

6 メンテナンスサイクルの効率化・信頼性向上に関する研究

研究期間：平成 28 年度～令和 3 年度

プログラムリーダー：橋梁構造研究グループ長 金澤 文彦

研究担当グループ：CAESAR（橋梁構造研究グループ）、iMaRRC（材料資源研究グループ）、地質・地盤研究グループ（特命上席）、技術推進本部（先端技術チーム）、道路技術研究グループ（舗装チーム、トンネルチーム）、寒地保全技術研究グループ（寒地道路保全チーム）、技術開発調整監（寒地機械技術チーム）

1. 研究の必要性

現在、社会資本の高齢化が急速に進展している。笹子トンネルの事故など、一部では劣化等に伴う重大な損傷が発生し、大きな社会問題となっている。こうした社会資本ストックの老朽化に対応するため、国土交通省では第 4 次社会資本整備重点計画（H27～R3）において「社会資本の戦略的な維持管理・更新」を重点目標に掲げ、関連施策を重点的に推進している。

例えば道路構造物に関しては、法改正に基づく点検の義務化が定められ、H26 年度より全ての道路管理者が点検等の維持管理を実施しているところである。ただし、点検・調査の効率化や高度化、健全性の合理的な評価や優先順位の付け方、不具合実態や現場条件に適合した補修補強方法など、現状では維持管理の実施に際して様々な技術的課題を抱えている。また、社会資本の多くは市町村が管理しているが、求められるサービス水準に対応した維持管理手法が明らかとなっておらず、点検等の維持管理実施に際しての課題となっている。

2. 目標とする研究開発成果

本研究開発プログラムでは、メンテナンスサイクルの各フェイズ（点検・調査、診断、措置（補修補強））における主要な技術的課題を解決する。また、市町村管理物のサービス水準への配慮など多様な管理レベルに対応した維持管理技術を開発する。

以上により、メンテナンスサイクルの技術面でのスパイラルアップを実現し、社会資本の健全性確保に貢献するために、以下の達成目標を設定した。

- (1) 多様な管理レベル（国、市町村等）に対応した維持管理技術の開発
- (2) 機器活用による調査・監視の効率化・高度化技術の開発・評価
- (3) 措置が必要な部位・箇所のパRIORITY決定手法の開発
- (4) 既往事象・現場条件に対応した最適な維持修繕手法、構造・材料の開発・評価

3. 研究の成果・取組

「2. 目標とする研究開発成果」に示した達成目標に関して、平成 30 年度に実施した研究の成果・取組について要約すると以下のとおりである。

(1) 多様な管理レベル（国、市町村等）に対応した維持管理技術の開発

<管理用施設（接合部）関連>

道路トンネル内のジェットファン（以降、JF）は所定の本数の取付金具（吊金具等）で自重を支えるよう設計されているが、不静定構造のため、何らかの不均衡要因が働いた場合に取付金具の軸力分担率が大きく変動する可能性がある。また、万が一に備えてバックアップ金具を設置する事例が散見されるが、吊金具破断時に残存する吊金具の荷重分担割合や衝撃の影響等は明らかではない。本研究では、国道トンネルにおいて JF 取付金具の軸力を計測し、重量物運搬車通行、JF 起動・停止、および地震が取付金具に与える影響を検討した。また、JF 吊金具の破断を想定した模型実験を行い、残存する吊金具とバックアップ金具に作用する荷重について検討した。

<舗装関連>

平成30年度においては、軽交通舗装区間の路面性状を把握する低廉な手法として、車両に搭載した加速度計によって国際ラフネス指数 IRI を算定する手法を用い、自治体管理の幹線及び生活道路の IRI 計測を行い、面的把握の有効性の確認、舗装の損傷と IRI の関係を把握した。

(2) 機器活用による調査・監視の効率化・高度化技術の開発・評価

<橋梁関連>

高度経済成長期に集中的に整備された橋梁が一斉に高齢化を迎える中、さまざまな劣化要因による損傷事例が報告されている。これらの損傷を出来るだけ早期に検知するための技術や、損傷に対して行われた補修・補強の効果を確認するための技術が求められている。今回、外ケーブル補強後21年が経過した既設PC桁を対象に、載荷試験が実施された。その載荷実験において、損傷状況・補強状況に応じた振動特性の変化を把握するため、加速度センサを用いて振動計測を行った。また、鋼橋において塗膜を剥がさずに塗膜上から目視点検が困難な疲労亀裂の有無を調査する技術を対象とした性能評価法の適用性について基礎的検討を行った。

<舗装関連>

移動式たわみ測定装置の実用化に向け、実道での検証を実施した結果、FWD たわみ量と概ね一致していることを確認した。また、解析プログラムを作成し、高度な専門知識がなくても短時間でたわみ量を算出することを可能にした。また、多チャンネル高速牽引型地中レーダ探査システムによる舗装構造調査技術開発を進め、舗装内部の電磁波の伝播速度を安定して解析する手法を開発し、広域の伝播速度分布を利用可能とした。これを応用し、水分率分布図として活用可能であることを示した。

(3) 措置が必要な部位・箇所の優先度決定手法の開発

<橋梁関連>

高度経済成長期に建設された膨大な道路橋ストックの高齢化が進む中で、近年、国内では鋼トラス橋斜材が腐食欠損により破断する重大な損傷が発生している。トラス橋およびアーチ橋における主構部材の腐食損傷については、橋全体系の安全性に影響を及ぼす可能性があり、構造物の状態を適切に調査・診断する技術が求められている。本研究では、腹材より圧縮力を受ける鋼トラス橋格点部におけるガセットの耐荷力評価の一検討として、弦材とボルトの離れに着目した鋼トラス格点部の耐荷力試験を実施し、弦材とボルトの離れが鋼トラス格点部の耐荷性能に及ぼす影響について調べた。

<舗装関連>

平成30年度は舗装の損傷が路盤に至っている場合を想定し、詳細調査のうち開削調査をどのように実施すべきか検討した。実大走行実験の結果によると、路面にわだち掘れが進行しておりかつひび割れの進行が小さい場合は、路盤の圧縮に起因することがわかった。また、舗装路盤のS波速度分布の探査による劣化箇所の評価手法の開発に関しては、実用化のために非接触型システムの開発を進めた。実用性向上のために多数の受振点で漏洩表面波を取得可能な装置に改良した。また、表層に高速度の舗装が存在する場合でも安定して解析可能なように表面波伝播モードの分析を進めた。

<管理用施設（機械設備）関連>

土木施設に導入されている各種の土木機械設備は、非常に重要な役割を果たしているが、施設数の増大、老朽化の進行、限られた維持管理予算の相反する条件下で、より適切なライフサイクルマネジメントの導入が進められている。本研究では、機能回復時間等を考慮した信頼性評価による機器・部品の重要度判断や、保全方法の最適化を検討し、それらの総合的なマネジメント手法を確立することを目的としている。今年度は、機械設備の故障時からの機能回復能力の定量化方法の向上を主体に検討を実施した。

(4) 既往事象・現場条件に対応した最適な維持修繕手法、構造・材料の開発・評価

<橋梁関連>

1) 高度経済成長期に集中的に整備された橋梁が一斉に高齢化を迎える中、さまざまな劣化要因による損傷事例が

報告されており、損傷した既設 PC 橋の性能評価法および補修補強技術の確立が求められている。今回、外ケーブル補強後 21 年が経過した既設 PC 桁を対象に、その補強効果を確認することを目的に載荷試験を実施した。

2) 本研究では、既設コンクリート橋の長寿命化に向けて表面保護工法による補修設計方法を高度化し、効果や信頼性を向上させることを目的としている。塗布材料や部位の違いによりコンクリート内部の含水状態が変化し、鉄筋腐食環境に影響を及ぼすことから、補修においては水分等のコンクリート内部の環境状態を制御することが重要になる。平成 30 年度は、塗布部位に関する腐食抑制効果の長期耐久性評価として、暴露 5 年後までの鋼材腐食状況を調査し、塗布部位の影響や含浸材の効果を調べた。また、実大断面を有する桁供試体を用いて内部の水分分布とその年間変動を観測した。

<舗装関連>

つくば市内の舗装の現道採取材の試験から、表面近傍 1cm 程度のアスファルト劣化が顕著であることがわかっており、軽交通道路では、遮水性確保による路盤保護とともに特に表面劣化やひび割れの処置が延命化に直結する。平成 30 年度は、予防保全が可能となる表面処理工法についてその適用の目安を示すため、トップダウンおよびトムアップひび割れが生じている箇所を交通量ごとに選定し、試験舗装による検証を開始した。ひび割れ状態の変化などから適用条件の初期データを得た。

<管理用施設（機械設備）関連>

土木施設に導入されている各種の土木機械設備は、非常に重要な役割を果たしているが、施設数の増大、老朽化の進行、限られた維持管理予算の相反する条件下で、より適切なライフサイクルマネジメントの導入が進められている。本研究では、機能回復時間等を考慮した信頼性評価による機器・部品の重要度判断や、保全方法の最適化を検討し、それらの総合的なマネジメント手法を確立することを目的としている。今年度は、点検診断が容易な機械設備構造の検討として、設備構造及び点検技術の実態調査と、設備診断に有効と考えられる点検診断手法が現在の設備構造で適用可能か等の実証試験を実施し課題を抽出した。

<管理用施設（接合部）関連>

本研究では、道路トンネルのジェットファンの取付け等に使用される金属系あと施工アンカーを主な対象として、設計、施工、維持管理の合理的な方法を確立することを目的としている。平成 28 年度より、金属系あと施工アンカーの引張耐力の評価方法について、試験時の支点間隔や母材コンクリートのひび割れが耐荷性能に与える影響の把握、近接した複数のもと施工アンカー（群配置）を一体とした場合の耐荷性能の検討、固着方法の異なるあと施工アンカーの選定方法や耐荷性能の特徴ならびに母材コンクリートのひび割れが与える影響の把握などを行った。

コンクリート内部におけるあと施工アンカーの長期的な挙動については、十分に解明されておらず、信頼性の高い耐久性評価手法などの知見が得られていないのが現状である。そこで本研究では、道路トンネル内の附属物の設置等に用いられるあと施工アンカーを主な対象として、各種の環境条件があと施工アンカーの耐力や破壊モードに与える影響を解明し、その評価手法を構築することを目的として検討している。コンクリートのアルカリ成分によるアンカー接着剤への影響を把握するため、水酸化カリウム水溶液への浸せきによるアンカー接着剤の経時変化を評価した。また、湿潤なコンクリート内部でアンカーに持続荷重が作用する場合の挙動について検討した。

STUDY ON EFFICIENCY AND IMPROVEMENT OF RELIABILITY OF THE MAINTENANCE CYCLE

Research Period : FY2016-2021

Program Leader : Director of Bridge and Structural Engineering Group
KANAZAWA Fumihiko

Research Group : Centar for Advanced Engineering Structural Assessment and Research
(Bridge and Structural Engineering Group)
Innovative Materials and Resource Research Center
(Materials and Resources Engineering Group)
Geological and feature ground Engineering Group
(Chief Researcher for Road Slope Management)
Construction Technology Research Department
(Advanced Technology Research Team)
Road Technology Research Group (Tunnel Team, Pavement Research Team)
Cold Region Maintenance Technology Research Group
(Rord Maintenance Research Team)
Technology Development Coordination (Machinery Technology Research Team)

Abstract : In this R & D program, major technical problems in each phase of the maintenance cycle (inspection, survey, diagnosis, measures (repair reinforcement)) have been solving. We will also develop maintenance management technologies that respond to diverse management levels, such as consideration of service levels of municipal managed items.

In conclusion, in order to achieve spiral up in the technical aspect of the maintenance cycle and to contribute to securing the soundness of infrastructure, the following objectives were set.

- (1) Development of the maintenance technology corresponding to a variety of management levels (country, cities, towns and villages)
- (2) Development of the efficiency, advancement technology of an investigation, the monitoring by the apparatus utilization
- (3) Development of the priority decision technique of a part, a point needing measures
- (4) The most suitable maintenance repair technique corresponding to past phenomenon, the spot condition, development of structure, materials

Key words : maintenance, structures, materials, tunnel, pavement, machinery

6.1 多様な管理レベル（国、市町村等）に対応した維持管理技術の開発

6.1.1 先端的維持管理技術による管理用施設（接合部）マネジメントに関する研究

担当チーム：道路技術研究グループ（トンネル）

研究担当者：日下敦、小出孝明、巽義知、原翔平

【要旨】

道路トンネル内のジェットファン（以降、JF）は所定の本数の取付金具（吊金具等）で自重を支えるよう設計されているが、不静定構造のため、何らかの不均衡要因が働いた場合に取付金具の軸力分担率が大きく変動する可能性がある。また、万が一に備えてバックアップ金具を設置する事例が散見されるが、吊金具破断時に残存する吊金具の荷重分担割合や衝撃の影響等は明らかではない。本研究では、国道トンネルにおいてJF取付金具の軸力を計測し、重量物運搬車通行、JF起動・停止、および地震が取付金具に与える影響を検討した。また、JF吊金具の破断を想定した模型実験を行い、残存する吊金具とバックアップ金具に作用する荷重について検討した。

キーワード：山岳トンネル、ジェットファン、現地計測、地震、模型実験

1. はじめに

道路トンネル内ではジェットファン（以降、JF）等の附属物が設置されている。それらの多くは、写真-1に示すように、あと施工アンカー（以降、アンカー）により、取付金具（吊金具、方向安定金具、ターンバックルなどの総称）を介して覆工に固定されている。トンネルの維持管理においては、覆工のみならず、このような取付金具類の点検を行うこととされている¹⁾。しかし、詳細な点検手法は限られており、目視や触診等により経験的に判断しているのが現状である。

JFの取付金具類の設計においては、所定の本数の吊金具でJF本体の自重を支えるよう所定の安全率を確保する場合が多い²⁾。しかし、不静定構造であるため、何らかの不均衡要因が働いた場合には設置に使用しているアンカーの軸力分担率が大きく変動する可能性がある。

また、JFには万が一に備えて落下防止装置（バックアップ金具）を設置する事例が見られる。しかし、吊金具が破断した時に残存する吊金具の荷重分担の割合や衝撃の影響等は明らかになっておらず、したがってJF落下に対するバックアップ金具の設計手法も十分に確立されているとは言いがたいのが現状である。

このような状況を踏まえ、本研究では過年度、国道のトンネルにおいてJF取付金具の軸力を計測し、供用中のJF起動時に作用する荷重の変動等の実態を確認している³⁾。

本年度は、継続計測中のJF取付金具の軸力測定結果より、重量物運搬車通行、運転起動・停止時、および平成30年9

月に北海道内で発生した地震の影響を確認した。また、バックアップ金具の角度と取付け時のたるみの有無に着目し、JFの吊金具が破断したことを想定した模型実験を行い、残存する吊金具とバックアップ金具に作用する荷重について検討を行った。



写真-1 JFの設置状況の例

2. 国道トンネルのJF取付金具に作用する荷重計測

2.1 計測の概要

計測対象としたJFは、山岳工法により建設された国土交通省北海道開発局小樽開発建設部が管理する延長1,742mの2車線の国道トンネルのものである。図-1にトンネル位置図を、表-1にトンネル諸元を示す。JFは図-2に示す位置に1台(1250型)ずつ設置されており、本計測ではそのうちの起点坑口側の1台に対し、平成30年2月より計測を実施している。

JF の設置方法として、吊下げ式と固定式の二つの方法がある。一般的には吊下げ式が採用されており、本計測の対象も吊下げ式である。対象の JF の設置状況および計測器の取付概要を図-3 に示す。対象の JF は本体前後の2つの方向安定金具と中心部の4つの吊金具にターンバックルで接続することにより覆工に固定されている。各ターンバックルの役割として、方向安定金具に接続する2本(TB1、TB4)は JF 本体の向き調整が主目的であり、吊金具に接続する4本(TB2、TB3、TB5、TB6)は JF の重量(約2000kg)を支持するように設計されている。本研究では各金具に接続するこれら6本のターンバックルの軸力を計測することで吊金具に作用する荷重を計測している。



図-1 トンネル位置図

表-1 トンネル諸元

道路種別・等級	車線数	交通方向	設計速度	トンネル延長
第3種2級	2車線	対面交通	60km/h	1,742m



図-2 JF 位置図

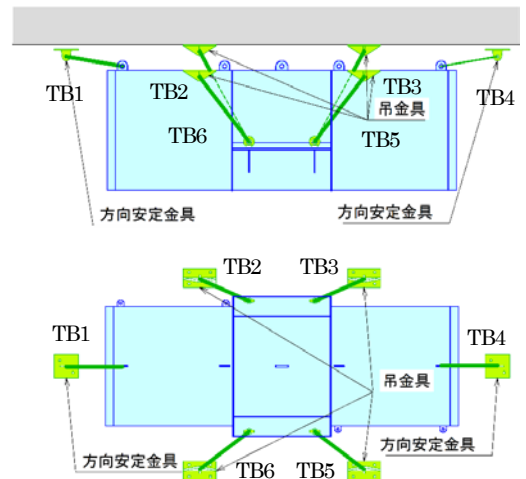
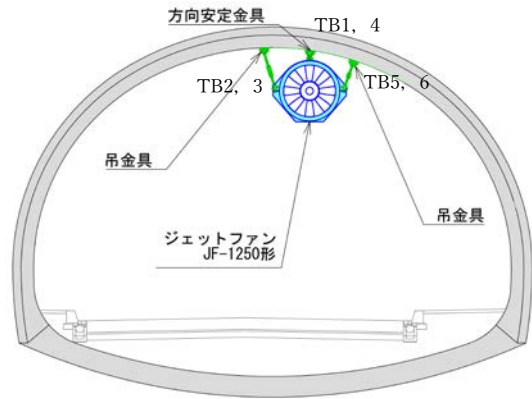


図-3 計測機器取付概要

2.2 計測の結果

2.2.1 重量物運搬車通行時の計測結果

トンネル供用前に重量物運搬車(除雪車)を通行させ、車両通行のみによる軸力変動を分析した。車両重量は約20t、通行速度は30~40km/h程度で、上り線(JF設置側)と下り線を一度ずつ走行した。車両の通行状況を写真-2に、軸力変動が顕著に認められたTB1およびTB4の計測結果を図-4に示す。



写真-2 車両の通行状況

図-4 内の破線は、車両の JF 近傍通過時のおおよその時刻である。図-4 より、車両通行時には両金具において

圧縮方向に 0.1kN 程度の荷重が作用していることが分かった。変動量は JF 推力による影響と比較してもさらに小さいため、構造上の問題はないと考えられる。また、車両通行時に変動した軸力は車両通行後に時間が経過しても同様の軸力を維持していることを確認した。本計測では方向安定金具 (TB1、4) に軸力変動は認められたが、4 つの吊金具 (TB2、3、5、6) では軸力変動はほとんど確認できなかった。車両通行による縦流の風力や自然風による影響を受けた可能性も考えられるが詳細は不

明であり、その他のデータを確認し要因を精査している。

2.2.2 JF 起動・停止時の計測結果

トンネル供用後に JF 稼働状況を確認し、一定の期間内での繰返しの JF 運転起動・停止による軸力変化を分析した。本節では計測期間内で 1 日当たりの運転回数が最も多い日を対象としており、運転回数は 6 回で運転時間は累計で 2 時間程度であった。1 回目運転時と 6 回目運転時の軸力計測結果の内、変動が顕著に認められた TB1 の計測結果をそれぞれ図-5、図-6 に示す。

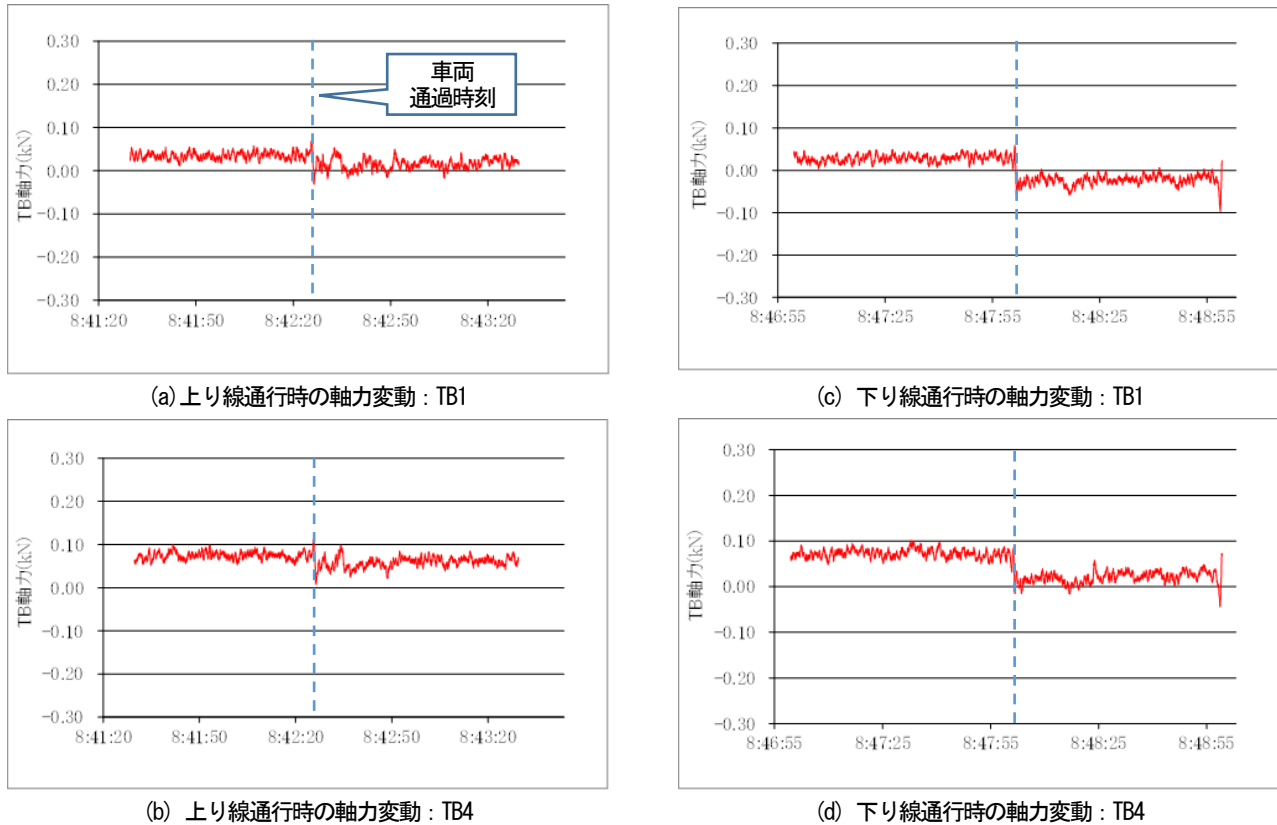
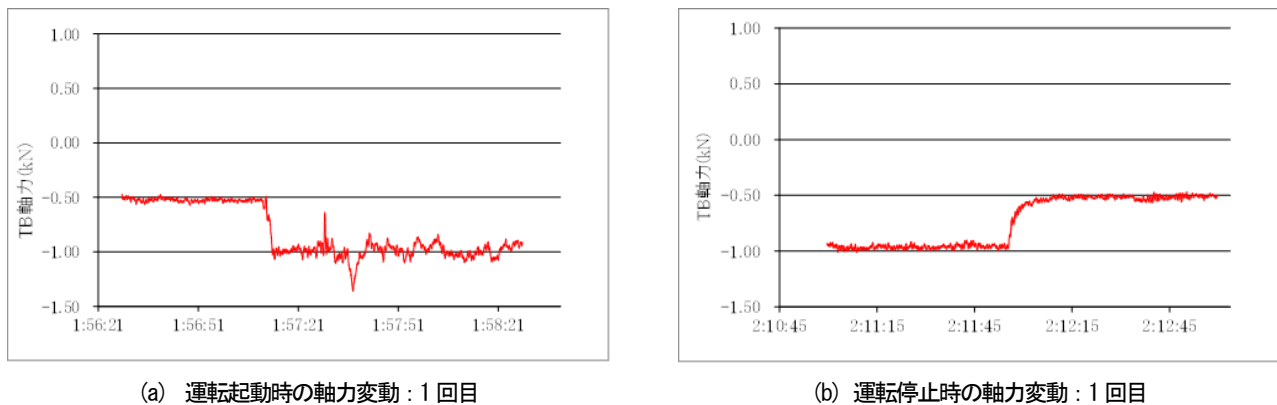


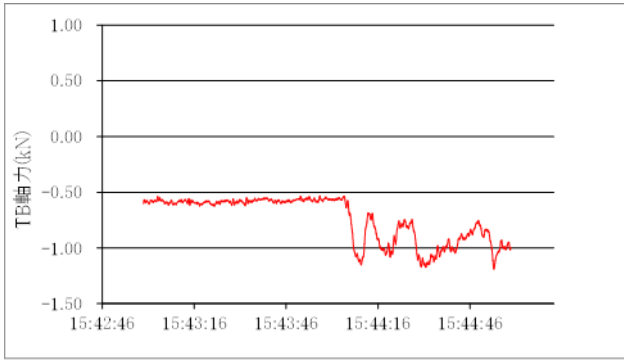
図-4 重量運搬車通行時の軸力変動



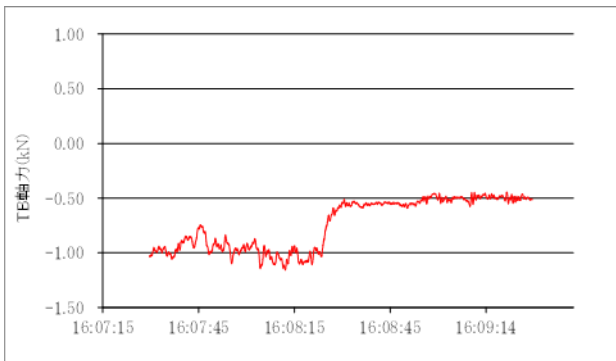
(a) 運転起動時の軸力変動 : 1 回目

(b) 運転停止時の軸力変動 : 1 回目

図-5 JF 運転起動・停止による軸力変動 (TB1) 1 回目



(a) 運転起動時の軸力変動：6回目



(b) 運転停止時の軸力変動：6回目

図-6 JF 運転起動・停止による軸力変動(TB1)6回目

図-5より、1回目運転起動時には0.5kN程度の圧縮方向の軸力が働き、運転停止時には当初の荷重状態に戻っている。その後繰り返し運転し、図-6に示す6回目運転時の軸力も1回目と同様に0.5kN程度の圧縮方向の軸力が働き、運転停止時にも同様に稼働前に近い軸力に戻っている。この結果より繰り返しのJF運転自体による軸力変動は発生するが、運転が停止すれば荷重状態は運転前と同等程度に戻ることを確認した。

2.2.3 地震時の計測結果

平成30年9月6日、北海道内では最大震度7の地震が発生し、その後も震度3以上の地震が頻発した。表-2に地震の最大震度と計測対象トンネルがある小樽市で観測された震度および加速度を示す。震度は気象庁のデータを、加速度は防災科学技術研究所の強度観測網のデータを参照している。トンネル付近では最大で震度4が観測され、それ以降も震度3以下の地震が複数回発生している。本研究では、これらの地震の中で震度が最も大きいNo.1の地震と2番目に大きいNo.7の地震発生時の軸力変動について検証した。地震発生時の軸力計測結果を、No.1は図-7、図-8に、No.7は図-9に示す。なお、図中の発生時刻は、震源地から計測機器までと観測所までの経路の違いによる差があるため推定値である。

図-7はNo.1で計測した中で最も顕著に変動が現れた、方向安定金具のTB1の計測結果であり、軸力変動は0.1kN程度であった。対面のTB4も同程度の変動が確認された。

図-8はNo.1の内、吊金具の一つであるTB5の計測結果である。地震発生時に軸力変動はほぼなく、計測中に発生しているノイズと判別できない程度であった。他の3本の吊金具でも同様の計測結果であった。

No.1の軸力計測結果より、TB1、TB4の方向安定金具は吊金具と比較してJF本体から作用する荷重が大きく、地震動の影響を受けやすい可能性が考えられる。

表-2 地震の最大震度、加速度 (H30.9.6北海道)

No.	発生時間	M	最大震度		最大加速度(gal)			
			全体	小樽	N-S	E-W	U-D	合成
1	3:07:59	M6.7	7	4	61	56	29	64
2	3:17:09	M4.7	4	2	2	4	1	5
3	3:20:10	M5.5	4	2	6	7	3	8
4	3:23:49	M4.8	4	2	3	2	1	3
5	3:32:52	M4.6	4	1	2	2	1	3
6	4:10:48	M4.7	4	1	2	2	1	3
7	6:11:30	M5.4	5弱	3	14	12	5	16
8	6:32:33	M3.9	3	1	1	2	1	2

震度：気象庁の各種・資料・データを参照
 加速度：防災科学研究所の強度観測網を参照

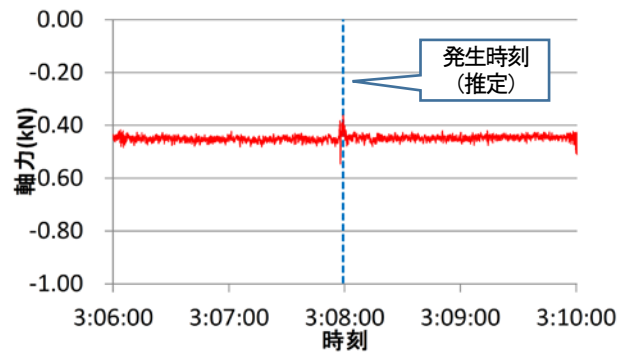


図-7 No.1地震発生時の軸力変動 (TB1)

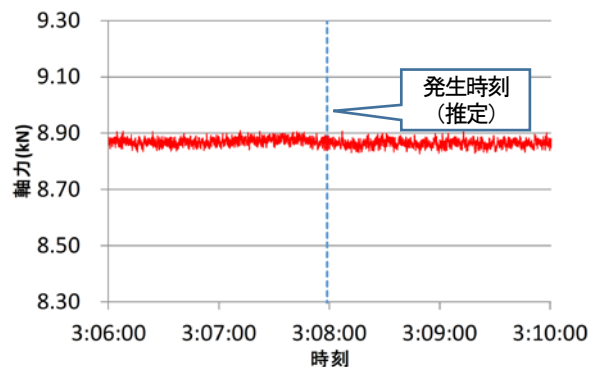


図-8 No.1地震発生時の軸力変動 (TB5)

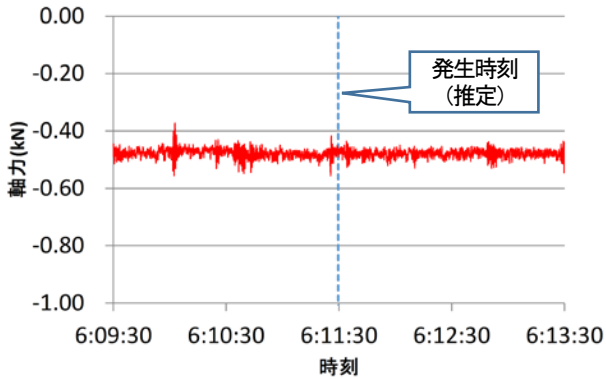


図-9 No. 7 地震発生時の軸力変動 (TB1)

図-9 は No. 7 の地震発生時(最大震度 3)における TB1 の計測結果である。図-9 より、No. 7 の地震発生時には軸力変動がほぼなく、TB2~TB6 の計測結果も同様であった。本地震の影響はほぼないと考えられる。ここで、表-2 より、No. 1 の地震の最大加速度は No. 7 の 4 倍であり、この差が変動に影響したと考えられる。

過去の計測において、JF 据付時には 1 本あたり最大で 10kN 程度の荷重がターンバックルに作用し³⁾、2.2.2 に示した通り、JF 稼動時の変動は 0.5kN 程度であることを確認している。これらの計測結果と比較して、今回発生した震度 4 の地震による変動は 0.1kN 程度と非常に小さいことが分かった。

2.3 計測結果まとめ

本計測では、道路トンネルに設置した JF の取付金具に作用する軸力計測を実施し、重量物運搬車通行時には 0.1kN 程度の変動を、JF 起動時には 0.5kN 程度の変動があり、停止時に元の荷重状態に戻ることを確認した。平成 30 年 9 月 6 日に発生した地震(小樽で最大震度 4 を観測)時においては、最大で 0.1kN 程度の軸力変動を確認した。これらは JF の自重による軸力と比較して小さく、影響は小さいと考えられる。

3. JF 吊金具破断の模型実験

3.1 実験の概要

図-10 に模型の概要を示す。JF 模型は外径 216.3 mm、長さ 600 mm、厚さ 4.5 mm の鋼管で、実際の JF の重量バランスを考慮して中心部約 200 mm 区間はモルタルを中詰めしている。総重量は 28.3 kgf である。この模型の 4 箇所吊金具(ターンバックル等で構成)を取付けるための金具を溶接し、4 本の吊金具を取付けて吊下げた。吊下げた状態の様子を図-11 に示す。

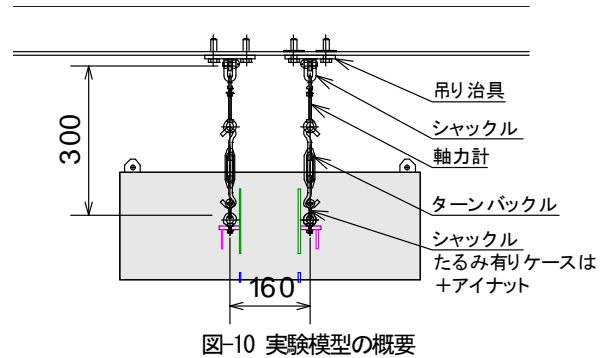


図-10 実験模型の概要

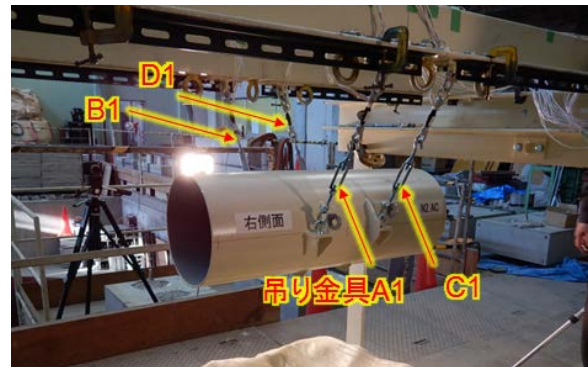


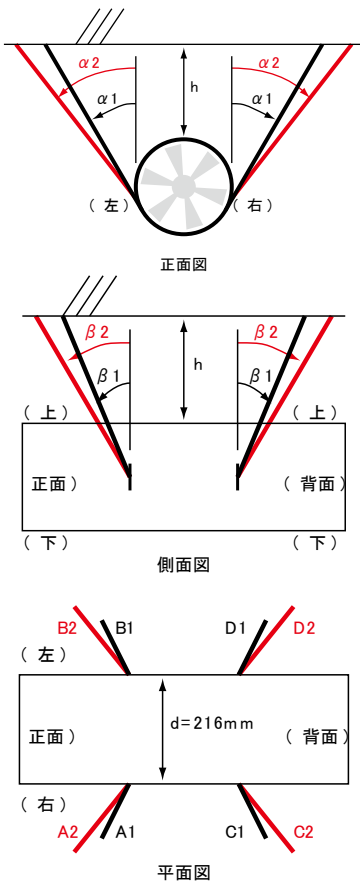
図-11 吊下げ状態の様子

実験では、4 本の吊金具の軸力調整を行って極力均等な軸力が発生している状態にした後、1 本目 (A1) および 2 本目 (B1、C1、D1 のいずれか) の吊金具を順次切断し、残存する吊り金具に発生する軸力を計測した。なお、吊金具にはシャックルピンが設置されており、ピンを引き抜くことで吊り金具の切断を模擬した。

実験ケースは、バックアップ金具の角度と取付け時のたるみの有無に着目して設定した。実験ケースを表-3 に、吊金具の名称を図-12 に示す。シリーズ N1 においては、4 本の吊金具を垂直に取付けた。N2、N3、N4 においては、4 本の吊金具を表-3、図-12 に示す角度で取付けた。シリーズ T1、T2 においては、4 本の垂直に取付けた吊金具に加え、バックアップ金具 4 本を T1 は吊金具の外側 13.5°、T2 は吊金具の内側 13.5° に取付け、吊り金具の概ね 10%程度の軸力がバックアップ金具に発生している状態に調整した。シリーズ W1、W2 においては、4 本の垂直に取付けた吊金具に加え、バックアップ金具 4 本を W1 は吊金具の外側 13.5°、W2 は吊金具の内側 13.5° に取付けるが、バックアップ金具はたるませた状態とした。

表-3 実験ケース

シリーズ	シリーズ概要	ケース名	JF吊金具		バックアップ金具		切断する金具	
			$\alpha 1$ (deg)	$\beta 1$ (deg)	$\alpha 2$ (deg)	$\beta 2$ (deg)	1本目	2本目
N1	4本の鉛直方向の吊り金具によりJFを支持	N1-AB	0	0	-	-	A1	B1
		N1-AC						C1
		N1-AD						D1
N2	正面から見て横方向に開いた4本の吊り金具によりJFを支持	N2-AB	30	0	-	-	A1	B1
		N2-AC						C1
		N2-AD						D1
N3	正面から見て前後方向に開いた4本の吊り金具によりJFを支持	N3-AB	0	30	-	-	A1	B1
		N3-AC						C1
		N3-AD						D1
N4	正面から見て横・前後方向に開いた4本の吊り金具によりJFを支持	N4-AB	30	30	-	-	A1	B1
		N4-AC						C1
		N4-AD						D1
T1	4本の鉛直方向の吊り金具に加え、外側に向けたバックアップ金具4本によりJFを支持	T1-AB	0	0	0	13.5	A1	B1
		T1-AC						C1
		T1-AD						D1
T2	4本の鉛直方向の吊り金具に加え、内側に向けたバックアップ金具4本によりJFを支持	T2-AB	0	0	0	-13.5	A1	B1
		T2-AC						C1
		T2-AD						D1
W1	4本の鉛直方向の吊り金具に加え、外側に向けた、たるみを有するバックアップ金具4本	W1-AB	0	0	0	13.5	A1	B1
		W1-AC						C1
		W1-AD						D1
W2	4本の鉛直方向の吊り金具に加え、内側に向けたバックアップ金具4本によりJFを支持	W2-AB	0	0	0	-13.5	A1	B1
		W2-AC						C1
		W2-AD						D1



— $\alpha 1, \beta 1, A1 \sim D1$: 吊り金具
 — $\alpha 2, \beta 2, A2 \sim D2$: バックアップ金具
 図-12 吊り金具の名称、角度

3. 2 実験結果

3.2.1 初期状態

図-13に、シリーズN1、W1の初期状態の軸力計測結果を示す。図-13より、初期状態においては、吊金具のみのシリーズN1、N2、N3、N4とたるみを有するバックアップ金具を加えたシリーズW1、W2では、ややバラツキはあるが、4本の吊金具に概ね均等に軸力が生じている。バックアップ金具をたるみ無く加えたシリーズT1、T2では、ややバラツキはあるが、4本の吊り金具に概ね均等に軸力が生じるとともに、バックアップ金具に若干の軸力が生じている。

3.2.2 1本目切断後

図-14に1本目切断後の軸力計測結果を示す。なお、同図中の×は、切断時に引っかかりがあった結果であり、再計測した結果を併記している。図-14より、1本目の吊金具の切断後においては、全ケース残存する3本の吊金具のうち、主に対角線上に残されたB1とC1で軸力を分担している。バックアップ金具を加えたT1、T2、W1、W2では、バックアップ金具に軸力はほぼ生じていない。

3.2.3 2本目切断後

図-15に2本目切断後の軸力計測結果の最大値を示す。図-15より、吊金具の角度に違いがあるシリーズN1、N2、N3、N4では、残存する2本の吊金具で軸力を分担しており、その大きさは角度により異なる。なお、2本目にB、Cを切断した場合においては、2本目を切断した時点で大きくJF模型が傾く結果となった。

2本目にB1を切断したケースにおいて、バックアップ金具をたるみ無く加えたT1-AB、T2-ABでは切断した側のバックアップA1、B1に軸力が生じ、残存する2本の吊金具C1、D1とそちら側のバックアップ金具C2、D2にも軸力が生じている。一方、たるみを有するバックアップ金具を加えたW1-AB、W2-ABでは、同様に切断した側のバックアップA1、B1、残存する2本の吊金具C1、D1に軸力が生じているが、残存する側のバックアップ金具C2、D2には軸力が生じていない。

2本目にD1を切断したケースN1-AD、T1-AD、T2-AD、W1-AD、W2-ADでは、吊金具に発生する軸力は1本目切断後の収束値からほぼ変化はなく、対角線上に残されたB1とC1のみで軸力を分担している。JF模型にも大きな動きはなかった。

バックアップ金具の角度の違いシリーズT1とT2間、シリーズW1とW2間では特に傾向は認められなかった。

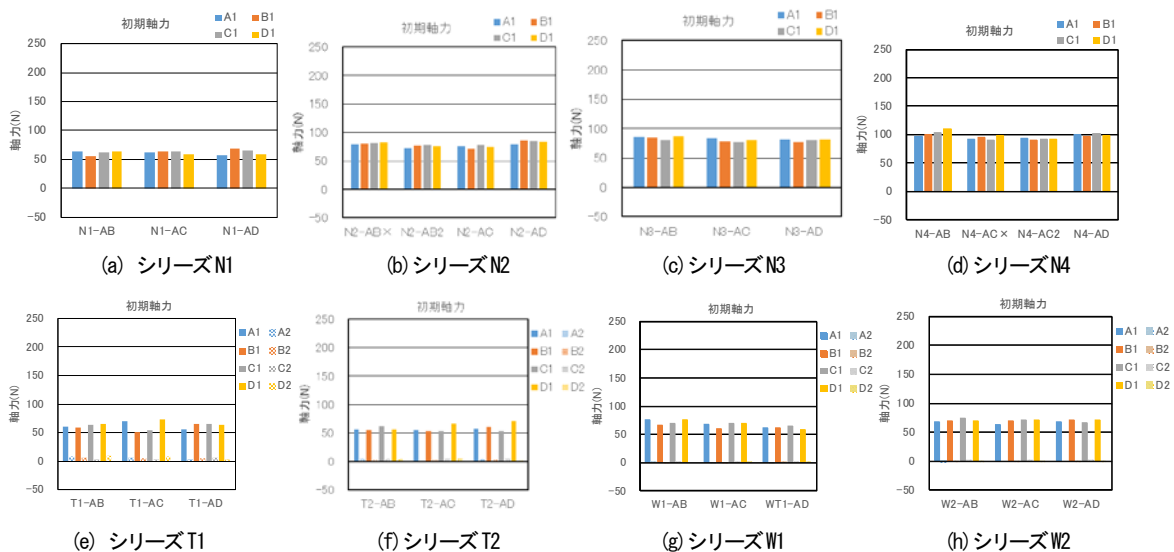


図-13 初期軸力

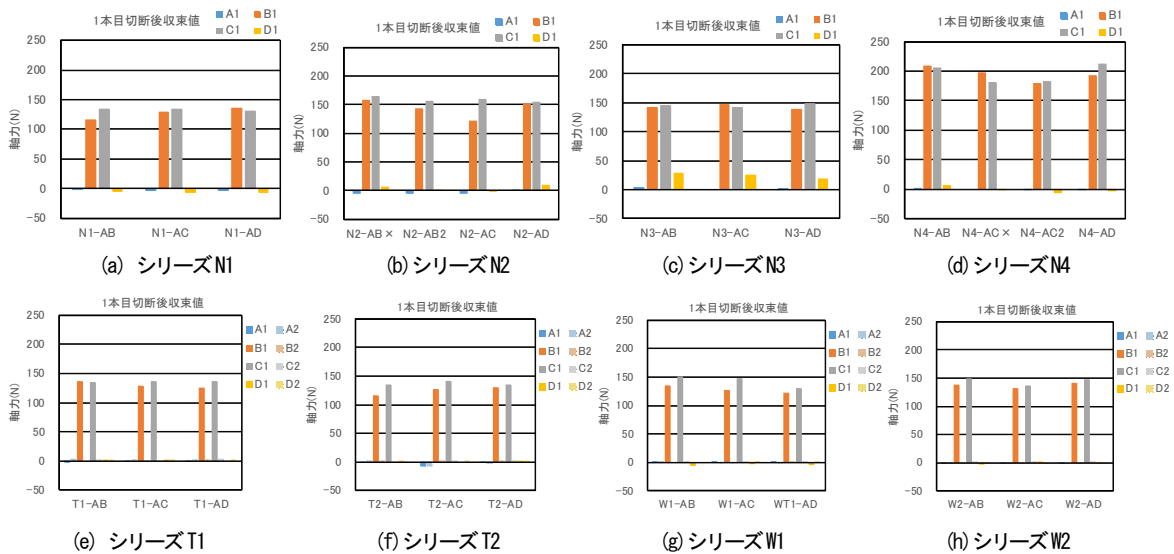


図-14 1本目切断後における軸力収束値

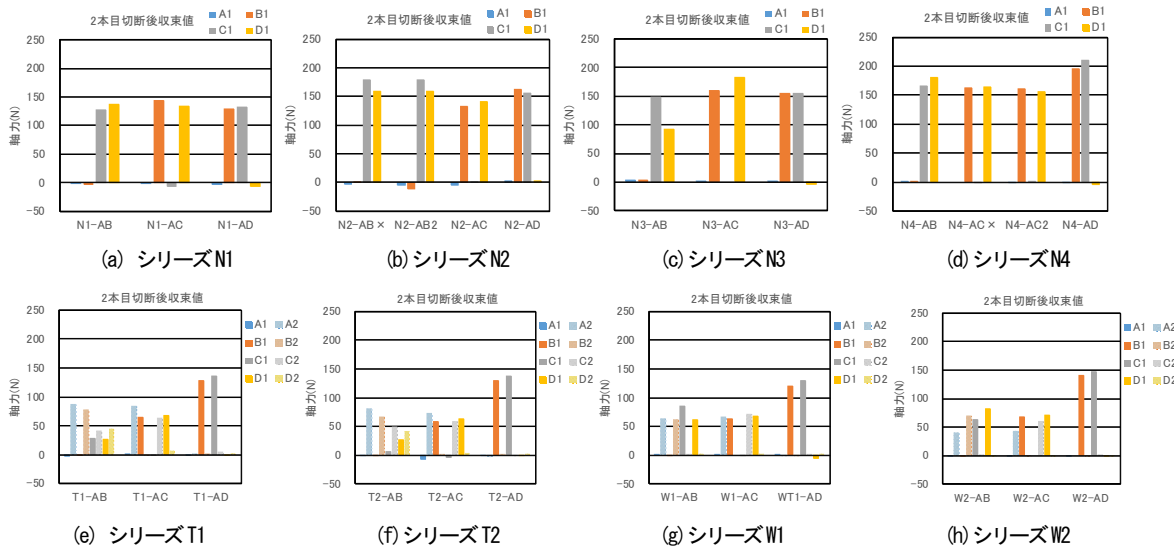


図-15 2本目切断後における軸力収束値

3. 3 実験結果考察

限定的なケースでの模型実験であるが、得られた結果から、本研究における実験条件においては、以下の事が考察される。

- ・JF を保持している4本の吊金具のうち1本が切断された場合、吊金具の角度やバックアップ金具の有無に関わらず、残存する3本の吊金具のうち、主に対角線上に残った2本の吊金具でJFを支持する傾向がある。
- ・対角線上の2本の吊金具でJFを支持できている場合は、バックアップ金具には軸力が生じない傾向がある。
- ・バックアップ金具の取付け時のたるみの有無によっては、バックアップ金具が負担する軸力の割合が変化する可能性がある。

4. まとめ

以上述べてきたように、JF 取付金具の軸力計測結果から、重量物運搬車通行時に0.1kN程度、JF 繰返し運転時に0.5kN程度、震度4地震時に0.1kN程度の軸力変動を確認した。これらの結果は、安全率15が確保されるアンカーの耐荷力を考慮すると影響は小さく、JFの静的荷重に加えて起動・停止、地震、交通振動などによる荷重の変動を考慮した場合でも許容範囲内であると考えられる。また、JFの吊り金具が破断したことを想定した模型実験を行い、残存する吊り金具やバックアップ金具に作用する荷重の傾向について考察した。ただし、本実験、計測結果は限定的な条件における結果であり、今後も引き続き検討を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 国土交通省道路局：道路トンネル定期点検要領 平成31年2月、pp.14-18、2019
- 2) 日本道路協会：道路トンネル技術基準（換気編）・同解説、p.136、平成20年10月
- 3) 原翔平、砂金伸治、日下敦、小出孝明：山岳トンネルに設置したジェットファン取付金具に作用する荷重計測、土木学会年次学術講演会概要集、第73回、第3部門、pp.781-782、2018

6.1 多様な管理レベル（国、市町村等）に対応した維持管理技術の開発

6.1.2 舗装マネジメントの効率化に関する研究

担当チーム：道路技術研究グループ（舗装）、
寒地保全技術研究グループ（寒地道路保全）、
地質・地盤研究グループ（特命）、材料資源研
究グループ（先端材料・高度化）

研究担当者：藪雅行、木村孝司、齋藤清志、西
崎到、稲崎富士、寺田剛、丸山記美雄、渡邊一
弘、尾西恭亮、佐々木巖、星卓見、大浦正樹、
若林由弥

【要旨】

本研究は、多様な管理レベル下にある舗装を対象に、舗装マネジメントの事例分析や、舗装の構造破損及び路面破損の実態調査、既設舗装の路面性状把握技術の改善等を通じ、新たな路面評価手法を提案することを目的としている。平成 28 年度は、重交通道路については修繕工事前後の路面・構造調査を、軽交通道路においては路面性状データの分析を通じて路面破損の形態について分析を行った。その結果、重交通道路の修繕工法の選定にあたってはコア抜きより有益な情報が得られること、軽交通道路ではボトムアップ疲労ひび割れの発生比率が高いこと等を明らかにした。平成 29 年度は、重交通道路を想定し、アスコン層の内部損傷を模擬した供試体に対する赤外線調査手法を用いた内部損傷の評価手法の検討を実施し、アスファルト層の内部損傷が面的に広がっている箇所では、路面温度の日最高温度や日最高温度からの低下傾向が健全部と異なることを把握した。軽交通舗装区間の路面性状を把握する低廉な手法として、車両に搭載した加速度計によって算定した国際ラフネス指数 IRI を活用する手法を検討した結果、計測やデータの表示が比較的容易であり、IRI 値と修繕要否判断との間に関連があることを確認した。平成 30 年度は、軽交通舗装区間の路面性状を把握する手法として自治体管理の幹線及び生活道路の IRI を計測した結果、面的把握に有効な手段であることと、舗装の損傷と IRI 値の間に関連があることを確認した。

キーワード：舗装、構造破損、路面破損、実態調査、コア抜き、疲労ひび割れ

1. はじめに

多様な管理レベル下にある舗装については、その管理レベルに対応した路面評価手法が求められる。そのためには、様々な性格を有する道路の舗装を対象に、損傷の実態を把握することが必要である。

平成 28 年度は、重交通道路については修繕工事前後の路面・構造調査を、軽交通道路においては路面性状データの分析を通じて路面破損の形態について分析を行った。

平成 29 年度は、アスコン層の様々な内部損傷を模擬した供試体を作成し、それら供試体に対して赤外線調査手法を用いた内部損傷の評価手法の検討を行った。

2. 重交通道路における舗装の損傷実態調査

2.1 背景

平成 28 年 10 月に策定された「舗装点検要領」（以下、

「点検要領」という。）においては、損傷の進行が早い道路等に分類されたアスファルト舗装について、表層の供用年数に対する使用目標年数の設定を通じ、早期に劣化した区間に対しては詳細調査を実施した上で適切な措置を選定することが求められている¹⁾。点検要領に基づくメンテナンスサイクルを運用していく上で、今後はより一層詳細調査の重要性が増してくると考えられる。詳細調査の手法としては、FWD たわみ量調査、コア抜き調査及び開削調査が点検要領の付録に例示されているが、開削調査は交通規制面等での制約が大きく、現場実務においては FWD たわみ量調査やコア抜き調査が主体になるものと考えられる。しかしながら、それら詳細調査に基づく工法選定が、舗装の構造的健全度の回復度にどのような影響を与えるかはあまり明らかになっていない。

本研究では、コア抜き調査をもとに修繕工法を選定した

修繕工事現場にて、FWD たわみ量調査を修繕工事の前後で実施し、舗装の構造的健全度の回復状況に関して実態調査を行った。

2. 2 調査箇所

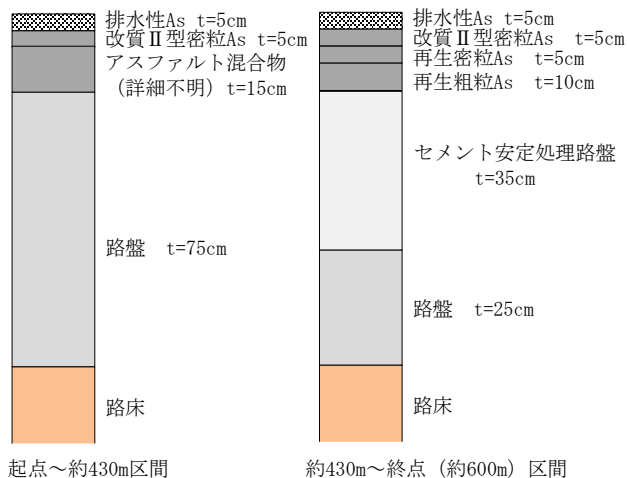


図 2-1 舗装構成

調査箇所は、コア抜き調査結果をもとに修繕工法を選定した修繕工事現場とした。場所は、関東地方整備局管内の直轄国道（往復 2 車線）であり、平成 22 年道路交通センサス²⁾では、大型車交通量は舗装計画交通量 N6 区分に該

当する道路である。線形はほぼ直線であり、工事延長はL=約 600m（上下線とも）である。

修繕工事前の舗装構成は、過去の修繕工事の設計図書の情報をもとにすると、起点側から約 430m を境に変化しているものとなっており、その舗装構成を図 2-1 に示す。いずれもアスファルト混合物層（以下、「アスコン層」という。）厚は 25cm であり、また図中の路盤は舗装構成より粒状路盤と考えられる。なお、前回修繕工事は今回修繕工事の 16 年前に実施しており、起点側から約 430m までは 2 層（t=10cm）の切削オーバーレイ、約 430m 以降は舗装打換え（図 2-1 中のセメント安定処理路盤層より上の施工）である。

2. 3 現場内のコア抜き本数

当該工事現場では、工事着手前に区間内のコア抜き調査が行われている。コア抜き調査は、道路管理者の指示の下、修繕工事受注業者が修繕前の路面の損傷状況を元に調査箇所を選定して実施し、その結果コア本数は下り車線が 11 本、上り車線が 13 本であった。

2. 4 コア抜き調査結果を踏まえた修繕工法の選定

前節に示したコア抜き調査により、アスコン層内の損傷は一様でないことが明らかとなった。具体的には、表層の



図 2-2 コア抜き調査結果

路面側を起点としたひび割れ（トップダウンひび割れ）が中間層までにとどまっているもの、ひび割れからの雨水の浸入に起因すると想定される層間剥離を引き起こしているもの、さらに進行して中間層、基層やアスファルト安定処理層部の混合物自体が剥離を引き起こしているもの、及びアスコン層（t=25cm）を貫通しているものと様々であった。当該修繕現場では、これらの状況を踏まえ、ひび割れ深さが15cm以上入っている区間をアスファルト混合物層の全層（t=25cm）打換え、それ以外の区間を2層（t=10cm）の切削オーバーレイと修繕工法が選定された。このように、同一現場内でもアスファルト混合物層内部の損傷は様々となりうることを認識しておく必要がある。当該現場のコアの状態を図2-2に示す。なお、図中のうち、「アスコン層内部の混合物自体の剥離が進行／ひび割れがアスコン層を貫通」の写真の一部は、コア側面のひび割れ部分のチョークによるトレースができていない。

2.5 修繕工事前の路面性状調査

当該修繕工事区間において、修繕前に路面性状調査を行った。その結果を表2-1に示す。これより、上下車線共に損傷は進行しており、また、どちらかと言えばひび割れによる損傷が卓越した区間であることが分かる。実際の現場では、ひび割れの他車輪通過部にわだち部オーバーレイ工（レーンパッチング）の実施箇所が点在しており、日常的な維持管理に苦慮していた様子が観察される路面状況であった。修繕前の路面の代表写真を写真2-1に示す。

2.6 修繕工事前後のFWD たわみ量調査

修繕工事前後において、OWP 上で起点から 20m 間隔で

表 2-1 修繕工事前の路面性状調査結果

路面性状		下り車線	上り車線
ひび割れ率 (%)	区間平均	24	31
	最大値 (10m 単位)	69	72
わだち掘れ量 (mm)	区間平均	17	17
	最大値 (10m 単位)	32	46
平たん性 (mm)	区間平均	2.8	3.1



写真 2-1 修繕工事現場の路面状況

FWD たわみ量調査を実施した。上下車線とも、路線の起点側を測点 No. 0 とし、順に 20m 間隔で測点を振り、終点側を測点 No. 30 とした。また、FWD たわみ量については、「舗装性能評価法—必須および主要な性能指標編—」³⁾に従い 20℃換算で補正している。

舗装の構造的健全度として、路床を含めた舗装全体の支

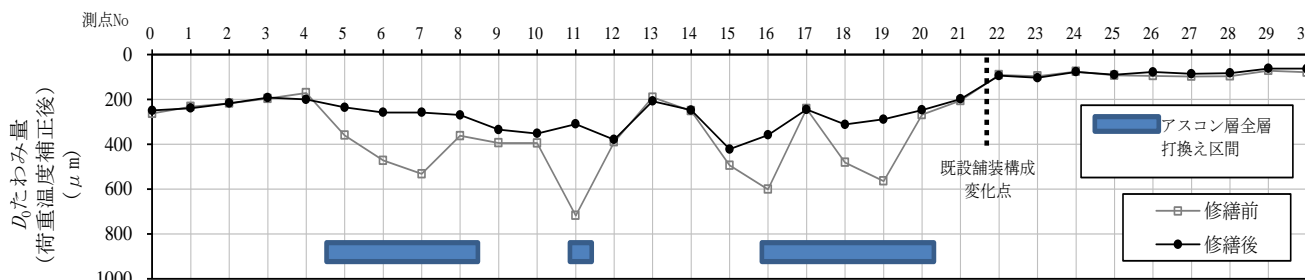


図 2-3 修繕工事施工前後の D0 たわみ量の比較（下り車線）

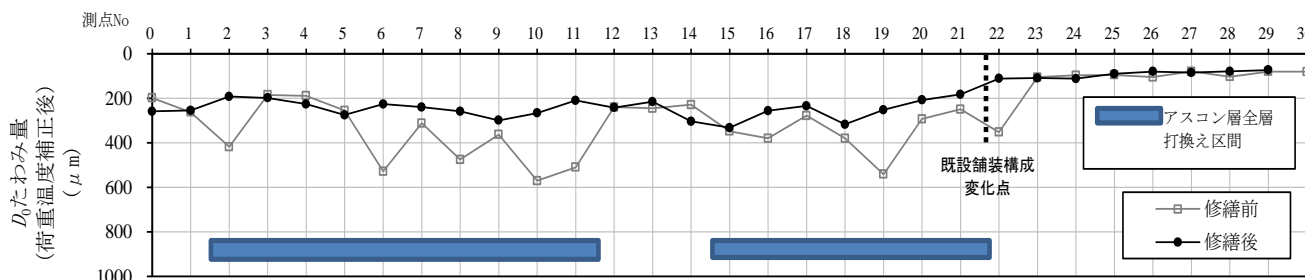


図 2-4 修繕工事施工前後の D0 たわみ量の比較（上り車線）

持力を示す載荷点直下の D0 たわみ量に着目し、それをグラフ化したものを図 2-3、2-4 に示す。また、同図中には、アスコン層全層 (t=25cm) 打換えの区間を表示している。この表示以外の区間は、t=10cm の切削オーバーレイの区間である。これより、当該現場では、2.4 に示したコア抜き調査によるひび割れ深さに着目した修繕工法の選定が、舗装の構造的健全度の概ね均一なレベルへの回復に大きく寄与したことが分かる。渡邊らは、別の現場にて一律の一層切削オーバーレイを実施した場合の修繕前後の構造評価を行った結果、当該区間内の構造的健全度のバラツキは概ねそのままであったことを報告している⁴⁾。この報告と照らし合わせると、構造的健全度の回復を目的とする場合は、詳細調査を通じた適切な修繕工法の選定が効果的であることが分かる。この結果については、平成 29 年度の日本道路会議等の場を通じて発表し、路盤の健全性の保護を通じた舗装の長寿命化という舗装点検要領の考え方の普及をはかった。なお、実際の修繕工事は、構造面のみならず路面機能面など様々な理由を勘案し道路管理者が総合的な判断のもとその区間・内容を決定するものであり、本報はその是非を議論するものではないことを申し添える。

当該現場では、多数のコア抜きによるアスコン層内部の損傷確認を実施したが、現場制約条件等から全ての現場で同様の取組を実施することは困難と考えられる。今後は、非破壊で面的にアスコン層内部の損傷状況を把握する手法の検討が必要と考えられる。

3. アスコン層内部損傷の評価手法の検討

3.1 背景

前章より、アスコン層内部の損傷状況を把握することが構造的健全度の一律なレベルへの回復の観点から重要であることが明らかになった。コア抜き調査は直接的にアスコン層内部の損傷状況を確認できるが、破壊調査であり、現場制約の条件等から、非破壊で把握する手法が望ましい。

アスコン層内部に損傷が存在すると、アスコン層内に不連続面が存在することとなる。このような不連続面の有無により、太陽の日射によるアスコン層内部への熱伝導の過程が変化し、舗装路面の表面温度に差異が生じることが考えられる⁵⁾。

早野ら⁶⁾は、舗装の内部損傷を擬似的に再現した供試体を室内に設置し、ライトにより日照を再現し、その表面温度についてサーモグラフィを用いて観測している。その結果、舗装の内部損傷の有無により、表面温度に差異が生じることを報告しているが、気温、日射量等の気象を再現し

た環境試験装置内での観測であり、また空港舗装を対象としているため、4時、15時及び22時を想定した時刻での供試体の表面温度を観測となっている。また、前川ら⁷⁾は、内部損傷を模擬した供試体を屋外に設置して表面温度を観測しているが、これも空港舗装を対象としているため、14時、19時、23時前後での3点の測定となっている。道路舗装は常時一般交通に供しており、時間を定めた定期的な表面温度の観測は通常困難であり、もっとも計測に適した時間帯の検討にあたっては、屋外で直接日射に暴露した状況下にて、よりきめ細かに表面温度を測定し、内部損傷を効果的に把握する時間帯等について検討を行うことが有効と考えられる。

そこで、本研究では、舗装の様々な内部損傷を模擬した供試体を屋外に設置し、サーモグラフィを用いて、その表面温度の経時変化をきめ細かく観測し、内部損傷の存在が表面温度にどのような差異を生じさせるか実験を行うこととした。

3.2 供試体の作成

供試体の作成にあたっては、トップダウンクラックが多いとされる重交通道路を想定し、雨水の浸透によるアスコン層の内部損傷を想定した。具体的には、5cmのアスコン層3層(表層・中間層・基層)からなる供試体とし、供試体・損傷の大きさは図 3-1、2 に示すとおりとし、図 3-3 に示す断面を有する8種類の供試体を作成した。供試体の設置場所は、土木研究所舗装走行実験場の構内であり、均一な日射が確保できるような場所を選定している。それぞれの供試体の離隔は50cmとした。

なお、施工基盤は供試体の下に厚さ10cmの粒状路盤を設け、表層用アスファルト混合物は最大粒径13mmの新規密粒度混合物、中間層・基層用のアスファルト混合物は最

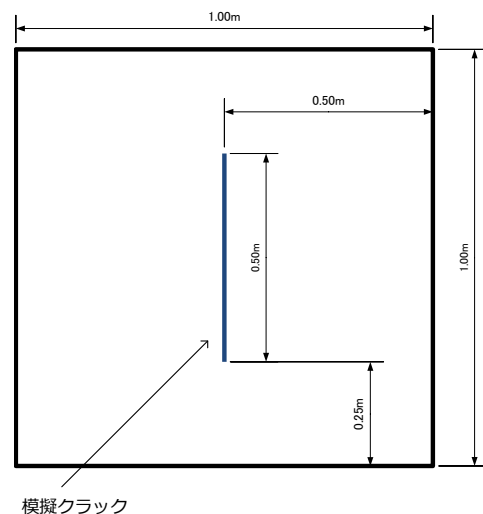


図 3-1 供試体と模擬ひび割れの大きさ

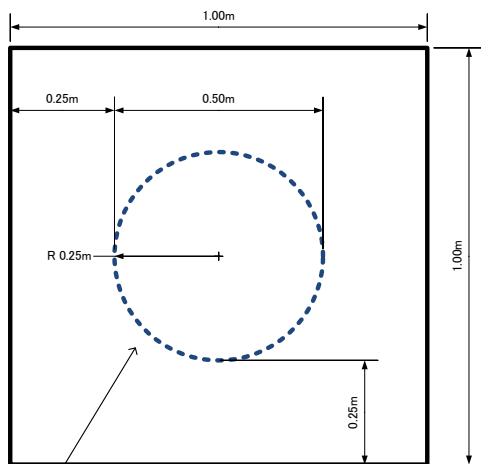


図3-2 供試体と模擬剥離、層間剥離の大きさ

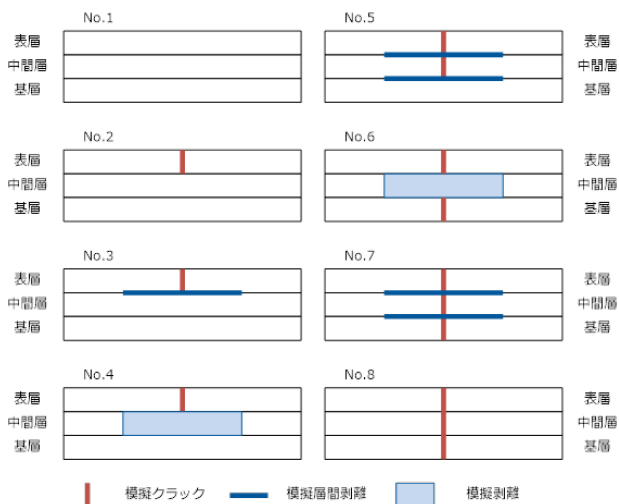


図3-3 各供試体の断面

大粒径 20mm の新規粗粒度アスファルト混合物とした模擬ひび割れは、設置対象とする層の施工時に、厚さ 1mm の金属板 (写真 3-1) を供試体に差し込みながらアスファルト混合物を敷均し、転圧し、その後に当該金属板を引き抜いていくこととした。

中間層の模擬剥離は、半径 25cm の円形木枠を供試体中心部に設置 (写真 3-2) し、円形木枠の周りにアスファルト混合物を敷均し、転圧し、その後円形木枠を取り外し、設置後に粗粒度アスファルト混合物の骨材配合からなる骨材を敷均し、転圧し、その後の表層を敷設することとした。層間剥離は、供試体中心部に半径 25cm、厚さ 5mm 程度で砂を敷均し (写真 3-3)、その後に上部の層を敷設することによって作成することとした。なお、いずれの供試体においても、健全部の層間にはタックコート塗布している。

3.3 サーモグラフィ評価試験

様々なアスコン層内部損傷を模擬した供試体に対して、



写真3-1 模擬ひび割れ作成



写真3-2 模擬剥離部の円形木枠の設置



写真3-3 模擬層間剥離作成

サーモグラフィを用いて表面温度の経時変化を 1h 置きに実施した。

使用したサーモグラフィは、現場での適用性を考慮して、安価に入手可能で、かつ可搬性が高いスマートフォンに接続してデータを取得する機種とした。熱画像解像度は 160 × 120 (155 万画素)、計測温度範囲は -20 ~ 400°C、温度分解能は 0.15°C、視野角は 55 × 43° の諸元を有しているものである。

試験実施日は平成 29 年 11 月 7 日であり、近傍のアメダス観測地点 (つくば (館野)) の当日の気象データは表 3-1 に示すとおりである。なお、供試体作製後に模擬ひび割れから人為的に水を挿入したところ、層間を使って供試体端部から水の浸みだしを確認し、供試体によってその浸みだし量はまちまちであった。これは、小さい供試体であ

りタンパ等の小型機械を中心とした締めめであったため、層間部での付着性にバラツキが生じたためと考えられる。そのため、内部の模擬損傷に雨水がたまっている状態という統一条件での試験の実施が困難であり、供試体が乾燥状態という条件下での比較試験とした。なお、上記アメダス観測地点において、試験前日及び前々日も晴天で降雨量は0mmであり、各供試体の内部は乾燥している状態を保持している状態と考えられる。

表 3-1 試験当日 (H29.11.7の気象データ)

時刻	天気	日射量 (MJ)	気温 (°C)	降水量 (mm)	時刻	天気	日射量 (MJ)	気温 (°C)	降水量 (mm)
0	晴れ	0	5.8	0	12	晴れ	2.15	16.6	0
1	晴れ	0	5.6	0	13	晴れ	2.01	17.6	0
2	晴れ	0	5.0	0	14	晴れ	1.66	18.6	0
3	晴れ	0	4.8	0	15	晴れ	1.14	19.3	0
4	晴れ	0	4.5	0	16	晴れ	0.53	18.9	0
5	晴れ	0	3.9	0	17	晴れ	0.07	13.8	0
6	晴れ	0	3.8	0	18	晴れ	0	12.0	0
7	晴れ	0.14	5.4	0	19	晴れ	0	11.3	0
8	晴れ	0.7	7.6	0	20	晴れ	0	11.6	0
9	晴れ	1.31	10.8	0	21	晴れ	0	10.9	0
10	晴れ	1.8	13.6	0	22	晴れ	0	10.2	0
11	晴れ	2.1	15.5	0	23	晴れ	0	9.7	0

図 3-4 に用いたサーモグラフィで得られた温度画像のデータの例を示す。この温度データの評価にあたり、供試

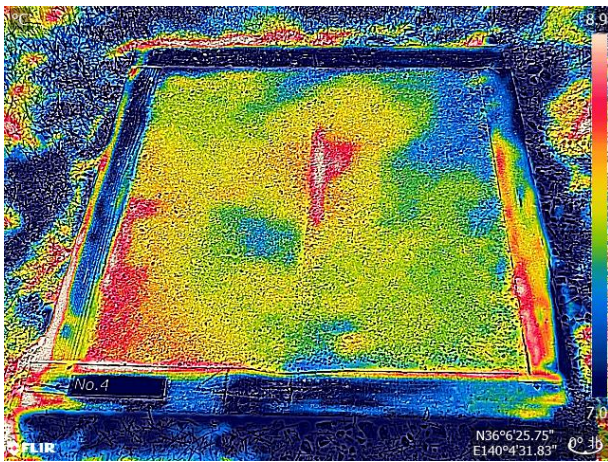


図 3-4 サーモグラフィによる撮影結果の例

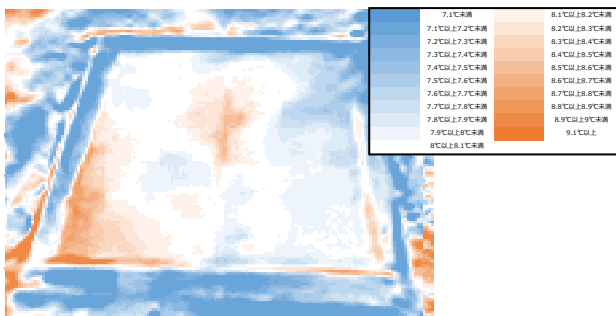


図 3-5 温度分布の処理例

体端部は供試体と熱伝導率が異なる木製型枠が接触している影響を受けていることに留意が必要であることが分かる。その影響を避けるため、ひび割れに沿って幅 20cm × 60cm 程度内の表面温度の平均値を基準値として、サーモグラフィの温度分解能である 0.1°C刻みでグラデーション化した処理の例を図 3-5 に示す。

各供試体の表面温度について、端部から 10cm の範囲を除いた部分 (供試体中央部) の平均温度の最高値及び経時変化を図 3-6、表 3-2 に示す。健全な供試体である No. 1 供試体が最も低く、表層のひび割れ模擬、及び表層のひび割れと表層・中間層間の層間剥離にとどまる No. 2、3 供試体が次いで低い。その次の低いのは No. 8 供試体となるが、No. 8 供試体はクラックがアスコン層を貫通しているのみで、熱伝導の遮断が生じる層間剥離・内部剥離が存在していない影響が出ていると考えられる。それ以外の面的に損傷がひろがっている供試体 (No. 4~7) との供試体中央部の最高温度の差は 1.5~2°C近くにも及び、表面の最高温度の差に着目することにより、面的に広がっている損傷を検知する可能性があることがわかる。

次に、各供試体における供試体中央部の最高温度と 11 時及び 14 時時点の平均温度の差を図 3-7 に示す。この経時変化の傾向も前述と同様、内部損傷が面的に広がっている供試体については、熱伝導が遮断されて表面側に熱がた

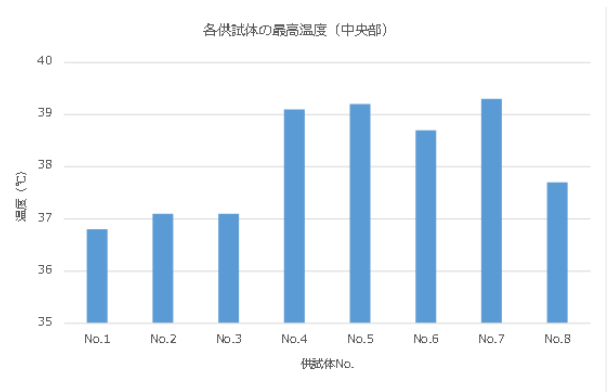


図 3-6 供試体中央部の平均温度の最高値

表 3-2 供試体中央部の平均温度の最高値と推移

時刻	表面温度 (°C)							
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8
7	7.2	8.0	7.7	8.2	7.9	7.4	8.1	7.4
8	10.9	12.0	11.1	14.5	14.6	14.2	14.4	13.7
9	18.3	20.5	19.8	20.6	20.7	20.5	20.9	20.3
10	29.9	30.6	30.2	31.1	30.9	30.9	31.5	30.1
11	33.4	33.6	33.1	34.0	33.8	33.4	34.5	35.2
12	35.9	36.9	37.1	37.7	39.2	38.3	39.3	37.7
13	36.8	37.1	37.0	39.1	38.7	38.7	39.0	37.2
14	34.6	34.0	34.5	34.5	34.1	33.9	34.2	36.4
15	29.6	29.5	29.8	32.7	31.4	31.4	31.9	31.0
16	25.1	24.7	25.2	25.4	24.2	25.1	25.5	25.2
17	19.7	19.2	19.4	19.4	18.4	18.5	20.0	19.8
18	18.4	17.8	18.3	18.2	17.6	17.6	18.0	18.4

まりやすい傾向が最高温度を示す前後 2 時間程度で顕著に出ることが分かる。特に、ピークアウト後の表面温度の低下時点で顕著であり、面的に損傷の有無の違いにより、温度差は $2^{\circ}\text{C}\sim 3^{\circ}\text{C}$ 前後にも及ぶ。

これらのことより、アスファルト層の内部損傷がある箇所においては、健全部との路面温度の違いが、表面温度の最高温度、最高温度からの低下過程で顕著に表れることがわかった。

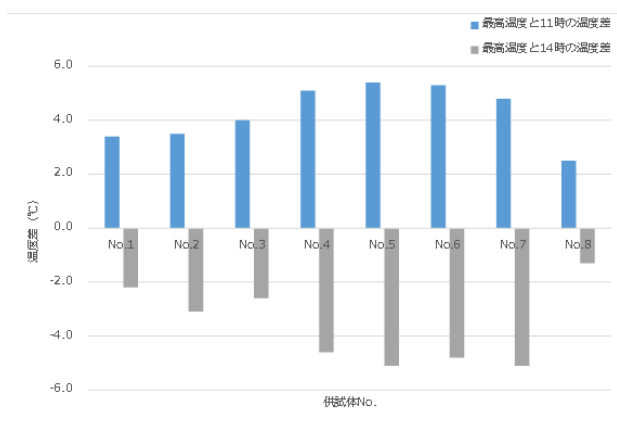


図3-7 供試体最高温度と11時及び14時時点の平均温度の差

4. 軽交通道路における舗装の損傷実態調査

4.1 背景

重交通道路と軽交通道路では、舗装の損傷形態に応じて点検診断時の着目点や維持管理手法が異なる可能性があるため、本研究では重交通道路と軽交通道路の損傷状況の特徴を把握する調査を行った。

4.2 調査方法

北海道内の国道約 6,500km を対象にアスファルト舗装の損傷実態を把握した。具体的には、現道の目視調査を行って、舗装管理支援システムに記録されているデータの区間毎(約 100m 単位)のひび割れ種類を判別し、どのような種類のひび割れがどのような条件の路線に多いかを調べた。判別したひび割れの種類は以下の 4 種類である。通過車両の繰返し载荷によって発生し舗装下面から上層に向かって伸びるボトムアップ型疲労ひび割れ(以下、ボトムアップひび割れ)、舗装表面から下層に向かって伸びるトップダウン型疲労ひび割れ(以下、トップダウンひび割れ)、路床内の水分が凍結して形成されるアイスレンズが成長することで生じる凍上ひび割れ、気温の上昇・下降によるアスファルト混合物の温度応力によって生じる低温ひび割れである。一つの区間に複数種類のひび割れが発生している場合には、複数種類のひび割れが発生している区

間として扱った。目視調査のデータを基に、ボトムアップひび割れ、トップダウンひび割れおよび凍上ひび割れに関しては、ひび割れ率が 5.0 %以上の区間数を 10km 毎にカウントして地図上に表示した。低温ひび割れに関しては、1km 当たりの低温ひび割れ発生本数をカウントして地図上に表示した。さらに、各々のひび割れが N_4 、 N_5 、 N_6 、 N_7 交通断面のうちどのような区間に多いのかを整理した。ちなみに本研究では、 N_4 、 N_5 交通を軽交通道路区間として扱っているので留意されたい。

なお、調査は自動車専用道路を除く下り車線を対象とし、構造物区間やコンクリート舗装区間など表 4-1 に該当するデータの区間長を除外した上で集計した。これらのデータを除外した理由は、一般的なアスファルト舗装区間に比べて舗装構成や基盤条件が特殊であり、除外するのが妥当と考えたためである。

表 4-1 除外区間一覧(単位:m)

項	目	延長(m)
舗装延長		6,584,198
除外区間		
①	構造物	177,348
②	最新ひび割れ率が空欄	109,396
③	最新調査後に工事	1,331,079
④	上り・及び自専道	152,190
⑤	最新調査時からルート変更・通行止め	16,702
⑥	Co舗装区間	135,109
⑦	累積大型車交通量が空欄、舗装厚不明	127,112
舗装延長-除外区間		4,535,262

4.3 調査結果

図 4-1 にボトムアップひび割れの発生分布図を、図 4-2 にトップダウンひび割れの発生分布図を、図 4-3 に凍上ひび割れの発生分布図を、図 4-4 に低温ひび割れの発生分布図を示す。図 4-1 より、ボトムアップひび割れは、道内の広い範囲に発生しており、主に郊外部において多く発生

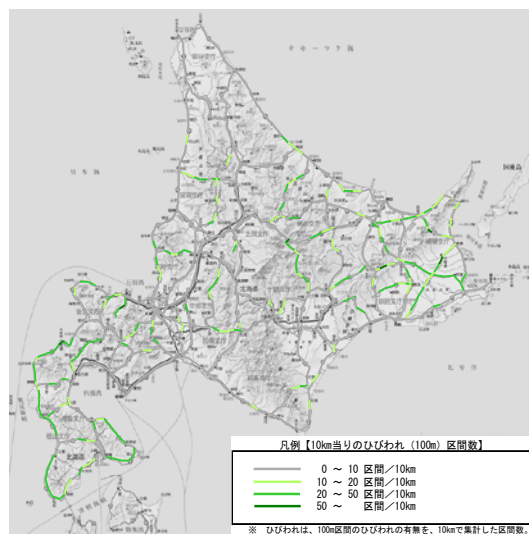


図 4-1 ボトムアップひび割れの発生分布図

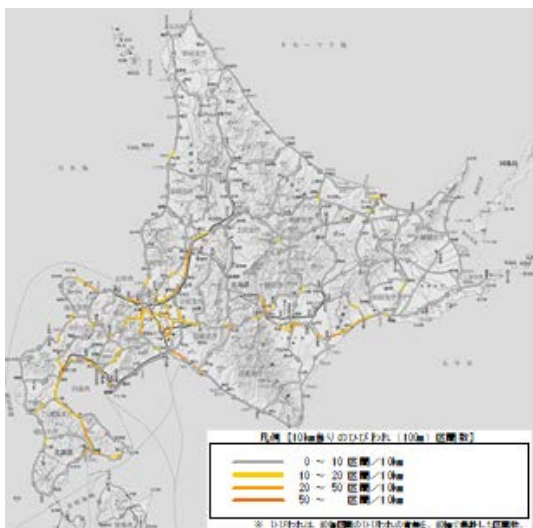


図 4-2 トップダウンひび割れの発生分布図

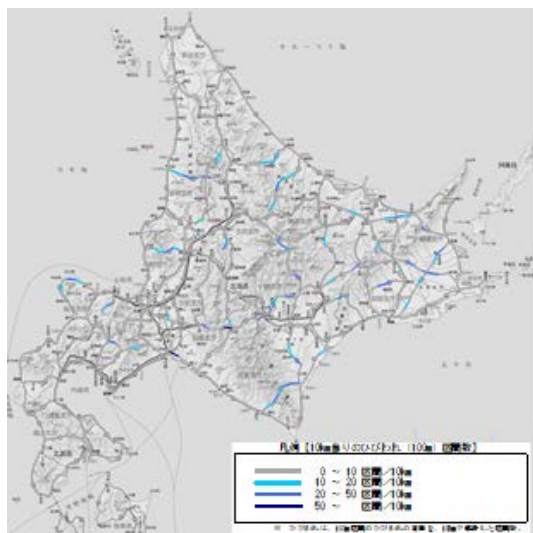


図 4-3 凍上ひび割れの発生分布図

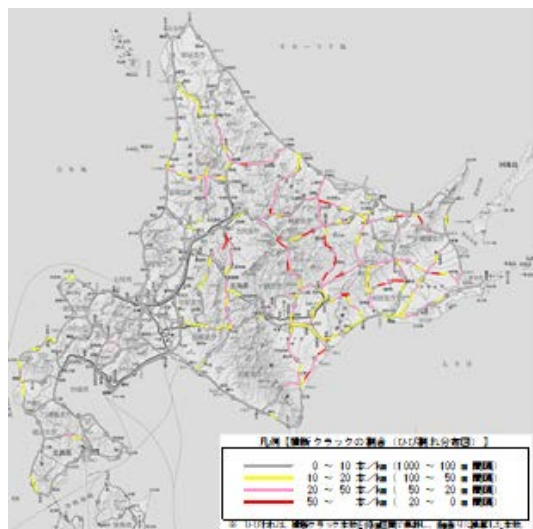


図 4-4 低温ひび割れの発生分布図

表 4-2 各ひび割れの発生延長及び調査集計区間の延長に対する比率

交通量区分	As混合物層厚 (cm)	14cm未満	14cm以上 20cm未満	20cm以上 30cm未満	30cm以上	合計
	旧	A	B	C	D	
ひび割れ種別	現	N_4	N_5	N_6	N_7	
	調査集計区間の延長(m)	2,557,530	1,353,654	508,295	115,783	4,535,262
ボトムアップひび割れ	ひび割れ発生区間の延長(m)	336,044	150,288	10,135	932	497,399
	調査集計区間の延長に対する発生区間比率(%)	13.1%	11.1%	2.0%	0.8%	11.0%
トップダウンひび割れ	ひび割れ発生区間の延長(m)	131,273	62,707	46,451	7,845	248,276
	調査集計区間の延長に対する発生区間比率(%)	5.1%	4.6%	9.1%	6.8%	5.5%
凍上ひび割れ	ひび割れ発生区間の延長(m)	112,752	59,233	11,036	113	183,134
	調査集計区間の延長に対する発生区間比率(%)	4.4%	4.4%	2.2%	0.1%	4.0%
低温ひび割れ	ひび割れ発生区間の延長(m)	229,742	105,960	13,781	995	350,478
	調査集計区間の延長に対する発生区間比率(%)	9.0%	7.8%	2.7%	0.9%	7.7%

していることがわかる。図 4-2 より、トップダウンひび割れは札幌近郊と札幌函館間や札幌旭川間などの幹線道路での発生が多い。図 4-3 と図 4-4 より、凍上ひび割れと低温ひび割れは道北地域や道東地域の内陸部に多く発生していることが分かる。表 4-2 には各ひび割れの発生延長及び調査集計区間の延長に対する発生比率を示す。赤枠で囲んだ部分に着目すると、ボトムアップひび割れ、凍上ひび割れ、低温ひび割れは N_4 、 N_5 交通断面などの舗装厚の薄い軽交通路線に多く発生していることが分かる。一方、トップダウンひび割れは N_6 、 N_7 交通断面などの混合物層厚が厚い重交通路線に発生している傾向が見られる。軽交通路線は混合物層厚が薄いため、作用する力に対する抵抗性が小さく、様々なひび割れが発生し易いと推察される。

軽交通区間では、特にボトムアップひび割れの発生区間延長が最も長く、次いで低温ひび割れ、凍上ひび割れの順であることが着目される。つまり、軽交通区間ではボトムアップひび割れに対する対処が最も多くなると理解できる。

以上のように、交通断面によってひび割れ損傷の形態は異なっている。 N_4 、 N_5 交通断面などの混合物層厚の薄い軽交通路線区間に着目すると、ボトムアップひび割れや低温ひび割れ、凍上ひび割れが発生しやすいことが確認された。 N_4 、 N_5 交通断面などの軽交通路線区間の舗装マネジメントならびに舗装維持修繕計画を考える場合には、これらの損傷形態への対処方法を検討することが大切である。特に、ボトムアップひび割れは広い範囲で発生している実態にあり、今後舗装の老朽化が進行するにつれて増加する性

質のひび割れであると考えられるため、要点であるといえる。

5. 目的や道路管理体制に応じた低廉な路面性状調査技術の開発

5.1 背景

軽交通舗装は供用延長が膨大であるため、その路面性状を把握するための手法は、経済的に安価で手間のかからない手法であることが望まれる。そこで、平坦性指標を活用した低廉な点検調査手法について検討を進めた。



図 5-1 IRI 計測装置搭載車両



図 5-2 IRI 計測路線区間(1)



図 5-3 IRI 計測路線区間(2)

5.2 調査方法

車両バネ上およびバネ下に設置した加速度計の加速度値から、リアルタイムで国際ラフネス指数(International Roughness Index、以下、IRI)を計測する装置(図 5-1)を用い、地方自治体が管理する軽交通道路において IRI 計測を実施した。この計測装置は、2 個の加速度計と GPS センサ、アンプおよびデータ処理ソフトを内蔵したモバイルパソコンから構成され、任意の車両に取り付けることができ、走行しながらの計測が可能であることから、計測が非常に容易で短時間で広い範囲を計測できるため、経済的な負担も少ないことが特徴である。計測対象とした路線は、図 5-2 に示す 12 の路線区間及び図 5-3 に示す 24 の路線区間である。図 5-2 の計測路線区間は、道路管理者が修繕を実施する予定の区間と、健全と判断した路線区間があり、IRI 計測を行い、両者の IRI 値にどのような差異が見られるかを解析した。図 5-3 の計測路線区間は、自治体管理の幹線及び生活道路であり、面的な IRI の把握とあわせ IRI と舗装損傷の関係について検討した。

5.3 調査結果

IRI を計測した結果は、図 5-4 及び図 5-5 に示すようにマップに表示することが可能であり、どの位置の IRI が悪いのかを視覚的に判別できる。また、図 5-2 に示した健全区間と修繕区間における IRI が 4 以上の割合を図 5-6 に



図 5-4 IRI 計測マップ表示の一例(1)

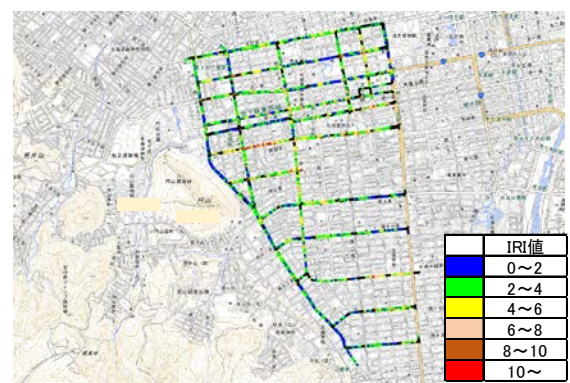


図 5-5 IRI 計測マップ表示の一例(2)

示す。維持修繕が必要と判断された路線区間は、IRI4 以上のデータ割合が高い傾向にあることが確認された。

図 5-3 に示した区間における実際に舗装が損傷している箇所数と IRI の関係を図 5-7 に示す。IRI 値の高い箇所は何らかの損傷が生じている箇所である傾向にあることが確認された。

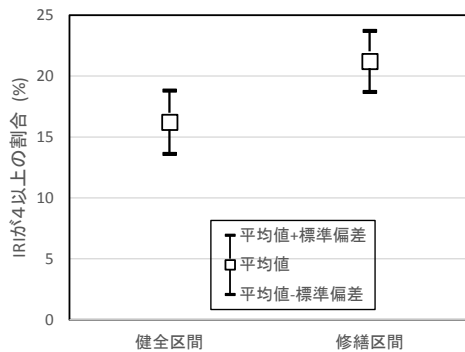


図 5-6 修繕判断と IRI の対応関係

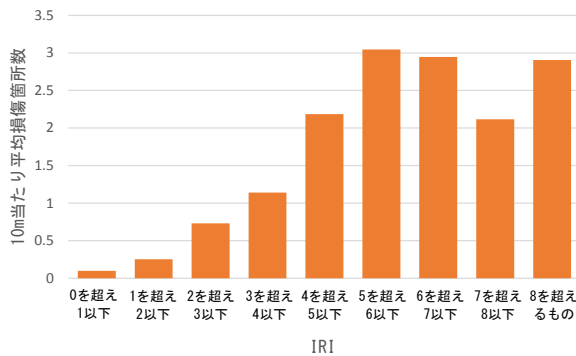


図 5-7 舗装損傷箇所数と IRI の関係

5. まとめ

平成 28 年度においては、重交通道路に該当する、関東地方整備局管内の直轄国道において、コア抜き調査結果をもとにした修繕工法の選定が、舗装の構造的健全度の概ね均一なレベルへの回復に寄与したことを明らかにした。点検要領に基づく舗装のメンテナンスサイクルにおいては、損傷の進行が早い道路等における早期劣化区間について、詳細調査の実施を通じた適切な措置が求められるが、本調査結果により詳細調査としてコア抜きによる舗装の内部損傷の把握の重要性を示唆するものとなった。

平成 29 年度においては、前年度で内部損傷の把握の重要性が明らかになったことより、アスコン層の内部損傷を模擬した様々な供試体を作成し、サーモグラフィを用いた評価試験を行った。その結果、アスファルト層の内部損傷が面的に広がっている個所では、路面温度の日最高温度や

日最高温度からの低下傾向が健全部と異なることを把握した。

平成 30 年度においては、軽交通舗装区間の路面性状を把握する手法として、自治体管理の幹線及び生活道路の IRI 計測を行い、面的把握の有効性の確認、舗装の損傷と IRI の関係を把握した。

また、路面性状データの分析を通じ、舗装断面によってひび割れ損傷の形態は異なっており、アスコン層の薄い軽交通道路においては、ボトムアップひび割れや低温ひび割れ、凍上ひび割れが発生しやすいことが確認された。舗装のメンテナンスサイクルにおける適切な措置の選定にあたっては、損傷原因を究明・推定することが重要であり、軽交通道路特有のこれらの損傷形態の整理、軽交通舗装区間における簡易な路面性状把握手法がメンテナンスサイクル上の適切な措置を選定する上で有効な情報となると考えている。今後、引き続き舗装の損傷の実態調査を継続すると共に、非破壊調査による舗装の内部損傷の検出手法の検討等を行う予定である。

なお、重交通道路の損傷実態調査は、(公社)日本道路協会舗装委員会舗装設計施工小委員会の活動の一環で実施したものであり、また道路管理者及び修繕工事施工業者の多大なるご協力の下実施したものである。ここに記して関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) 武藤聡、久保和幸、藪雅行：「舗装点検要領」の策定について、舗装、Vol.52、No.1、pp.11-15、2017.1
- 2) 国土交通省道路局：平成 22 年度全国道路・街路交通情勢調査 茨城県、64p.、2010
- 3) (公社)日本道路協会：舗装性能評価法—必須および主要な性能指標編一、pp.15-22、2013.4
- 4) 渡邊一弘、増戸洋幸、篠塚政則、上島壯：短い測定間隔による修繕前後の構造評価結果、土木学会論文集 E1 (舗装工学)、Vol.72、No.3、pp.177-185、2016.12
- 5) 坪川将丈：空港舗装の設計・維持管理手法の高度化に関する研究、国土技術政策総合研究所研究報告、No.41、50p.、2010.3
- 6) 早野公敏、水上純一、鈴木哲雄：層間剥離を有するアスファルト混合物層の表面温度分布特性に関する実験的検討、地盤工学ジャーナル、Vol.2、No.1、pp.1-11、2007.3
- 7) 前川亮太、蘇凱・水上純一、坪川将丈：空港アスファルト舗装剥離の非破壊探査方法の提案、港湾空港技術研究所報告、Vol.48、No.4、pp.71-87、2009.12

6.2 機器活用による調査・監視の効率化・高度化技術の開発・評価

6.2.1 既設橋の合理的な性能評価手法および補修・補強方法に関する研究

担当チーム：橋梁構造研究グループ

研究担当者：石田雅博、上仙 靖、高橋 実、
大島義信、山本 将、廣江亜紀子、
村井啓太

【要旨】

高度経済成長期に集中的に整備された橋梁が一斉に高齢化を迎える中、さまざまな劣化要因による損傷事例が報告されている。これらの損傷を出来るだけ早期に検知するための技術や、損傷に対して行われた補修・補強の効果を確認するための技術が求められている。今回、外ケーブル補強後 21 年が経過した既設 PC 桁を対象に、載荷試験が実施された。その載荷実験において、損傷状況・補強状況に応じた振動特性の変化を把握するため、加速度センサを用いて振動計測を行った。また、鋼橋において塗膜を剥がさずに塗膜上から目視点検が困難な疲労亀裂の有無を調査する技術を対象とした性能評価法の適用性について基礎的検討を行った。

キーワード：PC 橋、既設 PC 桁、塩害、劣化、損傷、振動特性、鋼橋、鋼材の亀裂、超音波探傷技術、渦流探傷技術

1. はじめに

橋梁の高齢化に伴い PC 橋に生じる損傷として、内部の PC 鋼材が腐食・破断した事例がある。しかしながら、腐食や破断など外観から分かる変状が現れた段階では、すでに損傷が深刻な状態まで進んでいる場合が多いため、外観に症状が現れない段階で、損傷の進行を把握することや、施された補修・補強の効果を確認するための技術が求められている。

外ケーブル補強された損傷を有する既設 PC 桁を対象に、その補強効果を定量的に把握することを目的に載荷試験を実施された(6.4.1)が、本研究では、その実験において損傷の進行や補強状態に応じた振動特性を把握するため、振動計測実験を行った。

また、鋼橋の点検で検出される溶接継手止端部などの塗膜割れについては、塗膜のみの割れであるのか鋼部材の疲労亀裂の発生に伴って生じた割れなのかを目視で判断することは困難である。このような特徴のある塗膜割れ下の亀裂の調査については、塗膜を剥がさずに塗膜上から亀裂を検出できる効率的な調査技術が、今後、開発・改良されることが期待されるが、これらの調査技術が点検調査の要求性能を満足しているかを評価するための評価方法については、明らかになっていない。

鋼橋に関する検討では、塗膜を剥がさず塗膜上から鋼部材表面に発生する疲労亀裂を対象とした、統一かつ普遍的な亀裂検出技術の性能評価方法(案)を提示することを目的とする。ここでは、渦流探傷試験(以下「ET」)について、基礎的な整理分析を行った。

2. 加速度センサを用いた既設 PC 橋の損傷・補修補強状態把握技術に関する検討

2.1 実験概要

2.1.1 撤去 PC 桁の概要と載荷試験方法

対象橋梁は写真 2-1 に示す 1962 年供用された 3 連の PC 単純 T 桁橋である。橋梁の詳細および載荷試験の方法については、6.4.1 にて詳述する。



写真 2-1 橋梁全景（左上）および外ケーブル設置状況（右下）

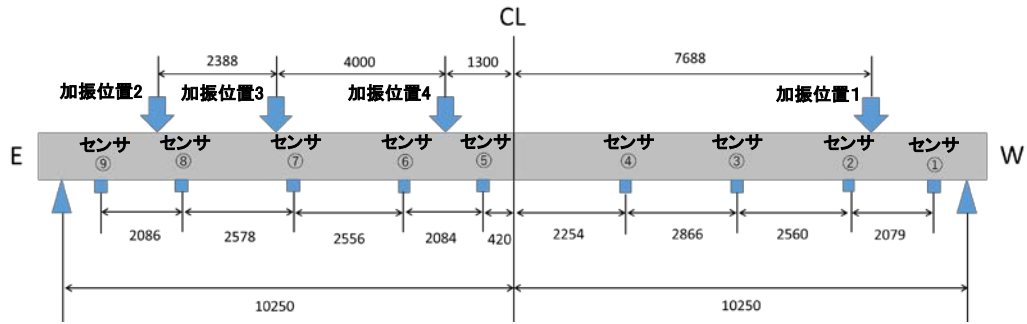


図 2-1 加速度センサの設置位置、および加振位置

表 2-1 使用した加速度センサユニットの性能

項目	仕様
方式	水晶振動子 MEMS 型
測定軸	3 軸
加速度測定範囲	±5 G
測定分解能	0.06 μG
サンプリング周波数	100 Hz (全センサ同期サンプリング)
周波数範囲	DC~20Hz (-10dB)
使用温度範囲	-20~60 °C
保護等級	IP67 相当
インターフェース	CAN2.0A

表 2-2 振動計測の実験ステップ

番号	名称
STEP1-1	外ケーブル試験緊張前
STEP1-2	外ケーブル試験緊張後
STEP2	試験载荷後（曲げひび割れ発生）
STEP3	外ケーブル本緊張後
STEP4-1	本試験 内ケーブル降伏後
STEP4-2	本試験 設計耐力相当荷重载荷後
STEP4-3	本試験 終局

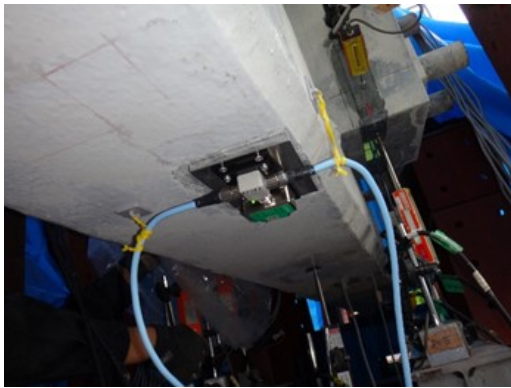


写真 2-2 センサユニット設置状況



写真 2-3 重錘落下による加振の様子



写真 2-4 ハンマーによる加振の様子

2.1.2 振動計測方法

土木構造物モニタリングに適する低周波の加速度測定に特化した、高精度・高分解能な加速度センサユニット 9 台を図 2-1 に示す位置に設置した。使用した加速度センサユニットの性能を表 2-1 に示し、センサユニットの設置状況を写真 2-2 に示す。

実験の進行に応じ、図 2-1 の加振位置 1~4 の場所において、表 2-2 のタイミングで加振を行った。加振は、小型 FWD を用いた重錘落下とハンマーによる打撃にて行った。加振状況は写真 2-3、写真 2-4 に示す。

2.2 実験結果

計測結果から推定される実験ステップごとの 1 次固有振動数およびの 2 次固有振動数の推移、ならびに振動モードの変化を確認した。固有振動数の推移を図 2-2、図 2-3、振動モードの変化を図 2-4、図 2-5

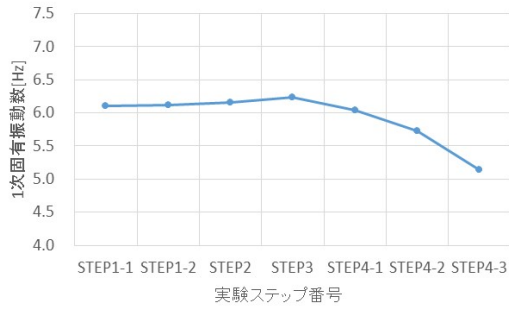


図 2-2 実験ステップ毎の 1 次固有振動数の推移

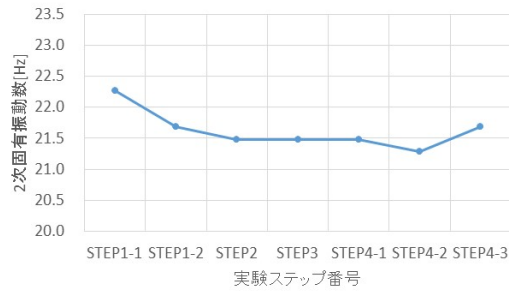
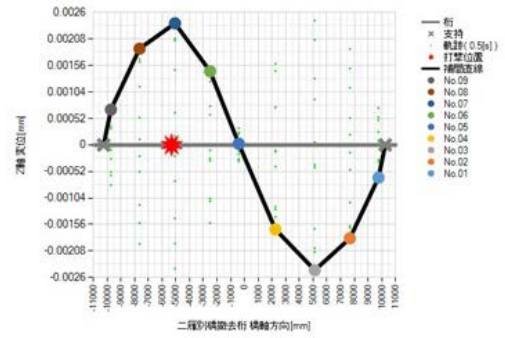
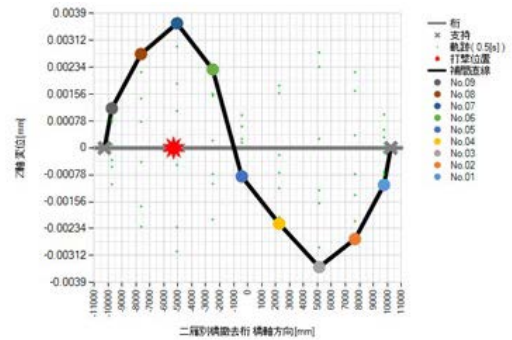


図 2-3 実験ステップ毎の 1 次固有振動数の推移

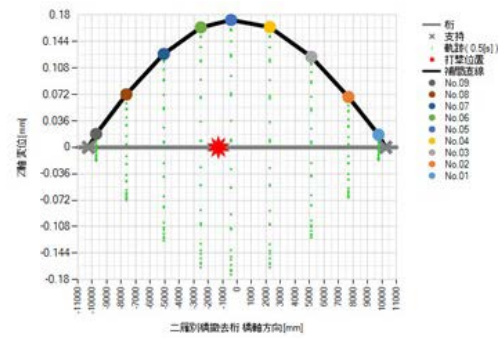


(a) STEP1-1

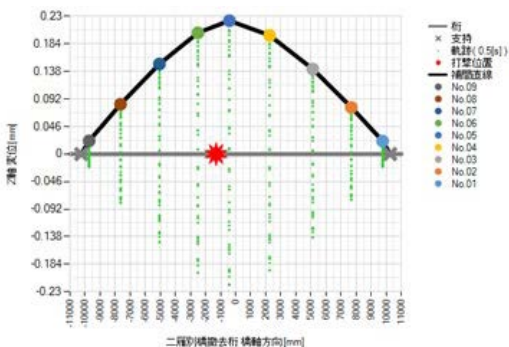


(b) STEP4-3

図 2-5 2 次の振動モード(ハンマー、加振位置 3)



(a) STEP1-1



(b) STEP4-3

図 2-4 1 次の振動モード(重錘落下、加振位置 4)

に示す。

1 次固有振動において STEP3 以降に損傷の進行に伴う振動数の低下が見られた。一方、2 次固有振

動においては、損傷の進行に伴う明確な傾向は見られなかった。また、外ケーブル緊張前後では大きな変化は見られなかった。

振動モードについては、ここでは初期状態 (STEP1-1) および終局状態 (STEP4-3) のみを図示しているが、1 次モードと 2 次モードのいずれにおいても、STEP4-2、STEP4-3 において、それ以前の段階の振動モードの形状との差が確認された。

一方、曲げひび割れ発生、内ケーブル降伏など、本試験の中では損傷が軽微な段階や外ケーブルの緊張前後においては、固有振動数、振動モードともに、大きな違いは見られなかった。

2.3 まとめ

本検討を通じ、次の知見が得られた。

- (1) 1次固有振動では、損傷の進行に伴う振動数の低下が見られたが、2次固有振動では、損傷の進行に伴う明確な傾向は見られなかった。外ケーブル緊張の前後では固有振動数の顕著な変化は見られなかった。
- (2) 振動モードは、終局に近い段階では、それ以前のモードとの差が確認できた。一方、損傷が軽微な段階や外ケーブル緊張前後においては、振

動モードに明確な違いは現れなかった。

- (3) PC桁の損傷が終局に近い状態であれば加速度センサを用いて状態を把握することが可能であることが明らかとなった。損傷の早期把握や外ケーブル補強の効果を確認することについては、課題が残った。

3. 塗膜上から疲労亀裂の有無を調査する技術に関する基礎的検討

3.1 検討の方針

ここでは、試験体を用いた性能評価方法を取り上げる。塗膜割れ下の疲労亀裂を模擬した試験体を用いる場合は、次に挙げる技術的課題がある。1) 塗膜下の疲労亀裂の状態が塗膜を剥がさないで正確に把握できない、2) 一端塗膜を剥がしてから再塗装すると、表面開口亀裂内部に塗料が侵入し、非破壊調査技術の検出性能に影響を及ぼす可能性がある、3) 塗膜は経年変化により硬さや膜厚が変化するなど性質が変化するため、調査時点の性質について毎回把握する必要があり手間がかかる、4) スプレー、はけ、ローラー等の道具を手で持って塗布する塗り方のため、塗膜厚にばらつきがある。本検討の最終的な目標は、これらの技術的課題を解決する一つの方法として、塗膜の代わりにシートやフィルム（以下「シート」）を用いた性能評価法の構築とした。

3.2 対象としたシートの主な仕様

塗膜を模擬するシートの選定にあたり、それぞれの特徴を踏まえて次のとおり主な仕様について検討した。シートは、材質や厚さが塗膜に比べ均一であり、貼付けや除去が簡単にできる長所がある。一方、貼付け時に空気が気泡としてシートと鋼材との間に混入したり、シートと鋼材との間で密着せずに剥がれてしまうことがあるなどの短所がある。塗膜を模擬するためにシートを用いる場合、塗膜下亀裂の調査技術の性能に影響を及ぼす因子が塗膜による場合と同等である必要がある。

ET の性能に影響を及ぼすシートの因子として、前述した短所の他に、金属表面の非導電性膜厚（リフトオフ量）、導電率、透磁率などが考えられる。これらの影響因子のうち、気泡の混入及び密着性については施工時にシートを丁寧に貼付けるよう留意することで防止できるとした。膜厚以外の音導電率、透磁率については、シート素材は、一般的に、非伝導非磁性であることから、主として、シートの厚さに

表 3-1 対象シートの主な仕様

名称	組合せ	主な基材	厚さ(mm)	粘着力(N/25mm)
PVC-1	-	PVC(ポリ塩化ビニル)	0.08	0.8 注2)
PVC-2			0.13	0.4 注2)
PVC-3			0.13	2.5 注2)
S-1	-	特殊アクリル	0.06	13 注3)
S-2	あり注1)	PVC(ポリ塩化ビニル)	0.06+0.14	-
S-3		特殊アクリル	0.06+0.12	-
S-4	-	フッ素系フィルム	0.06+0.07	-

注1: S-1をベースにその上にシートを貼付け、2枚を組合せたシートとした(メーカ仕様)。注2: アルミニウム板に幅25mmのシートを貼付け、180度方向に引張割られるときの引張力。注3: 注1でアルミニウム板の代わりにメラミン塗装板を用いた場合の値。いずれもメーカカタログ値。

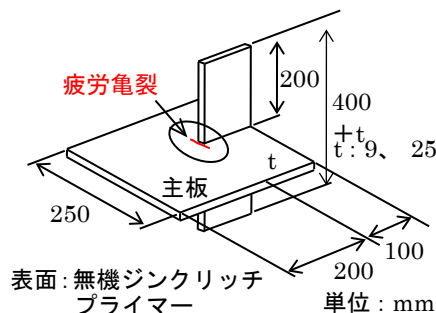


図 3-1 面外ガセット試験体 (3 体)

表 3-2 ET の探傷装置の主な仕様 (値は公称値)

ETの装置の種類	ET-1	ET-2	ET-3	ET-4
コイルの種類	上置コイル			
励磁・検出の方式	相互誘導形			自己誘導形
信号検出方式	自己比較方式			
コイルの相対サイズ	大	中	小	大
接触部サイズ (縦×横)(mm)	12×5	9×3	4×4	12×12
リフトオフ時の相対雑音	小	小	中	大
探傷周波数(kHz)	30			

表 3-3 ET の感度調整法

ET-1	ET-2	ET-3	ET-4
感度調整用試験片のスリット直上を走査したリサージェ曲線を基準			

よって生じるセンサのリフトオフ量に着目した。

3.3 対象とした試験体と既往調査技術の仕様

表 3-1 に示すシートが疲労亀裂の検出に及ぼす影響を調べるために、感度調整用試験片の人工きず（幅 0.2mm、深さ 1.0mm、長さ 5mm の放電加工で製作したスリット、材質 SM400）を対象とし、試験片の表面に各種のシートを貼付け、そのシート上から ET を行って人工きずの電圧変化を調べた。

また、亀裂を有する試験体としては、塗膜割れが比較的多く報告されている溶接継手のうち、主桁の面外ガセットを取り上げ、主板厚 9mm (2 体)、25mm (1 体) の 2 種類 (計 3 体) とし、溶接は CO₂ ガスシールドアーク溶接を用いた (図 3-1 参照)。試験体の主ビード止端に沿って進展した後に主板の母材にまで亀裂

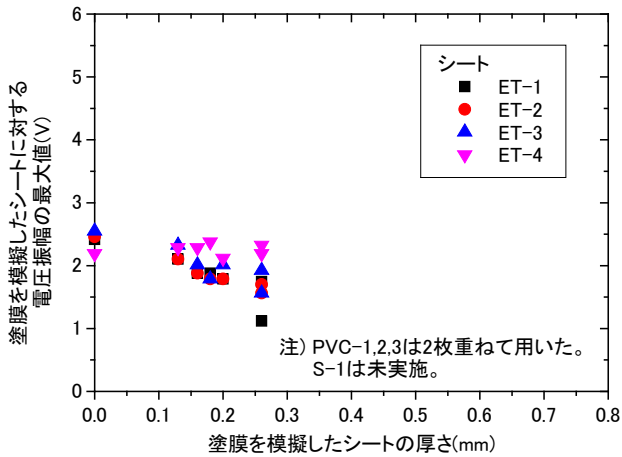


図 3-2 ET におけるシートによる電圧振幅変化

が進展したところで载荷を停止させ、疲労亀裂を有する面外ガセット試験体を製作した。

表 3-2 に本検討で対象とした ET の探傷装置の主な仕様を示し、表 3-3 に ET の基準感度の調整方法を示す。センサ（探触子）の走査は手動とし、既往技術を対象とした。

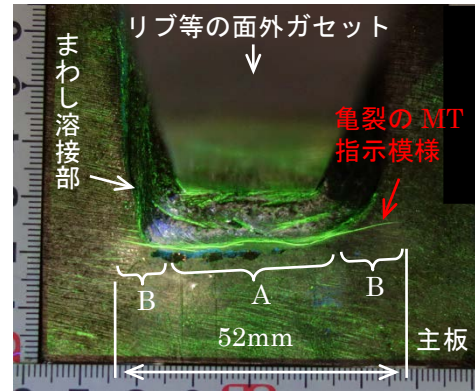
3.4 塗膜を模擬したシートの影響

表 3-2 に示す ET について、感度調整用試験体のスリットを用いて、表 3-1 に示すシートが感度に及ぼす影響を調査した。本検討では、ET の探傷結果である電圧信号の複素数平面において、原点からの距離（複素数の絶対値）を電圧振幅と称して ET の探傷結果の指標とした。図 3-2 に各種のシートに対する電圧振幅の最大値を示す。ET の場合、昨年度実施した UT と比べて、シートの有無による影響は相対的に小さい傾向となった。各 ET によってシート厚さの影響は異なるが、シート厚さに対して、ほぼ線形に電圧が変化していることがわかる。ET センサの特性によって、リフトオフの影響が異なるものと考えられる。

3.5 塗膜を模擬したシート条件下での亀裂検出性能

ET は、検出レベルは、感度調整用試験体スリットに対する電圧振幅を探傷画面のフルスケールの 80%程度となる設定で、亀裂と判別できる電圧振幅が確認できる場合とした。

結果は、ET は、ET-1～ET-4 の全てにおいて、写真 3-1 に示す領域 A は未検出であったが、領域 B は 10 の亀裂うち 8 つを検出し、いずれも空振りはなく、この結果は、全てのシートに対して同じ結果であった。



A: ET で亀裂が見逃されやすい領域(溶接ビード内または溶接ビード止端の領域)
B: ET で亀裂の見逃しが比較的小さい領域(溶接ビードから外れた主板の領域)

写真 3-1 ET で検出が困難な亀裂の分布領域

3.6 まとめ

本検討を通じ、次の知見が得られた。

- (1) 非伝導性塗膜の種類の影響はほとんどなく、塗膜厚（リフトオフ）の影響がセンサ種類毎に異なること、およびその変化値を定量的に実験で確認した。
- (2) 開口亀裂に対して各種の ET の検出性能を把握した。ET の種類によらず、ET では、亀裂端部は、検出できる可能性が高い一方で、亀裂中央は見逃す可能性が高いことを把握した。
- (3) 塗膜をシートにより模擬する性能評価を ET に適用する場合、シートが及ぼす影響のほとんどはシート厚さに伴って生じるリフトオフ量による違いに集約されると考えられる。

6.2 機器活用による調査・監視の効率化・高度化技術の開発・評価

6.2.2 舗装マネジメントの効率化に関する研究

担当チーム：道路技術研究グループ（舗装）、
寒地保全技術研究グループ（寒地道路保全）、
地質・地盤研究グループ（特命）、材料資源研
究グループ（先端材料・高度化）

研究担当者：藪雅行、木村孝司、齋藤清志、西
崎到、稲崎富士、寺田剛、丸山記美雄、渡邊一
弘、尾西恭亮、佐々木巖、星卓見、大浦正樹、
若林由弥

【要旨】

本研究は、移動式たわみ測定装置や地中レーダを用いた調査手法の改善等を通じ、より効率的な既設舗装の構造的特性の把握技術を提案することを目的としている。平成 28・29 年度は、移動式たわみ測定装置や多チャンネル高速牽引型地中レーダ探査システムの実用化に向け、それぞれ測定値に含まれる誤差の軽減策や測定装置の仕様について検討を行った。

キーワード：舗装、移動式たわみ測定装置、地中レーダ、MWD、GPR

1. はじめに

舗装の維持修繕工法の選定等にあたっては、既設舗装の構造的特性を把握することが求められる。現在、非破壊での構造調査としては重錘落下式たわみ測定装置（FWD：Falling Weight Deflectometer）を用いたものがあるが、各測点での測定であること、交通規制が必要であること等の課題がある。そこで、本研究では、より効率的な既設舗装の構造的特性の把握技術を提案することを目的としている。

平成 28 年度は、移動式たわみ測定装置（MWD）及び多チャンネル高速牽引型地中レーダ（GPR）探査システムの実用化に向け、それぞれ測定値に含まれる誤差の軽減策や測定装置の仕様について検討を行った。

平成 29 年度は、MWD のたわみ計測値の補正方法に関する検討として従来の板バネ車両からエアサスサスペンション車両に測定機器を移設し、車両のサスペンションの違いが取得データに与える影響の検証とドップラー振動計の角度変化による測定誤差を補正する方法を検討した。また、舗装用地中レーダ探査装置の探査性能の安定化改良のための仕様設計および性能特性評価を行った。

平成 30 年度は、MWD の実道での検証を行うとともに、測定値から舗装のたわみ量を算出するための解析プログラムを作成した。また、地中レーダにより路盤の水分率分

布の傾向を捉えた。

2. 移動式たわみ測定装置の実用化に向けた検討

2.1 サスペンションの異なる車両の検討

MWD に使用している車両は、サスペンションにリーフスプリング（板バネ）を使用しており、走行中の振動が非常に大きい。図 2-1 に示すように、路面の凹凸が大きい箇所では車両が振動した際、測定値がセンサの許容レンジを越えてしまうと、測定値が飛んでしまう。現在使用しているドップラー振動計は、測定値に対して低周波の成分を捉えるような処理が行われており、一度値が飛んでしまうと前の値をホールドしたまま数秒間復帰しない。

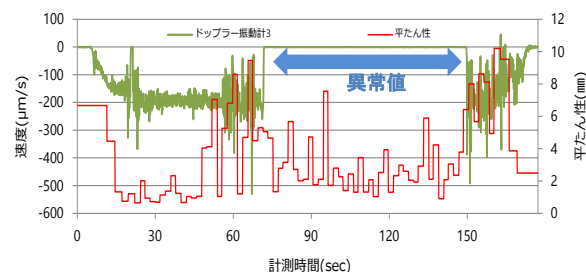


図 2-1 振動による測定値の飛び

この飛びを残した状態で解析を行うと、本来のたわみ量に

対し誤差が大きい値が算出されてしまう。

センサの飛びを抑えるためには、センサ自体を改良するか、振動の少ない車両を使用する方法が効果的であると考えられる。そこで、現在のMWDとサスペンションの異なる車両を使用し研究所の外周路を走行し、上下方向加速度について比較を行った。

図2-2および図2-3に、時速40km/hで走行し車両の上下方向の加速度およびそのスペクトル解析結果を比較した結果を示す。上下方向の振動については、エアースプリングを用いることで、リーフスプリングを使用時に生じていた高周波の大きな加速度が低減されることが分かる。続いてスペクトル解析結果を見ると、リーフスプリングでは3.0Hzおよび35.0Hz、エアースプリングでは

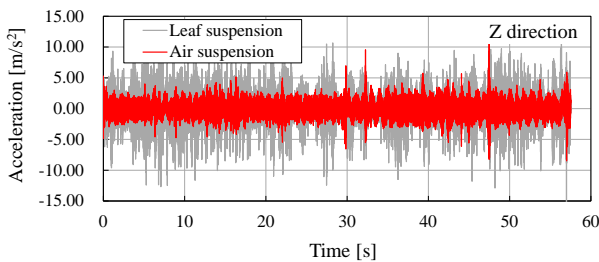


図2-2 上下加速度の比較

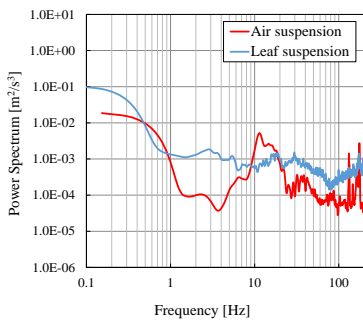


図2-3 上下加速度のスペクトル解析結果の比較

1.1Hz および 17.5Hz 程度の振動が卓越しており、エアースプリングの方が固有振動数は低いものと考えられる。

振動の大きさ自体はエアースプリングを採用することで低減することができ、ドップラー振動計による測定時に測定値の飛びが発生する頻度は少なくすることが出来ると考えられる。

H29年度は、MWDに使用している車両をエアースプリング車へと変更し、ドップラー振動計による測定値の飛びの発生が抑制できるか検証を実施した。

土研構内での計測の結果、エアースプリング車にすることで、車両の振動成分が小さくなり、ドップラー振動計の飛びが発生しないことを確認した。

2.3 レーザー変位計による車両姿勢の測定

ドップラー振動計の受信部は、厳密には真下を向いているわけではなく、垂直方向に対して2~3°程度の角度をつけた状態で取り付けられている。従って、図2-4に示すように測定した値には車両の速度成分が含まれており、以下の式(1)に従い、車両の速度成分を取り除く必要がある。

$$\frac{dw}{dt} \approx u - v \sin \theta \dots\dots\dots (1)$$

現在は走行中のセンサの角度は一定であるという仮定のもと、測定前にθを求め速度成分を除去しているが、車両は走行中に姿勢が変化するため、θは一定でない。そのため、特に姿勢の変化が大きくなる箇所については特に誤差が大きくなると考えられる。

ドップラー振動計の動的な角度変化を計測するためには、走行中の車両の姿勢を計測する必要がある。計測

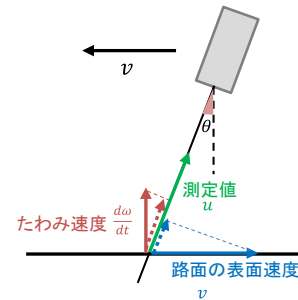


図2-4 センサの角度とたわみ速度の関係

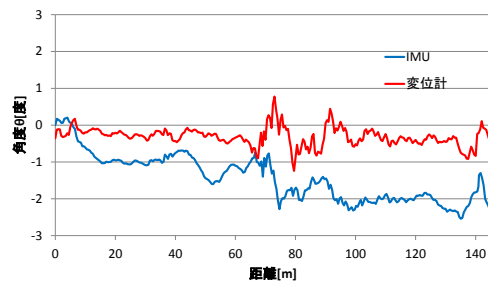


図2-5 レーザー変位計とIMUの角度比較

手法としては、ジャイロセンサを使用する方法が一般的であるが、非常に高価であるため、将来的な実務での適用を考えると費用面での課題がある。そこで、たわみ測定用に設置しているレーザー変位計を用いて簡易に車両の姿勢を測定する方法について、検討を実施した。

検討においては、路面のプロファイルを取得するために3つのレーザー変位計を使用しており、更にIMUによる姿勢計測機能も有するタイプの路面性状測定車を使用した。

図2-5に測定結果を示す。車両の傾きは0.5m間隔で算

出した。単純に角度の値で比較するとレーザー変位計による角度とIMUによる角度に一致性は見られなかったが、大小関係の傾向については一定の類似性が見られた。

H29年度は、MWD測定車の車体に設置したレーザー変位計にて得られる車両の傾きが正確に計測できるかを検証するため、土研構内にてMWD測定を実施した。

測定では、式(1)に示す θ の精度を確認する必要があるため、たわみが発生しない($u=0$)連続鉄筋コンクリート舗装を対象とした。式(1)で示す u (たわみ速度)はゼロであるため、 $dw/dt=v\sin\theta$ となれば、レーザー変位計で計測した車両の傾きが正確であることを確認できるため、連続鉄筋コンクリート舗装上での計測とした。

計測結果を図2-6に示す。ドップラー振動計にて得られた計測値(dw/dt)と、走行速度成分($v\sin\theta$)がほぼ一致する結果となり、レーザー変位計にて車両の傾きをほぼ正確に計測できていることを確認した。

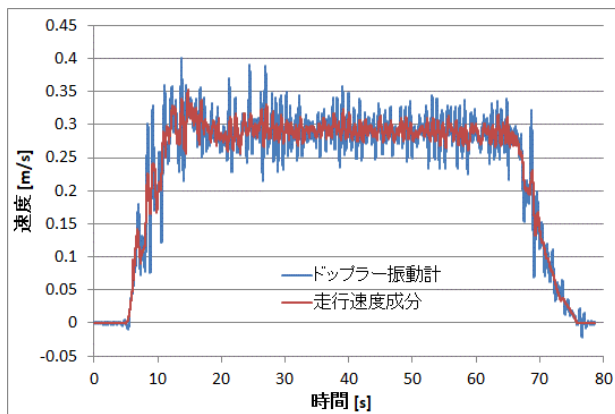


図2-6 たわみ速度測定結果

2.4 実道での検証

H30年度はこれまでの検討結果を踏まえ、土研外周路にてMWDによる測定を行い、FWDたわみ量との比較を行った。測定結果を図2-7に示す。たわみ量の小さい箇所ではFWDたわみ量との差異が見られるが、たわみ量の大きい箇所ではFWDたわみ量との一致が確認できた。また、合計3回の測定を実施しているが、概ね再現性も良好であることが分か

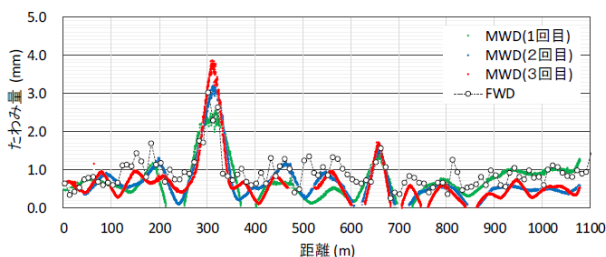


図2-7 MWDたわみ量とFWDたわみ量の比較

る。しかし、一部で不一致の区間がみられることから、今後も実道での検証を実施しさらなる精度向上に取り組む予定である。

2.5 解析プログラムの作成

H30年度は、MWDで測定したたわみ速度からたわみ量を算出するための解析プログラムを作成した(図2-8)。これまでたわみ量の算出にあたり、多くの処理が必要となるとともに高度な技術が必要であり膨大な時間を要していたが、プログラム化することにより高度な技術がなくても瞬時に解析することが可能となった。

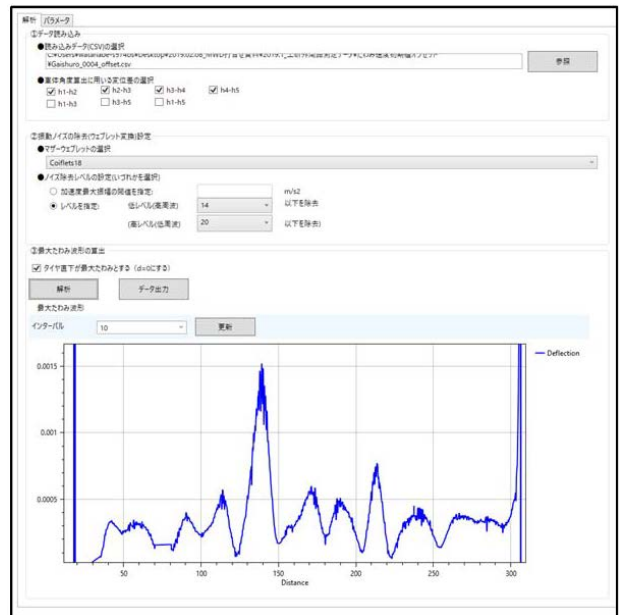


図2-8 MWDたわみ量の解析プログラム

3. 多チャンネル高速牽引型GPR探査システムの実用化に向けた検討

3.1 多チャンネルGPR実証試験装置

多チャンネル地中レーダの普及が進んでいる。1回の高速度走査で同時に複数の地点における記録を取得できるため、一般交通速度による1~2回の走行で車両道路の1車線分相当を調査可能となる仕様性能を有する。GPR探査の高分解能および高再現性を活かして路盤変状の検出が可能となれば、舗装のメンテナンスに有用な測定手法となることが見込まれる。

一般的に、空洞調査用にはボウタイ型のアンテナが用いられており、舗装道路の表層厚の測定にはホーン型のアンテナが用いられている。高速走査を実現するために、地中レーダのアンテナ面と道路表面との間にはある程度の距離が存在する場合が多い。しかし、この隙間は強い多重

反射を生じる。背景除去処理の適用により多重反射ノイズを抑制することが可能であるが、水平境界からの反射信号の振幅も低下させてしまう。

地表接合型のボウタイ型アンテナによる地中レーダ装置を高速で走査させて道路の探査が行えれば、ホーン型アンテナよりも深い探査深度の多チャンネルの記録が取得でき、路床を含む舗装道路構造全体の状態の探査には適している。そこで、地表接合型で地上への漏洩電磁波が抑制された設計のボウタイ型アンテナを備えた地中レーダ装置による舗装道路探査の適用試験を行った。

ハンディ型(図3-1)と車両牽引型(図3-2)の2種類の性能評価を行った。どちらも送信器4ch、受振器8chが配置された装置となっている。アンテナ面と路面との間の距離は、ハンディ型はほぼ接触した状態で、車両牽引型は5~10mmに調整されている。

アンテナ配置を図3-3に示す。送受信の組み合わせは32組となり、これらから約75mm離れた異なる地点の送受信記録が計14点同時に取得できる。送受信間隔の異なる記録の取得も可能で、伝播速度の推定が可能である¹⁾。電磁波は直交性を有するコード搬送信号の送信方式²⁾であり、一般的なパルスやステップ周波数方式と異なる。現時点では、他の既存方式と大きな性能差は認められないが、今後の開発で同時送信による大幅な探査速度の向上が見込まれる。



図3-1 ハンディ型多チャンネルGPR



図3-2 車両牽引型多チャンネルGPR

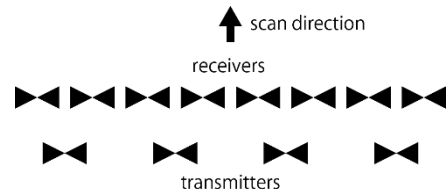


図3-3 多チャンネルGPRのアンテナ配置

多チャンネル記録は、土木研究所内の舗装走行実験場で試験記録を取得した。歩行移動速度と車両移動速度の2種類の探査を行い、どちらもサンプリング間隔は0.1 nsで記録を取得した。走査位置はRTK-GNSSにより0.05~0.1秒間隔で測位した。

3.2 高速走行試験

試験で用いた多チャンネルGPRの特徴は、アンテナ面と道路路面間の距離が、5~10mmの大変小さな隙間に調整されている点である。このため、アンテナと道路路面との電磁波の伝搬接合が良好となり、空中への損失や多重反射による雑音が抑制される。一方、高速走行により路面の起伏の影響を強く受け、データ品質が変化することが懸念される。

走査速度を変更させて同一地点を探査した記録を図3-4に示す。それぞれ、時速20kmと60kmで走行して取得した記録断面である。記録品質として大きな相違は認められず、高速走査においても十分な記録品質で記録が取得できている。

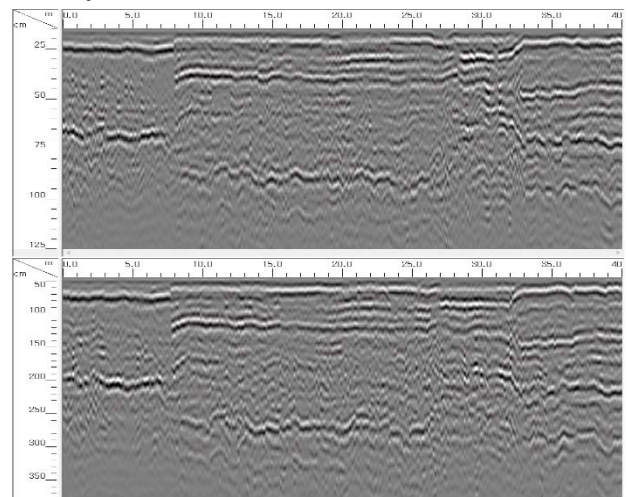


図3-4 走行速度による記録の相違。上から20km/h、60km/hで走行時に取得した記録

3.3 深度スライス断面による埋設物のイメージング

管状埋設物の検知性能を、深度スライス断面で評価する。多チャンネルGPRによる記録を図3-5に示す。縦断方向のみ7回の走査で得られた98測線を用いている。探査時間は準備撤収を除いて10分程度である。管状埋設物を明瞭

にイメージングできている。

多チャンネルGPRでは、シングルチャンネルGPRに比べて少ない走査回数で高密度な測線記録が得られることから、縦断方向の記録のみで、横断方向だけでなく縦断方向の管状埋設物の検知に成功している。

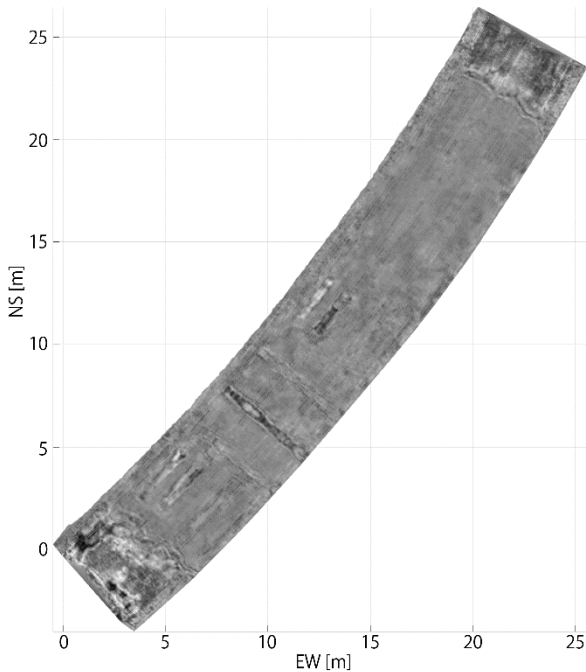


図 3-5 多チャンネル GPR 記録の深度スライス断面による管状埋設物のイメージング

3. 4 路盤路床構造の検出

地中レーダ記録にNMO補正を適用し、ゼロオフセットプロフィール（送受信点が同一点にある記録）を作成した。NMO補正には伝播速度分布が必要となる。多チャンネル地中レーダシステムには複数の送受信アンテナが配備されており、異なる送受信間隔の記録を解析することによりRMS（2乗平均）速度を推定することができる。図3-6に試験地で推定した区間速度例を示す。

図3-7は試験探査のゼロオフセットプロフィール例を示す。探査断面は舗装構造が変化する継ぎ目に相当し、明瞭にアスコン層と上部路盤層の浅部境界を捉えている。ゼロオフセット記録では空中を伝播する直接波の影響が抑制されている。浅部道路構造と比較的深部の路面下空洞を高速走査記録を用いても同時に捉えることができる可能性がある。

クラッシャーランと路床、または、アスファルト安定化処理層の間の境界が明瞭に確認できる。一方、クラッシャーランと粒度調整砕石層の境界は明瞭な境界を確認

することができない。一方、アスコン層と粒度調整砕石層との間の境界は明瞭に確認できるが、アスコン層とアスファルト安定化処理路盤層の間の境界では明瞭な反射イベントを捉えられていない。

同じ道路区間で異なる場所を走査した複数の記録を取得し、地中レーダの3次元データセットを用意した。このデータから水平スライス断面が可能となる。図3-8は表層からわずか12 cmの浅部断面例であり、アスコン層下部の水平境界をイメージング可能であることを示している。図3-7の右側は図3-8の北部域（右側）に相当する。南部域の境界は明瞭であるが北部域の振幅は小さいことがわかる。

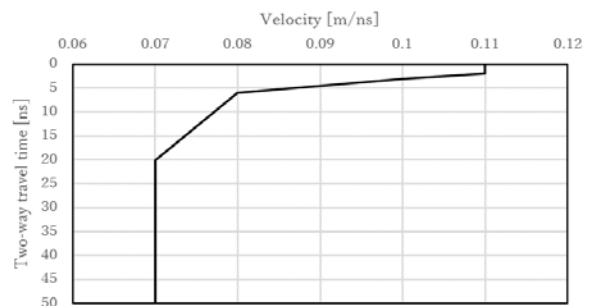


図 3-6 舗装道路のRMS速度分布例

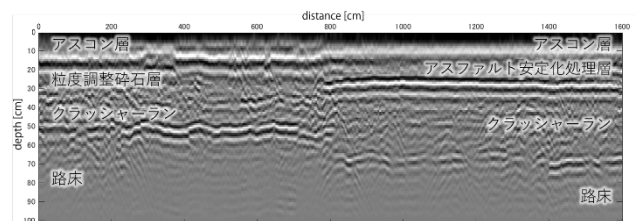


図 3-7 舗装道路の記録断面例

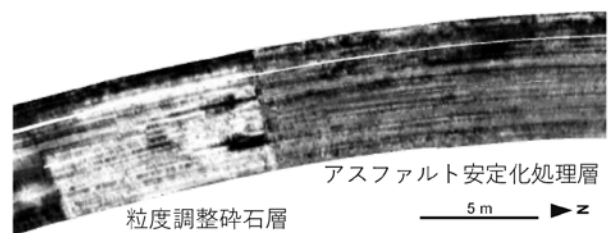


図 3-8 舗装道路の深度スライス断面例

3. 5 路盤の水分率分布の推定

舗装道路の損傷を促進させる要因に水分が関係していると考えられている。電磁波の伝播速度は水分率と高い相関を有するため、電磁波の伝播速度を求めれば、水分の分

布を推定することができる。電磁波の伝播速度は、伝播経路の異なる応答記録の解析により行える。点散乱体の場合は、アンテナの位置を変えて測定した記録を用いることができるが、舗装道路の場合は明瞭な点散乱体が少ないため、送受信点の中心位置は同じであるがアンテナの間隔が異なる記録を用いる必要がある。多チャンネル地中レーダでは、送受信点位置の異なる記録を同時に得ることができ、これを解析に用いた。

図 3-7 や図 3-8 の記録と同じ場所の路盤の電磁波伝播速度の推定値を図 3-9 に示す。電磁波の伝播速度が速いと一般的に水分率が低い傾向があるため、水分率の大小を平面分布として捉えることができる。ただし、電磁波速度と水分率は線形関係ではないため、水分率の値の推定は室内試験による検証などが必要となり、今後の課題となる。

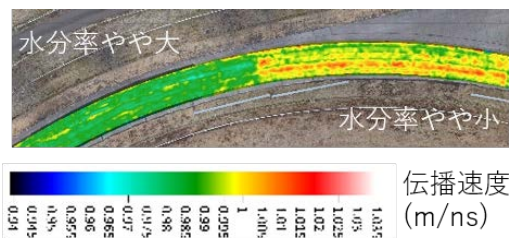


図 3-9 路盤の電磁波伝播速度の推定

4. まとめ

MWD の精度向上に向けた検討として、車両のサスペンションによる振動比較とレーザー変位計による車両角度測定の検討を行った。H29 年度は移動式たわみ測定装置の実用化に向け、測定データから車両振動等のノイズの除去しより精度の高い路面のたわみ量を計測する方法について検討を行った。その結果、車両を従来の板バネ車をエアサスペンション車両とすることにより車両振動等のノイ

ズをより効率よく除去できること、また、車両の傾斜を測定する機器を車両に取り付けて、この車両の傾斜をたわみ量の算定に反映させることにより、より精度の高いデータを取得することがわかった。H30 年度は、実道での検証の結果、FWD たわみ量と概ね一致していることを確認するとともに、解析プログラムを作成し、高度な専門知識がなくても短時間でたわみ量を算出することを可能にした。今後は、実道での計測を重ね更なる精度向上を目指す。

また、外部への漏洩電磁波が抑制された多チャンネル GPR の仕様設計および性能評価を行った。高速度走査においても低速度時と大きな差異のない良好な記録取得が行えることを確認した。地表接続型アンテナを備えた多チャンネル地中レーダは多重反射が抑制された地中記録を取得することができ、背景除去処理を適用せずに道路内部構造の水平境界を明瞭に捉えることができる。NMO 補正はアスコン層下部の浅部境界の特定に有用である。舗装道路を高速度走査で探査可能な、地表接続型のボウタイ型アンテナを備えた地中レーダは、道路内部状態の状態把握に有用である。また、既往の記録に追加解析を適用するだけで、水分率を推定できる可能性が示された。今後は、現場への実装を目的とした技術改良に取り組む。

参考文献

- 1) 尾西恭亮、木佐貫寛、Reeves Bryan : 地中レーダーの稠密探査記録における CMP 重合処理、第 135 回物理探査学会学術講演会講演論文集、pp.80-83、2016.1
- 2) Reeves, B. : Noise modulated GPR: Second generation technology. 15th International Conference on Ground Penetrating Radar. 6 p. 2014.6

6.3 措置が必要な部位・箇所の優先度決定手法の開発

6.3.1 既設橋の合理的な性能評価手法および補修・補強方法に関する研究

担当チーム：橋梁構造研究グループ

研究担当者：上仙靖、高橋実、坂本佳也

【要旨】

高度経済成長期に建設された膨大な道路橋ストックの高齢化が進む中で、近年、国内では鋼トラス橋斜材が腐食欠損により破断する重大な損傷が発生している。トラス橋およびアーチ橋における主構部材の腐食損傷については、橋全体系の安全性に影響を及ぼす可能性があり、構造物の状態を適切に調査・診断する技術が求められている。本研究では、腹材より圧縮力を受ける鋼トラス橋格点部におけるガセットの耐荷力評価の一検討として、弦材とボルトの離れに着目した鋼トラス格点部の耐荷力試験を実施し、弦材とボルトの離れが鋼トラス格点部の耐荷性能に及ぼす影響について調べた。

キーワード：鋼トラス橋、格点部、局部座屈、耐荷性能、維持管理

1. はじめに

2007年に発生した米国の鋼トラス橋の崩落事故、そして同年、国内の鋼トラス橋での腐食による斜材破断事故を契機に、橋梁におけるリダンダンシーが注目されるようになり、主構部材およびトラス格点部の耐荷力評価に関わる研究^{1)~4)}が行われている。鋼トラス橋や鋼アーチ橋の骨組系構造では、主構部材の耐荷力喪失が橋全体の安全性に影響を及ぼす可能性が高く、構造特性に応じた適切な維持管理手法が求められている。

鋼トラス橋では、ガセットを介して弦材と斜材を連結するため、ピン結合と仮定した設計モデルと剛結に近い実橋の挙動とが乖離する。既設橋の状態を把握し、さらに格点部の塑性化まで考慮した補強方法を提案するためには、実際の挙動を考慮して構成部材の残存耐荷力を評価する必要がある。しかしながら、鋼トラス橋格点部におけるガセットの現行設計法は、必要板厚等の構造細目によるものとなり、骨組解析による断面力からガセットの応力を算出し照査する方法が規定されていない。

本研究では、斜材より圧縮力を受ける鋼トラス橋格点部におけるガセットの耐荷力評価の一検討として、弦材と斜材の取付けボルトの離れに着目した鋼トラス格点部の耐荷力試験を行った。まず、試験体諸元を決定するために、対象橋梁を決定するための概略設計を行った。この概略設計結果に基づいた諸元を有する格点部試験体を製作し、大型試験機を用いて2つの斜材にそれぞれ圧縮と引張を作用させた2軸載荷試験を実施し、弦材とボルトの離れが格点部の耐荷力に及ぼす影響について調べた。

2. 対象とする格点部構造の概略設計

2.1 設計条件

格点部ガセット板厚が弦材ウェブと同厚となるのではなく斜材軸力により決定されるようなトラス橋諸元と格点部位置を検討するために、表-1に示す条件下でトラス橋全体の概略設計を行った。

なお、トラス形式の条件のうち、弦材と斜材のなす角については、これまで実験検討を実施してきた旧銚子大橋のトラス格点部3種類のうちいずれかと同じとなる条件とした。これは格点部用の載荷治具を既に3種類保有しており、これらを有効利用した載荷試験の実施を前提としたためである。

2.2 トラス橋概略設計結果

表-1の条件を満足するトラス橋として、図-1、表-2に示す7つのケースについて概略設計を実施した。

表-1 対象橋梁の主な設計条件

橋梁形式:	下路式鋼トラス橋 単純支持、連続形式(2径間)の順で検討
トラス形式:	ワーレントラス(鉛直材なし) 弦材と斜材のなす角が旧銚子大橋のトラス格点P25dと同じとする
床版形式:	鉄筋コンクリート床版 厚さ 230(mm)
舗装:	アスファルト舗装 厚さ 80(mm)
活荷重:	B活荷重-I
添架物:	なし
道路等条件:	中央分離帯なし、歩道なし
使用鋼種:	SM490Y-H、SM400-H
適用基準:	道路橋示方書 平成24年

表-2に示す単純トラス橋のケース1、2、3、4では、いずれのケースにおいても、弦材は支間中央に近づくほど軸力が大きくなり断面板厚が厚くなるが、斜材は支間中央に近づくほど軸力が小さくなった。このため、弦材ウェブ板厚より斜材ウェブ板厚が厚くならなかった。

連続トラス橋のケース5、6、7では、ケース5のみ全格点部において弦材ウェブ板厚より斜材ウェブ板厚が厚くならなかった。一方、ケース6、7においては中間支点付近の格点部において弦材ウェブ板厚より斜材ウェブ板厚の方が厚くなった(図-1中の該当格点部に丸印を記載)。ケース6、7を比較した結果、格点部の板厚が約10mmと比較的薄くなるケース7を対象橋梁として選定した。

2.3 対象格点部の試験体の設計

対象橋梁は、図-2に示す橋長136.8mの鋼2径間連続下路トラス橋とし、概略設計により主構部材断面やボルト継手部を決定した。载荷試験の対象とした格点部は、既設橋に多く採用されている斜材とガセットが2面添接となる構造とし、ガセット板厚が斜材軸力により決定される条件(弦材ウェブ板厚より厚くなる条件)を満足する位置(図-2の赤丸位置)とした。図-3に格点部試験体の寸法形状を示す。斜材はいずれも箱断面であり、鋼種はSM400である。図-4にガセットの材料試験結果(ロール方向)を示す。ロール直角方向は省略するが同様の結果であった。腐食欠損のない健全な状態の試験体を新たに製作した。試験体数は、弦材とボルトの離れを変化させた3体とし、いずれもH24道路橋示方書を満足する諸元である。

製作は基本的に実橋と同様の施工としたが、斜材や弦材の箱断面部材の製作方法では次の点に配慮した。断面を構成する4枚の鋼板のうち3枚を先に組立溶接及び本溶接した後に、最後に残り1枚の鋼板を落とし込んで箱断面(閉断面)を溶接して完成させるのが一般的であるが、この方法では箱断面内のダイアフラムは最初の3枚の鋼

板とは溶接されるものの、最後に落とし込む鋼板との溶接が不可能となり、構造的に载荷軸に対して対称とならない。今回の試験では、構造的な対称性を優先して、ダイ

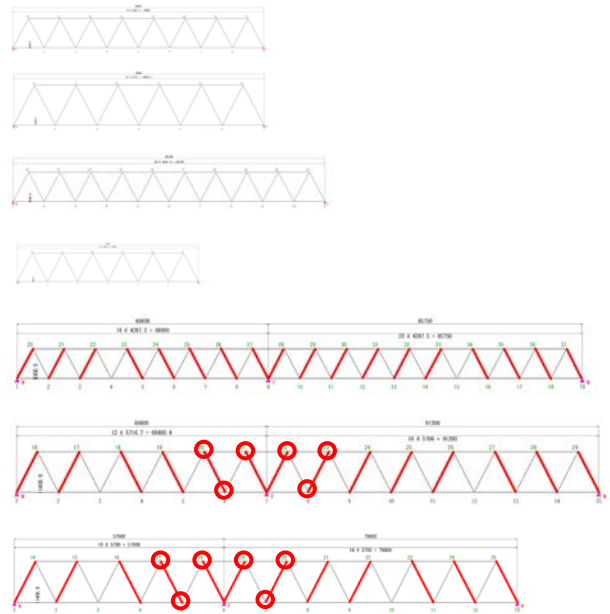


図-1 概略設計したトラス橋の一般図

表-2 概略設計した橋梁諸元

No.	形式	支間長(m)	主構高さ(m)	支間の格間分割数
1	単純トラス	68.6	8.3	8分割
2		68.6	11.4	6分割
3		85.75	8.3	10分割
4		51.45	8.3	6分割
5	連続トラス	68.6+85.75	8.3	8分割+10分割
6		68.6+91.2	11.4	6分割+8分割
7		57+79.8	11.4	5分割+7分割

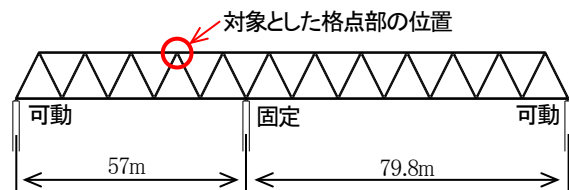


図-2 対象橋梁

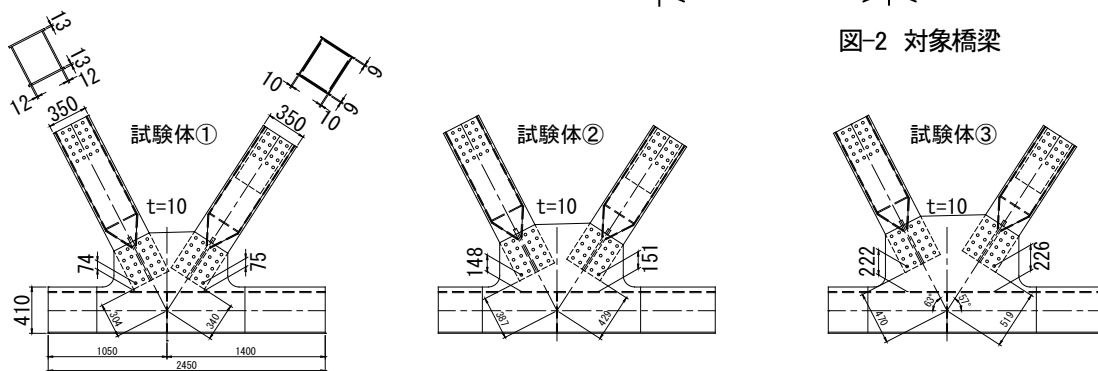


図-3 格点部の試験体の形状寸法

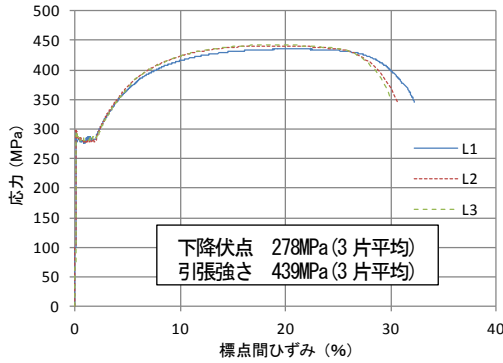


図-4 材料試験結果(ロール方向)

アフラムはフランジのみ 2 面溶接し、ウェブとは溶接せず、荷重軸に対して構造的に対称となるよう配慮した。

3. 荷重試験

図-5 に荷重試験の概要を示す。荷重試験は、まず、それぞれの斜材に圧縮荷重および引張荷重を交互に同値になるよう 2 軸荷重し、引張荷重が設計断面力とほぼ同じ 1,500kN に達するまでそれぞれ漸増させる。次に、引張力は斜材の設計断面力とほぼ同じ 1,500 kN に一定保持させたまま、圧縮力のみ圧縮破壊に至るまで増加させた。圧縮斜材および引張斜材のそれぞれの設計断面力を図-6 に示す。

圧縮荷重は、土木研究所所有の 30MN 大型構造部材万能試験機 (写真-1 参照) により荷重し、引張荷重は荷重治具に設けた 2,000kN センタホールジャッキ 4 台を取付けた自定式フレームにより荷重した。

4. 荷重試験結果

4. 1 圧縮斜材の荷重変位関係と変形状況

図-7 に圧縮斜材の荷重と圧縮斜材の軸方向変位の関係を示し、写真-2 に除荷後の試験体の変形状況を示す。荷重試験における圧縮最大荷重は、試験体①②③の順にそれぞれ約 3,900kN、約 3,600kN、約 3,180kN であった。破壊形態は、試験体①が圧縮斜材の局部座屈、試験体②③がガセットの局部座屈であり、これらの発生に伴い耐力が失われたものと考えられる。図より最大荷重以降の挙動は、試験体②③と比べて試験体①が最も緩い耐力低下挙動を示した。よって圧縮斜材の局部座屈の方がガセットの局部座屈と比べて変形性能が高い傾向となった。圧縮斜材の降伏荷重は、ガセットに差込んでいる H 断面部より箱断面部の方が小さく材料試験結果に基づくと約 5,010kN である。試験体①では圧縮最大荷重は降伏荷重に至らなかった。試験体①は圧縮斜材の箱断面から H 断面に変化する遷移区間を含めて局部座屈変形しており、そ

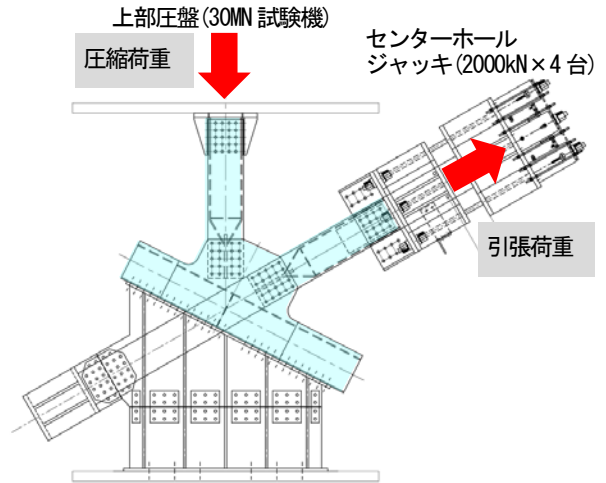
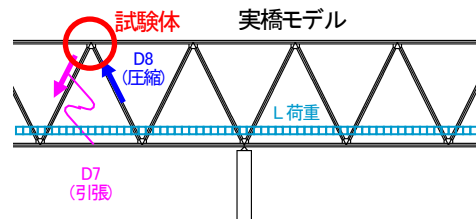


図-5 圧縮と引張の 2 軸荷重



		D7 引張斜材	D8 圧縮斜材
死荷重	ND	1063	-1063
活荷重	NL	576	-576
合計	ND+L	1639	-1639

図-6 L 荷重荷重時の設計軸力(単位: kN)



写真-1 30MN 大型構造部材万能試験機の全景

の部分には 2 面溶接したダイヤフラムが含まれているため、この構造的な要因が最大荷重の大きさに影響を及ぼしている可能性がある。

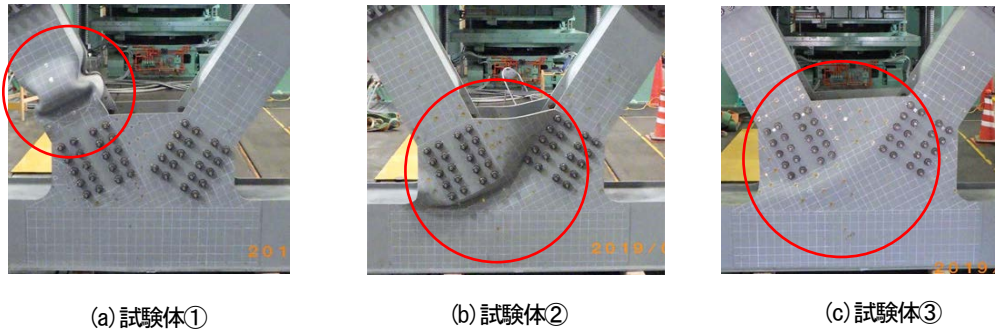


写真-2 試験後の変形状況

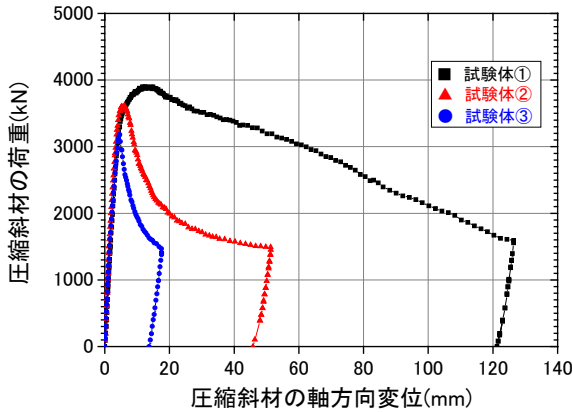


図-7 荷重試験結果

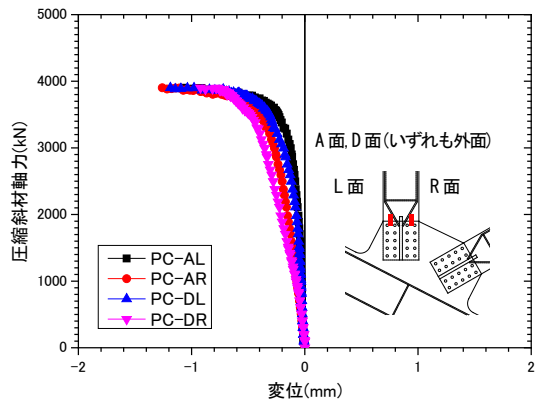


図-8 斜材とガセット間の π ゲージ (試験体①)

4. 2 ボルト継手部の滑りとガセットの主ひずみ

図-8 に格点部試験体の圧縮斜材とガセットのボルト継手部の滑り挙動について、試験体①を代表として示す。図は、最大荷重時までをプロットした。

図-9に格点部試験体のガセットの主ひずみについて示す。図には、ガセットおよび圧縮斜材の降伏時と最大荷重時の分布を示している。

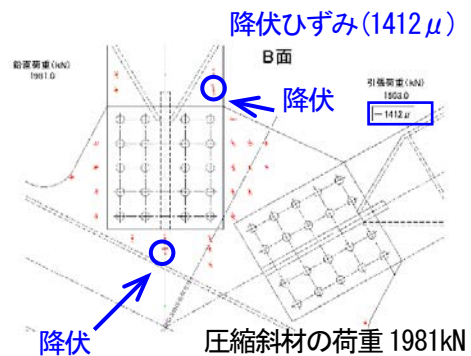
図-8、9より、ガセットおよび斜材の降伏時を超えて、3000kNくらいまでは、ボルト継手部の滑り変位は顕著に増えていないが、3000kNを超えたあたりから、急増しており、滑りが発生した可能性が高い。

図-9より、最大荷重時には、ガセットはほぼ全域が降伏している様子が確認できる。

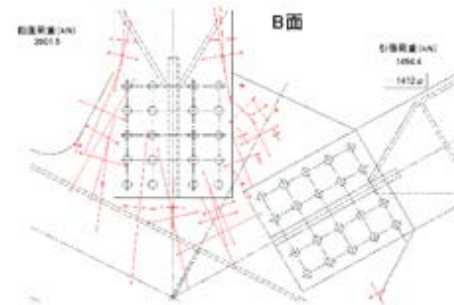
5. まとめ

本研究を通じ、次の知見が得られた。

- (1) 今回実施した弦材とボルトの離れに着目した鋼トラス格点部の耐荷力については、離れ量によって次の項目が異なることがわかった。①座屈耐荷力、②座屈発生部位、③座屈モード、④座屈に伴い変形エネルギー吸収量、⑤じん性。



(a) ガセットおよび圧縮斜材の降伏時



(b) 最大荷重時

図-9 ガセットの主ひずみ (試験体①)

- (2) 今回実施した試験体の諸元は、弦材と斜材の離れ量を含め、いずれも道路橋示方書を満足しているものであるが、斜材の局部座屈が生じた結果については、現行基準値を若干下回った結果となった。
- (3) ガセットの局部座屈と比較して斜材の局部座屈の方が、耐荷力およびじん性が高く、従って、座屈に伴う変形エネルギー吸収量も高かった。
- (4) 今回の結果から、斜材およびガセットの耐荷力算定式を提案するために必要となる実験的基礎データが得られた。

今後、3次元弾塑性FEM解析により今回の実験結果を検証するとともに、形状寸法をパラメータとした解析によるトラス格点部の耐荷性能について検討予定である。

参考文献

- 1) 笠野英行、依田照彦：米国ミネアポリス I35W 橋の崩壊メカニズムと格点部の損傷評価、土木学会論文集 A、Vol. 66、No. 2、pp. 312-323、2010. 6
- 2) 永谷秀樹、明石直光、松田岳憲、安田昌宏、石井博典、宮森雅之、小幡泰弘、平山博、奥井義昭：我国の鋼トラス橋を対象としたリダンダンシー解析の検討、土木学会論文集 A、Vol. 65、No. 2、pp. 410-425、2009. 5
- 3) 村越潤、遠山直樹、澤田守、有村健太郎、郭路、依田照彦、笠野英行、野上邦栄：腐食劣化の生じた鋼トラス橋格点部の圧縮耐荷力に着目した載荷試験、構造工学論文集 Vol. 59A、pp. 156-168、2013. 3
- 4) 山口隆司、吉田晋侑、橋本国太郎、杉浦邦征：高力ボルト摩擦接合された 2 面添接形式鋼トラス橋格点部の力学的挙動とその有効幅算定法に関する 2、3 の考察、鋼構造論文集、第 18 巻第 71 号、pp. 27-42、2011. 9

6.3 措置が必要な部位・箇所の優先度決定手法の開発

6.3.2 舗装マネジメントの効率化に関する研究

担当チーム：道路技術研究グループ（舗装）、
寒地保全技術研究グループ（寒地道路保全）、
地質・地盤研究グループ（特命）、材料資源研
究グループ（先端材料・高度化）

研究担当者：藪雅行、木村孝司、齋藤清志、西
崎到、稲崎富士、寺田剛、丸山記美雄、渡邊一
弘、尾西恭亮、佐々木巖、星卓見、大浦正樹、
若林由弥

【要旨】

本研究は、既設舗装を対象に維持修繕を行う際の優先度決定手法の構築に向け、新たな路面評価手法を提案すること及び非接触表面波探査手法を用いた舗装の局所的な構造評価を提案することを目的としている。平成 28～29 年度は、重交通道路については修繕工事前後の路面・構造調査を、軽交通道路においては路面性状データの分析を通じて路面破損の形態について分析を行った。また、非接触高周波表面波探査システムの開発に向け、S 派速度構造に基づく舗装の劣化度評価手法を提案した。

キーワード：舗装、構造破損、路面破損、実態調査、表面波探査、S 波

1. はじめに

舗装の維持修繕を行う際の優先度決定手法の構築に向け、路面特性及び構造特性の面から、既設舗装を適切に評価することが求められる。本研究では、措置が必要な部位・箇所の優先度決定手法の構築に向け、新たな路面評価手法及び局所的な構造評価手法を提案することを目的としている。

平成 28 年度は、重交通道路については修繕工事前後の路面・構造調査を、軽交通道路においては路面性状データの分析を通じて路面破損の形態について分析を行った。また、局所的な構造評価手法に関しては、非接触表面波探査手法を用いた、S 派速度構造に基づく舗装の劣化度評価手法を提案した。

平成 29 年度は、構造的健全度の回復を目的とする場合は、詳細調査を通じた適切な修繕工法の選定が効果的であることが分かったため、日本道路会議等の場を通じて発表し、路盤の健全性の保護を通じた舗装の長寿命化という舗装点検要領の考え方の普及をはかった。また、舗装路盤に適した表面波解析手法として、非接触高周波表面波探査の効率を向上させる改良技術を検討し、高周波の表面波を探査可能な装置を作製した。

平成 30 年度は路盤の健全性が損なわれた場合の詳細調

査のあり方を検討するため、詳細調査のうち路盤の状況を直接的に把握できる開削調査について分析を行った。また、非接触高周波表面波探査装置の実用性を向上させた。

2. 重交通道路における舗装の損傷実態調査

2.1 背景

平成 28 年 10 月に策定された「舗装点検要領」（以下、「点検要領」という。）においては、損傷の進行が早い道路等に分類されたアスファルト舗装について、表層の供用年数に対する使用目標年数の設定を通じ、早期に劣化した区間に対しては詳細調査を実施した上で適切な措置を選定することが求められている¹⁾。点検要領に基づくメンテナンスサイクルを運用していく上で、今後はより一層詳細調査の重要性が増してくると考えられる。詳細調査の手法としては、FWD たわみ量調査、コア抜き調査及び開削調査が点検要領の付録に例示されているが、開削調査は交通規制面等での制約が大きく、現場実務においては FWD たわみ量調査やコア抜き調査が主体になるものと考えられる。しかしながら、それら詳細調査に基づく工法選定が、舗装の構造的健全度の回復度にどのような影響を与えるかはあまり明らかになっていない。

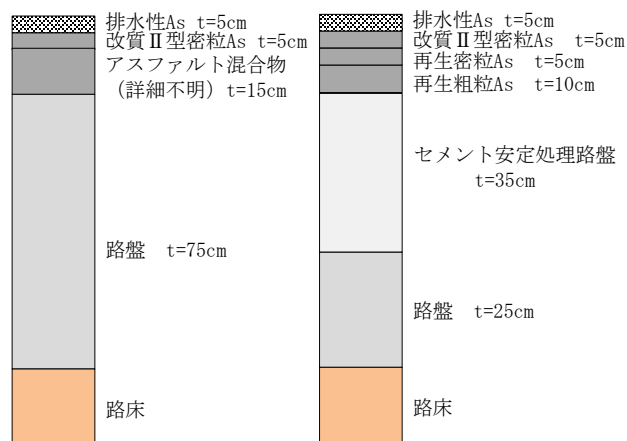
本研究では、損傷の範囲が表層・基層である場合を対象に、コア抜き調査をもとに修繕工法を選定した修繕工事現場にて、FWD たわみ量調査を修繕工事の前後で実施し、舗装の構造的健全度の回復状況に関して実態調査を行った。

次に損傷範囲が路盤に至っている場合を対象に、開削調査に至る前の、路面性状調査や FWD たわみ量調査の結果から、どのような調査結果の場合に開削調査を実施するかが重要であるか、実大の走行実験を通じて分析した。

2.2 調査箇所

調査箇所は、コア抜き調査結果をもとに修繕工法を選定した修繕工事現場とした。場所は、関東地方整備局管内の直轄国道（往復2車線）であり、平成22年道路交通センサス²⁾では、大型車交通量は舗装計画交通量N6区分に該当する道路である。線形はほぼ直線であり、工事延長はL=約600m（上下線とも）である。

修繕工事前の舗装構成は、過去の修繕工事の設計図書の情報をもとにすると、起点側から約430mを境に変化しているものとなっており、その舗装構成を図2-1に示す。いずれもアスファルト混合物層（以下、「アスコン層」という。）厚は25cmであり、また図中の路盤は舗装



起点～約430m区間 約430m～終点(約600m)区間

図2-1 舗装構成

構成より粒状路盤と考えられる。なお、前回修繕工事は今回修繕工事の16年前に実施しており、起点側から約430mまでは2層（t=10cm）の切削オーバーレイ、約430m以降は舗装打換え（図2-1中のセメント安定処理路盤層より上の施工）である。

2.3 現場内のコア抜き本数

当該工事現場では、工事着手前に区間内のコア抜き調査が行われている。コア抜き調査は、道路管理者の指示の



図2-2 コア抜き調査結果

下、修繕工事受注業者が修繕前の路面の損傷状況を元に調査箇所を選定して実施し、その結果コア本数は下り車線が11本、上り車線が13本であった。

2.4 コア抜き調査結果を踏まえた修繕工法の選定

前節に示したコア抜き調査により、アスコン層内の損傷は様でないことが明らかとなった。具体的には、表層の路面側を起点としたひび割れ（トップダウンひび割れ）が中間層までにとどまっているもの、ひび割れからの雨水の浸入に起因すると想定される層間剥離を引き起こしているもの、さらに進行して中間層、基層やアスファルト安定処理層部の混合物自体が剥離を引き起こしているもの、及びアスコン層（ $t=25\text{cm}$ ）を貫通しているものと様々であった。当該修繕現場では、これらの状況を踏まえ、ひび割れ深さが15cm以上入っている区間をアスファルト混合物層の全層（ $t=25\text{cm}$ ）打換え、それ以外の区間を2層（ $t=10\text{cm}$ ）の切削オーバーレイと修繕工法が選定された。

このように、同一現場内でもアスファルト混合物層内部の損傷は様々となりうることを認識しておく必要がある。当該現場のコアの状況を図2-2に示す。なお、図中のうち、「アスコン層内部の混合物自体の剥離が進行／ひび割れがアスコン層を貫通」の写真の一部は、コア側面のひび割れ部分のチョークによるトレースができていない。

2.5 修繕工事前の路面性状調査

当該修繕工事区間において、修繕前に路面性状調査を行った。その結果を表2-1に示す。これより、上下車線共に損傷は進行しており、また、どちらかと言えばひび割れによる損傷が卓越した区間であることが分かる。実際の現場では、ひび割れの他車輪通過部にわだち部オーバーレイ工（レーンパッチング）の実施箇所が点在しており、日常的な維持管理に苦慮していた様子が観察される路面状況であった。修繕前の路面の代表写真を写真2-1に示す。

表2-1 修繕工事前の路面性状調査結果

路面性状		下り車線	上り車線
ひび割れ率 (%)	区間平均	24	31
	最大値 (10m単位)	69	72
わだち掘れ量 (mm)	区間平均	17	17
	最大値 (10m単位)	32	46
平坦性 (mm)	区間平均	2.8	3.1



写真2-1 修繕工事現場の路面状況

2.6 修繕工事前後のFWDたわみ量調査

修繕工事前後において、OWP上で起点から20m間隔でFWDたわみ量調査を実施した。上下車線とも、路線の起点側を測点No.0とし、順に20m間隔で測点を振り、終点側を測点No.30とした。また、FWDたわみ量については、「舗装性能評価法—必須および主要な性能指標編—」³⁾に従い20℃換算で補正している。

舗装の構造的健全度として、路床を含めた舗装全体の支持力を示す載荷点直下のD0たわみ量に着目し、それを

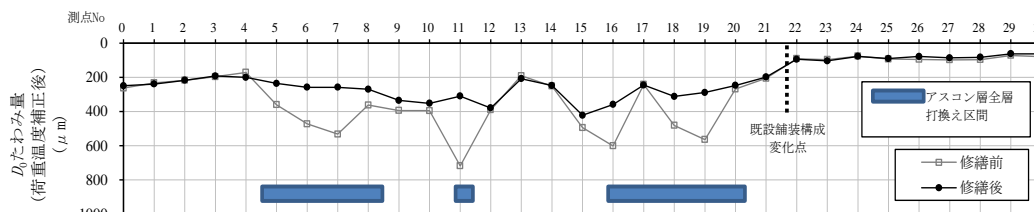


図2-3 修繕工事施工前後のD0たわみ量の比較（下り車線）

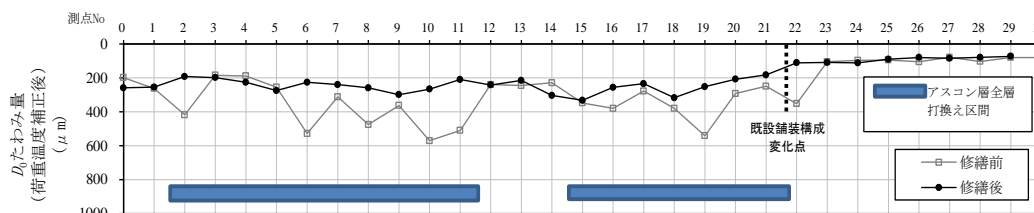


図2-4 修繕工事施工前後のD0たわみ量の比較（上り車線）

グラフ化したものを図2-3、図2-4に示す。また、同図中には、アスコン層全層 (t=25cm) 打換えの区間を表示している。この表示以外の区間は、t=10cmの切削オーバーレイの区間である。これより、当該現場では、2.4に示したコア抜き調査によるひび割れ深さに着目した修繕工法の選定が、舗装の構造的健全度の概ね均一なレベルへの回復に大きく寄与したことが分かる。渡邊らは、別の現場にて一律の一層切削オーバーレイを実施した場合の修繕前後の構造評価を行った結果、当該区間内の構造的健全度のバラツキは概ねそのままであったことを報告している⁴⁾。この報告と照らし合わせると、構造的健全度の回復を目的とする場合は、詳細調査を通じた適切な修繕工法の選定が効果的であることが分かる。この結果については、平成29年度の日本道路会議等の場を通じて発表し、路盤の健全性の保護を通じた舗装の長寿命化という舗装点検要領の考え方の普及をはかった。なお、実際の修繕工事は、構造面のみならず路面機能面など様々な理由を勘案し道路管理者が総合的な判断のもとその区間・内容を決定するものであり、本報はその是非を議論するものではないことを申し添える。

当該現場では、多数のコア抜きによるアスコン層内部の損傷確認を実施したが、現場制約条件等から全ての現場で同様の取組を実施することは困難と考えられる。今後は、非破壊で面的にアスコン層内部の損傷状況を把握する手法の検討が必要と考えられる。

2.7 路盤損傷時の開削調査に関する実験

舗装走行実験場において試験舗装を構築し、実大載荷実験を実施した。路盤における損傷を早期に発現させるために、疲労破壊輪数が10万輪程度になる構造の試験舗装を軟弱路床上に構築した。試験舗装の断面図を図2-5に示す。試験舗装はアスファルト混合物層および粒状路盤層からなる2層とした。既設路床のCBRは2.0であり、試験舗装の等価換算厚さTAが19cmであることから、算出される疲労破壊輪数は約8万輪となる。当該実験では25万輪まで促進載荷を実施し、所定の走行輪数ごとに調査を実施した。

開削調査に先立って、路面性状調査並びにFWD調査を実施した。路面性状測定結果として図2-6に走行輪数に対するひび割れ率の推移を、図2-7に路面横断形状の変化を示す。ひび割れについては10万輪走行までは発現せず、その後20万輪および25万輪走行の時点にかけて増加傾向となった。わだち掘れ深さについては、1.5万輪走行時に約20mmまで急増した後、10万輪で約30mm、40万輪で40mmと漸増した。20万輪時点以降はわだち掘

層	材料	厚さ (cm)	T _A (各層) (計)
表層	密粒(13)改II	5	5
路盤層	粒度調整碎石	40	14
路床	シルト質粘性土	-	-

図2-5 実大載荷実験の試験断面

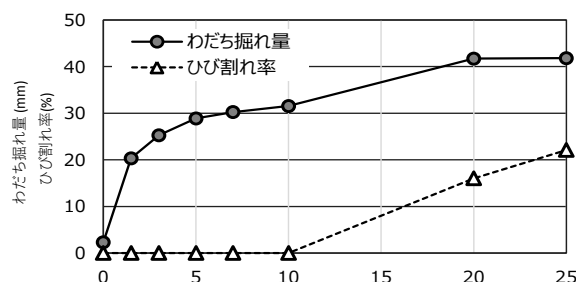


図2-6 走行輪数に対するひび割れ率の推移

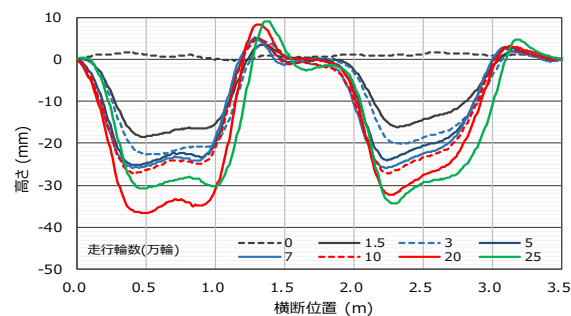


図2-7 路面横断形状の変化

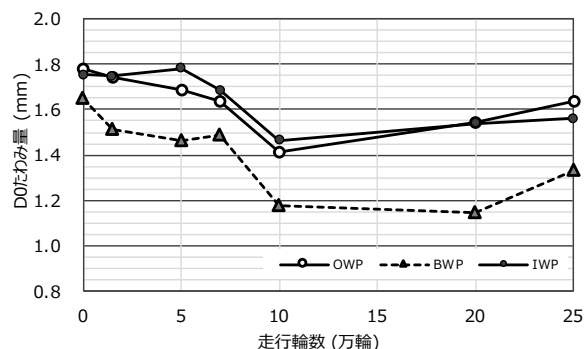


図2-8 FWD たわみ量

れの進展がみられなかった。

次にFWDによる載荷部直下のたわみ量D0の測定結果を示す。図2-8より、10万輪走行まではたわみ量が減少し支持力が増加する傾向がみられた。その後、ひび割れの生じた20万輪走行以降において、たわみ量の微増傾向がみ



写真 2-2 開削調査時の舗装状況

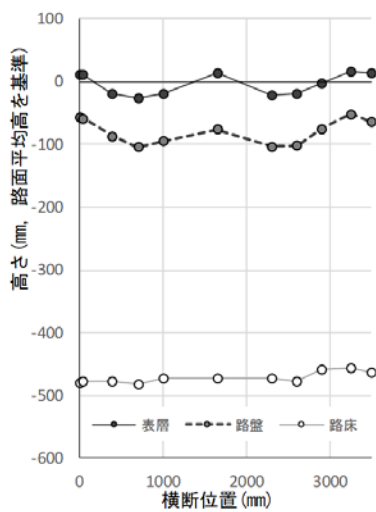


図 2-9 開削調査時の舗装の各層厚

られた。

25 万回の荷重終了後に、開削調査を実施した。写真 2-2 に舗装の状況を、図 2-9 に各層上面位置を示す。表層の厚さはわだち掘れの箇所においても、荷重前後で変化が小さく、わだち掘れの深さは路盤層の変形に起因するところが大きいことが把握できた。

以上のとおり、わだち掘れの進展に対してひび割れの発生が遅れていた間に、FWD たわみ値が減少する傾向がみられた。このことから推察すると、アスコン層が薄いため路盤に塑性変形が発生するとともに、剛性が高まったものと考えられる。また 20 万輪走行時にひび割れが確認されて以降は、表層および路盤層において FWD たわみ値の増加傾向がみられた。このことから、ひび割れの進展が舗装の構造的損傷に影響を与えていることが示唆される。

3. 軽交通道路における舗装の損傷実態調査

3.1 背景

重交通道路と軽交通道路では、舗装の損傷形態に応じ

て点検診断時の着目点や維持管理手法が異なる可能性があるため、本研究では重交通道路と軽交通道路の損傷状況の特徴を把握する調査を行った。

3.2 調査方法

北海道内の国道約 6,500km を対象にアスファルト舗装の損傷実態を把握した。具体的には、現道の目視調査を行って、舗装管理支援システムに記録されているデータの区間毎(約 100m 単位)のひび割れ種類を判別し、どのような種類のひび割れがどのような条件の路線に多いかを調べた。判別したひび割れの種類は以下の 4 種類である。通過車両の繰返し荷重によって発生し舗装下面から上層に向かって伸びるボトムアップ型疲労ひび割れ(以下、ボトムアップひび割れ)、舗装表面から下層に向かって伸びるトップダウン型疲労ひび割れ(以下、トップダウンひび割れ)、路床内の水分が凍結して形成されるアイスレンズが成長することで生じる凍上ひび割れ、気温の上昇・下降によるアスファルト混合物の温度応力によって生じる低温ひび割れである。一つの区間に複数種類のひび割れが発生している場合には、複数種類のひび割れが発生している区間として扱った。目視調査のデータを基に、ボトムアップひび割れ、トップダウンひび割れおよび凍上ひび割れに関しては、ひび割れ率が 5.0%以上の区間数を 10km 毎にカウントして地図上に表示した。低温ひび割れに関しては、1km 当たりの低温ひび割れ発生本数をカウントして地図上に表示した。さらに、各々のひび割れが N_4 、 N_5 、 N_6 、 N_7 交通断面のうちどのような区間に多いのかを整理した。ちなみに本研究では、 N_4 、 N_5 交通を軽交通道路区間として扱っているので留意されたい。

なお、調査は自動車専用道路を除く下り車線を対象とし、構造物区間やコンクリート舗装区間など表 3-1 に該当するデータの区間長を除外した上で集計した。これらのデータを除外した理由は、一般的なアスファルト舗装区間に比べて舗装構成や基盤条件が特殊であり、除外するのが妥当と考えたためである。

表 3-1 除外区間一覧 (単位: m)

項目	延長(m)
舗装延長	6,584,198
除外区間	
① 構造物	177,348
② 最新ひび割れ率が空欄	109,396
③ 最新調査後に工事	1,331,079
④ 上り・及び自専道	152,190
⑤ 最新調査時からルート変更・通行止め	16,702
⑥ Co舗装区間	135,109
⑦ 累積大型車交通量が空欄、舗装厚不明	127,112
舗装延長-除外区間	4,535,262

3.3 調査結果

図 3-1 にボトムアップひび割れの発生分布図を、図 3-2 にトップダウンひび割れの発生分布図を、図 3-3 に凍上

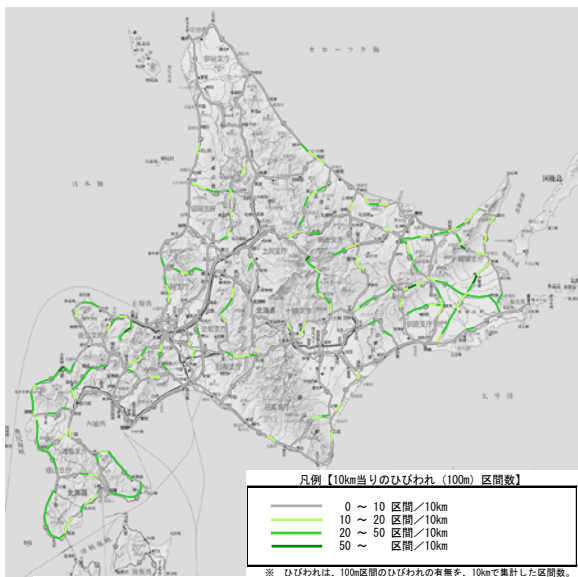


図 3-1 ボトムアップひび割れの発生分布図

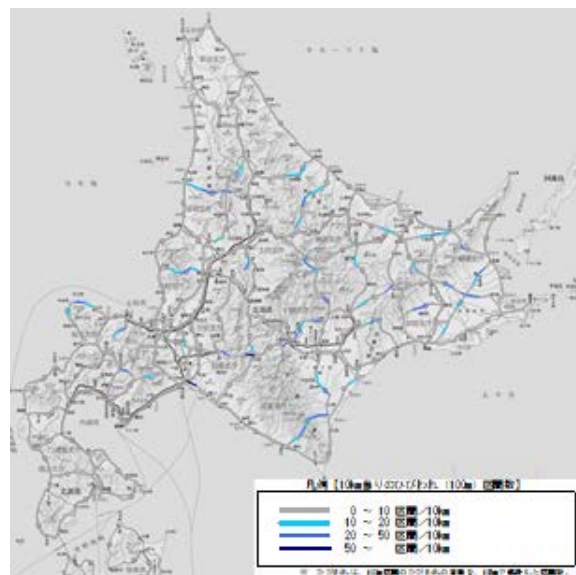


図 3-3 凍上ひび割れの発生分布図

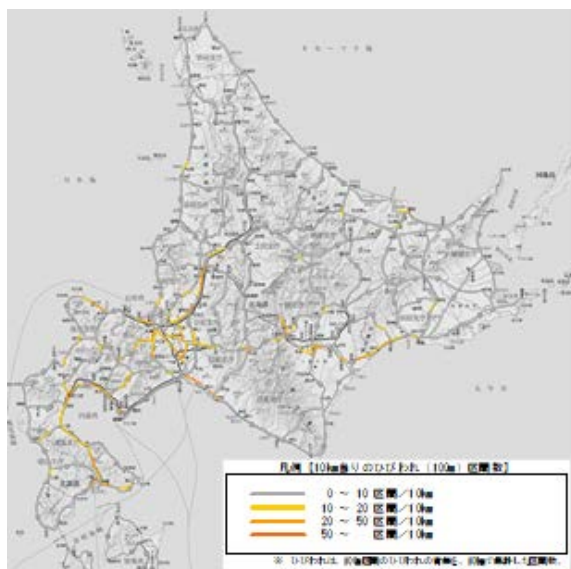


図 3-2 トップダウンひび割れの発生分布図

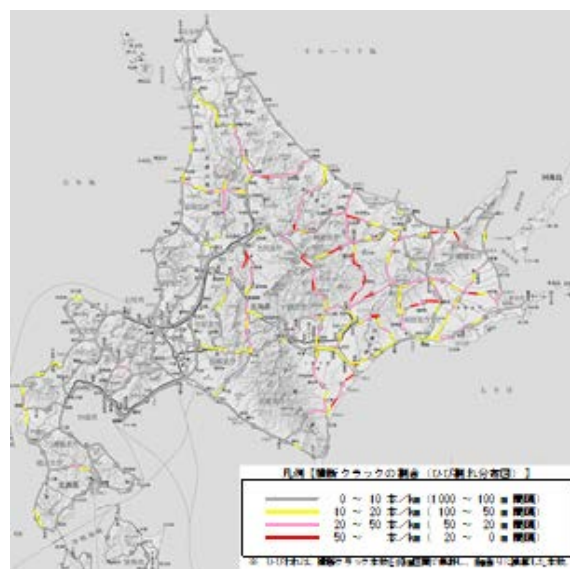


図 3-4 低温ひび割れの発生分布図

ひび割れの発生分布図を、図 3-4 に低温ひび割れの発生分布図を示す。図 3-1 より、ボトムアップひび割れは、道内の広い範囲に発生しており、主に郊外部において多く発生していることがわかる。図 3-2 より、トップダウンひび割れは札幌近郊と札幌函館間や札幌旭川間などの幹線道路での発生が多い。図 3-3 と図 3-4 より、凍上ひび割れと低温ひび割れは道北地域や道東地域の内陸部に多く発生していることが分かる。

表 3-2 には各ひび割れの発生延長及び調査集計区間の延長に対する発生比率を示す。赤枠で囲んだ部分に着目すると、ボトムアップひび割れ、凍上ひび割れ、低温ひび割れは N_4 、 N_5 交通断面などの舗装厚の薄い軽交通路線に多く発生していることが分かる。一方、トップダウンひび割れは N_6 、 N_7 交通断面などの混合物層厚が厚い重交通路線に発生している傾向が見られる。軽交通路線は混合物

層厚が薄いため、作用する力に対する抵抗性が小さく、様々なひび割れが発生し易いと推察される。軽交通区間では、特にボトムアップひび割れの発生区間延長が最も長く、次いで低温ひび割れ、凍上ひび割れの順であることが着目される。つまり、軽交通区間ではボトムアップひび割れに対する対処が最も多くなると理解できる。以上のように、交通断面によってひび割れ損傷の形態は異なっている。 N_4 、 N_5 交通断面などの混合物層厚の薄い軽交通路線区間に着目すると、ボトムアップひび割れや低温ひび割れ、凍上ひび割れが発生しやすいことが確認された。 N_4 、 N_5 交通断面などの軽交通路線区間の舗装マネジメントならびに舗装維持修繕計画を考える場合には、これらの損傷形態への対処方法を検討することが大切である。特に、ボトムアップひび割れは広い範囲で発生している実態にあり、今後舗装の老朽化が進行するにつれて増加する性

表 3-2 各ひび割れの発生延長及び調査集計区間の延長に対する比率

交通量区分	As混合物厚 (cm)	14cm未満	14cm以上 20cm未満	20cm以上 30cm未満	30cm以上	合計
	ID	A	B	C	D	
ひび割れ種別	現	N ₄	N ₅	N ₆	N ₇	
	調査集計区間の延長(m)	2,557,530	1,353,654	508,295	115,783	4,535,262
ボトムアップひび割れ	ひび割れ発生区間の延長(m)	336,044	150,288	10,135	932	497,399
	調査集計区間の延長に対する発生区間比率(%)	13.1%	11.1%	2.0%	0.8%	11.0%
トップダウンひび割れ	ひび割れ発生区間の延長(m)	131,273	62,707	46,451	7,845	248,276
	調査集計区間の延長に対する発生区間比率(%)	5.1%	4.6%	9.1%	6.8%	5.5%
凍上ひび割れ	ひび割れ発生区間の延長(m)	112,752	59,233	11,036	113	183,134
	調査集計区間の延長に対する発生区間比率(%)	4.4%	4.4%	2.2%	0.1%	4.0%
低温ひび割れ	ひび割れ発生区間の延長(m)	229,742	105,960	13,781	995	350,478
	調査集計区間の延長に対する発生区間比率(%)	9.0%	7.8%	2.7%	0.9%	7.7%

質のひび割れであると考えられるため、要点であるといえる。

4. S波速度構造に基づく舗装の劣化度評価手法

4.1 高周波表面波探査による舗装S波速度構造把握

舗装の表面に打撃振動を与えると、舗装構成部材中で弾性波動が伝播する。伝播する弾性波動のうち、表層部を選択的に伝播する表面波を測定して舗装の物性構造を2次元断面として可視画像化する方法が表面波探査である。舗装構造調査に利用されてきているFWDも、同様に打撃時の弾性波振動を測定し、その測定データから静荷重負荷時のたわみ量を推定しているため、表面波探査法の一つであるという点では類似した手法である。ただしFWDが測定する振動の周波数帯域が数100Hz程度以下であるのに対し、開発対象とする手法は数10Hz~数kHzの高周波数帯域の表面波を測定する。そこで本手法を高周波表面波探査と称している⁵⁾。舗装は最表層部にせん断剛性が最も大きいアスファルト混合物層(アスコン層)が存在し、通常は輪荷重を分散させるため下方ほどせん断剛性が小さくなるという特徴的な構造を有しているが、高周波表面波探査はこのような最表層の剛性の高い層が存在する一般的な舗装構造でも適用可能である。またアスコン層や上下層路盤を伝播する表面波は、数100Hz~数kHzの周波数帯域が卓越する。逆にこの周波数帯域の表面波を測定することで舗装の物性構造を推定する。

図4-1に高周波表面波探査記録からの舗装構造解析手

順を例示する⁵⁾。同図左上が測定記録である。2.4mのアレイ区間に10cm間隔で加速度センサを並べ、舗装表面を小型ハンマーで打撃したときの振動を計測する。この

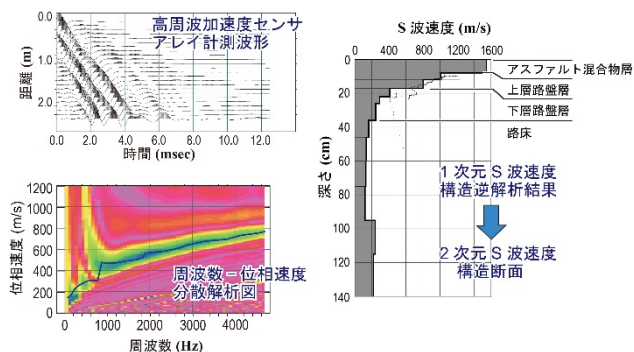


図 4-1 高周波表面波探査による舗装構造の解析手順 (文献⁵⁾に加筆)

アレイ内を3ms程度で伝播する優勢な表面波が捉えられている。この時間-距離領域の記録を、周波数-位相速度領域に変換することで表面波分散曲線(同図左下)が求められる。この分散曲線には、100Hzから5kHz程度の周波数帯域において、表面波の位相速度が周波数によって変化する現象、すなわち表面波分散が鮮明に捉えられている。この分散特性に着目し、逆解析によって1次元S波速度構造を求める(同図右)。この逆解析を測線に沿って逐次繰り返すことによって2次元のS波速度構造断面を構築する。この図には、厚さ8cm程度のアスコン層に対応した高速度層が再現されていること、下位にはS波速度が800m/sから300m/s程度の上下部路盤層が分布する。路床・地盤部のS波速度は200m/s程度であり、N値に換算すると6-8程度の柔らかい盛土材料・地盤が分布していると推定することができる。

4.2 非接触型高周波表面波計測システムの開発

高周波数帯域の振動を測定できる加速度センサアレイを路面に稠密に展開し、舗装を伝播する高周波表面波を観測することによって舗装の物性構造を推定できることがわかった。しかし加速度センサを用いる場合、舗装路面へセンサを固着することが必須条件となり、路上での作業区間の設定と安全性確保のために通行規制を必要とするという欠点があった。そこで、非接触で移動が容易な表面波測定システムを試作し^{6,7)}、その機能を検証する比較検証実験を実施した。

測定方法の概念図を図4-2に示す⁷⁾。舗装路の表面をハンマー等で打撃すると、実体波とともに表面波が励起され、舗装表面を伝播する。この表面波によって舗装表面が振動すると、その一部が空気中に漏洩する。これは漏えい表面波と称される波動で、超音波工学分野では広

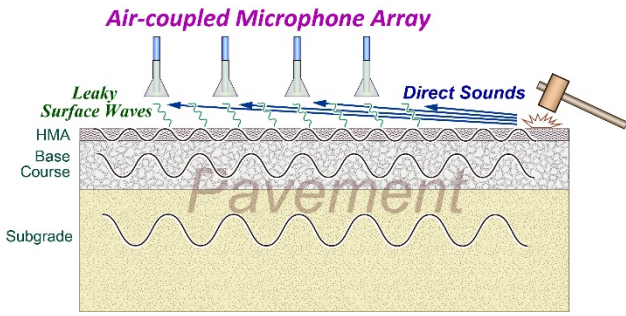


図 4-2 非接触型高周波表面波計測の概念図²⁾

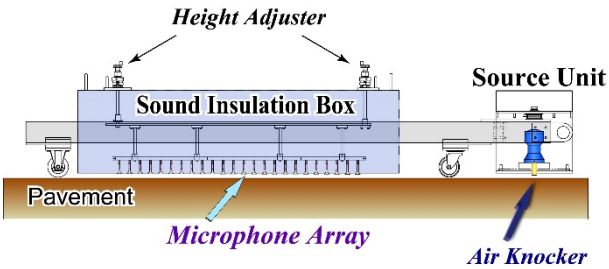


図 4-3 非接触舗装路物性計測システムの構成図⁶⁾

く計測産業に利用されている。舗装伝播表面波は、舗装構造によって速度分散性を有しているので、漏洩表面波にもそれが反映される。そこでマイクロフォンを舗装面と平行に多数並べるアレイ配置で漏洩表面波を計測するように工夫した。図 4-3 に試作した非接触型高周波表面波測定装置試作システムの構成を示す⁶⁾。本システムはホイール付きのフレームに懸架されており、路上を容易に牽引し、移動計測が可能である。非接触型のマイクロフォンアレイは遮音函体に収納されており、振源から直接空中を伝播する打撃音を極力低減させるよう設計されている。なお、移動時には遮音函体を上昇させ、測定時には下降させて路面と密着させる昇降装置が取り付けられている。測定地点における作業時間は、遮音函体の昇降、振源の操作およびデータ取得を含め、検証実験段階では5秒程度であった。

4. 3 非接触型高周波表面波計測システムの改良

非接触型高周波表面波計測システムは、微弱な漏洩表面波を信号として扱うことから、環境音響雑音の抑制が技術開発上の重要点となる。このため、遮音函体と吸音材およびその寸法や形状の検討試験を進め、平成 29~30 年度に改良を図った。チャンネル数を増大し実用性を高めた。一般に、遮音材が高密度で厚みがあるほど雑音低減性が高まるが、高品質かつ高い効率で記録取得を可能とするには探査作業装置としての可搬性も重要となる。図 4-4 に良好と考えられる遮音函体とマイクロフォンの配置設計例を示す。試験遮音函体を用いて取得された記録例

を図 4-5 に示す。図 4-5 の (b) は記録波形を位相速度と周波数の領域に変換し位相速度の分散曲線を示している。周波数 4.5Hz までの分散特性を取得できている。

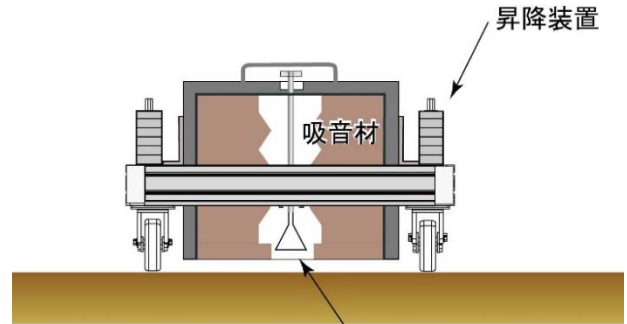


図 4-4 遮音函体とマイクロフォンの配置例⁸⁾

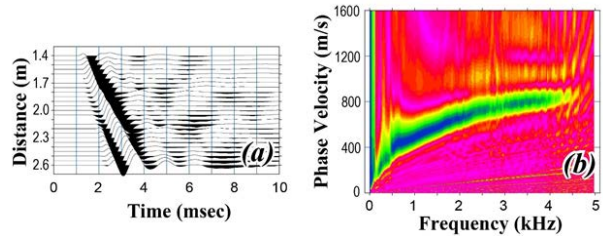


図 4-5 非接触型高周波表面波計測の (a) 取得記録と (b) 分散曲線⁸⁾

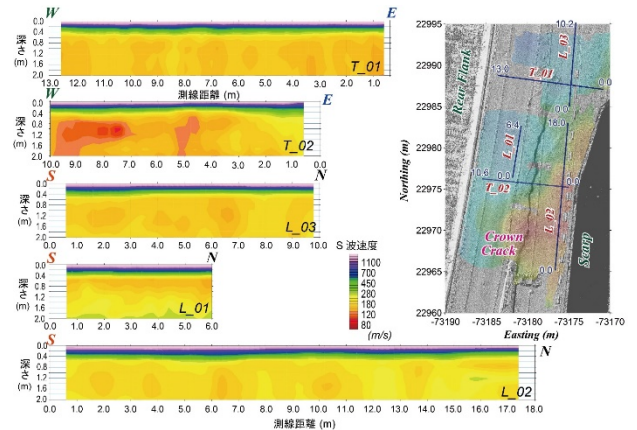


図 4-6 測線配置 (右図) および各測線の S 波速度構造断面 (左図)

4. 4 高周波表面波探査の実舗装路での適用検証

熊本地震で 120gal 程度の強震動を受け、その後の豪雨によって高盛土の一部が崩壊した自動車専用道路において、残存部の舗装の内部物性を把握することを目的として高周波表面波探査を実施した。路面には滑落崖と平行に長さ 25m 程度の東側落ちのクラックが発生していた。このクラックを挟むように 5 本の測線を設定し、2次元の S 波速度構造を再構成した。

測線配置および各測線のS波速度構造断面を図4-6に示す。調査区間の舗装は、15cmのアスコン層と合計23cmの路盤層で構成され、その下位は客土材で盛り立てられていることがわかってきた。S波断面においても、表層にアスコン層および路盤層が高速度層として明瞭に捉えられている。層厚はほぼ一定であり、同時に実施した地中レーダ（GPR）探査の結果と整合的であった。またクラックを横断するT_02測線断面には、交差部で路床部のS波速度が周囲より小さくなっており、クラックの下方進展を捉えていると推定できる。なお当該区間はこの路盤面での調査後に一部開削され、当該クラックがほぼ鉛直に1.3m下方まで進展していることが確認されている。また盛土崩壊とは反対側の路線下の路床層が、相対的に低いS波速度を呈していた。盛土施工時の不均一性の影響が示唆される。

4.5 舗装路盤に適した表面波解析手法の検討

標準的な地盤のS波速度分布は、深部になるほど速くなる。一般的に行われている表面波の解析では、最下層に高速の工学的基盤層を仮定し、最下層を最高速度層として最下層速度よりも小さい範囲でノーマルモードの分散曲線を計算する。しかし、舗装道路のように、表層に高速度層が存在すると厚い低速度層が出現し、多数の高次モードが現れ、解析が複雑となる場合がある。最下層速度の設定により浅部の推定速度分布が大きく影響を受ける場合には、地表震源の振動が最下層に到達しているか注意が必要となる。地表起震による表面波のうち、震源位置から遠くない範囲の地震波動の高速度成分は、高速度層からのリーケージ（漏洩）モードとして解析し、最下層の速度条件に影響を受けない計算手法が適している。そこで、平成29年度に表層に高速度層が存在する条件におけるリーケージモードの解析を進めた（図4-7）。リーケージモードは舗装等の高速度層が表層域に存在する際に、最下層の速度より高速の分散曲線として現れる。

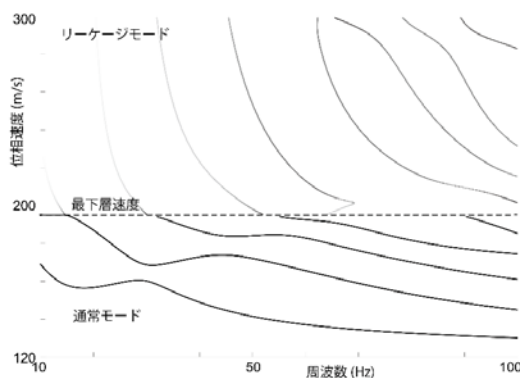


図4.7 リーケージモードの特性分析

最下層のS波速度は195m/sで、これより速い位相速度はリーケージモードである。リーケージモードでは表面波の水平方向への伝播とともに振幅が減衰しており、濃淡で減衰を表している。現在普及している表面波の解析手法では、最下層よりも高速な層の解析は難しく、舗装構造の解析を安定して行うために、今後は、リーケージモードを用いたS波速度分布の解析手法の開発が課題となる。

4.6 S波速度を示標とした優先度の評価手順の検討

現位置で、舗装内部の物性構造を2次元あるいは3次元的に把握することが可能な原位置調査手法としては、地中レーダのほか、MWDを含めた振動計測手法が最も有効であり、かつ技術的ハードルも低い。一方、舗装を伝播する振動のうち、S波速度は地盤強度の調査にも広く用いられており、液状化等の危険がある地盤にも対応した速度を示すことが知られている³⁾。ただし現時点ではS波速度分布を利用した舗装の健全度示標は構築されていない。今後室内実験での比較データの取得、FWD、MWD等の他の原位置調査データとの関係性の検討を進め、S波速度を用いた舗装健全度示標の提案を行なう予定である。

5. まとめ

平成28年度においては、重交通道路に該当する、関東地方整備局管内の直轄国道において、コア抜き調査結果をもとにした修繕工法の選定が、舗装の構造的健全度の概ね均一なレベルへの回復に寄与したことを明らかにした。点検要領に基づく舗装のメンテナンスサイクルにおいては、損傷の進行が早い道路等における早期劣化区間について、詳細調査の実施を通じた適切な措置が求められるが、本調査結果により詳細調査としてコア抜きによる舗装の内部損傷の把握の重要性を示唆するものとなった。

また、路面性状データの分析を通じ、舗装断面によってひび割れ損傷の形態は異なっており、アスコン層の薄い軽交通道路においては、ボトムアップひび割れや低温ひび割れ、凍上ひび割れが発生しやすいことが確認された。舗装のメンテナンスサイクルにおける適切な措置の選定にあたっては、損傷原因を究明・推定することが重要であり、軽交通道路特有のこれらの損傷形態の整理がメンテナンスサイクル上の適切な措置を選定する上で有効な情報となると考えている。

平成29年度においては、構造的健全度の回復を目的とする場合は、詳細調査を通じた適切な修繕工法の選定が効果的であることが分かったため、日本道路会議等の場

を通じて発表し、路盤の健全性の保護を通じた舗装の長寿命化という舗装点検要領の考え方の普及をはかった。

平成 30 年度においては、舗装の損傷が路盤に至っている場合を想定し、詳細調査のうち開削調査をどのように実施すべきか検討した。実大走行実験の結果によると、路面にわだち掘れが進行しておりかつひび割れの進行が小さい場合は、路盤の圧縮に起因することがわかった。また、路面性状データの分析を通じ、舗装断面によってひび割れ損傷の形態は異なっており、アスコン層の薄い軽交通道路においては、ボトムアップひび割れや低温ひび割れ、凍上ひび割れが発生しやすいことが確認された。舗装のメンテナンスサイクルにおける適切な措置の選定にあたっては、損傷原因を究明・推定することが重要であり、軽交通道路特有のこれらの損傷形態の整理、軽交通舗装区間における簡易な路面性状把握手法がメンテナンスサイクル上の適切な措置を選定する上で有効な情報となると考えている。

さらに、高周波数成分に着目した表面波探査によって、舗装内部の物性構造を詳細に把握できること、S 波速度構造から舗装内部の不均質構造や変形範囲を推定することが可能であることを実証した。また、高周波の表面波を探査可能な実用性を有する装置を作製した。

参考文献

- 1) 武藤聡、久保和幸、藪雅行：「舗装点検要領」の策定について、舗装、Vol.52、No.1、pp.11-15、2017.1
- 2) 国土交通省道路局：平成 22 年度全国道路・街路交通情勢調査 茨城県、64p.、2010
- 3) (公社) 日本道路協会：舗装性能評価法—必須および主要な性能指標編—、pp.15-22、2013.4
- 4) 渡邊一弘、増戸洋幸、篠塚政則、上島壯：短い測定間隔による修繕前後の構造評価結果、土木学会論文集 E1 (舗装工学)、Vol.72、No.3、pp.177-185、2016.12
- 5) 稲崎富士、青池邦夫、今村杉夫、林 宏一：高周波表面波分散特性を利用した舗装の物性構造調査、第 50 回地盤工学研究発表会講演概要集・pp.195-196、2015
- 6) Inazaki, T., Aoike, K., Kita, T., and Hayashi, K., (2014): High-frequency surface wave measurement for the pavement structural analysis, *Proceedings of the 27th Annual Symposium of the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP 2014)*, 7p., 2014
- 7) 稲崎富士：2011 年東北地方太平洋沖地震による河川堤防・表層地盤の S 波速度構造の変化、高周波表面波分散特性を利

用した舗装の物性構造調査、日本地震学会 2016 年秋季大会 予稿集、155p.、2016

- 8) 稲崎富士、木佐貫寛、今村杉夫、林 宏一：非接触舗装路物性計測システムの開発 (その 4)：函体の遮音性の改良と実用化、第 138 回学術講演会講演論文集、物理探査学会、pp.13-16、2018

6.3 措置が必要な部位・箇所の優先度決定手法の開発

6.3.3 先端的維持管理技術による管理用施設（機械設備）マネジメントに関する研究

担当チーム：技術推進本部（先端技術チーム）

研究担当者：新田恭士、中島淳一、上野仁士

【要旨】

土木施設に導入されている各種の土木機械設備は、河川・道路において非常に重要な役割を果たしているが、施設数の増大、老朽化の進行、限られた維持管理予算の相反する条件下で、より適切なライフサイクルマネジメントの導入が進められている。しかしながら近年、想定を超える天災による被災や、これまで重要とされていた部品や機器の故障により土木機械設備の機能喪失が見られることから、機能回復時間等を考慮した信頼性評価と機器や部品レベルでの重要度判断や保全方法の最適化を検討し、それらの総合的なマネジメント手法を確立する必要がある。本研究では、国民の生命、財産を守る上で不可欠な土木機械設備の確実な機能発揮を目指し、土木機械設備の効率的・効果的な維持管理に関する手法について提案するものである。平成30年度は、当チームがこれまで実施してきた河川ポンプ設備を中心とした土木機械設備のストックマネジメントに関する研究結果を基に、機械設備の故障時からの機能回復能力の定量化方法の向上と適用対象設備の拡張を主体に検討を実施した。

キーワード：土木機械設備、維持管理、ストックマネジメント、リスク回避

1. はじめに

土木研究所においては、これまで土木機械設備の効率的・効果的な維持管理の実現を目的として、信頼性評価手法及び関連する複数の施設における社会的な影響度と設備の健全度の総合評価手法、また「非」常用設備への状態監視技術に係る研究を実施し、効果的な更新や整備の計画立案に寄与してきたところである。

土木機械設備の信頼性評価において、故障等のリスクや故障時の機能回復の遅速も有力な要素となるが、これまでこれらを盛り込んだ評価手法が確立されていない。そのため、機器・部品の重要度判断や保全方法の選定にあたり現実と乖離した結果となることがあることから、これらを含めた総合的な信頼性評価手法の確立とマネジメントについて検討する必要がある。

今年度は、信頼性評価手法を用い、機械設備の機能回復期間の定量化方法の精度向上を主体に検討した。

2. 研究実施内容

本研究では、土木機械設備についてより効果的・効率的な土木機械設備の設計及び維持管理に関する手法の提案に資する、以下の研究に取り組んでいる。

- ・故障リスク等を考慮した設備ストックマネジメント手法の検討

3. 研究の基本方針

これまで土木機械設備の信頼性評価に関する研究にお

いて、故障等のリスクや故障時の機能回復の遅速を盛り込んだ評価手法の確立は行われていない。このため、機器・部品の重要度判断や保全方法の選定において、管理実態と乖離することがある。

したがって、故障等のリスクや機能回復の遅速を考慮した信頼性評価とマネジメント手法の確立と、各設備に最適な保全方法の選定手法の検討を行い、基準化に向けての技術資料を策定し提案する必要がある。

これらを実現するにあたって、以下の項目に着目し研究を進める。

- (1) 機械設備の運用、機能回復期間、整備体制等によるリスク回避の定量化方法検討
 - ・故障等のリスク、機能回復の遅速に関するデータ収集及び機能回復難易度、機能補完方針の検討
 - ・災害時に弱点となる設備構造の抽出及びFTA等の信頼性評価手法を活用した弱点克服の検討
 - ・設備構造における弱点を考慮した土木機械設備に最適な信頼性評価手法の提案に向けた課題整理
 - ・抽出された弱点となる機器部品の共有化の可能性、有効性検討及び技術的課題の抽出
 - ・信頼性評価手法を活用したリスク回避の定量化手法の検討
- (2) モデルケースによる定量的評価シミュレーションと設備管理実態の比較検討
 - ・信頼性評価手法を活用したリスク回避の定量化シミュレーション

- ・設備管理実態比較による課題の抽出と対応策検討
 - ・河川GISモデルを用いた浸水被害比較でのリスク回避度合いの評価
- (3) 故障リスク等による機能損失を考慮したストックマネジメント手法の検討
- ・整備・更新の優先度決定への取り込み検討
 - ・複数施設での適応性評価
 - ・手法としてとりまとめ

4. 研究内容

4. 1 故障データの解析

設備の信頼性評価を行う際には、基礎データとして故障実態のデータが必要である。

そこで土木研究所で過年度より実施してきた研究で

データ収集・分析を行ってきたが、後述する機能回復指標の再設定や、点検診断しやすい設備構造の検討への活用のため、改めてデータ分析を行った。今回の対象設備は河川水門設備とした。水門は扉体形式、開閉方式が多種多様だが、標準的なワイヤロープウィンチ式ローラゲートの構成機器例を図-1 に示す。分析データは、国土交通省でとりまとめた、平成19年～平成25年までの河川水門の故障事例(31件)であり、故障発生件数や復旧までの所要時間、費用などを分析した。分析結果からわかったことを以下に列挙する。

1) 装置別故障割合

分析結果を図-2 に示す。

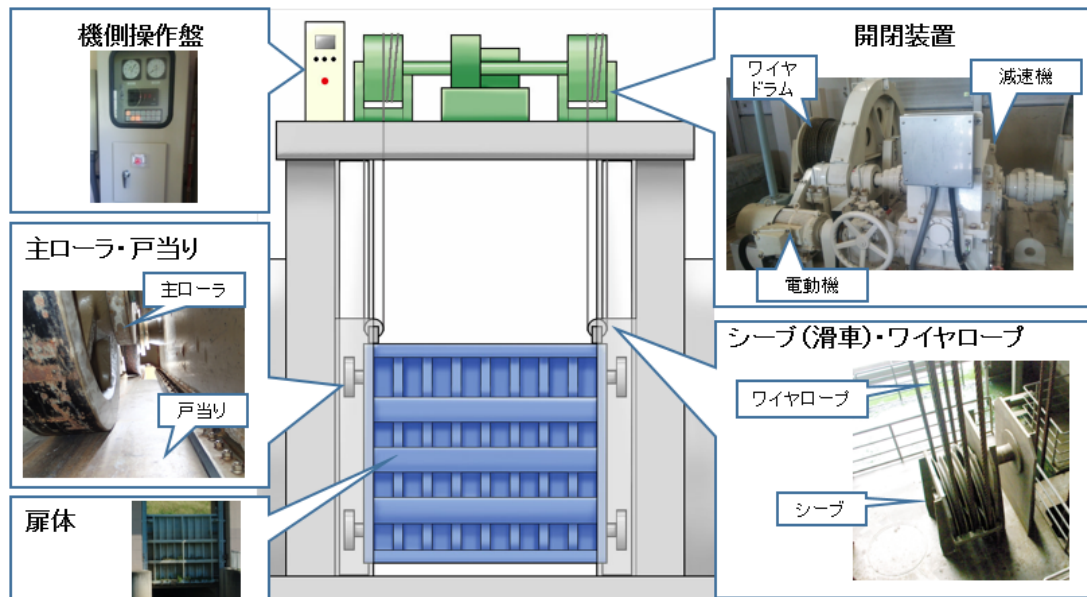


図-1 ワイヤロープウィンチ式プレートガーダローラゲートの機器構成例

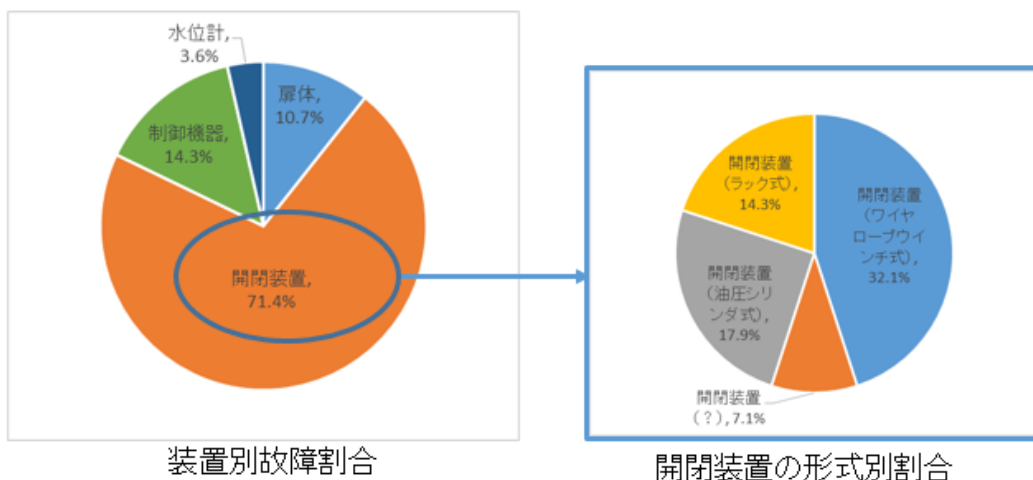


図-2 装置別故障割合

この図からは、以下のことがわかる。

- ・ 装置別では、開閉装置の故障が多い。
- ・ 開閉装置の形式別では、ワイヤロープウィンチ式の割合が高い。ただし、おそらくは設置比率もワイヤロープウィンチ式の方が多いと思われるので、台数に対する故障割合が多いとはいえない（設置比率については、台帳の表記が不統一のため、正確な数字を出すのは困難だった）。

なお、故障発生までの経過年数、費用による分析は、調査記載がないものがほとんど（50%程度）のため、検証不能であった。

2) 原因別故障割合

分析結果を図-3に示す。

なお、本来であれば装置別・構成機器別に分類すべきであるが、そうすると最大で9件、最小で2件となり、さらに構成機器別に分類するとほとんどが故障件数1件となってしまう、分母がきわめて小さくなり統計上意味をなさないので行っていない。

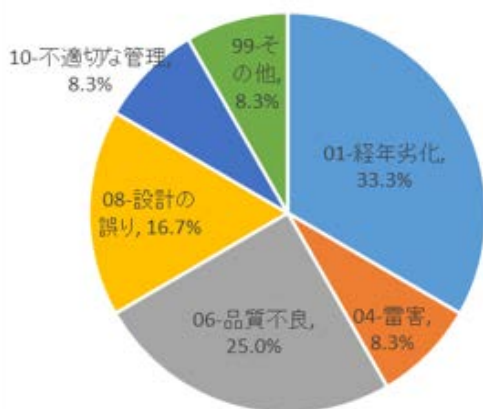


図-3 原因別故障割合

この図からは、下記のことをわかる。

- ・ 故障原因は、経年劣化によるものが全体の 1/3 と最も多い。ついで品質不良と人為的なもの（設計の誤り、不適切な管理）がそれぞれ 1/4 を占める。
- ・ ポンプ設備で散見された、操作ミスや外力（雷害以外）によるものは見られない。

3) 所見

先述の結果から言えることは、「故障の多い開閉装置の経年劣化に注意して点検・維持管理する」ということである。しかし、統計としては元データが少ないことから、必ずしもそう言い切れるものではない。このような

分析を行い維持管理に反映するには、より多くの件数と情報量のデータが必要である。真に故障が少ないがためにデータが少ないのであれば設備管理上喜ばしいことではあるが、データに漏れがあるならばそれを効率的かつ確実に収集する方法の検討が必要と考える。

4. 2 FMEA 解析手法を活用した機能回復指標

機能回復指標とは、設備の故障からの機能回復の遅速の定量的評価を試みたものである。

過年度の研究で、FMEA の手法を準用し、機能回復指標の算定手法を表-1 の通り定めた。

これにより過年度よりいっそう実態に即した評価が可能となったが、下記2点が難点としてあげられる。

- ・ 『機能回復難易度』は、『修繕費用ランク』と『故障検知難易度』が1～4点であるのに対し、「復旧までの所要時間」「設備復旧者の違い」「設備復旧場所」の合計点であるために3点～9点の7段階評価となっており、最低評価点の3点であっても、『修繕費用ランク』『故障検知難易度』と比較して高い点数である為バランスが悪い。（『機能補完性』についても同様である）
- ・ 評価項目により評価点が異なる為、機能回復指標の評価点のレンジが、最大値が約5.63、最小値が約1.57となり、評価がわかりにくい。また、「故障した場合のシステムへの影響度」「発見の容易性」「故障発生頻度」を評点とした従来のFMEA（以降「故障等級FMEA」と記載）で算出される故障等級（4～1点）による致命度評価との組み合わせが困難になると考えられる。

そこで、評価の平準化を検討する必要がある。また、機能回復指標算定式は、これまでは故障等級FMEAに依ったものとしていたが、それと比較して評価項目が多いため、算定式が適切かの検証も必要となる。

今年度はこれらの検証を行い機能回復指標算定手法を決定するとともに、機能回復指標の活用が想定される、地域性やメーカーの違い等による管理水準の差別化の指標となり得るかを検証することとした。

- ・ 以上をまとめると以下の通りとなる。今年度はこれらについての検討を行った。機能回復指標算定要素の平準化と標算定式の精査
- ・ 故障等級FMEAの評価との組み合わせ評価の検討
- ・ 同等規模の同一構成機器の機能回復指標の地域性等による変化の確認

表-1 評価項目と配点(平成29年度時点)

機能回復難易度 A = a+b+c						機能補完性 B = d+e				修繕費用 C		故障検知難易度 (故障箇所特定の難易度) D	
復旧までの 所要時間 a		設備復旧者の 違い b		設備復旧場所 c		機能補完性 (予備品の有無) d		機能補完性(近隣 の他機場による機 能補完) e					
評点基準	評点	評点基準	評点	評点基準	評点	評点基準	評点	評点基準	評点	評点基準	評点	評点基準	評点
7ヶ月以上	4					なし	4			次年度向け予算 要求が必要なレベル (目安:1,000万円 超)	4	故障時に分解して も即時に特定困難	4
4~7ヶ月	3	製造メーカーが 対応	3			予備品対応 (重故障)	3	不可能	3	地盤等の単位での 調整の後に当該 年度の維持管理 費で修理できるレ ベル(目安:1,000 万円以下)	3	故障時に分解した ら即時特定可能 (メーカーでなければ 分解不可能)	3
3~4ヶ月	2	点検業者で対 応可能	2	工場修理	2	予備品対応 (軽故障)	2	不完全(能力 不足) だが可能	2	事務所等での当該 年度の維持管理 費で修理できるレ ベル(目安:100万 円以下)	2	故障時に分解した ら即時特定可能 (直営または地場 点検業者で分解可 能)	2
0~3ヶ月未満	1	職員・操作員 で可能	1	現場修理	1	二重化可能	1	完全に可能	1	軽微な発注または 点検の付帯作業で 修繕できるレベル (目安:30万円以 下)	1	故障時に目視また は発生現象から即 時特定可能	1
A:上記3項目の合計 3~9点						B:上記2項目の計 2~7点				C:1~4点		D:1~4点	

機能回復指標は $\sqrt[4]{A \times B \times C \times D}$ で算出

4. 2. 1 機能回復指標の算定要素の平準化と算定式の精査

機能回復指標の算定要素の平準化にあたっては、下記が理想と考えられる。

- ・ 平準化後の評価が機能回復指標として、実態に沿うもの。
- ・ 『機能回復難易度』、『機能補完性』の評価点を1~4点の評価点になる様に設定し、『修繕費用ランク』『故障検知難易度』との点数ウェイトを平準化。
- ・ 『機能回復難易度』『機能補完性』の評価点を1~4点にすることで、機能回復指標値は、最大値4、最小値1となり、故障等級による致命度評価との整合すること。
- ・ 今後の運用を考慮し、評価方法がシンプルであり計算が容易であること。

以上に基づき検討した点数ウェイト平準化の方法案とその計算方法を示す。

その際、機能回復難易度Aの各評価要素について、例えば設備復旧者が「職員、操作員(評点1)」の場合、設備復旧場所は「工場(評点2)」はあり得ないなど、

実際には生じない組み合わせがあることから、評価要素の整理も合わせて行った。以下にそれを示す。

パターン1 幾何平均(現行評価案)ベース

パターン2 機能回復難易度の評価項目を減とする

2 a, 2 b 設備復旧場所を削除

2 c, 2 d 復旧所要時間と復旧者を削除

パターン3 各評価結果を4段階にランク分けして平準化

(例: 8~2点の大項目評点を、8、7点を4、6、5点を3、4、3点を2、2点を1とする、等)

パターン4 機能回復能力難易度評価項目の一部一本化(ランク分けの有無の双方で検討)

以上について、パターン1に対するパターン2, 4の変更内容を表-2に示す。

また、これらをそれぞれ計算方法で細分化すると15パターンとなる。これを表-3に示す。

パターン3は、小項目から算出される大項目の評価点を1~4点の4ランクに整理してその点数で機能回復指標を算出するものだが、評価項目の増減や大項目の計算

方法により算出結果が異なるので、ランク分け方法も異なる。ランク分け方法について表-4に示す。

評価要素の評点と同じでも、計算方法が異なるとランクが異なる場合がある。表-4の左は、これらの変化が

わかるように各評価の組み合わせに対して番号を設定したものである。また、計算方法によりランクが変わった組み合わせを赤枠で囲っている。

表-2 パターン2 a、2 bの評価項目

パターン1		パターン2a,b		パターン2c,d		パターン4		
大項目	小項目	大項目	小項目	大項目	小項目	大項目	小項目	
機能回復 難易度 A	復旧までの 所要時間 a	機能回復 難易度 A = a	復旧までの 所要時間 a	機能回復 難易度 A	復旧までの 所要時間 a	機能回復 難易度 A → A'	復旧までの 所要時間 a	
	設備復旧者 の違い b		設備復旧者 の違い a		設備復旧者 の違い b		設備復旧者 の違い a	統一 bc
	設備復旧場所 c		設備復旧場所 c		設備復旧場所 c		設備復旧場所 c	
機能 補完性 B	予備品・二重化 によるもの d	機能 補完性 B	予備品・二重化 によるもの d	機能 補完性 B	予備品・二重化 によるもの d	機能 補完性 B	予備品・二重化 によるもの d	
	近隣他稼働等 による機能補完 e		近隣他稼働等 による機能補完 e		近隣他稼働等 による機能補完 e		近隣他稼働等 による機能補完 e	
	修繕費用ランク C		修繕費用ランク C		修繕費用ランク C		修繕費用ランク C	
故障検知難易度 D	故障検知難易度 D	故障検知難易度 D	故障検知難易度 D	故障検知難易度 D	故障検知難易度 D	故障検知難易度 D	故障検知難易度 D	

機能回復指標は A×B×C×D で算出

表-3 算定方法15パターン

パターン名	パターン 小分類	案名	評価方法	計算法	計算式	機能回復指標の 最大値~最小値
パターン1 幾何平均 (現行評価案)ベース	1a	現行評価加法案	現行	各項目加法	$4\sqrt{A*B*C*D}$ A=a+b+c B=d+e	5.63 ~ 1.57
	1b	現行評価幾何平均案		各項目幾何平均	$4\sqrt{A*B*C*D}$ A=3 $\sqrt{a*b*c}$ B= $\sqrt{d*e}$	3.56 ~ 1
	1c	現行評価一括幾何平均案		一括幾何平均	$7\sqrt{a*b*c*d+e*C+D}$	3.34 ~ 1
パターン2 機能回復難易度の 評価項目減案	2a	機能回復難易度の評価項目減加法案(所要時間のみ)	機能回復難易度Aの評価項目を減(所要時間aのみ)	B:加法	$4\sqrt{e*B*C*D}$ B=d+e	4.6 ~ 1.19
	2b	機能回復難易度の評価項目減幾何平均案(所要時間のみ)	機能回復難易度Aの評価項目を減(所要時間aのみ)	B:幾何平均	$4\sqrt{e*B*C*D}$ B= $\sqrt{d*e}$	3.86 ~ 1
	2c	機能回復難易度の評価項目減加法案(所要時間と復旧者)	機能回復難易度Aの評価項目を減(所要時間aと復旧者b)	各項目加法	$4\sqrt{A'*B*C*D}$ A'=a+b B=d+e	5.29 ~ 1.41
	2d	機能回復難易度の評価項目減幾何平均案(所要時間と復旧者)	機能回復難易度Aの評価項目を減(所要時間aと復旧者b)	各項目幾何平均	$4\sqrt{A'*B*C*D}$ A'= $\sqrt{a*b}$ B= $\sqrt{d*e}$	3.72 ~ 1
パターン3 各評価項目ランク分け (操作員復旧時ランク1)案	3a	ランク分け加法案	A、Bをランク分け(復旧者bが操作員の場合、機能回復難易度は無条件でランク1)	A、Bをランク分け 各項目加法	$4\sqrt{A*B*C*D}$ A=a+b'+o(ランク) B=d+e(ランク)	4 ~ 1
	3b	ランク分け幾何平均・加法混合案		A、Bをランク分け A:幾何平均 B:加法	$4\sqrt{A*B*C*D}$ A=3 $\sqrt{a*b'*o}$ (ランク) B=d+e(ランク)	4 ~ 1
	3c	ランク分け幾何平均案		A、Bをランク分け 各項目幾何平均	$4\sqrt{A*B*C*D}$ A=3 $\sqrt{a*b'*o}$ (ランク) B= $\sqrt{d*e}$ (ランク)	4 ~ 1
パターン4 機能回復難易度の 評価項目一部一本化案	4a	評価項目一部一本化ランク分け幾何平均・加法混合案	機能回復難易度Aの復旧者bと復旧場所cを一本化	A、Bをランク分け A:幾何平均 B:加法	$4\sqrt{A*B*C+D}$ A= $\sqrt{a*b*o}$ (ランク) B=d+e(ランク)	4 ~ 1
	4b	評価項目一部一本化ランク分け幾何平均案		A、Bをランク分け 各項目幾何平均	$4\sqrt{A*B+C+D}$ A= $\sqrt{a*b*o}$ (ランク) B= $\sqrt{d*e}$ (ランク)	4 ~ 1
	4c	評価項目一部一本化幾何平均案		各項目幾何平均	$4\sqrt{A*B+C+D}$ A= $\sqrt{a*b*o}$ (生値) B= $\sqrt{d*e}$ (生値)	3.86 ~ 1
	4d	評価項目一部一本化ランク分け加法案		A、Bをランク分け 各項目加法	$4\sqrt{A*B+C+D}$ A=a+bc(ランク) B=d+e(ランク)	4 ~ 1
	4e	評価項目一部一本化一括幾何平均案		一括幾何平均	$6\sqrt{a*b*c*d+e*C+D}$	3.81 ~ 1

※: 加法とは(a+b)等の足し算の事である。幾何平均とは $n\sqrt{x_1 \times x_2 \times \dots \times x_n}$ で求められる平均である。

※: ランク分け・機能回復難易度Aと機能補完性Bを、評点生値をもとに1~4点に4段階に分類する

計算法は、平準化の評価方法として2種類を使用している。

- ・ 加算法： $a+b$ 等の足し算の事である。本評価では、加法により合計点を算出し評価している。
- ・ 幾何平均： $n\sqrt{X1 \times X2 \cdots Xn}$ で求められる平均である。本評価では、幾何平均により平均値を算出し評価している。

表-4 から、加法と幾何平均では、算出点数に大きな差が出ることがわかる。幾何平均を使用した評価を実施した場合には、算出点について加法と異なり下記の特徴がみられる。

- ①加法と異なり、幾何平均では小数点の値が算出される。
- ②加法に比べ幾何平均の算出結果は点数が細分化される。
- ③幾何平均で算出された値は、項目の最低点数～最高

点数以内となる。

④幾何平均で算出された値は、加法（合計点）が同点もしくは低くてもバランス良く高い値である場合、評価点が高く算出される。

特に④の特徴は、評価者の評価と幾何平均により算出された結果に差異が生まれる可能性がある事から、算出結果が実態と整合しているか検討する必要がある。機能回復指標の算定要素の平準化方法の検討であるが、表-3 に示した計算式だけでは良否の判断は困難である。よって、昨年度の研究で算定対象とした排水機場をモデルに、各パターンで機能回復指標の再算定を実施し、どのパターンが最も適当であるか検証した。対象排水機場の諸元を表-5 に示す。

表-4 機能回復難易度A・機能補完性Bのランク分け

		組み合わせ番号設定	加算法の場合のランク	幾何平均法の場合のランク																																																																																																																																																																																																																																																								
機能回復難易度	パターン3 a・3 b	<table border="1"> <thead> <tr> <th>組合せ番号</th> <th>a</th> <th>b</th> <th>c</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>4</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>2</td><td>4</td><td>2</td><td>1</td></tr> <tr><td>3</td><td>4</td><td>1</td><td>2</td></tr> <tr><td>4</td><td>4</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>5</td><td>3</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>6</td><td>3</td><td>2</td><td>1</td></tr> <tr><td>7</td><td>3</td><td>1</td><td>2</td></tr> <tr><td>8</td><td>3</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>9</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>10</td><td>2</td><td>2</td><td>1</td></tr> <tr><td>11</td><td>2</td><td>1</td><td>2</td></tr> <tr><td>12</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>13</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>14</td><td>1</td><td>2</td><td>1</td></tr> <tr><td>15</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td></tr> <tr><td>16</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </tbody> </table>	組合せ番号	a	b	c	1	4	2	2	2	4	2	1	3	4	1	2	4	4	1	1	5	3	2	2	6	3	2	1	7	3	1	2	8	3	1	1	9	2	2	2	10	2	2	1	11	2	1	2	12	2	1	1	13	1	2	2	14	1	2	1	15	1	1	2	16	1	1	1	<table border="1"> <thead> <tr> <th>組合せ番号</th> <th>a</th> <th>b</th> <th>c</th> <th>算出点</th> <th>ランク</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>4</td><td>2</td><td>2</td><td>8</td><td rowspan="3">4</td></tr> <tr><td>2</td><td>4</td><td>2</td><td>1</td><td>7</td></tr> <tr><td>3</td><td>4</td><td>1</td><td>2</td><td>7</td></tr> <tr><td>4</td><td>4</td><td>1</td><td>1</td><td>6</td><td rowspan="3">3</td></tr> <tr><td>5</td><td>3</td><td>2</td><td>2</td><td>7</td></tr> <tr><td>6</td><td>3</td><td>2</td><td>1</td><td>6</td></tr> <tr><td>7</td><td>3</td><td>1</td><td>2</td><td>6</td></tr> <tr><td>8</td><td>3</td><td>1</td><td>1</td><td>5</td><td rowspan="3">2</td></tr> <tr><td>9</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>6</td></tr> <tr><td>10</td><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>5</td></tr> <tr><td>11</td><td>2</td><td>1</td><td>2</td><td>5</td></tr> <tr><td>12</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>4</td><td rowspan="4">1</td></tr> <tr><td>13</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td><td>5</td></tr> <tr><td>14</td><td>1</td><td>2</td><td>1</td><td>4</td></tr> <tr><td>15</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td><td>4</td></tr> <tr><td>16</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>3</td></tr> </tbody> </table>	組合せ番号	a	b	c	算出点	ランク	1	4	2	2	8	4	2	4	2	1	7	3	4	1	2	7	4	4	1	1	6	3	5	3	2	2	7	6	3	2	1	6	7	3	1	2	6	8	3	1	1	5	2	9	2	2	2	6	10	2	2	1	5	11	2	1	2	5	12	2	1	1	4	1	13	1	2	2	5	14	1	2	1	4	15	1	1	2	4	16	1	1	1	3	<table border="1"> <thead> <tr> <th>組合せ番号</th> <th>a</th> <th>b</th> <th>c</th> <th>算出点</th> <th>ランク</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>4</td><td>2</td><td>2</td><td>2.52</td><td rowspan="3">4</td></tr> <tr><td>2</td><td>4</td><td>2</td><td>1</td><td>2.29</td></tr> <tr><td>3</td><td>4</td><td>1</td><td>2</td><td>2.00</td></tr> <tr><td>4</td><td>4</td><td>1</td><td>1</td><td>1.82</td><td rowspan="3">3</td></tr> <tr><td>5</td><td>3</td><td>2</td><td>2</td><td>2.00</td></tr> <tr><td>6</td><td>3</td><td>2</td><td>1</td><td>1.82</td></tr> <tr><td>7</td><td>3</td><td>1</td><td>2</td><td>1.82</td></tr> <tr><td>8</td><td>3</td><td>1</td><td>1</td><td>1.59</td><td rowspan="3">2</td></tr> <tr><td>9</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>1.59</td></tr> <tr><td>10</td><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>1.59</td></tr> <tr><td>11</td><td>2</td><td>1</td><td>2</td><td>1.59</td></tr> <tr><td>12</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>1.44</td><td rowspan="4">1</td></tr> <tr><td>13</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td><td>1.44</td></tr> <tr><td>14</td><td>1</td><td>2</td><td>1</td><td>1.26</td></tr> <tr><td>15</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td><td>1.26</td></tr> <tr><td>16</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1.00</td></tr> </tbody> </table>	組合せ番号	a	b	c	算出点	ランク	1	4	2	2	2.52	4	2	4	2	1	2.29	3	4	1	2	2.00	4	4	1	1	1.82	3	5	3	2	2	2.00	6	3	2	1	1.82	7	3	1	2	1.82	8	3	1	1	1.59	2	9	2	2	2	1.59	10	2	2	1	1.59	11	2	1	2	1.59	12	2	1	1	1.44	1	13	1	2	2	1.44	14	1	2	1	1.26	15	1	1	2	1.26	16	1	1	1	1.00
	組合せ番号	a	b	c																																																																																																																																																																																																																																																								
1	4	2	2																																																																																																																																																																																																																																																									
2	4	2	1																																																																																																																																																																																																																																																									
3	4	1	2																																																																																																																																																																																																																																																									
4	4	1	1																																																																																																																																																																																																																																																									
5	3	2	2																																																																																																																																																																																																																																																									
6	3	2	1																																																																																																																																																																																																																																																									
7	3	1	2																																																																																																																																																																																																																																																									
8	3	1	1																																																																																																																																																																																																																																																									
9	2	2	2																																																																																																																																																																																																																																																									
10	2	2	1																																																																																																																																																																																																																																																									
11	2	1	2																																																																																																																																																																																																																																																									
12	2	1	1																																																																																																																																																																																																																																																									
13	1	2	2																																																																																																																																																																																																																																																									
14	1	2	1																																																																																																																																																																																																																																																									
15	1	1	2																																																																																																																																																																																																																																																									
16	1	1	1																																																																																																																																																																																																																																																									
組合せ番号	a	b	c	算出点	ランク																																																																																																																																																																																																																																																							
1	4	2	2	8	4																																																																																																																																																																																																																																																							
2	4	2	1	7																																																																																																																																																																																																																																																								
3	4	1	2	7																																																																																																																																																																																																																																																								
4	4	1	1	6	3																																																																																																																																																																																																																																																							
5	3	2	2	7																																																																																																																																																																																																																																																								
6	3	2	1	6																																																																																																																																																																																																																																																								
7	3	1	2	6																																																																																																																																																																																																																																																								
8	3	1	1	5	2																																																																																																																																																																																																																																																							
9	2	2	2	6																																																																																																																																																																																																																																																								
10	2	2	1	5																																																																																																																																																																																																																																																								
11	2	1	2	5																																																																																																																																																																																																																																																								
12	2	1	1	4	1																																																																																																																																																																																																																																																							
13	1	2	2	5																																																																																																																																																																																																																																																								
14	1	2	1	4																																																																																																																																																																																																																																																								
15	1	1	2	4																																																																																																																																																																																																																																																								
16	1	1	1	3																																																																																																																																																																																																																																																								
組合せ番号	a	b	c	算出点	ランク																																																																																																																																																																																																																																																							
1	4	2	2	2.52	4																																																																																																																																																																																																																																																							
2	4	2	1	2.29																																																																																																																																																																																																																																																								
3	4	1	2	2.00																																																																																																																																																																																																																																																								
4	4	1	1	1.82	3																																																																																																																																																																																																																																																							
5	3	2	2	2.00																																																																																																																																																																																																																																																								
6	3	2	1	1.82																																																																																																																																																																																																																																																								
7	3	1	2	1.82																																																																																																																																																																																																																																																								
8	3	1	1	1.59	2																																																																																																																																																																																																																																																							
9	2	2	2	1.59																																																																																																																																																																																																																																																								
10	2	2	1	1.59																																																																																																																																																																																																																																																								
11	2	1	2	1.59																																																																																																																																																																																																																																																								
12	2	1	1	1.44	1																																																																																																																																																																																																																																																							
13	1	2	2	1.44																																																																																																																																																																																																																																																								
14	1	2	1	1.26																																																																																																																																																																																																																																																								
15	1	1	2	1.26																																																																																																																																																																																																																																																								
16	1	1	1	1.00																																																																																																																																																																																																																																																								
	パターン3 c・3 d	<table border="1"> <thead> <tr> <th>組合せ番号</th> <th>a</th> <th>b</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>4</td><td>4</td></tr> <tr><td>2</td><td>4</td><td>3</td></tr> <tr><td>3</td><td>4</td><td>2</td></tr> <tr><td>4</td><td>4</td><td>1</td></tr> <tr><td>5</td><td>3</td><td>4</td></tr> <tr><td>6</td><td>3</td><td>3</td></tr> <tr><td>7</td><td>3</td><td>2</td></tr> <tr><td>8</td><td>3</td><td>1</td></tr> <tr><td>9</td><td>2</td><td>4</td></tr> <tr><td>10</td><td>2</td><td>3</td></tr> <tr><td>11</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>12</td><td>2</td><td>1</td></tr> <tr><td>13</td><td>1</td><td>4</td></tr> <tr><td>14</td><td>1</td><td>3</td></tr> <tr><td>15</td><td>1</td><td>2</td></tr> <tr><td>16</td><td>1</td><td>1</td></tr> </tbody> </table>	組合せ番号	a	b	1	4	4	2	4	3	3	4	2	4	4	1	5	3	4	6	3	3	7	3	2	8	3	1	9	2	4	10	2	3	11	2	2	12	2	1	13	1	4	14	1	3	15	1	2	16	1	1	<table border="1"> <thead> <tr> <th>組合せ番号</th> <th>a</th> <th>b</th> <th>算出点</th> <th>ランク</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>4</td><td>4</td><td>8</td><td rowspan="3">4</td></tr> <tr><td>2</td><td>4</td><td>3</td><td>7</td></tr> <tr><td>3</td><td>4</td><td>2</td><td>6</td></tr> <tr><td>4</td><td>4</td><td>1</td><td>5</td><td rowspan="3">3</td></tr> <tr><td>5</td><td>3</td><td>4</td><td>7</td></tr> <tr><td>6</td><td>3</td><td>3</td><td>6</td></tr> <tr><td>7</td><td>3</td><td>2</td><td>5</td></tr> <tr><td>8</td><td>3</td><td>1</td><td>4</td><td rowspan="3">2</td></tr> <tr><td>9</td><td>2</td><td>4</td><td>6</td></tr> <tr><td>10</td><td>2</td><td>3</td><td>5</td></tr> <tr><td>11</td><td>2</td><td>2</td><td>4</td><td rowspan="4">1</td></tr> <tr><td>12</td><td>2</td><td>1</td><td>3</td></tr> <tr><td>13</td><td>1</td><td>4</td><td>5</td></tr> <tr><td>14</td><td>1</td><td>3</td><td>4</td></tr> <tr><td>15</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td></tr> <tr><td>16</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td></tr> </tbody> </table>	組合せ番号	a	b	算出点	ランク	1	4	4	8	4	2	4	3	7	3	4	2	6	4	4	1	5	3	5	3	4	7	6	3	3	6	7	3	2	5	8	3	1	4	2	9	2	4	6	10	2	3	5	11	2	2	4	1	12	2	1	3	13	1	4	5	14	1	3	4	15	1	2	3	16	1	1	2	<table border="1"> <thead> <tr> <th>組合せ番号</th> <th>a</th> <th>b</th> <th>算出点</th> <th>ランク</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>4</td><td>4</td><td>4.00</td><td rowspan="3">4</td></tr> <tr><td>2</td><td>4</td><td>3</td><td>3.46</td></tr> <tr><td>3</td><td>4</td><td>2</td><td>3.00</td></tr> <tr><td>4</td><td>4</td><td>1</td><td>2.45</td><td rowspan="3">3</td></tr> <tr><td>5</td><td>3</td><td>4</td><td>3.46</td></tr> <tr><td>6</td><td>3</td><td>3</td><td>3.00</td></tr> <tr><td>7</td><td>3</td><td>2</td><td>2.83</td><td rowspan="3">2</td></tr> <tr><td>8</td><td>3</td><td>1</td><td>2.45</td></tr> <tr><td>9</td><td>2</td><td>4</td><td>2.83</td></tr> <tr><td>10</td><td>2</td><td>3</td><td>2.45</td><td rowspan="4">1</td></tr> <tr><td>11</td><td>2</td><td>2</td><td>2.00</td></tr> <tr><td>12</td><td>2</td><td>1</td><td>2.00</td></tr> <tr><td>13</td><td>1</td><td>4</td><td>2.00</td></tr> <tr><td>14</td><td>1</td><td>3</td><td>1.73</td><td rowspan="4">1</td></tr> <tr><td>15</td><td>1</td><td>2</td><td>1.73</td></tr> <tr><td>16</td><td>1</td><td>1</td><td>1.41</td></tr> <tr><td>17</td><td>1</td><td>1</td><td>1.00</td></tr> </tbody> </table>	組合せ番号	a	b	算出点	ランク	1	4	4	4.00	4	2	4	3	3.46	3	4	2	3.00	4	4	1	2.45	3	5	3	4	3.46	6	3	3	3.00	7	3	2	2.83	2	8	3	1	2.45	9	2	4	2.83	10	2	3	2.45	1	11	2	2	2.00	12	2	1	2.00	13	1	4	2.00	14	1	3	1.73	1	15	1	2	1.73	16	1	1	1.41	17	1	1	1.00																																														
組合せ番号	a	b																																																																																																																																																																																																																																																										
1	4	4																																																																																																																																																																																																																																																										
2	4	3																																																																																																																																																																																																																																																										
3	4	2																																																																																																																																																																																																																																																										
4	4	1																																																																																																																																																																																																																																																										
5	3	4																																																																																																																																																																																																																																																										
6	3	3																																																																																																																																																																																																																																																										
7	3	2																																																																																																																																																																																																																																																										
8	3	1																																																																																																																																																																																																																																																										
9	2	4																																																																																																																																																																																																																																																										
10	2	3																																																																																																																																																																																																																																																										
11	2	2																																																																																																																																																																																																																																																										
12	2	1																																																																																																																																																																																																																																																										
13	1	4																																																																																																																																																																																																																																																										
14	1	3																																																																																																																																																																																																																																																										
15	1	2																																																																																																																																																																																																																																																										
16	1	1																																																																																																																																																																																																																																																										
組合せ番号	a	b	算出点	ランク																																																																																																																																																																																																																																																								
1	4	4	8	4																																																																																																																																																																																																																																																								
2	4	3	7																																																																																																																																																																																																																																																									
3	4	2	6																																																																																																																																																																																																																																																									
4	4	1	5	3																																																																																																																																																																																																																																																								
5	3	4	7																																																																																																																																																																																																																																																									
6	3	3	6																																																																																																																																																																																																																																																									
7	3	2	5																																																																																																																																																																																																																																																									
8	3	1	4	2																																																																																																																																																																																																																																																								
9	2	4	6																																																																																																																																																																																																																																																									
10	2	3	5																																																																																																																																																																																																																																																									
11	2	2	4	1																																																																																																																																																																																																																																																								
12	2	1	3																																																																																																																																																																																																																																																									
13	1	4	5																																																																																																																																																																																																																																																									
14	1	3	4																																																																																																																																																																																																																																																									
15	1	2	3																																																																																																																																																																																																																																																									
16	1	1	2																																																																																																																																																																																																																																																									
組合せ番号	a	b	算出点	ランク																																																																																																																																																																																																																																																								
1	4	4	4.00	4																																																																																																																																																																																																																																																								
2	4	3	3.46																																																																																																																																																																																																																																																									
3	4	2	3.00																																																																																																																																																																																																																																																									
4	4	1	2.45	3																																																																																																																																																																																																																																																								
5	3	4	3.46																																																																																																																																																																																																																																																									
6	3	3	3.00																																																																																																																																																																																																																																																									
7	3	2	2.83	2																																																																																																																																																																																																																																																								
8	3	1	2.45																																																																																																																																																																																																																																																									
9	2	4	2.83																																																																																																																																																																																																																																																									
10	2	3	2.45	1																																																																																																																																																																																																																																																								
11	2	2	2.00																																																																																																																																																																																																																																																									
12	2	1	2.00																																																																																																																																																																																																																																																									
13	1	4	2.00																																																																																																																																																																																																																																																									
14	1	3	1.73	1																																																																																																																																																																																																																																																								
15	1	2	1.73																																																																																																																																																																																																																																																									
16	1	1	1.41																																																																																																																																																																																																																																																									
17	1	1	1.00																																																																																																																																																																																																																																																									
機能補完性	B	<table border="1"> <thead> <tr> <th>組合せ番号</th> <th>d</th> <th>e</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>4</td><td>3</td></tr> <tr><td>2</td><td>4</td><td>2</td></tr> <tr><td>3</td><td>4</td><td>1</td></tr> <tr><td>4</td><td>3</td><td>3</td></tr> <tr><td>5</td><td>3</td><td>2</td></tr> <tr><td>6</td><td>3</td><td>1</td></tr> <tr><td>7</td><td>2</td><td>3</td></tr> <tr><td>8</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>9</td><td>2</td><td>1</td></tr> <tr><td>10</td><td>1</td><td>3</td></tr> <tr><td>11</td><td>1</td><td>2</td></tr> <tr><td>12</td><td>1</td><td>1</td></tr> </tbody> </table>	組合せ番号	d	e	1	4	3	2	4	2	3	4	1	4	3	3	5	3	2	6	3	1	7	2	3	8	2	2	9	2	1	10	1	3	11	1	2	12	1	1	<table border="1"> <thead> <tr> <th>組合せ番号</th> <th>d</th> <th>e</th> <th>算出点</th> <th>ランク</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>4</td><td>3</td><td>7</td><td rowspan="3">4</td></tr> <tr><td>2</td><td>4</td><td>2</td><td>6</td></tr> <tr><td>3</td><td>4</td><td>1</td><td>5</td></tr> <tr><td>4</td><td>3</td><td>3</td><td>6</td><td rowspan="3">3</td></tr> <tr><td>5</td><td>3</td><td>2</td><td>5</td></tr> <tr><td>6</td><td>3</td><td>1</td><td>4</td></tr> <tr><td>7</td><td>2</td><td>3</td><td>5</td><td rowspan="3">2</td></tr> <tr><td>8</td><td>2</td><td>2</td><td>4</td></tr> <tr><td>9</td><td>2</td><td>1</td><td>3</td></tr> <tr><td>10</td><td>1</td><td>3</td><td>4</td><td rowspan="4">1</td></tr> <tr><td>11</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td></tr> <tr><td>12</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td></tr> </tbody> </table>	組合せ番号	d	e	算出点	ランク	1	4	3	7	4	2	4	2	6	3	4	1	5	4	3	3	6	3	5	3	2	5	6	3	1	4	7	2	3	5	2	8	2	2	4	9	2	1	3	10	1	3	4	1	11	1	2	3	12	1	1	2	<table border="1"> <thead> <tr> <th>組合せ番号</th> <th>d</th> <th>e</th> <th>算出点</th> <th>ランク</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>4</td><td>3</td><td>3.46</td><td rowspan="3">4</td></tr> <tr><td>2</td><td>4</td><td>2</td><td>3.00</td></tr> <tr><td>3</td><td>4</td><td>1</td><td>2.83</td></tr> <tr><td>4</td><td>3</td><td>3</td><td>2.45</td><td rowspan="3">3</td></tr> <tr><td>5</td><td>3</td><td>2</td><td>2.45</td></tr> <tr><td>6</td><td>3</td><td>1</td><td>2.00</td></tr> <tr><td>7</td><td>2</td><td>3</td><td>2.45</td><td rowspan="3">2</td></tr> <tr><td>8</td><td>2</td><td>2</td><td>2.00</td></tr> <tr><td>9</td><td>2</td><td>1</td><td>1.73</td></tr> <tr><td>10</td><td>1</td><td>3</td><td>1.73</td><td rowspan="4">1</td></tr> <tr><td>11</td><td>1</td><td>2</td><td>1.41</td></tr> <tr><td>12</td><td>1</td><td>1</td><td>1.00</td></tr> </tbody> </table>	組合せ番号	d	e	算出点	ランク	1	4	3	3.46	4	2	4	2	3.00	3	4	1	2.83	4	3	3	2.45	3	5	3	2	2.45	6	3	1	2.00	7	2	3	2.45	2	8	2	2	2.00	9	2	1	1.73	10	1	3	1.73	1	11	1	2	1.41	12	1	1	1.00																																																																																															
組合せ番号	d	e																																																																																																																																																																																																																																																										
1	4	3																																																																																																																																																																																																																																																										
2	4	2																																																																																																																																																																																																																																																										
3	4	1																																																																																																																																																																																																																																																										
4	3	3																																																																																																																																																																																																																																																										
5	3	2																																																																																																																																																																																																																																																										
6	3	1																																																																																																																																																																																																																																																										
7	2	3																																																																																																																																																																																																																																																										
8	2	2																																																																																																																																																																																																																																																										
9	2	1																																																																																																																																																																																																																																																										
10	1	3																																																																																																																																																																																																																																																										
11	1	2																																																																																																																																																																																																																																																										
12	1	1																																																																																																																																																																																																																																																										
組合せ番号	d	e	算出点	ランク																																																																																																																																																																																																																																																								
1	4	3	7	4																																																																																																																																																																																																																																																								
2	4	2	6																																																																																																																																																																																																																																																									
3	4	1	5																																																																																																																																																																																																																																																									
4	3	3	6	3																																																																																																																																																																																																																																																								
5	3	2	5																																																																																																																																																																																																																																																									
6	3	1	4																																																																																																																																																																																																																																																									
7	2	3	5	2																																																																																																																																																																																																																																																								
8	2	2	4																																																																																																																																																																																																																																																									
9	2	1	3																																																																																																																																																																																																																																																									
10	1	3	4	1																																																																																																																																																																																																																																																								
11	1	2	3																																																																																																																																																																																																																																																									
12	1	1	2																																																																																																																																																																																																																																																									
組合せ番号	d	e	算出点		ランク																																																																																																																																																																																																																																																							
1	4	3	3.46	4																																																																																																																																																																																																																																																								
2	4	2	3.00																																																																																																																																																																																																																																																									
3	4	1	2.83																																																																																																																																																																																																																																																									
4	3	3	2.45	3																																																																																																																																																																																																																																																								
5	3	2	2.45																																																																																																																																																																																																																																																									
6	3	1	2.00																																																																																																																																																																																																																																																									
7	2	3	2.45	2																																																																																																																																																																																																																																																								
8	2	2	2.00																																																																																																																																																																																																																																																									
9	2	1	1.73																																																																																																																																																																																																																																																									
10	1	3	1.73	1																																																																																																																																																																																																																																																								
11	1	2	1.41																																																																																																																																																																																																																																																									
12	1	1	1.00																																																																																																																																																																																																																																																									

また、算定した結果例として、K 排水機場の各パターンのもの（抜粋）を表-6 に示す。

パターン1 a～cについては、現行案及び現行案の計算方法を幾何平均に変更したものであり点数ウェイトに変化がない事から、パターン選定のための比較検討からは除外する。

パターン1の算出方法は加法、パターン1 bの算出方法は幾何平均であり、評価点が同じであっても機能回復困難（しきい値以上）な機器の数に大きな差がある事が分かる。

これは、幾何平均が加法による算出と異なり、合計点が低くてもバランスよく高い値である方が評点は高くなる性質があるからである。

表-5 算定モデル排水機場 諸元

機場名	機種	主ポンプ		原動機		
		形式	吐出量[m ³ /s]	形式	出力	
M排水機場	1号、2号ポンプ	立軸渦巻斜流	25	100	ディーゼル機関	1987kW (2700ps)
	3号ポンプ	立軸渦巻斜流	50		ディーゼル機関	4122kW (5600ps)
K排水機場	1号、2号ポンプ	立軸斜流	7.5	15	ディーゼル機関	464kW (630ps)

表-6 各パターン毎の機能回復指標算出結果 (K 排水機場抜粋)

装置	機器区分	部品名	しきい値	パターン1			パターン2				パターン3			パターン4					
				1a	1b	1c	2a	2b	2c	2d	3a	3b	3c	4a	4b	4c	4d	4e	
主ポンプ	主軸及び軸受	軸継手		4.6	2.8	2.6	3.8	3.2	4.4	3.1	3.5	3.2	3.0	3.5	3.2	3.1	3.5	3.1	
		継手カラー		4.4	2.7	2.5	3.6	3.0	4.2	3.0	3.2	3.2	3.0	3.2	3.0	3.0	3.2	2.9	
主原動機	機関本体関係	シリンダヘッド		4.9	3.0	2.7	4.1	3.4	4.7	3.3	3.7	3.5	3.2	3.7	3.5	3.3	3.7	3.2	
		ライナ		4.7	2.9	2.6	3.9	3.3	4.5	3.2	3.5	3.2	3.2	3.5	3.5	3.2	3.5	3.1	
		クランク歯車		4.9	3.0	2.7	4.1	3.4	4.7	3.3	3.7	3.5	3.2	3.7	3.5	3.3	3.7	3.2	
		送給器		4.9	3.0	2.7	4.1	3.4	4.7	3.3	3.7	3.5	3.2	3.7	3.5	3.3	3.7	3.2	
		ピストン		4.6	2.8	2.6	3.8	3.2	4.4	3.1	3.5	3.2	3.0	3.5	3.2	3.1	3.5	3.1	
		連接棒		4.6	2.8	2.6	3.8	3.2	4.4	3.1	3.5	3.2	3.0	3.5	3.2	3.1	3.5	3.1	
		クランクピンメタル		4.6	2.8	2.6	3.8	3.2	4.4	3.1	3.5	3.2	3.0	3.5	3.2	3.1	3.5	3.1	
		潤滑油系統	潤滑油冷却器		4.6	2.8	2.6	3.8	3.2	4.4	3.1	3.5	3.2	3.0	3.5	3.2	3.1	3.5	3.1
		燃料系統	燃料噴射ポンプ		4.4	2.8	2.7	3.4	2.9	4.1	2.9	3.2	3.2	3.2	3.2	3.0	3.2	2.9	
		冷却水系統	内部冷却水ポンプ		4.1	2.6	2.6	3.2	2.7	3.8	2.7	3.1	3.1	2.9	3.1	2.9	2.8	3.1	2.9
流体継手	作動油・潤滑油系統	消音器・排気管		4.3	2.6	2.5	3.5	2.9	4.1	2.9	3.1	3.1	2.9	3.1	2.9	2.9	3.1	2.9	
		油ポンプ(流体継手給油ポンプ)		4.1	2.6	2.6	3.2	2.7	3.8	2.7	3.1	3.1	2.9	3.1	2.9	2.8	3.1	2.9	
減速機	冷却水系統	流体継手油タンク		4.6	2.9	2.8	3.6	3.0	4.2	3.0	3.5	3.5	3.2	3.5	3.2	3.1	3.5	3.1	
		油冷却器		4.4	2.7	2.5	3.8	3.2	4.2	2.9	3.2	2.9	2.7	3.2	3.0	2.9	3.2	2.9	
減速機	潤滑油系統	油濾過器		4.6	2.9	2.8	3.6	3.0	4.2	3.0	3.5	3.5	3.2	3.5	3.2	3.1	3.5	3.1	
		初期プライミングポンプ		4.6	2.9	2.8	3.6	3.0	4.2	3.0	3.5	3.5	3.2	3.5	3.2	3.1	3.5	3.1	
		潤滑油ポンプ駆動用歯車		4.6	2.9	2.8	3.6	3.0	4.2	3.0	3.5	3.5	3.2	3.5	3.2	3.1	3.5	3.1	
		配管		4.2	2.6	2.4	3.6	3.0	4.1	2.8	2.9	2.9	2.7	2.9	2.7	2.8	3.2	2.7	
吐出弁	冷却水系統	潤滑油冷却器		4.6	2.9	2.8	3.6	3.0	4.2	3.0	3.5	3.5	3.2	3.5	3.2	3.1	3.5	3.1	
		弁箱		4.6	2.9	2.8	3.6	3.0	4.2	3.0	3.5	3.5	3.2	3.5	3.2	3.1	3.5	3.1	
		本体		4.6	2.9	2.8	3.6	3.0	4.2	3.0	3.5	3.5	3.2	3.5	3.2	3.1	3.5	3.1	
		水密ゴム		4.6	2.9	2.8	3.6	3.0	4.2	3.0	3.5	3.5	3.2	3.5	3.2	3.1	3.5	3.1	
逆流防止弁	吐出弁	減速機		4.2	2.6	2.4	3.2	2.7	4.1	2.8	2.9	2.9	2.7	2.9	2.7	2.8	3.2	2.7	
		電動機		4.2	2.6	2.4	3.2	2.7	4.1	2.8	2.9	2.9	2.7	2.9	2.7	2.8	3.2	2.7	
		弁体		4.6	2.8	2.9	3.7	3.1	4.3	3.0	3.4	3.4	3.1	3.4	3.1	3.1	3.4	3.2	
		弁箱		4.6	2.8	2.9	3.7	3.1	4.3	3.0	3.4	3.4	3.1	3.4	3.1	3.1	3.4	3.2	
操作制御設備	逆流防止弁	弁軸		4.2	2.6	2.7	3.5	2.9	4.0	2.8	3.1	3.1	2.9	3.1	2.9	2.9	3.1	3.0	
		入出力装置盤		4.4	2.8	2.6	3.2	2.7	4.1	2.8	3.2	3.2	3.0	3.2	3.0	2.9	3.2	2.9	
		自動制御盤		4.4	2.8	2.6	3.2	2.7	4.1	2.8	3.2	3.2	3.0	3.2	3.0	2.9	3.2	2.9	
		CCTV設備		4.7	3.0	2.7	3.5	2.9	4.4	3.0	3.5	3.5	3.2	3.5	3.2	3.1	3.5	3.0	
発電設備	発電機	ビデオ		4.3	2.7	2.6	3.1	2.6	3.9	2.7	3.1	3.1	2.9	3.1	2.9	2.8	3.1	2.8	
		操作部		4.3	2.7	2.6	3.1	2.6	3.9	2.7	3.1	3.1	2.9	3.1	2.9	2.8	3.1	2.8	
		軸受		4.4	2.7	2.5	3.6	3.0	4.2	3.0	3.2	3.2	3.0	3.2	3.0	3.0	3.2	2.9	
		ライナ		4.2	2.6	2.4	3.4	2.9	4.1	2.9	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	2.9	3.0	2.8	
		フライホイール		4.2	2.6	2.7	3.5	2.9	4.0	2.8	3.1	3.1	2.9	3.1	2.9	2.9	3.1	3.0	
		オイルバン		4.4	2.8	2.6	3.2	2.7	4.1	2.8	3.2	3.2	3.0	3.2	3.0	2.9	3.2	2.9	
		潤滑油冷却器		4.9	3.0	2.7	4.1	3.4	4.7	3.3	3.7	3.5	3.2	3.7	3.5	3.3	3.7	3.2	
		圧力調整弁		4.2	2.6	2.4	3.2	2.7	4.1	2.8	2.9	2.9	2.7	2.9	2.7	2.8	3.2	2.7	
		燃料系統	燃料噴射ポンプ		4.1	2.5	2.3	3.1	2.6	3.9	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	3.0	2.6
		消音器・排気管	燃料噴射弁(燃料弁)		4.1	2.5	2.3	3.1	2.6	3.9	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	3.0	2.6
除塵設備	冷却装置	消音器		4.4	2.7	2.5	3.6	3.0	4.2	3.0	3.2	3.2	3.0	3.2	3.0	3.0	3.2	2.9	
		排気管		4.6	2.8	2.5	3.8	3.2	4.4	3.0	3.1	3.1	2.9	3.1	2.9	3.0	3.5	2.9	
		ラジエータ		4.6	2.8	2.6	3.8	3.2	4.4	3.1	3.5	3.2	3.0	3.5	3.2	3.1	3.5	3.1	
		駆動装置	スプロケット		4.1	2.6	2.6	3.2	2.7	3.8	2.7	3.1	3.1	2.9	3.1	2.9	2.8	3.1	2.9
コンベア	レーキ機構	減速機		4.4	2.8	2.6	3.2	2.7	4.1	2.8	3.2	3.2	3.0	3.2	3.0	2.9	3.2	2.9	
		電動機		4.7	3.0	2.7	3.5	2.9	4.4	3.0	3.5	3.5	3.2	3.5	3.2	3.1	3.5	3.0	
		シャーピン		4.4	2.8	2.6	3.2	2.7	4.1	2.8	3.2	3.2	3.0	3.2	3.0	2.9	3.2	2.9	
		駆動部	スプロケット		4.1	2.6	2.6	3.2	2.7	3.8	2.7	3.1	3.1	2.9	3.1	2.9	2.8	3.1	2.9
コンベア	ブーリ部	軸受		4.6	2.9	2.8	3.6	3.0	4.2	3.0	3.5	3.5	3.2	3.5	3.2	3.1	3.5	3.1	
		駆動部	スプロケット		4.6	2.9	2.8	3.6	3.0	4.2	3.0	3.5	3.5	3.2	3.5	3.2	3.1	3.5	3.1
		減速機		4.4	2.8	2.6	3.2	2.7	4.1	2.8	3.2	3.2	3.0	3.2	3.0	2.9	3.2	2.9	
		電動機		4.4	2.8	2.6	3.2	2.7	4.1	2.8	3.2	3.2	3.0	3.2	3.0	2.9	3.2	2.9	
ブーリ部	ヘッドブーリ		4.4	2.8	2.6	3.2	2.7	4.1	2.8	3.2	3.2	3.0	3.2	3.0	2.9	3.2	2.9		
	テールブーリ		4.4	2.8	2.6	3.2	2.7	4.1	2.8	3.2	3.2	3.0	3.2	3.0	2.9	3.2	2.9		
	スナップブーリ		4.4	2.8	2.6	3.2	2.7	4.1	2.8	3.2	3.2	3.0	3.2	3.0	2.9	3.2	2.9		
	スナップブーリ		4.4	2.8	2.6	3.2	2.7	4.1	2.8	3.2	3.2	3.0	3.2	3.0	2.9	3.2	2.9		

黄色セルが致命(しきい値以上)と評価
表の数値は小数点以下2位で四捨五入している。しきい値との比較は生値で行っているため、表の上ではしきい値と同値であっても「機能回復困難」としていない機器もある。

このことから、様々な算出パターンで加法・幾何平均で算出を実施し検討する必要がある。

パターン2 a～dについては、点数ウェイトの高く、大きく影響すると思われる「復旧までの所要時間」だけを残し、点数ウェイトが低く、影響が小さい「設備復旧者の違い」「設備復旧場所」を削除している。算定してみると、影響度が高い評価項目を残したにも関わらず、算出方法が加法も幾何平均でもパターン1a～cに比べ、機能回復困難機器の数が増える結果となった。したがって、復旧者と復旧場所の評価は、機能回復困難度の明確化に有効と思われるので、これらの項目は多少の変更は良いが要素として残すべきであると考えられる。

パターン3 a～cは、「機能回復難易度」「機能補完性」についてランク分けを行い、「修繕費用ランク」「故障検知難易度」と同じ4段階評価とする事で点数ウェイトを平準化する案である。平準化したことにより、「修繕費用ランク」「故障検知難易度」の影響が増えた為、機能回復困難機器の数は増える結果となった。

評価項目表にない評価の仕方（操作員・職員が対処する場合、機能回復難易度をランク1とする）が入るのが難点であるが、算定された機能回復困難機器は実態に近いものになっている。

パターン4 a～eは、「設備復旧者の違い」と「設備復旧場所」を集約して「設備復旧者・復旧場所」の4段階の評価項目とする案である。これもランク分けを行い平準化した事で機能回復困難機器の数は増える結果となった。パターン4 dについては、ランク分けが困難である事もあり、機能回復困難機器が実態と合わない部分が出る結果となったが、その他のパターンの機能回復困難機器は実態に近いものとなっている。

パターン4 cやパターン4 eは、「設備復旧者の違い」と「設備復旧場所」の集約により、「機能回復難易度」が1～4段階評価となったが、「機能補完性」の「近隣他機場等による機能補完」が3段階評価である為、「機能補完性」は1～3.46点であり、整合しない。また、故障等級 FMEA による評価との組み合わせ評価も困難であるため、採用しない。

算定された機能回復困難機器が、実態に近いと考えられるパターンのうち、パターン3 bパターン3 cパターン4 aパターン4 bの幾何平均でランク分けした案や、実態との整合が悪かったパターン4 dはランク分けのバランスが悪く、ランク分けの設定根拠が乏しい為、採用は困難であると考えられる。

パターン3 aであれば、ランク分けにより平準化もさ

れており、ランク分けのバランスも良く、算出される「機能回復指標」も1～4段階評価であるため、故障等級 FMEA による評価との組み合わせ評価も容易である事が考えられる。また、算定された致命的機器は実態に近い。

よって、機能回復指標算定要素平準化の方法パターンは、パターン3 a：ランク分け加法案を選定する。

次点候補としては、パターン4 bが考えられる。又、次々点として他に適合すると考えられるパターンは3 b、3 c、4 aである。

次に、各パターンについて、「実態との整合性」「評価点の平準化度（1～4点化）」「計算の容易性」及び「総合評価」にて評価する。

評価にあたっての優先順位は、

「実態との整合性」>「評価点の平準化度（1～4点化）」>「計算の容易性」とする。

実態との整合性は、M排水機場とK排水機場をそれぞれのパターンで評価し、実態との比較検証を行うことで検証した。以下に例を示す。

例1：M、K排水機場「主原動機—冷却水系統—内部冷却水ポンプ」

設備維持管理実態として、本機器が故障した場合、調整等での修繕は困難であり交換となる事が多い。よって復旧者は製造メーカーでなければ困難である。また、予備品等もない事から機能補完性がない。内部冷却水ポンプの動作不良の故障は、内部冷却水ポンプの内部の故障によるものが殆どであり、分解しなければ故障の検知は困難である。以上より、機能回復困難機器で適当であると言える。

例2：K排水機場「操作制御設備—PLC 関係」

PLC は、電気機器であり故障検知難しい機器である。電気部品と異なり、プログラムが内蔵されていることから、オーダーメイド品であり製造メーカーでなければ復旧ができず、高価である事から予備品も通常はない。以上より、機能回復困難機器で適当であると言える。

例3：M、K排水機場「除塵設備・コンベア・貯留設備関係」

設備維持管理実態として、除塵設備・コンベア・貯留設備については、水中内にある部分もある為、故障検知が困難である。また、ほとんどがオーダーメイドであり、製造メーカーでなければ復旧が難しい。大物であるため、工場への持ち帰りや設置に時間が掛かり、高価になる。

よって、機能回復困難機器で適当であると言える。

平準化後新たに機能回復困難と算定された機器についても、適当であると考えられる。平準化後の評価方法では、機能回復難易度と機能補完性にランク分けが入る為、多少煩雑にはなる。ただ、評価レンジが約 1.57～約 5.63 から 1～4 となり評価結果が分かりやすい。また、評価結果を 1～4 にした事で、故障等級による致命度評価と同じレンジの評価である為、再び点数ウェイトの平

準化する必要がない、総合的に評価しやすいという利点がある。

上記より、平準化後（パターン3 a：ランク分け加法案を推奨する。

以上をまとめると表-7の通りとなる。

また、機能回復指標算定の評価要素と算出方法を表-8の通りとすることとした。

表-7 各パターン毎の評価結果

算出パターン	算出パターン																						
	パターン1			パターン2				パターン3			パターン4												
	1a	1b	1c	2a	2b	2c	2d	3a	3b	3c	4a	4b	4c	4d	4e								
	機能回復難易度の評価項目減			ランク分け				評価項目一部一本化(b, cを統合)															
現行評価 幾何平均案			所要時間aのみ評価				所要時間a, 復旧者bのみ評価				加法案			幾何平均・加法案			幾何平均案			ランク分け			
一括幾何平均案			加法案		幾何平均案		加法案		幾何平均案		幾何平均・加法案			幾何平均案			加法案			一括幾何平均案			
実態との整合性	-	-	-	「復旧までの所要時間」だけでは、適切な評価が困難である。	「復旧までの所要時間」だけでは、適切な評価が困難である。	「復旧までの所要時間」だけでは、適切な評価が困難である。	「復旧までの所要時間」だけでは、適切な評価が困難である。	算定された致命的機器と、実態との整合性は良い。	算定された致命的機器と、実態との整合性は良い。	算定された致命的機器と、実態との整合性は良い。	算定された致命的機器と、実態との整合性は良い。	算定された致命的機器と、実態との整合性は良い。	算定された致命的機器と、実態との整合性は良い。	算定された致命的機器と、実態との整合性は良い。	算定された致命的機器と、実態との整合性は良い。	算定された致命的機器と、実態との整合性は良い。	算定された致命的機器と、実態との整合性は良い。	算定された致命的機器と、実態との整合性は良い。	算定された致命的機器と、実態との整合性は良い。				
評価点の平準化度(1~4点化)	-	-	-	機能回復難易度は、1~4点となるが、機能補完性は2~7点となる。	機能回復難易度は、1~4点となるが、機能補完性は1~3.46点となる。	機能回復難易度は、2~7点となり、機能補完性は2~7点となる。	機能回復難易度は、1~3.46点となり、機能補完性は1~3.46点となる。	ランク分けをする為、1~4点となり平準化度は高い。ランク分けのプランも良い。	ランク分けにより1~4点となるが、ランク分けのプランが悪い。又、ランクの設定根拠が薄い。	ランク分けにより1~4点となるが、ランク分けのプランが悪い。又、ランクの設定根拠が薄い。	ランク分けにより1~4点となるが、ランク分けのプランが悪い。又、ランクの設定根拠が薄い。	ランク分けにより1~4点となるが、ランク分けのプランが悪い。又、ランクの設定根拠が薄い。	ランク分けにより1~4点となるが、機能補完性は1~3.46点となり整合しない。	機能回復難易度は、1~4点となるが、機能補完性は1~3.46点となり整合しない。	ランク分けにより1~4点となるが、機能補完性は1~3.46点となり整合しない。	ランク分けにより1~4点となるが、機能補完性は1~3.46点となり整合しない。	算出される機能回復指標の値が1~4点にならない。	算出される機能回復指標の値が1~4点にならない。	算出される機能回復指標の値が1~4点にならない。				
計算の容易性	-	-	-	計算は加法のみとなる事から容易である。	加法と幾何平均が混合しており、容易性は多少劣る。	計算は加法のみとなる事から容易である。	計算は幾何平均のみとなる事から容易である。	計算は加法のみとなる事から容易である。	加法と幾何平均が混合しており、容易性は多少劣る。ただし、操作員補修時の特殊な評価方法がある。	計算は幾何平均のみとなる事から容易である。	加法と幾何平均が混合しており、容易性は多少劣る。	計算は幾何平均のみとなる事から容易である。	計算は幾何平均のみとなる事から容易である。	計算は幾何平均のみとなる事から容易である。	計算は幾何平均のみとなる事から容易である。	計算は幾何平均のみとなる事から容易である。	計算は幾何平均のみとなる事から容易である。	計算は幾何平均のみとなる事から容易である。	計算は幾何平均のみとなる事から容易である。				
総合評価	-	-	-	平準化前の原案である為評価しない	平準化前の原案である為評価しない	平準化前の原案である為評価しない	機能回復難易度の項目を減らした事で、実態との整合性が低い為採用は困難である。	機能回復難易度の項目を減らした事で、実態との整合性が低い為採用は困難である。	機能回復難易度の項目を減らした事で、実態との整合性が低い為採用は困難である。	機能回復難易度の項目を減らした事で、実態との整合性が低い為採用は困難である。	実態との整合性も高く、プランの良いランク分けが可能。	実態との整合性は良いが、ランク分けのプランが悪い。設定根拠が薄い。	実態との整合性は良いが、ランク分けのプランが悪い。設定根拠が薄い。	実態との整合性は良いが、ランク分けのプランが悪い。設定根拠が薄い。	実態との整合性は良いが、ランク分けのプランが悪い。設定根拠が薄い。	機能回復指標が1~4点と異なる為、評価がしにくく、故障等級との整合も取りにくい為、採用は困難である。	算定された致命的機器と、実態が整合しない為、採用は困難である。	算定された致命的機器と、実態が整合しない為、採用は困難である。	機能回復指標が1~4点と異なる為、評価がしにくく、故障等級との整合も取りにくい為、採用は困難である。				

凡例：○>△>×

表-8 機能回復指標算定評価項目と算出式（決定）

大項目	小項目	評価	4点	3点	2点	1点	機能回復指標算定のための点数配分の調整	
							元の合計点	機能回復指標算定点数
機能回復難易度 A	復旧までの所要時間 a	4段階	7ヶ月以上	4~7ヶ月	3~4ヶ月	3ヶ月未満	7~8点	→ 4点
	設備復旧者の速い b	2段階			メーカ	点検業者	6点	→ 3点
	設備復旧場所 c	2段階			工場	現場	5点	→ 2点
機能補完性 B	予備品・二重化によるもの d	4段階	なし	対応可(重)	対応可(軽)	二重化可能	6~7点	→ 4点
	近隣他機場等による機能補完 e	3段階		不可能	能力不足だが可能	可能	5点	→ 3点
		4段階					4点	→ 2点
修繕費用ランク C		4段階	1000万円超	1000万円以下	100万円以下	30万円以下	3~4点	→ 1点(注)
			4点	→ 4点				
			3点	→ 3点				
			2点	→ 2点				
故障検知難易度 D	4段階	分解が必要				目視で特定可能	4点	→ 4点
		分解しても困難	メーカが分解	点検業者で分解可能	3点		→ 3点	
					2点		→ 2点	
					1点		→ 1点	

機能回復指標は 4/A×B×C×D で算出

(A=a+b+c, B=d+e の合計点から、機能回復指標算定点数にランク分けする)

(注) 機能回復難易度Aは、「設備復旧者の速い」が操作員の場合は、他の点数に関わらず1点とする。

機能回復指標を算定

4. 2. 2 機能回復指標と故障等級 FMEA による評価との組み合わせによる評価の検討

前章で行った設備構成機器の機能回復難易度評価と、故障等級 FMEA で算定した故障等級を元にした致命度評価を比較するとともに、双方を組み合わせた致命度評価手法を検討し、実際の維持管理計画での評価との変化を確認する。

故障等級 FMEA による致命度評価は、過年度当チームで実施した研究によるものを用いており、機器一部品毎の故障要因、影響度、発見の容易性、故障率から故障等級（致命度）を算定し解析を行っている。算定対象としたモデル機場は、先述のK排水機場、M排水機場としている。故障等級 FMEA の例を表-9 に示す。

評価を比較するにあたり、故障等級 FMEA について、致命/非致命的のしきい値を設定する。

これも過年度の研究では、下記の2通りがあげられている。

- ・ 3つの指標各々「2」以下であれば維持管理上安全側の評価範囲にあるとして、故障等級においても「2」以下であれば維持管理上の問題が少ない構成機器であると判断し、2より大きい値を致命とする。
- ・ 故障等級の大きさを評価する1つの指標として、2つの指標が「2」であっても、1つ「4」がある場合の故障等級「2.5」に着目し、もう一つの案として、2.5以上を致命とする。

上記の2通りで、故障等級 FMEA について、故障等級の致命的機器を算定する。

上記により算定した故障等級の致命/非致命的機器と機能回復指標での機能回復困難度との比較を行った。例として、M排水機場、K排水機場の主ポンプでの致命/非致命的機器の比較表を表-10 に示す。また、故障等級 FMEA での致命的機器と機能回復指標での機能回復困難機器の個数と割合を表-11 に示す。

M排水機場では「故障等級による致命的機器」より、「機能回復困難の機器」の方が多く結果となっている。

K排水機場では、「故障等級の致命的機器」（2より大きい）よりは、若干少ない結果であるが、故障等級の致命的機器（2.5以上）に比べると多い結果となっている。

設備毎に確認すると、ポンプ、主原動機、流体継手、減速機、除塵設備、コンベアで異なる傾向の致命的機器が選定された結果となっている。また、系統機器設備については、機能回復困難機器が少なく、故障等級の致命的機器は多い結果となった。

これは機能回復指標では復旧までの難しさを示しており、故障等級が低い（壊れにくい機器・壊れた場合に影響が低い）機器であってもその機器・部品が壊れた場合は、復旧までに必要な時間やコスト等が大きい事を示している。

ポンプ設備では、バンドケーシングや据付部について、機能回復困難となっている。壊れる可能性が低く、すぐには大きな影響を及ぼさないため、故障等級は低いが、壊れた場合は大がかりな修繕工事が必要となるためである。

主原動機でも、ポンプ設備と同様の傾向がみられる。機能回復困難機器は、壊れにくい機器である台版やフライホイール、クランク関係の機器となっているが、故障等級の致命的機器では非致命となっている。また、逆にピストンリングやオイルリング、ピストンピンなどは、壊れた場合には主原動機の停止となり、故障の事例も多い部品であるが、復旧は比較的容易である為、機能回復困難とはなっていない。

減速機については、機能回復指標では致命的機器となっている機器が殆どであるが、故障等級ではほぼ非致命である。減速機は、軸受等の主原動機とポンプの回転部の動力伝達を担う設備であり、原動機・主ポンプとの調整を実施しながらの復旧となる為、復旧難易度が高いと考えられる。

表-9 故障等級 FMEA の例

部品名	故障	故障モード	原因	a システムへの影響度	b 発見難易度	c 発生頻度	危険指数
ベド (ケーシング)	漏水(横軸)	劣化	経年劣化	4	1	1	1.6
	排水能力低下	腐食	水質				
据付部	支持力低下	躯体変形	キズ・変形・の発生	3	1	1	1.4
	ポンプ位置のずれ	クラック	不適切な管理				
直立用 ボルト・ナット	固定能力の低下	破断	経年劣化	3	2	1	1.8
	漏水	腐食	キズ・変形・の発生				

危険指数は右式で算出 $3\sqrt{a \times b \times c}$

評価点	システムに対する影響	発見難易度	発生頻度
4	重大障害 (運転停止を要する)	検出困難	0.099E-6 (1/h)以上
3	軽微障害 (短時間の運転可能)	警備レベル	0.066~0.099E-6 (1/h)
2	軽微 (継続運転可能(運転後要点検))	準点検レベル	0.033~0.066E-6 (1/h)
1	冗長並あり (運転に支障なし)	月点検レベル	0~0.033E-6 (1/h)

a,b,c各項目の評価基準は上表の通り

表-10 機能回復困難度と故障等級FMEAによる評価比較

装置	機器区分	部品名	機能回復指標		故障等級		
			機能回復指標	致命 /非致命 (しきい値:3 以上)	故障等級	致命 /非致命 (しきい値:2 より大きい 値)	致命 /非致命 (しきい値: 2.5以上)
M排水機場 主ポンプ(1号・2号)	ベルマウス	吸込口(ベルマウス)	3.7	困難	2.3	致命	非致命
	本体	ベンド(ケーシング)	3.7	困難	1.6	非致命	非致命
		掘付部	3.4	困難	1.4	非致命	非致命
		組立用ボルト・ナット	2.4		1.8	非致命	非致命
		インペラ	羽根車	3.7	困難	3.6	致命
		キー	4.0	困難	2.3	致命	非致命
	主軸及び軸受	主軸	4.0	困難	2.3	致命	非致命
		スリーブ	3.7	困難	2.3	致命	非致命
		軸受(ラジアル軸受)	3.5	困難	2.9	致命	致命
		ランタンリング	2.6		2.5	致命	致命
		パッキン押え	2.6		2.0	非致命	非致命
		グランドパッキン	2.0		3.2	致命	致命
		ボルト・ナット	2.0		2.0	非致命	非致命
	K排水機場 主ポンプ	ベルマウス	吸込口(ベルマウス)	4.0	困難	2.3	致命
本体		ベンド(ケーシング)	4.0	困難	1.6	非致命	非致命
		掘付部	4.0	困難	1.4	非致命	非致命
		組立用ボルト・ナット	2.6		1.8	非致命	非致命
		インペラ	羽根車	4.0	困難	3.6	致命
		羽根車ナット	3.7	困難	2.3	致命	非致命
		キー	4.0	困難	2.3	致命	非致命
主軸及び軸受		上部主軸	4.0	困難	2.3	致命	非致命
		下部主軸	4.0	困難	2.3	致命	非致命
		軸継手	3.5	困難	3.6	致命	致命
		スリーブ	4.0	困難	2.3	致命	非致命
		継手カラー	3.2	困難	2.3	致命	非致命
		水中軸受(セラミック)	4.0	困難	3	致命	致命
		封水ブッシュ	4.0	困難	2.5	致命	致命
ボルト・ナット		1.4		2.0	非致命	非致命	
		案内羽根	4.0	困難	2.3	致命	非致命

表-11 機能回復困難機器の数と割合

排水機場	機器数	機能回復 困難機器	故障等級の致命的 機器	故障等級の致命的 機器
			(2より大きい)	(2.5以上)
M排水機場	279	137 (49%)	128 (46%)	103 (37%)
K排水機場	292	112 (38%)	118 (40%)	92 (32%)

系統機器設備では、故障した場合に排水機場の主機の故障につながり、故障頻度も比較的高いため、故障等級の致命的機器ではほとんどが致命となる結果であるが、機能回復困難度では、小型ポンプや弁・配管等は復旧が容易であるため、ほとんどが困難とはなっていない。また補完性が多い事も要因として考えられる。

除塵設備では、故障等級の致命的機器は少ないが、ほとんどが機能回復困難となっている。除塵設備の復旧は、設置場所が屋外であり、水中部もあるために復旧工事に時間が掛かり、予備品等もないためこのような差が出たと考えられる。

故障等級 FMEA と機能回復指標の組合せ方法について、下記の方法案が考えられる。

- 案1：故障等級と機能回復指標が双方致命・困難の場合に致命とする案
- 案2：故障等級と機能回復指標が片方でも致命・困難の場合に致命とする案
- 案3：機能回復指標と故障等級の値により新たに算定する案
- 案3-1：機能回復指標と故障等級の平均値より新たに算定する案
(しきい値は2より大きいor2.5以上)
- 案3-2：機能回復指標と故障等級の幾何平均値より新たに算定する案
(しきい値は2より大きいor2.5以上)
- 案4：全項目が致命・困難/非致命で判定する案

案4-1：故障等級・機能回復指標・平均値・幾何平均の
どれもが致命・困難である場合に致命とする案

案4-2：故障等級・機能回復指標・平均値・幾何平均
どれもが非致命である場合に非致命とする案

この各案について、【河川ポンプ設備点検・整備・更新検討マニュアル（案）平成27年3月 国土交通省総合政策局公共事業企画調整課水管理・国土保全局河川環境課】(1)に示される構成要素例の致命/非致命と比較した結果について、主立ったものの抜粋を表-12に示す。

この表からは以下の様な事が分かる。

現状のマニュアルの致命/非致命は、故障等級のシステムへの影響度を主としたFMEAより作成された致命/非致命となっており、故障等級の他の要素（故障率や故障モード発見の容易性）や機能回復指標の評価が加わった事で、違う傾向を示した。

壊れた場合に影響が大きい機器であっても、復旧までの難易度が低い設備は、非致命となっている。主に系統

機器設備、グランドパッキン等の受注生産でなく、交換等が容易であり復旧への所要時間が短いものとなっている。

逆に壊れた場合の排水能力の低下や排水停止等への影響度は低い機器であっても、復旧までの難易度が高い設備は致命的機器となっている。遠隔監視操作制御設備・機場監視操作盤、運転支援装置、CCTV設備はPLCや演算処理、記録カメラを必要とし復旧までの難易度が高い。

また、故障時の影響度は低いが水中部にあり受注生産であるフラップ弁も新たに致命的機器となっている。

全項目が非致命については、今回のFMEAで使用した設備機器一覧表とマニュアルの図の構成や機器・部品の分解度が異なる事から、装置の一部（部品）が非致命でも、装置や設備全体を非致命とする考え方は困難であり、全項目が非致命の評価方法については十分考慮し使われるべき、組合せ評価の手法だと考えられる。

表-12 各案別 機能回復指標での致命的機器とマニュアルとの比較

装置	機器	部品	マニュアル	案1: 双方致命		案2: 片方でも致命		案3-1: 双方の平均値		案3-2: 双方の幾何平均		案4: 全項目致命	
				しきい値 2.0以上	しきい値 2.5以上	しきい値 2.0以上	しきい値 2.5以上	しきい値 2.0以上	しきい値 2.5以上	しきい値 2.0以上	しきい値 2.5以上		
主ポンプ	本体(ケーシング)	吸込口(ベルマウス)	致命	致命		致命	致命	致命	致命	致命	致命		
		バンド(ケーシング)					致命	致命	致命	致命	致命		
		案内羽根	致命										
		据付部					致命	致命	致命		致命		
	主軸および軸受	主軸	致命	致命			致命	致命	致命	致命	致命	致命	
		中間軸	致命										
		軸継手	致命										
		外側軸受	致命	致命	致命	致命	致命	致命	致命		致命	致命	致命
		水中軸受(セラミック)	致命										
		水中軸受(ゴム)	致命	致命	致命	致命	致命	致命	致命	致命	致命	致命	致命
		グランドパッキン	致命				致命	致命	致命	致命	致命	致命	
		無給水軸封装置	致命										
	インペラ	インペラ	致命	致命	致命	致命	致命	致命	致命	致命	致命	致命	
	計器	圧力計											
温度計													
フロースイッチ		致命											
水位計		致命											
系統機器設備	燃料系統	燃料貯油槽	致命			致命	致命	致命	致命	致命	致命		
		燃料小出槽	致命						致命		致命		
		燃料移送ポンプ					致命	致命	致命		致命		
		配管・弁	致命				致命	致命	致命	致命	致命		
	冷却水系統	冷却装置	致命	致命	致命	致命	致命	致命	致命	致命	致命	致命	
		冷却水槽	致命										
		冷却水ポンプ	致命				致命	致命	致命		致命		
		潤滑・軸封水ポンプ	致命										
		原水取水ポンプ											
		オートストレーナ	致命										
		配管・弁	致命				致命	致命	致命	致命	致命		
		給水ポンプ・井戸ポンプ					致命	致命	致命		致命		
監視制御設備	遠隔操作制御設備			致命	致命	致命	致命	致命	致命	致命	致命	致命	
	機場監視操作盤			致命	致命	致命	致命	致命	致命	致命	致命	致命	
	機側操作盤	致命											
	補助継電器盤	致命	致命	致命	致命	致命	致命	致命	致命	致命	致命		
	電動機制御盤	致命											
	系統機器盤	致命						致命		致命			
	運転支援装置			致命	致命	致命	致命	致命	致命	致命	致命	致命	
	CCTV設備			致命	致命	致命	致命	致命	致命	致命	致命	致命	
計装設備(水位計等)	致命				致命	致命	致命	致命	致命	致命	致命		

本検討では、故障等級 FMEA と機能回復指標の算出結果より、致命/非致命的の区分を検討している。各案によって抽出された致命的機器及び非致命的機器は異なるが、現状のマニュアルや維持管理計画で設定されている各排水機場の致命/非致命的の区分について、

- ・致命的機器であっても、復旧までの難易度が低いものについては非致命的機器とする。
- ・非致命的機器であっても復旧まで難易度が高いものについて致命的機器とする。

等の復旧までの難易度を考慮し、各排水機場に致命的機器/非致命的機器を決定する事は今後重要であると考えられる。

これまでの、同一管理者の規模の異なる排水機場（M機場とK機場）をモデルケースに、算定方法の検討を含め比較検討してきたが、指標の実用化のためには、これら諸条件の違いによっても機能回復指標に明確な差が現れるかを確認する必要がある。

そこで、同等規模の設備でも、同一管理者の他メーカーの設備の場合、あるいは管理者が異なる場合で機能回復指標が変化するかを検証した。対象としたのは、K 排水機場を比較対象として選定した、表-13 の 2 機場である。これらの機場の機能回復指標が、K 排水機場と異なる結果となった割合を表-14 に示す。

表-13 機能回復指標算定機場

機場名	主ポンプ		原動機		管理者	備考
	吐出量 (m3/s)	メーカー	出力 (ps)	メーカー		
K排水機場	7.5	A社	630	X社	A事務所	K機場に対して、同一管理者で他メーカー
N排水機場	7.5	B社	510	Y社		
K2排水機場	5	C社	430	Z社	B事務所	K機場に対して、異なる管理者で他メーカー

表-14 異なる機能回復指標算定結果 割合比較

装置名	K排水機場に対して	
	同一事務所 他メーカー (N機場)	他事務所 他メーカー (K2機場)
主ポンプ	6.7%	14.3%
主機関	51.4%	2.7%
減速機	17.6%	27.8%
吐出弁	33.3%	33.3%
逆流防止弁	0.0%	0.0%
系統機器	40.0%	50.0%
操作制御機器	40.9%	85.7%
電源設備	52.6%	81.8%
発電設備	48.8%	65.0%
除塵設備	30.8%	30.8%
コンベア	63.6%	63.6%

4. 2. 3 同等規模の設備の他機場、他管理者との評価の比較

機能回復能力の定量化による評価の目的の一つに、メーカーの違いや地域性などによる管理水準の差別化がある。

例として、同等規模の設備の同じ構成機器であっても、メーカーの違いや地域性その他の要因が影響して機能回復までの時間に差が出ることが想定されるが、それに合わせた管理水準の設定、例えば早期機能回復が困難な場合は早期に整備するよう計画するなどというものがあり、それによって、よりの確な維持管理に資することを想定している。

また、K排水機場とこの2機場の機能回復指標の算定結果の比較（代表的な部品を抜粋）を表-15 に示す。

この結果を見ると、明確に差が現れる機器と現れない機器があることがわかる。例えば表-15 からは、主ポンプの組立用ボルト、遠方操作端末盤の CRT ディスプレイや CCTV 設備のカメラや拡声部は、しきい値を超える機場と超えない機場がある。

また、表-14 からは、K機場とN機場（同一事務所管理で他メーカー製）では主機関の部品の半数強の指標が異なることや、K 2 機場（他事務所管理で他メーカー製）に対しては操作制御設備や電源設備の 8 割強が異なる評価となっている。これらは対N機場でも半数前後と高い数値となっている。

表-15 機能回復指標 算定結果

装置名	機器区分	部品名	機能回復指標			
			K機場	N機場 (K機場と同一事務所他メーカー)	K2機場 (K機場と他事務所他メーカー)	
主ポンプ	ベルマウス	吸込口(ベルマウス)	4.0	4.0	4.0	
		ペン(ケーシング)	4.0	4.0	4.0	
	本体	組立用ボルト・ナット	2.6	3.1	2.9	
		インペラ	羽根車	4.0	4.0	4.0
	主軸及び軸受	羽根車ナット	3.7	3.7	3.7	
		上部主軸	4.0	4.0	4.0	
主原動機	機関本体関係	軸継手	3.5	3.5	3.5	
		ライナ	3.5	3.7	3.5	
		吸・排気弁	2.6	2.2	2.6	
		過給器	3.7	3.2	3.5	
		ピストン	3.5	3.5	3.5	
		ピストンリング	2.6	1.9	2.6	
	燃料系統	高圧管	2.4	1.9	2.4	
		燃料濾過器	2.0	1.7	2.0	
	減速機	減速機本体	歯車(大・小)	3.7	3.7	3.7
			入力軸ラジアル軸受	3.7	3.7	3.7
冷却水系統		出力軸スラスト軸受	3.7	3.7	3.7	
		配管	2.9	2.6	2.4	
操作制御設備	遠方操作端末盤	軸継手	3.5	3.2	3.1	
		CRTディスプレイ (タッチパネルを含む)	2.9	2.9	3.5	
	CCTV設備	中央演算処理装置	3.7	4.0	3.7	
		カメラ	3.5	3.7	2.9	
		拡声部	2.4	3.2	2.9	
電源設備	機関本体関係	直流電源盤	1.4	2.2	2.4	
		蓄電池	2.0	2.9	2.6	
発電設備	潤滑油系統	シリンダヘッド	2.9	3.5	2.6	
		潤滑油冷却器	3.7	3.7	4.0	
	燃料系統	タペット	2.9	3.1	3.5	
除塵設備	駆動装置	チェーン	2.4	2.4	2.4	
		スプロケット	3.1	3.1	3.1	
		減速機	3.2	3.5	3.5	
		電動機	3.5	3.5	3.5	

このことから、機能回復指標によって、機能回復能力の機場別、地域別による明確な差を表すことができることが確認されたと考ええる。

4. 2. 4 機能回復指標の水門への適用性への検討

これまでの機能回復指標の検討は、排水機場ポンプ設備を対象としたものであった。

しかし、土木機械設備は多種多様であることから、機能回復指標が他の設備でも算定可能か、設備維持管理に有効に機能するかを検証する必要がある。

そこで、同一事務所管理の規模の異なる河川水門設備について、機能回復指標を算定した。対象設備を表-16に、結果(代表的な部品を抜粋)を表-17に示す。

また、K堰メインゲートに対してK堰サイドゲート、A排水樋管の機能回復指標が異なる結果となった割合を表-18に示す。

この結果からは、以下のことがわかる。

①同一メーカーで大型水門に分類されるK堰メインゲートとサイドゲートでは、部品毎の機能回復指標に差は出ない。

②対して、規模の異なるK堰メインゲートとA排水樋管ゲートでは、操作制御設備以外では差の出る部品が8割強となる。規模の大きいK堰の方が機能回復指標が高い傾向がある。

③ただし、電動機や開閉装置のボルトなど、規模が小さいA排水樋管が高い数値を示す場合もある。

④操作制御設備では、規模の異なるK堰メインゲートとA排水樋管ゲートでも部品毎の機能回復指標の差は出ていない。

特に②③の確認のため、代表例として、扉体スキンプレートと開閉装置の電動機について、各対象水門の評価要素の評点を表-19に示す。

スキンプレートでは復旧までの機能回復難易度の所要時間と修繕費用が、K堰とA排水樋管では異なり、いずれもK堰の方が高い。ただし、機能回復難易度はランク分けの際に双方とも4点と違いが無くなっているため、修繕費用ランクのみが影響している。

電動機では、やはり復旧までの所要時間がK堰とA排水樋管では、規模の大きいK堰の方が高い。しかし、機能補完性は規模によらずまちまちである。これは機能代替が無いA排水樋管、K堰メインゲートのフラップゲートは評点が高くなり、相互に機能代替が可能なメインゲート、サイドゲートは評点が低くなるためと考える。

表-16 機能回復指標算定水門

水門名	扉体形式	扉体寸法 (径間×扉高)	開閉装置	動力	
K堰	メインゲート	フラップ付シェル構造 ローラゲート	50m×6.1m (メイン4.6m フラップ1.6m)	2M2D ワイヤロープウインチ式	電動機 30kW×2台(メイン用) 3.7kW×2台(フラップ用)
	サイドゲート	シェル構造 ローラゲート	38m×2.9m	2M2D ワイヤロープウインチ式	電動機 37kW×2台
A排水樋管	プレートガーダ式 ローラゲート	3.6m×2.1m	電動2ラック式	電動機 0.64W	

表-17 機能回復指標 算定結果

装置名	機器区分	部品名	機能回復指標			
			Kメイン	Kサイド	A	
扉体	構造部	スキンプレート	2.8	2.8	2.6	
		主桁・補助桁	2.8	2.8	2.6	
		ボルト・ナット・リベット	1.4	1.4	1.4	
	ローラ部	主ローラ・軸・軸受	3.7	3.7	3.5	
		水密部	水密ゴム	2.8	2.8	2.6
		ゴム押え板	2.8	2.8	2.6	
戸当り	取外し部	主ローラレール	2.8	2.8	2.6	
		補助ローラレール	2.8	2.8	2.6	
開閉装置	構造体	架台フレーム	2.8	2.8	2.6	
		ボルト・ナット	1.2	1.2	1.4	
	動力部	電動機 (Kメインは上ローラゲート 下フラップゲート)	2.8		2.9	
			3.7	2.6		
	扉体駆動部	減速装置	減速機	3.7	3.7	3.5
		ドラム・ドラム軸	3.4	3.4	—	
		機械台シブ・軸・軸受	3.1	3.1	—	
		ワイヤーロープ	2.8	2.8	—	
操作制御設備	駆動部	ラックピン	—	—	2.8	
		ラック棒	—	—	3.1	
操作制御設備	制御回路	盤躯体	2.6	2.6	2.6	
		補助リレー	1.4	1.4	1.4	
	変換器類	タイマ	1.3	1.3	1.3	
		計器用変成器 (変圧器・変流器)	2.2	2.2	2.2	

表-18 異なる機能回復指標算定結果 割合比較

装置名	異なる評価と違った割合	
	KメインとKサイド	KメインとA
扉体	0.00%	85.7%
戸当り	0.00%	80.0%
開閉装置	0.00%	80.0%
操作制御設備	0.00%	0.0%

表-19 機能回復指標(水門) 各要素評点

装置名	部品名	施設名	機能回復難易度					機能補完性						
			復旧までの 所要時間	設備復旧者 の連日	設備復旧場 所	機能回復 難易度 合計	機能回復 難易度 のランク 分け	機能補完性	近隣に所在す る他の排水機 場ポンプ設備 者の稼働によ る機能補完	機能補完性 合計	機能補完 性のランク 分け	修繕 費用 ランク	故障 検知 難易度	機能 回復 指標
扉体	スキンプレート	K堰メインゲート	4	2	2	8	4	4	2	6	4	4	1	2.8
		K堰サイドゲート	4	2	2	8	4	4	2	6	4	4	1	2.8
		A排水樋管	3	2	2	7	4	4	2	6	4	3	1	2.6
開閉装置	主電動機	ローラゲート用	3	2	2	7	4	1	2	3	1	4	4	2.8
		フラップゲート用	3	2	2	7	4	4	2	6	4	3	4	3.7
		K堰メインゲート	3	2	2	7	4	1	2	3	1	3	4	2.6
		K堰サイドゲート	3	2	2	7	4	1	2	3	1	3	4	2.6
		A排水樋管	2	2	2	6	3	4	2	6	4	3	2	2.9

④については、操作制御設備はゲートの規模に影響されず同等の機器を用いているためと思われる。

以上より、河川水門設備についても、機能回復指標により明確に機能回復能力の定量的評価が可能であることが確認された。

4.3 土木機械設備の機能喪失時の被害リスクの定量的評価に関する検討

限られた維持管理予算でよりの確な設備維持管理を行ううえで、年度によって維持管理費が突出しないよう可能な限り標準化して維持管理計画を立案することが行われている。予算の標準化のためには管理する設備の優先順位付けは必須であり、これまでも様々な取り組みが行われてきている。

その一手法として、「被害リスク」から、各排水機場の各ポンプ設備の整備の優先順位付けを行えないかの検討を行った。

一般に、被害リスクの算定は下式により行われている。

$$\text{被害リスク} = \text{故障発生頻度} \times \text{被害想定額} \quad (1)$$

検討対象は、先述のM排水機場とK排水機場の2機場を有する水系とする。排水機能の排水能力喪失パターンは、M排水機場が表-20に示す5パターン、K排水機場が表-21に示す3パターンであり、その組み合わせで表-22に示す15パターンとなる。

各パターンの組み合わせによる被害総定額は、過年度当チームの研究で排水機場の機能喪失時の社会的影響度を検討するためのツールとして作成したCommon-MPのGISモデルを利用して行った。算定結果について表-23に示す。

故障発生確率については、これも過年度当チームでの研究で排水機場の信頼性評価のために作成したFTAを元に算定した。FTA図を図-4に、算定された故障発生確率を元に算出した組み合わせパターン発生確率と被害リスクを表-24に示す。

今回、パターン7、8、9では、同パターン（同排水能力、同排水割合時）であっても、被害リスクの値に差が出ている。

これは、M排水機場の排水能力50 m³/s（排水能力割合50%）の場合に、2種類の組合せがあるからである。1つは、1号ポンプ25 m³/s及び2号ポンプ25 m³/sの2基が故障した場合、もう1つは3号ポンプ50 m³/sが故障した場合である。1号・2号ポンプは同形式であり故障率も同じであるが、3号ポンプは故障率が若干高い

事から、同パターンであっても故障リスクに差が出たと考えらえる。

表-20 M排水機場 排水機能発生パターン

		1号	2号	3号	計	割合
	排水能力	25	25	50	100	100%
パターン1	運転可否	○	○	○		
	排水能力	25	25	50	100	100%
パターン2	運転可否	×	○	○		
	排水能力	0	25	50	75	75%
	運転可否	○	×	○		
	排水能力	25	0	50	75	75%
パターン3	運転可否	○	○	×		
	排水能力	25	25	0	50	50%
	運転可否	×	×	○		
	排水能力	0	0	50	50	50%
パターン4	運転可否	×	○	×		
	排水能力	0	25	0	25	25%
	運転可否	○	×	×		
	排水能力	25	0	0	25	25%
パターン5	運転可否	×	×	×		
	排水能力	0	0	0	0	0%

表-21 K排水機場 排水機能発生パターン

		1号	2号	計	割合
	排水能力	7.5	7.5	15	100%
パターン1	運転可否	○	○		
	排水能力	7.5	7.5	15	100%
パターン2	運転可否	○	×		
	排水能力	7.5	0	7.5	50%
	運転可否	×	○		
	排水能力	0	7.5	7.5	50%
パターン3	運転可否	×	×		
	排水能力	0	0	0	0%

表-22 排水機能発生パターン 組み合わせ

組み合わせ パターン名	パターン名		排水能力割合 (M%×K%)
	M排水機場	K排水機場	
パターン1	パターン1	パターン1	100×100
パターン2	パターン1	パターン2	100×50
パターン3	パターン1	パターン3	100×0
パターン4	パターン2	パターン1	75×100
パターン5	パターン2	パターン2	75×50
パターン6	パターン2	パターン3	75×0
パターン7	パターン3	パターン1	50×100
パターン8	パターン3	パターン2	50×50
パターン9	パターン3	パターン3	50×0
パターン10	パターン4	パターン1	25×100
パターン11	パターン4	パターン2	25×50
パターン12	パターン4	パターン3	25×0
パターン13	パターン5	パターン1	0×100
パターン14	パターン5	パターン2	0×50
パターン15	パターン5	パターン3	0×0

各パターンの被害リスクについて、被害リスク順に表を並び替え被害リスクの順位付けを行う。その結果を表-25に示す。

表-23 排水機能発生パターン別 被害総定額

(単位:百万円)

項目	パターン	パターン1	パターン2	パターン3	パターン4	パターン5	パターン6	パターン7	パターン8	パターン9
	M排水機場×K排水機場 (%)	100*100	100*50	100*0	75*100	75*50	75*0	50*100	50*50	50*0
直接被害額	一般被害額計	63.6	192.9	848.9	752.9	961.6	2562.1	998.1	1996.7	2845.6
	農作物被害額(水稲)	1.5	1.8	2.5	1.8	2.3	2.9	2.5	2.8	3.0
	農作物被害額(畑作)	0.3	0.3	0.6	0.3	0.6	1.2	0.6	1.5	2.4
	公共土木被害額	107.7	326.8	1438.0	1275.5	1629.0	4340.2	1690.8	3382.4	4820.5
間接被害額	営業停止損失額	3.0	9.5	50.7	56.4	52.3	150.9	54.3	119.9	164.4
	清掃労働対価	1.9	7.6	34.0	28.0	36.8	90.0	38.6	75.0	97.0
	代替活動等の出費	3.5	14.5	65.2	53.5	70.4	170.3	73.7	142.6	183.2
	事務所代替活動	2.3	8.7	27.2	22.4	29.6	70.9	31.0	58.9	76.0
合計		183.8	562.0	2467.1	2190.7	2782.5	7388.4	2889.5	5779.7	8192.1

項目	パターン	パターン10	パターン11	パターン12	パターン13	パターン14	パターン15
	M排水機場×K排水機場 (%)	25*100	25*50	25*0	0*100	0*50	0*0
直接被害額	一般被害額計	1509.5	2265.6	2866.2	4193.6	7203.3	12693.9
	農作物被害額(水稲)	2.6	2.7	3.2	3.5	4.3	4.5
	農作物被害額(畑作)	0.9	1.5	2.1	4.2	4.2	4.2
	公共土木被害額	2557.1	3837.9	4855.3	7104.0	12202.3	21503.4
間接被害額	営業停止損失額	84.5	133.4	167.6	228.7	278.4	374.3
	清掃労働対価	59.2	80.8	97.4	128.5	180.7	269.9
	代替活動等の出費	112.5	153.0	184.1	240.5	330.6	463.4
	事務所代替活動	45.8	63.9	76.5	105.9	144.3	218.3
合計		4372.1	6538.9	8252.3	12009.1	20348.1	35531.7

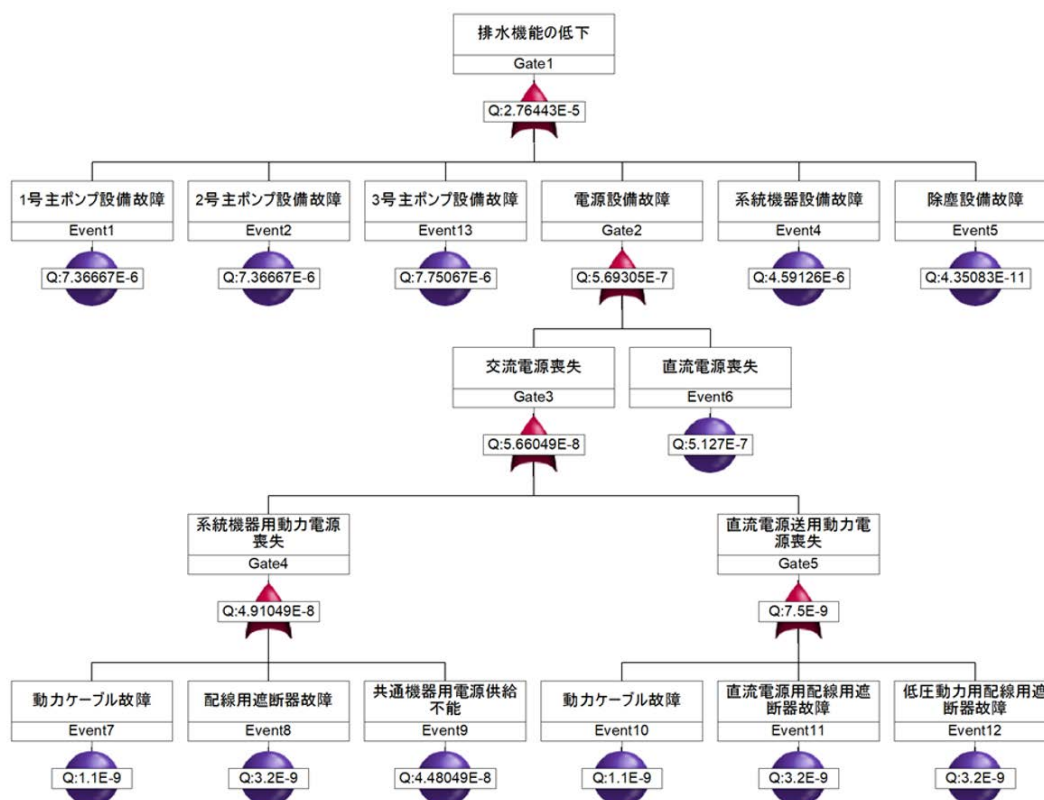


図-4 FTA図(例)

表-24 組み合わせパターン発生確率と被害リスク

No.	組み合わせパターン	M×K(%)	M排水機場			K排水機場		M排水機場の事象発生頻度	K排水機場の事象発生頻度	各パターンの事象発生頻度	各パターンの想定被害額	被害リスク	
			1号	2号	3号	1号	2号						
1	パターン1	100*100	○	○	○	○	○	1	×	1	=	1	0.0
2	パターン2	100*50	○	○	○	○	×	1	×	1.50859E-05	=	1.50859E-05	562.0
3			○	○	○	○	○						
4	パターン3	100*0	○	○	○	○	×	1	×	5.68964E-11	=	5.68964E-11	2467.1
5			○	○	○	○	○						
6	パターン4	75*100	○	○	○	○	○	1.47333E-05	×	1	=	1.47333E-05	2190.7
7			○	○	○	○	○						
8	パターン5	75*50	○	○	○	○	○	1.47333E-05	×	1.50859E-05	=	2.22266E-10	2782.5
9			○	○	○	○	○						
10			○	○	○	○	○						
11			○	○	○	○	○						
12	パターン6	75*0	○	○	○	○	○	1.47333E-05	×	5.68964E-11	=	8.38274E-16	7388.4
13			○	○	○	○	○						
14	パターン7	50*100	○	○	○	○	○	7.75067E-06	×	1	=	7.75067E-06	2889.5
15			○	○	○	○	○						
16	パターン8	50*50	○	○	○	○	○	7.75067E-06	×	1.50859E-05	=	1.16926E-10	5779.7
17			○	○	○	○	○						
18			○	○	○	○	○						
19			○	○	○	○	○						
20	パターン9	50*0	○	○	○	○	○	5.42678E-11	×	5.68964E-11	=	3.08764E-21	8192.1
21			○	○	○	○	○						
22	パターン10	25*100	○	○	○	○	○	1.14193E-10	×	1	=	1.14193E-10	4372.1
23			○	○	○	○	○						
24	パターン11	25*50	○	○	○	○	○	1.14193E-10	×	1.50859E-05	=	1.72271E-15	6538.9
25			○	○	○	○	○						
26			○	○	○	○	○						
27			○	○	○	○	○						
28	パターン12	25*0	○	○	○	○	○	1.14193E-10	×	5.68964E-11	=	6.49718E-21	8252.3
29			○	○	○	○	○						
30	パターン13	0*100	○	○	○	○	○	4.20612E-16	×	1	=	4.20612E-16	12009.1
31			○	○	○	○	○						
32	パターン14	0*50	○	○	○	○	○	4.20612E-16	×	1.50859E-05	=	6.34533E-21	20348.1
33			○	○	○	○	○						
34	パターン15	0*0	○	○	○	○	○	4.20612E-16	×	5.68964E-11	=	2.39313E-26	35531.7
35			○	○	○	○	○						

パターン1については、故障が発生しない確率を1で算出しており、全機場の排水機能が保たれている状態である事から想定被害額は0としている。よって被害リスクは0となり、故障しない場合の被害リスクは無いと考える。

各パターンの中で、特に被害リスクが高いパターンは、赤色で示した、パターン4、次に青色で示したパターン7（13：3号ポンプの排水機能が停止した場合）、黄色で示したパターン2である。パターン2～8は約1/10000の値となり、差が大きい。よって、本検討で注意すべき被害リスクが高い排水機場の各ポンプ設備の排水機能停止のパターンは、

- パターン4のM排水機場の1号・2号ポンプ設備のどちらかが壊れた場合

- パターン7のNo. 13：M排水機場の3号ポンプ設備が壊れた場合
- パターン2のK排水機場の1号・2号ポンプ設備のどちらかが壊れた場合

であると言える。

上記より、どれもポンプ設備が1台壊れた場合の被害リスクが高い事が分かる。これは、1台だけが故障する確率が高いからである。また、表-25の各パターンの被害リスク順位表からも各パターンの事象発生頻度の被害リスクの寄与率が高い事が分かる。多くのポンプ設備が機能停止になった場合の被害想定額は高い。しかし、各排水機場でポンプ設備が同時に壊れる可能性はとても低い事から被害リスクは小さい事が分かる。ポンプ設備だ

けに関して言えば、台数が多い方が同時に壊れる可能性はさらに減りリスク分散となる可能性が考えられる

表-25 被害リスク(高い順)

No.	各パターン	全体計	割合(全体)	M×K(%)	各パターンの事象発生頻度	各パターンの想定被害額(百万)	被害リスク	順位
5	パターン4	90	78%	75*100	1.47333E-05	2190.7	0.03227696	1
6	パターン4	90	78%	75*100	1.47333E-05	2190.7	0.03227696	1
13	パターン7	55	48%	50*100	7.75067E-06	2889.5	0.02239561	3
2	パターン2	107.5	93%	100*50	1.50859E-05	562.0	0.00847887	4
3	パターン2	107.5	93%	100*50	1.50859E-05	562.0	0.00847887	4
15	パターン8	57.5	50%	50*50	1.16926E-10	5779.7	6.7579E-07	6
16	パターン8	57.5	50%	50*50	1.16926E-10	5779.7	6.7579E-07	6
7	パターン5	82.5	72%	75*50	2.22266E-10	2782.5	6.1846E-07	8
8	パターン5	82.5	72%	75*50	2.22266E-10	2782.5	6.1846E-07	8
9	パターン5	82.5	72%	75*50	2.22266E-10	2782.5	6.1846E-07	8
10	パターン5	82.5	72%	75*50	2.22266E-10	2782.5	6.1846E-07	8
21	パターン10	30	26%	25*100	1.14193E-10	4372.1	4.9926E-07	12
22	パターン10	30	26%	25*100	1.14193E-10	4372.1	4.9926E-07	12
14	パターン7	55	48%	50*100	5.42678E-11	2889.5	1.5681E-07	14
4	パターン3	100	87%	100*0	5.68964E-11	2467.1	1.4037E-07	15
23	パターン11	32.5	28%	25*50	1.72271E-15	6538.9	1.1265E-11	16
24	パターン11	32.5	28%	25*50	1.72E-15	6538.9	1.1265E-11	16
25	パターン11	32.5	28%	25*50	1.72271E-15	6538.9	1.1265E-11	16
26	パターン11	32.5	28%	25*50	1.72271E-15	6538.9	1.1265E-11	16
11	パターン6	75	65%	75*0	8.38274E-16	7388.4	6.1935E-12	20
12	パターン6	75	65%	75*0	8.38274E-16	7388.4	6.1935E-12	20
29	パターン13	5	4%	0*100	4.20612E-16	12009.1	5.0512E-12	22
17	パターン8	57.5	50%	50*50	8.18681E-16	5779.7	4.7317E-12	23
18	パターン8	57.5	50%	50*50	8.18681E-16	5779.7	4.7317E-12	23
19	パターン9	50	43%	50*0	4.40985E-16	8192.1	3.6126E-12	25
30	パターン14	7.5	7%	0*50	6.34533E-21	20348.1	1.2912E-16	26
31	パターン14	7.5	7%	0*50	6.34533E-21	20348.1	1.2912E-16	26
27	パターン12	25	22%	25*0	6.49718E-21	8252.3	5.3617E-17	28
28	パターン12	25	22%	25*0	6.49718E-21	8252.3	5.3617E-17	28
20	パターン9	50	43%	50*0	3.08764E-21	8192.1	2.5294E-17	30
32	パターン15	0	0%	0*0	2.39313E-26	35531.7	8.5032E-22	31
1	パターン1	115	100%	100*100	1	0.0	0	32

ここで、被害リスクの算定より、被害リスクから整備・更新の優先順位を行う場合を考える。

表-24の結果から優先順位付けを行うと表-25のとおりになる。この優先順位表では1号または2号ポンプを整備・更新した場合、残りの一方と他のパターンのどちらが優先か不明である。

表-26に示す各パターンに一方を整備・更新した場合について各排水機場の事象発生頻度、各パターンの事象発生頻度、被害リスクについて再算出し優先順位を決定したものを表-27に示す。

これは、たとえばパターン4で1号ポンプか2号ポンプどちらか一方を整備・更新した場合、そのポンプはその後「故障しない(故障率0%・故障しない確率

100% : 1)」と仮定して算出を行った。すると、2台のポンプの内どちらか一方が故障する確率から、そのポンプが故障する確率に変わる事となるため、発生確率が半分となる。M排水機場の1号ポンプを整備・更新した場合、その後1号ポンプは故障しないと仮定する事から、M排水機場の2号ポンプだけが排水不可となる事象発生頻度は、M排水機場2号ポンプの故障確率7.6667E-06となる。よって、被害リスクは、0.016138478となる。この被害リスクは、パターン2のK排水機場1号ポンプor2号ポンプが機能停止する故障リスクより大きい事から、優先順位は3位となる。

K排水機場の1号ポンプを整備・更新した場合、その後1号ポンプは故障しないと仮定する事から、K排水機場の2号ポンプだけが排水不可となる事象発生頻度は、K排水機場2号ポンプの故障確率7.54297E-06となる。よって、被害リスクは、0.004239434となり、一番低い被害リスクとなる。

以上より、M排水機場・K排水機場の各ポンプの優先順位は以下のとおりである。

1. M排水機場1号ポンプ or 2号ポンプ
2. M排水機場3号ポンプ
3. M排水機場の残りの1号ポンプ or 2号ポンプ
4. K排水機場1号ポンプ or 2号ポンプ
5. K排水機場の残りの1号ポンプ or 2号ポンプ

上記より、リスク評価による設備整備の優先順位付けは可能であることが確認された。

5. まとめ

FMEAを準用した機能回復指標の算定について、昨年度の検討で、適切な評価が可能となった半面、「評価の適切性の他、評価項目が多く評価自体が難しい、あるいはより実態に近づけるためには評価項目毎の重み付けをどうするか、等の課題が示された。

今年度はそれを受け、適用性について精査するとともに、排水機場以外の土木機械設備」とした点について、

表-26 被害リスクを元にした整備優先順位付け(再算出前)

No.	施設名	全体計 m/s	パターン4	整備・更新するポンプ設備	M排水機場の事象発生頻度	K排水機場の事象発生頻度	各パターンの事象発生頻度	各パターンの想定被害額(百万)	被害リスク	優先順位
1	M排水機場	90	パターン4	1号ポンプor2号ポンプ	1.47333E-05	1	1.47333E-05	2190.742605	0.032276956	1
2	M排水機場	55	パターン7	3号ポンプ	7.75067E-06	1	7.75067E-06	2889.506145	0.022395609	2
3	K排水機場	107.5	パターン2	1号ポンプor2号ポンプ	1	1.50859E-05	1.50859E-05	562.037735	0.008478868	3

表-27 被害リスクを元にした整備優先順位付け(再算出後)

No.	施設名	全体計 m/s	パターン4	整備・更新するポンプ設備	M排水機場の事象発生頻度	K排水機場の事象発生頻度	各パターンの事象発生頻度	各パターンの想定被害額(百万)	被害リスク	優先順位
1	M排水機場	90	パターン4	1号ポンプor2号ポンプ	1.47333E-05	1	1.47333E-05	2190.742605	0.032276956	1
2	M排水機場	55	パターン7	3号ポンプ	7.75067E-06	1	7.75067E-06	2889.506145	0.022395609	2
4	M排水機場	90	パターン4	M機場の残りの1号ポンプor2号ポンプ	7.36667E-06	1	7.36667E-06	2190.742605	0.016138478	3
3	K排水機場	107.5	パターン2	1号ポンプor2号ポンプ	1	1.50859E-05	1.50859E-05	562.037735	0.008478868	4
5	K排水機場	107.5	パターン2	K機場の残りの1号ポンプor2号ポンプ	1	7.54297E-06	7.54297E-06	562.037735	0.004239434	5

算定方法の再整理と算定対象モデルを増やしての検証、さらには河川水門設備をモデルとした検証を行った。これにより、機能回復指標が明確に機能回復能力の定量的評価が可能であることが確認された。

今後は、算定マニュアルの策定など機能回復指標の実用化に向けた検討を進めていきたい。

また FTA を活用した方法では、河川 GIS モデルを用いた浸水被害シミュレーションでの評価も加えたりリスク評価により、設備の整備優先付けが可能かを検討してみた。ただし、河川 GIS モデルを用いた浸水被害算人的面や費用面などコストがかかることから、実用化に向けてはこれらの問題点の解消が課題となる。

なお、これらの評価に当たっては、故障情報などのデータの充実が不可欠であるが、現時点ではデータに欠落があるなど、必ずしも統計処理に適切なデータであるとは言えないのが現状である。

繰り返しになるが、真に故障が少ないがためにデータが少ないのであれば設備管理上喜ばしいことではあるが、データに漏れがあるならばそれを効率的かつ確実に収集する方法の検討が今後の課題となる。

参考文献

- 1) 国土交通省：河川ポンプ設備点検・整備・更新マニュアル（案）、84p.、平成 27 年 3 月

6.4 既往事象・現場条件に対応した最適な維持修繕手法、構造・材料の開発・評価

6.4.1 既設橋の合理的な性能評価手法および補修・補強方法に関する研究 (1)

担当チーム：橋梁構造研究グループ

研究担当者：石田雅博、大島義信、山本将
山口岳思

【要旨】

高度経済成長期に集中的に整備された橋梁が一斉に高齢化を迎える中、さまざまな劣化要因による損傷事例が報告されており、損傷した既設 PC 橋の性能評価法および補修補強技術の確立が求められている。今回、外ケーブル補強後 21 年が経過した既設 PC 桁を対象に、その補強効果を確認することを目的に載荷試験を実施した。

キーワード：PC 橋、既設 PC 桁、塩害、劣化、損傷、外ケーブル補強、載荷試験、解体調査

1. はじめに

橋梁の高齢化に伴い PC 橋に生じる損傷として、内部の既設 PC 鋼材が腐食・破断した事例がある。それらの損傷に適用する補強工法の一つとして、外ケーブル工法がある。これは、桁外部に定着部、偏向部を設けて PC ケーブルを設置、緊張し、内ケーブル破断によって失われたプレストレスを再導入するものであり、施工実績も比較的多い¹⁾。

しかしながら、損傷を有する既設 PC 桁については、損傷の有無や程度など新設基準とは前提条件が異なるため、損傷に対しての定量的な補強効果の把握が必要とされる。

本研究では、外ケーブル補強された損傷を有する既設 PC 桁を対象に、その補強効果を定量的に把握することを目的に載荷試験を実施した。また、既往研究を含め外ケーブル工法の補強効果が確実に発揮可能な限界について考察した。



写真-1 橋梁全景（左上）および外ケーブル設置状況（右下）

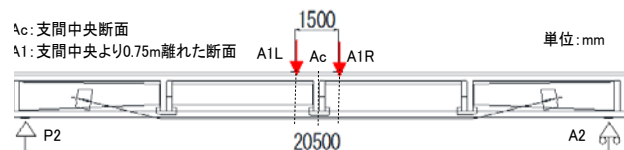


図-1 載荷試験概要図

2. 実験概要

2.1 撤去 PC 桁の概要

対象橋梁は1962年に海岸から約70mの河口上に建設された3連のPC単純T桁橋である。本橋は、1976年より塩害補修が着手され、その後既設PC鋼材の破断が点検で確認され、1996年に外ケーブル補強が行われた。2017年には新橋建設に伴い撤去されることになり、外ケーブル補強された第3径間G4桁を譲り受けた（写真-1）。

2.2 載荷試験方法

載荷試験概要図を図-1に示す。支間20.5m、載荷

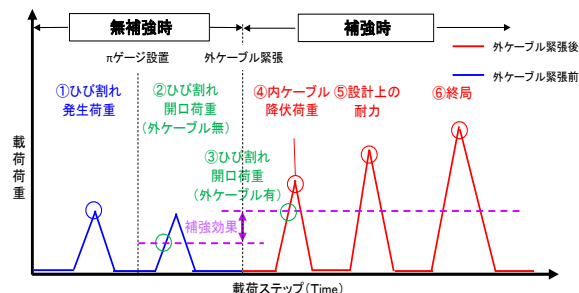


図-2 載荷パターン

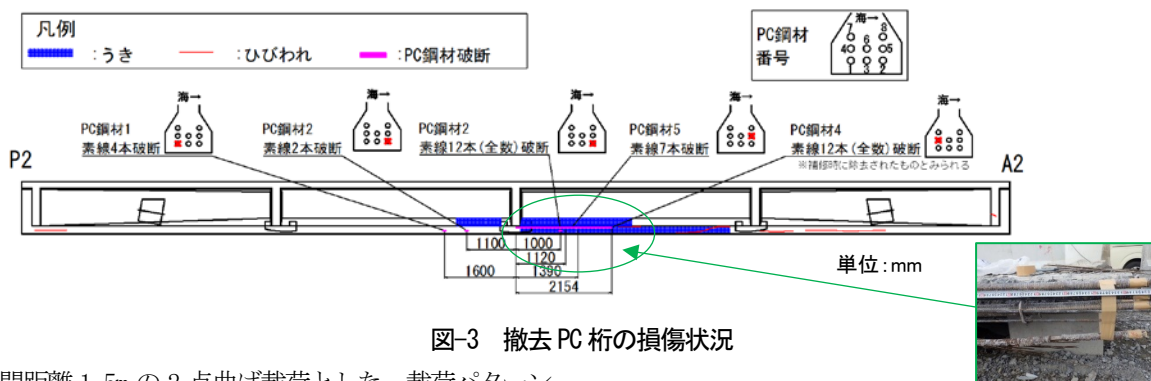


図-3 撤去PC桁の損傷状況

点間距離 1.5m の 2 点曲げ荷重とした。荷重パターンを図-2 に示す。本研究では外ケーブル補強効果の確認を目的とするため、無補強時と補強時に分けて試験を行った。

図-2 に記載の「②ひび割れ開口荷重(外ケーブル無)」(荷重②) から「③ひび割れ開口荷重(外ケーブル有)」(荷重③) を差し引いた値が、ひび割れ開口に対する外ケーブル補強効果となる。その後は、「④内ケーブル(既設 PC 鋼材) 降伏荷重」(荷重④)、「⑤設計上の耐力」(荷重⑤)、「⑥終局」(荷重⑥) に十分に達した時点で一旦除荷し、最後は破壊に至るまで荷重した。

3. 解体調査による損傷状況把握

既設 PC 桁の損傷状況把握のため、荷重試験後に解体調査を実施した。既設 PC 鋼材は 12φ5mm のものが 8 本配置されていたことが判明した。

PC 鋼材の状況について、腐食が確認されない場合若しくは薄錆が全面にあるがブラシで磨くと地鉄が出るものを「健全」、PC 鋼材の径が減少しているものを「劣化」と評価した²⁾。

健全な PC 鋼材の引張強度は設計値 1740N/mm² を上回ったが、顕著な腐食劣化が確認された PC 鋼材は、設計値に対し引張強度が約 77% に低下 (1312N/mm²) することが確認された。また、コンクリートの圧縮強度は、本橋が場所打ち PC 桁であり、コアの圧縮強度試験の平均が 60.7N/mm² であったことから、40N/mm² と推定した。

撤去 PC 桁の損傷状況を図-3 に示す。外観上、撤去 PC 桁には下流側(海側)の桁側面にコンクリートのうきやひび割れが広範囲に見られた。解体調査にて、支間中央から A2 側に 1.0m 離れた位置で PC 鋼材が最大 2 本破断していることが判明した。なお、1996 年の補強前には 5 番と 8 番の既設 PC 鋼材 2 本 (25%) が破断していたとの記録が残されていた。

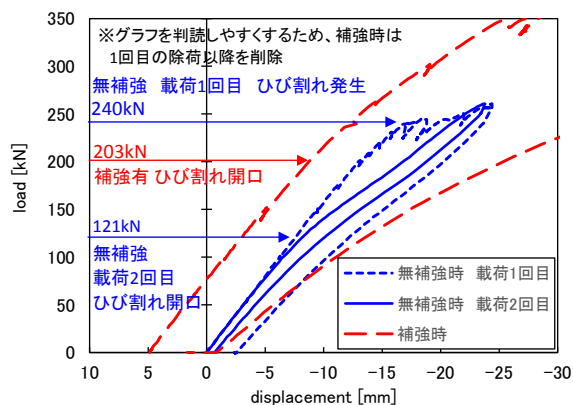


図-4 荷重-支間中央変位 (低荷重時)

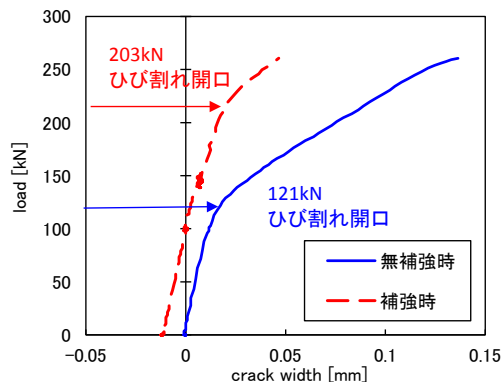


図-5 荷重-ひび割れ幅 (Ac 断面)

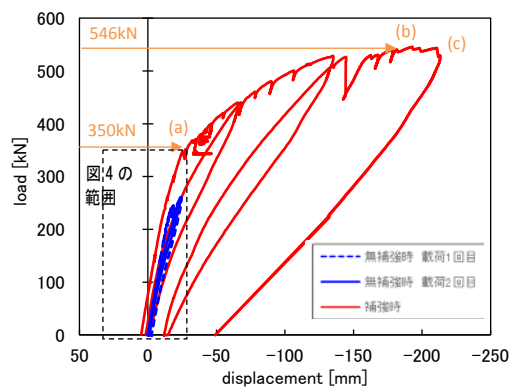


図-6 荷重-支間中央変位 (補強時)

4. 載荷試験結果

4.1 ひび割れ開口荷重とおよび曲げ破壊荷重

載荷試験による荷重変位関係(図-4, 6) および荷重ひび割れ幅関係(図-5)を示す。無補強時の2回目の載荷では、1回目より屈曲時の荷重が低下した。図-4および図-5の屈曲状況より、ひび割れ開口荷重を121kNと判断した。

終局までの荷重変位関係を図-6に示す。ひび割れ幅が屈曲した203kNを補強時のひび割れ開口荷重と判断した。最終的には、変位210mmに達した時点(c点)で載荷点間の上縁コンクリートに圧壊が生じ、荷重が低下したため曲げ破壊に至ったと判断した。

載荷試験にて、外ケーブル補強により撤去PC桁のひび割れ開口耐力および曲げ破壊耐力を増加させ、建設時と同等の耐力まで補強できることが確認された。

4.2 ひび割れ性状

載荷試験中のひび割れ発生状況を図-7に示す。ひび割れの発生は、無補強時および補強時の既設PC鋼材の降伏時(荷重④)までA1R地点(既設PC鋼材が2本破断している付近)を中心にA2側に偏在した。しかし、既設PC鋼材の降伏以降に関しては載荷点を中心に概ね均等にひび割れが発生した。

A1R地点およびAc地点の引張鉄筋ひずみとひび割れ幅の関係を図-8に示す。図にはコンクリート標準示方書より求まる曲げひび割れ幅の算定値³⁾を併記した。

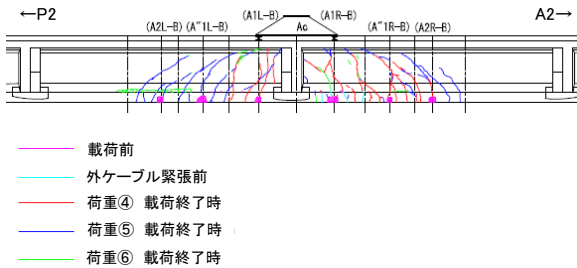


図-7 ひび割れ発生状況

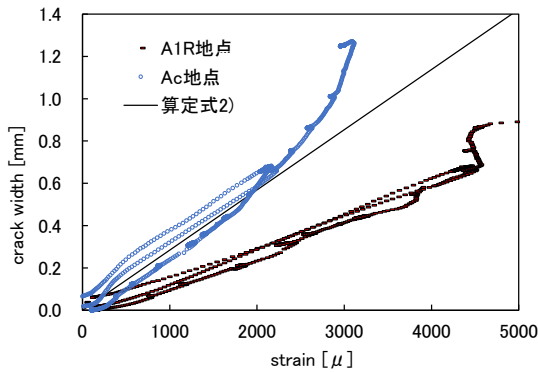


図-8 引張鉄筋ひずみとひび割れ幅の関係

ひび割れ幅0.6mm程度までは両地点とも引張鉄筋ひずみと概ね線形関係にあり、Ac地点では引張鉄筋ひずみが2000 μ 程度(丸鋼の降伏ひずみ以上)まで既往の曲げひび割れ算定式に近似した。Ac地点では、PC鋼材の破断により局部的に引張鉄筋ひずみが卓越したが、算定式ではひび割れ幅はひび割れ間の平均ひずみに比例するため、算定式がひび割れ幅を過大に見積もったためと推察される。

以上より、今回試験を行った撤去PC桁では、初期ひび割れが偏在したが、外ケーブル補強後はひび割れが分散し、引張鉄筋が降伏するまで既往の算定式により曲げひび割れ幅を評価できることが確認された。

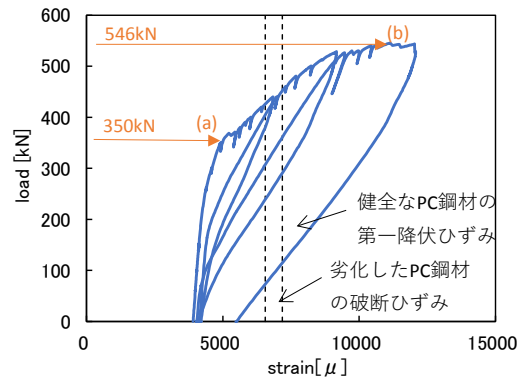


図-9 荷重-既設鋼材ひずみ(支間中央)

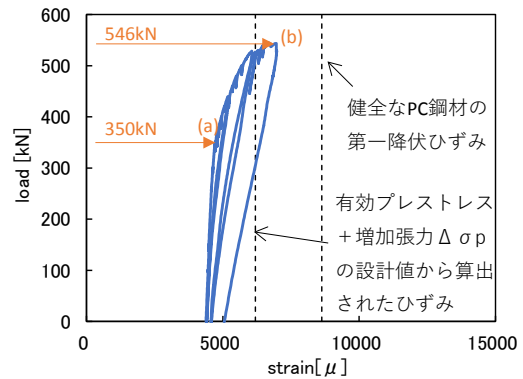


図-10 荷重-外ケーブルひずみ(支間中央)

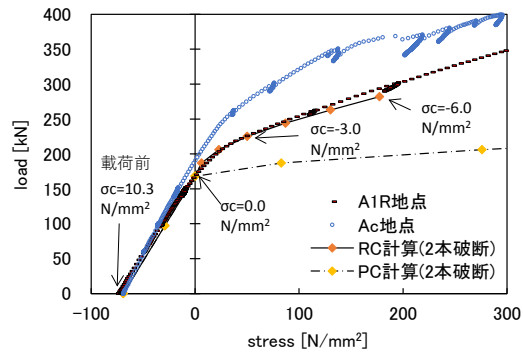


図-11 荷重-引張鉄筋応力(補強時)

4. 3 PC鋼材ひずみ

支間中央の既設PC鋼材ひずみを図-9に示す。既設PC鋼材ひずみは載荷荷重350kN付近のa点で屈曲し降伏したと推測される。しかし、a点のひずみは約5000 μ であり、健全なPC鋼材の第一降伏点ひずみや劣化したPC鋼材の破断ひずみよりも小さい。

つまり、a点は他の部位（前述のA1R地点）で既設PC鋼材が第一降伏を超過したと推察される。また、載荷荷重546kNとなる図中のb点ではひずみが10000 μ を超えることから、PC鋼材の第二降伏に至り、荷重が頭打ちになったと推察される。

外ケーブルの荷重-ひずみ関係を図-10に示す。外ケーブルひずみは最大荷重時でも約7000 μ であり、第一降伏ひずみ（8600 μ ）に至っていない。なお、実験における外ケーブルの張力増加量 $\Delta\sigma_p$ は490N/mm²であり、コンクリート標準示方書より算定される外ケーブルの張力増加量³⁾の429N/mm²以上であった。

以上より、今回試験した撤去PC桁を外ケーブル補強した場合は、既設PC鋼材が降伏するまでに破壊に至らないこと、補強後の曲げ耐力は既往の算定式により算出した外ケーブルの張力増加量を用いて評価できることが確認された。

5. 外ケーブル工法の補強効果が確実に発揮可能な限界に関する考察

載荷試験にて得られた引張鉄筋ひずみから実応力を算定した結果を図-11に示す。図には既設PC鋼材が2本破断した際のRC計算と全断面有効として計算したコンクリート引張応力(σ_c)をすべて引張鉄筋に受け持たせた場合の計算値(PC計算)を合わせて示した。A1R地点の引張鉄筋は補強前に降伏応力を受けたが、補強後の荷重応力関係はRC計算と概ね一致し、PC計算は安全側の設計値を与えることが確認された。

本研究および過年度研究^{4)~6)}ではPC鋼材破断率が25~29%の範囲であれば建設時と同等の耐力まで補強可能であることが確認された。(表-1)

表-1 外ケーブル工法による曲げ耐力回復度

	PC鋼材 破断率 (%)	(A) 載荷試験 の最大荷重 (kN)	(B) 建設時 曲げ破壊荷重 (kN)	曲げ耐 力比 A/B
本研究	25	546	553	0.99
文献4	25	919	962	0.96
文献5	29	430	385	1.12
文献6	65	492	1450	0.34

6. まとめ

本研究を通じ、次の知見が得られた。

- (1) 今回試験を行った撤去PC桁の外ケーブル工法による補強効果に関し、ひび割れ開口耐力および曲げ破壊耐力を増加させること、ひび割れを分散させ引張鉄筋が降伏するまで既往の算定式により曲げひび割れ幅を評価できること、既設PC鋼材が降伏するまでに破壊に至らず補強後の曲げ耐力が既往の算定式により算出した外ケーブルの張力増加量を用いて評価できることを確認した。
- (2) 外ケーブル工法の補強効果が確実に発揮可能な限界に関し、引張鉄筋が補強前に受ける応力履歴が降伏応力までであれば補強後の荷重応力関係はRC計算と概ね一致し、かつ、全断面有効のPC計算は安全側の設計値を与えること、PC鋼材破断率が25~29%の範囲であれば建設時と同等の耐力まで補強可能であることを確認した。

謝辞

本研究は、プレストレスト・コンクリート建設業協会と土木研究所との「撤去橋梁を用いた既設PC橋梁の補修補強技術の高度化に関する共同研究」の一環として行われた。ご協力を頂いた関係各位に対し、ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) プレストレスト・コンクリート建設業協会：外ケーブル方式によるコンクリート橋の補強マニュアル(案)、pp. 1-4、1998. 6 ([改訂版]、2007. 4)
- 2) プレストレスト・コンクリート建設業協会：プレストレストコンクリート構造物の補修の手引き(案) [断面修復工法]、pp. 88-93、2009. 9
- 3) 土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書設計編、pp. 231-234、2018. 3
- 4) 蒲和也、増井隆、秋元泰輔：44年供用したPC桁の載荷試験報告(その2)、第22回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集、pp. 239-242、2014. 10
- 5) 中村定明、濱田譲、谷口秀明、中村雅之：PC橋の改造技術に関する研究—その3：PC部材のはつりの適切性に関する研究—、プレストレストコンクリート、Vol. 50、No. 1、pp. 54-60、2008. 1
- 6) 土木研究所：塩害を受けたPC橋の耐荷力評価に関する研究、土木研究所資料第3816号、pp. 65-76、2001. 3

6.4 既往事象・現場条件に対応した最適な維持修繕手法、構造・材料の開発・評価

6.4.1 既設橋の合理的な性能評価手法および補修・補強方法に関する研究 (2)

担当チーム：材料資源研究グループ

研究担当者：西崎到、新田弘之、佐々木巖、櫻庭浩樹

【要旨】

本研究では、既設コンクリート橋の長寿命化に向けて、コンクリート橋の代表的な補修工法の一つである表面保護工法の設計方法を高度化し、補修の効果や信頼性を向上させることを目的としている。平成 28 年の検討では、表面保護工法の塗布部位の違いによりコンクリート内部の含水状態が変化し、鉄筋腐食環境に影響を及ぼすことを明らかにした。補修においては水分をはじめとしたコンクリート内部の環境状態を制御することが重要になることから、平成 29 年度は実大断面を有する桁供試体を用いて、コンクリート内の水分分布とその経時変化を実際に把握するための検討を行った。平成 30 年度は、表面保護工法の塗布部位に関する腐食抑制効果の長期耐久性評価として、供試体暴露 5 年後までの鋼材腐食状況を調査し、塗布部位の影響や含浸材の効果調べた。また、実大桁の水分状態の年間変動を観測した。

キーワード：既設コンクリート橋、補修、表面保護工法、塗布部位、鉄筋腐食

1. はじめに

表面保護工法は、表面被覆材や表面含浸材をコンクリート構造物の表面に塗布して遮蔽層を形成することにより、劣化因子の浸入を抑制する工法である。表面保護工法は、劣化因子が浸入する可能性がある全ての面に施工することが望ましいとされている¹⁾。しかし、塩分を含んだ水の移流が避けられない部位や、ASR や凍害等の劣化機構により乾燥状態を維持したい部位等では、遮蔽型の表面保護工法の適用が好ましくない場合もあると推察される。既設構造物の場合は、土中や他部材との近接干渉等により表面保護工法の適用が困難な場合もある。さらには、塗布される保護材料には様々なものがあるが、環境条件に応じた使い分けの考え方は確立されていない。

本研究では、表面保護工法の塗布部位の選定方法および塗布材料の使い分けの考え方を確立し、表面保護工法の設計を高度化させることで、表面保護工法の補修効果や信頼性を向上させることを目的としている。調査の視点として、まず鉄筋の腐食環境をとりあげているが、ASR や凍害などの対策にも応用が期待できる。

平成 30 年度は、水分をはじめとしたコンクリート内部の環境状態を踏まえた補修設計を可能にするために、表面保護材を塗り分けた供試体の暴露 5 年後までの鋼材腐食状況調査、実大断面の桁供試体によるコンクリート内の水分状態の経時変化の観測を行った。

2. 塗布部位の異なるコンクリート供試体による試験

2. 1 試験方法

2. 1. 1 供試体

基材コンクリートの配合を表-1 に示す。初期の塩化物イオン量の影響を検討するために、全塩化物イオン量が $0\text{kg}/\text{m}^3$ 、 $2.4\text{kg}/\text{m}^3$ 、 $6\text{kg}/\text{m}^3$ となるように、 $150\times 150\times 500\text{mm}$ でかぶり 30mm の供試体を作製した。図-1 に供試体の概要図、表-2 に塗布部位を示す。供試体の名称は、例えば E3 のように、塗布材料と塗布部位の数で表した。塗布材料の記号は、基準無塗装を R、被覆材を E、含浸材(表-2 の記号 S, N, L) とし、材料記号の後に塗布部位の面数を表記した。なお、E3 と E4 の供試体は鉄筋軸方向の両側端面に表面被覆材を塗布し、その他の供試体は片側端面にのみ塗布した。表面被覆材料は表-3 に示す市販エポキシ樹脂系の塗装を、含浸材も市販の標準的な材料を規定の塗布量で用いた。

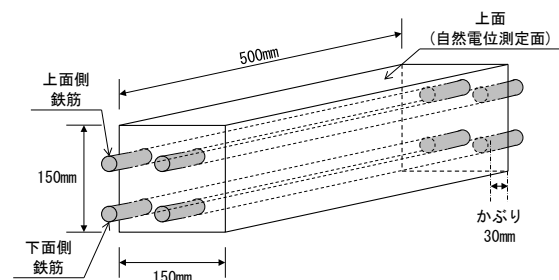


図-1 供試体の概要図

表-1 基材コンクリートの配合

W/C (%)	単位量 (kg/m ³)				
	水	セメント	細骨材	粗骨材	混和材
55	160	299	858	968	4.19

初期塩化物イオン量 0kg/m³、2.4kg/m³、セメント 普通ポルトランドセメント、最大粗骨材寸法 20mm、スランブ 8cm、空気量 4.5%

表-2 供試体の種類

名称	鉄筋軸方向の面における塗布面 表面被覆材		概要図
	表面被覆材	表面含浸材	
R	—	—	
E2	2面 両側面	—	
E3	3面 両側面、底面	—	
S1E2	2面 両側面	底面にシラン系	
E1H2	両側面 (底面から 50mm)、 底面	側面 (上端から 100mm)にシラン 系表面含浸材	
S3 or N3 or L3	—	両側面および底面 S:シラン系 N:けい酸 Na 系 L:けい酸 Li 系	

表-3 使用した表面被覆材の仕様

構成材料の 名称	主成分	塗布量 (kg/m ³)	目標膜厚 (μm)
プライマー	エポキシ樹脂	0.10	—
パテ	エポキシ樹脂	0.50	—
中塗り	エポキシ樹脂	0.20	110
上塗り	アクリルウレタン樹脂	0.12	30

2. 1. 2 促進劣化サイクル試験

促進劣化サイクル試験は、初期塩化物イオン量 0kg/m³の供試体を用いて実施した。試験には、環境温湿度の制御および塩水散布が可能な設備を用いた。試験条件は、3%NaCl 水溶液の散布を 0.5hr、40°C90%RH を 5.5hr、60°C 30%RH を 6hr と設定し、1 サイクルを 12hr とした。促進劣化サイクル試験は、鉄筋の腐食によるひび割れの発生状況を考慮し、440 サイクルで終了した。

測定項目は、全塩化物イオン量、鉄筋の自然電位および腐食減量とした。全塩化物イオン量の分析は JCI-SC4 (硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法) に準

拠して行った。供試体の上面中央部から直径 26mm のコンクリートコアを乾式方法にて採取し、供試体の上面から板厚 2~3cm のスライス片に切断して測定試料とした。

鉄筋の自然電位は、照合電極に銀塩化銀電極を用いて、上面側、下面側 1 本ずつの計 2 本 (以下、上部鉄筋と下部鉄筋) を対象とし、供試体の上面から測定した。測定箇所は、供試体上面の鉄筋軸方向 (L=500mm) を約 83mm 間隔で等分した 5 点とした。自然電位の測定値は、照合電極の温度依存性を考慮して飽和硫酸銅 (CSE) 基準に換算し、ASTM の基準に従って腐食状態を判定した。鉄筋の腐食減量は、上部鉄筋と下部鉄筋の計 2 本を対象とし、JCI-SC1 に準じて行った。

2. 1. 3 屋外暴露試験

(1) つくばにおける試験

供試体内部の含水状態を確認することを目的として、飛来塩分の影響を受けない茨城県つくば市の屋外で暴露試験を行った。試験対象の供試体は、初期塩分量 0kg/m³ の R、E3、E4 とした。

含水状態を確認するため、供試体の上面側および下面側の左右鉄筋間のコンクリート電気抵抗を測定した。測定には、ポテンショガバナスタットと FRA (周波数特性分析器) を用いた。測定は、交流インピーダンス法により、電圧 30mV、周波数 100kHz から 500MHz の交流波を印加して行い、得られた液抵抗成分を鉄筋間の電気抵抗 (以下、電気抵抗と称す) とした。屋外暴露は、暴露期間 161 日まで計 8 回電気抵抗を測定した。なお、屋外暴露開始直前まで、供試体は常温の室内に静置した。

(2) 沖縄大宜味における試験

飛来塩分の影響を受ける環境での供試体の腐食挙動を検討するために、沖縄県大宜味村の海岸に位置する暴露試験場で暴露試験を実施した。

大宜味での屋外暴露は初期塩分 2.4 および 6kg/m³ の供試体を対象とし、暴露供試体の調査は原則として夏と冬の年 2 回、定期的に実施してきている。調査項目は、供試体の自然電位、電気抵抗、分極抵抗である。

自然電位の測定は促進劣化サイクル試験と同様に実施した。電気抵抗は、コンクリート中の水分状態の把握として、LCR メータを用いて、鋼材表面の腐食分極状態に影響されないよう周波数を 1kHz としてコンクリートのインピーダンスを測定した。

分極抵抗は、つくばでの電気抵抗の測定と同じ機器を用い、照合電極を銀塩化銀電極、対極を測定対象鉄筋以外のもう一方の上面側鉄筋と下面側鉄筋を短絡させて実施した。測定は交流インピーダンス法により行い、電圧

10mV、周波数 100kHz から 0.1mHz の交流波を印加した。測定された見かけの分極抵抗測定値から鉄筋の腐食電流密度を算出した。

2. 2 試験結果および考察

2. 2. 1 促進劣化サイクル試験

鉄筋の自然電位と腐食減量の測定結果を図-2 に示す。上面側鉄筋の自然電位に着目すると、一般的な腐食判定基準によれば、R は 90%以上腐食ありの判定領域、E2 と E3 は不確定の判定領域であった。下面側鉄筋は R と E2 は 90%以上腐食ありの判定領域、E3 は 90%以上腐食なしの判定領域であった。また、腐食減量を測定した結果も同様の傾向が示され、上面側、下面側ともに腐食減量の小さいものから E3<E2<R という順列となった。

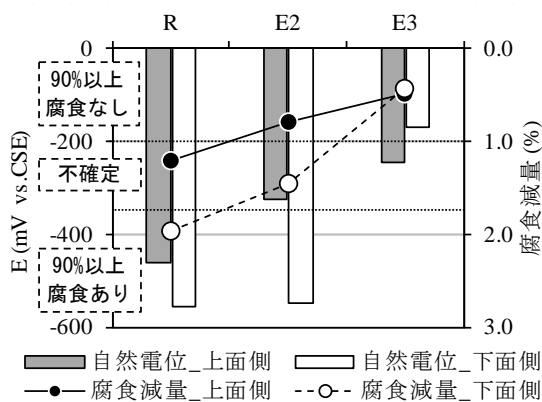


図-2 440 サイクル終了時の鉄筋自然電位

供試体の塩化物イオン量測定結果を図-3 に示す。図にはコンクリート標準示方書設計編 (2012 年) の普通ポルトランドセメントの腐食発生限界量算定式から求めた腐食発生限界量 (1.75kg/m³) も併せて示す。

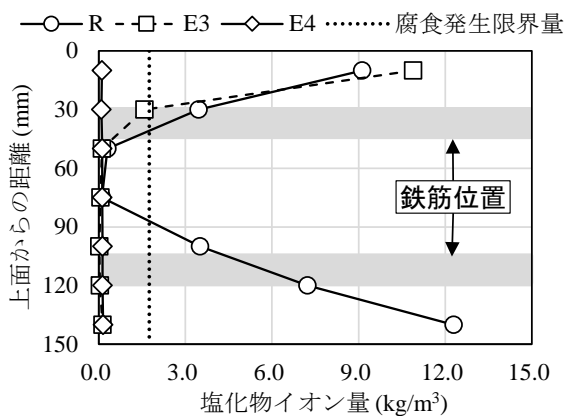


図-3 440 サイクル終了時の塩化物イオン量分布

E4 は 6 面全面が被覆されているため、全ての範囲でほぼ 0kg/m³であった。一方、R は供試体上面から 40mm までの範囲、および 90mm から 150mm (下面から 60mm) までの範囲で腐食発生限界量を上回った。E3 は上面から 20mm までの範囲は腐食発生限界量を上回ったが、20~40mm の範囲で 1.6kg/m³ となり、これ以外の範囲はほぼ 0kg/m³であった。さらに、E3 は R に比べて、上面付近 (0~20mm) の範囲では塩化物イオン量が多かったものの、上面側鉄筋位置に相当する 20~40mm の範囲では R よりも少なかった。これらの結果は、自然電位測定の腐食判定結果と一致している。

以上の結果から、表面被覆材による塗布部位の違いが内部への塩分進入挙動に影響を与え、鉄筋位置に応じて腐食抑制効果に差異を生じることが確認された。

2. 2. 2 屋外暴露試験

(1) 飛来塩分の影響を受けない環境 (つくば) での暴露

暴露に伴う鉄筋間の電気抵抗の変化を図-4 に示す。図中には平均湿度として測定日と測定日 5 日前までの日平均湿度の平均値、および日降水量を合わせて示す。屋外暴露による供試体内部の水分分布の変化を確認するため、暴露前に供試体を相対湿度 20~40%の室内で静置し、含水率が低い状態から暴露を開始した。

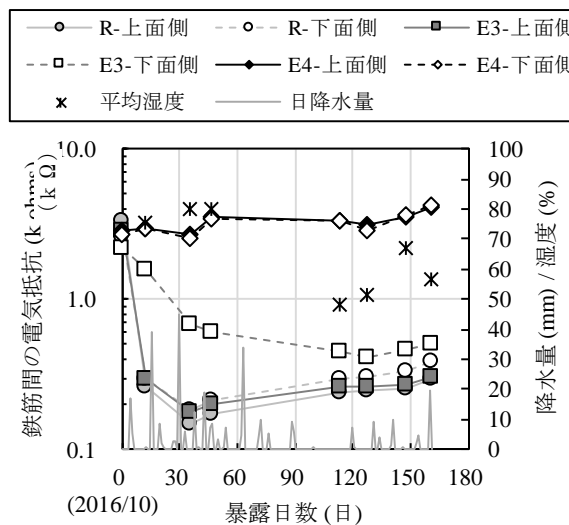


図-4 暴露に伴う鉄筋間の電気抵抗の変化

暴露開始直後から、R と E3 は、電気抵抗が低下した。一方、E4 はほぼ一定の値を示した。R と E3 の電気抵抗の低下は、暴露開始時の湿度や降水の影響によるものと推察される。E4 は露出部がないため水分の影響を受けにくいため、他の供試体と比較して、電気抵抗は変化していない。R と E3 はコンクリートの露出部があるため、大気

中の水分の影響を受けてコンクリート内部の含水量が増加して、電気抵抗が小さくなっている。R の上面側、下面側、およびE3 の上面側は、およそ14日で電気抵抗の急激な低下が収束したが、E3 の下面側はおよそ40日まで収束せず、その後も緩やかに低下した。また、暴露からおよそ150日後の電気抵抗を比較すると、上面側についてはRとE3はほぼ同じ値を示したが、下面側では若干異なり、E3の方が抵抗は大きかった。

以上より、下面側の電気抵抗および暴露に伴う変化がRとE3で異なる結果であったため、塗膜で周囲を覆われているE3の下面側鉄筋付近の内部環境は異なることが示唆された。

(2) 飛来塩分環境下（沖縄大宜味）での暴露

鋼材の腐食環境としての自然電位の測定結果を図-5～9に示す。まず表面被覆材の塗布範囲に着目すると、塩化物イオンが6kg/m³入っている供試体群では、図-5に示すように上面側の鉄筋は暴露直後から腐食状態にある。これは、被覆状態の影響をあまり受けない供試体形状で無被覆Rに近い環境であるためと考えられる。下面側の鉄筋では、図-6において一部のシラン系供試体では3年後までは腐食不確定であったが、4年目を以降はすべてが継続的に腐食状態にある。塩分が高濃度に浸透すると表面保護工では対策できないことが確認できる。

塩化物イオンが2.4kg/m³については、被覆状態の影響をあまり受けない上面側の鉄筋では6kg/m³に類似しているもの図-7に示すように暴露後すぐに腐食不確定から腐食ありの状態が続いている。

表面被覆材の塗布範囲に着目し下面側鉄筋をみると、図-8に示すようにE3下面側鉄筋は90%以上腐食なしから暴露4年後頃に腐食不確定の判定領域となり、RおよびE2では、数年間不確定ののち腐食ありに移行した。上面以外が井状に被覆されているE3では、下面側鉄筋では含水状態が高く維持されるなど酸素が供給されにくい状況にあったと考えられ、ある程度腐食を抑制できる環境であったとみられる。それ以外の条件では、塩化物、水、酸素の供給が十分に供給され、被覆による効果が得られなかったことがわかる。

含浸材の影響は、シラン系含浸材では図-8の破線で示すように90%以上腐食なしが数年続いたのちに不確定の判定領域となり、適用条件によっては乾燥状態の維持等による腐食抑制に寄与しうることがわかる。

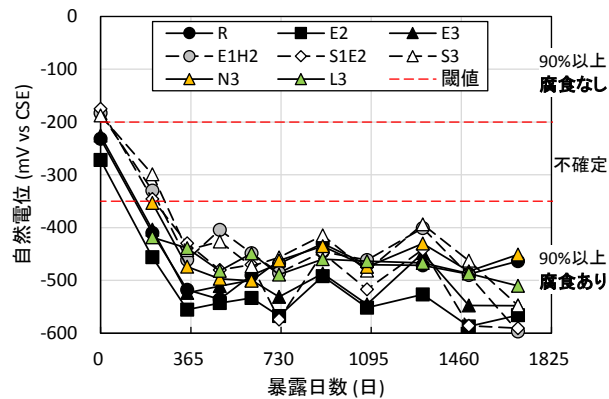


図-5 塩化物6kg/m³上側鉄筋の自然電位変化

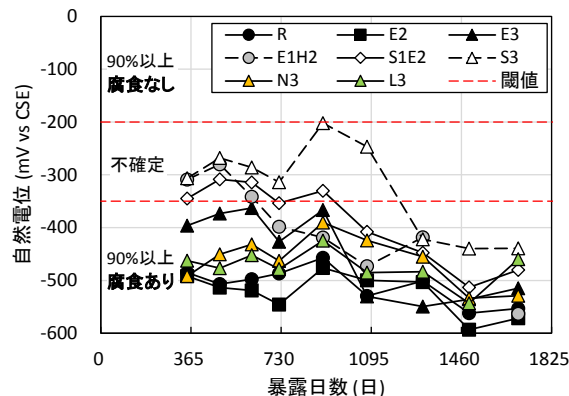


図-6 塩化物6kg/m³下側鉄筋の自然電位変化

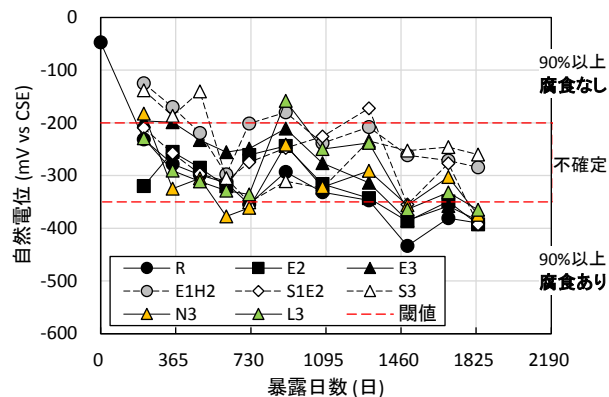


図-7 塩化物2.4kg/m³上側鉄筋の自然電位変化

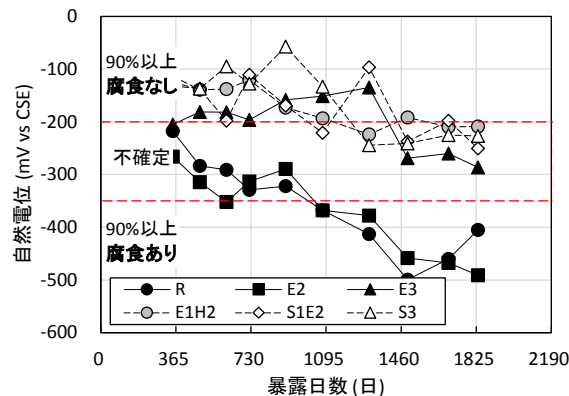


図-8 塩化物2.4kg/m³下側鉄筋の自然電位変化

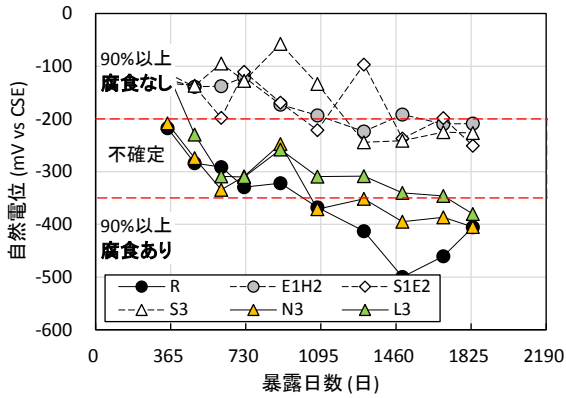


図-9 塩化物 2.4kg/m³下側鉄筋の自然電位変化

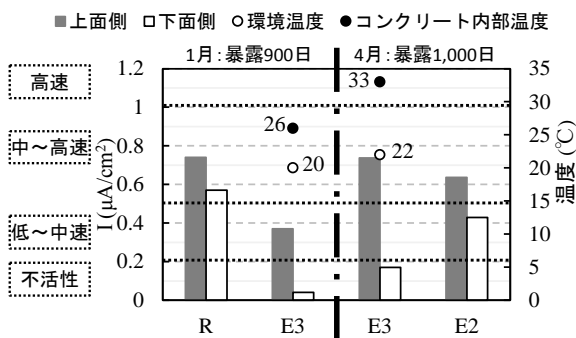


図-10 鉄筋の腐食電流密度の比較

けい酸塩系の表面含浸材は、図-9 に示すように暴露開始後1年で腐食不確定になり、数年後には腐食ありに移行していることから、塩分存在下での対策に用いるのは困難であることが示唆される。

鉄筋の腐食速度として、分極抵抗測定より算出した腐食電流密度の結果を図-10 に示す。また、腐食電流密度から判定される一般的な腐食速度の基準を併せて示す。腐食電流密度の測定は、暴露 2.5[~]3 年時点での1月と4月に実施した。900 日後に測定したRとE3の腐食電流密度を比較すると、上面側、下面側鉄筋ともにRの方が大きく、特に下面側で違いが顕著であった。次に1000 日後に測定したE3とE2とを比較すると、上面側鉄筋はほぼ同じであったが、下面側鉄筋に違いが見られ、E2の方が大きかった。また、両測定日に共通して測定したE3の結果から、900 日後に比べて、1000 日後の方が腐食電流密度は大きいことが分かる。これは、図中に標記した環境温度とコンクリート内部温度 (R 供試体中央部の温度) から、測定時の温度が高いほど腐食速度は大きくなることも影響している。

これらを踏まえ被覆範囲の影響をみると、供試体の上面が無処理であることもあり、下面側鉄筋にて腐食電流

密度の差が顕著に表れており、腐食の小さいものから順に、E3<R≒E2 と考えることができる。暴露数年後の腐食速度測定でみられたこの順列は、自然電位の測定結果とも一致しており、5 年暴露後の自然電位の状態はその腐食速度の相違の結果として生じていることが今年度の調査結果から確かめられた。

表面含浸材の効果については、シラン系含浸材は塗布範囲を有効に設定した被覆材と同等以上の腐食抑制効果がみられている。一方、けい酸塩系含浸材は、塩害に対する有効な腐食抑制効果が得られるとはいえない結果となっている。

3. 実大断面を有する供試体による内部環境の評価

鉄筋コンクリート供試体を用いた促進劣化サイクル試験および屋外暴露試験より、塗布部位によりコンクリート内部の環境が異なり、鉄筋の腐食抑制効果に影響を及ぼすことが確認された。この効果を実大規模で部材としての形状の中での挙動を検証するため、JIS A 5373 道路橋用橋げたを模擬した供試体 (T 形断面) を製作し、屋外暴露試験を開始した。供試体の概要と暴露後約1年間の測定結果を示す。

3.1 水分評価方法の検討

供試体の設置状況を図-11 に、コンクリートの配合を表-4 に示す。供試体は合計4体製作し、茨城県つくば市の屋外暴露場に平成29年2月に設置した。



図-11 実大断面を有する供試体の設置状況

表-4 コンクリートの配合

W/C (%)	単位量 (kg/m ³)				
	水	セメント	細骨材	粗骨材	混和材
40.5	181	447	668	991	4.02

セメント：普通ポルトランドセメント、最大粗骨材寸法 20mm、スランブ 13cm、空気量 3.7%

この桁供試体では、コンクリートの水分量により電気伝導性が変化することを利用して、電気抵抗を測定することにより含水状態の分布を把握する。供試体の両端部から 400mm の位置に、直径 13mm、長さ 100mm のステンレス鋼材 (SUS304) を、2 本 1 組で鉄筋等と電氣的に絶縁

して11箇所(22本)ずつ、**図-12**のように各供試体の北側と南側にコンクリート打設時に埋設した。交流インピーダンス(電気抵抗)は、周波数を1kHzに設定したLCRメータを用いて測定した。また、電気抵抗の測定結果との比較のため、コンクリート表面の水分量の測定に一般に使用されている、高周波容量式水分計による測定も行った。この水分計は、コンクリート表面に電極を押し当て、表層数cmの領域における高周波容量(キャパシタンス)から水分量を推定するものである。

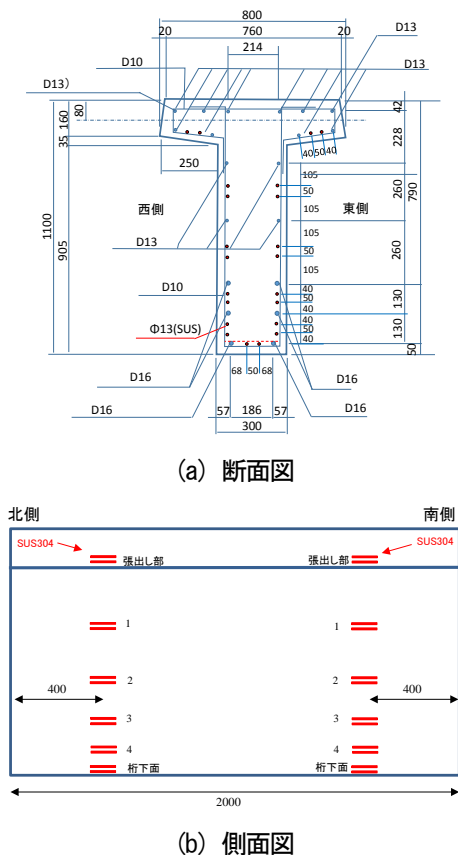


図-12 ステンレス鋼材埋設位置(寸法: mm)

3.2 電気伝導性による水分量の評価

供試体の北側に配置したステンレス鋼材間の電気伝導率の測定結果の一例を**図-13**に示す。図より、張出部の電気伝導率が大きい傾向にあることがわかる。コンクリート中の水分が多いほど電気伝導率は大きくなると考えられることから、張出部は比較的高い含水状態にあるものとみられる。また、測定日によって、電気伝導率の分布が異なることが確認される。

ステンレス鋼材間の電気伝導率の経時変化を、気象庁つくば館野における降水量と併せて**図-14**に示す。図より、ある程度降水が続くと数日間は電気伝導率が高くなることが密な計測頻度の期間でみられ、これは供試体内

部の含水状態が高くなるためと推察される。電気伝導率の序列は、張出部>ウェブ>桁下面であり、測定期間内でその傾向は変わらないことが確認された。

次に、高周波容量式水分計による水分量の経時変化を**図-15**に示す。測定期間では徐々に水分量が低下していく傾向にある。水分量の序列は、電気伝導率の測定結果のように明確ではない。測定対象深さも異なるため、電気伝導率のみで含水状態の分布や経時変化の傾向を把握することは困難と考えられる。温度をはじめとした他の影響因子により電気伝導率を補正して水分量の評価を行う必要があることがわかった。

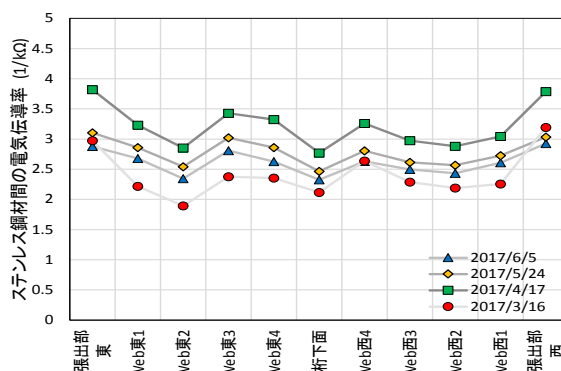


図-13 ステンレス鋼材間の電気伝導率の分布

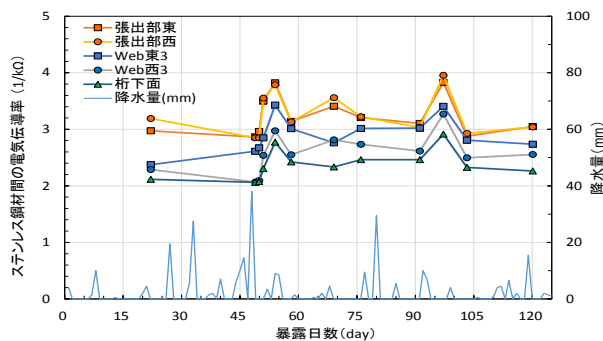


図-14 ステンレス鋼材間の電気伝導率と降水量

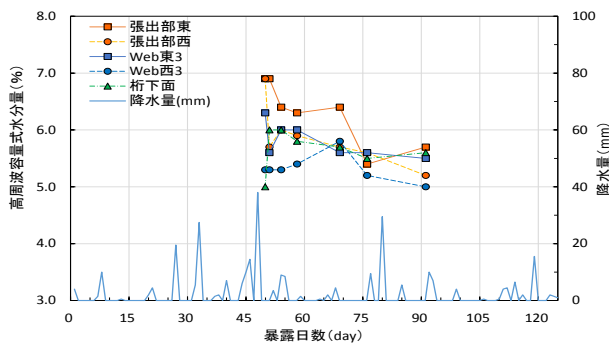


図-15 高周波容量式水分計による水分量と降水量

電気伝導率により水分量の動態観測を行うために、交流インピーダンスの測定値の自動観測に移行した。交流インピーダンス Z 値は、細孔構造、塩分、温度、水分等の様々な要因により変化しており、測定される値は、 $Z = f(W, T, CI, \text{etc.})$ のような関数で示される変化を示すと考えられる。このため、温度（内部分布）の測定を行って、その結果から温度影響を除去することを試みた。

実大桁の SUS 電極センサ対の各位置を中心に熱電対を埋設して同時測定し、その結果からコンクリート桁内の温度分布を推定して Z 値を補正することとした。図-16 に約半年間の交流インピーダンスと温度の関係を示す。 Z 値は指数関数で近似される関係を呈し、湿潤飽水時に最低値をとって下側包絡線を形成し、乾燥が進むほど高い抵抗値を示すものと考えられる。したがって、この指数近似線から基準温度への Z 値の変換を行うこととした。

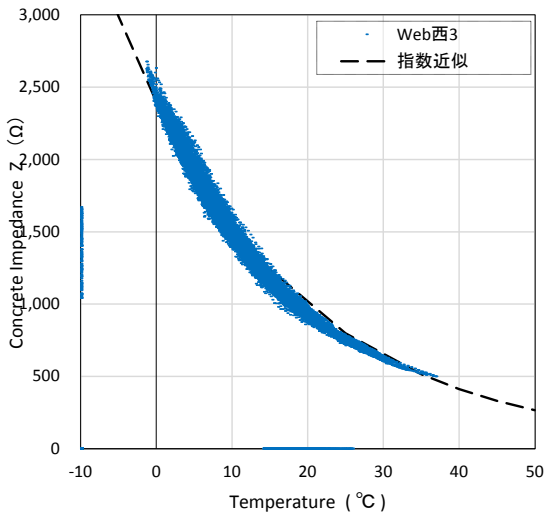


図-16 交流インピーダンスの温度依存性

3.3 水分量変化の観測結果

1kHz での交流インピーダンスを多チャンネルで測定記録できるデータロガーを用いて、平成 29 年度後半から長期観測を開始した。床版防水と橋面舗装を施工した後の平成 30 年度の観測結果として、基準温度を 23°C として交流インピーダンス値を補正した変化を図-17 に示す。温度補正後の Z 値が水分量変化を示すとすると、含水状態は同一箇所でも時間とともに変化している。平成 30 年度前半は継続的に電気抵抗が増加傾向を示しているが、これは天端の防水工を施したことにより、コンクリート桁が乾燥側に变化したことが考えられる。8 月以降は概ね同程度の値を示しつつも、降雨があるとそれから一定時間は湿潤傾向を示すことがわかる。桁の箇所間の相違に着目すると、降雨が少なく乾燥が続くと同程度であるが、降雨が続くと部位による相違が見られるようになり、その序列は前述の測定結果と同様に、張出部 > Web > 桁下面の順に含水状態が高い傾向を示すことがわかった。

4. まとめ

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 鉄筋コンクリート供試体を用いた促進劣化サイクル試験および屋外暴露試験の結果から、表面保護工の塗布部位が異なることによって、コンクリート内部の環境が変化し、鉄筋の腐食環境に影響を及ぼすことを確認した。鉄筋の腐食抑制効果は、上面から水分や塩分が浸入する本試験では、下面側の鉄筋から表面保護による腐食抑制効果がわかり、被覆範囲や含浸材の種類による影響を把握できた。
- (2) 塗布部位および塗布材料の効果については、底面も封止する表面被覆を行った場合とシラン系含浸材を用いた場合において、腐食抑制効果が認められた。水分の出入りが無塗布に対して大きく変化しないその他の塗布条

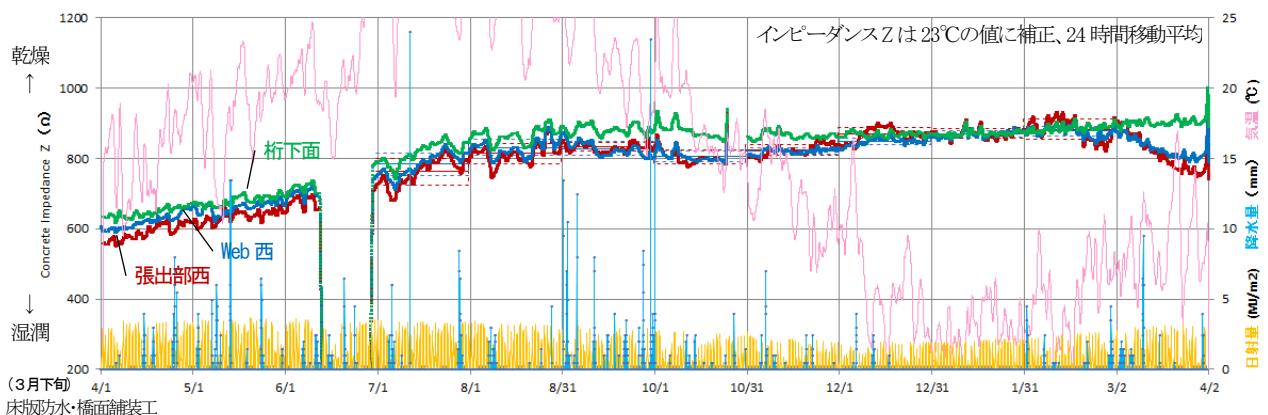


図-17 水分量と関連付けられる温度補正後の交流インピーダンスの変化 (平成 30 年度: 表面保護なし)

件では、塩分が浸透した状態での長期耐久性は期待できないことがわかった。

(2) 実大T形断面を有する桁供試体を用いた測定から、部位によって電気伝導性が異なり、張出部の含水状態が高いなどその序列は一定していることが確認された。測定を自動化し年間を通して観測した結果から、降雨の影響やその部位の特徴もわかった。今後、測定精度をさらに向上させ詳細な変化を把握するとともに、床版防水とその模擬破損、表面保護工の種類や塗布部位を変えた場合の影響等について観測を続けてゆくこととしている。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリートライブラリー119 表面保護工法設計施工指針(案)、工種別マニュアル編、p.28,100,164、2005

6.4 既往事象・現場条件に対応した最適な維持修繕手法の構築、構造・材料の開発・評価

6.4.2 舗装マネジメントの効率化に関する研究

担当チーム：道路技術研究グループ（舗装）、
寒地保全技術研究グループ（寒地道路保全）、
地質・地盤研究グループ（特命）、材料資源研
究グループ（先端材料・高度化）

研究担当者：藪雅行、木村孝司、齋藤清志、西
崎到、稲崎富士、寺田剛、丸山記美雄、渡邊一
弘、尾西恭亮、佐々木巖、大浦正樹、若林由弥

【要旨】

本研究は、多様な交通条件、気象条件下で供用されている舗装を対象に、それら現場条件に応じた適切な維持修繕手法に関する検討を通じ、重交通道路及び軽交通道路の舗装の長寿命化・延命化手法を提案することを目的としている。平成 28 年度は、予防保全の観点から維持工法に着目し、維持工法が主たる工法である軽交通道路の破損特性と維持工法に用いられる材料の基礎物性について調査分析を行った。その結果、アスファルト舗装では表面から 1cm 以内の材料劣化が顕著であり、そこからのひび割れに起因して破損が進展することを明らかにしたほか、汎用的な維持工法の材料の用途や基礎物性（適用条件、仕様材料、材料特性等）を整理した。平成 29 年度は、軽交通道路に多い表面のアスファルト劣化から生じるトップダウン型ひび割れ、ボトムアップ型疲労ひび割れや低温ひび割れなどの損傷形態に対応した延命化補修工法として、表面処理工法ならびにじょく層併用薄層補修工法について現道調査による検討を行った。平成 30 年度は、予防保全が可能となる表面処理工法について試験舗装による検証を開始し、ひび割れ状態の変化などから適用条件の初期データを得た。じょく層併用薄層補修工法ではボトムアップ型疲労ひび割れや低温ひび割れなどのリフレクションクラック発生を抑制する効果が確認できた。

キーワード：舗装、表面機能、路面破損、構造破損、材料劣化、実態調査

1. はじめに

本研究では、多様な交通条件、気象条件下で供用されている舗装を対象に、それら現場条件に応じた適切な維持修繕手法に関する検討を通じ、舗装の長寿命化・延命化手法を提案することを目的としている。多様な管理レベル下にあることが多い軽交通道路の舗装については、その管理レベルに対応した路面の維持工法と材料が求められる。そのためには、損傷の実態、特に損傷要因を把握し対策を選定することが必要である。

平成 28 年度は、予防保全の観点から維持工法に着目し、維持工法が主たる工法である軽交通道路の破損特性の整理、舗装表面の材料劣化状況の評価、維持工法に用いられる材料の用途や基礎物性について調査分析を行った。なお本研究では、N5 交通以下の道路を軽交通道路としている。

平成 29 年度は、舗装表面のアスファルト劣化から生じるトップダウン型ひび割れの抑制につながる表面処理工

法について、平成 30 年度は、予防保全が可能となる表面処理工法について試験舗装による検証を開始した。また、軽交通道路に多いボトムアップ型疲労ひび割れや低温ひび割れなどの損傷形態に対応した延命化補修工法の一つとして、じょく層併用薄層補修工法について追跡調査による検討を行った。

2. 軽交通道路の管理と破損特性

2.1 舗装の診断区分と措置

平成 28 年 10 月に策定された「舗装点検要領」（以下、「点検要領」という。）において、アスファルト舗装では表層の供用年数に対する使用目標年数を設定し、これを通じて表層の供用年数と損傷レベルに応じた適切な措置の実施により長寿命化をはかってゆくことになっている。軽交通道路等の多くは、損傷の進行が緩やかな道路等に分類（C、D）され、表層を使い続ける目標期間の設定は各道路管理者に求められていないが、道路特性を踏まえ

て管理基準を設定し、点検と診断を行って、適切な措置を講ずることとされている¹⁾。

舗装の点検と診断においては、管理基準に照らした劣化の程度に応じた診断区分が、Ⅰ健全、Ⅱ表面機能保持段階、Ⅲ修繕段階に区分されている。これを受けて、舗装点検必携では使用目標年数と診断区分の対応を図 2-1 のように整理している²⁾。

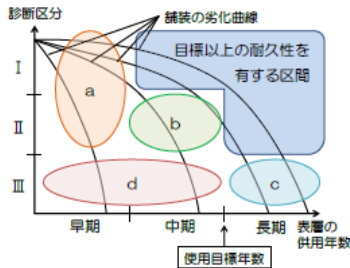


図 2-1 使用目標年数と診断区分のイメージ²⁾

舗装構造が比較的単純で舗装厚が薄い軽交通道路では、図中の措置の区分 c と d では表層を更新する機会が多く、必要に応じ路盤改良の要否を検討することとなる。このため適確な点検と診断が必要となるものの、措置としての修繕工事には技術的な課題は多くない。

一方、区分 a と b では、表面処理やクラックシールといった維持工法が主体になる。しかしながら、維持材料工法の選定方法や判断基準が体系的に定まっているとは言えず、表層がどの程度延命されるのかもあまり明らかになっていない。点検要領に基づくメンテナンスサイクルを運用していく上で、今後はより一層、措置としての路面の維持工法の効果的な使用の重要性が増してくると考えられる。

2. 2 表面の損傷形態と劣化要因

表層機能の保全による舗装の長寿命化・延命化は、表層の機能である快適な路面の保持と路盤の保護の持続によって達成される。これを阻む要因は、舗装表面の材料劣化と、ひび割れ等の不連続箇所からの水の浸透に大別される。ポットホールや段差などの即応せざるを得ない損傷や、放置しうる損傷もあるものの、破損進行が問題となる損傷として、ひび割れへの対応は重要である。

舗装のひび割れには、通過車両の繰返し载荷で舗装下面から発生し上層に向かって伸びるボトムアップ型疲労ひび割れ（以下、ボトムアップひび割れ）、舗装表面から下層に向かって伸びるトップダウン型疲労ひび割れ（以下、トップダウンひび割れ）、凍上ひび割れ、温度応力ひび割れがある。

ボトムアップひび割れは、重ね梁としての舗装版の曲げ疲労破壊であり、舗装の構造設計の基本となる損傷形態である。路面に現れたひび割れは版を貫通しており、下層に水が浸透し剥離を生じるほか支持層である路盤の損傷を促進することとなる。

トップダウンひび割れは、表面の変形抵抗性が乏しい場合にタイヤ近傍の引張ひずみで生じるといわれており、特に劣化によるアスファルトの硬化が指摘されている。路面は日射を直接受けるため、紫外線や温度上昇に伴う酸化劣化が進みやすい。表面の微細ひび割れや剥離による疲労性状の低下も過年度の研究課題で確認されている³⁾。

軽交通道路における損傷の進行要因として、水の浸入と表面付近の材料劣化が二つの大きな形態であり、その状況把握と抑制のための維持工法が重要となる。

3. 舗装表面の材料劣化の調査

表層機能保持において表面付近の材料劣化を正確に把握することが必要であるため、試験舗装工区の材料を用いて深さ方向のアスファルト劣化を調べた。

3. 1 国道 50 号下館試験舗装

国道 50 号線下館 BP ではカーボンブラックによるアスファルト舗装の耐久性評価を行っており⁴⁾、この採取表層材を用いて、舗装表面からの深さ方向に細かくスライスしてアスファルト劣化を調べた。当該舗装は平成 26 年 3 月に新設工事として施工され、本年度に供用 3 年後の試験を行った。使用材料は表 3-1 に示すとおりである。なお、舗装厚などの面から試験未実施の箇所があるほか、歩道工区の 1 年後は 20mm スライスで試験した。

表 3-1 試験舗装工区（下館）の表層材料

工区	混合物の種類	As 量	空隙率	アスファルトの種類
車道	密粒度アスファルト混合物(13)[75]	5.4%	—	ポリマー改質Ⅱ型
歩道	開粒度アスファルト混合物(13)[50]	4.5%	12%以上	ストレートアスファルト 60～80

図 3-1 と図 3-2 に試験結果を示す。車道部の改質密粒混合物では、表層深部では新設当初の針入度および軟化点を示しているのに対し、表面に近づくほど劣化度が大きくなり、表面 1cm だけをみると針入度は 20 未満で軟化点もかなり高く、アスファルトの劣化が著しいことがわかる。歩道部は 0 年（練落とし材）のアスファルト試験が未実施であるが、使用アスファルト級から針入度 50 強程度であるとみられ、開粒度であり劣化は車道よりもさら

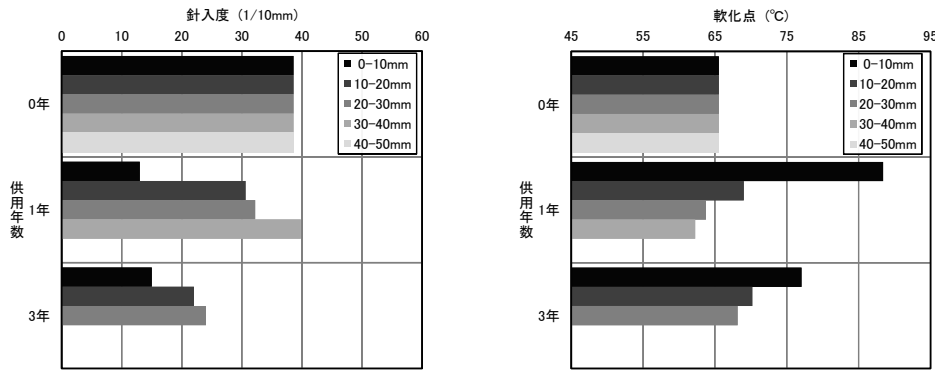


図 3-1 表面深さ方向の劣化状況(車道密粒)

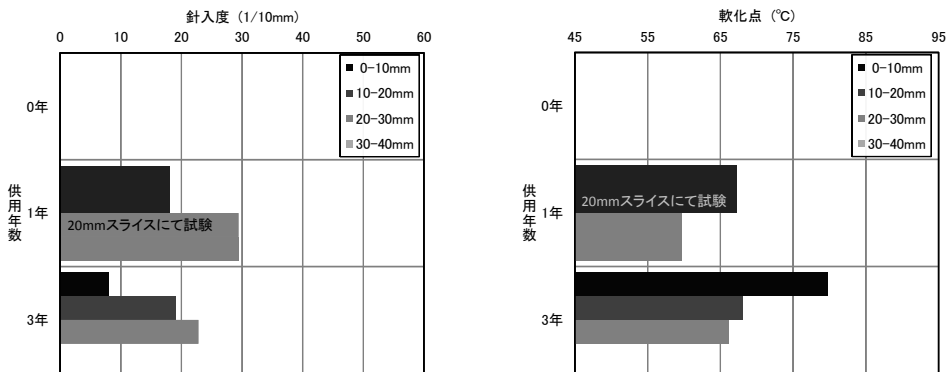


図 3-2 表面深さ方向の劣化状況(歩道開粒)

に早いとみられる。アスファルトの劣化は供用年数とともに進行するが、表面付近ではその進行は急激なことがこれらの結果からわかる。その理由としては、紫外線および酸化による劣化が挙げられる。表面部の締固め状態にもよるが深部では酸素に触れる機会も相対的に少ないため、材料劣化の条件は表面付近で顕著に厳しい。

これまでの研究では表層 5cm を一体として材料評価することがほとんどであったが、今回、深さ方向に細かく分割して経年変化を調べたところ、表面付近の劣化条件が特に厳しいことがわかった。これは、耐候性に優れた表面処理材料等で路面を保護すれば、舗装の耐久性を大幅に向上でき得ることを示唆する。

3. 2 東京都道青梅試験舗装

土木研究所では、東京都土木技術支援・人材育成センターおよび（一社）日本アスファルト合材協会の三者で高針入度のアスファルトの舗装への適用性を検証するための共同研究として青梅市内の東京都道での試験舗装を平成 26 年 4 月に施工した⁵⁾。今回、供用 2.5 年後および暴露 1 年後の再取材のアスファルト劣化度評価試験を前項と同様に行った。ここでは使用材料のうち表 3-2 に示す、通常の再生アスファルト混合物および新規アスファルト混合物の試験結果を述べる。

表 3-2 試験舗装工区(青梅)の表層材料

工区	混合物の種類	再生骨材 (%)	新材 (%)	新アスファルトの種類	再生用添加剤量(%)
①	再生密粒度アスファルト混合物(13)[75]	60	40	ストレートアスファルト 40~60	旧アスファルトに対し 8.0
④	新規密粒度アスファルト混合物(13)[75]	—	100	ストレートアスファルト 40~60	—

図 3-3 と図 3-4 に試験結果を示す。劣化傾向は定性的には前項と同様であるが、再生混合物と新規混合物ではその進行速度が異なり、再生混合物の方が劣化は早いことがわかる。特に再生混合物の表面 1cm だけをみると針入度は 10 未満で軟化点も異常に高く、アスファルトの劣化が著しい。表面付近ではその進行が急激であることはこの結果からも裏付けられる。

当該試験舗装では、同じアスファルト混合物を用いた供試体を、東京都土木技術支援・人材育成センター（江東区）の屋上で暴露している。約 1 年間後に回収した供試体の結果を図中に示しているが深さ方向に材料を一括して試験しており、再生と新規ともに、0 年や 2.5 年供用後の深部と同程度の値を示した。表面近傍では劣化が進行していると推測されるが、表層全体を混合して試験

設定が必要となっている。

アスファルト系舗装の補修材料として、国内で使用されている材料製品の公表資料を市場調査により網羅的に整理し、表4-1の例示のように集約した。今後、材料製品の技術資料等から、対策効果と謳い文句を整理し、比較評価のための性能表示や適用条件を示すための表示項目の標準化などを検討する予定としている。

5. 軽交通道路における舗装の長寿命化・延命化技術・手法の構築

5.1 背景

損傷要因に応じた維持修繕工法の適用法を明らかにすることで、軽交通道路の舗装の長寿命化と維持管理技術を向上させることを目指している。軽交通道路における維持修繕工法の延命効果データを取得し、その適用手法を提案する。

これまでの調査におけるひび割れ発生形態を含めた路面損傷調査から、トップダウン型ひび割れとボトムアップ型ひび割れの、二つの形態に分けられることがわかっている。前者は、舗装構造的には必要な断面を有している。表面の材料劣化が進行することによりトップダウン型ひび割れを生じ、それが進展することにより舗装全体の破壊に進行する。後者は、アスファルト混合物層厚が薄いことによる表層版の曲げ破壊や低温ひび割れが生じ、そのひび割れが表面まで貫通した時点で舗装全体の破壊に到る。そこで、その形態に着目し、表面処理工法およびじょく層併用薄層補修工法の延命効果データを調査している。

5.2 表面処理工法の調査

舗装表面のアスファルト劣化が進行するとトップダウン型ひび割れを生じ、それが水の浸透を促して全層破壊に到る。軽交通道路では、重荷重が繰り返し作用する構造破壊や疲労損傷が卓越するよりは、材料劣化によるこの損傷が多く、表面機能の維持が求められる。表面処理工法は、表面のアスファルト劣化を抑制することによるひび割れ発生の防止効果とともに、表層の水密性向上による路盤をはじめとした下層の損傷抑制をはかることができる工法である。クラックシール等の事後保全型の対策工法と異なり、予防保全が可能となる表面処理工法についてその適用の目安を示すため、損傷段階や交通/環境条件ごとの有効性を把握するための試験舗装を進めている。



図5-1 ひび割れ形態の異なる破損（つくば市内試験舗装区）

(1) 試験施工のための調査

つくば市内の舗装を調査し、同程度の路面損傷状態が続く複数の区間を抽出した。これらの区間からコア抜きして調べたところ、図5-1に示すように、交通量や表層の供用年数の相違により損傷形態が異なり、トップダウンおよびボトムアップなどの形態の異なるひび割れが生じている箇所を選定できた。表層のアスファルトの劣化度を、表面部分と内部に分けて抽出回収して調べたところ、図5-2に示すように表面部分のアスファルトの劣化が顕著であることも確認できた。これらの区間について、さまざまな表面処理工法の試験舗装を施工して、損傷段階や交通/環境条件ごとの適用性を検証するための試験舗装を施工した。

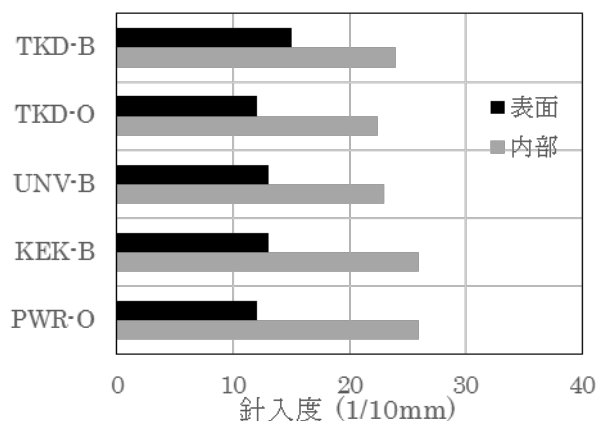


図5-2 表面処理工法試験舗装区間の針入度

(2) 表面処理工法の試験施工

適用可能な交通条件の把握とともに、延命効果の検証を比較的短期間に行うために、生活道路から重交通路線

までを対象とした。既設舗装の損傷に関する適用範囲の調査として、ひび割れ状態や下層の健全性が異なる路線を含むよう試験箇所を選定を行った。試験箇所の概要を表5-1に、表面処理工法とその使用材料を表5-2に示す。各工法の延長を10mとし、薄層表面処理工法は全箇所(試験箇所①と②では、クラックシールとの併用工区も設定)で工区を設け、その他シール処理は交通量の多くない箇所で行った。

表5-1 試験施工箇所と既設舗装の状態

箇所記号	交通量	下層状態(推定) DO たわみ	表層供用期間	ひび割れ率(箇所平均%)	路面テクスチャきめ深さ(mm)
①	重	損傷大 505	<5年	2.2% (ボトムアップ)	0.46 mm
②	重	損傷中 491		7.5 (ボトムアップ)	0.88 (粗い)
③	重	損傷中 395	15年<	14.2	0.54
④	中	健全 542	<5年	0.2	0.35 (良い)
⑤	軽	健全 210	10-15年	0.1	0.58
⑥	軽	損傷小 421	15年<	2.8 (トップダウン)	0.72 (粗い)

表5-2 試験舗装に用いた表面処理工法

工法名	主な結合材料	骨材	塗布量 kg/m ²
フォグシール	改質 As 乳剤 (PKM-T)	—	0.6~1.0
フォグシール	ポリマー改質 As 乳剤	—	0.4~0.8
チップシール	改質 As 乳剤	砕石 7号	7.4
チップシール	改質 As 乳剤	単粒砕石 5-8mm	10.3~10.8
薄層表面処理 A	改質アスファルト	細骨材	1.8~2.3
薄層表面処理 B	弾力性 As 乳剤	珪砂	0.6~0.9
薄層表面処理 C	As 乳剤およびセメント	細骨材	1.9~2.6

(3) 試験施工の初期調査結果

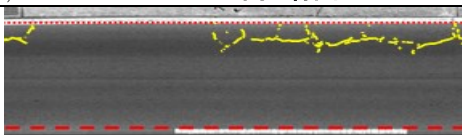
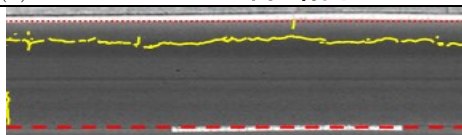
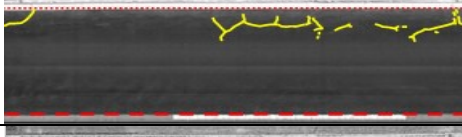
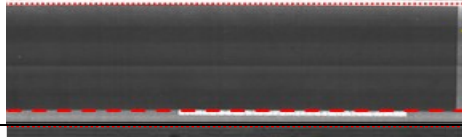
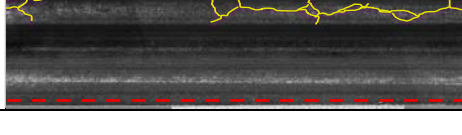
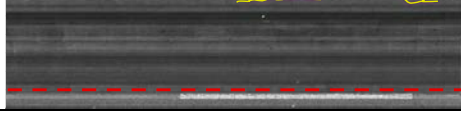
表面処理の施工期間は、最高気温は40℃近くまで、路面温度は65℃程度まで達した日々が続いた。過酷な条件下ではあったが、各工法ともに施工性は問題なく、良好な仕上がりが得られた。

表層アスファルトの劣化防止の効果は長期供用後の評価を待つ必要がある。ここでは、水の浸入抑制としてのひび割れ状況の調査結果を示す。交通量が多く既設路面のひび割れが進んでいる試験箇所③での調査結果の例を表5-3に示す。フォグシールでは施工5日後には表層の既存ひび割れに沿った変状が生じ、薄層表面処理でもひび割れは顕在化しつつある。このひび割れ率を図示したのが図5-3(a)であるが、図5-3(b)ではこれとはやや異なり、フォグシールやチップシールでもひび割れがある程度抑制されている。下層状態が比較的健全で交通量が多くなければ適用性があることが示唆される。図5-3(c)、(d)は重交通区間でクラックシールと薄層表面処理を併用した場合の結果であるが、両者でひび割れ再発が大きく異なることがわかる。その理由としては下層の損傷状態により表層の歪状態が異なることが考えられる。なお、路面上にひび割れが見られていても、塗布材料がひび割れ内部に浸透し遮水効果を有しているとみられることから、実際の遮水性を面的に評価してゆく必要がある。

5.3 じょく層併用薄層補修工法の調査

アスファルト混合物層厚の薄い軽交通路線区間には、ボトムアップ型疲労ひび割れや低温ひび割れが発生しやすいことがわかっている。そのため、軽交通路線区間ではこれらの損傷形態に対応した延命化補修工法を検討することが大切である。ボトムアップ型疲労ひび割れや低温ひび割れ箇所を補修する工法の一つとして、じょく層併用薄層補修工法について検討を行った。

表5-3 表面処理工法施工前後と0.5年供用後までのひび割れ状況の変化の例

試験箇所③ (R408 土研前)	フォグシール(PKM-T)		薄層表面処理 A	
	ひび割れ率(%)	ひび割れ線図	ひび割れ率(%)	ひび割れ線図
施工前	12.5		18.4	
施工5日後	10.5		0.0	
0.5年供用後	11.0		3.3	

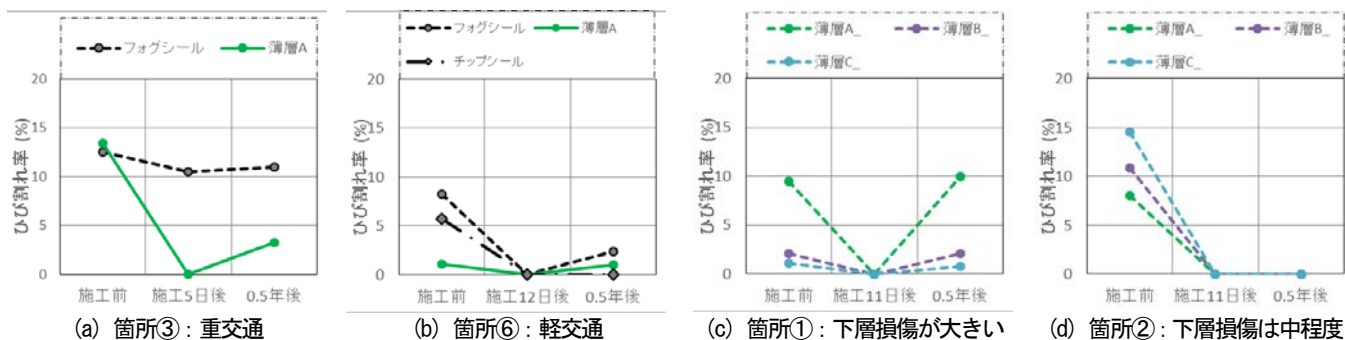


図5-3 表面処理工法施工前後と0.5年供用後までのひび割れ状況の変化の例

じょく層併用薄層補修工法の供用後12年間の追跡調査結果を整理した。じょく層併用薄層補修工法とは、図5-4に示すように、既設路面にじょく層（応力を上のアスファルト混合物に伝えないようにする層）を1cm程度の厚さで敷設し、さらにその上に変形追随性を高めるために、柔軟性の高い軟質改質アスファルトを使用した混合物層を3cm程度舗設するもので、リフレクションや低温クラックの抑制効果が期待できるものである。調査箇所では混合物層に空隙10～15%の開粒度アスコン（3cm）を舗設している。

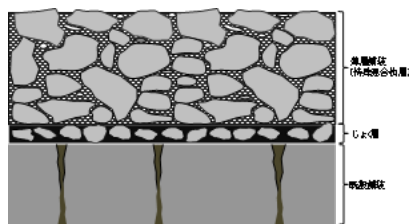


図5-4 じょく層併用薄層補修工法断面図

じょく層併用薄層補修工法を施す前の既設舗装の状態としては、低温クラックが10mに一本の割合で入っており、ひび割れ率は約12%であった。比較工区として、標準的な補修工法である合成繊維シートとオーバーレイを併用した区間を設けて比較している。じょく層併用薄層補修工法と標準工法の区間の、既設舗装のひび割れ率はほぼ同程度であり、平等な条件で補修効果の比較ができると考えられる。なお、調査対象箇所は北海道の道北内陸部に位置しており、近傍のアメダス観測点における1980～2000年の凍結指数の平均値は約900であり、全道の平均値（585℃・日）よりもかなり高い数値を示す、非常に厳しい寒さに晒される箇所であると言える。

施工後12年間のひび割れ率追跡調査結果を図5-5に示す。標準的な薄層舗装区間は、10%を越えるひび割れ率となっているのに比べて、じょく層併用薄層補修工法のひび割れ率は2%程度であり、リフレクションクラック発

生を抑制する効果が確認できる。

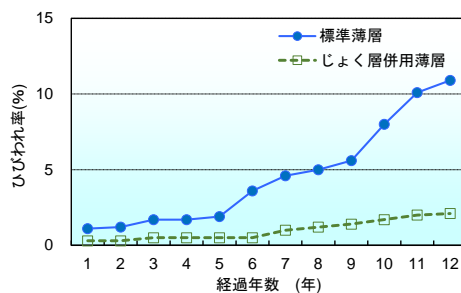


図5-5 じょく層併用薄層補修工法区間のひび割れ状況

6. まとめ

アスファルト混合物層が薄い軽交通道路では、表層機能の保全を目的とした維持工法が主たる措置である。損傷レベルの大きい診断区分Ⅲの多くは舗装打換えや表層更新となるものの、管理方針によっては維持工事により延命をはからざるをえない場合もある。

研究の初年度である平成28年度は、アスファルト舗装の破損特性の整理、舗装表面の材料劣化状況の評価、維持工法に用いられる材料の用途や基礎物性について調査分析を行った。その結果、表面近傍の材料劣化が顕著であることがわかり、既往研究課題課題の水浸疲労の知見とあわせて、表面劣化やひび割れの処置が延命化に直結することを確認した。表面機能確保のための表面処理工法の適用の目安を示すための、試験舗装を含めた試験調査を進めてゆくことにした。

平成29年度は、予防保全としても可能な措置であり、その適用の目安を示す必要がある表面処理工法について、つくば市内の現道舗装での適用性評価のための試験舗装に着手した。また、軽交通道路に多いボトムアップ型疲労ひび割れや低温ひび割れ区間における延命化工法の一つとして、じょく層併用薄層補修工法について追跡調査による検討を行った結果、じょく層併用薄層補修工法はボトムアップ型疲労ひび割れや低温ひび割れなどのリフ

レクションクラック発生を抑制する効果が確認できた。

平成 30 年度は、予防保全あるいは劣化初期における延命化の観点から維持工法に着目し、破損のメカニズムを踏まえて、いつどこに適用すべきであるか、試験舗装による検証を開始した。ひび割れ状態の変化などから適用性条件の初期データを得た。今後、材料の性能指標、延命のコスト効果など、維持修繕シナリオを想定しつつ調査を進めてゆく予定である。

なお、現道における調査はそれぞれ道路管理者の協力を得て、また試験舗装には共同研究において実施しているものもある。道路管理者ほかの多大なるご協力のもと実施しているものであり、ここに記して関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) 武藤聡、久保和幸、藪雅行：「舗装点検要領」の策定について、舗装、Vol.52、No.1、pp.11-15、2017.1
- 2) 日本道路協会：舗装点検必携 平成 29 年版、p.50、2017.1
- 3) 渡邊一弘、藪雅行：舗装の表面処理工法による延命効果、土木技術資料、Vol.58、No.8、pp.16-17、2016.8
- 4) 佐々木巖、新田弘之、西崎到：歩道用開粒度アスファルト混合物へのカーボンブラックの適用性、土木学会第 70 回年次学術講演会、Vol.70、No.V-268、pp.535-536、2015.9
- 5) 峰岸順一、西岡佑介：再生アスファルト混合物への高針入度アスファルトの適用性検討、土木技術資料、Vol.59、No.3、pp.44-47、2017.2

6.4 既往事象・現場条件に対応した最適な維持修繕手法、構造・材料の開発・評価

6.4.3 先端的維持管理技術による管理用施設（機械設備）マネジメントに関する研究

担当チーム：技術推進本部（先端技術チーム）
 寒地技術推進室（寒地機械技術チーム）
 研究担当者：新田恭士、中島淳一、上野仁士
 片野浩司、牧野正敏、澤口重夫、
 平地一典

【要旨】

土木施設に導入されている各種の土木機械設備は、河川・道路において非常に重要な役割を果たしているが、施設数の増大、老朽化の進行、限られた維持管理予算の相反する条件下で、より適切なライフサイクルマネジメントの導入が進められている。しかしながら近年、想定を超える天災による被災や、これまで重要とされていた部品故障により土木機械設備の機能喪失が見られることから、施設の健全性評価や早期機能回復のために点検診断・維持管理の容易な設備構造も検討する必要がある。本研究では、国民の生命、財産を守る上で不可欠な土木機械設備の確実な機能発揮を目指し、土木機械設備の効率的・効果的な設計に関する手法について提案するものである。平成30年度は、当チームがこれまで実施してきた河川ポンプ設備を中心とした土木機械設備のストックマネジメントに関する研究結果を基に、点検診断が容易な設備構造を検討するため設備構造及び点検技術の実態調査と、既往研究等により設備診断に有効と考えられる点検診断手法が現在の設備構造で適用可能か等の実証試験を実施した。

キーワード：土木機械設備、維持管理、ストックマネジメント

1. はじめに

土木研究所においては、これまで土木機械設備の効率的・効果的な維持管理の実現を目的として、信頼性評価手法及び関連する複数の施設における社会的な影響度と設備の健全度の総合評価手法、また「非」常用設備への状態監視技術に係る研究を実施し、効果的な更新や整備の計画立案に寄与してきたところである。

土木機械設備の状態監視技術に関する研究成果は国土交通省の「河川用ポンプ設備状態監視ガイドライン（案）」¹⁾にその知見が反映されているが、設備構造が障害となり十分に適用できない事例がある。このため設備構造と状態監視技術を含めた点検手法、整備方法との融和を図る必要がある。

今年度は、点検診断が容易な設備構造を検討するため設備構造及び点検技術の実態調査を実施した。

2. 研究実施内容

本研究では、土木機械設備についてより効率的・効果的な土木機械設備の設計及び維持管理に関する手法の提案に資する、以下の研究に取り組んでいる。

- ・点検診断の容易な設備構造の設計・改良手法の構築

3. 研究の基本方針

土木機械設備の状態監視技術については、これまで研究を進めており、国土交通省のガイドラインに知見が反映されるなど一定の成果を上げている。しかしながら、既存設備においては、設備構造が障害となり点検診断技術が十分に適用できない事例がある。

このため、設備構造と状態監視技術を含めた点検手法、整備方法との融和を図り、点検診断、維持管理の容易な設備構造を検討し、設計の考え方や既存設備の改良を盛り込んだ基準化へ向けての技術資料を策定し提案する必要がある。

これらを実現するにあたって、以下の項目に着目し研究を進める。

- (1) 設備構造等実態及び活用すべき点検技術の調査
 - ・設備構造及び点検技術の実態調査
 - ・点検診断技術と設備構造の適合性検討、評価
- (2) 点検・診断しやすい設備構造の検討
 - ・河川ポンプ設備における設備構造の具体化検討
 - ・既設ポンプ設備による検証
 - ・点検診断しやすい設備構造の評価・整理
- (3) 既存設備の改良手法に関する検討
 - ・既存設備への改良手法検討

- (4)点検診断の容易な設備構造の設計・改良手法の構築
・手法としてとりまとめ

4. 研究内容

4. 1 点検診断の容易な設備構造の技術動向・実態調査等

「非」常用設備である土木機械設備の点検診断が容易な設備構造を検討するにあたっては、実際に点検で苦慮している事例や実際の設備構造に関する調査が必要である。

特に、実際の設備点検では、本来点検しなければならない箇所でも、設備構造上それが困難あるいは事実上不可能な事例も散見される。

そこで、実際に点検業務を行っている点検技術者に対してのヒアリング調査と、実際の土木機械設備の現地調

査を行った。以下にその結果について述べる。

なお、今年度は、河川水門設備を主体としつつ、過年度から引き続き排水機場ポンプ設備についても調査を行った。

河川水門設備に関しては、点検技術者を対象としたヒアリングを実施した。また、ダム水門設備・排水機場ポンプ設備については、現地調査と管理者に対するヒアリングを行った。その結果について、ダム機械設備については表-1 に、排水機場ポンプ設備については表-2 に、河川水門設備については、装置別は表-3、年代別は表-4 に示す。

表-1 ダム機械設備での事例（管理者から聞き取り・現地調査）

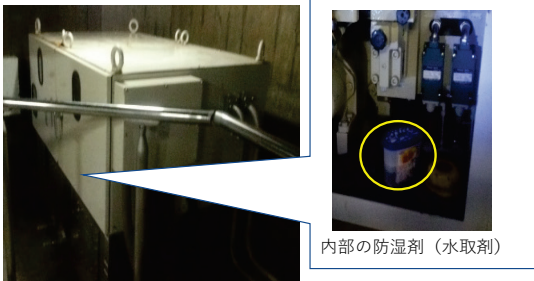

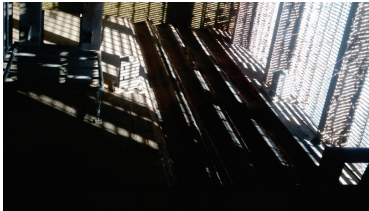
番号	分類	内容	写真
1	コンジットゲート	油圧ユニット内に結露のため水が入る。防湿剤を入れても取り切れないので、換気等を行う必要ありと考えている。	 <p>内部の防湿剤（水取剤）</p>
2	ハウエルバンガーバルブ	ベベルギアの向きが悪く（上か下にあるべきが横にある）、現場では潤滑油交換が出来ない。潤滑油交換は工場OH時に行っている。前はH14。	 <p>ベベルギアをしたから見上げた写真。○がドレンボルト（横についているので、これより下の油はこのままでは抜けない）</p>
3	取水ゲート	戸当りがすべて重構造のため、ローラの点検が出来ない。	

表-2 排水機場ポンプ設備での事例（管理者から聞き取り・現地調査）





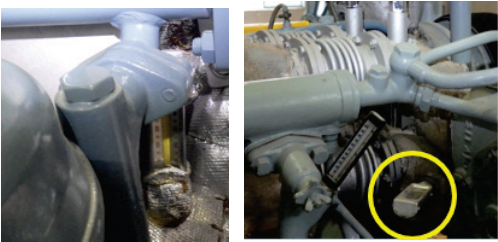
番号	分類	内容	写真
1	除塵機	除塵機が建屋内にある。天井にクレーンはあるが除塵機とのクリアランスが大きくないので整備に苦慮している	
2	除塵機	除塵機の前に角落しゲートを投入できるようになっているが、ガタ土がたまるので、下3段があげられなくなる。その場合は潜水土を呼ばなければならない	
3	潤滑油系統	減速機潤滑油クーラが、減速機架台に吊り下げられる形でポンプ室内に設置されている。おそらくは潤滑油配管の短縮を企図しての配置と推測されるが、ポンプOHの際は潤滑油クーラを外さなければならない、整備性の面では好ましくない。	
4	上屋	ポンプ設備設置後に建屋を建設したが、屋根の脱着ができないので、ポンプ設備を工場に搬出することが難しい機場がある。搬出口もあるが、設備の方が大きくて搬出困難。（搬出のことを意識しないで作られた）。	
5	ディーゼルエンジン 排気温度計 冷却水温計	<p>・ディーゼルエンジンには各気筒毎や過給器の排気側等に排気温度計や冷却水温度計(水銀柱温度計)が設置されているが、設置位置や向き、室内への日光の入射角によっては目盛りの読み取りの困難な事例がある。</p> <p>・点検では目盛りを点検員が読むので、点検員の癖が出る可能性がある。特に複数人で手分けする場合や、点検ごとに点検員が変わる場合は状態監視データとしては統一性に欠けるので注意しなければならない。</p>	 <p>左：温度計設置位置が奥まっております、配管が邪魔で目盛りを読み取りにくい 右：温度計の目盛り面が上を向いているため目盛りを読み取りにくい</p>

表-3 水門点検業者とのヒアリング結果（装置別に分類）

番号	部位	意見
1	主ローラ	ロッカービーム構造のローラーゲートはローラが露出していないので状況の目視が困難で、整備も困難。 ころがり軸受けは最初はよいが、何か噛んだら動かなくなる。実際にゲートが止まった際に、油圧が原因か機械的なものなのかわからない。原因の判断が難しい。
2		動きが多いゲートで、ローラやシーブは故障多い。 シーブは補修は簡単だが、ローラ部の軸を抜くのが困難。
3		主ローラの点検がしづらく、専用の治具が必要になる場合がある。
4	圧着装置	圧着装置はメーカーごとに特殊性がある。現在は自社製品扱いだが当時は別メーカー（50年近く前に合併した）の製品があるが、凝った設計で現在では設計思想が不明なので整備しにくい。 他社製品も高度なので手を出しにくい。
5	休止装置	構造上目視点検でしか点検できない設備が多い
6	油圧系統	油圧パイロットチェックバルブのシール性が悪いとゲートが落ちる。 最近ではソフトシールで油圧を完全に止めている。しかし、（ソフトシールを採用した）ユニットに交換するなどすると、油圧が完全に閉じ込められてかえって油圧上のトラブルが発生する（油温上昇による膨張で圧が上がるとその逃げ道がなく油圧が上がりすぎてバルブが開かない、など）。
7		油圧系統の潤滑油管理。油漏れは原因の特定難しいので、補修しても再発することもある。
8		油圧パッキンの故障が多い
9		倒伏堰の背面の油圧シリンダ（コンクリートの中に埋まっている）のOHでは、抜くのに非常に手間がかかり大変苦慮した。（もうやりたくない） >更新ならこれほどの手間はかからない。費用的にも余り変わらないと思う（が、発注者側の予算要求では更新では通らず整備では通るのでこのような形になる）
10	電気系統	電気系統、PLCも故障多い。
11		盤のランプは近年LED化している。なので交流から直流に変換する電源装置が必要だが、これの寿命は5～7年なので、定期的な交換を推奨。 （価格は数千～10000円程度。予備品として持つことは、コンデンサが使われており保管時の経年劣化があるのでNG）
12		特に30年くらい前のモータでもう生産していないものは、同一メーカーのモータに変えようと思ってもサイズが合わないなどがある（架台の改造を伴ってしまう）。モータを新品にしても古い設備なので他の部分が持つのか、という懸念も生じる。
13		他社のPLCの不具合は対応が困難。
14		PLC化が進みブラックBOX化されているため点検が困難。

表-4 水門点検業者とのヒアリング結果（用途・年代による分類）

番号	項目	意見
1	常時止水している設備	常時止水している、水圧のかかっているゲート、角落しのない止水できない構造のゲートなどは故障時の復旧が困難。
2		常時全閉で運用する設備は開操作が容易ではなく、全開位置まで移動させるために予備ゲートの挿入が必要な場合があり大がかりな作業となる。
3	古い設備（メーカー撤退）	撤退してしまったメーカーが販売した部品のアフターメンテ。実例として、油圧ユニット一体型シリンドラを過去に導入した（10年程度前）がトラブル対応が難しい。 （メーカーの撤退、内部はブラックボックス） *サーボモータで駆動しているため、動作がかくかくしており、管理者の担当が異動で変わるたびに「これ大丈夫？」と質問される。 （メーカーはメンテも撤退。何かあったら、シリンドラや制御機器のメーカーと直接対応となっている）
4	古い設備（新設時から）	古い設備は維持管理のことを考えずに機器設置(配置)している例がある。
5		古い設備は当時の設計思想がよくわからず点検に苦慮。
6	古い設備（改造に伴うもの）	維持管理について、新設時は構造上考慮されていても、改造による増設機器が、元々あった設備の点検を阻害する例(点検スペースを圧迫など)がある。
7		改修履歴と現場が合っていない、図面との不一致があり、装置数が増えている点検スペースを圧迫している事例がある。
8		点検スペースが狭く、現地と図面が合わないケースもある（メーカー以外の業者が修繕した場合など）。
9		改修履歴と現場が合っていない、図面との不一致があり、装置数が増えている点検スペースを圧迫している事例がある。 ちょっと横に余計なものがつけられていて、その奥に手が入らなくなる、という事例もある。
10		新設の時は大きな仮設道路があるが、ゲートや開閉器を搬入、設置したあとに建屋を建てた場合に、その後の点検改修では進入路がない、近づくことも開けることもできない、ということがある。
11		水門・堰の操作室が狭く点検が困難（特に機器を後で増設した場合に点検を意識していない配置とされている）。

表-1 の調査対象のダムは建設後48年を経過している。表-1 の番号2と表-4 の番号4以降から、年代の古い設備は維持管理性が意識されていないことがわかる。

特に表-2 の番号3、表-4 の番号6以降は機器配置の問題であり、新設時あるいは改造時には、CIM の活用により維持管理性の確認を行うことが有効と思料する。

表-3 の番号4、表-4 の番号3からは、メーカー撤退による必要情報の失伝を示している。維持管理に必要な情報は、メーカーに頼らず管理者側でも保持する重要性がここから示されている。

表-2 の番号5については、別の研究で標準の棒温度

計に変えて熱電対温度センサによるデータ計測を実施した例がある。この方法は確実な計測が可能だが、点検業者へのヒアリングでは、経年によりセンサにすす等が付着すると計測精度が落ちるので定期的な清掃が必要、との意見もあげられており、活用の際は注意が必要である。

以上の調査結果については、容易に対策が可能なものもある。そのようなものは今後の基準に対策の反映を提案するとともに、他の事例については今後も引き続き事例調査を行うこととともに、検証が必要なものに関しては実証試験の実施を検討する。

4. 2 点検しやすい構造の実証実験（ディーゼル原動機）

排水機場ポンプ設備の構成機器で、故障頻度が高いものに原動機があげられる。そのため、故障予兆の発見にはより精度の高い点検診断技術と、点検診断しやすい設備構造の検討が求められている。

ディーゼル原動機の故障事例を構成機器別に見ると、過給器の故障が多い。また修理に費用、時間がかかることから、過給器の点検診断技術に関する現場ニーズは高いといえる。

船用機関の過給器では、掃気室の油堆積物の影響やタービン翼等への不完全燃焼発生物の付着が故障原因としてあげられており、これら付着物の目視確認ができれば故障を未然に防止できるものと考えられる。

一般の工場プラントその他の機械設備では、工業内視鏡を用いた点検診断が行われている例がある。土木機械設備においても、排水機場ポンプ設備の主ポンプ内部の摩耗状況の確認やガスタービンエンジンの内部状況の調査に用いられている。ディーゼル機関の過給器にもこれを適用できれば、より高度な点検診断が可能になると思われるが、民間での船用機関等では実績があるが、排水機場ポンプ設備では事例がない。そこで、既存の設備が内視鏡を投入可能で診断に活用できる画像が取得可能な構造であるかの実証試験を行うこととした。

また、過給器停止所要時間（機関停止直後からの過給器の回転停止までの時間）は、現時点では点検整備要領等では必須の計測項目とはなっていないが、正常値（点検技術者へのヒアリングによると一般に7分程度）より短いと内部の摩擦抵抗が大きくなっている＝たとえば軸受異常の疑いがもたれる、など過給器の健全性を量るうえで有用な項目であり、「河川ポンプ設備状態監視ガイドライン（平成30年4月国土交通省総合政策局）」に、その計測方法が記載されている。

しかしその計測方法は、ロータ軸が露出していればその動作を目視、ロータ軸が見えない場合には停止のタイミングを音で判断する、というものであるが、過給器の多くはロータ軸が露出しておらず、音の聞き取りは熟練を要する。そこで、計測機器を用いてこれを計測できないかの試験を行うこととした。

これらは実際の排水機場のディーゼル機関を用いて実施した。対象機器の諸元を、表-5に示す。

詳細は後述するが、基本的には供用中の2号原動機を対象としているが、内視鏡投入試験は撤去済みの1号原動機も対象として試験を行った。

表-5 試験対象機器諸元

対象設備	K排水機場 主ポンプ主原動機 (1号機:撤去済み 2号機:供用中)
形式	ディーゼル機関 V型12気筒
過給器	2機
定格出力	736kW(1000ps)
定格回転数	900rpm

4. 2. 1 内視鏡投入試験

1) 方法

過給器内部への内視鏡投入については、まず、適切に投入できる箇所があるかの確認（なければどのような構造であれば投入できるかの検討）を行うことが必要である。また、投入できたとしても内部のタービン等への接触・損傷のリスクがあるため安全性の確認も必要である。そこで、同一形式の原動機が2台あり、1台（1号原動機）は更新のため撤去済み、もう1台（2号原動機）は現役で供用中の排水機場で、下記の手順で試験を行った。

- ① 撤去済みの1号原動機で、過給器への内視鏡投入を行い、的確な画像を得ることができると、どこから投入することが有効かなどを確認する。投入箇所については、過給器内までボルトが貫通しているであろう写真-1に示す箇所を想定した。



写真-1 内視鏡投入想定箇所（当初）

- ② もし①で、的確な画像を得ることができない場合は、どこを改造すればよいのか検討する。場合によっては1号原動機を加工して再試験を行う。
- ③ ①で的確な画像が得ることができたら、2号機で実際に内視鏡を投入し、画像による状態診断を行う。

2) 結果および考察

撤去済みの1号原動機での試験では、以下のことが確認できた。

- 当初の投入想定箇所は潤滑油ドレンボルト等で過給器内部まで貫通しておらず、内視鏡投入が不可能であった。
- 供用中の原動機では不可能ではあるが、①適切な画像取得と②機器内部の安全性の確認のために、本来排気管が接続されている箇所（撤去されているので開口している）から内視鏡を投入したところ、①②ともに問題なく行えることを確認した。投入箇所を写真-2 に、この際の撮影映像を写真-3 に示す。



写真-2 内視鏡投入箇所と投入状況

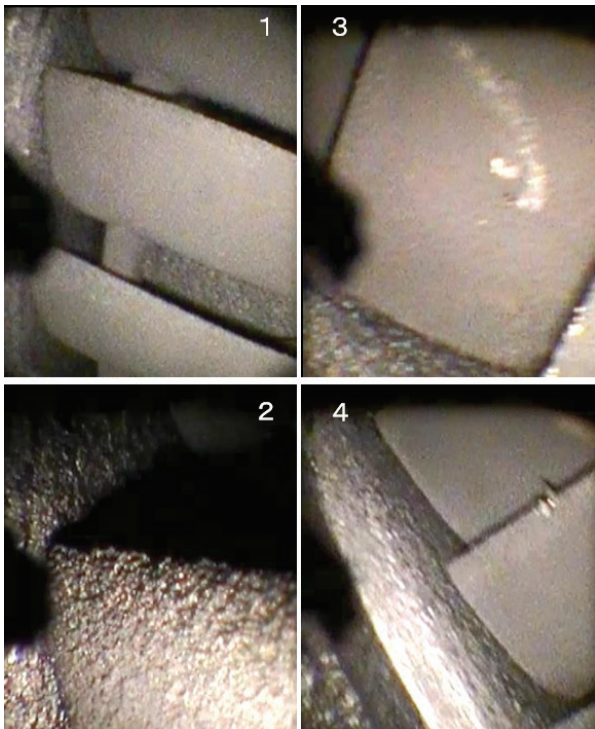


写真-3 内視鏡撮影画像

- この写真-3 に関する評価は、以下の通りである。

- 写真-3 の1では、特に目立った特徴はない。
- しかし2のように近づいてみると、タービンブレードに油汚れが付着しているのがわかる
- 付着物が多くなるとブレードが重くなり過給器の効率が落ちるので、付着物の状況確認は有効と思われる（ただし、付着物の程度と効率の関係は不明。過給圧が低下している場合に内部確認するのが現実的と思料）
- 振動による異常兆候把握も考えられるが、油汚れがブレードすべてに均等に付着している場合は振動を計測してもその兆候を把握できない。3のように汚れの一部が剥離した場合、バランスが崩れ振動に兆候が現れる場合がある（これは他のプラントで例がある）。
- 4では、ブレードにわずかに傷があるのがわかる。どの程度の傷や曲がりがあれば整備が必要かは現時点では不明だが、整備の可否にはこれらを観察が一助になり得るのではないかとと思われる。この点についてはメーカーの意見も聞きたい。

- この原動機の場合、写真-4 に示すように排気管の付け根に貫通ボルトがある（写真赤丸）。メーカーによると、排気温度計取り付け用のボルトとのことであり、下中央の内部状況を見ても障害物がなくここからの投入が可能と思われることが確認された。

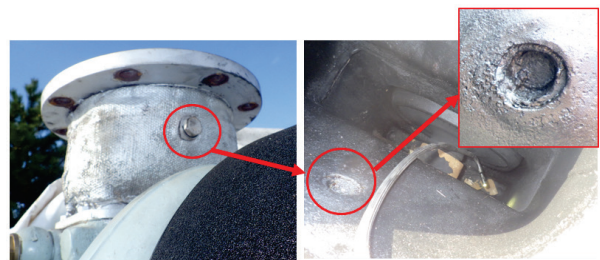


写真-4 内視鏡投入可能箇所（排気温度計用貫通孔）

引き続き行った、現在供用中の2号原動機での試験では、以下のことが確認できた。

- 内視鏡は、先に行った1号原動機過給器での結果に基づき、排気管の貫通ボルトを外して投入した。①適切な画像取得と②機器内部の安全性の確認については、いずれも問題なく行えることを確認した。投入状況を写真-5 に、この際の撮影映像を写

真-6に示す。

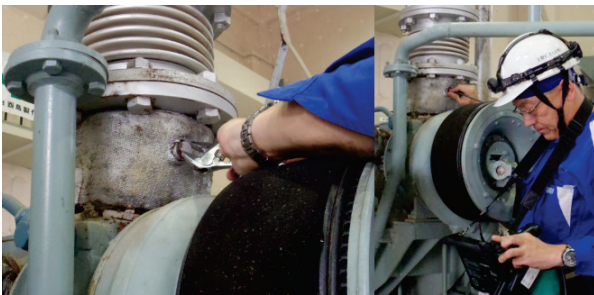


写真-5 内視鏡投入状況

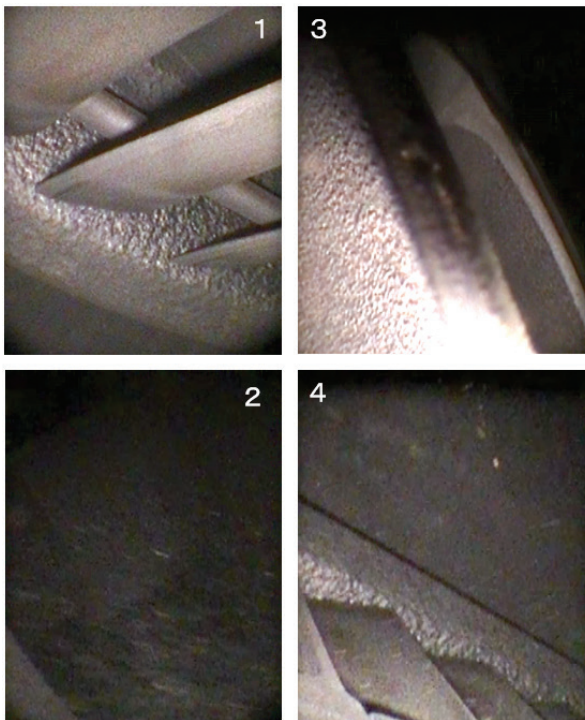


写真-6 内視鏡撮影画像

- 写真-6 に関しての評価は、以下の通りである。
 - タービンブレードの状況は、ある程度確認できた。ただし、どこを撮影しているのかわからなかった（全周を一通り見ることができたのかは不明）。これは、初めて実施したからで慣れにより解決できるかもしれない（要確認）。
 - 1号機の際は、近づいてみるとタービンブレードに油汚れが付着しているのがわかったが、今回はそこまで近づいてみても汚れは見えなかった。
 - 静止画ではわかりにくいですが、2に見られるように、動画だと内部に空気の流れがあるよう

で埃のようなものが舞っていた。

- 今回内視鏡を投入したのは右バンク側の過給器。左バンクの過給器は貫通ボルトが固着して外せなかった。また、ボルトがスパナを回しづらい位置だったので、取り外し作業をスムーズに行えなかった。

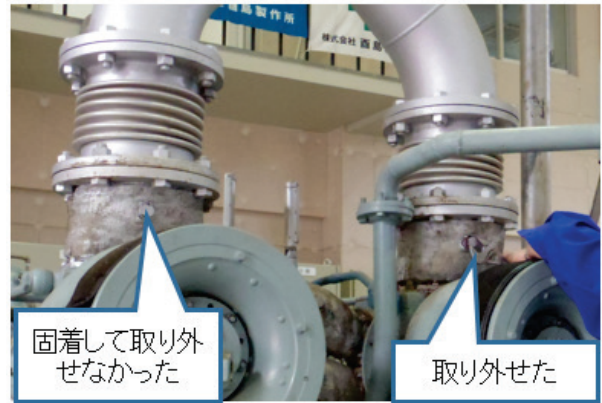


写真-7 ボルトの脱着可否

- 実際に内視鏡投入は行っていないが、H29 に更新した新1号原動機の過給器に内視鏡投入をどう行うかを想定してみた。写真-8 に現況を示すが、旧原動機（撤去された旧1号機、2号機）のようにちょうどよい位置に貫通ボルトがない。強いて挙げれば、中央の温度計を外して投入することが考えられるが、内視鏡のファイバー先端の左右どちらかへの振り方（取り回し）など、実際に行ってみないとなんともいえないが、旧原動機よりも投入に熟練が必要かと思われる。



写真-8 新1号原動機の過給器

3) まとめ

今後、過給器の内視鏡による点検診断を導入するなら、排気管のなるべく過給器に近い側に、投入孔（貫通ボルト等）をもうけることを検討する。その際は、下記の点に留意する。

○ボルトが脱着しやすいこと

○内視鏡の取り回しがしやすい位置であること

内視鏡による過給器診断の有効性については、現時点では判断できない。別途メーカーと意見交換する等を行い、有効性について検証する。

4. 2. 2 過給器停止時間計測試験

1) 方法

左右の過給器ならびに原動機基部の左右に加速度センサを取り付けて振動を計測し、下記2点について確認することとした。

- 機関運転直前と停止直前・直後の振動加速度 RMS 値の確認と比較
- 振動機関停止直前までと機関停止直後以降の振動時刻歴波形と周波数分布の確認と比較

センサ設置位置を写真-9 に、計測機器の仕様等を表-6 に示す。

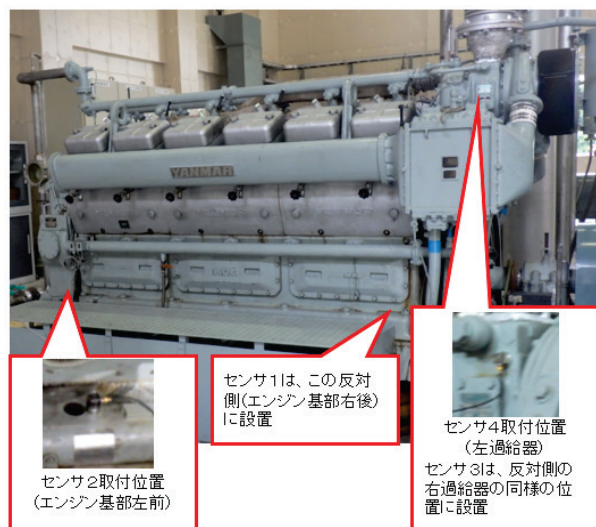


写真-9 計測機器取付位置

表-6 計測機器

機器類名	形式
圧電式加速度センサ	SA12ZSC-T1
データロガ	RION DA-40
振動解析ソフトウェア	DaDisp Pro ver.6.7

2) 結果および考察

計測結果について、振動加速度 rms 値を表-7 に、振動時刻歴波形と周波数分布については図-1 に示す。

表-7 計測結果 (各部振動加速度 rms 値)

	2号機加速度 rms 値 (m/s ²)		
	運転直前	停止直前	停止直後
センサ1 (エンジン基部右後)	0.34	12.25	0.065
センサ2 (エンジン基部左前)	0.2	21.25	0.1
センサ3 (右過給器)	0.26	40.04	0.43
センサ4 (左過給器)	0.08	29.19	0.45

周波数分布では、過給器の定格回転数である3900rpm=650Hz 付近の振動は停止前後とも確認できなかった。

最もそれに近い振動周波数は、左が440Hz 付近、右が380Hz 付近で見られた。これは停止直後でも見られる。ただし数値としては小さい。また、本当に過給器による振動かは不明であった。

エンジンが停止しエンジン基部の振動が0に近づいても、過給器の振動はわずかながら高い。また、運転直前より運転停止直後の方が振動が高い(エンジン基部が逆に低い)。

以上、今回の調査では、過給器停止時間を明確に把握できる結果とはならなかった。今後取り組む際には、センサ位置の再考や、集音マイク等の活用を検討するなどが課題として抽出された。



図-1 振動事項履歴波形と周波数分布

4. 3 点検しやすい構造への改造と検証（主ポンプ）

過年度より土木研究所では、主ポンプの軸振動変位の計測と、その時刻履歴波形と高速フーリエ変換による周波数分布から異常兆候を把握する研究を進めてきた。その研究では計測用センサである渦電流変位計はマグネットスタンドを用いて仮設していたが、本来はポンプ設備に固定しての運用が望ましいことを、過年度の研究成果報告で述べた。

渦電流変位計のポンプ設備への固定は、地方整備局の一部のポンプ設備ですでに実施事例があるが、土木研究所でも本年度より本研究とは別に実施している「官民研究開発投資拡大プログラム（PRISM）」において、「効率的かつ効果的なインフラ維持管理・更新の実現」として、排水機場ポンプ設備を対象とするデータ収集モニタリ

ングシステムの構築の中で、排水機場ポンプ設備に渦電流変位計を固定したが、その際に気づいた点、確認すべき事項が明確になったので以下にそれを記す。

4. 3. 1 センサ固定金具の形状等について

センサ固定金具は、主ポンプの形状が千差万別のため、それに合わせた形状、場合によっては現地での現物合わせになることがある。今年度実際に取り付けた4例について、取付対象としたポンプ諸元を表-8 に、写真-10~13 に示す。写真-10~12 では、左が上方向からの全景、右が横方向からの金具形状を示す。写真-13 では、1つの金具に2つのセンサを取り付けているため、左に全景を、右にセンサ位置を示す。

表-8 取り付け対象ポンプ諸元

機場名	形式	諸元等			金具形状
		号機	主軸回転数	軸封部	
S排水機場	立軸斜流	1号機	146rpm	グランドパッキン	1号と2号は異なる
		2号機	146rpm	メカニカルシール	
Y排水機場	立軸斜流	1号機	230rpm	メカニカルシール	1号と2号は同じ
		2号機	230rpm		
T排水機場	横軸斜流	2号機	120rpm	グランドパッキン	1号と2号は同じ
		3号機	120rpm	無注水軸封装置	

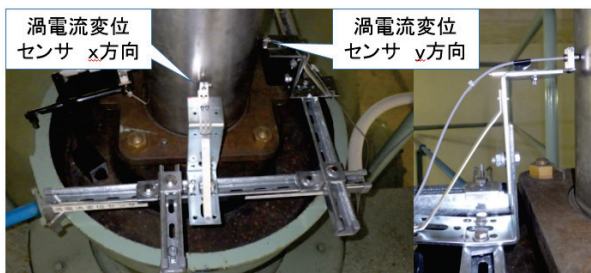


写真-10 S排水機場1号主ポンプ

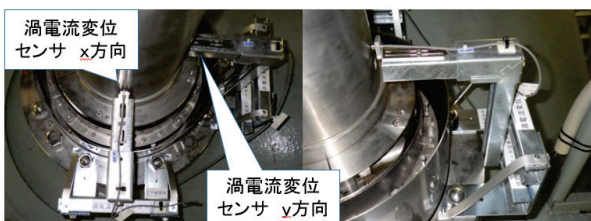


写真-11 S排水機場2号主ポンプ

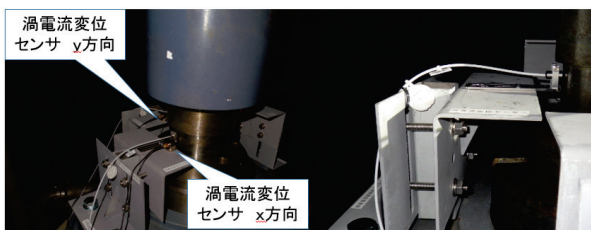


写真-12 Y排水機場主ポンプ（1, 2号同型）

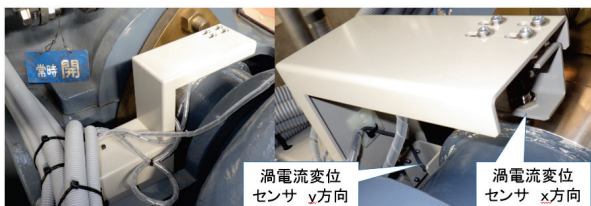


写真-13 T排水機場主ポンプ（2, 3号同型）

S排水機場は、基本的には同型同仕様のポンプではあるが、金具取付部である主ポンプ軸封部が、1号機はグランドパッキンだが2号機はメカニカルシールに改造されているため形状が異なり、そのため取付金具の形状も異なるものとなった。いずれの場合も、固定部とセンサ部までの距離が離れていることから、振動やたわみによる計測データへの影響が懸念された。実際、取付金具を

手で軽くたたくと金具が振動し、センサ部のたわみが見られた。そのためL型金具の振動を抑制するように斜めのステーを取り付けた。

Y排水機場では、たわみに対してS排水機場より有利な構造としたため、特段の改良は不要であった。

なお、これらの作業を行った作業員からは、金具取り付け位置の選定や設置に苦慮した、との意見が聞かれた。

以上の経験から、渦電流変位計センサの固定の際には以下のことに留意するという教訓が得られた。

- ・可能な限り、センサ位置と主ポンプへの取付位置の長さを短くする。
- ・振動・たわみが発生しない形状とする。
- ・主ポンプ側も、主軸近傍に渦電流変位計センサ取付金具を設置しやすい構造にする。

4. 3. 2 センサ固定金具の固有振動数調査

マグネットスタンドでの軸振動変位計測データの周波数分布では、スタンドの固有振動数と思われる50Hz前後の振動が発生している場合が見られる。これは取付金具がポンプ運転時に発生する各種の振動により加振されるためであり、センサを固定した場合も取付金具の固有振動数の振動が発生する可能性がある。マグネットスタンドによる計測時の、スタンドの振動と思われる周波数発生状況を図-2に示す。

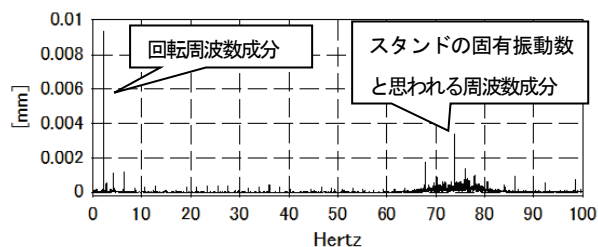


図-2 スタンドの固有振動発生例 (H26 K排水機場での例)

そこで、各排水機場において、取付金具の固有振動数の調査のため、インパルスハンマによる打撃時の取り付け架台の振動周波数を測定した。代表例として、Y排水機場での測定について、試験機器、方法をそれぞれ表-9、10に、その結果を図-3、4に示す。

表-9 試験機器

3方向圧電式 加速度センサ	型式:SA12ZSC-T1	
	渦電流x方向金具用	製造番号6276
	渦電流y方向金具用	製造番号6277
データロガ	リオン製 DA-40	
振動解析ソフト	DaDISP ver.6.7	
インパルスハンマ	小野測器製 GK-3100	

表-10 計測条件

サンプリングレート	256Hz	
打撃方向	取付金具に對し上からと横からの2方向	
振動計測方向	x方向: ポンプ主軸方向	
	y方向: ポンプ主軸と直交方向	
	z方向: 上下方向	

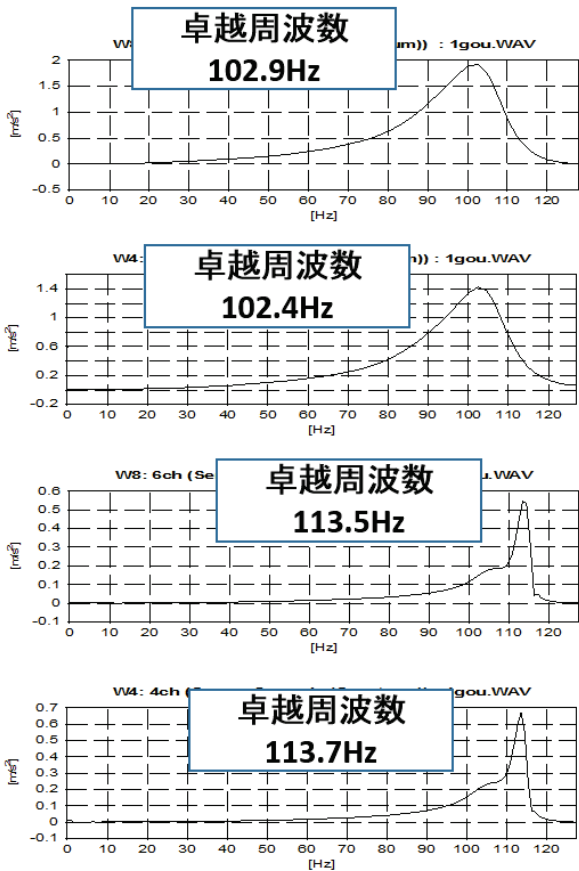


図-3 1号機 計測結果 (周波数分布)

(上より x 方向上、横、y 方向上、横 計測方向は打撃方向と同一方向)

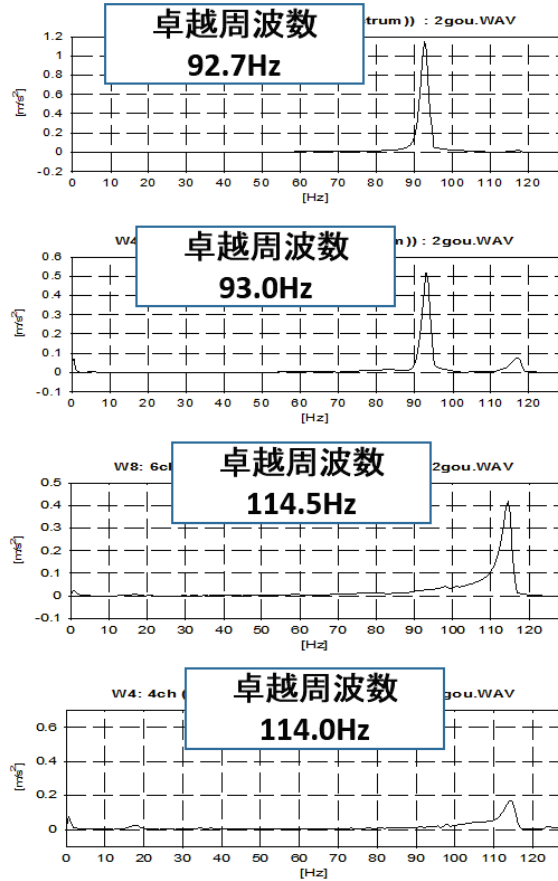


図-4 2号機 計測結果 (周波数分布)

(上より x 方向上、横、y 方向上、横 計測方向は打撃方向と同一方向)

この結果から、Y 排水機場のセンサ取付金具の固有振動数は100Hz 前後ということがわかった。

また、他の対象ポンプの結果を含めた固有振動数の測定結果を表-11 に示す。

表-11 固有振動数計測結果

機場名	号機	固有振動数測定結果	
		X方向	Y方向
S排水機場	1号機		
	2号機		
Y排水機場	1号機	102Hz近傍	114Hz近傍
	2号機	93Hz近傍	114Hz近傍
T排水機場	2号機	78Hz近傍	
	3号機	82Hz近傍	

この結果が、実際の測定時のどのような影響を与えるかは、今後の実運転時の軸振動変位計測結果を含めて検討する必要があるが、少なくともこの振動周波数が発生している場合は、金具の振動を拾っており診断の際は除外して考えることに留意する。同様に、今後渦電流変位計センサを主ポンプに設置する際には、金具の固有振動数をあらかじめ計測しておくことが望ましいと考える。

4. 4 積雪寒冷地における凍結対策について

積雪寒冷地に設置されている横軸ポンプは、冬期間の凍結対策として、毎年、非出水期になると冷却系統の水抜き作業を実施している。しかし、近年、水抜き作業を実施しても冷却系統の凍結破損が報告されている。そこで、現状の水抜き作業を調査し、凍結破損の対策について検討した結果を以下に示す。

4. 4. 1 水抜き作業の現状調査

1) 水抜き手順

水抜き作業としては、低い位置に設置されたバルブなどから順次排水し、高い位置の配管に滞留する冷却水の有無を確認しながら行われている。代表的な手順については以下の通りである。

- ①制水バルブの開放による膨張タンクからの水抜き
- ②冷却水弁の開放による水抜き
- ③各弁開放による主ポンプの水抜き
- ④周辺設置バルブの開放による二次冷却水の水抜き
- ⑤周辺設置バルブの開放による真空ポンプの水抜き
- ⑥配管等の水抜き

2) 問題点

現状における水抜き作業の問題点と破損実態については、以下の通りである。

- ①ポンプ周りの小配管バルブの開放による水抜き作業を実施しているが、弁体の残水凍結の影響により弁体下部の破損が発生。
- ②小配管に異物の影響とみられる詰まりが発生し、残水凍結による配管の破損が発生。

横軸ポンプにおいて、小配管やバルブに破損事例が多く見られることがわかった。

4. 4. 2 破損原因と対策

1) 破損原因

破損が発生している横軸ポンプ冷却系統の水抜き弁について、破損原因として滞留水の凍結が考えられる。非常用設備である排水機場が厳冬期期間を迎えることで、ポンプやバルブ、配管などに滞留水が凍結してしまい、破損の原因となる。

主要なバルブ構造から滞留水の発生を想定した図を図-

6~7に示す。

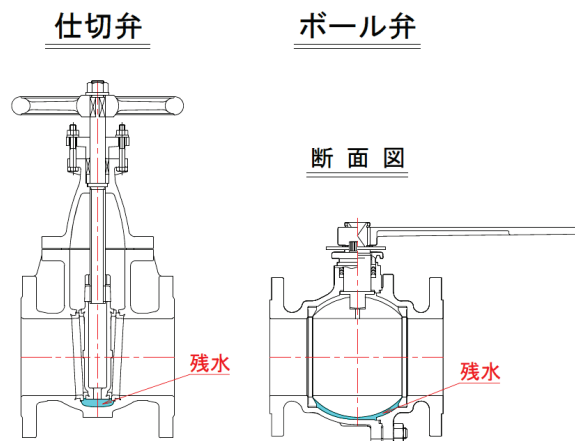


図-6 滞留水の想定箇所1

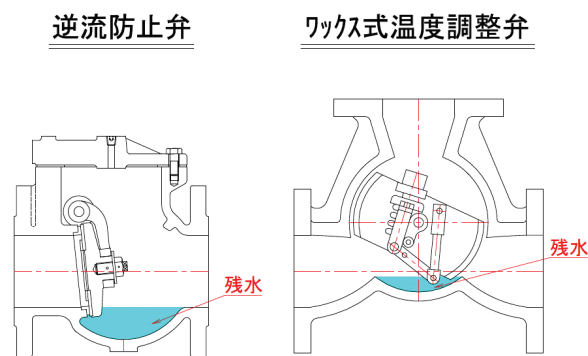


図-7 滞留水の想定箇所2

2) 凍結対策

凍結対策としては、滞留水の推定箇所から滞留水を排水し乾燥空間にする必要がある。そのため、滞留水を排水する手法について検討を行った。

①排水バルブの追加

滞留水の推定箇所に排水バルブを新たに設置するため、大規模な改修工事を行う必要がない。ただし、排水バルブの増設を行うことで、稼働時に水漏れが起こる可能性もあるため、設置の際の施工方法を検討する必要がある。

②真空乾燥による対策

エアコン等の配管内部の水抜きの際に用いられる手法であるが、多くの排水機場では既設設備に真空ポンプが設置されている。そのため、既設の真空ポンプを利用して滞留水推定箇所のバルブと配管等の設置で真空空間を作ることができ、真空乾燥の手法を用いることが可能となる。ただし、バルブ内部の減圧による圧力の影響が当初設計と変わってくるため、バルブ等の強度について検

討する必要がある。

③エアブローによる対策

排水機場の既設設備である始動用空気槽から配管及びバルブに空気を送り込むことで、残存する水分を除去し、乾燥を促進する手法である。

表-12 に比較結果の表を示す。最も安価で効果的であると考えられるは、排水バルブの追加である。図-8、9 に追加案を示す。

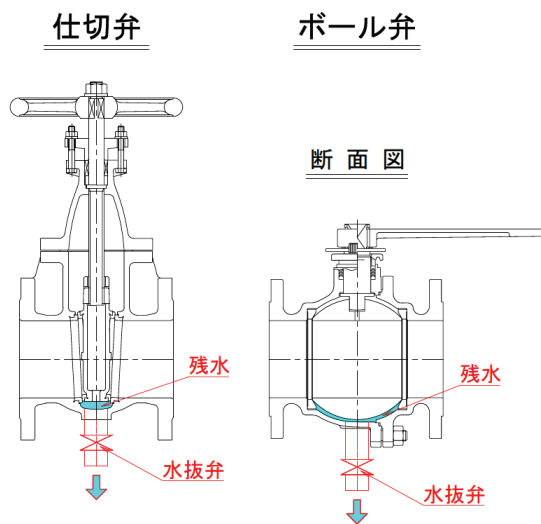


図-8 排水追加バルブ追加1

逆流防止弁

ワックス式温度調整弁

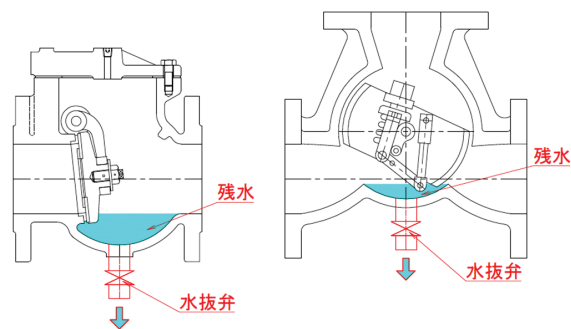


図-9 排水追加バルブ追加2

5. まとめ

各種機械設備の点検・診断しやすい設備構造について、水門では古い設備や改造による機器の追加の際に、維持管理を意識していない設計を行っている事例が多く見られた。これらについては管理者への事例周知や基準への反映を行うことで、今後このようなことのないようにしていく必要がある。また、故障頻度の高いディーゼル機関過給器、積雪寒冷地特有の凍結による設備故障対策については、今後も引き続き調査を行うとともに、可能なものについては模型や実機による効果検証などを行い、効果的な設計・改良手法の構築に向けた検討を進める。

表-12 水抜き手法の比較結果

	排水バルブの追加	真空乾燥	エアブロー
概要	<ul style="list-style-type: none"> 滞留水の推定箇所へ排水バルブを設置する。 排水箇所を増やし、滞留水を排水する。 	<ul style="list-style-type: none"> 真空ポンプを使用し、管内を真空状態にし、減圧状態にすることで、水分の除去が可能である。 	<ul style="list-style-type: none"> 空気の送り込みにより水分を飛ばすことができる。管内の乾燥が期待される。
効果	滞留水の排水能力は向上するが、完全排水は困難であると考えられる。 △	管内を減圧状態にし、管内を乾燥させる。滞留水の除去には効果があるがバルブ内の滞留水の除去は困難である。 ○	水分を飛ばすことで管内を乾燥させる。そのため、滞留水の除去には効果があると考えられる。 ○
施工性	バルブの増設のみ。 ◎	専用の配管を設置する必要がある。 △	専用の配管を設置する必要がある。 △
施工費用	バルブの増設はあるものの大規模な施工はない。 ◎	真空ポンプとの接合が必要となるため、大規模な施工が必要になる。 △	始動用空気を使用するため、大規模な施工が必要となる。 △
まとめ	上記の比較結果から、排水バルブの追加が高評価である。		

6.4 既往事象・現場条件に対応した最適な維持修繕手法、構造・材料の開発・評価

6.4.4 先端的維持管理技術による管理用施設（接合部）マネジメントに関する研究（1）

担当チーム：材料資源研究グループ（汎用材料）

研究担当者：古賀裕久、中村英佑、加藤祐哉

【要旨】

本研究では、道路トンネルのジェットファンの取付け等に使用される金属系あと施工アンカーを主な対象として、設計、施工、維持管理の合理的な方法を確立することを目的とし、平成 28 年度より検討を行っている。これまでに、金属系あと施工アンカーの引張耐力を適切に評価する方法を明らかにするため、試験時の支点間隔や母材コンクリートのひび割れが耐荷性能に与える影響を検討した。また、近接した複数のあと施工アンカー（群配置）を一体とした場合の耐荷性能を検討した。平成 30 年度の検討では、固着方法の異なるあと施工アンカーの耐荷性能を明らかにするために、4 種類の金属系あと施工アンカーと 1 種類の接着系あと施工アンカーの引張試験を行った。この結果、あと施工アンカーの引張耐力やひび割れ発生時の耐荷挙動は固着方法の違いによって異なること、先端の拡張部が大きい形式の金属系あと施工アンカーではコーン状破壊部の形状が大きく引張耐力が大きくなること、逆に拡張部が小さい形式の金属系あと施工アンカーや接着系あと施工アンカーではひび割れ発生時の引張耐力の低下が大きくなることなどを明らかにした。

キーワード：あと施工アンカー、引張耐力、固着方法、ひび割れ、コーン状破壊

1. はじめに

あと施工アンカーは構造物の補修や補強、附属物の取付け等に幅広く使用されており、既設構造物を安全に供用していくためには、あと施工アンカーの耐力の評価方法や施工時の留意点、信頼性の高い点検方法等を確立しておく必要がある。このため、あと施工アンカーの設計、施工、維持管理に関する指針類の作成が国内外で進められているが、土木分野では十分な知見がなく、更なる実験データの蓄積や検討が必要とされている。

本研究では、道路トンネルのジェットファンの取付けに用いられる金属系あと施工アンカーを主な対象として、設計、施工、維持管理の標準的な方法や留意点をまとめることを目的としている。

2. 平成 28 年度の検討

平成 28 年度は、金属系あと施工アンカー（以下、アンカーという）の設計に用いる引張耐力を適切に評価する方法を明らかにするため、試験時の支点間隔が引張耐力に与える影響を把握した。引張試験時の支点間隔をアンカー埋込み長さの 0.5～6 倍に変化させて試験を行った結果、コーン状破壊時の引張耐力を適切に求めるためには、支点間隔をアンカー埋込み長さの

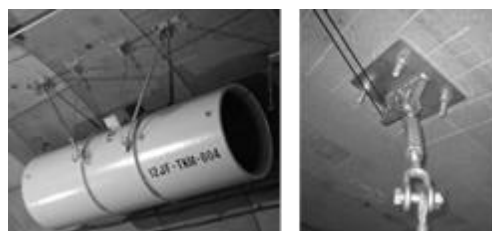


写真-1 ジェットファンの取付け状況の例

4 倍以上とする必要があることが分かった。

また、アンカーはひび割れ等のない位置に設けるのが原則であるが、供用中にコンクリートにひび割れが発生することも考えられることから、母材コンクリートのひび割れが金属系アンカーの耐荷性能に与える影響を検討した。その結果、ひび割れがアンカー設置位置と一致している場合はひび割れ幅が大きいほど引張耐力が低下すること、また、ひび割れがアンカー設置位置の周囲にある場合も、コーン状破壊の範囲にひび割れがある場合は引張耐力が低下するため注意が必要であることが分かった。

3. 平成 29 年度の検討

一般に、道路トンネルでは写真-1 に示すように、複数のアンカーを近接して覆工コンクリートに設置し

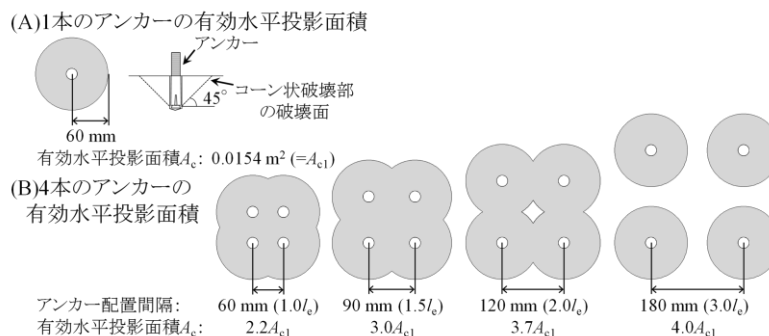
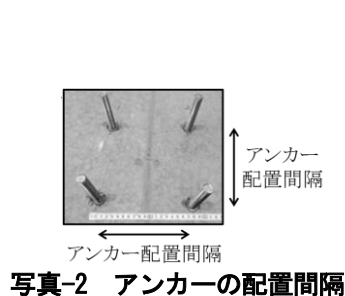


図-1 有効水平投影面積

(群配置)、ジェットファンを取付ける。群配置された場合のアンカーの耐荷力については、有効水平投影面積を用いた評価方法があるが、その評価結果と実際の耐荷力の関係は必ずしも明確ではない。

そこで、平成 29 年度は、様々な配置間隔（写真-2 参照）に群配置されたアンカーを一体とした場合の耐荷性能について検討を行った。配置間隔をアンカー埋込み長さの 1~3 倍に変化させて試験を行った結果、配置間隔が大きくなるほど引張耐力が大きくなることが分かった。また、引張耐力の実測値と群配置の影響を考慮した既存の引張耐力算定式（式(1)^{1), 2)} による計算値の差は、配置間隔によって異なることが分かった。

$$T_c = 0.31A_c \sqrt{f'_c} \quad (1)$$

ここに、 T_c : コーン状破壊の引張耐力 (N)

A_c : コーン状破壊部の有効水平投影面積 (mm^2 、

図-1 参照、1本の場合は $\pi l_e (l_e + D_a)$)

l_e : アンカー有効埋込み長さ (= 60 mm)

D_a : アンカー外径

f'_c : コンクリート圧縮強度 (N/mm^2)

また、施工上の留意点として、穿孔径が大きい場合の引張耐力の影響を確認するなどの検討を行った。

4. 平成 30 年度の検討

4.1 検討内容と目的

一般に、アンカーは金属系と接着系に大別され、金属系には先端の形状の違い、接着系には接着剤の種類や充填方法の違いによって細かく分類された様々な製品が存在する。しかし、アンカーに関する国内の指針類^{3), 4)}では、固着方法ごとの耐荷挙動の特徴は明確には示されていない。また、ひび割れのないコンクリートに設置することを前提としているため、ひび割れが

発生した場合の耐荷性能への影響も明確には示されていない。ひび割れの影響に着目した複数の実験結果^{5) ~7)}が報告されているが、ひび割れ有無やひび割れ幅の違いが固着方法の異なるアンカーの耐荷性能に与える影響は十分には把握されていない。

これらのことを踏まえて、平成 30 年度の検討では、固着方法の異なるアンカーの選定方法、耐荷性能の特徴、ひび割れ発生時の耐荷挙動を明らかにするために、4種類の金属系と1種類の接着系のアンカーをひび割れ発生状況の異なるコンクリート試験体に設置して引張試験を行った。

4.2 実験方法

4.2.1 コンクリート試験体の諸元

コンクリート試験体に使用したコンクリートの配合、フレッシュ性状、圧縮強度を表-1に示す。材齢 7 日まで湿潤養生を行い、材齢 28 日以降にあと施工アンカーを設置した。試験体の形状は、縦 830×横 1690×高さ 300 mm の版状である(4.2.3で詳述)。

4.2.2 実験に用いたあと施工アンカーの種類

実験に使用したアンカーの概要を表-2、金属系アンカーの外観を写真-3に示す。固着方法の違いが耐荷性能に与える影響を検討するために、4種類の金属系アンカー(スリーブ打込み式(平成 28 年度、29 年度の検討でも使用)、芯棒打込み式、締付け式、拡底式)と1種類の接着系アンカー(無機系接着剤(注入式))を使用した。スリーブ打込み式ではアンカーボルトの先端にスリーブを打ち込むこと、芯棒打込み式ではアンカーボルトの中心部に芯棒を打ち込むこと、締付け式ではアンカーボルトにトルクを導入してスリーブを開くことによって先端を拡張し、コンクリートの孔壁に固着させる。拡底式では、アンカーボルトの先端にスリーブを打ち込む際に、先端の拡張と孔の底部の拡径を同時に行うことによってコンクリートの孔壁に固着させ

表-1 コンクリートの配合、フレッシュ性状、圧縮強度

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)					スランブ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)
		水	普通ポルトランドセメント	細骨材	粗骨材	混和剤			
57.0	43.8	159	279	810	1068	2.99	7.5	3.5	33.0

※圧縮強度は試験体と同条件で製作した円柱(φ100×200 mm)での載荷試験時の試験結果である。

表-2 実験に使用したアンカーの概要

アンカーの種別		アンカーの形状			孔の形状		施工トルク (N・m)			
		ねじの呼び	外径 (mm)	埋込み長さ (mm)	直径 (mm)	深さ (mm)				
系	固着方法	M12	17.3	50	18.0	56	無			
								スリーブ打込み式		
金属系	芯棒打込み式				12.0	60			12.5	75
								縮付け式	12.0	75
接着系	無機系接着剤(注入式)	17.5	17.0	60	18.0	68	30			
					12.0	16.0	60	無		

※孔の直径と施工トルクについては各アンカーのカタログ値に準拠した。

スリーブ打込み式



芯棒打込み式



縮付け式



拡底式



写真-3 金属系アンカーの外観

る。一方、接着系アンカーでは、金属系アンカーと固着メカニズムが異なり、孔内に接着剤を充填し、コンクリートと接着剤の付着や接着剤に含まれる骨材のかみ合わせによって、コンクリートの孔壁との固着力を確保する。

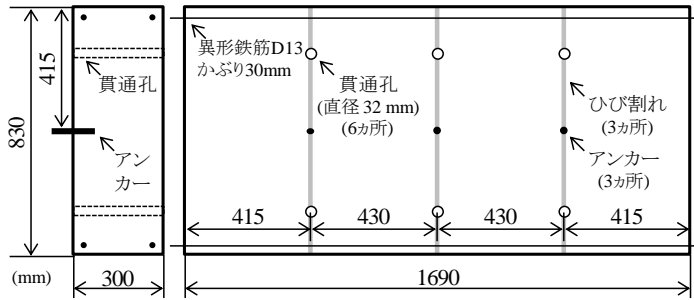
実験室内の床に静置した試験体に対して下向きにハンマードリルを使用して孔を穿孔し、孔内を清掃した後にアンカーを設置した。金属系アンカーではねじの呼びを M12 とし、接着系アンカーでは寸切り全ねじボルト SNB7 M12(引張強度 974 N/mm²)を使用した。アンカーの埋込み長さについては 50~60 mm に統一した。しかし、アンカーを設置するために穿孔する孔の直径や施工トルクについては各アンカーのカタログに準拠して、アンカーごとに異なる値に設定した。特にスリーブ打込み式と拡底式では、芯棒打込み式や縮付け式と

比較して、アンカー先端の拡張部が大きいため、スリーブも含めたアンカーの外径や穿孔する孔の直径が大きい。また、縮付け式と拡底式では、設置時にトルクを導入した。接着系アンカーの引張試験時の接着剤の圧縮強度は、62.0 N/mm²であった(材齢 28 日の規格値 50 N/mm²)。

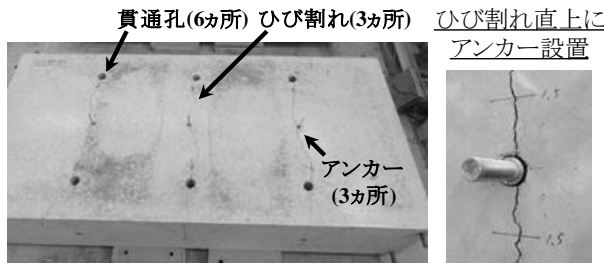
4.2.3 試験体へのひび割れの導入方法

試験体の概要を図-2、ひび割れ幅と引張試験数を表-3に示す。アンカーの固着方法の違いがひび割れ発生時の耐荷挙動に与える影響を検討するために、ひび割れ有無とひび割れ幅の異なる試験体を製作した。ひび割れ幅の目標値を 1) ひび割れ無 (0 mm)、2) 0.2 mm 以下、3) 0.5 mm 前後、4) 1.0 mm 前後、5) 1.5 mm 前後の 5 種類として、ひび割れの直上にアンカーを設置した。試験結果のばらつきを考慮して、1 条件あたりのアンカーの引張試験数を 3~4 本とした。

過去の実験⁸⁾と同様に、試験体の貫通孔にくさびを挿入してひび割れを導入した。まず、2 ヶ所の貫通孔にくさびを均等に挿入し、試験体表面で微細なひび割れを確認した直後にくさびを引き抜き、ひび割れが一旦閉じた。次に、ひび割れの直上に孔を穿孔し、アンカーを設置した。アンカー設置後、くさびを貫通孔に再び挿入してひび割れ幅を増大させ、目標のひび割れ幅となった時点で貫通孔付近のひび割れに釘を挿入し、ひび割れを固定した。その後、アンカー設置位置の両側でひび割れ幅をクラックゲージで測定した。また、試験体側面を目視で確認したところ、ひび割れは試験体を貫通していなかったが、孔よりも深い位置まで進展していた。



(A) 試験体の形状



(B) ひび割れ導入状況
図-2 試験体の概要

表-3 ひび割れ幅と引張試験数

ひび割れ幅の目標値	ひび割れ幅の実測値	アンカーの引張試験数
ひび割れ無	0 mm	3
0.2mm以下	0.1~0.2 mm	3
0.5mm前後	0.4~0.5 mm	4
1.0mm前後	0.9~1.1 mm	4
1.5mm前後	1.1~1.5 mm	4

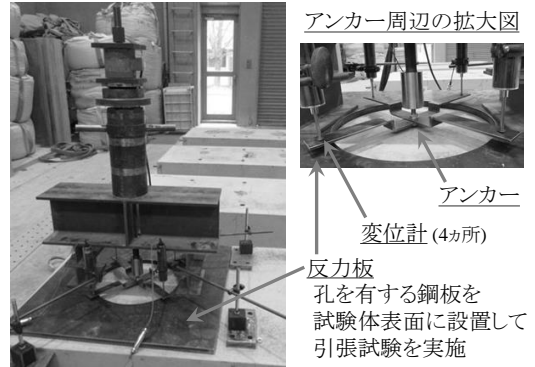


写真-4 引張試験の実施状況

4.2.4 あと施工アンカーの設置方法

引張試験の実施状況を写真-4に示す。コーン状破壊時の引張耐力を適切に求めるためには十分な支点間隔を確保する必要があるため⁸⁾、直径 360 mm の孔を有する反力板(鋼製、厚さ 19 mm)を試験体表面に設置した。引張試験では、載荷速度を約 3 kN/s⁹⁾とし、アンカーに作用する引張荷重をロードセル、変位を試験体表面から高さ 10 mm の位置で 4 方向から変位計で測定した。

4.3 実験結果及び考察

4.3.1 コーン状破壊の発生状況

(1) 固着方法の違いの影響

ひび割れを導入していない試験体でのコーン状破壊の発生状況の例を表-4 上段、コーン状破壊部の面積の実測値と平均値を図-3(A)に示す。コーン状破壊部の面積は、試験体表面でのコーン状破壊部の形状を目視で記録して求めた結果である。表-4 上段の「ひび割れ無」のコーン状破壊の発生状況によると、ひび割れを導入していない試験体では、アンカーを中心としたコーン状破壊が発生したことがわかる。しかし、図-3(A)では、アンカーボルトの直径が同一でも、固着方法の違いによってコーン状破壊部の面積が異なることがわかる。アンカー先端の拡張部の大きさが異なることも理由の1つと考えられる。

(2) ひび割れの有無とひび割れ幅の影響

ひび割れを導入した試験体でのアンカーのコーン状破壊の発生状況の例を表-4 下段、コーン状破壊部の面積をアンカー種別ごとに図-3(B)~(F)に示す。表-4

下段の「ひび割れ幅 1.5 mm」のコーン状破壊の発生状況によると、スリーブ打込み式と拡底式では、引張試験前に導入したひび割れの片側のみでコーン状破壊が発生したことがわかる。過去の実験⁸⁾と同様に、ひび割れ幅の拡大によってアンカー先端の拡張部がコンクリートの孔壁に適切に固着されず、ひび割れの片側のみでコーン状破壊が進展したことが原因と考えられる。一方、芯棒打込み式、締付け式、接着系アンカーでは、スリーブ打込み式や拡底式よりもコーン状破壊部が小さくなった。特に芯棒打込み式と締付け式では、コーン状破壊部が極めて小さく、アンカーが引き抜けて破壊に至ることもあった。また、図-3(B)~(F)では、コーン状破壊部の面積は、全ての種別のアンカーにおいて、ひび割れ幅が大きいほど減少する傾向にあり、この傾向は特に芯棒打込み式、締付け式、接着系アンカーで明確に現れた。今回用いた芯棒打込み式と締付け式ではアンカー先端の拡張部が小さいこと、接着系アンカーでは接着剤の付着や接着剤に含まれる骨材のかみ合わせで固着力を確保することから、ひび割れ幅の拡大によってアンカーとコンクリートの孔壁との固着力が損なわれやすく、コーン状破壊部が小さくなったと考えられる。

4.3.2 引張耐力

(1) 固着方法の違いの影響

ひび割れを導入していない試験体でのアンカーの引張耐力の実測値と平均値を図-4(A)に示す。本研究の実験ではアンカーボルトの直径を同一としていたが、

表-4 コーン状破壊の発生状況の例

金属系アンカー				接着系アンカー
スリーブ打込み式	芯棒打込み式	締付け式	拡底式	
ひび割れ無	ひび割れ無	ひび割れ無	ひび割れ無	ひび割れ無
ひび割れ幅1.5mm程度	ひび割れ幅1.5mm程度	ひび割れ幅1.5mm程度	ひび割れ幅1.5mm程度	ひび割れ幅1.5mm程度

※●:アンカー本体, —:コーン状破壊部, - - -:引張試験前に導入したひび割れ

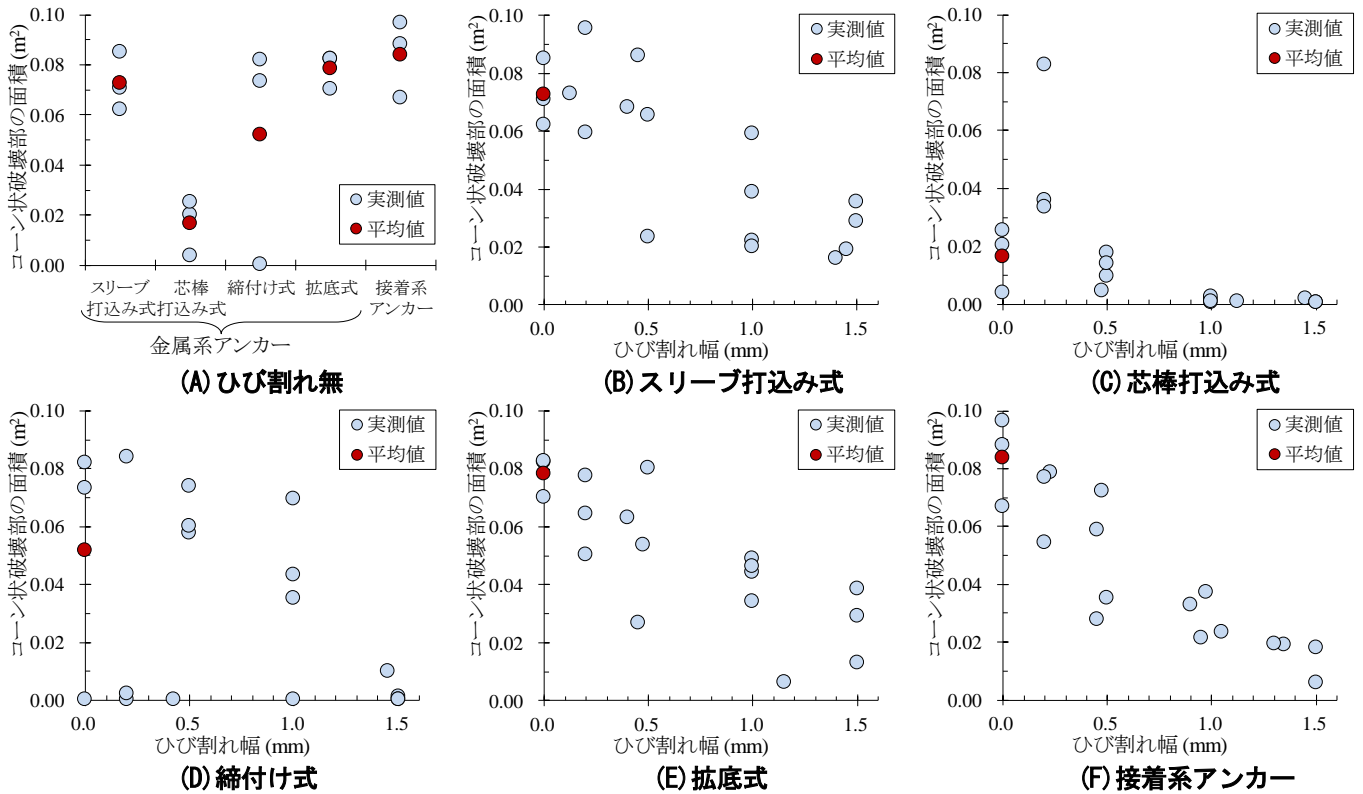


図-3 コーン状破壊部の面積の実験結果

アンカー先端の拡張部の大きさが異なることもあり、固着方法の違いによって引張耐力に差が生じた。金属系アンカーでは、引張耐力は、スリーブ打込み式と拡底式で大きく、これらに次いで締付け式で大きく、芯棒打込み式で最も小さくなった。

ここで、引張耐力とコーン状破壊部の面積の関係を図-5に示す。同図には、後述するひび割れを導入した試験体の結果も示した。ばらつきは認められるが、コーン状破壊部の面積が大きいほど、引張耐力が大きくなる傾向にあった。スリーブ打込み式と拡底式では、芯棒打込み式や締付け式よりもアンカー先端の拡張部が大きいいため、コーン状破壊部の面積が大きくなり、引張耐力も大きくなったと考えられる。金属系アンカーの引張耐力は、アンカーボルトの直径が同一であっても、スリーブを含めたアンカー先端の拡張部の形状によって異なると考えられる。

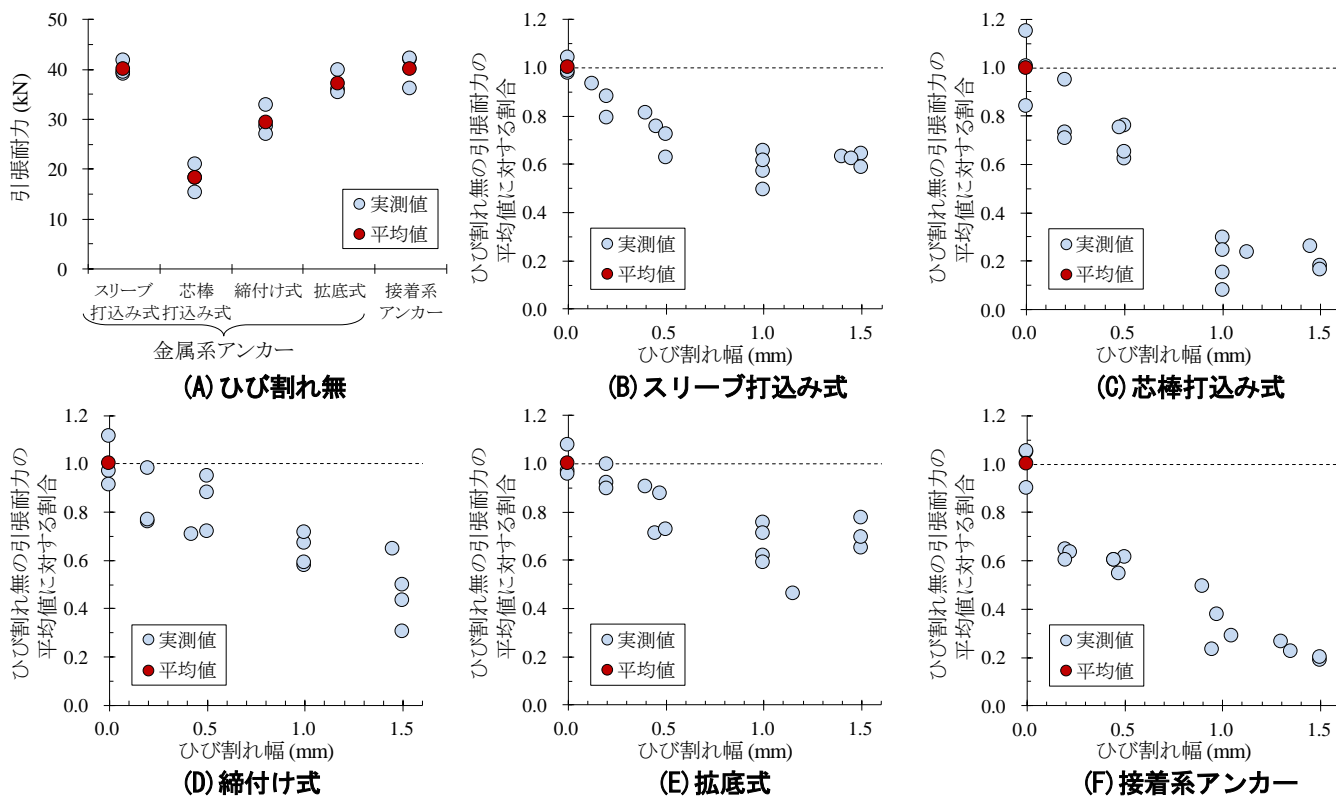


図-4 引張耐力の実験結果

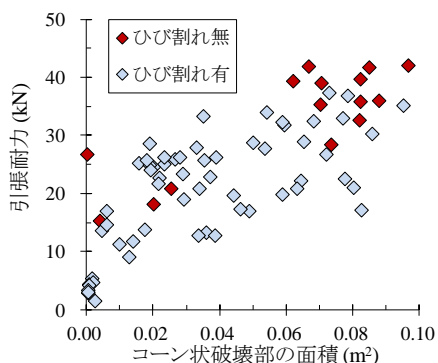


図-5 引張耐力とコーン状破壊部の面積

一方、接着系アンカーでは、コンクリートと接着剤の付着や接着剤に含まれる骨材のかみ合わせによって固着力が確保されるため、接着剤の強度や種別によって引張耐力が異なることとなる。本研究の実験で使用した接着系アンカーの引張耐力は、スリーブ打込み式や拡底式と同程度であり、芯棒打込み式や縮付け式よりも大きくなった。

(2) ひび割れの有無とひび割れ幅の影響

ひび割れを導入した試験体でのアンカーの引張耐力について、ひび割れを導入していない試験体でのアンカーの引張耐力の平均値に対する割合に換算した結果を図-4(B)～(F)に示す。引張耐力は、全ての種別のアンカーにおいて、ひび割れ幅が大きいほど低下した

が、その低下傾向はアンカーの固着方法の違いによって異なった。金属系アンカーでは、スリーブ打込み式と拡底式で引張耐力の低下が小さく、芯棒打込み式で引張耐力の低下が大きくなった。図-5で示したように、引張耐力はコーン状破壊部の面積が大きいほど大きくなる傾向にあったことから、金属系アンカーの先端の形状によってひび割れ発生時のコーン状破壊部の面積が異なり、引張耐力にも差が生じたためと考えられる。また、「ひび割れ幅 1.5 mm 前後」の引張耐力に着目すると、引張耐力は、スリーブ打込み式と拡底式で約 60～70%、芯棒打込み式で約 20%、縮付け式で約 50%に低下したことがわかる。スリーブ打込み式と拡底式では、芯棒打込み式や縮付け式よりもアンカー先端の拡張部が大きく、ひび割れによってアンカーとコンクリートの孔壁との固着力が損なわれにくいため、コーン状破壊の面積が極端に小さくなることなく、引張耐力の低下が小さくなったと考えられる。

一方、接着系アンカーの引張耐力は「ひび割れ幅 0.2 mm 以下」で約 60%、「ひび割れ幅 0.5 mm 前後」で約 20%に低下し、ひび割れによる引張耐力の低下が大きくなった。ひび割れによってコンクリートと接着剤の付着や接着剤に含まれる骨材のかみ合わせで確保される固着力が損なわれるためにコーン状破壊の形状が小さくなり、引張耐力が著しく低下したと考えられる。

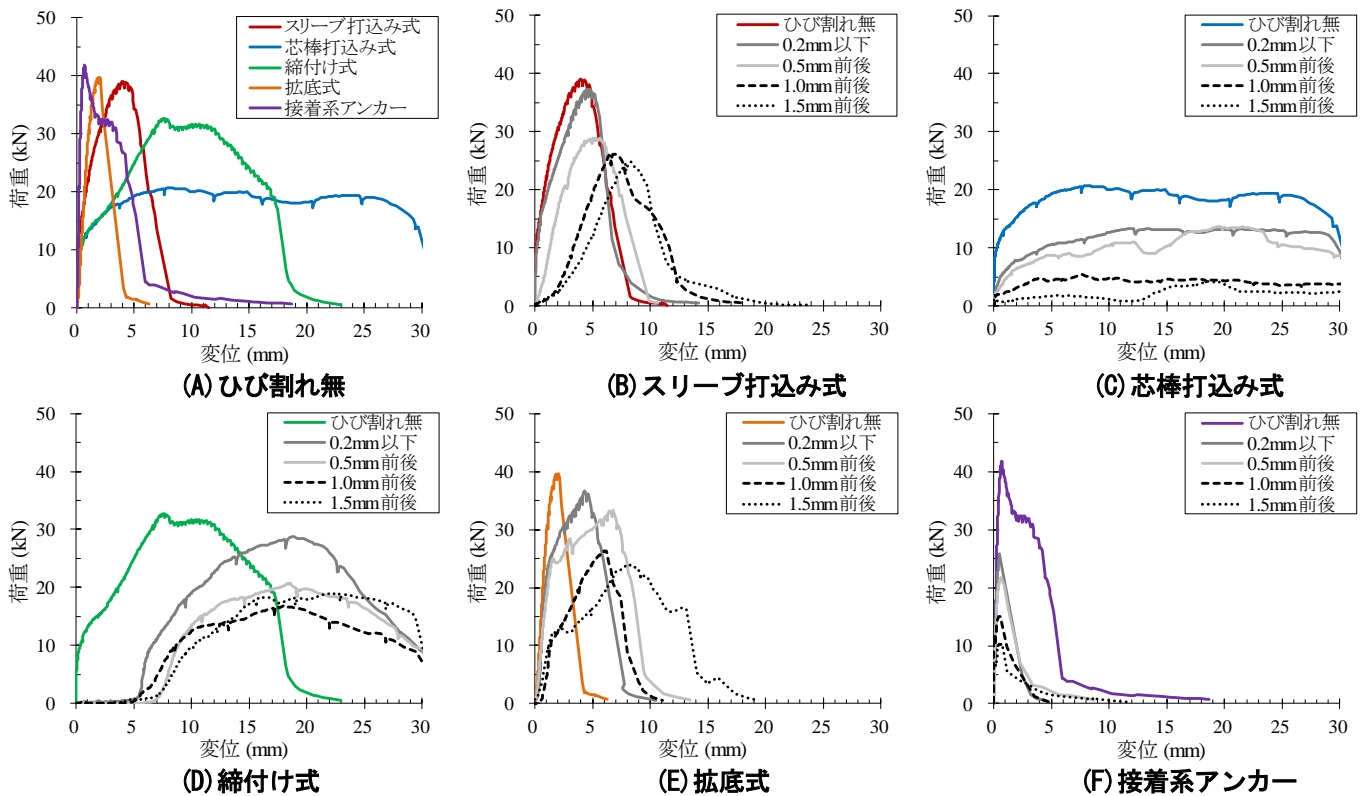


図-6 荷重-変位曲線の実験結果の例

以上を踏まえると、金属系アンカーの先端の形状・拡張部の大きさの違いや金属系アンカーと接着系アンカーの固着メカニズムの違いによって、ひび割れ発生時の引張耐力の低下傾向には差が生じると考えられる。

4.3.3 荷重-変位曲線

(1) 固着方法の違いの影響

ひび割れを導入していない試験体でのアンカーの荷重-変位曲線の例を図-6(A)に示す。金属系アンカーでは、荷重-変位曲線は固着方法の違いによって異なり、引張荷重作用時の変位の増加量は、スリーブ打込み式と拡底式で小さく、芯棒打込み式と縮付け式で大きくなった。特に芯棒打込み式では、最大荷重以降も引張荷重の負担を維持した状態で変位が大幅に増加した。芯棒打込み式や縮付け式では、スリーブ打込み式や拡底式よりもアンカー先端の拡張部が小さいため、引張荷重作用時の試験体からのアンカーの拔出量が大きく、変位の増加量が大きくなったと考えられる。一方、接着系アンカーでは、金属系アンカーよりも変位の増加量が小さくなった。接着系アンカーでは、孔内全体に接着剤を密実に充填してアンカーボルトをコンクリートの孔壁に固着させるため、アンカー先端の拡張のみによって固着力を確保する金属系アンカーよりも引張荷重作用時の拔出量が小さくなったためと考えられる。

(2) ひび割れの有無とひび割れ幅の影響

ひび割れを導入した試験体でのアンカーの荷重-変位曲線をアンカー種別ごとに図-6(B)～(F)に示す。金属系アンカーでは、ひび割れによって引張耐力が低下するとともに、変位の増加量が大きくなった。この傾向は、スリーブ打込み式、縮付け式、拡底式で明確に現れた。ただし、縮付け式では、引張荷重の作用直後に変位が極端に増加した。この一因としては、縮付け式では、ひび割れ幅の拡大によってスリーブとコンクリートの孔壁との固着が一時的に失われたが、引張荷重が作用すると再びスリーブがコンクリートの孔壁に固着されて引張荷重を負担することができたことが挙げられる。また、芯棒打込み式では、ひび割れを導入した場合においても、変位の増加量が大きくなった。一方、接着系アンカーでは、ひび割れによって引張耐力が著しく低下し、引張荷重が小さい段階で破壊に至ったため、ひび割れに伴う変位の大幅な増加は確認されなかった。

5. まとめ

本研究では、道路トンネルのジェットファンの取付け等に用いられる金属系アンカーを主な対象として、設計、施工、維持管理の標準的な方法や留意点をまとめることを目的としている。平成30年度の検討では、

固着方法の異なるアンカーの選定方法、耐荷性能の特徴、ひび割れ発生時の耐荷挙動を明らかにするために、4種類の金属系アンカーと1種類の接着系アンカーの引張試験を行った。得られた知見を以下にまとめる。

- 1) アンカーの引張耐力とひび割れ発生時の耐荷挙動は、金属系アンカーの先端の形状・拡張部の大きさの違いや金属系アンカーと接着系アンカーの固着メカニズムの違いによって異なった。このため、構造物の要求性能を適切に考慮して、所要の耐荷性能を有するアンカーを選定する必要がある。
- 2) 今回用いたスリーブ打込み式と拡底式の金属系アンカーでは、芯棒打込み式や締付け式の金属系アンカーと比較して、コンクリートとの固着力を確保するためのアンカー先端の拡張部が大きいため、コーン状破壊部の形状が大きく、引張耐力が大きくなり、ひび割れ発生時の引張耐力の低下が小さくなった。
- 3) 接着系アンカーでは、コンクリートの孔内に接着剤を密実に充填し、接着剤の付着や接着剤に含まれる骨材のかみ合わせによって固着力を確保するため、引張荷重作用時の変位の増加量が小さくなったが、ひび割れ発生時に引張耐力が著しく低下した。

今後は、得られた知見を活用して、道路トンネルのジェットファンの取付け等に用いられる金属系アンカーの設計、施工、維持管理の標準的な方法や留意点をまとめるとともに、あと施工アンカーの選定するための性能評価手法を検討する予定である。

参考文献

- 1) 日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説、pp. 207-292、2010
- 2) 土木学会：コンクリートのあと施工アンカー工法の設計・施工指針(案)、pp. 37-82、2014
- 3) 日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説、pp. 207-273、2010
- 4) 土木学会：コンクリートのあと施工アンカー工法の設計・施工指針(案)、pp. 1-78、2014
- 5) 川口潤、国枝稔、牧田通：コンクリート強度及びひび割れがあと施工アンカーの耐荷性に与える影響、コンクリート工学年次論文集、Vol. 37、No. 2、pp. 511-516、2015
- 6) 青木圭一、西田宏司、前田晴人、石原力也：あと施工アンカーにおけるひび割れの影響試験について、コンクリート工学、Vol. 54、No. 2、pp. 170-175、2016
- 7) 石原力也、国枝稔、高橋宗臣：コンクリートのひび割れがあと施工アンカーの力学性能に与える影響評価のための試験方法の開発と実験的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol. 39、No. 1、pp. 1723-1728、2017
- 8) 中村英佑、栗原勇樹、古賀裕久：金属系あと施工アンカーの引張耐力に関する基礎的研究、コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文報告集、Vol. 17、pp. 69-72、2017
- 9) 社団法人日本建築あと施工アンカー協会：あと施工アンカー標準試験法・同解説、pp. 18-23、1987

6.4 既往事象・現場条件に対応した最適な維持修繕手法、構造・材料の開発・評価

6.4.4 先端的維持管理技術による管理用施設（接合部）マネジメントに関する研究（2）

担当チーム：材料資源研究グループ（先端材料・高度化）

研究担当者：新田弘之、富山禎仁

【要旨】

コンクリート内部におけるあと施工アンカーの長期的な挙動については、十分に解明されておらず、信頼性の高い耐久性評価手法などの知見が得られていないのが現状である。そこで本研究では、道路トンネル内の附属物の設置等に用いられるあと施工アンカーを主な対象として、各種の環境条件があと施工アンカーの耐力や破壊モードに与える影響を解明し、その評価手法を構築することを目的として検討している。平成30年度は過年度に引き続き、コンクリートのアルカリ成分によるアンカー接着剤への影響を把握するため、水酸化カリウム水溶液への浸せきによるアンカー接着剤の経時変化を評価した。また、湿潤なコンクリート内部でアンカーに持続荷重が作用する場合の挙動について検討した。

キーワード：接着系あと施工アンカー、アルカリ、持続荷重、接着強さ、押抜試験、引抜試験、クリープ試験

1. はじめに

あと施工アンカーは比較的容易に定着が可能ことから、土木構造物においても、橋梁の耐震補強や河川構造物等の既設構造物の補強、附属物の取り付けなどの用途で、既に数多く使われていると共に、今後も需要が見込まれる。しかし、コンクリート内部におけるこれらの長期的な挙動については、十分に解明されておらず、信頼性の高い耐久性評価手法などの知見が得られていないのが現状である。このため、土木用途におけるあと施工アンカーの適切な設計・施工・維持管理法は確立しておらず、基準類も存在していない状況にある。

そこで本研究では、道路トンネル内の附属物の設置等に用いられるあと施工アンカーを主な対象として、各種の環境条件が耐力や破壊モードに与える影響を解明し、その評価手法を構築することを目的としている。

平成30年度は過年度に引き続き、接着系アンカーのコンクリートのアルカリ成分による影響、湿潤なコンクリート内部でアンカーに持続荷重が作用する場合の挙動について検討した。接着系アンカーは現在ジェットファン固定には使用されていないが、構造物として多用される分野もあり、あと施工アンカー全体の信頼性向上のためには、その長期挙動の把握は重要である。

2. アルカリの影響に関する実験

2.1 概要

コンクリート内部の高アルカリ環境下における接着系

あと施工アンカーの長期的な挙動については十分に解明されておらず、さらなるデータの充実が必要である。このため、接着系アンカーの試験方法の一つである ACI 355.4-11¹⁾を参考に、アンカー接着剤のアルカリによる劣化機構や劣化の評価方法について検討している^{2), 3)}。当該規格で規定されている接着系アンカーの耐アルカリ性評価方法では、アンカーを打設したコンクリート円柱を所定の厚さにスライスした試験片を用いる。水酸化カリウム (KOH) 水溶液浸せき前後の試験片の押抜試験を実施し、得られたアンカー接着剤とコンクリートとの接着強さを劣化の指標とするものである。

2.2 実験方法

2.2.1 実験材料

接着系アンカーは、製品の形態や施工方法、接着剤樹脂の種類等が異なるさまざまな製品が市販されている⁴⁾。これらの中から、ガラス製カプセルに接着剤（主剤、硬化剤）と骨材とが封入された「カプセル方式」の製品を4種類、「注入方式（カートリッジ型）」の製品1種類を用いた。カプセル方式の製品は、カプセルをドリルで削孔した孔に挿入した後、回転・打撃を与えて施工する「回転・打撃型」3種類（不飽和ポリエステル樹脂、ビニルエステル樹脂、ビニルウレタン樹脂）と、ハンマー等でボルトを打込むことでガラスカプセルを破碎し施工する「打込み型」1種類（不飽和ポリエステル樹脂）である。実験に用いた接着系アンカーの製品規格を表2-1に示す。試験片の母材となるコンクリート（φ154 × 150 mm）は、

表 2-1 アルカリ浸せき試験に用いた接着系あと施工アンカーの寸法と強度（製造メーカーの技術資料より）

製品種別	アンカーのタイプ	接着剤樹脂 ^{※1}	外径 (mm)	長さ (mm)	アンカー筋	ドリル径 (mm)	削孔長 (mm)	最大引張荷重 (kN)	付着強さ ^{※2} MPa
A	カプセル方式 回転・打撃型	UP	13	100	M12 ^{※3}	14.5	100	57.4	17.3
B	カプセル方式 回転・打撃型	VE	12.7	100	M12 ^{※3}	14.5	100	73.1	22.0
C	カプセル方式 回転・打撃型	VU	13.1	127	M12 ^{※3}	14	110	54.2	14.7
D	カプセル方式 打込み型	UP	13	102	M12 ^{※4}	15	110	52.7	12.7
E	注入方式 カートリッジ型	EP	—	—	M12 ^{※4}	14.5	100	—	—

※1: UP/不飽和ポリエステル樹脂、VE/ビニルエステル樹脂、VU/ビニルウレタン樹脂 ※2: 有効付着長（削孔長-カット部長）により算出
 ※3: SUS304 全ねじボルト 先端斜め45°カット ※4: SUS304 全ねじボルト 先端斜めカットなし

表 2-2 母材コンクリートの配合

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤A	混和剤B
		水	セメント	細骨材	粗骨材		
70	47	163	23.3	87.4	1001	セメント× 0.25%	セメント× 0.003%

硬質塩化ビニル管を型枠にして打設した。水セメント比は70%、材齢28日目の圧縮強度は約23 MPaである（表2-2）。母材コンクリートへのアルカリ添加による劣化促進効果について検証するため、一部の実験ケースでは、pH 13.2~13.5程度に調製したKOH水溶液を練混ぜ水として用い母材コンクリートを作製した。

材齢約15週の母材コンクリート上面中央に、製造メーカーが指定する径、長さの孔をハンマードリルで設けてアンカーのカプセルを挿入し、製品A、B、Cについては先端を斜め45°にカットした全ねじボルト（M12）を挿入しながらカプセルに回転・打撃を与え、製品D、Eについては先端が平らな全ねじボルト（M12）にハンマーで打撃を与えながら挿入し、施工した。アンカーの接着剤が完全に硬化した後、コンクリート円柱を水平方向に型枠ごとスライスし、製品A~Dについてはこれを試験片とした浸せき試験を行った。試験片はコンクリート円柱の上面近傍を避け、1体につき3枚ずつ採取した。試験片の厚さについてACI 355.4-11では1 3/16±1/8インチ（27~33.3 mm）と規定しているが、本研究ではやや薄い25 mmで試験した。アンカー打設後のコンクリート断面と、試験片採取方法の概略を図2-1に示す。

2.2.2 実験方法

作製した試験片は、プラスチック製水槽に満たしたKOH水溶液中に浸せきした。浸せき開始時の母材コンクリートの材齢はおよそ20週である。KOH水溶液の濃度は約1 mol/LでpH 13.2~13.5程度となるように調製し、液温は恒温恒湿室内で20℃あるいは40℃一定で保持し

た。試験片は、互いに30 mm程度の間隔を保つよう、水槽中に立てて静置した。浸せき試験時の試験片設置状況を図2-2に示す。

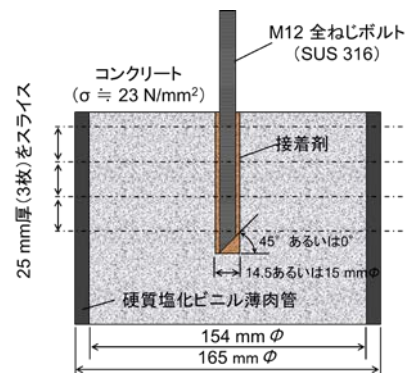


図 2-1 接着系アンカー打設後のコンクリート断面と試験片採取方法の概略



図 2-2 浸せき試験時の試験片設置状況

所定の時間が経過した時点で試験片を取り出し、軽く水洗した後、押抜試験を実施した。押抜試験は、試験片取り出し後から1時間以内に実施した。ACI 355.4-11の規定に準拠し、20℃、湿度60%RHの空气中に暴露した試験片についても同様に評価した。スライス試験片の数量は、一水準あたり10枚とした。浸せき試験を行ったケースを表2-3に示す。

表2-3 浸せき試験を行ったケース

製品 種別	KOH水溶液 (pH 13.2~13.5) 浸せき		20℃、60%RH 大気中
	40℃	20℃	
A	○/◎	○	○
B	○	—	—
C	○	—	—
D	○	—	—

○：母材コンクリートへのアルカリ添加なし／◎：母材コンクリートへのアルカリ添加あり

押抜試験の概略図を図2-3に示す。押抜試験は、厚さ25mmの鋼製反力板で試験片の底面全面を支持し、直径8mmの治具により、試験片上面よりボルト中心に荷重を加えることにより行った。反力板の開孔部の直径は16mmとした。押抜試験には万能試験機を用い、試験速度は1mm/min.で行った。破壊に至るまでの最大荷重から、式(1)により接着強さを求めた。

$$\tau_{dur,i} = \frac{N_{u,i}}{\pi d_a h_{sl}} \quad (1)$$

ここに $\tau_{dur,i}$: 接着強さ (MPa)、 $N_{u,i}$: 最大荷重 (N)、 d_a : アンカー径 (mm)、 h_{sl} : 試験片厚さ (mm)

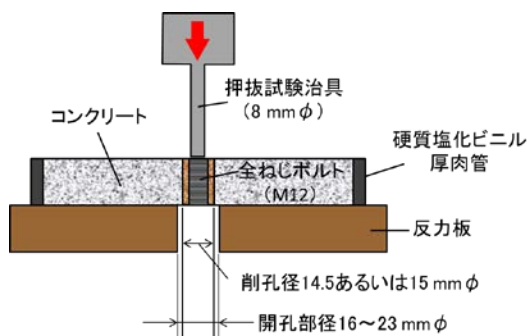


図2-3 スライス試験片による押抜試験の概略図

2.2.3 赤外線分光分析

赤外線分光分析は、有機化合物の中の炭素同士や、炭素-酸素、炭素-水素などの化学結合の様々な振動による光の吸収が、赤外線域に現れることを利用した化学分析手法である。試料の赤外線 (波長 800~4000 cm⁻¹程度)

吸収スペクトルから、樹脂の種類や劣化の有無に関する情報が得られる⁵⁾。そこで、押抜試験後の接着剤の表面近傍 (接着剤表面から深さ数10 μm程度までの範囲) から採取した少量の微粉状のサンプルについて赤外線分光分析を行い、薬液浸せき前後における接着剤の化学構造の変化について調べた。

接着剤から得られる微粉状のサンプルには樹脂分と骨材分とが混合しているため、光学顕微鏡で観察しながら、樹脂分と思われる粒子のみを選別し、これをコンプレッションセルで加圧圧縮することで赤外線顕微鏡を用いた透過スペクトルの測定を行った。

2.3 実験結果と考察

2.3.1 アルカリによるアンカー接着剤の劣化挙動

接着剤 (樹脂) の種類や施工方法の異なる4種の接着系あと施工アンカーについて、40℃のKOH水溶液に浸せきした時の、接着強さの経時変化を図2-4に示す。これらの結果は、押抜試験によって得られたものである。

いずれの実験ケースにおいても、母材コンクリートには肉眼で確認できるひび割れは生じなかった。浸せきの有無にかかわらずデータのばらつきは大きく、変動係数は製品A、B、C、Dの順にそれぞれ23%、18%、37%、13%となった。いずれの製品においても、浸せきによる破壊モードの変化に明確な傾向は認められなかった。接着強さの平均値に着目すると、4000時間浸せき後には、製品Bを除きいずれもわずかながら低下が見られた。また、母材コンクリートにあらかじめアルカリを添加したケースでは、浸せきにより接着強さがわずかに増加した。

そこで、浸せき前と4000時間浸せき後の平均値について、有意水準5%でF検定およびt検定を行ったところ、製品A (アルカリ添加なし) は有意差あり、製品B、C、Dおよび製品A (アルカリ添加あり) については有意差は無いとの結果が得られた。

KOH水溶液浸せきによるアンカー接着剤の劣化の有無を調べるため、押抜試験後の接着剤破断面表面近傍の樹脂について、赤外線顕微鏡による化学構造分析を行った。その結果、製品A (アルカリ添加なし) を除きいずれも、アルカリ浸せきの前後で明確な赤外線吸収スペクトルの変化は認められなかった (図2-5)。以上の結果を踏まえると、製品B、C、Dについては、実験を行った範囲内ではアルカリによる劣化は生じていないものと推察される。

一方、製品A (アルカリ添加なし) についてはKOH水溶液浸せき前後において、化学構造の変化を示す赤外線吸収スペクトルの変化が認められた。図2-6は20℃、60%RHの空气中または40℃のKOH水溶液中で2000時間経過後の、

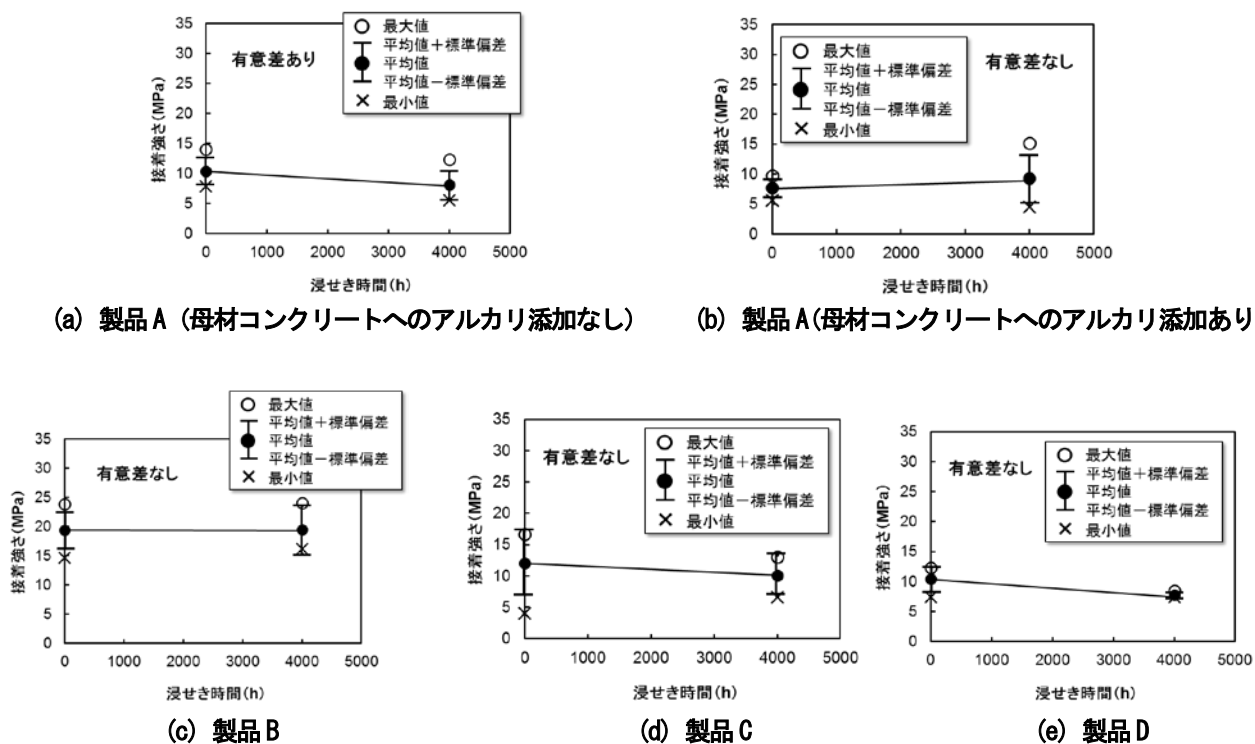


図2-4 接着系あと施工アンカーの接着強さの経時変化 (40℃、pH13.2 水酸化カリウム水溶液浸せき)

接着剤表面の赤外吸収スペクトルを示している。いずれのスペクトルにおいても 1730 cm^{-1} 付近に、エステル結合の強い吸収ピークが認められる。これは、不飽和ポリエステル樹脂のスペクトルの特徴の一つである。40℃に浸せきした接着剤のスペクトルでは、 1730 cm^{-1} 付近の吸収がやや弱まり、 1580 cm^{-1} 付近に新たな吸収ピークの出現の兆候が認められた。既往の研究などから、不飽和ポリエステル樹脂に含まれるエステル結合がアルカリ存在下で加水分解しカルボン酸塩を生じた場合に、同様の赤外吸収スペクトルの変化を示すことが明らかとなっている^{6), 7)}。すなわち、図2-6で示したスペクトルの変化から、40℃のKOH水溶液に浸せきしたことにより、接着剤表面近傍の樹脂が加水分解を生じていることが示唆された。

そこで、さらに長時間浸せきした場合の挙動を把握するために、製品Aについて浸せきを継続することとした。図2-7はアルカリ浸せきを8000時間まで継続したときの、製品Aの接着強さの経時変化を示している。浸せき8000時間後においても、接着強さの低下は認められなかった。

既往の知見^{6), 7)}などから、加水分解が進行するほど 1580 cm^{-1} 付近のピークは強くなり、逆に 1730 cm^{-1} 付近の吸収は弱まるものと考えられるため、これらの2つの吸収ピークの比を指標として利用し、製品Aについて浸せきによる加水分解の程度を評価することにした。方法は以下のとおりである⁸⁾。

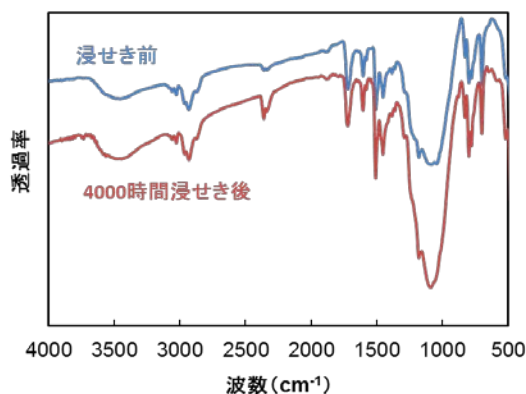


図2-5 アルカリ浸せき前後におけるアンカー接着剤の赤外吸収スペクトルの一例 (製品B)

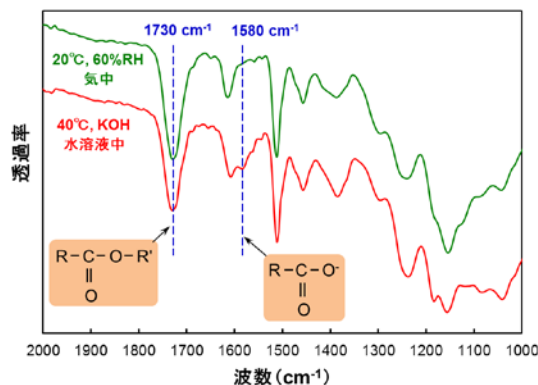


図2-6 接着剤表面の典型的な赤外吸収スペクトル (2000時間経過後)

- a) スペクトルを吸光度に換算して解析する。
- b) 1580 cm^{-1} 付近および 1730 cm^{-1} 付近の吸収ピークそれぞれについて、ベースラインからピークトップまでの高さを求める。ベースラインは各吸収ピークの高波数側/低波数側の 2 点のピーク立ち上がり部を結ぶ直線とする (図 2-8)。なお、1580 cm^{-1} 付近に明確な吸収ピークを持たない試料については、1580 cm^{-1} における吸光度とベースラインとの差をピーク高さとする。
- c) 上記で求められる 1580 cm^{-1} 付近/1730 cm^{-1} 付近の吸収ピーク高さの比が当該スペクトルの加水分解度合いの指標となる。(1580 cm^{-1} /1730 cm^{-1} 比が大きいほど加水分解が進んでいることとなる。)

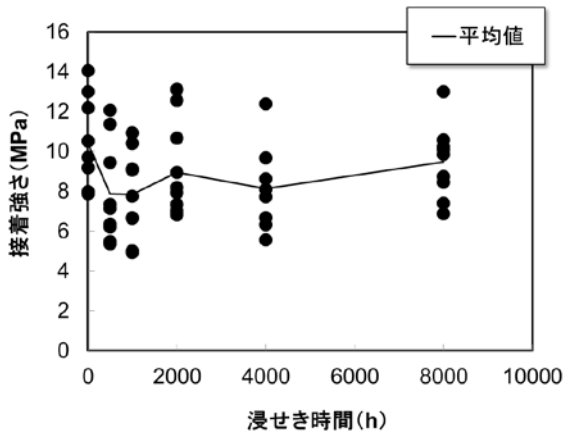


図 2-7 製品 A における接着強さの経時変化 (40°C、pH13.2 水酸化カリウム水溶液浸せき)

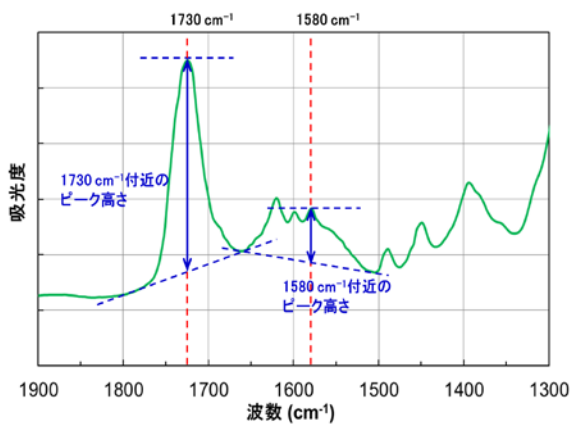
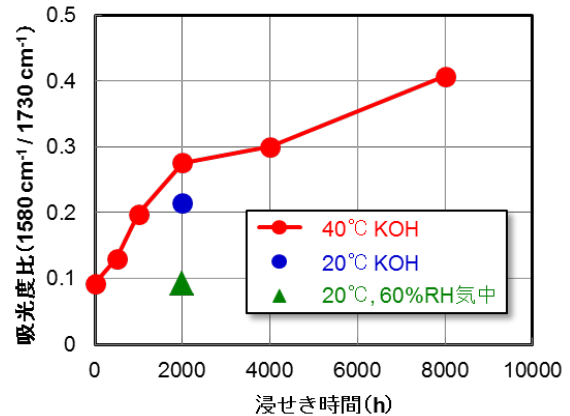


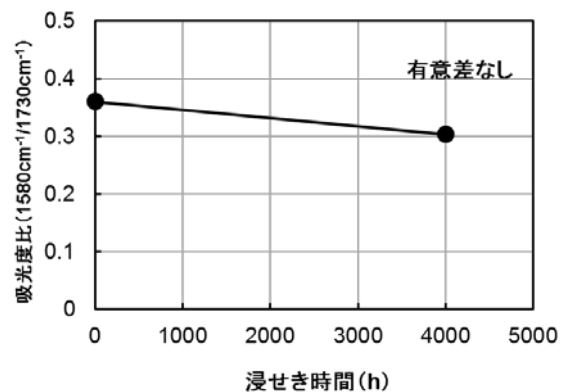
図 2-8 赤外吸収スペクトルにおけるピーク高さの求め方

赤外吸収スペクトルの解析結果を図 2-9 に示す。それぞれのデータは、押抜試験後における接着剤表面の任意の 3 か所から試料を採取してスペクトル測定を行い、解

析して得られた結果の平均値を示している。母材コンクリートへのアルカリ添加が無いケースにおいて、40°C の KOH 水溶液に浸せきした場合の吸光度比 (1580 cm^{-1} 付近 / 1730 cm^{-1}) の経時変化に着目すると、浸せき時間の増加に伴い、吸光度比も増加していることがわかる (図 2-9 (a))。すなわち、浸せき時間の増加に伴って、樹脂の加水分解の程度が進行する傾向にあることが明らかとなった。また、2000 時間経過時点の吸光度比について比較すると、20°C 浸せきよりも 40°C 浸せきの方が大きいことから、環境液の温度が高い方がより促進的に加水分解が進行しているものと考えられる。20°C、60%RH 気中に暴露した試験片については、2000 時間後においても初期とほぼ同程度の吸光度であることから、加水分解は生じていないものと推察される。40°C の KOH 水溶液では 8000 時間後においても吸光度比は上昇傾向にあると考えられる。



(a) 母材コンクリートへのアルカリ添加なし



(b) 母材コンクリートへのアルカリ添加あり

図 2-9 赤外吸収スペクトルにおける吸光度比の経時変化 (1580 cm^{-1} 付近 / 1730 cm^{-1} 付近)

一方で、母材コンクリートにアルカリを添加したケー

スでは、浸せき前の時点で0.35程度の吸光度比を示した(図2-9 (b))。これは、アルカリ添加の無いケースで、40°CのKOH水溶液に4000時間浸せきした時点の吸光度比と同程度である。しかし、浸せきにより吸光度比は増加することなく、4000時間後においても初期とほぼ同じ値となった。4000時間までの浸せき試験の結果から、母材コンクリートへのアルカリ添加は、浸せきによるアンカー接着剤の劣化を促進させる効果は確認できなかった。今後引き続き浸せきを継続し、さらに長期のデータを取得していきたいと考えている。

2.3.2 アンカー接着強さの評価方法

押抜試験によるアンカー接着強さの評価では、浸せきの有無にかかわらずデータのばらつきが大きく、変動係数は製品A、B、C、Dの順にそれぞれ23%、18%、37%、13%となった。最大押抜荷重が低かったサンプルの多くで、接着剤の充填不良による空隙が観察された(図2-10 (a))。このことから、施工時に接着剤の充填が不十分な箇所があると、そこを起点に局部的な破壊が生じ、これが接着強さの低下や試験結果のばらつきの要因につながるものと推察される。

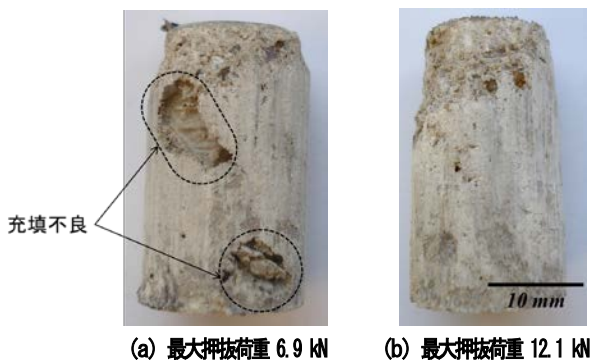


図2-10 押抜試験後のアンカー外観の比較

接着剤の充填不良が押抜試験における結果のばらつきの一因であるならば、アンカーと母材コンクリートとの接着面積を十分大きくすることにより、その影響を低減できるものと考えられる。そこで、製品A、BおよびEを打設した円柱供試体をスライスせず試験に供することとし、引抜試験による接着系アンカーの挙動を調べた。引抜試験は図2-11に示す通り、万能試験機の治具に供試体を反力板を介してボルト・ナットで固定して行った。試験速度は押抜試験と同様、1 mm/min.とした。

引抜試験により得られた各製品の接着強さを図2-12に示す。この図には比較のため、既往の押抜試験による接着強さも併せて示している。引抜試験によるアンカー

接着強さの平均値は、製品Aは15.8 MPa、製品Bは19.4 MPa、製品Cは11.5 MPaとなり、いずれも押抜試験結果より高い値を示した。特に製品Aでは押抜試験による接着強さのおよそ1.5倍となり、カタログ値(表2-1)により近い値が得られた。押抜試験における変動係数は23% (製品A)、18% (製品B)、6.4% (製品E)であったのに対し、引抜試験ではそれぞれ10%、7%、6.1%となり、特にカプセル方式の製品でばらつきが大幅に低減されることが明らかとなった。この結果から、よりばらつきの少なく、実際の使用条件に近い試験方法として、アンカー全長を用いた引抜試験を応用する手法が提案できると考えられる。

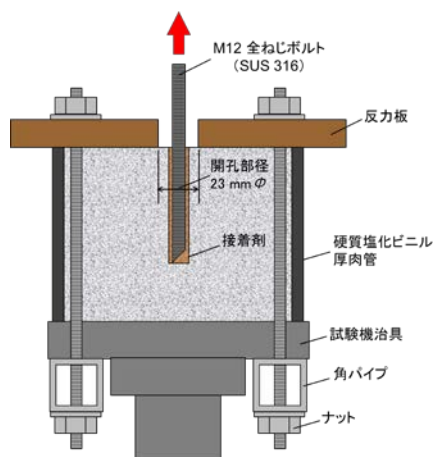


図2-11 スライス試験片による押抜試験の概略図

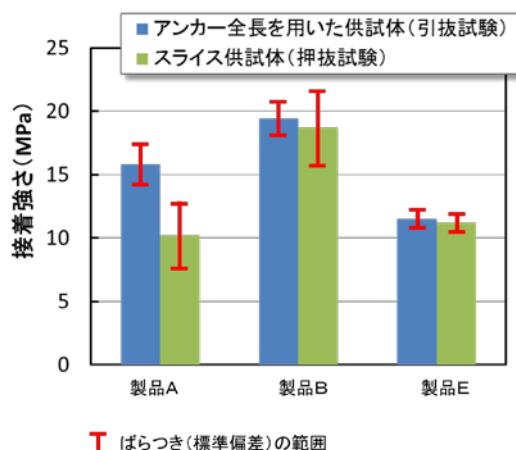


図2-12 試験方法による接着強さの比較

引抜試験に用いる反力板(図2-11)の開孔部径を変えて引抜試験を行ったところ、開孔部径が16、17、20 mmではボルトの破断により、23 mmではアンカーの付着切れにより試験が終了した。本研究で用いたM12ボルト

(SUS304) の公称引張破断荷重は約 49.7 kN であり、アンカーの最大引張荷重 52.7~73.1 kN よりも小さい。開孔部径が 20 mm 以下の場合にはアンカーに対する反力板の拘束力が大きく、アンカーが付着切れを起こすことなく、ボルトの降伏・破断に至るものと考えられる。その一方で、開孔部径を 23 mm より大きくすると、コンクリート母材のコーン状破壊が生じ、アンカーの接着強さを適正に評価することができない。そのため、本研究における反力板の開孔部径は 23 mm が妥当であると判断した。

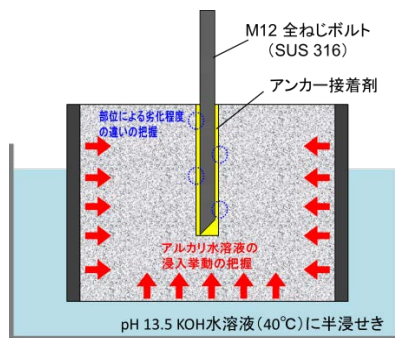


図 2-13 円柱供試体を用いたアルカリ浸せき試験の概略図

現在、アンカー全長を用いた引抜試験に基づく、アンカーの耐アルカリ性評価方法の確立に向け、浸せき試験を継続中である。スライス試験片と円柱供試体とのアルカリ浸入挙動の違いや、アンカーの部位による接着剤劣化挙動の違い等に着目し、引き続き検討する予定である。

3. 湿潤環境下での持続荷重の影響に関する実験

3.1 概要

接着系あと施工アンカーに持続的な荷重が長時間作用する場合の耐力は、最大耐力に比べて明らかに低下することが知られている⁹⁾。しかし、これらのデータは十分に蓄積されておらず、適切な設計が行えないのが現状である。特に、母材であるコンクリートに発生したひび割れなどに起因し、コンクリート/アンカーの接着面に水が滞留するような場合、持続荷重と水分との複合的な作用により接着系アンカーの耐久性が低下することが懸念されるが、その挙動については明らかにされていない。

そこで、接着系あと施工アンカーを施工したコンクリート供試体を水中に浸せきし、この状態でアンカーに持続荷重を負荷するクリープ試験を行い、湿潤環境下における接着系アンカーのクリープ挙動について検討した。

3.2 実験方法

3.2.1 実験材料

市販されている不飽和ポリエステル樹脂系のアンカー種類を選び、試験に供した(表 3-1)。製品はガラス製のカプセルに接着剤(主剤、硬化剤)と骨材が封入されたタイプであり、これをドリル孔に挿入し回転・打撃を与えて施工する。試験片の母材となるコンクリートは、「2.2.1 実験材料」と同じものを用いた。このコンクリート円柱に、上記の接着系アンカーをメーカーの指定する方法(削孔径 14.5 mm、削孔長 100 mm)で打設し、これを供試体とした(図 3-1)。

3.2.2 実験装置

クリープ試験機は、ロードセルによる荷重検出とサーボモータ駆動による張力ロッドの制御とを組み合わせたものである(図 3-2)。最大荷重は 50 kN、ウォームジャッキのストロークは 100 mm となっている。この試験機には恒温水槽が備わっており、常温~70°C の範囲で、供試体を一定水温の水中に浸せきしつつ、引張クリープ試験を行うことができる(図 3-3)。

3.2.3 実験方法

予備試験において万能試験機を用いアンカーの最大引張荷重を求めたところ、49.7 kN であった。そこでクリープ試験においては、最大引張荷重の 80% (39.8 kN)、70% (34.8 kN)、60% (29.8 kN) の 3 水準の引張荷重を持続的にアンカーに負荷し、この時のアンカーの変位を測定した。試験機の張力ロッドの変位をアンカーの変位とみなし、これを自動記録した。試験は、供試体を無負荷で所定の水温の水中に 1 週間浸せきした後に開始した。クリープ試験開始時には、およそ 60 秒で目標の荷重に達するよう徐々に載荷し、供試体への衝撃を回避した。浸せき水は層内で十分に攪拌されており、水温は 25°C~65°C の範囲で設定した値に保たれている。比較として、供試体を室温(20~35°C 程度、温度制御なし)大気中に設置した状態でのクリープ試験も行った。

表 3-1 クリープ試験に用いた接着系あと施工アンカーの寸法と強度(製造メーカーの技術資料より)

アンカーのタイプ	接着剤樹脂	外径(mm)	長さ(mm)	アンカー筋	ドリル径(mm)	削孔長(mm)	最大引張荷重(kN)	付着強さ*(MPa)	長期許容引張荷重(kN)
カプセル方式 回転・打撃型	不飽和 ポリエステル	13	100	M12	14.5	100	57.4	17.3	11.7

※ 有効付着長(削孔長-カット部長)により算出

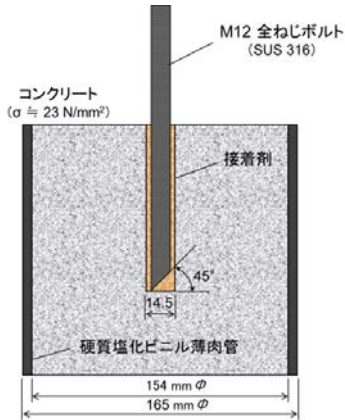


図3-1 供試体の概略図

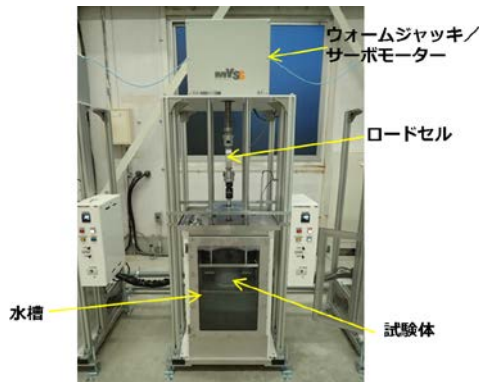


図3-2 クリープ試験機の概観

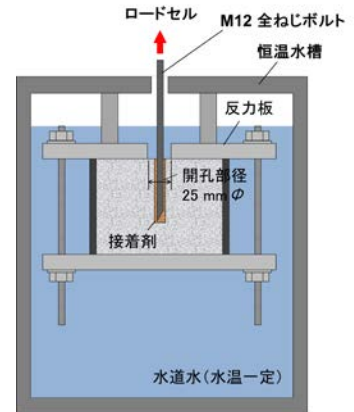
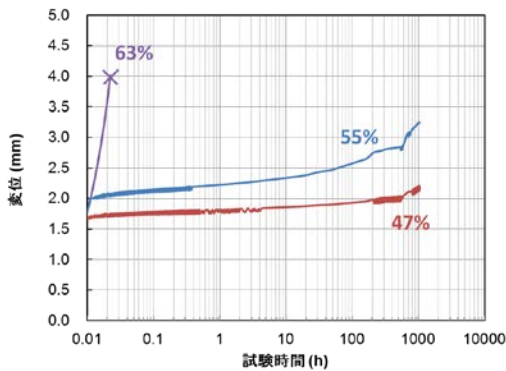


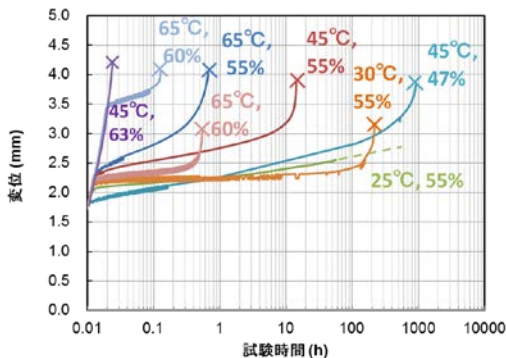
図3-3 浸せきクリープ試験の模式図

3.3 実験結果と考察

接着系アンカーのクリープ試験の途中経過として、アンカーの変位の経時変化を図3-4に示す。負荷する荷重の増大に伴いアンカーのクリープ変形は速くなり、最大荷重の63%を負荷した試験水準では、試験開始から数分のうちに引抜破壊(付着切れ)に至り、試験が終了した。最大荷重の63%のケースでは、供試体により破壊までの時間に若干の差異があったものの、水中と大気中で明確な違いは認められなかった。



(a) 室温大気中



(b) 水中

図3-4 持続荷重下でのアンカー変位の経時変化

水中に浸せきし、最大引張荷重の55%を負荷したケースを比較すると、水温の上昇に伴いクリープ変形が早くなり、65°Cでは試験開始から1時間程度、45°Cでは15時間程度、30°Cでは110時間程度で破壊に至った。一方で、25°Cのケースでは1000時間以降もクリープ変形は緩やかであり、破断には至らなかった。

大気中で最大引張荷重の55%を負荷した結果と、同程度の温度(25°C)で水中で荷重を負荷した結果とを比較すると、载荷の初期に生じた変位は水中が大気中よりも大きく、また変位の経時変化は水中の方がやや早い結果となった。

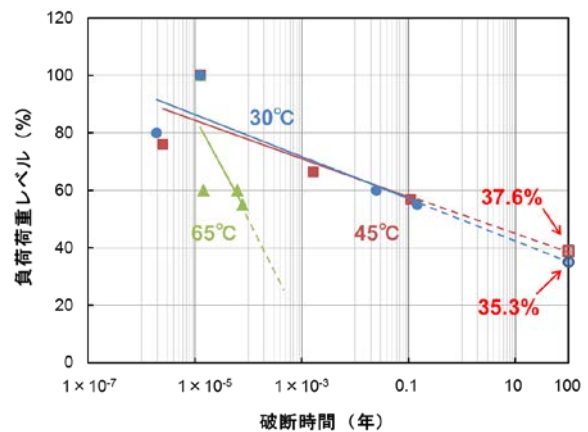


図3-5 線形外挿によるクリープ破断寿命の予測(水中)

AASHTO TP 84-11 (2017)では、接着系あと施工アンカーのクリープ破断寿命を予測する方法として、3段階の負荷荷重レベル(100%、80~70%、70~60%)と破断時間との関係から得られる近似直線を外挿することにより、より低い荷重を負荷したときの破断時間求める手順が示されている。この方法に基づき、これまでに得られた水中

でのクリープ試験結果を整理したグラフを図3-5に示す。30°Cおよび45°Cの近似直線には大きな差異は無く、破断時間100年を想定した時の許容負荷荷重レベルはそれぞれ35.3%、37.6%となった。製造メーカーの技術資料によると、今回の試験に用いたアンカーの長期許容引張荷重は、接着系あと施工アンカーの設計式¹⁾を用いて算定されており、最大引張荷重のおよそ20% (11.7 kN) に設定されている。すなわち、一般的な温度条件であれば湿潤環境であっても、100年間でクリープ破断は生じない荷重レベルに設定されていることがわかった。一方、水温65°Cの高温になると、低い負荷荷重でも寿命が極端に短くなることが示され、使用荷重だけでなく、使用温度の許容値についても適切に設定する必要があることを把握した。

4. まとめ

本研究では、道路トンネル内の附属物の設置等に用いられるあと施工アンカーを主な対象として、各種の環境条件があと施工アンカーの耐力や破壊モードに与える影響を解明し、その評価手法を構築することを目的として検討している。平成30年度は過年度に引き続き、コンクリートのアルカリ成分によるアンカー接着剤への影響を把握するため、水酸化カリウム水溶液への浸せきによるアンカー接着剤の経時変化を評価した。また、湿潤なコンクリート内部でアンカーに持続荷重が作用する場合の挙動について検討した。

水酸化カリウム水溶液中での浸せき試験では、実験に供した一部の製品で、強度低下を伴うアンカー接着剤の化学的劣化が認められた。また、劣化の指標として、赤外吸収スペクトルの吸光度比を利用できる可能性が示された。母材コンクリートへのアルカリ添加は、浸せきによるアンカー接着剤の劣化を促進させる効果は確認できなかった。一方、アルカリによるアンカー接着剤の接着強さの変化を評価する方法として、アンカー全長を用いた引抜試験は従来法よりもばらつきが少なく、実際の使用条件に近い試験方法として利用できる可能性を確認することができた。

湿潤環境下でのクリープ試験では、より多くの荷重・水温条件下でのデータを蓄積しつつある。これまでで得られた結果から、高温、短時間の実験結果にもとづき低温、長時間の寿命予測ができる可能性が示された。この

実験については、今後、アンカーの材種も変えてデータを充実させ、信頼性の高い寿命予測に繋げていきたいと考えている。

参考文献

- 1) ACI 355.4-11: Qualification of Post-Installed Adhesive Anchors in Concrete and Commentary, 2011
- 2) 富山禎仁、西崎 到：接着系あと施工アンカーの耐アルカリ性評価方法に関する検討、土木学会論文集 A1、Vol. 72、No. 5、pp. 46-55、2016
- 3) 富山禎仁、西崎 到：接着系あと施工アンカーの耐アルカリ性評価方法に関する検討、複合・合成構造の活用に関するシンポジウム講演集、第11回、pp. 296-303、2015
- 4) 日本建築あと施工アンカー協会：あと施工アンカー技術資料 第7版、66 p.、2009
- 5) 泉 美治、小川政彌、加藤俊二、塩川二郎、芝 哲夫：機器分析のてびき 第2版、pp. 1-23、化学同人、1996
- 6) Chin, J. W., Aouadi, K., Haight, M. R., Hughes, W. L. and Nguyen, T.: Effects of water, salt solution and simulated concrete pore solution on the properties of composite matrix resins used in civil engineering applications, Polymer Composites, Vol. 22, Issue 2, pp. 282-298, 2001
- 7) 富山禎仁、久保内昌敏、仙北谷英貴、津田 健：高分子系材料の腐食検知をめざした赤外線透過ファイバセンサの特性評価、強化プラスチック、Vol. 49、No. 6、pp. 258-264、2003
- 8) トンネル天井板の落下事故に関する調査・検討委員会：トンネル天井板の落下事故に関する調査・検討委員会報告書、pp. 29-30、2013
- 9) R. A. Cook, E. P. Douglas and T. M. Davis, "Adhesive Anchors in Concrete Under Sustained Loading Conditions", NCHRP Report 639, Transportation Research Board, 138 p., 2009
- 10) 国尾 武、M. L. Williams: 粘弾性体の力学的挙動、日本機械学会誌、Vol. 68、No. 552、pp. 83-92 68、1965
- 11) 国土交通省：あと施工アンカー・連続繊維補強設計・施工指針、62 p.、2006