

道路橋における目視困難な重要構造部位を対象とした点検技術に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 20～平 23

担当チーム：橋梁構造研究グループ

研究担当者：木村嘉富、村越潤、花井拓、高橋実

【要旨】

近年、道路橋において目視点検が困難な部位に経年劣化による損傷が報告されており、このような部位の合理的かつ効率的な調査手法の確立が求められている。本研究では、道路橋における目視困難な重要構造部位の損傷として、1) 鋼床版デッキプレート進展き裂、2) コンクリート等埋込部の鋼材に生じる腐食欠損を対象とし、これらの部位の損傷に対する非破壊調査技術の検討を行った。また、3) 道路橋の損傷発見後における、対策実施までの状態監視技術の基礎的検討を行った。その結果、1) については、超音波探傷法を提案し、実用化に向けた現地性能確認・改良を重ね、マニュアル案を作成した。2) については、鋼部材内に伝搬する超音波の伝搬数値シミュレーションを行い、欠損部からの反射波の伝搬挙動を考慮して各技術の適用性を整理し、遮断周波数を利用したSH 板波の適用性を提示した。3) については、汎用技術による実用的な計測技術のシステム・機器の仕様における技術面・運用面での課題・留意点を整理した。

キーワード：非破壊調査技術、目視困難な部位、鋼床版デッキプレート、コンクリート等埋込部、状態監視技術

1. はじめに

近年、道路橋の点検において目視点検が困難な部位に経年劣化による損傷が報告されており、重大事故を未然に防ぐための合理的・効率的な点検・調査手法の確立が求められている。

一方、他分野を含め数多くの非破壊技術の研究開発が行われているが、維持管理の目的に見合った性能を有する技術は少なく、技術開発のシーズとニーズが必ずしも一致していないのが現状である。点検・調査技術に求められる性能・仕様を明確にした上で、対策検討の意志決定ツールとしての適用条件、適用方法を個別に明らかにしていく必要がある。

本研究では、道路橋における目視困難な重要構造部位の損傷として、維持管理の課題・ニーズを踏まえたうえで、1) 鋼床版デッキプレート進展き裂、2) コンクリート等埋込部の鋼材に生じる腐食欠損の2種類を対象とし、これらの部位の損傷に対する非破壊点検・調査技術の提案を行った。また、3) 道路橋の損傷発見後における、対策実施までの状態監視技術の基礎的検討を行った。

本報告では、先ず、1) 鋼床版デッキプレート進展き裂を対象とした超音波探傷法の概要及び検出性能の試験結果について述べるとともに、実用化に向けた検討結果について述べる。

次に、2) コンクリート等埋込部の鋼材に生じる腐食欠

損を対象として、適用性の期待される技術（各種波による超音波探傷法）についての調査結果を述べるとともに、抽出した調査技術を対象として、超音波の伝搬数値シミュレーションによる各技術の適用性の検討結果を述べる。

最後に、3) 道路橋の損傷発見後における、対策実施までの状態監視技術について、実橋への適用事例を踏まえた、汎用技術による実用的な計測技術のシステム・機器の仕様における技術面・運用面での課題・留意点を整理した結果について述べる。

2. 鋼床版デッキプレート進展き裂の調査のための超音波探傷技術の検討

2.1 対象とする損傷の概要

図-2.1 に対象とする鋼床版の疲労き裂を示す。鋼床版のUリブは閉断面構造のため、製作時においてデッキプレートとの溶接は外面からの片側溶接となるが、この溶接のルート部（溶接金属の底部とデッキ鋼板の接触する部分）からデッキプレート内部に進展し、デッキ表面に貫通するき裂（以下、デッキプレート進展き裂）が報告されている¹⁾。このき裂は10年前頃より重交通路線の鋼床版橋梁において散見されているが、目視では発見困難な部位に発生するため損傷実態については不明な部分が多い。き裂が進展するとデッキプレート上の舗装の変状として現れるので、その大部分が変状に伴う舗装除去時

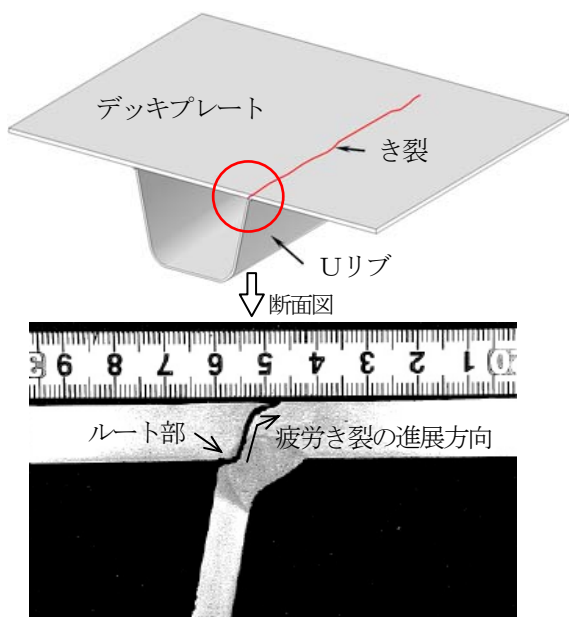


図-2.1 鋼床版デッキプレート進展き裂の例

や打換え時に発見されている。貫通前にき裂深さを概略捉えるには、現状では超音波探傷法が唯一の手段と考えられる (図-2.2 参照)。

2.2 臨界屈折角探触子による探傷イメージと特徴

一般的に使われている探触子は公称屈折角が70度であるが、屈折角を70度より大きくし90度に近づけた方(以下、臨界屈折角探触子)が原理的に超音波ビームがき裂に当たるようになり、板厚に対して浅いき裂を直接法により検出できる可能性が高くなる(図-2.3 参照)。

図-2.4 にこの臨界屈折角探触子を2個用いて、送信用と受信用としてそれぞれの臨界屈折角探触子を対向させ、透過法において動作させると、この疑似表面SV波による透過パルスが得られる様子を示す。図中のA スコープにおいて、表面波の透過パルスの前に(表面波より音速が速い位置に)パルス高さは低い透過パルスが確認できる。図-2.4 に示すように、2つの探触子を対向させ透過法により被調査物の疑似表面SV波の透過パルスを調べることによって被調査物の超音波基本特性を調べることが可能となる。

2.3 臨界屈折角探傷法の適用方法に関する検討

2.3.1 検討項目

臨界屈折角探触子を用いた探傷法(以下、臨界屈折角探傷法)の当該き裂への適用にあたっては、特に以下の課題に着目し、適用方法を検討した。

- ① 塗膜上からの探傷における検出性能の向上
- ② き裂深さの推定精度の向上

上記課題の解決に向けて、次に示す検討を行った。

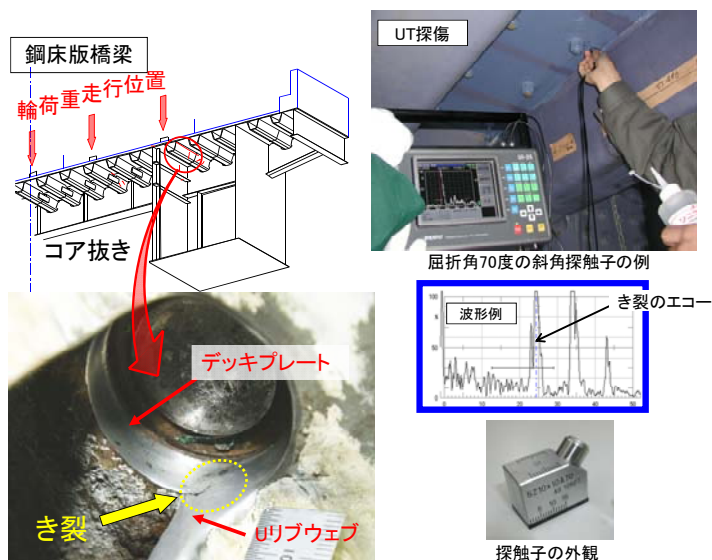


図-2.2 き裂の発生事例と手動による探傷例

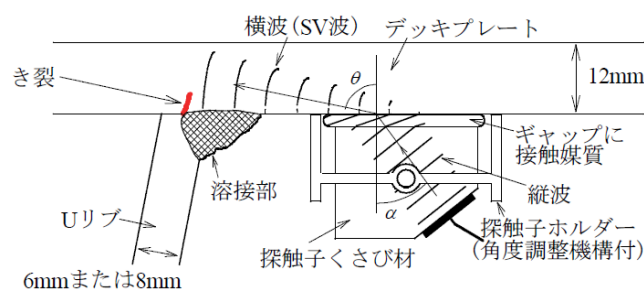


図-2.3 臨界屈折角探触子による探傷イメージ

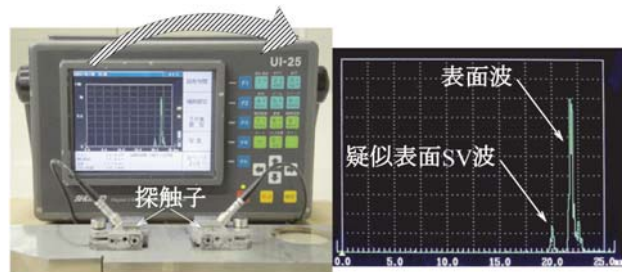


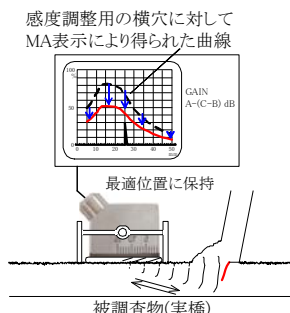
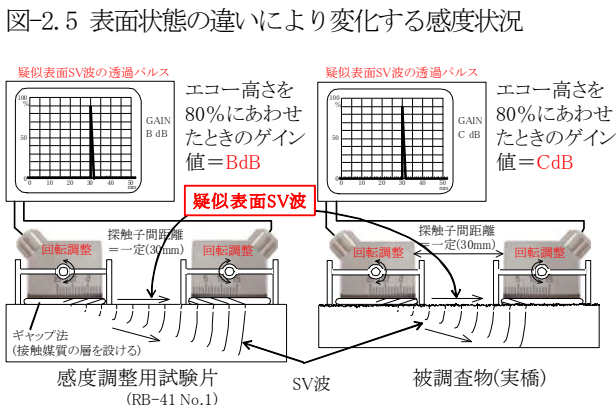
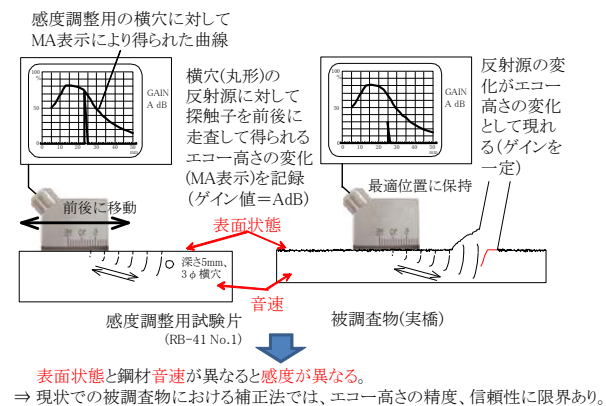
図-2.4 SV斜角探傷の透過法においてこの疑似表面SV波による透過パルスが得られる状況

- 1) 探傷面の状態(塗膜厚、鋼材の表面状態等)に対する感度補正方法の検討(2. 3. 2 参照)
 - 2) エコー高さとき裂深さの関係把握(2. 3. 3 参照)
- ### 2.3.2 探傷面の状態に対する感度補正方法の検討
- (1) 感度補正方法

感度補正方法として、探傷面の状態(塗膜厚、鋼材の表面状態等)がエコー高さに及ぼす影響を補正する方法を提案した。以下、感度補正方法の内容と手順を述べる。

1) 角度調整

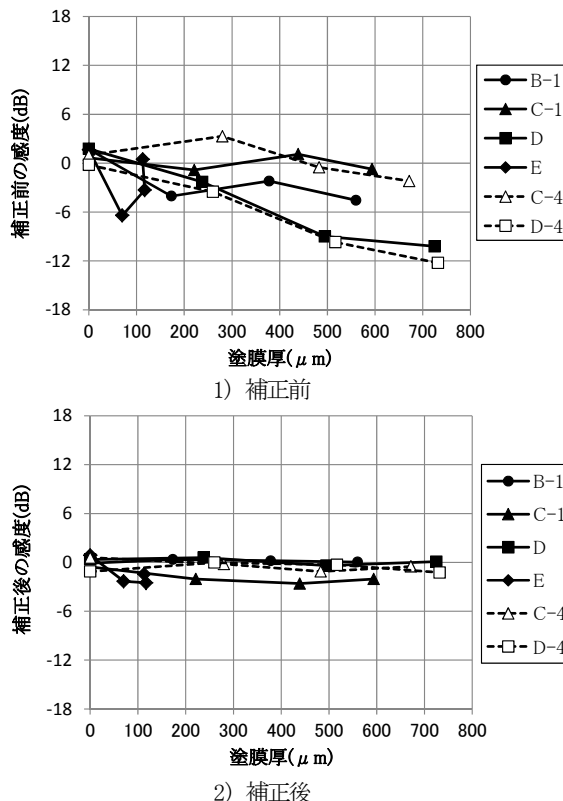
図-2.6 に示す角度調整機構付きの探触子ホルダと臨界屈折角探触子を組合せて、感度調整用試験片と被調査



物に用いて、それぞれの透過パルスのパルス高さが最大となるように送受信それぞれの探触子ホルダの角度調整を行うと、臨界屈折角探触子の入射角(屈折角)のバラツキの補正が可能となる。その結果、鋼材音速が異なる場合でも、屈折角を一定にすることができ、送信音場の音圧分布を一定にすることができる。また、鋼材表面に塗膜を有する場合や鋼材表面の粗度が異なる状態においても、同様に、送信音場の音圧分布を一定にすることが可能となる。

2) 感度補正 (感度調整)

感度調整用試験片と被調査物のそれぞれに対して、図-2.6に示すように角度調整を行った後、透過パルスのパルス高さの違いを計測することにより、感度調整用試



補正前の感度: 各種の塗膜種類および各種の塗膜厚(塗膜ふしを含む)を有する感度調整用試験片(RB-41 No.1)の深さ5mmの標準穴φ3mmのビーム路程27mmの位置でのエコー高さ(%)を、塗膜ふしの場合のエコー高さ(%)を基準とした。
補正後の感度: 臨界屈折角の横波斜角探触子を用いて感度補正量を計測し、その補正量を「補正前の感度」に考慮したもの。

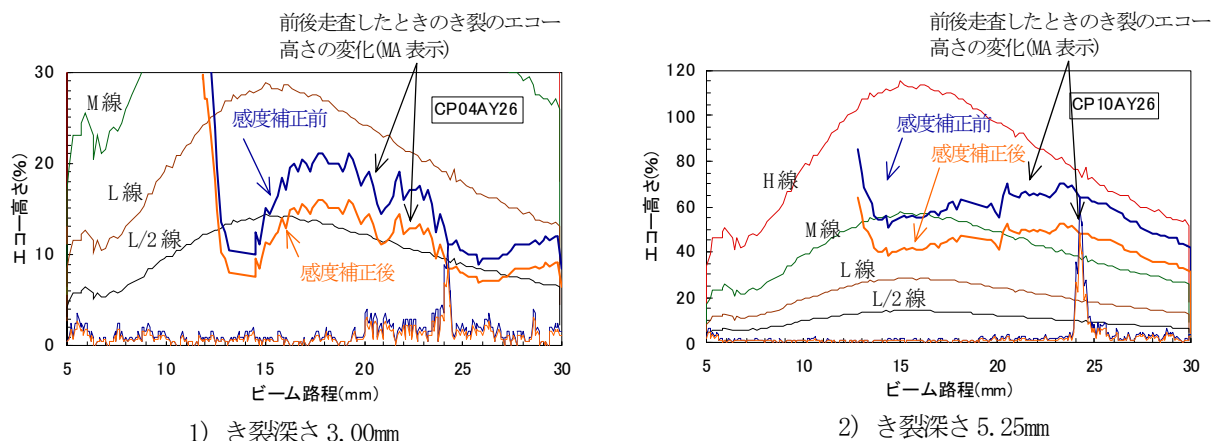
図-2.8 塗装の上からの探傷試験における塗膜厚と感度の関係

験片と被調査物の表面状態の違いによる感度差を補正できる (図-2.6 では感度補正量 (C-B) dB)。

一方、感度調整用試験片とデジタル超音波探傷器のMA表示機能を利用して、深さ5mmのφ3横穴に対し、同手法により得られる曲線(距離方位振幅特性曲線と呼ぶ)を作成する。この距離方位振幅特性曲線に対して、感度調整用試験片と被調査物の表面状態の感度差を考慮すれば(図-2.7参照)、この曲線に対するき裂の相対エコー高さを相対的に評価することにより、表面状態の違いを補正したき裂深さの評価ができる。

(2) 塗装試験体による感度調整方法の検証

塗装が探傷試験結果に及ぼす影響について、すなわち、塗装の塗膜厚や塗装の種類の違い(表面状態の違い)による感度差について、塗装試験体を用いて検討した結果を示す。図-2.8に感度補正を実施した前後の感度と塗装試験体の塗膜厚との関係を塗装の種類別に示す。塗装の種類としては、既設鋼床版に使用されている塗装系として、文献2)のB-1系、C-1系、E系、D系の4種類と、



図中にはき裂と探触子との距離を変化させたときのき裂のエコー高さの変化(MA表示)について、感度補正前と感度補正後の場合の2種類を示す。また、探触子の位置Y=19mmのときのき裂のAスコープを示す。図中のH線、M線、L線、L/2線は距離角度振幅特性曲線であり、H線は感度調整用試験片(RB-41 No.1)の深さ5mmの標準穴φ3mmに対し、前後走査したときのエコー高さの変化(MA表示)を示した。M線、L線、L/2線は、それぞれH線を-6dB(1/2倍)、-12dB(1/4倍)、-18dB(1/8倍)したものである。

図-2.9 定点载荷によりき裂を導入した小型試験片の探傷結果の例

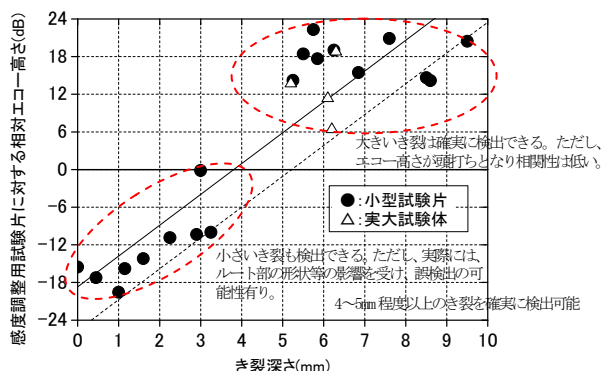


図-2.10 探触子前面とき裂との水平距離が27mmのときの感度調整用試験片に対する相対エコー高さとき裂深さの関係

新設鋼床版に使用されている塗装系として、文献 3)のC-4系、D-4系の2種類の計6種類の塗装系について、塗膜厚を通常の仕様の約1倍、2倍、3倍に変化させた試験体を製作した。図より感度の補正をせずに塗装の上から探傷した場合には、+3~-12dB程度の感度のばらつきが生じる結果が得られた。一方、同手法による表面状態の感度補正を考慮すれば+1~-3dB程度以下に塗装による表面状態の違いに伴う感度のばらつきが低減していることがわかる。

2.3.3 エコー高さとき裂深さの関係把握

疲労試験を実施して実き裂に近いき裂を有する試験体19体を対象として、き裂と探触子との距離を変化させたときのき裂のエコー高さの変化に着目し、探傷試験を実施した。図-2.9に、き裂の深さが3mmと5.25mmの2ケースについて、き裂と探触子との距離を変化させたときのエコー高さの変化を示す。表面状態の感度補正前と補正後のエコー高さを比較すると、約3dB(約1.4倍)の変化があることがわかる。図-2.10に、探触子前から亀

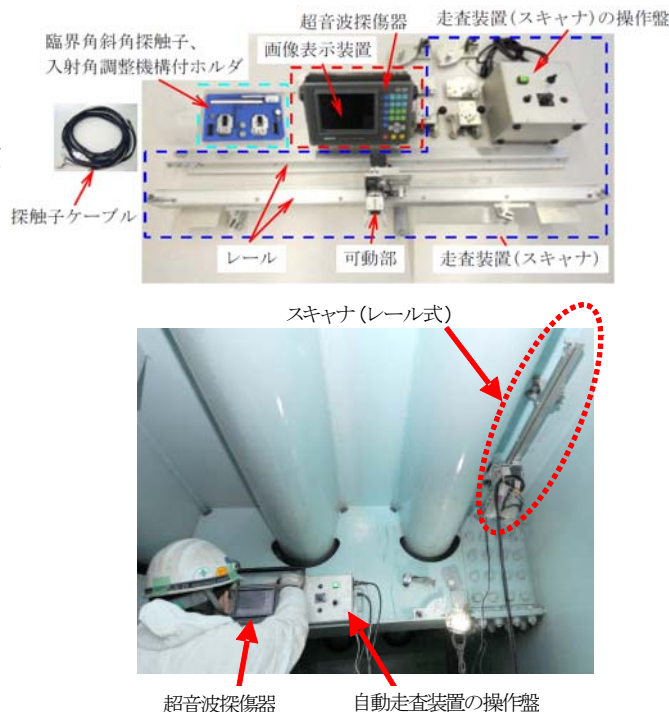


写真-2.1 超音波探傷装置の構成の例と現場での適用状況

裂までの距離を27mmとした場合の、き裂深さとエコー高さの関係を示す。き裂深さが小さい場合にはエコー高さとき裂深さが概ね比例関係にあり、き裂深さを概略推定が可能であることがわかる。

以上の検討を踏まえ、鋼床版デッキプレート進展き裂の調査のための超音波探傷マニュアル(案)⁴⁾を作成した。写真-2.1に臨界屈折角探触子や角調整機構付き探触子ホルダなどの開発した探傷装置と、現場での適用状況を示す。

3. コンクリート等埋込部の鋼材に生じる腐食欠損を対象とした調査技術の検討

コンクリート等埋込部の鋼材に生じる腐食欠損を対象として、他分野を含めた既往の調査技術のレビューを行い、適用性の期待される技術（各種波による超音波探傷法）について整理を行った。また、鋼部材内に伝搬する超音波の伝搬数値シミュレーションを行い、欠損部からの反射波の伝搬挙動の観点から各技術の適用性を整理し、実用化の可能性のある技術の提案を行った。

3.1 既往の調査技術

調査対象技術の条件として、土中（道路標識柱など）もしくはコンクリート中に埋込まれた鋼材（床版に埋込まれた主構部材）の腐食欠損（写真-3.1 参照）を計測するための非破壊技術とし、検知するためのセンサは腐食欠損の生じている埋込部より少し離れた位置に配置することを想定し、腐食欠損は目視困難な埋込部中に生じていることとした。調査方法は、インターネット上の各種文献データベースよりキーワードにより検索する方法とした。対象とした分野は、鉄道橋、石油・化学プラント、発電プラント、石油精製、電力鉄塔、照明柱（標識柱、信号柱）、海洋構造物、港湾構造物である。

表-3.1 に調査結果（文献5）～12）により分類整理した技術の一覧を示す。表面SH波を用いた技術では、必ずしも腐食欠損の検出率が高くないという課題があるとしている。また、板波を用いた技術では、速度の分散性により扱う波形が多いことと、埋込部において周囲のコンクリート等の周囲材料への散乱が著しくなる懸念があるとしている。また、SH板波については、モード変換がほとんど生じず、埋込部においてコンクリート等の周囲材料への散乱も少ないと考えられる。配管に用いられている全周および軸方向に複数のセンサを使用する方法では、装置にかかる費用の面の課題があるとしている。

3.2 各超音波の伝搬数値シミュレーションによる適用性の検討

鋼部材内に伝搬する超音波の伝搬数値シミュレーション

ンを行い、欠損部からの反射波の伝搬挙動の観点から各技術の適用性を整理し、実用化検討を行う技術の抽出を行った。数値シミュレーションとしては、二次元弾性波時間領域差分法¹³⁾を用いた。

図-3.1 に数値シミュレーションにおいて対象とした埋込部を想定した鋼部材を示す。同図(a)のモデル1では腐食損傷は想定せずコンクリート等埋込部のみをモデル化し、同図(b)のモデル2では腐食欠損を模擬した三角溝を片面側に設けたモデルとした。

数値シミュレーションにおいて対象とした超音波の種類は、本研究で対象とするコンクリート中に埋め込まれた鋼部材の大きさやコストの点から、表-3.1 に示す既往の技術の調査結果のうち、センサの数が1～2個で適用可能な超音波の種類を選定し、表-3.2 に示す4種類とした。

図-3.2 にモデル1における縦波斜角、横波斜角、SV板波の3種類の超音波の伝搬状況を示す。同図(a)は、縦波がコンクリート埋込部へ入り込むところの伝搬状況であるが、鋼材の側面で縦波がほとんど反射せず、モード変換により横波の反射が確認される。このため、縦波は、側面で反射を繰り返す毎に減衰し消滅してしまうため、埋込部の調査技術への適用性は低いと考えられる。同図(b)は、横波がコンクリートとの境界面で反射および屈折している伝搬状況である。コンクリートとの境界面で、横波の反射が確認されるため、縦波と比べると、鋼材側面の反射による減衰は少ないと考えられる。また、横波が



写真-3.1 コンクリート中に埋め込まれた鋼材の腐食欠損の例（コンクリートの一部をはつた状況）

表-3.1 鋼部材の埋設部の腐食減肉状況の検知評価に適用可能な技術

対象施設	透過/反射	超音波の種類	特徴	センサ種類	センサの数	文献例
港湾構造物(鋼矢板岸壁)	反射法	表面SH波	超音波センサの受受信面積を大きくして利用	圧電素子	1個	5)
原子力発電所(原子炉格納容器鋼板)		板波	周波数と次数により速度が異なることを利用	電磁超音波	3個	6)
配管 (発電・化学・ガスプラント)		縦波	センサの多段化、エコーの平均化処理を利用		1個	7)
		ねじり波			全周(多数)、 軸方向複数	8)
	曲げ波	9)				
透過法	板波	周波数と次数により速度が異なることを利用	圧電素子	2個	11)	
	SH板波		電磁超音波		12)	

コンクリート中に透過しており、コンクリート境界面で反射を繰り返す毎に一部はコンクリート中に透過するため、鋼材中を伝搬する横波はいずれ減衰し消滅してしまうことから、埋込部の調査技術への適用性は低いと考えられる。同図(c)は、SV板波の伝搬状況であるが、縦波斜角、横波斜角と比べて、鋼材側面での反射による減衰はほとんど認められないが、コンクリート境界部では、コンクリート中に板波に起因する横波が伝搬している。SV板波は、縦波斜角、横波斜角と比べて、埋込部の調査技術への適用性は高いと考えられる。

図-3.3にモデル2におけるSV板波、SH板波の2種類の超音波の伝搬状況を示す。同図(a)は、SV板波が腐食欠損を模擬した三角溝に対して、反射および透過している状況を示している。同図より、SV板波が三角溝に到達した後、ほとんどの超音波の波動は、三角溝を透過して伝搬しており、三角溝で反射する波動成分はほとんど確認できないくらい弱いものとなっている。よって、SV板波は、腐食欠損の調査技術への適用性は低いと考えられる。同図(b)は、SH板波が腐食欠損を模擬した三角溝に対して、遮断周波数に対して、反射したときの超音波の振幅を示している。SH板波は、三角溝に対して反射する特徴を有していることが確認できたため、腐食欠損の調査技術への適用性は高いと考えられる。

3.3 SH板波の伝搬数値シミュレーションによる適用性の検討

3.3.1 SH板波の次数と埋込深さに関する検討

鋼部材内に伝搬する超音波の種類のうちSH板波に着目し、腐食欠損部からのSH板波の反射波の伝搬挙動の観点から、1)SH板波の次数(1~4次の4ケース)、2)腐食欠損部の埋込深さ(50, 100, 150, 200mmの4ケース)をパラメータとした伝搬数値シミュレーションを行い、それぞれのパラメータの適用範囲を明らかにする等、遮断周波数を利用したSH板波の適用性の検討を行った。以下では、SH板波の次数に着目して実施した検討結果を示す。

(1) 対象モデル

図-3.4に数値シミュレーションにおける対象モデルを示す。対象モデルは、コンクリート埋込部に腐食を模擬した三角溝を有する鋼部材とした。健全部の鋼板の板厚を4.5mmとし、コンクリート中の鋼板には腐食欠損を模擬した三角溝(鋼板の軸方向の長さ40mm、最深部の欠損量2mmとした三角溝)を片面側に設けた。三角溝として模擬した欠損部の中身は、空気を想定した。図中にSH板波を送受信させるためのSH波探触子の配置位置を示す。SH波探触子は、腐食欠損を模擬した側の非埋込部の

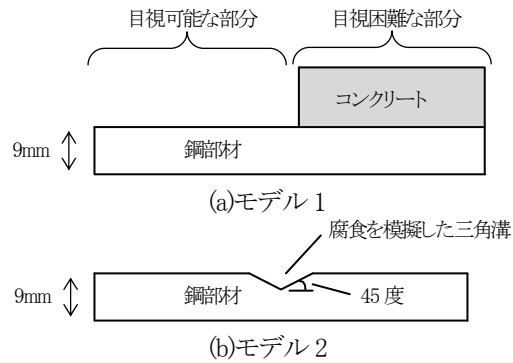


図-3.1 数値シミュレーションにおける対象モデル

表-3.2 数値シミュレーションにおいて対象とした超音波の種類

超音波の種類	屈折角
縦波斜角	70度
横波斜角(SV波斜角)	70度
SV板波	90度
SH板波	90度

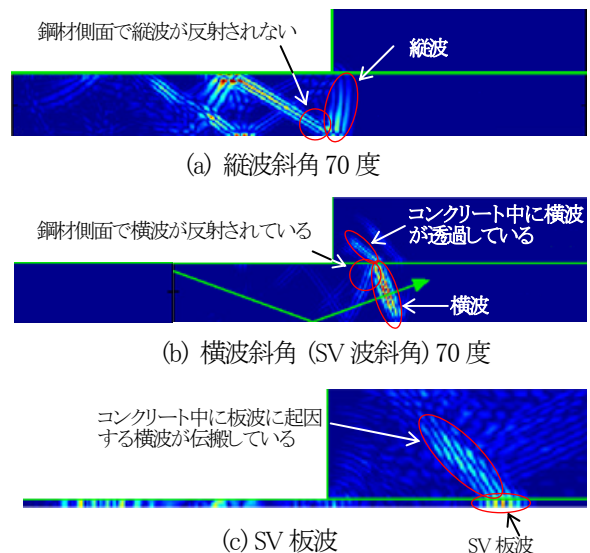


図-3.2 モデル1における超音波の各種類の伝搬状況

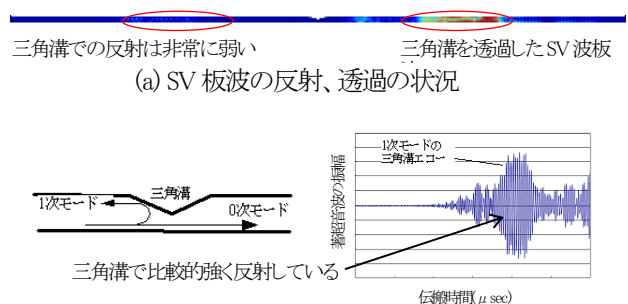


図-3.3 モデル2における超音波の各種類の伝搬状況

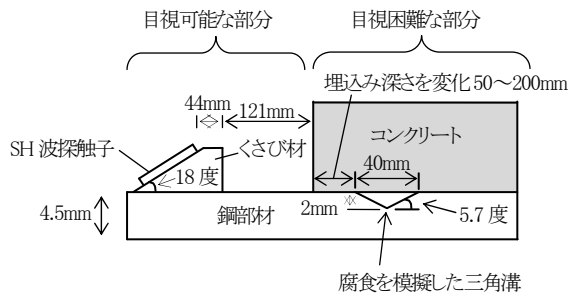
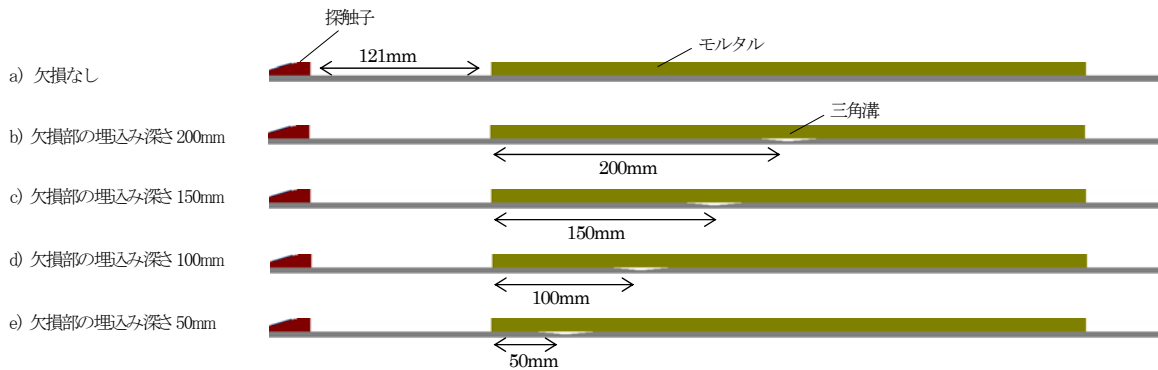


図-3.4 数値シミュレーションにおける対象モデル

表-3.3 数値シミュレーションにおいて対象とした SH 板波の次数の種類(4種類)

SH波の周波数	SH板波の次数	健全部のSH板波の遮断周波数	欠損部のSH板波の遮断周波数
0.5	1	0.35	0.50
1.0	2	0.70	1.0
1.5	3	1.1	1.5
2.0	4	1.4	2.0

注) それぞれのSH板波の次数に対して、腐食を模擬した三角溝の埋込み深さとして、50,100,150,200mmの4種類(欠損なしを含めると5種類)を対象とした(図-3.5参照)。



注) 表-2.1 に示す SH 板波の次数に対して、腐食を模擬した三角溝の埋込み深さとして、50,100,150,200mmの4種類(欠損なしを含めると5種類)を対象とした。

図-3.5 数値シミュレーションにおいて対象とした腐食を模擬した三角溝の埋込み深さの種類(50,100,150,200mmの4種類(欠損なしを含めると5種類))

鋼板表面に配置させた。

(2) 検討方法

SH板波の次数として、鋼板の腐食減肉の調査に適した次数を明らかにするために、コンクリート埋込部の腐食欠損をモデル化し、鋼板内に伝搬するSH板波の伝搬数値シミュレーションを行った。数値シミュレーションとしては、二次元弾性波時間領域差分法¹³⁾を用いた。SH波探触子の入射角は、鋼板のSH板波を効率よく生成させるため、スネルの法則により横波臨界屈折角となるように18度とした。その入射角を決める際に、1~4次の次数のSH板波を利用すること(後述)を視野に入れて、SH板波の位相速度を4,669m/secと仮定し、探触子のくさび材として横波音速1,430m/sec、密度1,180kg/m³のアクリル材を想定した。また、鋼部材とコンクリートとの境界部は音響的に一体化しているものと仮定した。コンクリート(モルタル)の横波音速は1,900m/sec、密度は1,872kg/m³とし、コンクリートの大きさは反無限を想定し、鋼材と反対側の境界は吸収境界を仮定した。

表-3.3に数値シミュレーションにおいて対象としたSH板波の次数の種類(1~4次の4種類)を示す。図-3.5に同時に欠損部の埋込み深さに対する適用性を確認するために、それぞれのSH板波の次数に対して、腐食欠損を模擬した三角溝の埋込み深さとして50~200mm、50mmピ

ッチの4種類(欠損なしを含めると5種類)を対象とした各対象モデルを示す。表-3.3と図-3.5に示す種類を合わせて、計20ケースの数値シミュレーションを実施した。表中に示したSH板波の次数に対応させたSH波の送信周波数は、仮定したSH板波の位相速度4,669m/secを考慮し、理論的にSH板波が欠損部で通過できない条件となるように、それぞれのSH板波の次数に対応した欠損部の遮断周波数に一致させた送信条件として定めた。

図-3.6に数値シミュレーションに用いた探触子の応答特性のうち、SH板波の次数が1次(SH波の周波数が0.5MHz)の場合の例を示す。図に示す探触子の応答特性は、別の周波数の実際のSH波探触子の特性を相似させたものを用いた。

(3) 検討結果

図-3.7に数値シミュレーションの結果のうち、SH板波の次数が3次と4次(SH波の周波数が1.5MHzと2.0MHz)で、それぞれの周波数に対して埋込み深さが100mmと50mmのときの計4種類のAスコープ(縦軸がエコーの大きさ、横軸がエコーが得られるまでの経過時間を示した図)の例を示す。図より、SH板波の次数が3次と4次(SH波の周波数が1.5MHzと2.0MHz)のいずれの場合でも、埋込み深さ100mmの三角溝からのエコーは、コンクリート境界部からのエコー等にまぎれて不明瞭であることが

わかる。一方、埋込み深さ 50mm の三角溝からのエコーは、埋込み深さ 100mm の三角溝からのエコーと比べ、SH 板波の次数が 3 次と 4 次 (SH 波の周波数が 1.5MHz と 2.0MHz) のいずれの場合でも、コンクリート境界部からのエコーと区別でき明瞭であることがわかる。さらに、SH 板波の次数が 4 次 (SH 波の周波数が 2.0MHz) の場合の方が、SH 板波の次数が 3 次 (SH 波の周波数が 1.5MHz) と比べると、三角溝からのエコー以外のエコーレベルが低く、明瞭であることがわかる。図に示す以外の埋込み深さが 150mm、200mm のケースでは、三角溝からのエコーが弱く、コンクリート境界部からのエコーに埋もれて判別できなかった。また、SH 板波の次数が 1 次と 2 次 (SH 波の周波数が 0.5MHz と 1.0MHz) のケースでは、A スコープ上のエコーのうち、最も大きいエコーが三角溝からのエコーであったが、2 番目に大きいエコーがコンクリート境界部からのエコーであった。SH 板波は、速度分散性を有し複数の音速の波から構成されており波の音速は一定ではなく、従ってエコーが得られるまでの経過時間に波の音速を乗じて得られたエコーの検出位置を算出し推定することは

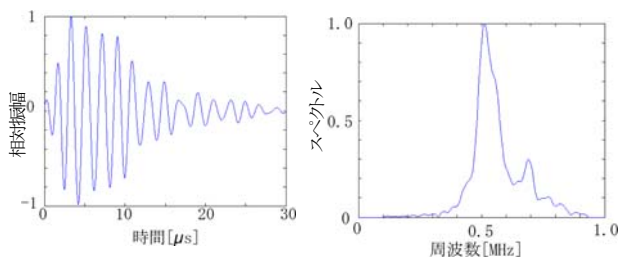
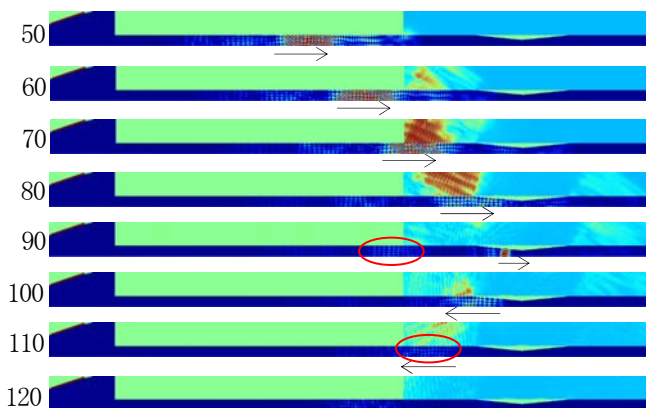


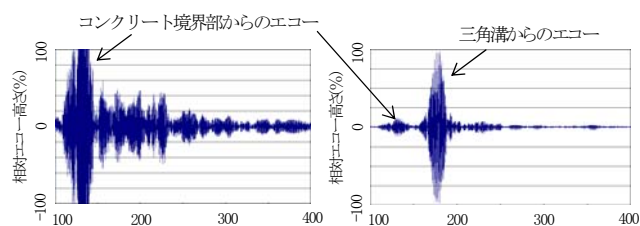
図-3.6 数値シミュレーションに用いた探触子の応答特性のうち、SH 板波の次数が 1 次 (SH 波の周波数が 0.5MHz) の場合の例



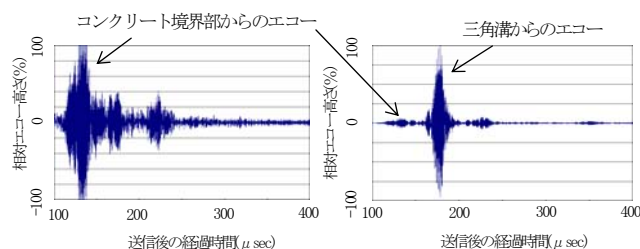
a) SH 板波の次数が 3 次 (SH 波の周波数が 1.5MHz)

できない。従ってエコーの大きさだけから反射源を特定しなければならないが、これらのケースでは三角溝からのエコーとコンクリート境界部からのエコーをその大きさだけから区別することは困難であった。

図-3.8 に、SH 板波の次数が 3 次と 4 次 (SH 波の周波数が 1.5MHz と 2.0MHz) で、埋込み深さが 50mm のときの計 2 種類の SH 板波の伝搬状況を示す。埋込み部中では、コンクリート中に SH 板波の波動の主要部分が伝搬し、鋼板中の SH 板波の波動は埋込み深さの影響を受けることがわかった。また、コンクリート境界部からのエコーが

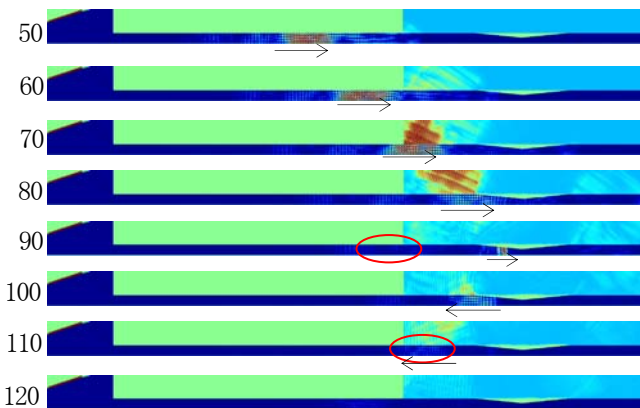


i) 埋込み部深さ 100mm ii) 埋込み部深さ 50mm
a) SH 板波の次数が 3 次 (SH 波の周波数が 1.5MHz)



i) 埋込み部深さ 100mm ii) 埋込み部深さ 50mm
b) SH 板波の次数が 4 次 (SH 波の周波数が 2.0MHz)

図-3.7 数値シミュレーション結果の A スコープ (縦軸がエコーの大きさ、横軸がエコーが得られるまでの経過時間を示した図) の例



b) SH 板波の次数が 4 次 (SH 波の周波数が 2.0MHz)

図中の数値は、送信後の経過時間(μ sec)を示している。上から下に向かって 10 μ sec 毎の伝搬状況を示している。

図-3.8 数値シミュレーション結果の伝搬状況の例 (埋込み深さが 50mm)

SH 板波の次数が 3 次 (SH 波の周波数が 1.5MHz) または 4 次 (SH 波の周波数が 2.0MHz) であれば、三角溝からのエコー以外のエコーレベルが低く、明瞭に三角溝からのエコーを区別可能であることがわかった。

3. 3. 2 遮断周波数を利用した SH 板波による腐食欠損検知の適用性の検討

腐食欠損部の検知と腐食欠損量を計測する方法として、遮断周波数を利用した SH 板波に着目し、伝搬数値シミュレーションを行い、適用性の検討を行った。SH 板波の周波数を SH アレイ探触子を用いて変化させて腐食部を伝搬させ、遮断周波数 f_c 前後での反射波の変化を捉え、その時の伝搬角度より残存板厚の定量的に計測するものである。

図-3.9 に腐食を模擬した三角溝に対する探傷イメージを示し、図-3.10 に伝搬数値シミュレーションの結果を示す。図-3.10(a)には、遮断周波数 f_c と等しくなった時の伝搬角度 θ よりも大きい周波数の波の伝搬状況を示し、図-3.10(b)には、遮断周波数 f_c と等しくなった時の伝搬角度 θ よりも小さい周波数の波の伝搬状況を示している。同図(a)では、多くの成分は腐食を模擬した三角溝を通過している様子を示しており、同図(b)では、多くの成分が腐食を模擬した三角溝を通過せずに反射される様子を示している。

以上の検討結果より、遮断周波数を利用した SH 板波を用いれば、コンクリート等埋込部の鋼材に生じる腐食欠損を検出できることを提案した。

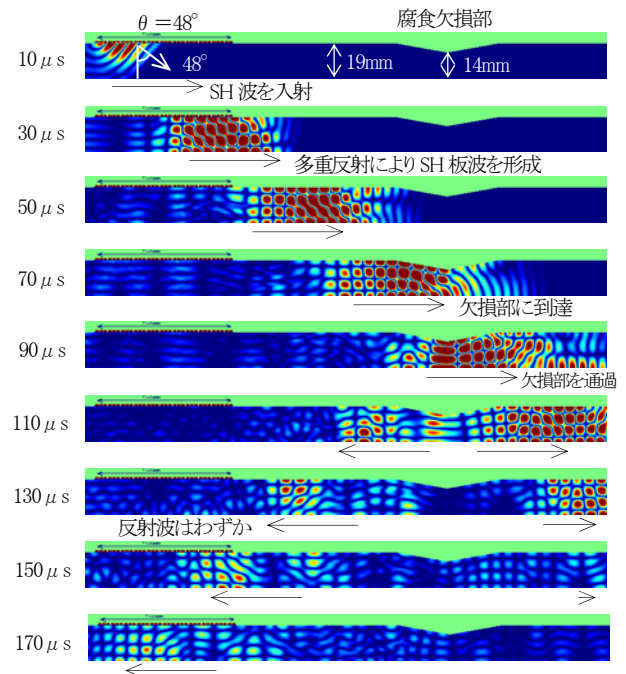
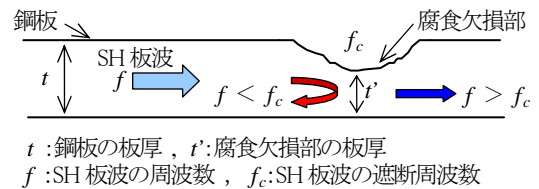
4. 状態監視技術に関する基礎的検討

本章では、研究の一環として状態監視技術を損傷橋に実際に適用することによって、道路橋の損傷発見後における対策実施までの状態監視技術に関しての技術面・運用面での課題・留意点等を検討した結果を述べる。

なお、損傷橋の状態監視技術の基礎的検討の実施にあたっては、管理者の協力を得て、2008 年末より変状モニタリングを琉球大学と共同で実施し、崩落過程に係る映像を含む計測情報を収集した。

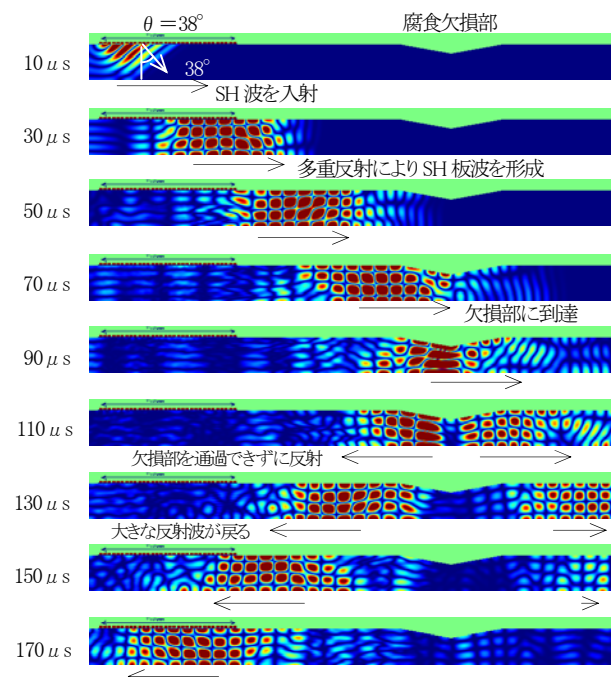
4. 1 橋梁概要

写真-4.1 に対象橋梁を示す。本橋は、橋長 35m の無塗装仕様の耐候性鋼を使用した道路橋 (鋼単純合成桁) であり、1981 年に建設されたものである。沖縄県北部に位置しており、厳しい腐食環境の下、著しい腐食劣化 (写真-4.2) が生じたため、2004 年に全面通行止めとなり、その後、腐食劣化の進行により撤去直前の 2009 年 7 月に崩落に至ったものである。



※ コンターの濃淡は、波動伝搬の挙動を視覚的に示したもので

(a) SH 波(3 次モード)の角度 = 48° (周波数 0.382MHz)



(b) SH 波(3 次モード)の角度 = 38° (周波数 0.324MHz)

図-3.10 鋼板中の腐食欠損への SH 板波の伝搬数値シミュレーション



写真-4.1 腐食劣化の生じた橋の全景(2007年7月)

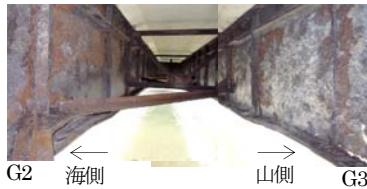


写真-4.2 主桁内面の著しい腐食状況

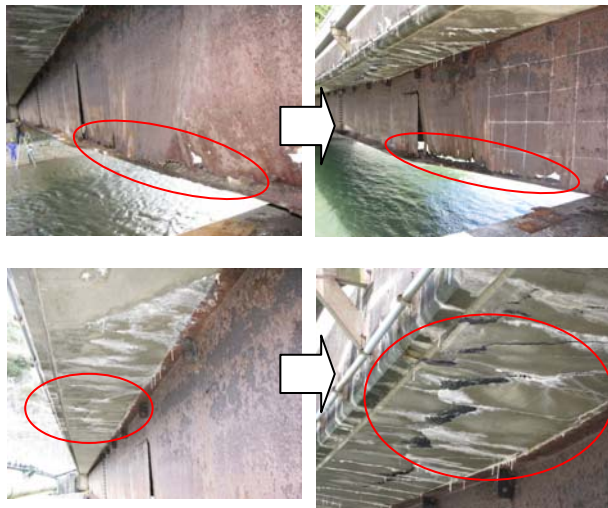
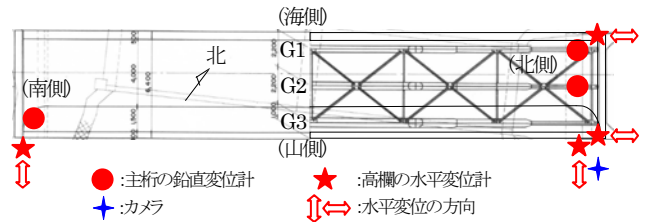


写真-4.3 集中豪雨の際の主桁および床版の変状進行状況(G3主桁)

崩落に至るまでの経過については次のとおりである。2004年11月に著しい腐食劣化により構造安全性への影響が懸念されたため全面通行止めの措置がとられた。その後の調査においても、腐食劣化が進行し、2008年8月には現地周辺で発生した震度4の地震によって、主桁ウェブの面外変形の増加が見られた。また、RC床版のひび割れも確認され、舗装面上の水溜りの状態や高欄の曲がりなどから、橋全体が山側へ傾き始めていることも確認された。その調査結果を踏まえ、管理者により周辺住民に対する橋周辺の立入り禁止の周知徹底等の安全対策、崩落時の対応や撤去に向けた準備が進められた。

上記と並行して、2008年12月より、変状モニタリング(変位、加速度、ひずみ計測)を琉球大学と共同で開始した。2009年5月には遠隔監視ウェブカメラによる24



a) 変位計測 b) カメラ画像計測

図-4.1 変位、カメラ画像の計測状況



a) 加速度計測 b) 風向風速計測

図-4.2 加速度、風向風速の計測状況



写真-4.4 崩落の瞬間のカメラ画像

時間画像計測を開始した。その後、2009年6月の集中豪雨の際に、鋼桁と床版に著しい変状進展が確認されたため、早期の撤去工事の準備が進められているところ、2009年7月15日に崩落に至った。

4.2 変状モニタリング

4.2.1 目的

本橋の場合、既に主桁に著しい腐食劣化が見られていたことから、地震、強風、隣接する国道を通過する大型車による振動等の外力により、撤去前に崩壊することも想定された。このため、撤去前に、腐食劣化に伴う変状進行過程の記録と既存計測技術を活用したモニタリングの試行（適用性と課題抽出）を目的として短期計測を行ったものである。ただし、崩壊時に河道を塞ぐおそれや、隣接する水管橋への影響も懸念されたため、実施にあたっては、管理者と連携の上、管理者側にも現地画像を配信し、3者でのリアルタイムでの現状監視を行った。

4.2.2 計測項目・方法

図-4.1, 4.2に計測に用いた装置の設置箇所を示す計測項目は、外力と変状を把握するために、カメラ画像、加速度、変位、風向風速とした。

リアルタイムに変状を把握するため、本橋に隣接する屋内施設に計測装置を設置し、ISDN回線(最大通信速度128kbps)を引いてインターネットに常時接続し、監視カメラ映像(簡易映像)をLAN配信した。また、現地のパソコンにリモート接続し、各種の動的計測値の記録状況を確認できるようにした。

監視カメラには、全天候型の遠隔監視ウェブカメラを使用し、インターネット接続により遠隔操作(上下左右、ズーム)を可能とした。計測間隔は、監視カメラでは6コマ/秒、他の計測項目では20Hzとした。なお、同地区にはISDN回線しかなく通信速度が遅いため、現地に設置したパソコンに記録されている全データのネットワーク転送が困難であった。このため、各種センサや記録装置の状態の確認・保守と合わせて、毎月1度程度の頻度で現地へ行き、記録データの回収を行った。

従って、遠隔では計測および記録が正常に行われていることを確認することとした。例えば、監視カメラ画像については1分間に2枚程度の静止画を確認する程度が限界であった。なお、ここではカメラ画像によるモニタリングのみ概説する。

4.2.3 変状モニタリングで捉えた崩落の前兆と崩落の状況

モニタリング開始以降、2009年6月24日に沖縄県北部に集中豪雨があり、その前後に監視カメラにより主桁

の面外変形の増加とRC床版のひび割れ進展などの変状を確認した。

写真-4.3に変状前後の現地調査における主桁及び床版の状況を比較して示すが、桁端部の変形等の進行が確認できる。この変状を受けて、管理者により緊急撤去の準備及び周辺住民への再度の注意喚起が行われた。結果的に撤去前に崩落したが、安全対策の徹底がなされ、崩落後も1日で河川内の橋を撤去できた点については実務面でのモニタリング活用の成果であったといえる。

写真-4.4に、崩落の瞬間の画像の一部を示す。崩落の起点は山側のG3主桁南側橋台の桁端部(写真の主桁奥側)であった。前述のとおり、同部位及び隣接するG2主桁には、破断等の著しい腐食劣化が発生しており、同部位の破壊の進行により崩落したものと考えられる。

5. まとめ

道路橋における目視困難な重要構造部位の損傷として、維持管理の課題・ニーズを踏まえたうえで、1)鋼床版デッキプレート進展き裂、2)コンクリート等埋込部の鋼材に生じる腐食欠損の2種類を対象とし、非破壊調査技術の適用性、適用方法に関する検討を行った。また、3)道路橋の損傷発見後における、対策実施までの状態監視技術の基礎的検討を行った。

以下に主な結果をまとめる。

(1) 実用化に向けた各種の性能確認試験や装置改良を実施し、鋼床版デッキプレート進展き裂を対象とした臨界屈折角探傷法を提案し、マニュアル案を作成した。

(2) 腐食欠損を有する鋼部材内に伝搬する各種の超音波の伝搬数値シミュレーションによる検討を実施し、コンクリート等埋込部の鋼材に生じる腐食欠損を対象としたSH板波の遮断周波数を利用した超音波探傷法を提案した。

(3) 腐食劣化の生じた鋼橋の変状モニタリングを実施し、管理者と連携の上、現況把握・対処の判断に活用するとともに、崩落過程の貴重な情報を取得した。また、対策実施までの状態監視における計測機器の選定や機器設置・計測方法等に係る技術面・運用面での課題・留意点を整理した。

参考文献

- 1) 村越潤、梁取直樹、宇井崇：鋼床版の疲労損傷と補修・補強技術に関する検討、鋼構造と橋に関するシンポジウム、(社)土木学会、鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集、第10回、鋼床版の疲労損傷とその対策一、pp. 19-37、2007

年8月

- 2) (社)日本道路協会：鋼道路橋塗装便覧、昭和54年2月
- 3) (社)日本道路協会：鋼道路橋塗装便覧、平成2年6月
- 4) 村越潤、木村嘉富、高橋実：鋼床版デッキプレート進展き裂の調査のための超音波探傷マニュアル(案)、土木研究所資料、第4138号、平成21年3月
- 5) 浅沼陽介、長瀬禎、鈴木慶律：鋼矢板式岸壁点検装置の開発について、国土交通省北海道開発局、技術研究発表会、第51回、技-07、平成20年2月
- 6) 石田仁志：大型探触子超音波探傷法によるコンクリートで覆われた原子炉格納容器鋼板の腐食測定技術の開発(第2報)、原子力安全システム研究所、INSS JOURNAL、pp. 271-279、2005年12月
- 7) 山崎友裕、河部大輔、大谷俊博、平尾雅彦：電磁超音波センサを用いた最適波形法による鋼管の減肉検査、日本機械学会論文集、A編、67巻659号、論文No. 00-1144、pp. 1255-1260、2001年7月
- 8) 山崎友裕、河部大輔、大谷俊博、平尾雅彦：電磁超音波センサによる縦波を用いた銅パイプの探傷、日本機械学会論文集、A編、70巻690号、論文No. 03-0508、pp. 238-245、2004年2月
- 9) 山崎友裕、河部大輔、大谷俊博、平尾雅彦：ねじり波用電磁超音波センサによる銅パイプの深傷、(社)日本非破壊検査協会、非破壊検査、第52巻、2号、pp. 89-94、2003年2月
- 10) 卯西裕之、平林清照、土屋憲一郎、大谷靖弘：ガイド波を用いた配管腐食検査技術の検討、(社)日本非破壊検査協会超音波分科会、超音波による非破壊評価シンポジウム、第9回、7-2、pp. 109-112、平成14年1月
- 11) 平塚隆明、渡辺徳明、菅利之：機器及び配管技術の腐食検査技術の開発、(財)石油産業活性化センター、第20回技術開発研究成果発表、[R4. 1. 2]、平成18年6月
- 12) 中村暢伴、Silvina URIBE、荻博次、平尾雅彦：電磁超音波センサによるSH板波のモード変換を利用したパイプの減肉検査、非破壊検査、第58巻、10号、2009年10月
- 13) 木村友則、三須幸一郎、和高修三、小池光裕：弾性波FDTD法による音場シミュレーションの超音波斜角探傷への適用、信学技報、US2005-124、2006.
- 14) 下里哲弘、村越潤、玉城喜章、高橋実：腐食劣化により崩落に至った鋼橋の変状モニタリング、(財)土木研究センター、土木技術資料、第53巻第2号、pp. 14-17、平成23年1月

RESEARCH ON INSPECTION TECHNOLOGY FOR INVISIBLE PARTS OF CRITICAL STRUCTURAL COMPONENTS IN HIGHWAY BRIDGES

Budgeted : Grants for operating expenses
General account

Research Period : FY2009-2012

Research Team : Bridges and Structures
Research Group

Author : Yoshitomi KIMURA

Jun MURAKOSHI

Taku HANAI

Minoru TAKAHASHI

Abstract : With recent increase of aged and deteriorated highway bridges, it is needed to establish rational and efficient inspection/investigation techniques for preventing highway bridges from fatal damage. In this research, inspection/investigation techniques for invisible parts of critical structural components in highway bridges are investigated in order to put them into practice. Ultrasonic testing methods are proposed for detecting fatigue crack of weld root at deckplate-rib connection in orthotropic steel decks, and measuring section loss due to corrosion at invisible parts of critical structural components are focused. Also, structural health monitoring on a deteriorated steel bridge was conducted to clarify technical and practical issues.

Key words : nondestructive inspection, invisible part, orthotropic steel decks, corrosion embedded to concrete, structural health monitoring