

## 道路土工と舗装の一体型設計に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）  
 研究期間：平 26～平 28  
 担当チーム：地質・地盤研究グループ（施工技術）  
 技術推進本部（先端技術）  
 道路技術研究グループ（舗装）  
 寒地基礎技術研究グループ（寒地地盤）  
 研究担当者：宮武裕昭、近藤益央  
 藤野健一、橋本 毅、田中洋一、山田 充  
 藪 雅行、寺田 剛、岩永真和  
 林 憲裕、佐藤厚子、久慈直之

### 【要旨】

道路土工と舗装は独立した設計体系に基づき設計されている。道路土工と舗装を一体として設計することにより、より合理的かつ経済的な設計及び耐久性の向上が期待できるため、コスト縮減及び長寿命化に繋がる。本研究では、道路土工と舗装の一体型設計することにより、道路土工と舗装一体で道路の交通性能を確保し、合理的かつ効果的な設計法と一体型性能評価手法、さらに道路土工から路盤までの品質管理手法の提案及び情報化施工の活用方法とそれによる品質確保等の評価手法の提案を目的とする。

キーワード：道路土工、舗装、一体型設計、性能評価、品質管理

### 1. はじめに

道路土工と舗装は独立した設計体系に基づき設計されている。道路土工と舗装を一体として設計することにより、より合理的かつ経済的な設計及び耐久性の向上が期待できるため、コスト縮減及び長寿命化に繋がる。

これは、路盤・路床は、施工によるばらつきがあるため、従来は道路土工の CBR 評価により舗装は安全側の設計・施工を行っている。道路土工と舗装を一体で設計することにより、道路土工から路盤まで一連の設計・施工・品質管理が可能となり、舗装の薄層化や断面の合理化によりコスト縮減及び長寿命化に繋がる。近年は情報化施工も導入されており、一体型設計の前提となる精密な施工も可能となっており、その効果を高めることが期待される。このためには、従来の道路土工を評価する CBR 試験の代替評価試験と情報化施工の効果的な活用方法と品質確保等の評価が必要である。

道路に求められる要求性能を交通量や重要度に応じて明らかにし、重要度の低い道路の場合は要求性能を下げても、交通性能確保は可能であると考えている。

本研究では、道路土工と舗装を一体として設計することにより、道路土工と舗装一体で道路の交通性能を確保し、合理的かつ効果的な設計法と一体型性能評価手法、さらに道路土工から路盤までの品質管理手法の提案及び情報化

施工の活用方法とそれによる品質確保等の評価手法の提案を目的として実施した。

### 2. 道路土工と舗装の一体型設計手法の提案に向けた事例収集および検証実験

#### 2.1 舗装損傷に関する事例の収集

関東地方整備局管内 109,583 区間の舗装工事履歴を用いて、舗装が施された年月日から各補修工事の施工間隔を抽出し、補修理由、補修工法、使用材料毎に補修履歴間隔（年月）を整理した。

##### 2.1.1 舗装材料毎の補修履歴間隔の整理

舗装材料別の補修間隔を図-2.1～図-2.3 に示す。舗装材料別の補修間隔をみると、アスファルト舗装では改質 H 型を用いた舗装の場合、補修間隔 10 年でピーク値を示すが、改質 II 型の場合には補修間隔 4～12 年程度に多く分布し、顕著なピーク値はみられなかった。

また、ポラスアスファルト舗装では、改質 H 型を用いた舗装は補修間隔 4～16 年程度に多く分布がみられ、補修間隔 10 年でピーク値を示すが、その他改質アスファルトを用いた舗装は、補修間隔 3 年～13 年程度に多く分布し、顕著なピーク値はみられなかった。

##### 2.1.2 補修工法毎の補修間隔の整理

補修工法毎の補修間隔の内訳を図-2.4 に示すとおりで

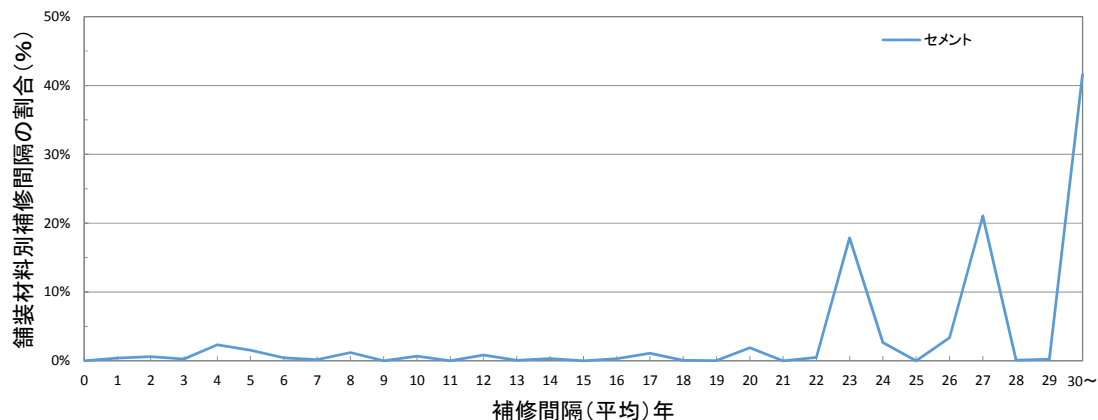


図-2.1 コンクリート舗装における材料別の補修間隔の分布

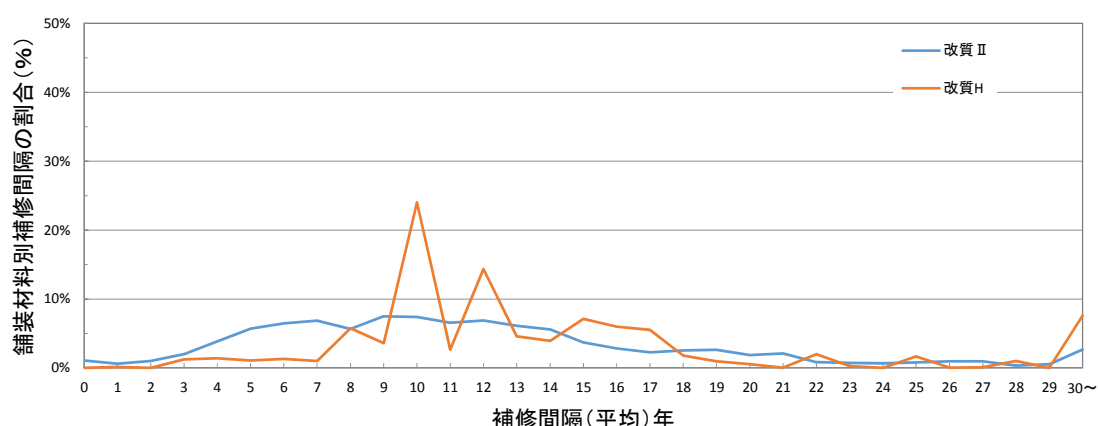


図-2.2 アスファルト舗装における材料別の補修間隔の分布

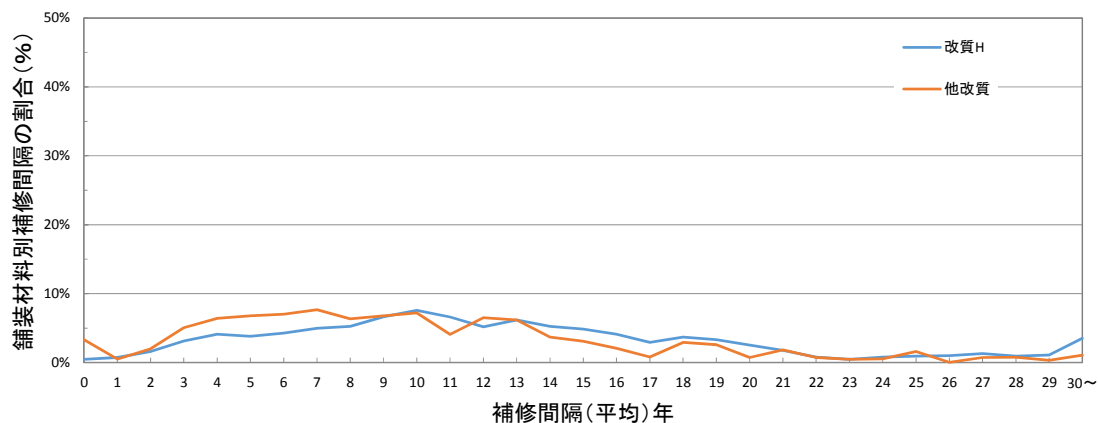


図-2.3 ポーラスアスファルト舗装における材料別の補修間隔の分布

あり、約6年～15年間隔で補修が行われている工法が多く見られる。

比較的短い間隔(10年以内)で補修が行われている割合が少ない補修工法は、路上路盤再生工法、切削薄層コンクリート舗装工法、切削表面処理工法、路上表層再生工法(リミックス)であり、安定して長期間舗装性能を保持することができるものと考えられる。

一方、若干ではあるが、比較的短い間隔(10年以内)で

補修が行われる割合が多い補修工法は、維持工事であるシーラ材注入工法・表面処理工法を除くと、その他の補修工法、切削オーバーレイ工法、局部打換え工法、わだち部オーバーレイ工法であった。

### 2.1.3 補修理由毎の整理

補修工事を行った理由について、補修年ごとの件数を整理した結果を図-2.5に示す。同図によれば、平成13年までの補修理由は、主に破損(その他)、その他の理由であっ

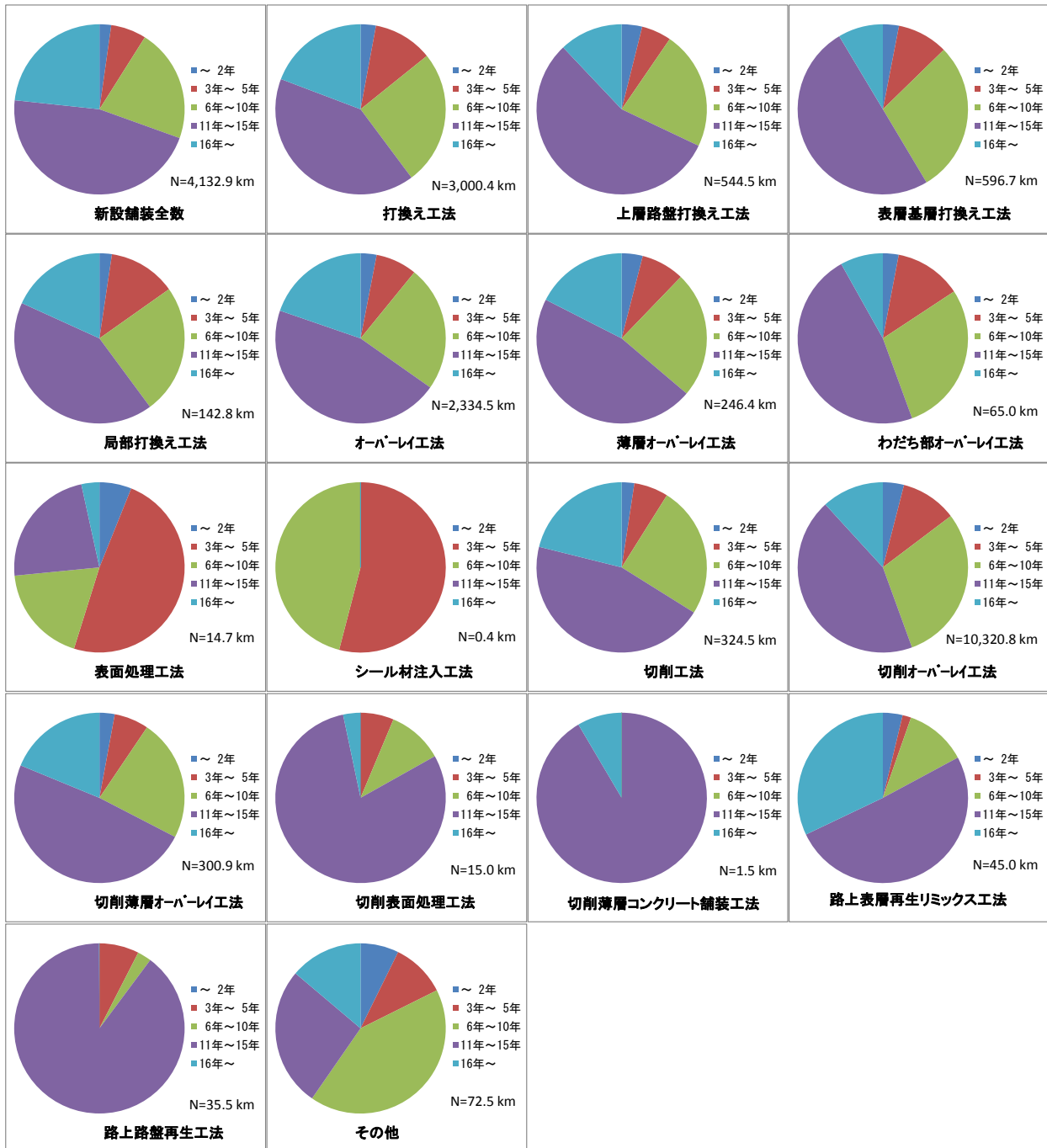


図-2.4 補修工法別の補修間隔内訳

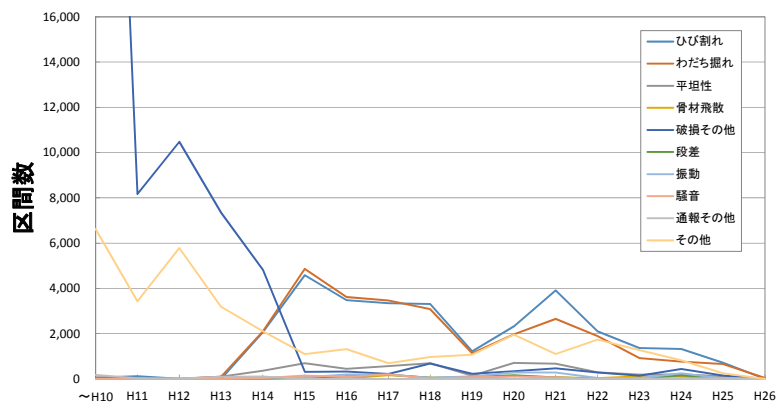


図-2.5 補修理由の推移

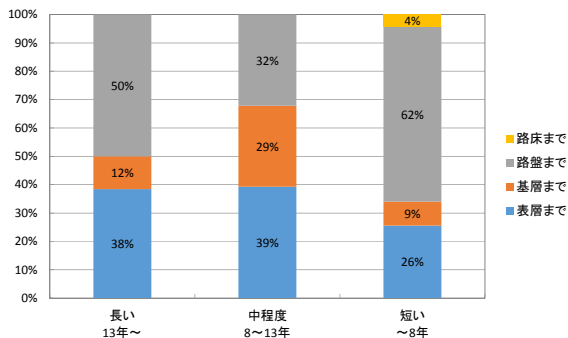


図-2.6 補修間隔と補修内容

たが、平成 14 年以降はひび割れやわだち掘れといった理由が増加し、破損（その他）やその他の理由が減少した。これは、平成 14 年以降に補修理由が整理されたためであると考えられる。平成 14 年以降の主な補修理由は、ひび割れやわだち掘れであり、ほぼ同様の推移を示している。

### 2.1.4 補修間隔と補修内容の整理

関東地方整備局管内の 2 つの出張所をピックアップし、道路工事台帳を基に補修間隔と補修内容について整理した。

図-2.6 に補修間隔と補修内容の調査結果を示す。一般的な補修間隔を 10 年と設定し、補修間隔が 13 年以上の区分、補修間隔が 8~13 年の区分、補修間隔が 8 年未満の区分を分類した。補修間隔が短い方が路盤や路床まで補修する割合が多いことが同図からわかった。

## 2.2 路床状態が舗装性能に及ぼす影響の確認

現在、一般的に実施されている路床の施工管理は、締固め度の管理で行われており、詳細な締固め状態を確認する場合は CBR 試験を実施することになっている。しかし、原位置での CBR 測定は反力の用意など測定が煩雑であることから、転圧回数による管理を行い現場密度試験により確認している。

そこで本検討は、路床の締固め状態がアスファルト舗装の性能に与える影響を確認するとともに、路床の締固め状態を適切に確認できる方法を検討することを目的に、輪荷重走行試験機を用いて路床、路盤、表基層を構築した供試体で耐久性試験を実施した。

輪荷重走行試験機を用いて供試体 3 ケースに対して輪荷重走行試験を行った。供試体 3 ケースの使用材料と厚さを表-2.1 に、実験模型（供試体）の形状を図-2.7 に示す。締固めは、写真-2.1~2.4 に示すように路床はタンパー、路盤はタンパー後にプレートコンパクター、表基層はプレートコンパクターで行った。本検討では試験方法の有効性を確認するため、CBR が 2.8 の粘性土と CBR が 28 前後の砂質土と極端な路床土を用いて試験した。

表-2.1 使用材料と厚さ

層	材料	CASE1	CASE2	CASE3
		材料	砂質土	粘性土 + 消石灰約 4%
路床	厚さ (cm)	30	30	30
下層路盤	材料	C-40		
	厚さ (cm)	19	19	19
上層路盤	材料	C-30		
	厚さ (cm)	15	15	20
基層	材料	密粒度 (13F) (ストアス80/100)		
	厚さ (cm)	5	5	0
表層	材料	密粒度 (13F) (ストアス80/100)		
	厚さ (cm)	5	5	5
合計厚さ (cm)		74	74	74
T <sub>A</sub> (cm)		20.0	20.0	16.8
地点の CBR		29.7	2.8	27.5

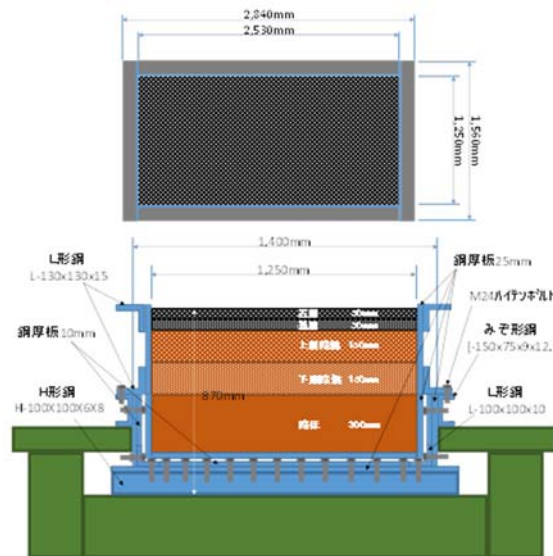


図-2.7 実験模型（供試体）の形状

### 2.2.1 輪荷重走行試験

路床、路盤、表基層を構築した後、輪荷重走行試験機を用いて耐久性試験を実施した。輪荷重走行試験は以下の条件で試験を行った。試験状況を写真-2.5 に示す。

- ・ ゴムタイヤ：複輪（大きさ：直径 1,051mm × 幅 277mm）
- ・ 走行速度：25 往復/分
- ・ 載荷荷重：98kN
- ・ 接地圧：0.78MPa
- ・ 繰返し載荷回数：舗装の沈下量が 30mm（載荷装置の下限リミット）になるまで

### 2.2.2 確認項目

- ① 舗装の破損を確認するため、計測 10,000 回毎にひび割れ量と表面凹凸（舗装の沈下量）をレーザー変位計を用いて 3 測線（供試体中央、端部から 1m）で測定した。
- ② 路床と路盤の施工時の締固め状態を確認するため、小型 FWD (FWD-Light)、簡易支持力測定器（キャスポル、NETIS 登録番号：KK-980055-VE）、衝撃加速度試験機（NETIS 登録番号：HK-130011-A）の 3 種類の試験機を用いて路床及び路盤の支持力を 3 測線（中央、端部から 1m）3 箇所測定した。小型 FWD、簡易支持力測定器及び衝撃加速度試験機



写真-2.1 路床の締固め状況 (タンパー)



写真-2.2 路盤の締固め状況 (タンパー)



写真-2.3 路盤の締固め状況 (プレート)



写真-2.4 表層の締固め状況 (プレート)



写真-2.5 試験状況



写真-2.6 測定状況 (左: 小型FWD、中央: キャスポル、右: 衝撃加速度試験機)

表-2.2 路床の密度と締固め度の測定結果

	CASE1	CASE2	CASE3
材料	砂質土	粘性土 + 消石灰約 4%	砂質土
厚さ (cm)	30	30	30
締固め度管理基準 (%)	95以上		
締固め度 (砂置換、%)	99.3	96.7	96.9
現場密度 (砂置換、 $g/cm^3$ )	1.831	1.044	1.787
地点のCBR	29.7	2.8	27.5

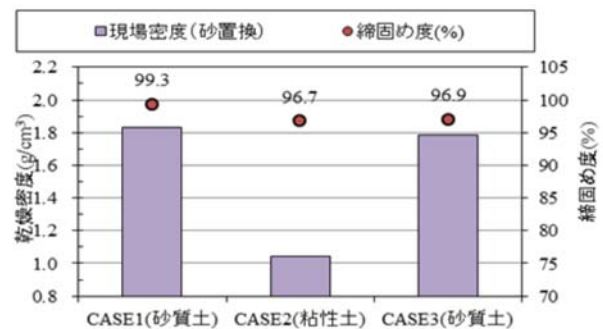


図-2.8 路床の密度と支持力測定結果

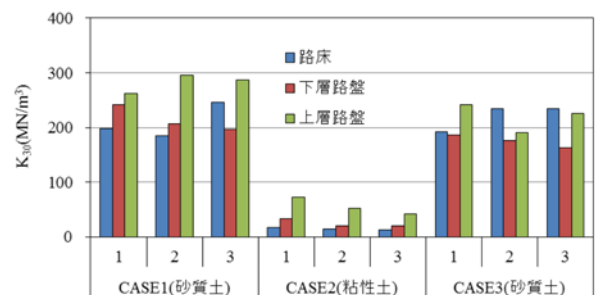


図-2.9 各層の  $K_{30}$  (小型 FWD) の結果

の測定状況を写真-2.6 に示す。

### 2.2.3 輪荷重走行載荷試験の結果

#### (1) 路床の密度と締固め度測定結果

施工後の路床の密度と締固め度の測定結果を表-2.2 と図-2.8 に示す。通常、路床は締固め度管理で施工されており砂置換法では、表-2.2 と図-2.8 に示すように3ケー

スとも締固め度管理基準の 95%以上を満足した結果であった。しかし、砂置換で現場密度を確認するとケース 1 とケース 3 の砂質土は  $1.7\text{g}/\text{cm}^3$  前後で、ケース 2 の粘性土は  $1.0\text{g}/\text{cm}^3$  程度であった。

### (2) 路床及び路盤の支持力測定結果

路床と路盤の支持力として各ケースの 3 箇所での小型 FWD を測定し求めた支持力係数 (K30) の結果を図-2.9 に示す。各ケースとも 3 箇所のばらつきはあるものの、路床、路盤ともケース 1 とケース 3 の砂質土は  $200\text{MN}/\text{m}^3$  前後と大きく、ケース 2 の粘性土は  $50\text{MN}/\text{m}^3$  前後と小さい結果であった。これらの結果は、図-2.8 に示す現場密度試験から算出された乾燥密度の値と同じ傾向であった。ケース 1 とケース 2 は、路床、路盤とも厚さは同じで、路盤の材料も同じであるのに支持力係数に差があるのは、路床の密度や CBR などの支持力の影響を受けた結果である。

### (3) 路床の支持力が舗装の破損に与える影響

図-2.10~2.12 にケース 1~ケース 3 の供試体の中央部の表面凹凸測定結果を示す。図中の折れ線グラフは、走行回数に応じた舗装表面の凹凸形状を示す。表面凹凸の形状を比較するとケース 1 とケース 3 は、走行回数が増加するにつれ複輪の形に凹んだが、ケース 2 は複輪の形にならず凹んだ。また、図-2.13 にケース毎に舗装が 1mm 沈下するに要した走行輪数 (変形輪数) の結果と施工時の路床の締固め状態を確認した支持力測定装置の測定結果と変形輪数の結果を示す。ケース 2 の粘性土は変形輪数が小さく、ケース 1 とケース 3 の砂質土は変形輪数が大きくなった。この結果から、路床の支持力が小さければ舗装の破損が大きく早期に破損しており、路床の支持力が舗装の破損に影響することが分かった。また、ケース 1 とケース 3 と比較すると基層がなく TA で 3.2cm 小さいケース 3 の方が変形輪数が小さくなった。

### (4) 支持力測定装置の適用性の確認

施工時の路床の締固め状態を確認した支持力測定装置の測定結果と変形輪数の結果を図-2.13 に示す。3 種類の支持力測定装置とも差はあるものの、変形輪数が小さいケース 2 の粘性土は支持力が小さく、変形輪数が大きいケース 1 とケース 3 の砂質土は支持力が大きい結果となった。この結果から、3 種類の支持力測定装置とも路床の締固め状態を評価できる可能性があることが分かった。

## 2.3 路床および路盤材の弾性係数の検討

道路土工と舗装の一体型設計として多層弾性理論に基づく設計が考えられる。多層弾性理論を用いた設計法は、線形弾性理論を用い各舗装材料のひずみを計算し疲労回数内の舗装構成を決定するものであり、計算過程に用いる、

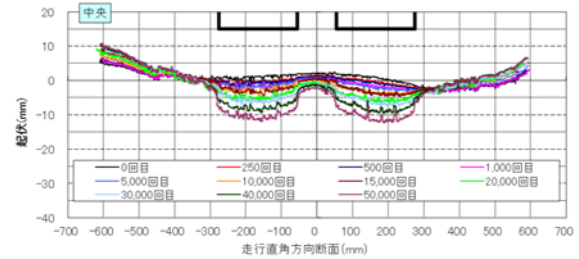


図-2.10 CASE1 の表面凹凸測定結果

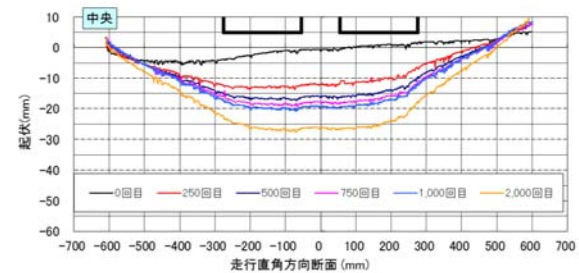


図-2.11 CASE2 の表面凹凸測定結果

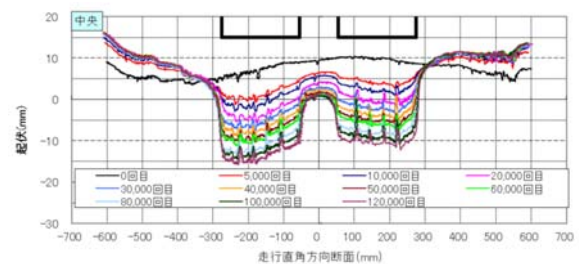


図-2.12 CASE3 の表面凹凸測定結果

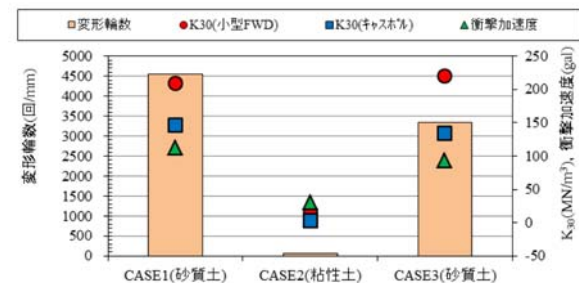


図-2.13 変形輪数と支持力測定装置の測定結果

舗装材料の弾性係数やポアソン比を適切に設定する必要がある。そこで路床および路盤材の締固め度や含水比が弾性係数に及ぼす影響を検討するためレジリエントモデュラス試験を実施した。

表-2.3 に実施した試験ケースを示す。今回、路床材として使用した細粒分質砂は最適含水比  $w_{opt}=16.3\%$ 、最大乾燥密度  $\rho_{dmax}=1.739\text{g}/\text{cm}^3$  である。路盤材として C30 材を使用した。締固め度の影響に着目した試験結果を図-2.14 及び図-2.15 に示す。図中の不飽和は最適含水比に対して乾燥側、飽和は最適含水比に対して湿潤側を示す。路床材、路盤材ともに締固め度による若干の違いが弾性係数に影



写真-2.7 レジリエントモデュラス試験装置

表-2.3 試験ケース

試料番号	試料区分	含水比(%)	密度(%)
1	細粒分質砂 A	8.5	90
2	細粒分質砂 A	18	90
3	細粒分質砂 A	11	93
4	細粒分質砂 A	18	93
5	細粒分質砂 A	12	95
6	細粒分質砂 A	18	95
7	細粒分質砂 A	13.5	98
8	細粒分質砂 A	17.5	98
9	粗骨材(C30)	3.7	90
10	粗骨材(C30)	3.7	93
11	粗骨材(C30)	3.7	95
12	粗骨材(C30)	3.7	98

表-2.4 各試料の締固め仕事量

試料	細粒分質砂 A	粗骨材(C30)
WR (kN)	0.025	0.044
H (m)	0.3	0.45
N <sub>B</sub> (回)	29	110
N <sub>L</sub> (層)	4	6
V (m <sup>3</sup> )	0.001571	0.005301
EC (kJ/m <sup>3</sup> )	554	2465
モールド寸法	φ10cm × h 20cm	φ15cm × h30cm

響しているが、ほとんど差がないことがわかる。これに対して、含水比が弾性係数に及ぼす影響については図-2.16に示すように、含水比が増加すると弾性係数が低下する傾向が確認できた。

現場施工管理においては、所定の締固め度を満足するために目標含水比を定めて転圧回数の設定が行われているが、多層弾性理論による設計法では締固めを行う際の含水比設定が特に重要であることがわかった。

2.4 舗装走行実験場を用いた破壊状況の確認

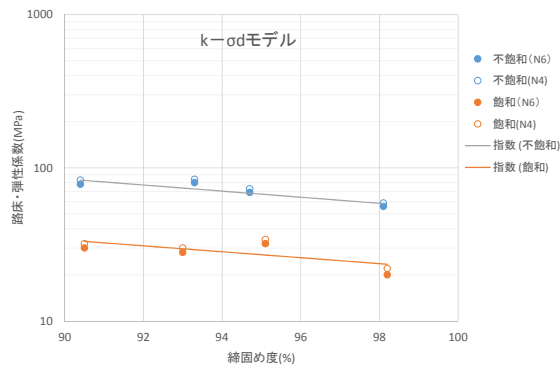


図-2.14 締固め度と弾性係数 (路床材)

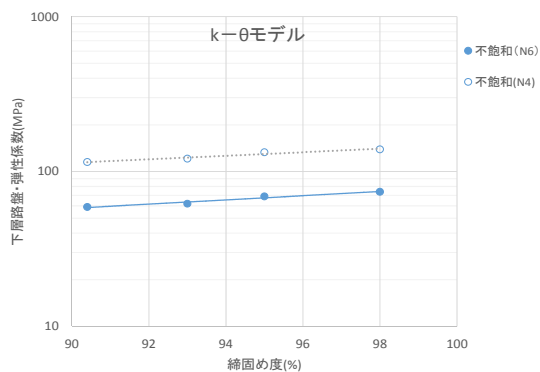


図-2.15 締固め度と弾性係数 (路盤材)

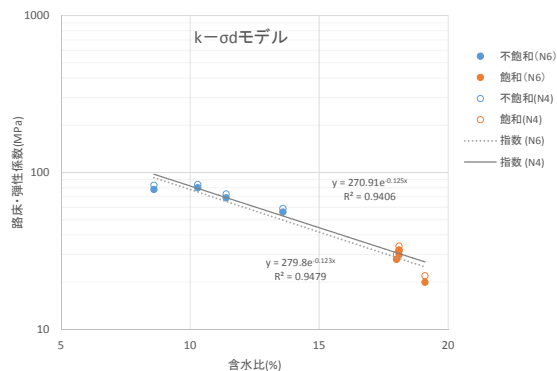


図 2.16 含水比と弾性係数 (路床材)

土木研究所の舗装走行実験場において試験施工を実施した。また、舗装走行実験場は交通荷重の影響を実物大の舗装にて評価することが可能であることから、路床の締固め度に差異を生じさせた工区を設定し、路床の締固め度が舗装の構造的健全度に与える影響を検討した。なお、構造的健全度を示す指標としては、路床を含めた舗装全体の支持力を表す D<sub>0</sub> たわみ量 (荷重・温度補正後) と舗装路面のわだち掘れ深さに着目し、舗設直後及び荷重車が所定輪数を走行した後に FWD による構造調査及び路面性状調査を行った。



写真-2.8 試験施工箇所（路床施工時）

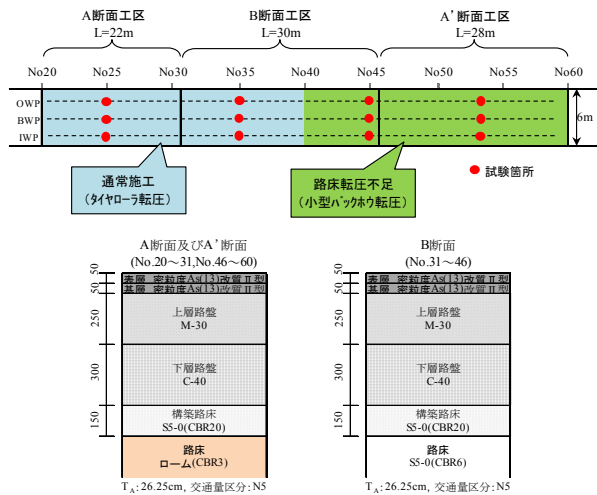


図-2.17 試験施工検討工区（上；平面図，下；断面図）

表-2.5 構築路床の締固め度測定結果

	測点	測定位置	構築路床 締固め度(%)	
			測定値	平均値
A断面工区	No25	OWP	95.2	97.3
		BWP	96.9	
		IWP	95.5	
	No30	BWP	101.7	
A'断面工区	No53	OWP	90.1	90.3
		BWP	89.1	
		IWP	91.6	

表-2.6 下層路盤以降の品質管理試験結果（締固め度）

	使用材料	締固め度(%)	
		A断面工区	A'断面工区
下層路盤	C-40	100.8	100.4
上層路盤	M-30	98.7	99.0
基層	密粒度 As(13) 改質II型	99.9	97.0
表層	密粒度 As(13) 改質II型	99.1	99.6

試験施工の概要を写真-2.8及び図-2.17に示す。異なる締固め度の施工方法は、構築路床（砂質土：S5-0、t=15cm）に対して、A断面工区は通常施工としてタイヤローによる転圧を行い、A'断面工区は、転圧不足となるように小型バックホウで1回のみ転圧を行った。

#### 2.4.1 路床の締固め度

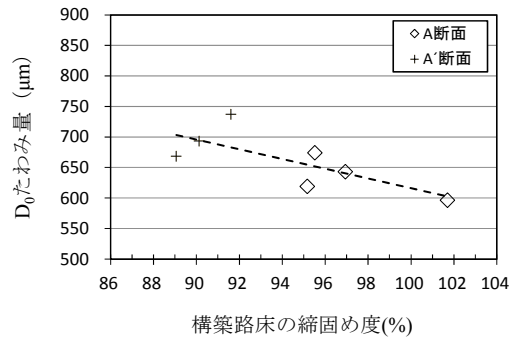


図-2.18 構築路床の締固め度とD<sub>0</sub>たわみ量の関係（舗設直後）

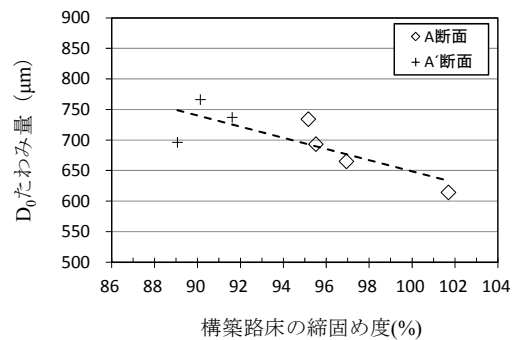


図-2.19 構築路床の締固め度とD<sub>0</sub>たわみ量の関係（49kN換算11.58万輪走行後）

A断面工区、A'断面工区における構築路床の締固め度測定結果を表-2.5に示す。表-2.5より、両工区とも各位置における測定値には若干のバラつきがあるものの、工区平均値で7%の差を設定することができた。なお、下層路盤以降については、両工区とも通常施工とし表-2.6に示すように所定の品質を確保した。

#### 2.4.2 路床の締固め度とD<sub>0</sub>たわみ量の関係

路床の締固め度とD<sub>0</sub>たわみ量の関係を図-2.18、図-2.19に示す。なお、D<sub>0</sub>たわみ量の測定は、図-2.17に示す路床の締固め度管理と同一測点とし、舗設直後と49kN換算11.58万輪走行後（N5交通区分の供用1年程度に相当）の結果について整理した。

舗設直後の結果（図-2.18）より、路床の締固め度が低いとD<sub>0</sub>たわみ量は大きくなる関係にあることがわかる。次に、49kN換算11.58万輪走行後の結果（図-2.19）より、路床の締固め度とD<sub>0</sub>たわみ量は、上記した舗設直後の結果と同様の関係にあることがわかる。また、D<sub>0</sub>たわみ量は、供用に伴い全体的に増加しているが、路床の締固め度が小さいほど、D<sub>0</sub>たわみ量の増加分が大きくなる傾向にあり、路床の締固め度が舗装の構造的健全度を示す指標であるD<sub>0</sub>たわみ量に大きく影響を与える可能性があることがわかった。

#### 2.4.3 路床の締固め度とわだち掘れ量の関係



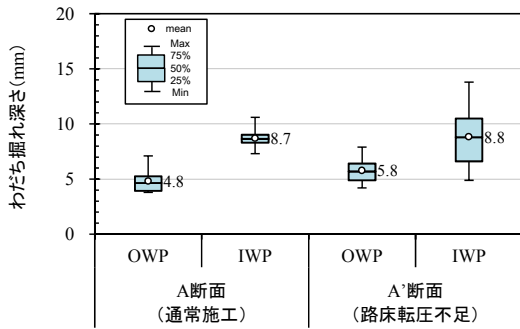


図-2.20 構築路床の締固め度とわだち掘れ深さの関係 (49kN 換算 51.58 万輪走行後)

路床の締固め度と舗装路面のわだち掘れ深さの関係を図-2.20に示す。なお、わだち掘れ深さは、舗装路面にわだち掘れが現れ始めた49kN換算51.58万輪走行後(N5交通区分の供用5年程度に相当)に測定した。

図-2.20に示す値は、A断面工区及びA'断面工区において2m間隔の測線上(工区境は除く)にて測定した横断形状データからOWP部、IWP部のわだち掘れ深さを算出した結果を整理したものである。図-2.20より、49kN換算51.58万輪走行後のわだち掘れ深さは、両工区とも概ね10mm以下であり損傷の程度は小さい結果であったが、A断面工区よりも路床の締固め度が低いA'断面工区の方がわだち掘れ深さが大きい傾向を示すことがわかった。

### 3. 道路土工と路盤の品質管理手法の提案

本項では、砂置換と同程度の測定精度を担保しつつ、より迅速に路体の品質管理を行うことのできる測定装置として国土交通省北海道開発局において採用されている衝撃加速度を用いた盛土の品質管理方法について、道路土工の路床材及び路盤材に対する適用を検討した。合わせて簡易に路床の品質を管理できると考えられる小型FWD、土壌硬度計についても路床の品質管理としての適用性を調査した。

#### 3.1 種々の方法による路床の品質管理手法について

土木研究所の舗装走行実験場において衝撃加速度試験機、小型FWD、土壌硬度計の3種類の測定機器を選定し試験施工を実施した。

##### 3.1.1 路床の品質管理手法の提案に関する検討

表-3.1にそれぞれの測定機器の概要を示す。いずれも人力にて測定箇所への運搬が可能であり、かつ、測定結果は臨場で比較的短時間に確認することができ、1回に要する測定時間も数分以内である。

##### 3.1.2 測定方法

測定は、平成27年2月2日に茨城県つくば市の土木研

表-3.1 各測定機器の概要

名称	大きさ	重さ	備考
衝撃加速度測定装置	高さ800mm × φ200mm	7.0kg	路体盛土品質管理の場合は事前に試料を採取し室内試験を行う
小型FWD	高さ1,100mm × φ120mm	15.0kg※	計測前に落下高さ、重錘を決定する予備試験を行う
土壌硬度計	長さ200mm × φ30mm	0.65kg	

※載荷板φ100mm、重錘5kgの状態

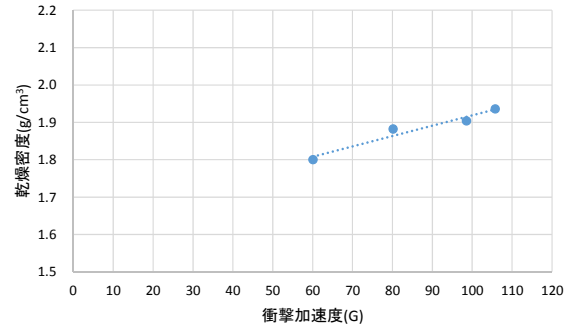


図-3.1 衝撃加速度と乾燥密度の関係

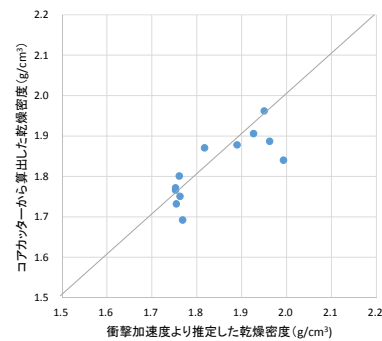


図-3.2 衝撃加速度による乾燥密度の推定値とコアカッターによる測定値の関係

究所構内の舗装走行実験施設の舗装の打ち換え工事時に実施した。試験施工の概要は、2.4で記したとおり全長110m、幅6mにわたり既設の舗装及び路盤材が撤去され、露出した路床に対して測定を行った。

既設の舗装及び路盤材を撤去し露出した路床に対し、測線No20~No40は3t級タイヤローラーにより転圧を行った。測線No40~No60はバックホウでかき乱し人力で敷き均したのち、小型バックホウで1回転圧を行った。転圧が完了した状態で測定を行った。

測定は、No25、No35、No45、No55の測線毎に、1.5m幅で3点の測定を行った。測定項目は、衝撃加速度測定装置による衝撃加速度、小型FWDによる地盤反力係数 $K_{FWD}$ 、土壌硬度計による指標硬度、コアカッター(直径10cm、体積785cm<sup>3</sup>)による密度計測である。

衝撃加速度は路体での品質管理方法にならない、10点の測定を行い、測定値のうち上限と下限の各2値を除外し全6点の平均値を採用した。小型FWDは1箇所1点の測定とし、測定条件は載荷板直径100mm、重錘質量5kgとし

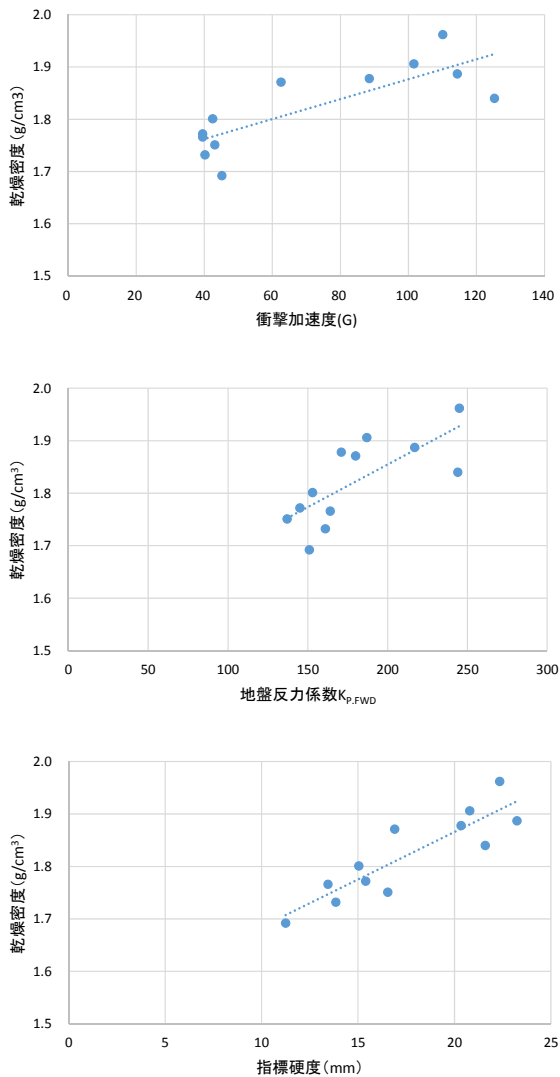


図-3.3 各指標と締固め度の関係  
表-3.2 各測定機器の比較

名称	運搬	精度	実績
衝撃加速度測定装置	○	○	○
小型FWD	△	○	○
土壌硬度計	◎	○	△

た。指標硬度は10点の平均値を採用した。また、現地から試料を採取し、衝撃加速度を用いた盛土の品質管理方法に基づいて室内試験を実施した。

### 3.1.3 測定結果及び考察

#### (1) 衝撃加速度測定装置

図-3.1 に、室内試験により求めた衝撃加速度と乾燥密度の関係を示す。衝撃加速度の増加に伴い乾燥密度が増加していく傾向が認められ、本測定対象の路床材料には衝撃加速度を用いた盛土の品質管理方法を適用することが可能と考えられる。図-3.2 には衝撃加速度から推定した乾

燥密度とコアカッターを用いた現場密度測定から算出した乾燥密度の関係を示す。特別な大きな誤差は、見受けられず、ある程度の精度を達成しているものと考えられる。

#### (2) 各試験器の比較検討

各測定機器の測定精度を比較するために、図-3.3 に3種類の測定機器の測定値と乾燥密度、締固め度の関係を示す。図-3.3 からは、測定機器の間に明確な精度の差は見受けられなかった。

上記の測定精度を含めて、各測定機器の比較検討を表-3.2 にまとめる。運搬について、全て人力で運搬可能であるものの、小型FWDは載荷板を大きくしたり付加重錘を追加した場合には重量が大幅に増加し、運搬にはかなりの労力を要する。他方、土壌硬度計はポケットに収納することも可能な大きさや重量である。さらに土壌硬度計は精度に特段の問題点がない上に、使用実績及び指標硬度と関係諸数値との相関性が明らかにされた場合には、非常に有用な測定機器となり得る可能性がある。現時点では、衝撃加速度測定装置以外の2機種は、それぞれに特長と問題点があるが、問題点を解決していくことにより、それぞれ有効な品質管理手法になり得ると考えられる。

### 3.2 衝撃加速度を用いた路盤の品質管理方法の検討

#### 3.2.1 路盤の品質管理手法の提案に関する検討

北海道内の道路工事施工現場において、路盤13箇所について、現地における衝撃加速度の測定、および砂置換法による密度測定を行った。また、現地より試料を採取し、室内試験により衝撃加速度と乾燥密度の関係を求めた。また、各資料の基本物性値を測定した。

#### 3.2.2 測定結果及び考察

路盤材に用いられていた材料の粒度特性は、2mm以上の礫質分を65%~80%以上含み、自然含水比は最適含水比より少ないものがほとんどである。また、コンシステンシーがすべてN.P.であり、礫質材料であった。図-3.4 に各試料の粒度加積曲線をいくつかの路体・路床材料とともに示す。路盤材は路体・路床材料に比べ比較的同様な曲線を表している。これは、路盤材は工事において使用できる規格が決められており、粒度品質管理を行っているものが使

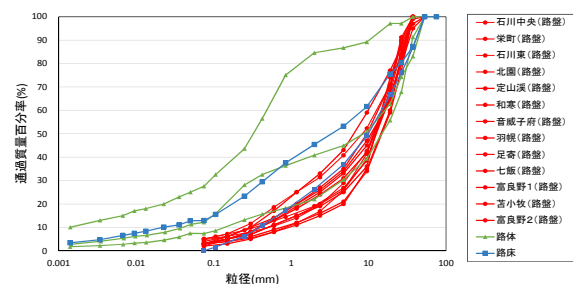


図-3.4 各試料の粒径加積曲線

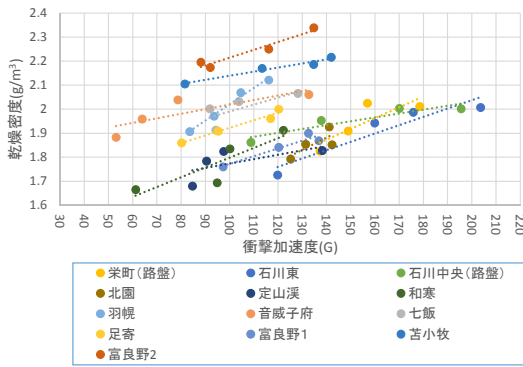
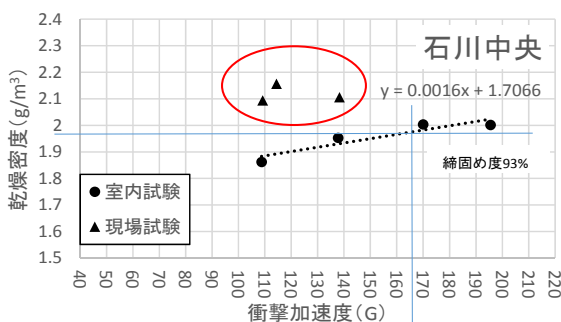
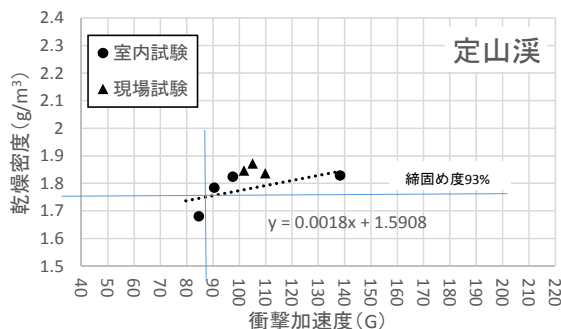


図-3.5 乾燥密度と衝撃加速度の関係 (室内試験)



a. 現場試験と室内試験が一致した例



b. 現場試験と室内試験が一致しない例

図-3.6 乾燥密度と衝撃加速度の関係 (2 試料のみ掲載)

用されるためと思われる。しかしながら、使用する路盤材の採取地山の違いや、再生材・新材の違いなどがあるため同一材料とはならない。

路盤の13試料について室内試験より求めた衝撃加速度と乾燥密度との関係を図-3.5に示す。すべての試料において乾燥密度が大きくなると衝撃加速度も大きくなる傾向となり、密度と衝撃加速度の間で比例関係があることがわかる。また、試料全体では、グラフの傾きがほぼ同じであるが、乾燥密度に対する衝撃加速度は同じ値とはならない。これは、粒度管理を行っているとはいえ、粒径加積曲線に差が見られたことや、おのおのの試料で、最大乾燥密

度及び最適含水比が違うためと考えられる。よって、ある特定箇所の室内試験の結果を、全ての路盤材料において適用することはできないと考える。

次に、室内試験の結果から個々の試料における締固め度93%に相当する乾燥密度から推定した衝撃加速度と現場で測定した衝撃加速度を比較したところ、13試料のうち5試料は現場試験と室内試験が一致したが、8試料は室内試験で求めた衝撃加速度を下回る結果となった。図-3.6にその一例を記す。この原因としては、室内試験における衝撃加速度の測定は直径15cmのモールドに拘束されている状況で実施しているため、ランマが衝突した際に発生する接地面からの衝撃の反発力がモールド壁面より過大に作用している可能性が考えられる。路体や路床に比べ路盤材は、比較的粒径の大きい礫質分を多く含むことが要因と考えられる。よって、路体・路床における衝撃加速度測定装置を使用した現行の品質管理の方法を、路盤における品質管理への適用を確認するためには、さらなる検討が必要と考えられる。

#### 4. 道路土工と舗装の一体型設計に対応した情報化施工の活用方法と品質確保等の評価手法の提案

##### 4.1 情報化施工の複数技術の活用等の調査および効果的な活用方法の整理

実際の施工現場において相乗効果のある複数の情報化施工技術（MC/MG技術やTS出来形管理など）の活用や情報の共有・連携などの情報化施工を効果的に活用するためのポイントを施工計画・準備の段階を含めて収集・整理し、効果的な活用方法の事例集とそれらを講習会などで説明するための資料を作成した。

実施した事項は以下のとおりである。

- (1) 効果的な活用方法の事例収集・整理
- (2) 効果的な活用方法の事例集・説明資料の作成

##### 4.1.1 調査フローと実施内容

調査フローと実施内容を以下に示す。本調査では、情報化施工を効率的に活用するための留意点や工夫について、既存の報告事例などから抽出・整理し、講習会などで活用する説明資料を解り易くとりまとめる。

- (1) 効果的な活用方法の事例収集・整理

###### ①事例収集

土工および舗装工を対象に、MC/MG技術やTS出来形管理を利用した事例を収集する。収集の対象は、平成24年1月～平成26年12月の3ヶ年を対象とする。導入効果、効果を得るための留意点や工夫が示されている文献を収集する。

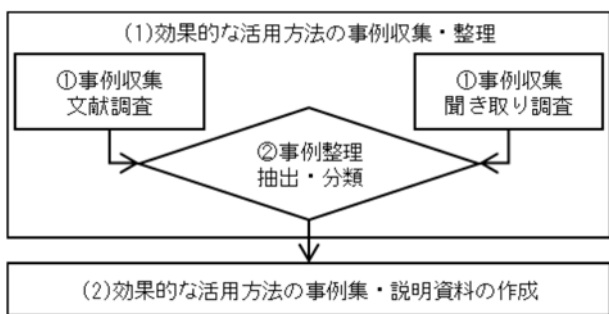


図-4.1 調査フロー

表-4.1 事例整理の分類

条件	効果の分類	留意点 (効果の発現条件)
汎用	省力化/時間短縮/品質/安全/人材/環境	資器材/人材/作業手順/利用技術/管理手法/発注者
特殊条件		

表-4.2 事例調査対象

会社名	現場名	活用した技術
(株)砂子組	石狩川改修工事の内旧夕張川築堤工事	MGバックホウ、MCブルドーザ等
(株)丸田組	平成24年度 北海道横断自動車道訓子府町訓子府改良工事	縮固め回数管理システム、MGバックホウ等

表-4.3 事例整理 (準備)

フェーズ	技術	事例	内容
準備 (データ作成)	共通 (MC・MG、TS出来形)	適切なデータ作成順序	・設計データは、TS出来形→MC・MGの順で作成する (TSのデータをベースにMC・MGのデータ作成が可能) ・施工用と管理用の基本設計データは同じ (出力時に形式を指定するだけ)
		複雑な設計形状のデータ化のコツ	・複雑な形状の設計データは、単純な形状に分割して作成

表-4.4 事例整理 (施工計画)

フェーズ	技術	事例	内容
施工計画	共通 (MC・MG)	人員配置の最適化	・情報化施工を対象にした資材搬入等、情報化施工を最大限に活用できるように周辺作業も合わせていく必要がある・ ・MGを導入するだけでなく、この技術に最適な人員配置を行うことで経済性向上・安全性向上が得られる。
		計画工程の最適化	・盛土の施工期間は、現場条件により断続的な場合や1日の施工量が限られ長期化する場合があります。仮に盛土期間が空いたとしてもシステムは容易に取外し再設置できない。また、システムのレンタル料は安くはないことから、使用期間ができるだけ短くなるよう、工程等の調整が必要である。

この他、情報化施工機器メーカーへの聞き取り調査により、情報化施工機器を効率的に利用している施工者を選定し、効率的に活用・運用する留意点などを調査する。

## ②事例整理

収集した事例を対象技術別に、対象工種や現場条件等を整理し、効果と効果を発現するための留意点や工夫との関連を考察して分類し、汎用性のある事例と特殊な条件下での事例に分類する (表-4.1)。

### (2) 効果的な活用方法の事例集・説明資料の作成

収集・整理した事例から汎用的に活用できる工夫や留意点を抽出し、効果的な活用方法の事例集・説明資料を作成する。なお、情報化施工の初心者や土木関係の学生でも内容が解るように整理する。

## 4.1.2 調査結果

### (1) 効果的な活用方法の事例収集・整理

#### ①事例収集

収集した文献のうち、導入効果、効果を得るための留意点や工夫が示されている事例を27件抽出して整理を行った。また、情報化施工機器を効率的に利用している施工者を選定し、効率的に活用・運用する留意点などを調査した。調査した施工者を表-4.2に示す。

#### ②事例整理

収集した事例から情報化施工の効果を最大化するために行った工夫等を抽出し、分類・整理した。分類・整理は、建設プロジェクトの段階毎 (準備、施工計画、施工) と使用した情報化施工技術毎に行った。準備段階で4技術分類に対して9事例、施工計画段階で1技術分類に対して4事例、施工段階で6技術分類に対して20事例を整理した。整理した事例の中から汎用的に活用できる工夫や留意点として抽出した主な事例を表-4.3~4.5に示す。

### (2) 効果的な活用方法の事例集・説明資料の作成

整理した情報化施工技術の効果を最大化するための工夫等の事例のうち、汎用的に活用できる工夫や留意点を抽出し、効果的な活用方法の事例集と説明資料を作成した。効果的な活用方法の事例集は、以下に示すイメージの様式を用いて、27事例を作成した。

効果的な活用方法の説明資料は、本調査を行う前から既知の留意点や工夫を含めて作成した。従来の手法と情報化施工を活用した手法との違いが解るように記載した。また、内容は、情報化施工の初心者や土木関係の学生でも理解できるように留意し、平易な文言を用いた。図-4.2、4.3に説明資料のイメージを示す。

## 4.2 情報化施工の品質確保等の効果の検証と効果の定量的評価

情報化施工技術の一つとしてマシンコントロールがある。マシンコントロール (以下MC) とは、TSやGNSSなどを用いて施工機械の位置を把握し、その位置における目

表 4. 5 事例整理 (施工)

フェーズ	技術	事例	内容
施工	共通	ネットワーク機能の活用	・個別機器をグラウトサービスで統合管理することにより、事務所から重機・測量機へのデータ入出力や遠隔アシスタントが可能となる。また、ダンプ、施工機械、測量機等のデータを蓄積し、計画データと統合して進捗状況を分析できる。
	MGバックホウ	MGと普通バックホウの組み合わせによる効率化	1) MGで切り出し位置(法肩や法尻等)にバケットで印をつける。または管理断面や変化断面を仕上がる。 2) その後、普通バックホウがその切り出し位置や観に仕上がっている断面の形状を基準に施工する。 3) 管理断面や位置出しが終わったMGは先行して施工する。
		衛生補足状態が悪くなったときの対応	・先に管理断面をMGで仕上げ、FLOATになったら管理断面間を、MGで仕上げた形状に倣って従来施工で施工する。
		各種アタッチメントの活用	・アタッチメントにロータリー攪拌装置を取り付け、地盤改良のための攪拌を行った範囲・深度を管理する。 ・プレーカバ明渠バケット、ツインヘッダー、Eロック、Mロックなども使用できる。
		ライフライン対策	・送電線や橋梁下の作業、埋設物がある箇所等の作業などフロント部の上下稼働範囲が限られる現場で、可動範囲を設定して警告アラーム等により注意を促し、空中の電線や地中の管などに誤って接触する危険を低減できる。
	簡易測量器として活用	・爪先の座標を記録し、土量計算、進捗管理等に利用できる。 ・巻き出し厚を示す丁張りの代わりに土砂で高さを示す。	

標高(あらかじめ入力された設計データ)と作業装置(ブレードなど)との差を算出し、作業装置が設計値に添うよう自動的にリアルタイムで制御を行う技術のことである。現在ではモータグレーダやブルドーザを用いた敷き均し施工を中心に実用化されており、オペレータの負担を軽減することによる施工の効率化や高精度化などが期待されている。国土交通省では平成25年3月に新たな「情報化施工推進戦略<sup>2)</sup>」を策定し、その中でMCモータグレーダとMCブルドーザを「一般化推進技術」としてさらなる普及を進めている。

本研究では、2015年と2016年の2か年にわたり、このMC施工の優位性を定量的に明らかにすることを目的とし、施工条件を同一にした2つの試験場にて従来施工とMC施工を行い、施工にかかる作業時間及び出来形のバラツキ、および平坦性を比較した。またさらに、MC施工がオペレータへ及ぼす影響を調査するために、心拍数計測装置および視線計測装置をオペレータに装着してデータの収集を行った。対象の工種は、モータグレーダによる路盤

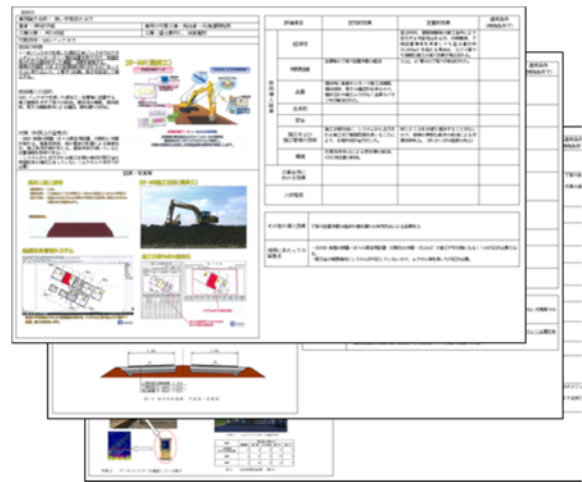


図-4.2 事例集のイメージ



図-4.3 説明資料のイメージ

敷き均し施工とした。

なお、本実験は土木研究所と民間企業5社(鹿島建設、鹿島道路、トプコンソキアポジショニングジャパン、西尾レントオール、NIPPO)による共同研究にて行った。

#### 4.2.1 実験概要

##### 4.2.1.1 実験概要

幅6m、全長70m(直線部45m、曲線部25m)の路床を2レーン用意し、その路床上に厚さ30cmになるよう路盤材料(M40)をモータグレーダにて敷き均す実験を行った。モータグレーダはMCシステムを搭載した機体を使用し、No.1レーンはMCを使用せずに(従来施工)、No.2レーンはMCを使用して(MC施工)施工を行った。モータグレーダの仕様を表-4.6に、実験状況を写真-4.1に示す。

また実験は一般的な施工と同様に、直線部10mピッチ、曲線部5mピッチで設定した測点における仕上がり高さが、設計高さ(基準高さ)±1cm以内になった時点で終了

表-4.6 モータグレーダ仕様

メーカー	KOMATSU
定格出力	123kW
型式	GD655
運転質量	16555kg
ブレード幅	3710mm
全長	8695mm
全幅	2460mm
全高	3370mm



写真-4.1 実験状況

とした。

#### 4.2.1.2 データ計測

実験結果として以下のデータを測定した。①②③④は2015年、2016年両方、⑤⑥は2016年のみ計測したものである。

- ① 施工開始から終了までにかかった時間
- ② 仕上がり高さ計測回数
- ③ 施工終了後、中央・右・左の3測線上1mピッチの仕上がり高さ（出来形）。TSにて計測（写真-4.2）
- ④ 施工終了後、ローラにて締固めを行い、写真-4.2に示した左2.5m測線上の平坦性。3mプロファイルメータを用いて測定
- ⑤ 施工中のオペレータ心拍数。心拍数計測装置にて計測（EPSON社製：SF-850、写真-4.3）
- ⑥ 施工中のオペレータ視線。視線計測装置にて計測（NAC社製：EMR-9、写真-4.4）

#### 4.2.1.3 オペレータ

表-4.7に示す様々な経験を持った6名のオペレータにて実験を行った。なお、オペレータB、C、D、Eの4名は2015年、2016年両年実験に参加したオペレータである。オペレータA、Fは2015年と2016年で別人であるため、2015年をオペレータA'、F'としている。オペレータA、A'、Bは熟練者（経験15年以上）、D、E、F'、Fは非熟練者（経験10年未満）といえることができる。なお、オペレー



写真-4.2 出来形計測容量



写真-4.3 心拍数計測装置



写真-4.4 視線計測装置

タCは、MC施工の社内トレーナー（社内オペレータにMC施工を教育する）として勤務しており、通常の重機オペレータと違い、現場経験はほとんどないがMCの操縦に長けている特殊な人物である。

#### 4.2.2 実験結果

##### 4.2.2.1 施工時間

2015年と2016年の実作業時間データ（延べ12名）の、熟練者（経験15年以上）の平均、非熟練者（経験10年未満）の平均、全体の平均を図-4.4に示す。なお、実作業時

間とは後進や計測作業などを含まない、敷き均し作業のみの時間のことである。

図-4.4によると、オペレータの熟練度によらずMC施工を導入することにより実作業時間が短縮され、その短縮率は熟練者では10.0%、非熟練者では37.2%となっており、非熟練者の方がMC施工導入による作業時間短縮効果が高いことがわかる。さらに非熟練者にMC施工を導入した場合、ほぼ熟練者並みの実作業時間で施工できる可能性があることもわかる。

#### 4.2.2.2 仕上がり高さ計測回数

2015年と2016年の仕上がり高さ計測回数データ（延べ12名）の、熟練者（経験15年以上）の平均、非熟練者（経験10年未満）の平均、全体の平均を図-4.5に示す。なお、実作業時間とは後進や計測作業などを含まない、敷き均し作業のみの時間のことである。

図-4.5によると、オペレータの熟練度によらずMC施工を導入することにより仕上がり高さ計測回数が短縮され、その短縮率は熟練者では40.0%、非熟練者では58.6%となっており、非熟練者の方がMC施工導入による仕上がり高さ計測回数短縮効果が高いことがわかる。さらに非熟練者にMC施工を導入した場合、ほぼ熟練者並みの仕上がり高さ計測回数で施工できる可能性があることもわかる。

#### 4.2.2.3 出来形バラツキ

2015年と2016年の出来形データ（延べ12名）の、熟練オペレータ（経験15年以上）の度数分布図を図-4.6に、非熟練オペレータ（経験10年未満）の度数分布図を図-4.7に、全体の度数分布図を図-4.8に示す。なお、度数分布は設計値（目標高さ）からの乖離で表しており、それぞれ標準偏差も示してある。

図-4.6~4.8によると、オペレータの熟練度によらずMC施工を導入することにより出来形バラツキが改善され、非熟練者の方がその改善効果が高いことがわかる。さらに非熟練者にMC施工を導入した場合、ほぼ熟練者並みの出来形バラツキで施工できる可能性があることもわかる。以上ことは、MC施工を導入することにより、オペレータによらず出来形バラツキが一定の範囲内に収められていることを担保できることを示している。MC施工の導入は、道路設計を行う際に以上を考慮することを可能とすることができる。

#### 4.2.2.4 平坦性

モータグレーダによる路盤敷き均し施工では、通常出来形のみが品質管理基準値であり、平坦性はあまり考慮されない。しかし高品質の道路を得るためには平坦性も重要な

表-4.7 オペレータ

	オペレータ	年齢	業務経験年数
2015年	A'	52	33
	B	36	16
	C	33	10
	D	30	8
	E	23	5
	F'	22	1
2016年	A	57	35
	B	37	17
	C	34	11
	D	31	9
	E	24	6
	F	24	2

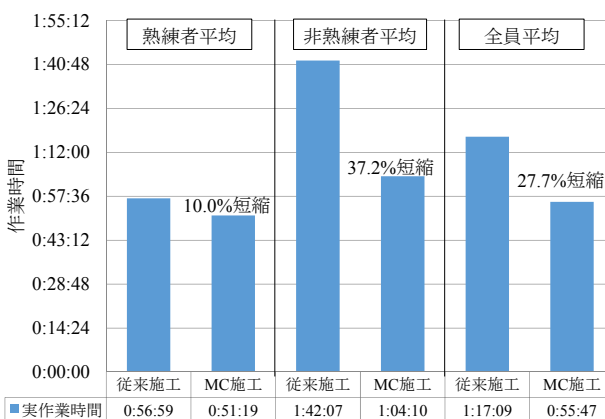


図-4.4 作業時間

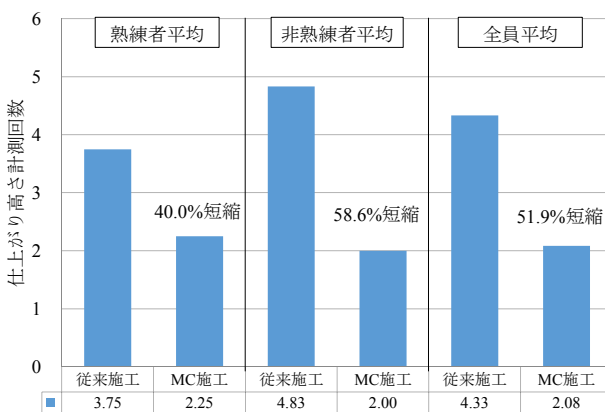


図-4.5 仕上がり高さ計測回数

要因であるため<sup>9)</sup>、本研究では平坦性に対してもMC施工の効果を検証した。

2015年の平坦性測定結果を図-4.9に、2016年の平坦性測定結果を図-4.10に示す。なお、平坦性は数値が低い方が滑らかであることを示している。

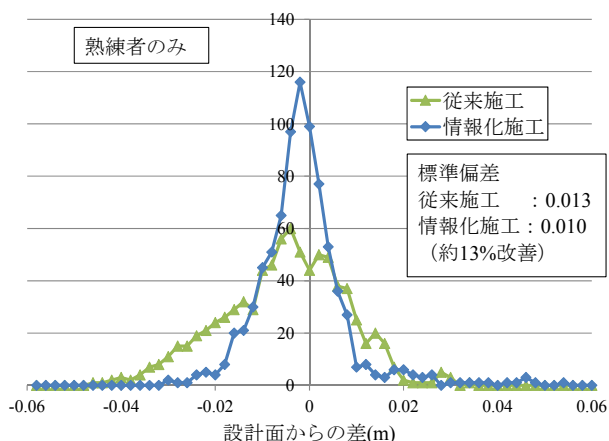


図-4.6 出来形度数分布 (熟練オペレータ)

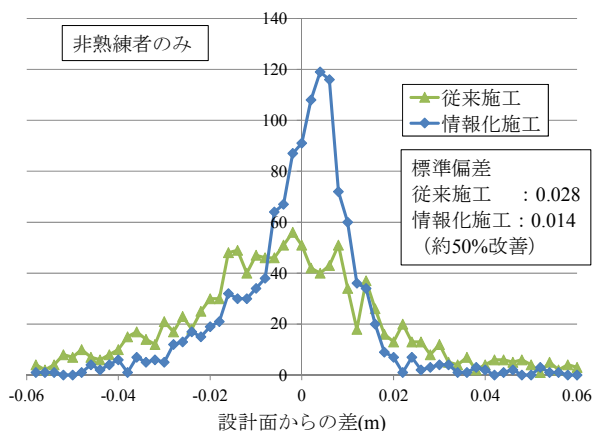


図-4.7 出来形度数分布 (非熟練オペレータ)

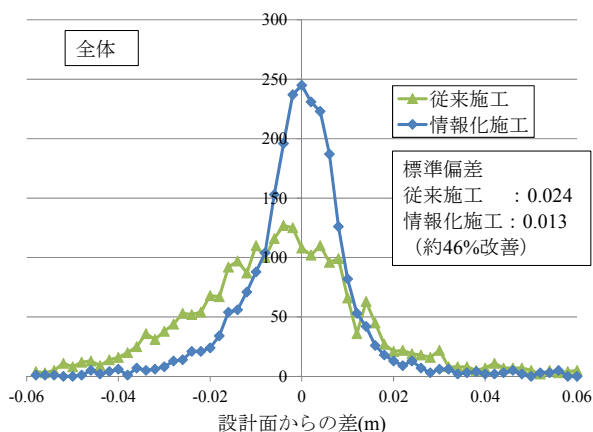


図-4.8 出来形度数分布 (全オペレータ)

図-4.9, 4.10によると、熟練者 (A, B, A') の平坦性は、MC 施工導入すると全員従来施工より悪化するということ同じ傾向を示していること、またオペレータ C は兩年とも MC 施工導入により平坦性が向上していること、他のオペレータ (非熟練者) は MC 施工導入による平坦性への効果はオペレータによってまちまちであり、かつ同一オペレータでも実験年によって傾向が異なる (D) ことがわかる。

平坦性とは仕上げ面の滑らかさを表す指標であり、一般的に、施工中に設計値 (目標高さ) へ近づくよう急激にブレードを操作すると、バラツキ (目標値からの乖離) は改善するが平坦性は悪化し、滑らかにブレードを操作すると、バラツキは改善しないが平坦性は向上する。以上のことを踏まえて考えると、熟練者 (A, B, A') はこの平坦性の特徴をよく理解しており、通常施工を行う際はブレードを走行速度などに合わせ適度に滑らかに操作することにより、バラツキと平坦性を高いレベルで両立するよう操作していると考えられる。しかし、MC 施工を導入した場合、ブレードの上下操作は MC コントローラが行うため、平坦性はコントローラの設定と走行速度や荒均し品質などとのバランスにより決定されることになり、本研究での MC コントローラ設定では、熟練者の通常施工工程の高い平坦性は実現できなかったものと考えられる。図-4.11 にオペレータ B の平坦性測定前 (ローラ締固め後) 左側線を、出来形計測と同様に TS を用いて 1m ピッチで測定した結果を示す。図-4.11 から上記のこと、すなわち従来施工ではブレードを滑らかに操作し、バラツキと平坦性を高いレベルで両立させようとしていること、MC 施工ではバラツキを向上させるためにブレードをやや急激に操作しているため、バラツキは少ないが平坦性が少し劣ることが確認できる。

また、オペレータ C は MC 施工に長けているため MC コントローラ設定の特徴をよく理解しており、MC 施工を用いた方がバラツキと平坦性を高いレベルで両立できたものと考えられる。一方非熟練者は、走行速度や荒均し品質などがオペレータおよび実験年などでまちまちのため、傾向がバラバラになってしまったものと考えられる。さらに、オペレータ F のように従来施工での平坦性が他の非熟練者と比較しても著しく悪い初心者オペレータが、MC 施工を用いると熟練者ほどではないが、他の非熟練者並みの平坦性を得られる可能性があることがわかった。

#### 4.2.2.5 心拍数

2016 年の心拍数測定結果を図-4.12 に示す。

図-4.12 によると、オペレータ F を除くすべてのオペレータにて、MC 施工を導入すると心拍数が低下していることがわかる。心拍数のみで断定することはできないが、MC 施工を導入することで、熟練度に寄らず、オペレータ負担が低減される可能性があることがわかる。

オペレータ F のみ MC 施工を導入しても心拍数はほぼ変化しなかったが、これは入社 1 年目のオペレータ F の実験を行う際に、上司がつきっきりで見学していたため、



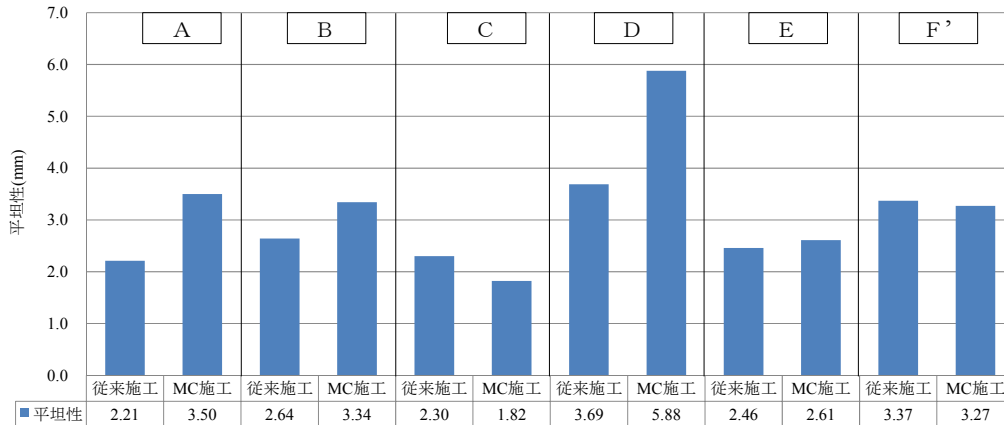


図-4.9 平坦性 (2015年)

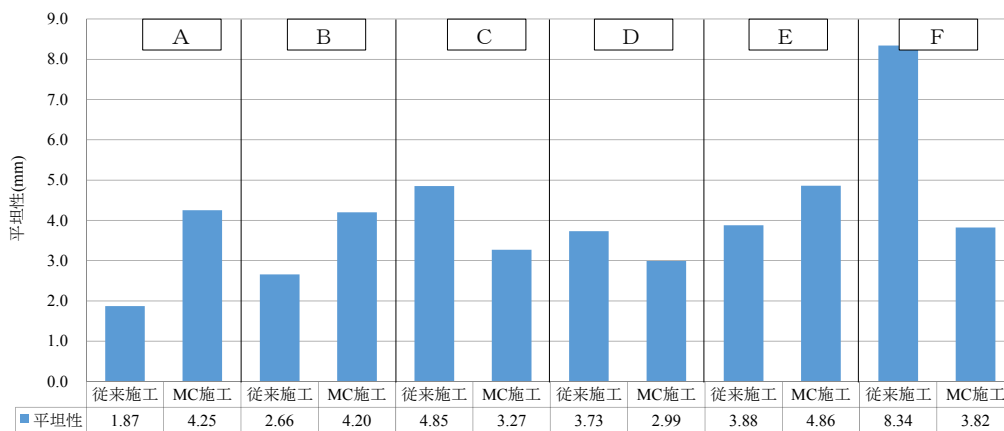


図-4.10 平坦性 (2016年)

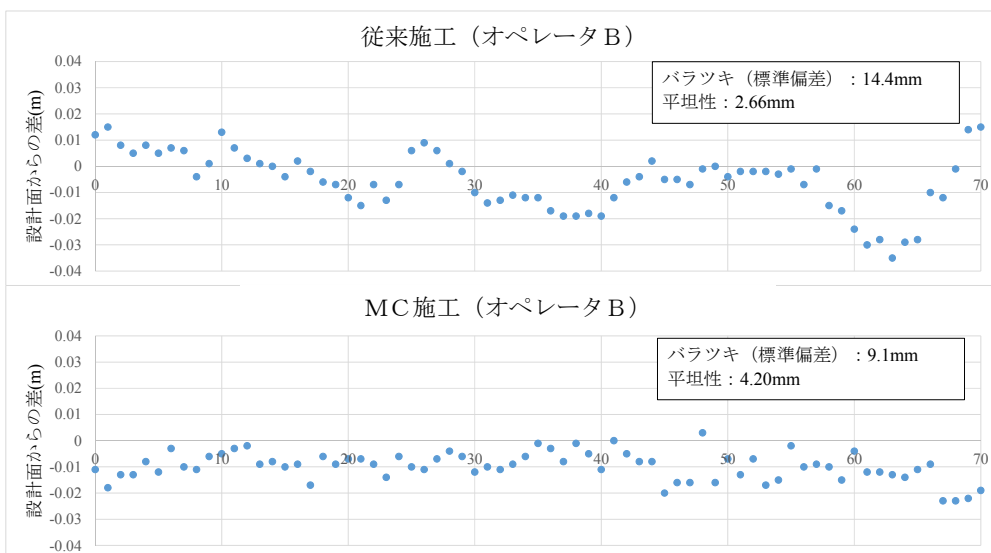


図-4.11 締固め後高さ計測 (オペレータB, 2016年)

従来施工、MC施工ともに緊張が続く高い心拍数となってしまったためと考えられる。

#### 4.2.2.6 オペレータ視線

オペレータの視界を、写真-4.5に示すように、ブレード近傍、前方、その他の3つに分け、仕上げ施工中

の視線が0.1秒以上停留している時間割合を整理した。なお、オペレータB、Eは視線データが取得できなかった。整理結果を図-4.13、4.14に示す。

図-4.13、4.14によると、従来施工の場合、オペレータA(熟練者)はブレード近傍を見ている時間割合が70%

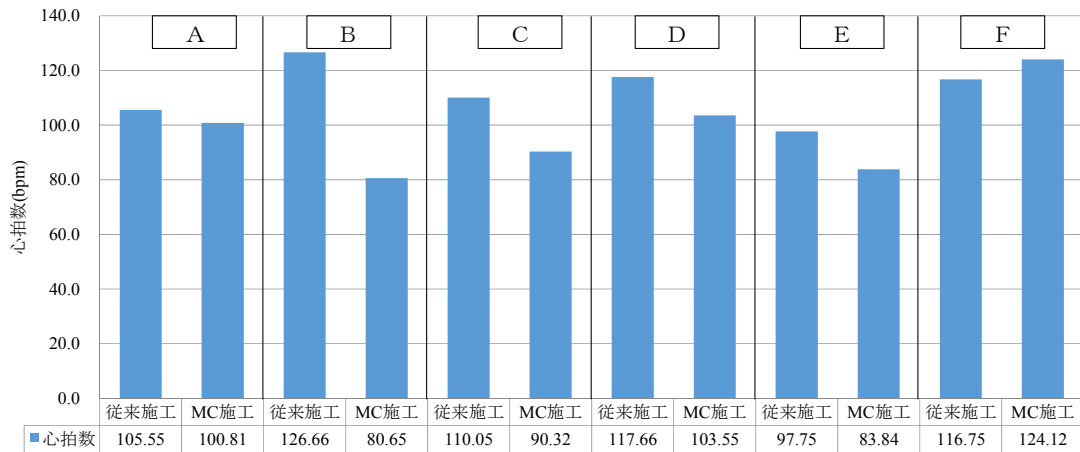


図-4.12 心拍数

弱であるのに対し、他の3名は約90%程度あることがわかる。これは、熟練度が低い場合、材料を敷き均しているブレード近傍にばかり集中し、周辺状況の把握ができていないが、熟練者は前方にも注意を払い、走行経路の状況を予測することで、円滑で高品質な施工を行っていると考えられる。また、MC施工を導入するとすべてのオペレータでブレード近傍を注視している時間割合が減少しており、特にオペレータD、Fという非熟練者ほど大きく減少している。これはMC施工によりブレード操作にそれほど注意を払わなくてもよくなり、周辺に注意を払う余裕が生まれたためと考えられる。このことから、MC施工導入の導入は、高品質で円滑な施工を可能とするだけでなく、周辺状況に注意を払うことでより安全な施工を可能とするとも言える。



写真-4.5 オペレータ視界

#### 4.2.3 情報化施工が生産性向上に資する効果の定量的評価

本章では、MC施工を導入することによる生産性（時間当たり施工土量）への効果について試算する。

図-4.8より、熟練者、非熟練者の実作業時間平均は表-4.8のようになる。

次に図-4.9より、平均仕上がり高さ計測回数は表-4.9のようになる。

仕上がり高さ計測1回にかかる時間を10分(1/6h)とすると、表-4.8、4.9から作業時間平均が算出できる(表-4.10)。

本実験の施工土量420.3m<sup>3</sup>(幅6m×全長70m×厚さ0.30m)を表-4.10の値で除することにより、熟練者、非熟練者の従来施工、MC施工における時間・人当たりの施工土量が算出できる(表-4.11)。

また、2014年の年齢階層別建設業就業者数は図-4.15のようになる<sup>4)</sup>。モータグレーダオペレータの人数お

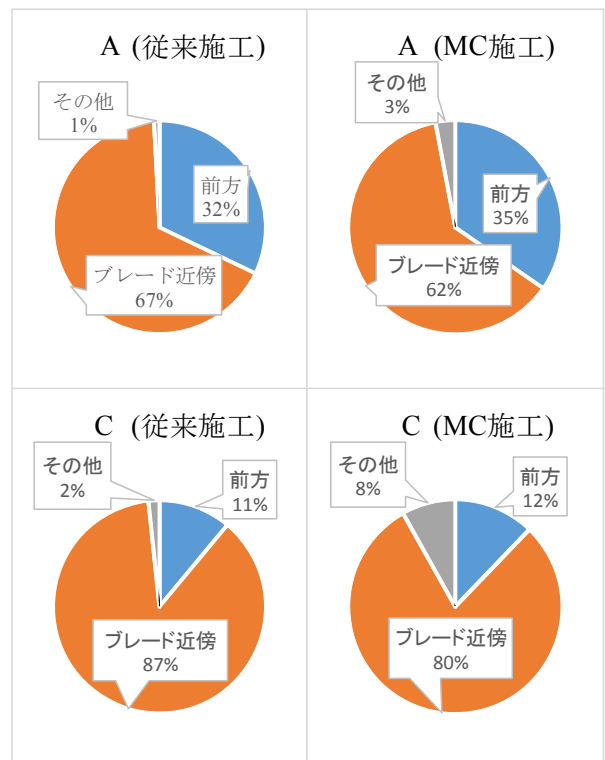


図-4.13 視線停留時間割合（熟練オペレータ）

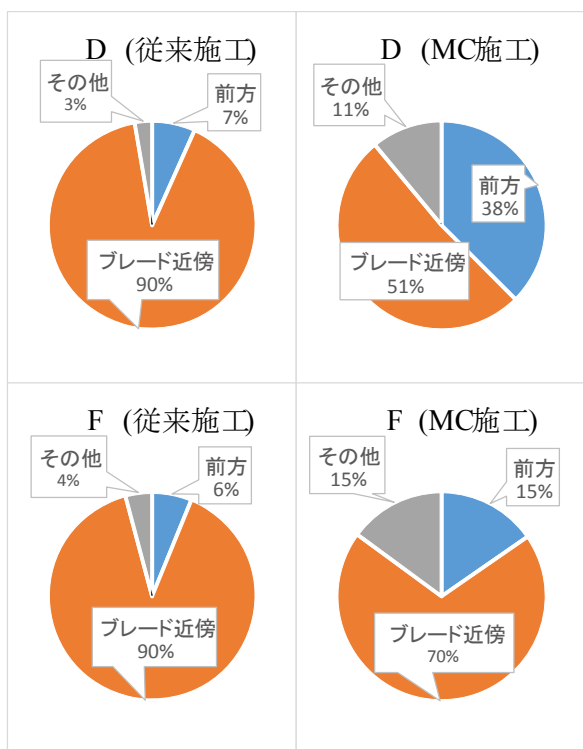


図-4.14 視線停留時間割合 (非熟練オペレータ)

よび年齢階層別割合は正確にはわからないが、ここでは図-4.15に示した全建設業就業者の1/1万の人数であり割合は同一であると仮定する(図-4.16)。また年齢と実務経験は必ずしも同一ではないが、簡便のため35歳以上を熟練者、以外を非熟練者と仮定すると、図-4.16よりモータグレーダオペレータの熟練者は408人、非熟練者は97人となる。この人数に表-4.11の値を乗することにより、従来施工、MC施工によるモータグレーダ路盤敷き均し工の時間当たり全施工土量が算出できる(表-4.12)。

表-4.12によると、MC施工を導入することにより全施工土量は約34%向上し、モータグレーダ路盤敷き均し工にMC施工を導入することは、生産性に効果があることがわかる。

また、図-4.16に示した2014年の年齢階層別モータグレーダオペレータ数のうち、55歳以上の173人が10年後までにはすべて引退し、他の年齢のオペレータは10年後まで1人も辞めないと仮定すると、2024年の年齢階層別モータグレーダオペレータ数は図-4.17のようになる。ここで新規オペレータ数x人は、24歳以下に限らず、年齢によらない新規オペレータ

数と考えることができる。上記と同様に、35歳以上を熟練者、以外を非熟練者と仮定すると、2024年における熟練者は308人、非熟練者は(24+x)人となる。そこで上記の計算とは逆に、この2024年のオ

表-4.8 実作業時間平均 (h)

	熟練者	非熟練者
従来施工	0.95	1.70
MC 施工	0.86	1.07

表-4.9 平均仕上がり高さ計測回数 (回)

	熟練者	非熟練者
従来施工	3.75	4.83
MC 施工	2.25	2.00

表-4.10 作業時間平均 (h)

	熟練者	非熟練者
従来施工	1.58	2.51
MC 施工	1.24	1.40

表-4.11 時間・人当たりの施工土量 (m<sup>3</sup>/h・人)

	熟練者	非熟練者
従来施工	266	167
MC 施工	339	300

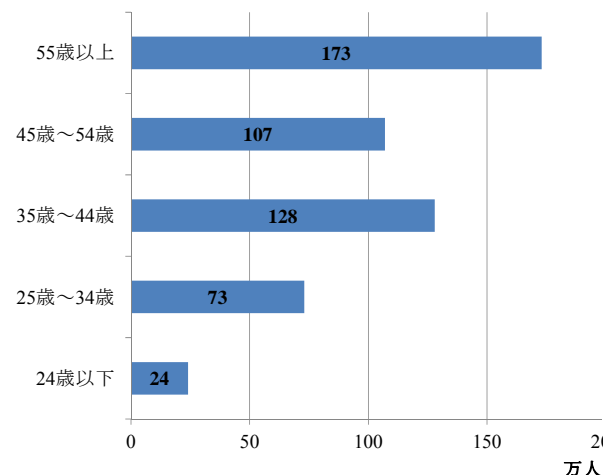


図-4.15 年齢階層別建設業就業者数 (2014年)  
(建設業ハンドブック2015)

ペレータ数にて、表-4.12に示した2014年従来施工での全施工土量  $1.25 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{h}$  を達成するために必要な新規オペレータ数x人を算出すると表-4.13のようになる。

表-4.13によると、10年後も2014年従来施工での全施工土量  $1.25 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{h}$  を達成するためには、従来施工のままでは新規オペレータを234人確保しなければならないのに対し、MC施工を導入した場合は、約1/5の44人確保すればよいことになる。建設産業は他産業と比べ、高齢者の割合が高くなっており、近い将来の高齢者大量退職に伴う熟練技能者不足が危険性として存在している<sup>(4)</sup>。MC施工の導入は、この将来予想されている熟練技能者不足に対しても、効果的であることがわかる。

これまで述べたように、上記試算は下記の3つの仮定のもとに行われている。

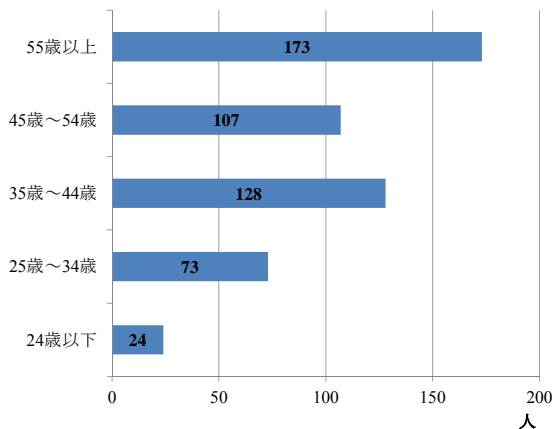


図-4.16 年齢階層別モータグレーダオペレータ数 (2014年・図-4.20より仮定)

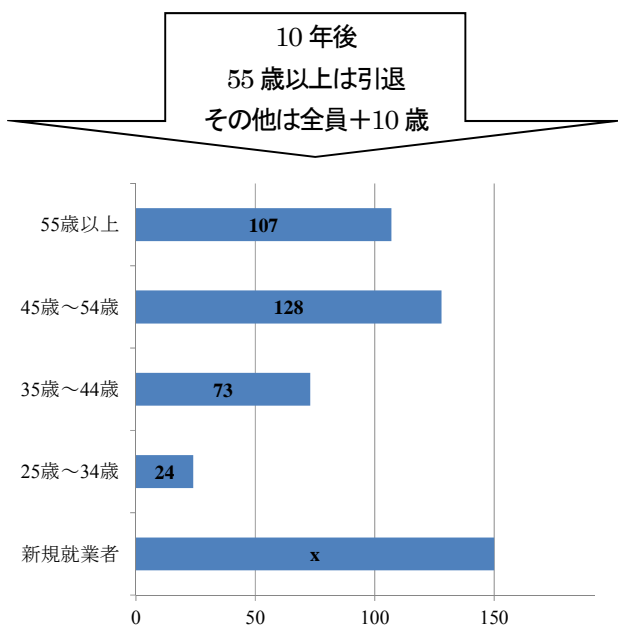


図-4.17 年齢階層別モータグレーダオペレータ数 (2024年・図-4.21より仮定)

表-4.12 時間当たり全施工土量 (m<sup>3</sup>/h)

従来施工	1.25×10 <sup>5</sup>
MC 施工	1.67×10 <sup>5</sup>

表-4.13 2024年に2014年従来施工での全施工土量を達成するために必要な新規オペレータ数 (人)

従来施工	234
MC 施工	44

- ① モータグレーダオペレータの年齢階層別人数は建設就業者数 (図-4.15) の0.01%である。
- ② 年齢35歳以上を熟練者、以外を非熟練者とする。

- ③ 2014年に55歳以上であるオペレータは10年後までにはすべて引退し、他の年齢のオペレータは10年後まで1人も辞めない。

これらの仮定は現実と比較して正確ではないが、現実とそれほど大きく乖離はしていないと考えられる。従って上記の試算結果数値は必ずしも正確ではないが、MC施工の導入が、生産性の向上、熟練技能者不足への対応に効果的であるとは言えると考えられる。

## 5. 道路土工と舗装の一体型設計手法の提案

### 5.1 設計条件の確率分布を考慮した理論的設計手法の概要

平成14年「土木・建築にかかる設計の基本<sup>10)</sup>」の策定に伴い、舗装の構造設計に信頼度が導入され<sup>11)</sup>、信頼性を考慮した設計 (安全係数を用いた設計法: 信頼性設計法レベル1に相当<sup>12)</sup>) が可能となった。しかし、現行の設計法は簡便ではあるものの、材料や構造等の設計変数のバラつきを考慮できないという課題があり、信頼性設計法に関する検討が進められている<sup>13)</sup>。そこで本研究では、2章に示した検討成果をもとに、設計変数のバラつきを考慮した信頼性設計法として、理論的設計手法に対しモンテカルロシミュレーションを用いて舗装の構造的信頼性を算定する手法を考案した。

本手法の計算フローを図-5.1に示す。本手法は、モンテカルロシミュレーションによって、設定した舗装断面の許容49kN輪数の分布を予測し (図-5.2参照)、設計輪数を上回る確率を計算することで舗装の構造的信頼性を算定するもの (信頼性設計法レベル3に相当<sup>12)</sup>) である。また、設計変数 (各層の弾性係数、各層の厚さ、載荷荷重) を互いに独立な正規確率変数として計算し、各設計変数の分布が信頼度  $R_m$  に与える影響を評価することが可能である。

### 5.2 検討概要

本手法を用いて材料条件である弾性係数のバラつきがアスファルト舗装の信頼性に与える影響について検討した結果を以下に記す。

検討断面の概要を表-5.1に示す。設計条件として、高規格幹線道路 (交通量区分N7) における設計盛土上の舗装を想定し、地盤条件 (路床 CBR) が異なる3水準を設定した。また、各層の厚さは、経験的設計法 (以下、 $T_A$ 法という) を参考に設定した。なお、検討断面No3は、盛土施工時に良質な材料が使用されたことを想定し路床 CBR30%とした。このような場合、 $T_A$ 法では設計 CBR20以上として扱うため検討断面No2と同一断面となる。次

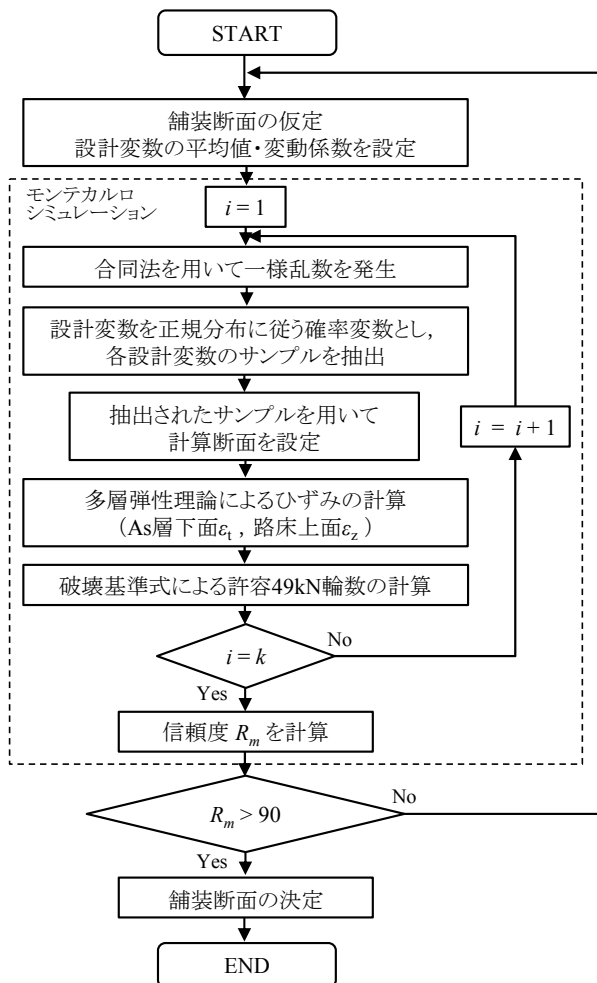


図-5.1 本手法の計算フロー

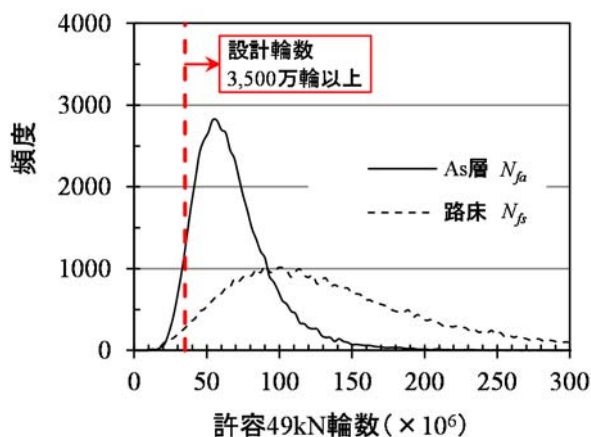


図-5.2 許容49kN輪数の分布予測結果の一例

表-5.1 検討断面の概要 (交通量区分N7)

検討断面 No	路床 CBR (%)	各層の厚さ(cm)			
		表層基層	As 安定処理路盤	上層路盤 M-30	下層路盤 C-40
1	8	15	8	20	25
2	20	15	8	-	20
3	30	15	8	-	20

に、各層の弾性係数の計算条件を表-5.2 に示す。弾性係数のバラつきの設定として、路床・路盤の変動係数を2水準 (CV0.2、CV0.1) 設定した。また、表基層とアスファルト安定処理路盤については、アスファルト混合物の温度依存性を考慮し変動係数を0.2に固定した。なお、本検討では、弾性係数のバラつきが信頼性に与える影響のみを評価するため、各層の厚さおよび載荷荷重 (単輪荷重 49kN、接地圧 0.59MPa) に関してはバラつきを考慮しないこととした。

### 5.3 検討結果

#### 5.3.1 繰り返し計算回数の検討

モンテカルロシミュレーションを用いる場合、精度の良い結果を得るためには多くの試行回数が必要となる。そこで、本検討における最適な繰り返し計算回数  $k$  を決定することを目的に、検討断面 No2 (変動係数 CV0.2) について繰り返し計算回数と信頼度  $R_m$  の推定精度の関係を整理した。その結果を図-5.3 に示す。

図-5.3 より、繰り返し計算回数が1万回以上であれば、信頼度  $R_m$  の値が概ね収束することがわかった。この結果より、本検討における繰り返し計算回数は5万回とした。

#### 5.3.2 弾性係数のバラつきが信頼性に与える影響に関する検討

今回検討した6ケース (断面3水準×変動係数2水準) について本手法より得られたアスファルト層の許容49kN輪数  $N_{fa}$  の予測分布を設計輪数 3,500万輪で除した結果を図-5.4 に示す。図-5.4 より、アスファルト層の許容49kN輪数  $N_{fa}$  の予測分布 (10~90%) は、 $T_A$ 法で設計した全ての検討断面において設計輪数を上回る結果を得た。また、図-5.4の結果を整理し、信頼度  $R_m$  および耐用年数を算定した結果を表-5.3 に示す。信頼度  $R_m$  は、許容49kN輪数の予測分布から設計輪数を上回る確率を算出した。また、耐用年数は次式より算出した。

$$\text{耐用年数} = \frac{\text{許容49kN輪数予測分布の下から10\%の輪数}}{\text{設計輪数}} \times 10\text{年} \quad (5.1)$$

表-5.3 より、検討断面ごとの比較を行うと、検討断面 No1 は、検討断面 No2 に比べ信頼度  $R_m$ 、耐用年数ともに高い数値を示している。また、検討断面 No3 は検討断面 No2 と同一舗装断面であるが検討断面 No2 よりも路床の弾性係数が高い分、長期供用性に期待できることがわかった。次に、変動係数ごとの比較を行うと、路床・路盤の弾性係数の変動係数を小さく設定すれば、全ての検討断面において許容49kN輪数の予測分布のバラつきが小さくなり、信頼度  $R_m$ 、耐用年数ともに高い数値を示すことがわかった。このことより、路床・路盤の弾性係数のバラつきが舗

装や路床の信頼性に大きく影響することがわかった。  
以上の検討結果より、得られた知見を以下に示す。

表-5.2 各層の弾性係数の計算条件

	平均値 (MPa)	変動係数	
		CV0.2	CV0.1
表層基層	5,000	0.2	0.2
As 安定処理路盤	3,500	0.2	0.2
上層路盤 M-30	400	0.2	0.1
下層路盤 C-40	250	0.2	0.1
路床	10×CBR	0.2	0.1

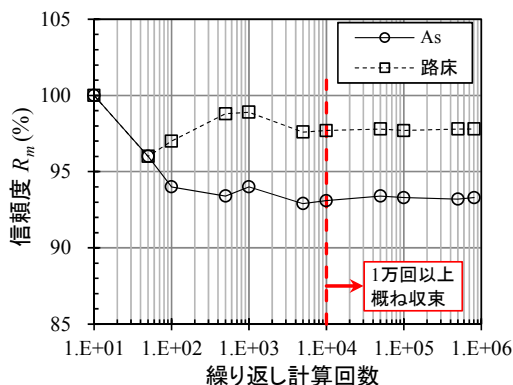


図-5.3 繰り返し計算回数の検討結果

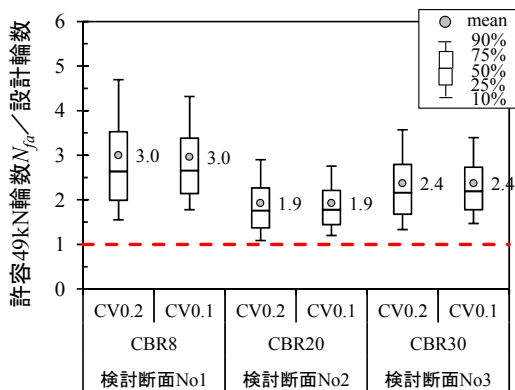


図-5.4 許容49kN輪数  $N_{fa}$  / 設計輪数

表-5.3 信頼度  $R_m$  および耐用年数の算定結果

検討断面 No	路床 CBR (%)	変動係数 CV	信頼度 $R_m$ (%)		耐用年数 (年)	
			As	路床	As	路床
			1	8	0.2	99.0
		0.1	99.9	100	17.7	26.1
2	20	0.2	93.4	97.8	10.9	16.6
		0.1	96.8	99.9	12.0	21.7
3	30	0.2	97.8	99.9	13.3	42.5
		0.1	99.2	100	14.7	58.7

- 1) 路床・路盤の弾性係数のバラつきが舗装や路床の信頼性に大きく影響することがわかった。
- 2) 本手法により、許容49kN輪数の予測分布や信頼度  $R_m$ 、耐用年数を確認することで、舗装断面決定の際の経済性評価や設計期間の設定がより合理的に行える

可能性があることがわかった。

- 3) 本手法により、従来の  $T_A$  法では考慮できなかった CBR20 以上の路床土に対する設計手法の構築の可能性を見出した。

### 5.4 今後の課題

今回の検討においては、舗装設計便覧に示されている値を参考にして、弾性係数の分布性状を仮定して検討を行った。今後は、各材料の弾性係数の分布性状を明らかにすることを目的とした室内試験、現場試験の評価手法についてさらなる検討を進め、路床・路体の品質管理の状況を舗装の設計に反映できるようにしたいと考える。

### 6. まとめ

本研究から次のことが明らかになった

- ・舗装材料による補修間隔はいずれの材料を用いた舗装もほぼ同程度であった。
- ・改質H型を用いた舗装は補修間隔4年～16年程度に多く分布がみられ、補修間隔10年でピーク値を示すが、その他改質アスファルトを用いた舗装は、補修間隔3年～13年程度に多く分布し、補修間隔7年がピーク値であった。
- ・補修工法としては、路上路盤再生工法、切削薄層コンクリート舗装工法、切削表面処理工法、路上表層再生工法(リミックス)が補修間隔が比較的長く、安定して長期間舗装性能を保持することができるものと考えられる。
- ・維持工事であるシーラ材注入工法・表面処理工法を除くと、その他の補修工法、切削オーバーレイ工法、局部打換え工法、わだち部オーバーレイ工法では比較的短い間隔(10年以内)で補修が行われる割合が多い。
- ・路床、路盤の品質管理手法として、衝撃加速度測定装置、小型FWD、キャスポル、土壌硬度計の適用性を確認した結果、各試験器ごとに得られる値は異なるものの、路床の締固め状態を評価できる可能性があることが分かった。しかし、比較的粒径の大きい礫質分を多く含む路盤への適用については、礫質分が各装置の測定結果に与える影響についてさらなる検討が必要である。
- ・舗装走行実験場における試験施工箇所の追跡調査の結果より、路床の締固め度が小さいほど、路床を含めた舗装全体の支持力を表す  $D_0$  たわみ量や舗装路面のわだち掘れ深さは大きくなる傾向にあり、路床の締固め度が舗装の構造的健全度に大きく影響を与える可能性があることがわかった。

- ・オペレータにて MC 施工を導入することにより作業時間の短縮、バラツキの改善が可能である。
- ・MC 施工導入による作業時間短縮率、バラツキ改善率は非熟練者の方が高い。
- ・非熟練者に MC 施工を導入した場合、ほぼ熟練者並みの実作業時間 (約 30~40 分)、熟練者並みのバラツキ (標準偏差約 1cm 以内) で施工できる可能性がある。
- ・平坦性はオペレータの経験、MC 施工の有無による明確な傾向はなく、その値も (特異なデータを除くと) ほとんど同一である。
- ・敷き均し施工直後の出来形にはオペレータの経験、MC 施工の有無によって明確な傾向が現れたが、敷き均してから転圧を行った後の平坦性では、明確な傾向は現れなかった。
- ・直轄工事における情報化施工の複数技術の活用等の調査を行い、情報化施工の効果的な活用方法の整理を行った。その結果事例集として 27 事例の説明資料を作成できた。
- ・施工条件を同一にした 2 つの試験場にて従来施工と MC 施工を行った結果、MC 施工を導入することにより従来施工に比べ、作業時間の短縮、仕上がり高さ計測回数削減、出来形バラツキの改善が図られ、その効果は非熟練オペレータの方が高い。
- ・上記効果を定量的に表すと、全オペレータ平均にて、作業時間短縮約 27.7%、仕上がり高さ計測回数削減約 51.9%、出来形バラツキ改善約 46%であった。特に出来形バラツキ (設計面からの乖離) は MC 施工を導入することにより、オペレータによらず標準偏差約 0.013m の範囲内に収められることが可能であることがわかった。これは道路設計時に考慮することが可能である。
- ・6 名中 5 名のオペレータで、MC 施工を導入することで施工中の心拍数が低下しており、オペレータ負担を低減できる可能性がある。
- ・視線データが取得できたすべてのオペレータにて、MC 施工導入によりブレード近傍注視時間割合が減少しており、より安全な施工ができる可能性がある。
- ・ある条件の下で試算した結果、MC 施工を導入することにより生産性を約 34%向上できる可能性があることがわかった。また、MC 施工の導入は、将来予想されている熟練技能者不足に対しても効果的であることもわかった。

- ・道路土工と舗装の一体型設計手法について検討した結果、提案した設計手法により、許容 49kN 輪数の予測分布や信頼度  $R_m$ 、耐用年数を確認することで、舗装断面決定の際の経済性評価や設計期間の設定がより合理的に行える可能性があることがわかった。
- ・道路土工と舗装の一体型設計手法について検討した結果、提案した設計手法により、従来の  $T_A$  法では考慮できなかった CBR20 以上の路床土に対する設計手法の構築の可能性を見出した。

## 参考文献

- 1) 丸山輝彦、姫野賢治、林正則：FWD たわみ測定による舗装の健全度評価、舗装、Vol.24、No.9、pp3~8、1989.9
- 2) 松井邦人、井上武美、二瓶辰之：舗装各層の弾性係数を表面たわみから推定する一手法、土木学会論文集、第 420 号、V-13、pp107~114、1990.8
- 3) 阿部長門、丸山輝彦、姫野賢治、林正則：たわみ性能指標に基づく舗装の構造評価、土木学会論文集、第 460 号、V-18、pp41~48、1993.2
- 4) 阿部長門、丸山輝彦、姫野賢治、林正則：高速道路における路床強度が舗装構造に与える影響、土木学会第 53 回年次学術講演会、V-29、pp58~59、1998.10
- 5) 小林尚登、赤木寛一、池内達宣：FWD による舗装構造値と路面性状測定によるひび割れ率との関係、第 10 回地盤工学会関東支部発表会、2013.10
- 6) 三浦真紀、赤木寛一、池内達宣、小林尚登：FWD による舗装構造値と路面性状値を用いた補修効果の調査、2014.10
- 7) 社団法人日本道路協会：道路土工「軟弱地盤対策工指針」、2012.8
- 8) 一般財団法人土木研究センター：ジオテキスタイルを用いた補強土の設計・施工マニュアル 第二回改訂版、2013.12
- 9) 情報化施工推進会議：情報化施工推進戦略～「使う」から「活かす」へ、新たな建設生産の段階へ挑む！！～、2013.3
- 10) 国土交通省：土木・建築にかかる設計の基本、平成 14 年 10 月
- 11) (社)日本道路協会：舗装設計便覧、pp19-21、2006.
- 12) 星谷 勝、石井 清：構造物の信頼性設計法、鹿島出版会、1986.
- 13) 西澤 辰男： $T_A$ 法によるアスファルト舗装の信頼性評価、土木学会論文集 No.781/V-66、2005.6

## A Study on Integration Design of the Road Earthworks and the Pavement

**Abstract** : Road earthwork and the pavement are designed based on an independent design system. We think that it is can be expect an economical design and durable improvement by the integration design of road earthwork and the pavement. As a result, we think that it is can be expect cost reduction and lifelong duration.

We examined integration design technique of road earthwork and the pavement, quality control technique of road earthwork and the base course. Moreover, we examined a utilization method of the observational method and evaluation technique for quality assurance.

**Key words** : road earthworks, pavement, integration design, performance evaluation, quality control