

◆ 特集：道路構造物の性能評価技術 ◆

路床剛性を評価する現場試験法

中島伸一郎* 大下武志**

1. はじめに

新技術の開発促進、建設コスト縮減の観点から、道路建設において性能規定化が進められている。舗装構造については既に性能規定化が図られているが、舗装の基盤である路床・路体についても今後性能規定化が求められると推測される。

路床は舗装と一体となって交通荷重を支えるものであるため、舗装の長期的な性能を評価するためには、舗装が構築された状態で路床がどのような力学挙動を示すのかという検討が必要である。さらに、今後の理論設計への展開を踏まえると、耐久性の評価については、これまでのCBRや締固め度（密度比）といった材料性状や施工状態に基づく指標だけでなく、弾性係数等の力学定数を指標とする必要がある。

一方、路床の弾性係数といってもその試験方法は各種提案されており、その適用性や精度は必ずしも明らかではない。また、土質材料の弾性係数は、締固め度（密度）で一意に定まるものではなく、含水比や拘束圧などに依存する。

本研究では、路床の品質管理および舗装の理論設計に資する路床剛性の評価技術の確立を目的として、実大路床において路床剛性を求める各種現場試験法の比較を行い適用性と評価深度について検討を行った。また、舗装構築前後での路床剛性の変化や浸水前後での路床剛性の変化について試験舗装や室内実験により検討し、路床剛性の拘束圧や含水比依存性について基礎的なデータを取得した。

2. 路床の要求性能と現場試験法

路床の役割は、交通荷重を受け持つ舗装を支持することであり、舗装の耐久性にかかわる路床の性能としては、

①舗装と一体となって交通荷重を支持すること。

②舗装から伝達されてきた荷重を路体に十分分散させて伝達すること。

③支持力が面的に均質であることが要求される。

従来、路床の品質は主に締固め度（密度比）とCBRによって評価されてきた。締固め度は、材料の強固さや安定性（繰り返し荷重や浸水などによっても品質が劣化しにくい性質）を表す重要な指標であるが、締固め度自体は、路床の力学特性を直接表すものでない。また、CBRは浸水状態の材料強度を表す指標であるが、試験法の性質上、境界条件が複雑で、試験結果が持つ力学的意味が不明確である。すなわち、締固め度やCBRは、値が高ければ路床の品質が高いことは定性的にわかるが、例えば、値の変動が舗装の変形性や耐久性にどの程度寄与するかという点については、定量的な評価が困難である。

一方、上述の①、②の性能は、多層弾性解析やFEMなどの計算手法によって、舗装と路床の一体構造として評価が可能である。そして、これらの計算手法では、路床の物性として弾性係数等の力学定数が必要となる。したがって、路床の性能指標としては弾性係数（以下、路床剛性）が有効であり、性能評価手法としては、路床剛性を直接的に評価できる試験法が望ましいといえる。また、③の路床の均質性については、面的に評価できる試験法や多点計測が可能な試験法が望ましい。

表-1は、路床の品質を評価する現場試験法をまとめたものである。これらの中で、路床剛性の評価手法として最も一般的で信頼性が高いと考えられるのは平板載荷試験である。しかしながら、平板載荷試験は反力を必要とし、測定に時間と労力がかかることから、多点での計測が困難である。これに対し、近年では、FWD試験、小型FWD試験、急速平板載荷試験など、重錘落下を載荷源とするタイプの試験法が提案されてきている。これらの試験では、路床剛性を直接的に評価すること

In-Situ Test Method Evaluating Subgrade Stiffness

表-1 代表的な現場試験法

	試験法	測定値
密度	砂置換法など	密度
	RI法	飽和度
強度 変形	現場CBR試験	CBR
	簡易支持力測定試験	
	平板載荷試験	地盤反力係数K 弾性係数E
	FWD試験	
	小型FWD試験	
	急速平板載荷試験	たわみ
プルーフローリング		

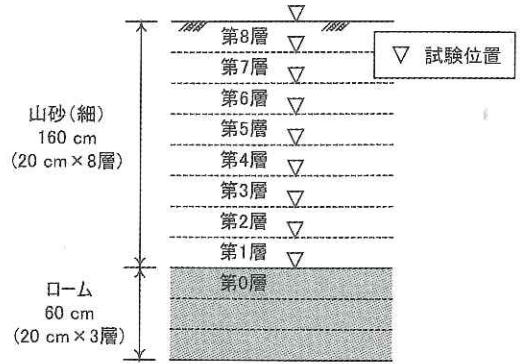


図-1 実大路床断面

ができ、かつ、大きな反力を必要としないことから多点計測が可能で、路床剛性を評価するには優れた方法であると考えられる。

2. 実大路床による現場試験法の比較

表-1に示したの現場試験法のうち、平板載荷試験と重錘落下型試験2種類（小型FWDと急速平板載荷）について、測定精度と評価深度を検討するために、実大路床を構築し試験を実施した。

2.1 実験概要

図-1に示すように、下層60cmをローム、上層160cmを山砂（細目）とした実大路床を構築した。平面形状は5m × 10mである。路床の構築では、20cmごとのまき出し・振動転圧を行った。

試験は、いったん路床を最上面まで構築したのち、表面を20cmずつ掘削しながら各層表面で実施した。

平板載荷試験については5サイクル（6, 12, 18, 24, 40kN）の繰返し載荷（繰返し平板載荷試験）とし、各層で3地点ずつ実施した。小型FWDと急速平板については、各層6地点ずつ試験を実施した。いずれの試験も載荷板径はφ300mmを用いた。

2.2 実験結果

2.2.1 路床剛性の計測値

図-2は、計測された路床剛性を比較したものである。図より、値にばらつきは見られるものの、小型FWDと急速平板載荷による路床剛性は、平板載荷試験の路床剛性と高い相関性を有し、それぞれ1 : 1.1、1 : 0.6の関係にあることが確認できる。

2.2.2 評価深度

図-3は、ローム面から試験高さまでの距離z（=山砂層の厚さ）と路床剛性の関係を示してい

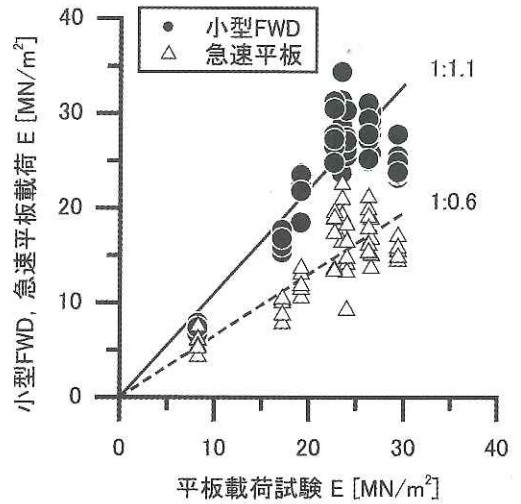


図-2 路床剛性の比較

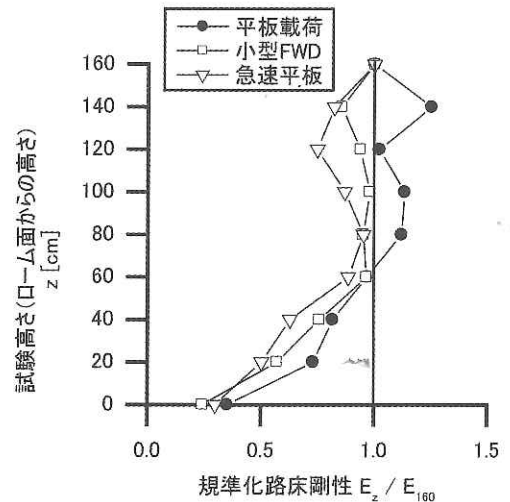


図-3 ローム面からの距離と路床剛性の関係

る。ここに、路床剛性は、z = 160cmでの値で規準化して表示している。図より、いずれの試験法

においても、 $z = 60\text{cm}$ から $z = 40\text{cm}$ の間で値が低下しはじめることが確認できる。

一般に、平板載荷試験における荷重の伝達範囲は、下方向に載荷板径の2.0倍程度 ($\phi 300\text{mm}$ の場合、深さ 600mm まで) とされており¹⁾、本実験の結果とほぼ一致している。

評価深度に関する以上の結果より、小型FWDおよび急速平板載荷の評価深度は、平板載荷試験とほぼ同程度であることが確認された。

2.3 評価深度に関する多層弾性解析

重錘落下型現場試験法の評価深度についてさらに検討するため、深部に軟弱な層が存在する路床をモデル化し、小型FWDの荷重を模擬した多層弾性解析 (ELSA) を実施した。

2.3.1 解析概要

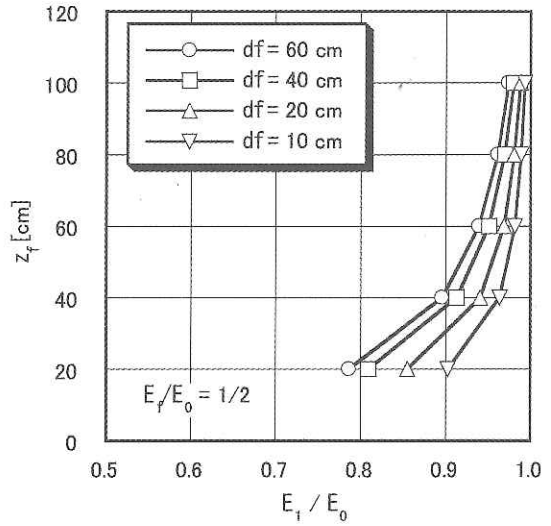
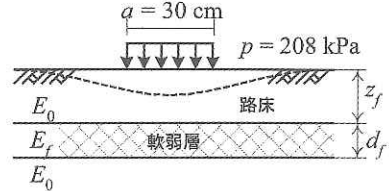
基本的な路床剛性を E_0 、軟弱層の弾性係数を $E_f = 1/2 E_0, 1/5 E_0, 1/10 E_0$ とし、厚さ $d_f = 10, 20, 40, 60\text{cm}$ の軟弱層が、路床最上面より深さ $z_f = 20 \sim 100\text{cm}$ に存在する場合について解析を実施した。荷重条件については、小型FWD試験において、 25kg の重錘を高さ 500mm から落下させた場合の最大荷重強さを参考に、 208kPa の円形等分布荷重とした。解析結果については、載荷板中心のたわみ量と荷重強さとの関係から、見かけの弾性係数 E_1 を求め、路床内に軟弱層が無い場合の弾性係数 E_0 との比 (E_1/E_0) をとって表示する。

2.3.2 解析結果

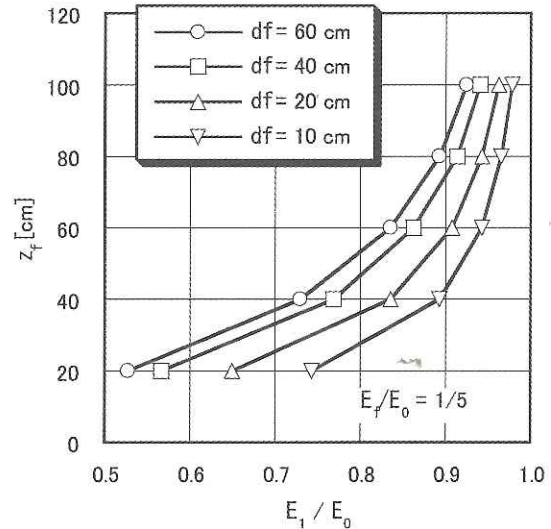
図-4は、軟弱層の弾性係数が $E_f = 1/2 E_0, 1/5 E_0$ の場合の解析結果であり、軟弱層深さ z_f と E_1/E_0 の関係を示している。前節の実大路床実験では小型FWD試験を各層9か所で実施したが、その結果によれば、同じ土質、同じ転圧条件であっても、変形係数 E は地点によって 10% 程度のバラツキが生じた。そこで、路床内部の低弾性係数の存在を明確に評価するためには、弾性係数 E の差が 10% 以上必要だと仮定すると、図-4より以下のことがわかる。

- ①実大路床での実験は、図-4 (a) の $E_f = 1/2 E_0$ で、 $d_f = 60\text{cm}$ の場合に相当する。この条件では、軟弱層からの距離が $z_f = 40 \sim 60\text{cm}$ の間で E_1/E_0 が 0.9 を下回る。この結果は図-3の評価深度に関する結果と同様の傾向を示している。
- ②低弾性係数層が $E_f = 1/2 E_0$ の場合、厚さが

10cm より薄い軟弱層については、路床面からの深さ 20cm であっても探知することが困難である。また、厚さが 60cm より薄い軟弱層については、路床面から 40cm 以上深い場合には探



(a) $E_f/E_0 = 1/2$



(b) $E_f/E_0 = 1/5$

図-4 評価深度に関する多層弾性解析結果

知が困難である。

- ③さらに軟らかい低弾性係数層 ($E_f = 1/5 E_0$) の場合、深さ40cmよりも浅い軟弱層ならば、厚さ10cm以上の弱層を探知することが可能である。一方、厚さが60cmの軟弱層であっても、1m以深に存在する場合には探知が困難である。

3. 舗装の上載が路床剛性に及ぼす影響

土質材料の弾性係数は拘束圧に依存することが知られており、また、舗装と路床面の境界面に発生する摩擦により路床の変形が抑制されることも考えられる。

舗装の上載が路床剛性に及ぼす影響を検討するため、試験舗装の構築路床面で平板載荷試験と重錘落下型現場試験を実施するとともに、舗装構築後に舗装表面でFWD試験を行って得られた測定データを逆解析し、路床剛性を推定して比較した。また、路床材料に対する室内レジリエントモジュラス試験(室内Mr試験)も実施し、別途路床剛性を求めた。

3.1 試験舗装概要

試験舗装は図-5に示すような2断面について検討を行った。平面形状はいずれの断面も幅5m、長さ10mである。

現場試験としては、路床完成時に、平板載荷試験、小型FWD試験、急速平板載荷試験を実施した。平板載荷試験は、各路床で1地点ずつ行った。また、小型FWDと急速平板載荷は、各路床で15地点ずつ試験を行った。路床材料の室内Mr試験は、「路盤材・路床土のレジリエントモジュラス試験方法」に準拠して行った。

FWD試験は、舗装完成後、荷重車走行の供用前に実施した。FWDの測定データに対して静的逆解析(BALM99)、動的逆解析(DBALM97)を行い、路床剛性を評価した。

3.2 路床剛性の比較結果

図-6は、現場試験(平板載荷、小型FWD、急速平板)、室内Mr試験、FWD逆解析によって得られた路床剛性を比較したものである。図より、以下が確認できる。

- ①3種類の現場試験による路床剛性の値はほぼ一致しており、小型FWD試験や急速平板載荷試験は平板載荷試験の代替として用いることが可能であることが確認された。

断面1 (旧B交通・信頼性90%)	断面2 (旧D交通・信頼性90%)
表層(密粒・ストアス)t=50	表層(密粒・改質II)t=50
基層(粗粒・ストアス)t=50	基層(粗粒・ストアス)t=100
上層路盤M-30 (粒度調整碎石)t=150	アスファルト 安定処理路盤 t=110
下層路盤C-40 (クラッシュラン)t=350	下層路盤C-40 (クラッシュラン)t=350
路床(構築) (設計CBR=4%) t=1000	路床(構築) (設計CBR=12%) t=1000
路体(原地盤・関東ローム)	

図-5 試験舗装断面

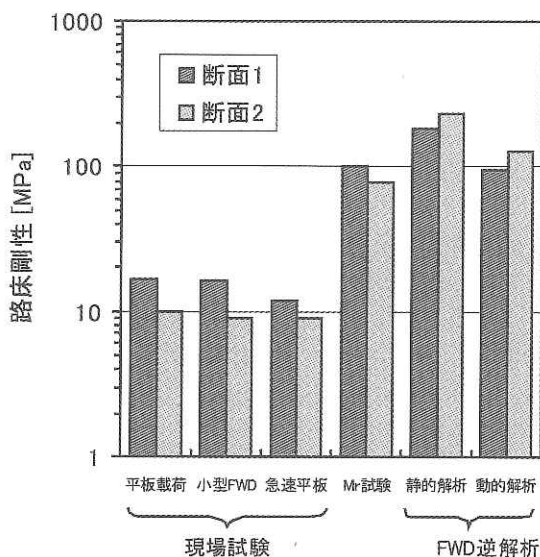


図-6 試験舗装による路床剛性の比較

- ②現場試験による路床剛性は、Mr試験やFWD逆解析による路床剛性と比べて10~20%程度の小さな値となっている。これは、舗装表面でのFWDによって路床上面に発生するひずみレベルと、現場試験で路床表面に発生するひずみレベルの差によって生じるものと考えられる。今回の試験舗装で路床表面付近に埋設されたひずみ計によれば、FWD試験時に路床上面に発生した圧縮ひずみは最大で 3×10^{-4} 程度であった。一方、平板載荷試験($\phi 300\text{mm}$ 、沈下量1.25mm)によるひずみレベルは、 6×10^{-3} 程度²⁾であり、20倍程度の差がある。既往の研

究³⁾によれば、 10^{-3} 、 10^{-4} ひずみ時の弾性係数の比 E_3/E_4 は、粘性土で $E_3/E_4 = 0.6 \sim 0.75$ 、砂質土では $E_3/E_4 = 0.4$ (拘束圧50 kPa時)で、低拘束圧になるにつれて E_3/E_4 の低下が大きくなると報告されている。これと同様に本試験舗装の結果をあらわすと、 $E_{現場}/E_{Mr,FWD} = E_3/E_4 = 0.1 \sim 0.2$ であり、上記の研究結果よりも E_3/E_4 がさらに小さい。これは舗装による拘束圧の有無によるものと考えられる。したがって、施工中に小型FWDや急速平板載荷によって求めた路床剛性を舗装設計に用いるためには、試験で求めた路床剛性をひずみレベルや拘束圧を考慮して補正する必要があるといえる。

- ③室内Mr試験による路床剛性は、FWD逆解析による路床剛性に比較的近い値を示す。これは、室内Mr試験とFWD試験時のひずみレベルが同程度 (10^{-4} オーダー) であることによると考えられる。
- ④断面1と断面2を比較すると、現場試験および室内Mr試験による路床剛性は【断面1 > 断面2】である。一方、室内CBR試験結果やFWD逆解析による路床剛性は【断面1 < 断面2】であり、逆の傾向となった。この理由は現在のところ明らかでないが、今後、荷重車走行による耐久性試験の中で、土圧計やひずみ計の長期計測を行いながら明らかにしていく必要があるといえる。

4. 浸水が路床剛性に及ぼす影響

近年、都市水害抑制や都市環境改善の観点から、交通量の多い車道においても透水性舗装を設置する機会が増加している。しかし、浸水は路床の支持力低下をもたらす可能性があることから、浸水の力学的影響を定量的に評価する必要がある。

そこで、浸水が路床剛性に及ぼす影響の把握を目的として、室内模擬路床の浸水した地盤で小型FWD試験を実施した。

4.1 実験概要

川砂、山砂、マサ土の3種類の材料で深さ4mの模擬路床を作成し、浸水状況を変えながら路床面で小型FWD試験を実施した。浸水状況の変化は、模擬地盤内の地下水位をGL-0.2m ~ -3.0mの範囲で変化させることで表現した。小型FWD試験はφ300mmの載荷板を使用し、重錘重量3種

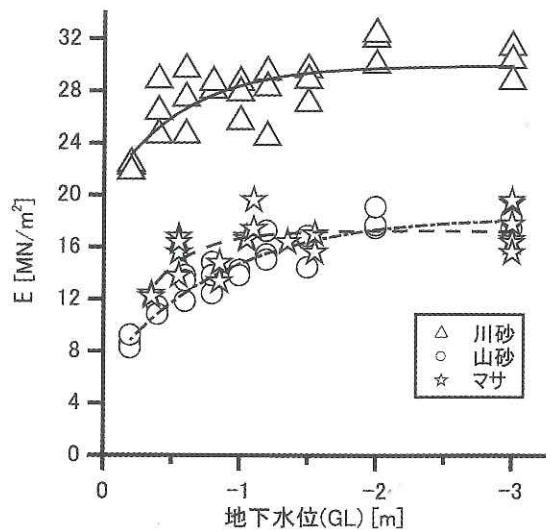


図-7 地下水位とEとの関係

表-2 施工直後と地下水位GL-0.2m時の路床剛性

土質	E [MN/m²]	
	施工直後	水位 GL -0.2m
川砂	30.9	23.9
山砂	18.7	9.12
マサ土	17.8	13.1

類 (5, 15, 25kg)、落下高さ2種類 (200, 400mm) で試験を実施した。地盤内には土中水分計を埋設し飽和度分布を計測した。

4.2 浸水時の路床剛性

小型FWD試験結果から路床剛性E [MN/m²]を算定した。図-7は、地下水位とEの関係を示す。

図より、いずれの土質においても、地下水位が浅く地表面付近がほぼ飽和状態にある場合には、地盤剛性が低下することが確認できる。表-2は、模擬地盤施工直後の地盤剛性と、地下水位GL-0.2m時の地盤剛性をまとめたものであるが、表より、浸水による地盤剛性の低下度合いは、川砂・マサ土で約75%、山砂では50%程度であることがわかる。

図-8は、土中水分計により測定された、各地下水位時の地盤内飽和度プロファイルを示している。図-8より、保水性の悪い川砂地盤では地下水位の低下に連動して地表面付近はただちに乾燥するが、保水性の高い山砂では、地下水位が低下しても地表面付近の飽和度の低下はきわめて遅いことが確認できる。

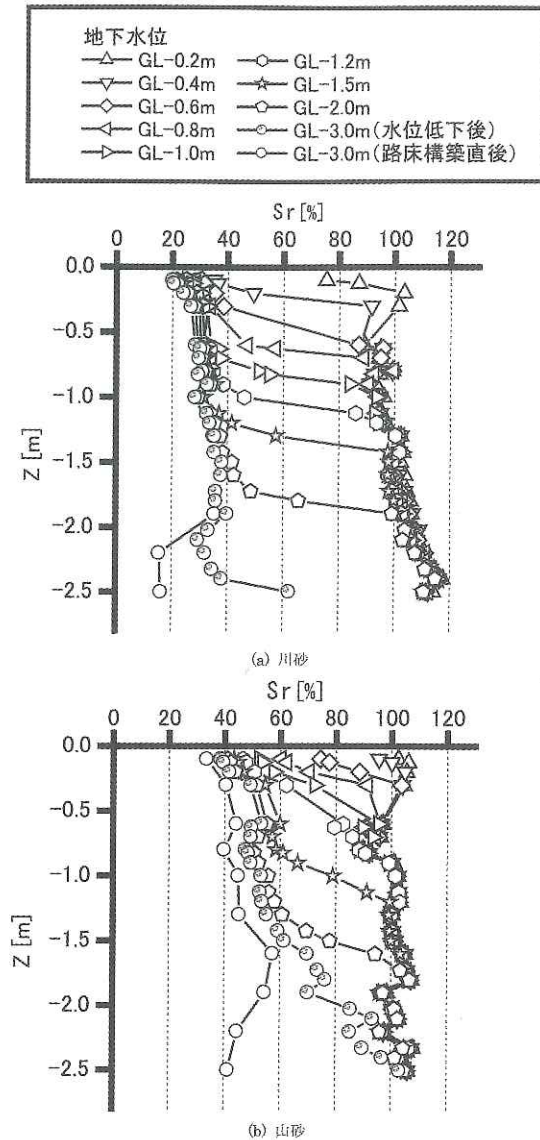


図-8 各地下水水位時の地盤内飽和度分布

5. まとめ

本研究で得られた成果を以下に列挙する。

- (1) 小型FWD、急速平板載荷などの重錘落下型の現場試験は、性能指標である路床剛性を直接的に測定することができ、静的な平板載荷試験を代替する試験法として用いることができる。また、試験が簡便で可搬性に優れることから多点計測が可能であり、路床の支持力の面的な均質性を評価する手法としても有効である。すなわち、性能規定に対応した性能

評価手法として有効であるといえる。

- (2) 舗装構築後のFWD試験から逆解析で求めた路床剛性は、路床面で測定した路床剛性の8~10倍高い値を示した。これは、現場試験のひずみレベルの差と舗装の上載による拘束圧の差によるものと考えられる。したがって、舗装の力学挙動を解析する際には、路床剛性の拘束圧やひずみレベル依存性を考慮して入力値を定めることが重要であるといえる。
- (3) 浸水時の路床剛性は、非浸水時（施工直後）の値よりも川砂・マサ土で約75%、山砂で50%程度まで低下することが確認された。すなわち、地下水や浸透水により路床が浸水しやすい現場や透水性舗装などでは、浸水による支持力の低下を考慮した設計が必要である。

参考文献

- 1) (社)地盤工学会：地盤調査の方法と解説, pp.500, 2004.
- 2) 土木学会：FWDおよび小型FWD運用の手引き、舗装工学ライブラリー-2, pp.70, 2002.
- 3) (財)鉄道総合研究所：鉄道強化路盤の合理的設計法に関する研究、鉄道総研報告、特別第6号, pp.164-167, 1996.

中島伸一郎*



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所技術推進
本部施工技術チーム研
究員, 工博
Dr. Shinichiro NAKASHIMA

大下武志**



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所技術推
進本部施工技術チーム主
席研究員
Takeshi OSHITA