

### Ⅲ-2-1 舗装の耐久性を考慮した路床の性能規定に関する調査

研究予算：運営費交付金（道路整備勘定）

研究期間：平 13～平 16

担当チーム：技術推進本部（施工技術）

研究担当者：大下武志，波田光敬，中島伸一郎

#### 【要旨】

本研究では、舗装の耐久性に関する路床の性能指標として弾性係数（以下、路床剛性）に着目し、路床剛性を直接的かつ面的に評価することが可能な施工・品質管理手法を提案することを目的として検討を行った。

その結果、小型 FWD 試験や急速平板載荷試験などの重錘落下型試験は、路床剛性を直接的かつ面的に評価することが可能であり、平板載荷試験で求める路床剛性との相関性も高いことから、性能規定に対応した施工・品質管理手法としての有効性が高いことを確認した。一方、これらの現場試験で路床面に発生するひずみレベルは、舗装施工後の交通荷重や FWD 試験によって路床面に作用するひずみレベルよりも大きいため、現場試験による路床剛性を舗装設計に用いる際にはひずみレベルの差を考慮した補正が必要であることがわかった。

キーワード：路床，施工・品質管理，弾性係数，現場試験

#### 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，舗装を支える路床・路体についても今後性能規定化が必要になると推測される。

路床の性能規定化にあたっては，舗装の機能と性能に応じて路床に要求される性能を明確にし，これを確認する施工・品質管理手法を開発する必要がある。当チームでは，要求性能に対応した施工・品質管理手法の提案を目的として調査・検討を実施した。

まず，現在提案または利用されている現場試験法を整理し，性能規定化に対して有効と考えられるものを抽出した。つぎに，室内に構築した実大路床において各種現場試験を実施し，試験の簡便さ，測定値の相関性，評価深度，適用範囲等について比較・検討を行った。さらに，試験舗装により，舗装施工後における路床の力学挙動について検討した。

#### 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，耐久性にかかわる性能としては、『舗装と一体となって交通荷重を支持すること』および『舗装から伝達されてきた荷重を路体に十分分散させ伝達すること』が挙げられる。また，『均質性』も舗装の耐久性に影響を及ぼすとされており，重要な性能であるといえる。

これらのうち，前2つの性能は，多層弾性解析やFEM

などの計算手法によって評価が可能であるため，路床の品質評価指標としては弾性係数（以下，路床剛性）が有効である。したがって，施工・品質管理手法としては，路床剛性を直接的に評価できる試験法が望ましい。また，路床の均質性については，面的に評価できる試験法や多くの点を押さえられる試験法が望ましいといえる。

表1は，路床の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，路床の剛性を評価するには優れた方法であると考えられる。

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	
	FWD 試験	地盤反力係数 K 弾性係数 E
	小型 FWD 試験	
	急速平板載荷試験	
	ブルーフローリング	たわみ
	簡易たわみ測定試験	

### 3. 実大路床による現場試験法の比較実験

表 1 に示した各試験法について、性能規定に対応した品質管理手法としての適性、適用範囲、問題点等を把握するため、実大路床を構築し試験を実施した。

本実験では、路床剛性を評価可能な、平板载荷試験、FWD、小型 FWD、急速平板载荷に着目するが、この他に、現行の施工管理手法である密度試験、CBR 試験や簡易支持力測定試験もあわせて実施した。

#### 3.1 実験の概要

路床材料として、山砂（粗）、山砂（細）、ロームの 3 種類を用いた。路床断面を図 2 に示す。1 種類の路床の広さは 5 m×5 m とし、20 cm ごとに撒き出し振動転圧を 5 回繰返し、厚さ 1 m の路床を構築した。路床の種類は上記 3 種類の材料単体のものと、下層 60 cm をローム、上層 40 cm を山砂（粗）としたものの 4 種類である。なお、すべての路床の下には、山砂（細）を十分に締固めて均質にした厚さ 3 m の路体が存在する。

密度試験、簡易支持力測定試験、FWD 試験、小型 FWD 試験、急速平板载荷試験は、各層ごと（路床厚 40, 60, 80, 100 cm 時点）に実施し、現場 CBR 試験、平板载荷試験は路床厚 1 m の最上面でのみ実施した。FWD 試験、小型 FWD 試験、急速平板载荷試験の载荷板径はすべてφ300 mm を使用した。

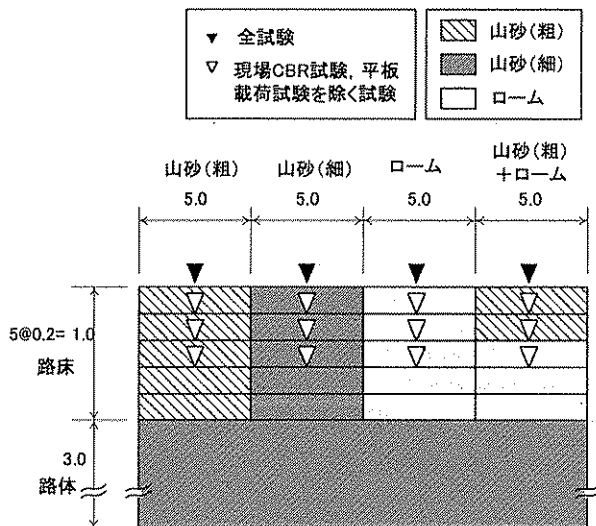


図 2 路床断面

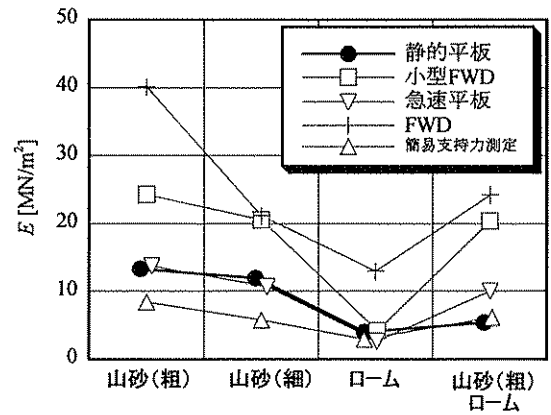
#### 3.2 実験結果

図 3 は、各路床の最上面で測定された路床剛性および CBR を示す。図 3 (b) では、各路床材料の室内 CBR

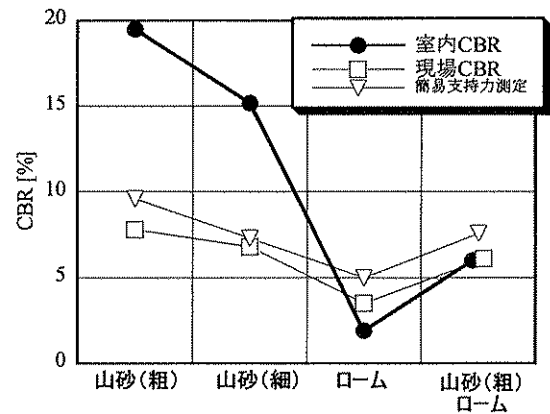
も示した。なお、山砂（粗）とロームによる 2 層構造の路床の CBR については、層厚を考慮した平均的な室内 CBR を次式によって算出し表示している。

$$CBR = \{(h_1 \cdot CBR_1^{1/3} + h_2 \cdot CBR_2^{1/3}) / 100\}^3 \quad (1)$$

ただし、 $h_1$ 、 $h_2$  はそれぞれ山砂粗とロームの厚さ [cm]、 $CBR_1$ 、 $CBR_2$  はそれぞれ山砂粗とロームの室内 CBR 値 [%] である。



(a) 路床剛性



(b) CBR

図 3 路床最上面で測定された路床剛性 E および CBR

図 3 より、いずれの試験結果も路床材料の差に対して同様の変化を示しており、高い相関性が確認できる。図 3(a)より、路床剛性の値については、試験法による差異が見られるが、これは、载荷速度や载荷荷重の大きさの差によるものと考えられ、これらを見直すことで値を一致させることは可能であると考えられる。また、図 3(b)より、簡易支持力測定試験による CBR は、現場 CBR と比較的良好に一致しており、簡易支持力測定試験が現場 CBR 試験の代用として利用できる可能性が高いことを示している。

今回の実験では、小型 FWD および急速平板载荷を

各層 9 点ずつ行ったが、1 地点の試験は数分で完了するので、試験の簡便性、多点計測の観点から優れているといえる。

簡易支持力測定試験については各層 16 点ずつ行ったが、1 地点の試験が 1 分程度で完了するので、実施した試験法の中で最も簡便な試験であった。

FWD については、路床剛性に対する荷重エネルギーが大きすぎるために、沈下が局所的で、残留沈下量が大きい。また、ロームのような軟弱路床の場合、複数回試験を実施しても値が安定しないなどの問題点が挙げられる。したがって、路床で FWD を実施する場合には、荷重荷重を小さくするか、荷重板径を大きくするなどの工夫が必要である。

## (2) 評価深度について

図 4 は、路床施工中の各段階で実施した小型 FWD および急速平板荷重の結果である。ロームと山砂(粗)を使った路床では、山砂に変わった直後(図 4 点 A)、すなわち、ローム 60cm の上に山砂(粗)を 20cm 施工した段階の路床剛性は、山砂(粗)単体とローム単体の中間的な値となっている。さらに、山砂(粗)を 20cm 構築した段階(図 4 点 B)では、ほぼ山砂(粗)単体の値まで回復している。山砂(粗)の厚さ 40 cm までのデータしかないため、定かなことはいえないが、この結果より、小型 FWD や急速平板荷重では、深さ 40 cm 程度までの地盤の平均的な物性を評価しているものと考えられる。

## 4. 路床剛性を求める現場試験法の比較実験

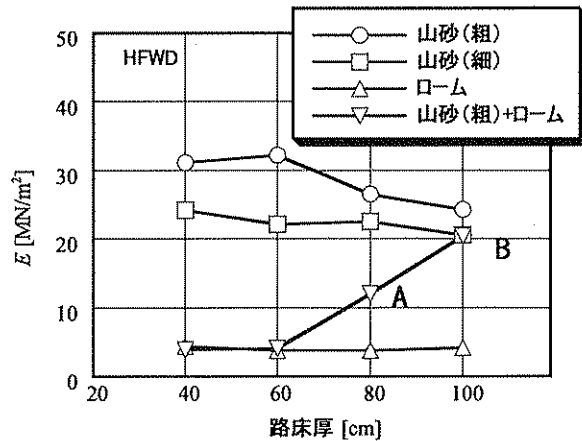
前節の実験により、小型 FWD、急速平板荷重は、路床剛性を評価する手法として、直接的かつ簡便な手法であることが確認された。そこで、平板荷重試験、小型 FWD、急速平板荷重について、測定される路床剛性値の相関関係および評価深度についてさらに検討するため、新たに模擬地盤を作製して試験を行った。

### 4.1 実験概要

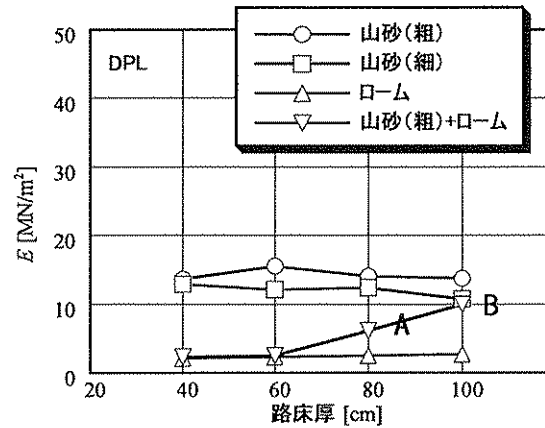
図 5 に示すように、下層 60 cm をローム、上層 160 cm を山砂(細)とした実大路床を作製した。平面形状は 5m×10m である。路床の作成では、前節の実験と同様に 20 cm ごとのまき出し・振動転圧を行った。

前節の実験では、路床の作成過程で各試験を実施したが、その場合、盛土の上転圧によって地盤が締め固まり、路床剛性が変化してしまう可能性がある。そこで、今回の実験では、いったん路床を最上面まで施工

したのち、表面を 20 cm ずつ掘削しながら各層表面で試験を実施した。



(a) 小型 FWD 試験



(b) 急速平板荷重試験

図 4 路床厚と路床剛性 E との関係

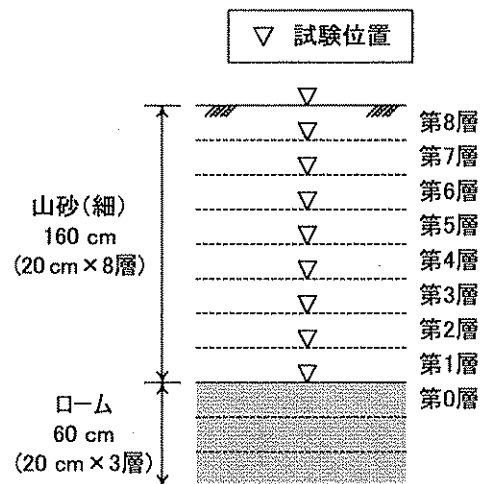


図 5 路床断面

実施した試験は、平板载荷試験、小型 FWD、急速平板の 3 種類である。平板载荷試験は 5 サイクル (6, 12, 18, 24, 40 kN) の繰返し载荷 (繰返し平板载荷試験) 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。いずれの試験も载荷板径は  $\phi 300$  mm を用いた。

## 4.2 実験結果

### (1) 路床剛性の計測値の相関関係

図 6 は、各試験で計測された路床剛性を、比較したものである。図 6 より、値にばらつきは見られるものの、小型 FWD による路床剛性は、平板载荷試験の路床剛性とほぼ 1:1.1 の関係にあることが確認できる。また、急速平板载荷による路床剛性は、平板载荷試験の路床剛性とほぼ 1:0.6 の関係にあることが確認できる。小型 FWD と急速平板による路床剛性は互いに 2 倍程度異なっているが、これは、小型 FWD では重錘重量と落下高さを 3 種類ずつ変化させて地盤剛性を求めているのに対し、急速平板では重錘重量と落下高さを固定して実験を実施したことが影響しているものと考えられる。

### (2) 評価深度

図 7 は、ローム最上面からの距離と計測路床剛性の関係を示している。図より、小型 FWD と急速平板载荷では、ローム面から 40 cm の時点で値が低下しはじめることが確認できる。この結果は、前節の室内実験結果と整合しており、小型 FWD および急速平板载荷の評価深度が 40 cm 程度であることが再確認された。

平板载荷試験では、ローム面から 60 cm の時点で値が低下しはじめることが確認できる。一般に、平板载荷試験における荷重の伝達範囲は、下方向に载荷板径の 2.0 倍程度 ( $\phi 300$  mm の場合、深さ 600 mm まで) とされており<sup>1)</sup>、本実験の結果と一致している。

評価深度に関する以上の結果より、小型 FWD および急速平板载荷を施工管理手法として採用する場合には、少なくとも厚さ 40 cm ごとに実施する必要がある。ただし、地盤の物性が大きく変わった場合や载荷板径が 300 mm よりも小さい場合には、さらに頻繁に実施する必要がある。

## 5. 試験舗装による路床剛性の検討

路床剛性の評価手法としては、これまで述べてきた現場試験による方法以外に、室内レジリエントモジュラス試験 (Mr 試験) による方法や、舗装表面での FWD

試験の測定データを逆解析して路床剛性を推定する方法がある。

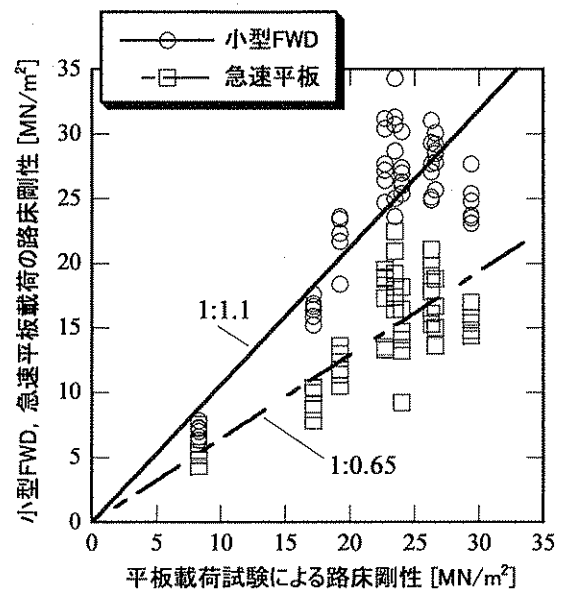


図 6 路床剛性の比較

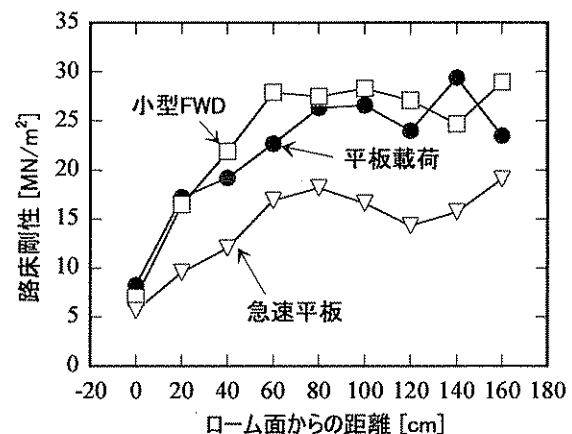


図 7 ローム面からの距離と路床剛性の関係

そこで、土木研究所舗装走行実験場内に試験舗装を構築し、上記 3 手法の路床剛性を比較した。

### 5.1 試験舗装概要

試験舗装は図 8 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 5 m、長さ 10 m である。

現場試験としては、路床完成時に、平板载荷試験、小型 FWD、急速平板载荷を実施した。平板载荷試験は、各路床で 1 地点ずつ行った。また、小型 FWD と急速平板载荷は、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。

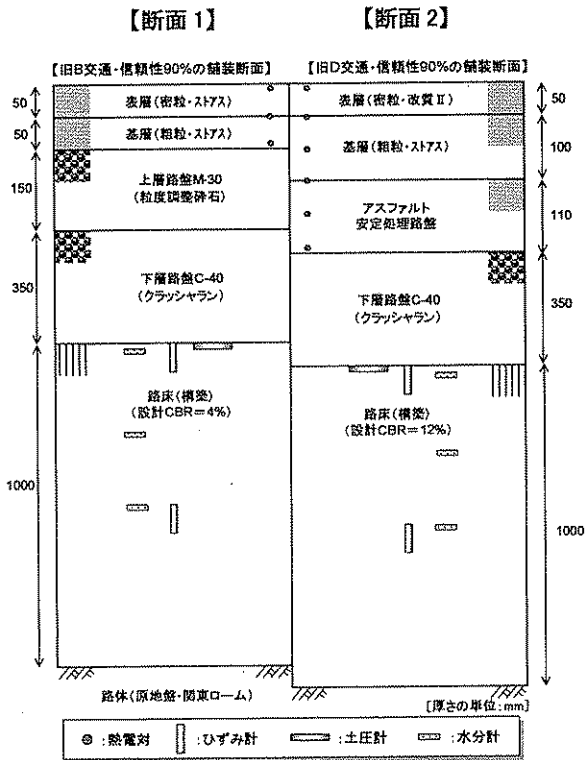


図8 試験舗装の断面

## 5.2 路床剛性値の比較結果

図9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いる。これは、室内実験の結果と同様の傾向であり、小型FWDや急速平板載荷は、平板載荷試験の代わりとして用いることが可能であることが確認された。
- 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 $3 \times 10^{-4}$ 程度であった。一方、平板載荷試験( $\phi 300$  mm、沈下

量1.25 mm)によるひずみレベルは、 $6 \times 10^{-3}$ 程度<sup>2)</sup>であり、20倍程度の差がある。ある研究<sup>3)</sup>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、 $E_{現場}/E_{Mr, FWD} \approx E_3/E_4 = 0.1 \sim 0.2$ であり、上記の研究結果よりも $E_3/E_4$ がさらに小さい。しかし、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。

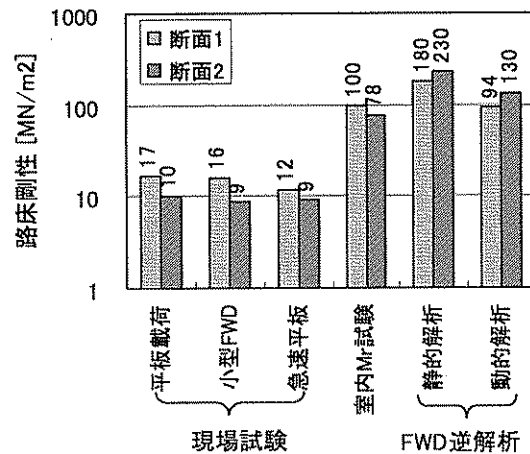


図9 試験舗装による路床剛性の比較

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を考慮して割増す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。

## 6. まとめ

本研究で得られた成果を以下に列挙する。

- ・小型FWD試験や急速平板載荷試験などの重錘落下

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、路床の面的な均質性を評価することができる。すなわち、性能規定に対応した施工・品質管理手法として有効であるといえる。

- 小型 FWD 試験や急速平板載荷試験による路床剛性は、平板載荷試験による路床剛性と高い相関性を有する。すなわち、平板載荷試験の代替として用いることが可能である。
- 小型 FWD 試験や急速平板載荷試験の評価深度は 40 cm 程度（載荷板径 300 mm の場合）である。したがって、路床の施工管理で用いる場合には、厚さ 40 cm 程度ごとに試験を実施する必要がある。
- 現場計測によって得られた路床剛性を多層弾性解析等の理論設計に用いる場合には、ひずみレベルに応じた補正が必要となる。本研究の試験舗装の場合、現場試験（平板載荷、小型 FWD、急速平板載荷）に

よる路床剛性  $E_{現場}$  と室内 Mr 試験による路床剛性  $E_{Mr}$ 、FWD 逆解析による路床剛性  $E_{FWD}$  との関係は  $E_{Mr} \approx E_{FWD} \approx 8 \sim 10 \times E_{現場}$  となった。

なお、本研究は限られた条件下での検討結果であるので、今後も同様の検討を継続し、データを蓄積していく必要があると考える。

#### 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.