

アスファルト舗装の詳細調査に用いられる 舗装たわみ測定装置の紹介

寺田 剛

1. はじめに

平成28年に国土交通省において「舗装点検要領」¹⁾が策定され、点検が実施されている。この「舗装点検要領」では、点検の結果、路面の状態が早期に劣化していることが確認された区間については詳細調査により路盤以下の健全性の確認などを行い、これに基づき適切な修繕等を実施することが求められており、これらを現場で実際に取り組むために参考となる実務的な技術図書類の整備が求められていた。そこで、(公社)日本道路協会から令和5年3月に詳細調査の具体的な方法や、修繕設計の手順や選択肢を示す図書として、「アスファルト舗装の詳細調査・修繕設計便覧」²⁾(以下「詳細調査・修繕設計便覧」という。)が発刊された。

「舗装点検要領」や「詳細調査・修繕設計便覧」には、詳細調査としてFWD(Falling Weight Deflectometer: 舗装たわみ測定装置)たわみ量調査が示されているが、FWDは、経年使用に伴い計器等に劣化や狂いが生じるため、荷重とたわみ量に誤差が生じる。よって、「舗装調査・試験法便覧」³⁾および「舗装性能評価法」⁴⁾には、検定を実施することが記載されている。

筆者は、(公社)日本道路協会性能評価小委員会の委員として「詳細調査・修繕設計便覧」や「舗装調査・試験法便覧」の作成や長年、舗装に関する調査研究に携わっている。そこで、本報では、専門的な知識や経験を活かし、このFWDについてどういう装置なのか、FWDの仕組みや原理、詳細調査における位置づけおよび活用例等について紹介する。

2. FWDとは

FWDとは、舗装上に重りを落下させることによって、舗装に衝撃荷重を与え、その時に舗装に発生するたわみを測定する非破壊試験装置である。実際の走行輪荷重をシミュレートした載荷荷重が得られることから、道路や空港などの原位置における舗

装の支持力特性、損傷している層(深さ)の特定、健全性の確認、コンクリート舗装の目地部やひび割れ部における荷重伝達特性などを把握するために幅広く利用されている。載荷装置の搭載形態によって、車載型(写真-1参照)と牽引型(写真-2参照)の2種類の装置がある。国内では、車載型FWDの台数が多い。これは、日本の道路は狭く牽引型FWDだと移動がしづらいためと測定にけん引免許が必要であるなどの理由があるためと考えられるが、世界的には、牽引型FWDが主流である。2023年現在では、日本では道路舗装会社を中心に舗装の健全度を評価するために約60台のFWDが稼働している。



写真-1 FWDの例 (左: 車載型²⁾、右: 牽引型)

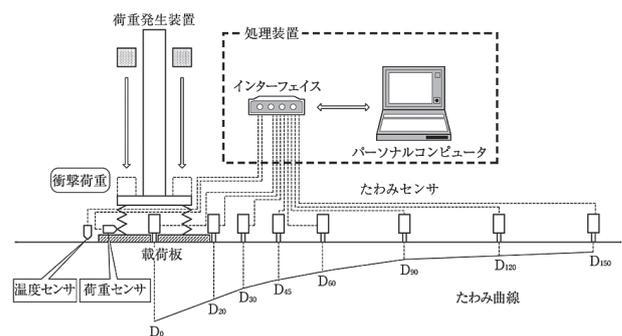


図-1 FWDのシステムの概要³⁾

2.1 FWDの仕組み

FWDは舗装の種類等によって落下高さ、重錘の質量を変えることで荷重を設定して測定を行っている。標準的荷重は、アスファルト舗装 49kN、コンクリート舗装 98kN、空港舗装は 200kN や 250kN

である。また、衝撃荷重によって路面に生じるたわみを 10 個程度のたわみセンサで測定している（図-1 参照）。

2.2 たわみセンサ

センサ配置位置は、一般的には、載荷板中心から 0、20、30、45、60、90、150、200cm の位置を基本として配置され、装置によっては-20、75、180、250cm の位置に配置されたものもある。センサの位置によって、舗装のたわみ量が変わり、そのたわみ量の評価することで舗装のどこの層の支持力かを評価することができる。

2.3 舗装の損傷や健全性を評価できるFWDの原理

なぜ FWD は、舗装の損傷や健全性を評価できるのか、その原理についてイメージ例で簡単に説明する。

FWD は、路面に衝撃荷重を作用させたときに生じる舗装表面のたわみ量を測定している。図-2⁵⁾に示すように舗装表面に作用した衝撃荷重は、舗装の深さ方向に舗装内部を円錐状（図中の破線）に伝わる。

荷重は、上の層から下の層へ伝達され、その各層の変形量の合計が表面たわみ量になって表れる。

荷重直下での D_0 たわみ量は、舗装のすべての層が破線の下側にあり、全ての層の垂直方向の変形量の合計になるので、 D_0 たわみ量は路床を含めた舗装全体の支持力を評価している。逆に、 D_{150} たわみ量は、破線の下側にある層が路床だけであるので、路床の支持力を評価していることとなる。また、 D_{20} たわみ量は、上層路盤より下の層すべてを評価しているから、 D_0 たわみ量から D_{20} たわみ量を引いた $D_0 - D_{20}$ は、アスファルト混合物層のたわみ量进行评估していることになる。

例えば、舗装全体が損傷しておらず健全な場合は、図-3 の損傷例①に示すようにアスファルト層および路盤、路床とも固く舗装全体がたわまないので、舗装全体のたわみ量を確認してたわみ量が小さい場合は損傷していないと評価できる。アスファルト層および路盤、路床ともに損傷している場合は、図-3 の損傷例②に示すようにアスファルト層および路盤、路床とたわむので、舗装全体のたわみ量が大きくなり、損傷していると評価できる。アスファルト層が損傷しているが、路盤、路床が損傷していない場合は、図-3 の損傷例③のように、アスファルト層だけがたわみ、その影響で路盤、路床面が局部的に若干たわむが、アスファルト層だけが損傷していると評価できる。アスファルト層が健全で路盤、路床が

損傷している場合は、図-3 の損傷例④のように、路盤、路床がたわむので、舗装全体が大きくたわみ、そのたわみ量は大きくなる。このように、舗装表面に 49kN の衝撃荷重を与えたときにアスファルト層や路盤、路床がたわむ量をセンサで測定して、舗装の損傷や健全性を評価している。

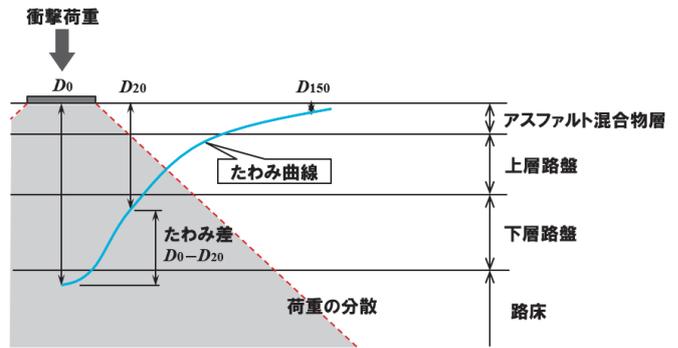


図-2 載荷荷重の分散とたわみ曲線の関係のイメージ⁵⁾

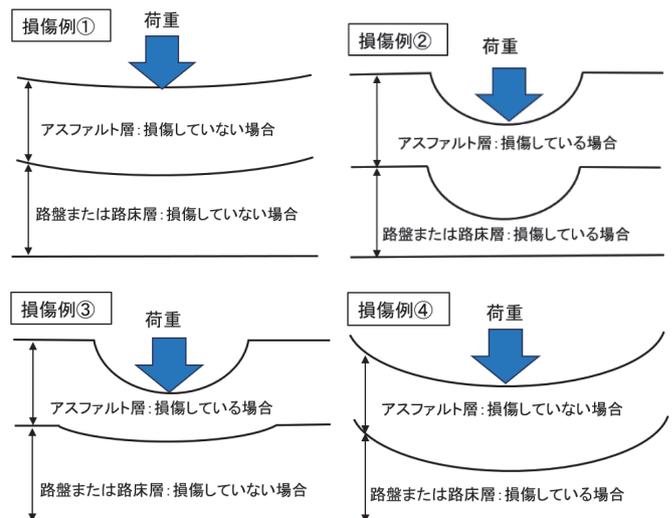


図-3 舗装の損傷や健全性を評価できるFWDの原理のイメージ図

3. FWDの検定

FWD は経年使用に伴い計器等に劣化や狂いが生じるため、荷重とたわみ量に誤差が生じる。よって、「舗装調査・試験法便覧」³⁾および「舗装性能評価法」⁴⁾には、以下のように検定を実施することが記載されている。

- 1) FWD の検定は、2 年に 1 回以上の頻度で実施する。
- 2) 検定は（国研）土木研究所において毎年実施される FWD 検定によることができる。
- 3) 疲労破壊輪数などの舗装性能を評価する場合は、検定に合格した FWD を使用することを原則とする。

土研センター

なお、FWD 検定は、(国研) 土木研究所が定める「舗装たわみ測定装置検定業務実施要領」⁶⁾に従い、FWD の荷重検定およびたわみ検定を実施している。検定は平成 22 年から実施されており、図-4 に平成 22 年からの FWD の受験台数を示す。1 年ごとでは増減があるが、受験は 2 年に 1 回なので 2 年毎では増加傾向であることが分かる。

荷重センサと各センサの変位計の測定装置のみの較正は製造者で実施し、測定装置を組み込んだ装置として FWD の検定を実施する。検定は、(国研) 土木研究所が設置している FWD 検定施設で行う。

荷重センサの検定方法の概念を図-5 に、たわみセンサの検定方法の概念を図-6 に示す。

荷重センサの検定は、ロードセルと受圧板が一体となったシステム上に FWD の荷重を載荷し、ロードセルと FWD の荷重計の測定値を比較する。変位計の較正は、各較正用舗装の中央部の横方向に溝が設けられており、屋外の地中に打ち込んだ支持杭で両端を固定した PC 鋼棒を不動点として、そこに取り付けられたギャップセンサと FWD の変位計の測定値を比較する。「荷重センサとたわみセンサについて以下に示すような基準で評価している。

- ・荷重センサ：検定用ロードセルの計測値との差が±2%以内
- ・たわみセンサ：検定用ギャップセンサの計測値との差が±3%以内

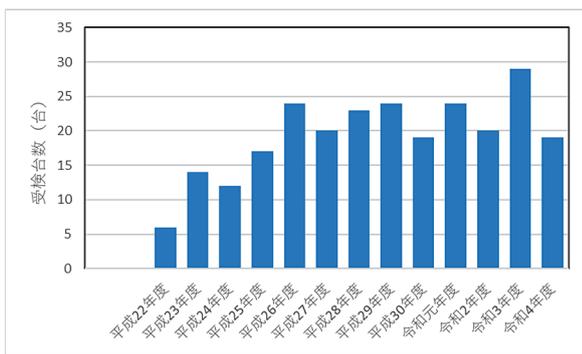


図-4 FWD受験台数

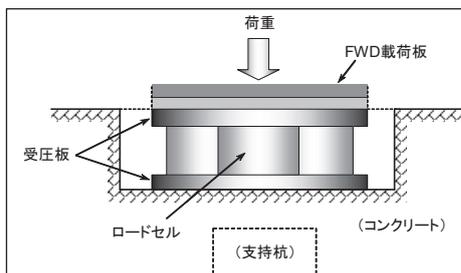


図-5 荷重センサの検定方法の概念⁶⁾

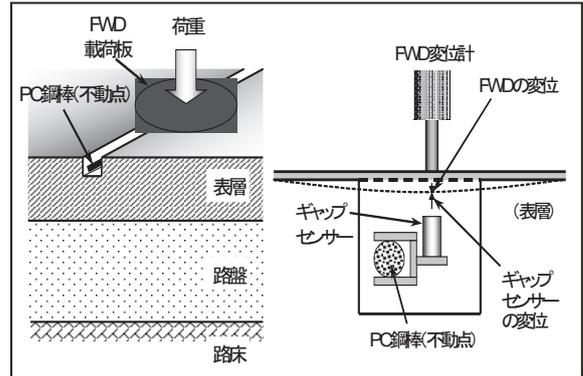


図-6 たわみセンサの検定方法の概念⁶⁾

4. 詳細調査におけるFWD調査の位置づけ

舗装は、車両の走行や経年劣化によって、ひび割れやわだち掘れといった路面損傷や、ひび割れ等から侵入した水や走行疲労により、アスファルト混合物の剥離や路盤や路床の支持力不足などの損傷が発生する。車両走行に影響を及ぼすような損傷が発生した場合は修繕を行うことになるが、修繕を行うには、損傷している層(深さ)を特定して修繕する層を決定する必要がある。

しかし、どこの層(深さ)まで損傷しているかは、路面の損傷だけ点検していても判断できないため、「舗装点検要領」では、詳細調査を実施して路盤以下の健全性を確認することが定められた。「詳細調査・修繕設計便覧」では、その詳細調査の具体的な方法を示し、損傷した層(深さ)の推定に応じたコア抜き調査、FWD たわみ量調査および開削調査などの詳細調査を選定する方法と詳細調査の方法を説明している。

舗装の健全度を評価するには、路盤や路床などの深い層の詳細調査が重要であり、図-7 は、どの詳細調査ならどこの層まで調査ができるかを表した図で、層の深さに応じて詳細調査手法を選択することが重要となる。

FWD 調査は、開削調査と同様にアスファルト混合物層及び路盤や路床の損傷を調査したい場合に有効な方法である。また、コア抜き調査と開削調査は、交通規制が必要となるが、FWD 調査は、主に移動規制で測定でき、推定値であるが非破壊で効率的に各層の健全性を評価でき、現地での調査に要する時間が開削調査よりも短く、舗装構造に損傷が生じていると思われる範囲を絞り込むことができる。また、路面目視調査では確認できない潜在的な舗装体内部

の損傷を把握できる可能性があり、コア抜き調査や開削調査の最適な場所選定にも活用できる。また、構造設計に用いるたわみ量や弾性係数などの設計値も取得可能であり、FWD 調査は詳細調査の中では有効な方法である。

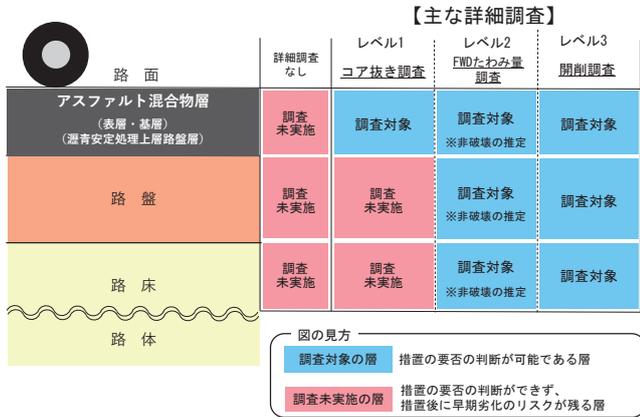


図-7 詳細調査手法と対象とする層の概念²⁾

5. 詳細調査での活用例

FWD を用いて、舗装の健全度を詳細調査した一例を以下に示す。「詳細調査・修繕設計便覧」に示された方法に従って調査を行った。

5.1 詳細箇所の概要

1) 基本諸元の把握

- ・調査延長：100m（片側1車線）
- ・交通量区分：N₄交通
- ・道路分類：損傷の進行が緩やかな道路（分類C）
- ・使用目標年数：15年
- ・供用年数：20年（補修履歴あり）
- ・舗装構成：
 - ・表層（アスコン）5cm
 - ・上層路盤（粒調砕石）10cm
 - ・下層路盤（クラッシュラン）：40cm
- ・路床設計 CBR：3%

2) 点検・診断結果

目視による診断の結果、写真-2に示すように走行軌跡に沿って部分的に亀甲状のひび割れが発生し、ひび割れ率は45%で診断区分Ⅲの損傷レベル大の修繕段階の判定であった。補修を繰返し実施し当初の設計交通量より交通量が増加し路盤の損傷が懸念されたため、詳細調査を実施して表層等や路盤以下の状態を確認して損傷している層（深さ）を特定して、修繕設計および修繕の参考とする。

3) 損傷した層の推定

部分的に亀甲状のひび割れが発生しており、補修を繰返し実施しているため、路床・路盤の支持力不足が損傷の原因と推定された。

4) 詳細調査方法の選定

路床・路盤の支持力不足が損傷の原因と推定されたことと、交通規制が移動規制で費用が少額で済むFWD たわみ量調査を選定した。

5.2 詳細調査結果

FWD たわみ量調査は、表-1に示す測定値を用いることで損傷の程度を把握することができる。



写真-2 調査箇所例
(左：損傷部の例、右：健全部の例)

表-1 FWDたわみ量調査で得られるたわみ指標値の例²⁾

たわみ指標値	特徴
D_0	舗装計画交通量ごとの許容たわみ量により、路床を含む舗装全体の支持力を評価
D_{150}	路床の支持力をCBRとして評価
$D_0 - D_{150}$	残存等値換算厚の推定値により路床面より上の舗装の状態を評価
$D_0 - D_{20}$	アスファルト混合物層の弾性係数の推定値によりアスファルト混合物層の状態を評価

1) FWD たわみ量 D_0 による評価

FWD たわみ量調査の結果を図-8に示す。測定された D_0 たわみ量と表-2に示すFWDの交通量区分別の許容たわみ量の目安の例とを比較することにより、路床を含む舗装全体の支持力を評価することができる。載荷版直下のたわみ量 D_0 は、舗装の損傷を評価する確認項目の中では一番代表的なものである。

今回調査した道路の設計交通量はN₄なので、許容たわみ量の目安は900 μ mである。よって、すべての測点ともたわみ量が許容たわみ量より大きく上回っており、また、健全部と比較しても大きなたわみ量となっており、すべての延長で舗装全体の支持力が不足していると判断できる。

土研センター

表-2 FWDの交通量区分別の許容たわみ量の目安の例²⁾

舗装計画 交通量 (台/日・方向)	100 以上 250 未満	250 以上 1000 未満	1000 以上 3000 未満	3000 以上
設計交通量 の区分	N ₄	N ₅	N ₆	N ₇
許容たわみ量 (μm)	900	600	400	300

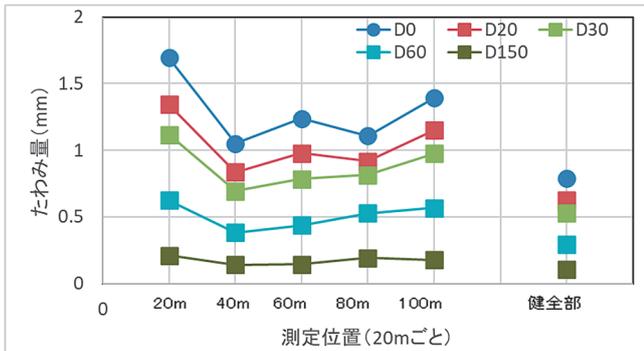


図-8 各測定位置のたわみ量

2) FWD たわみ量 D_{150} による評価

載荷版直下から 150cm 離れた位置のたわみ量 D_{150} で、路床の支持力を評価することができる。 D_{150} から式 (1) により、路床の支持力を評価する CBR を算出して、健全部や初期の CBR と比較して、小さければ路床の支持力が不足している状態にあると判断できる。

$$CBR_{sg} = \frac{1}{D_{150}} \dots \dots \dots \text{式 (1)}$$

ここに、 CBR_{sg} : 路床の CBR (%)

D_{150} : 載荷板中心から 150cm 位置にあるたわみ量 (mm)

今回調査した D_{150} から式 (1) を使って求めた路床の CBR の測定結果を図-9 に示す。健全部と比較してすべての工区とも小さな CBR となっており、すべての延長で路床の支持力が不足していると判断できる。

3) FWD たわみ量 D_0 - D_{150} による評価

載荷板直下のたわみ量 D_0 と、荷板中心から 150cm 離れた位置のたわみ量 D_{150} を用いて、残存載等値換算厚 (T_{A0}) を算出し、健全な箇所と比べ、小さければ路床面より上の舗装が損傷していると判断できる。残存等値換算厚とは、舗装の損傷状況に応じて既設の残存価値を等値換算厚で評価したものである。破損の程度が大きいほど残存等値換算厚は薄くなる。

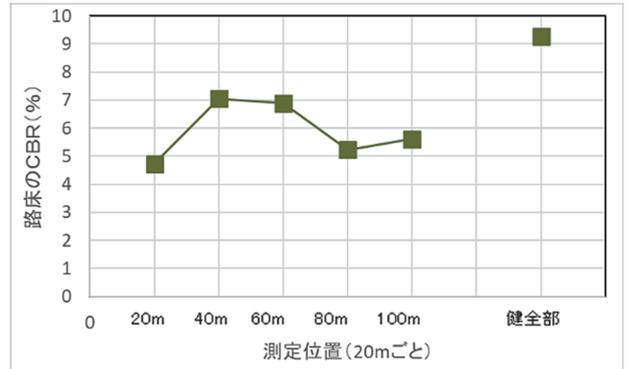


図-9 各測定位置の路床の CBR

健全な箇所がある場合は式 (2) によって、健全な箇所での測定が困難な場合は、式 (3) によって残存等値換算厚を求めることができる。

$$T_{A0} = T_A \cdot 34.5 \log_{10} \left(\frac{D_p}{D_{p\text{-good}}} \right) \dots \dots \text{式 (2)}$$

$$T_{A0} = -25.8 \log_{10} (D_0 - D_{150}) + 11.1 \dots \dots \dots \text{式 (3)}$$

ここに、 T_{A0} : 残存等値換算厚 (cm)

T_A : 修繕箇所の舗装断面から算出する新設時の等値換算厚 (cm)

D_p : 評価地点の $D_0 - D_{150}$ (mm)

$D_{p\text{-good}}$: 補修区間内のうち構造的に健全な箇所や、修繕区間に隣接し基盤条件が同一と考えられる健全な箇所での D_p (mm)

今回調査したたわみ量 D_0 - D_{150} から式 (3) を使って求めた残存等値換算厚 (T_{A0}) の測定結果を表-3 に示す。健全部と比較してすべての工区とも残存等値換算厚は小さくなっており、すべての延長で路床面より上の舗装が損傷していると判断できる。

4) FWD たわみ量 D_0 - D_{20} による評価

載荷板直下のたわみ量 D_0 と、載荷板中心から 20cm 離れた位置のたわみ量 D_{20} より、式 (4) によってアスファルト混合物層の弾性係数求め、アスファルト混合物層の状態を評価することができる。弾性係数が健全部や過去の実績値より明らかに小さい場合は、アスファルト混合物層が損傷していると判断できる。

$$E_1 = \frac{23,520(D_0 - D_{20})^{-1.25}}{h_1} \dots \dots \dots \text{式 (4)}$$

ここに、 E_1 : 瀝青安定処理層を含めたアスファルト混合物層の弾性係数 (MPa)

- D_0 : 載荷板中心のたわみ量 (mm)
- D_{20} : 載荷板中心から 200 mm 位置のたわみ量 (mm)
- h_1 : 瀝青安定処理層を含めたアスファルト混合物層の厚さ (mm)

今回調査したたわみ量 D_0 - D_{20} から式 (4) を使って求めた弾性係数 (E_1) の測定結果を表-3 に示す。健全部と比較してすべての工区とも弾性係数は小さくなっており、すべての延長で表層が損傷していると判断できる。

⑤逆解析による各層の評価

逆解析により、各層の弾性係数を算出し、各層の状態を評価することができる。弾性係数が健全部より明らかに小さい場合は、各層がそれぞれ損傷していると判断できる。逆解析とは、舗装の各層の弾性係数を未知変数として、計算するたわみが FWD による計測たわみと同じになるまで弾性係数を調整しながら計算を繰り返す、計測たわみと計算たわみがほぼ一致したときの弾性係数を舗装各層の弾性係数とする方法である。松井らが開発したプログラム GAMES⁷⁾等を用いると簡単に算出できる。今回調査した FWD たわみ量から逆解析で求めた各層の弾性係数の測定結果を表-3 に示す。健全部と比較してすべての工区ですべての層とも弾性係数は小さくなっており、すべての延長で各層とも損傷していると判断できる。

表-3 FWD特性値

測点	残存等値換算厚	(式-5)から求めた弾性係数	逆解析で求めた各層の弾性係数			
	TA ₀	E ₁	表層	上層路盤	下層路盤	路床
No	cm	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa
20m	6.7	1754	5011	284	46	30
40m	12.2	3232	7224	491	68	58
60m	10.1	2510	6030	387	58	48
80m	12.1	3517	6843	515	112	19
100m	8.9	2786	6557	402	57	26
健全部	15.4	4439	8222	617	108	59

6. あとがき

本報では、詳細調査として示されている FWD たわみ量調査に使用される FWD について紹介した。当センターでは FWD の業務を含め、アスファルト舗装やコンクリート舗装の耐久性や健全性の評価業務を実施しており、研究、材料開発、工法評価など

の性能確認の支援を行っている。「詳細調査・修繕設計便覧」が発刊され、FWD は修繕を行う際の詳細調査・修繕設計に大いに使用されていくと思われる。

最後に、詳細調査での活用例で、FWD を用いて舗装の健全度を調査した際のデータを提供して頂いた(公社)日本道路協会舗装性能評価小委員会に感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 国土交通省道路局：舗装点検要領、平成 28 年 10 月
- 2) (公社)日本道路協会：アスファルト舗装の詳細調査・修繕設計便覧、令和 5 年 3 月
- 3) (公社)日本道路協会：舗装調査・試験法便覧(平成 31 年版)、平成 31 年 3 月
- 4) (公社)日本道路協会：舗装性能評価法、平成 24 年 4 月
- 5) 丸山暉彦、姫野賢治、林正則：FWD のたわみ測定による舗装の健全度調査、舗装、Vol.24・9、pp.3~8、1998.9
- 6) (国研)土木研究所：舗装たわみ測定装置検定業務実施要領、(国研)土木研究所 HP
- 7) 舗装工学ライブラリー3「多層弾性理論による舗装構造解析入門ー GAMES (General Analysis of Multi-layered Elastic Systems) を利用してー」、(社)土木学会、平成 17 年 4 月

寺田 剛



(一財)土木研究センター 技術研究所
道路研究部 部長
TERADA Masaru