

論文

FWD を用いた道路橋 RC 床版のたわみ測定後の補正方法に関する一検証

東山浩士*, 澤下七海**, 西川翔大**, 赤松宏紀***, 塚本真也****, 小河浩幸*****

*博 (工), 近畿大学教授, 理工学部社会環境工学科 (〒577-8502 東大阪市小若江 3-4-1)

**近畿大学, 理工学部社会環境工学科 (〒577-8502 東大阪市小若江 3-4-1)

***東亜道路工業株式会社, 技術本部技術研究所 (〒300-2622 つくば市要 315-126)

****博 (工), 東亜道路工業株式会社, 技術本部技術研究所 (〒300-2622 つくば市要 315-126)

*****東亜道路工業株式会社, 関西支社技術部 (〒550-0011 大阪市西区阿波座 1-13-13)

著者らは, FWD (Falling Weight Deflectometer) を用いた重錘落下試験 (FWD 試験) による道路橋 RC 床版の健全度評価手法を検証してきた. FWD 試験では, 橋梁上から重錘を落下させ, RC 床版のたわみを動的に測定するため, 得られたたわみデータには桁の曲げおよびねじり挙動に加え, 上置層であるアスファルト混合物の変形を含むことになる. したがって, これらを適切に補正することで RC 床版単体のたわみが得られ, 健全度評価に資するデータとすることができる. 本研究では, 模擬 RC 床版において FWD 試験を行い, 得られたデータに対して, これまでに著者らが提案してきたたわみ補正を適用し, その精度を検証した. 検証の結果, 概ね 10% 程度の差異でたわみ補正ができることを確認した.

キーワード: 道路橋 RC 床版, FWD, 健全度評価, たわみ補正

1. はじめに

著者らは, FWD を用いた重錘落下試験 (FWD 試験) による道路橋 RC 床版の健全度評価システムについて弾性解析結果を基に構築してきた. まず, 荷重点直下のたわみとたわみ面積 (橋軸直角方向および橋軸方向) の関係を健全度評価指標とし, 両者の関係を検討した¹⁾. 次に, RC 床版上面から重錘を落下させる FWD 試験では, 上置層であるアスファルト混合物の変形を含むたわみを測定することから, 温度に依存するアスファルト混合物の変形を取り除いた RC 床版単体のたわみに変換する補正方法を解析的に検討した²⁾. その際に必要となるのが, アスファルト混合物内の平均温度である. 土工部に舗設されたアスファルト混合物の平均温度推定式はいくつか提案されているが, RC 床版上に舗設されたアスファルト混合物の平均温度推定式は見当たらなかったことから, 温度測定試験を実施し, 平均温度推定式を提案した³⁾. さらに, 測定されたデータを基に健全度評価を実施するための評価区分の設定方法について提案した⁴⁾. これら一連の研究結果から, 図-1 に示すフローに沿った健全度評価システムを構築してきた.

これら一連の研究過程において実橋 RC 床版におけるたわみ測定も実施してきた⁵⁾. しかし, 実橋における健全度評価システムの精度検証は, アスファルト舗装の修

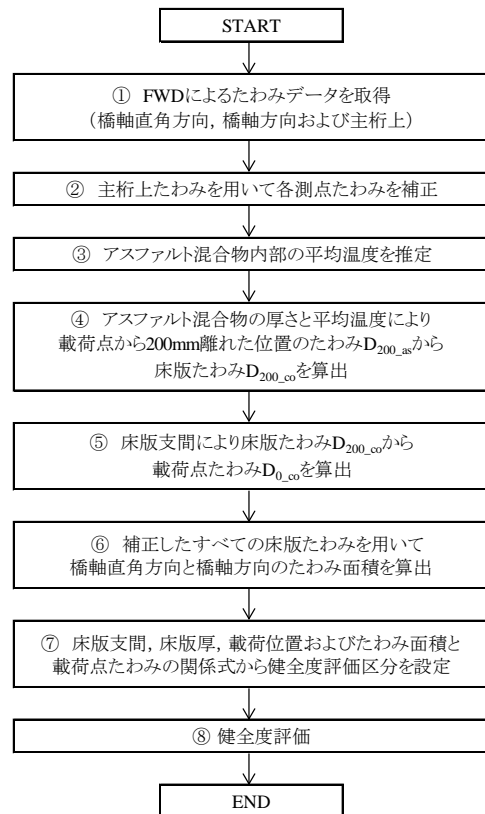


図-1 健全度評価フロー⁴⁾



写真-1 主桁および横桁



写真-3 アスファルト混合物舗設状況



写真-2 模擬 RC 床版試験体



写真-4 FWD 試験状況

表-1 RC 床版の配筋

鉄筋	上段	下段
主鉄筋	D16@250 mm	D16@125 mm
配力鉄筋	D13@250 mm	D13@125 mm

繕時の切削前後での FWD 試験が必要となるが、実橋にてその機会を得るのは頻度に乏しい状況である。

そこで本研究では、FWD 装置を搭載した車両を載せることができる寸法の模擬 RC 床版を作製し、アスファルト混合物の舗設前後において FWD 試験を実施することにより、これまで提案してきた健全度評価システムの精度検証を試みた。ただし、本論では冬季のみにおける FWD 試験に対してであることを限定しておく。

2. FWD 試験

2.1 試験体

本試験に用いた模擬 RC 床版は、写真-1 に示す主桁上（主桁間隔 2000 mm）に 2200×2300×180 mm の正方形 RC 床版を設置した 2 体である（写真-2）。いずれの RC 床版も主鉄筋には D16（SD345）、配力鉄筋には D13（SD345）を用い、昭和 48 年道示による RC 床版を想定し、表-1 に示す配筋とした。なお、下段主鉄筋のかぶり厚は 30 mm である。コンクリート（粗骨材寸法 20 mm）の圧縮強度は 35.9 N/mm² であり、床版作製から 1 年近くの

養生期間を設けており、強度は安定した状態にあるといえる。

RC 床版は、高さ 400 mm の主桁 H 鋼上フランジ上にネジボルトを用いて締結し、高さ 200 mm の横桁 H 鋼上には締結していない。なお、主桁 H 鋼は基礎コンクリート上にアンカーボルトで簡易に固定してある。

アスファルト混合物は、ストレートアスファルト 60/80、最大粒径 13 mm を用いた密粒度アスファルト混合物であり、混合物厚さの影響をも把握するため、写真-3 に示すように、目標厚さ 40 mm と 80 mm の 2 種類をそれぞれの RC 床版上に舗設した。ここで、載荷点における混合物厚さの実測値は約 40 mm と約 70 mm であった。ここで、混合物厚さ 40 mm の床版を床版①、70 mm の床版を床版②とする。なお、防水層は設けておらず、RC 床版表面に乳剤を塗布するのみとした。さらに、RC 床版の吊りピース設置箇所への舗設は避けている。それぞれのアスファルト混合物の表面（実際は表面から深さ 5 mm の位置）および下面（アスファルト混合物とコンクリートとの間）に熱電対を設置し、さらに熱電対をラジエーションシールド内にも設置して温度と気温を測定した。

2.2 試験方法

写真-4 に示すように、FWD 装置を搭載した車両を RC 床版上に載せ、目標衝撃荷重 49 kN および 75 kN を円形載荷板（直径 300 mm）上に載荷した。それぞれの荷重に対して、1 回目を予備荷重とし、載荷試験を合計 5 回

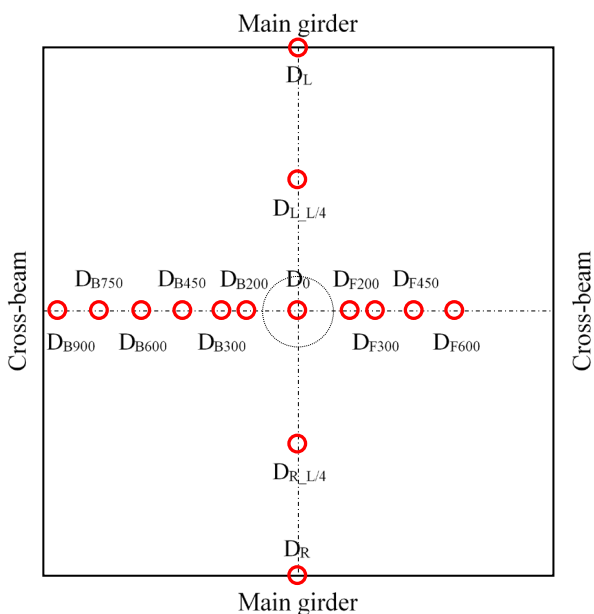


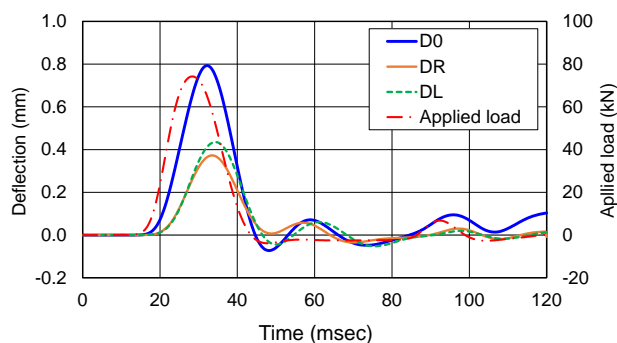
図-2 たわみセンサーの設置位置



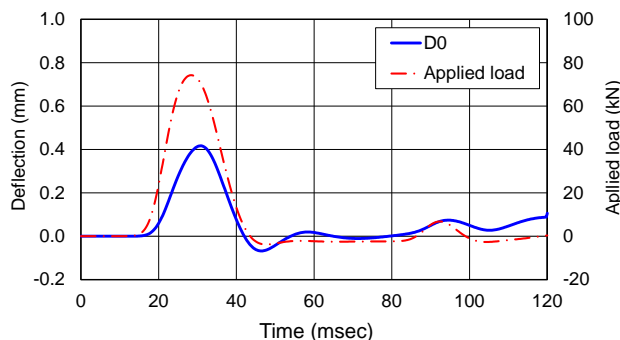
写真-5 変位計設置状況

実施してたわみを測定した。

たわみセンサーの設置位置は、図-2 に示すように、載荷点 (D_0)、載荷点から橋軸方向 (D_B および D_F) の ± 200 mm, ± 300 mm, ± 450 mm, ± 600 mm, 750 mm, 900 mm, ならびに、載荷点から橋軸直角方向の ± 500 mm ($D_{L/L4}$ および $D_{R/L4}$) および主桁上 (D_L および D_R) とした。なお、たわみセンサーの固定条件により、横桁直上のたわみは測定できていないため、必要に応じて D_{B750} および D_{B900} のたわみを用いて外挿した。また、写真-5 に示すように、RC 床版下面にも変位計 (LVDT) を載荷点、載荷点から橋軸直角方向の ± 500 mm、主桁近傍および横桁近傍に設置した。なお、たわみセンサーの計測速度は $4,000$ Hz、下面に設置した変位計の計測速度は $1,000$ Hz である。たわみは、FWD 試験により測定された波形データ (図-3(a)) から、主桁上たわみ (D_L および D_R) を差し引いた後 (図-3(b)) のピーク値を採用している。なお、下面たわみについても上面たわみと同様に、測定された波形データのピーク値を採用している。



(a) 測定した荷重およびたわみの波形データ



(b) 主桁上たわみをキャンセルした波形データ

図-3 FWD 試験による床版たわみの波形データ

3. 試験結果と考察

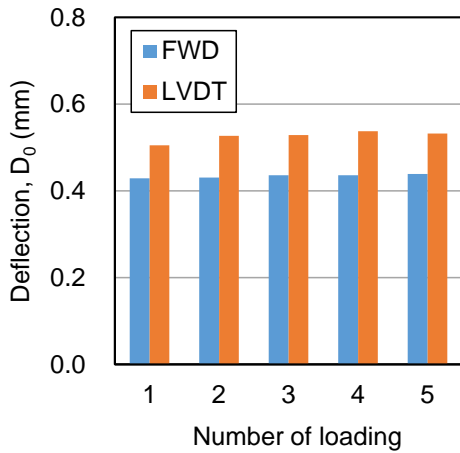
3.1 RC 床版単体のたわみ

載荷点における上面たわみ (FWD) と下面たわみ (LVDT) の比較 (75 kN 載荷時) を図-4 に示す。下面たわみは主桁上フランジの近傍に設置した変位計による測定たわみを FWD 試験と同様の考えに基づいてキャンセルしている。また、5 回の計測結果を平均した上面たわみおよび下面たわみを表-2 に示す。なお、表-2 の値は、各載荷時の荷重の違いを考慮するため、RC 床版が弾性体であると仮定して 49 kN あるいは 75 kN に換算してある。図-4 から、5 回の測定値のばらつきは小さいことがわかる。また、床版①および床版②の上面たわみの差異は小さいが、下面たわみに比べて上面たわみの方が小さい値となっており、床版①および床版②の下面たわみに対する上面たわみの比は、 $0.83 \sim 0.91$ の範囲である。下面たわみは、床版①の方が大きい結果となっており、動的応答に何らかの差が生じた可能性が考えられるが原因は不明であり、今後の検討としたい。

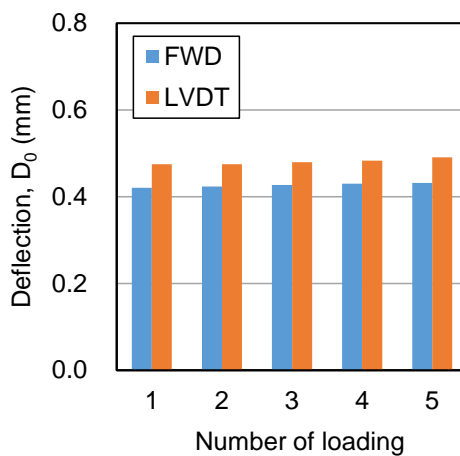
3.2 アスファルト混合物を有する RC 床版のたわみ

(1) アスファルト混合物の温度測定結果

FWD 試験時の気温およびアスファルト混合物の温度履歴を推定平均温度とともに図-5 に示す。混合物舗設後の FWD 試験は 2022 年 2 月 25 日に実施したことから、



(a) 床版①



(b) 床版②

図-4 床版単体の載荷点たわみ (75 kN 載荷時)

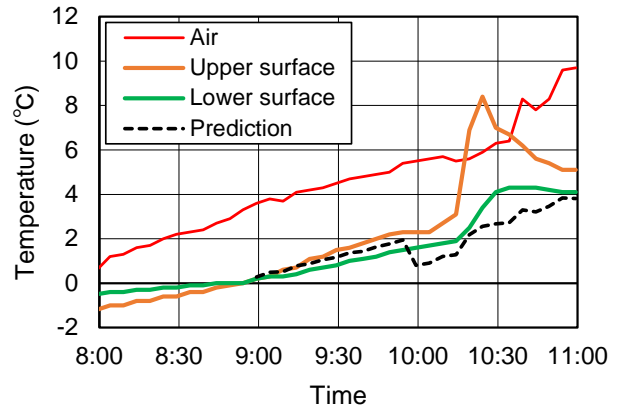
表-2 床版たわみの比較

床版	荷重 (kN)	上面たわみ (mm)	下面たわみ (mm)	比
①	49	0.276	0.321	0.86
	75	0.434	0.526	0.83
②	49	0.270	0.296	0.91
	75	0.427	0.480	0.89

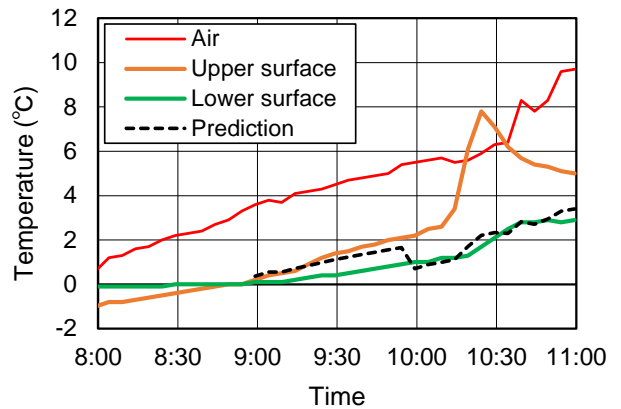
混合物の温度は低く、10:20 頃から舗装全体への日射による温度上昇が観測されているものの、温度勾配は小さい。

(2) アスファルト混合物を有する RC 床版のたわみ

載荷点直下の上面たわみと下面たわみの比較 (75 kN 載荷時) を図-6 に示す。図-4 に示した RC 床版単体のたわみ測定結果とは異なり、下面たわみより上面たわみが大きくなっている。また、床版①と床版②のたわみを比較すると、アスファルト混合物厚さが大きい床版②のたわみが小さくなっており、混合物の剛性が床版の変形に寄与しているためといえる。



(a) 床版①



(b) 床版②

図-5 アスファルト混合物の温度履歴

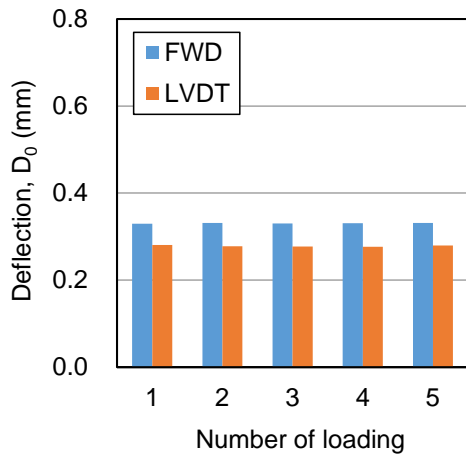
(3) たわみ補正

著者らは、既往研究において、アスファルト混合物の変形影響をキャンセルするためのたわみ補正方法を検討してきた。文献2)では、アスファルト混合物厚さおよびその内部平均温度をパラメータとした補正係数 ($CF_1 = D_{200,co} / D_{200,as}$) について、重回帰分析による次式を提案した。

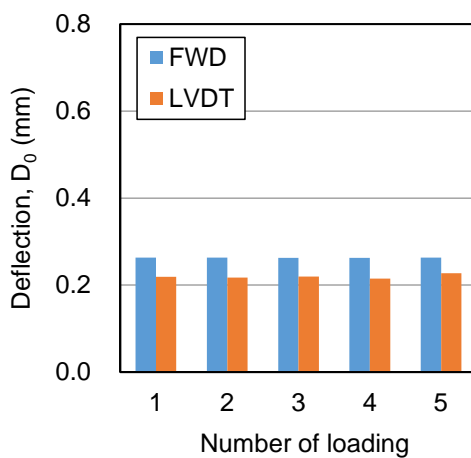
$$\log(CF_1) = \log\left(\frac{D_{200,co}}{D_{200,as}}\right) = (aH_a^2T^2 + bH_a^2T + cH_a^2 + dH_aT^2 + eH_aT + fH_a) \times 10^{-4} \quad (1)$$

ここに、 $D_{200,as}$: 載荷点から橋軸方向に 200 mm 離れた位置のアスファルト混合物上の測定たわみ、 $D_{200,co}$: 載荷点から橋軸方向に 200 mm 離れた位置のアスファルト混合物が無い状態の RC 床版のたわみ、 H_a : アスファルト混合物厚さ (mm)、 T : アスファルト混合物内部の平均温度 (°C)、 $a \sim f$ は回帰係数である。

この補正係数 CF_1 では、FWD 試験により測定された載荷点から橋軸方向に 200 mm 離れた位置のアスファルト混合物上のたわみ $D_{200,as}$ をアスファルト混合物が無い状態の RC 床版の同位置におけるたわみ $D_{200,co}$ へ変換する。



(a) 床版①



(b) 床版②

図-6 アスファルト混合物を有する床版の荷点たわみ (75 kN 荷重時)

表-3 荷点たわみの比較

床版	荷重 (kN)	(1) 補正前の上面たわみ (mm)	(2) 補正後の上面たわみ (mm)	(3) 測定上面たわみ (mm)	(2)/(3)
①	49	0.212	0.303	0.276	1.10
	75	0.331	0.472	0.434	1.09
②	49	0.170	0.310	0.270	1.15
	75	0.263	0.479	0.427	1.12

また、アスファルト混合物の平均温度の推定は文献3)を参照されたい。

さらに、床版支間長の影響を考慮した補正係数として、 CF_2 を次式のように提案した。

$$CF_2 = \left(\frac{D_{0,co}}{D_{200,co}} \right) = 0.0107L^2 - 0.0883L + 1.2139 \quad (2)$$

ここに、 $D_{0,co}$: アスファルト混合物が無い状態の RC 床版の荷点直下のたわみ、 L : 床版支間長 (m)である。

表-3 に荷点における補正前後の上面たわみおよび

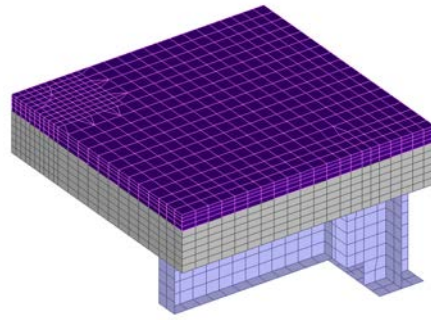


図-7 解析モデル

表-4 解析における材料定数

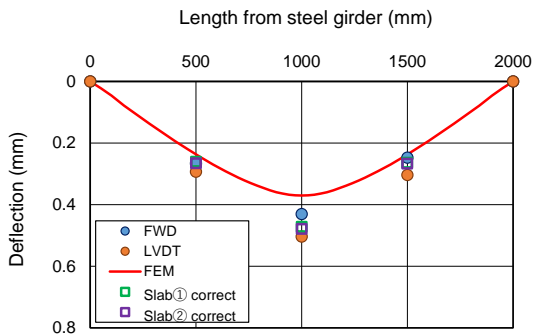
項目	コンクリート	アスファルト混合物	鋼桁
ヤング係数 (kN/mm ²)	29.8	12.6	200
ポアソン比	0.167	0.35	0.3

その比較を示す。ここで、アスファルト混合物を有する床版の上面たわみの測定値 (補正前)を(1)、アスファルト混合物の無い状態の床版に補正した上面たわみを(2)、アスファルト混合物が無い状態の床版の上面たわみの測定値を(3)として示した。なお、表-3の値は、5回の計測結果を平均した値であり、荷重時の各荷重の違いを考慮して、49 kNあるいは75 kNに換算してある。アスファルト混合物が無い状態の RC 床版上で測定されたたわみ(3)に対する補正後のたわみ(2)の比は1.09~1.15の範囲であり、アスファルト混合物厚さ40 mmでは10%程度、厚さ70 mmでは12%~15%の差異である。補正後のたわみが測定たわみより大きくなっている。健全度評価においては安全側の値を与えるといえ、また、小さいたわみ値の比較であることを考慮すると、比較的よい結果であると考えられる。今後は夏季においても同様の測定を行い、さらに精度検証を行う予定である。

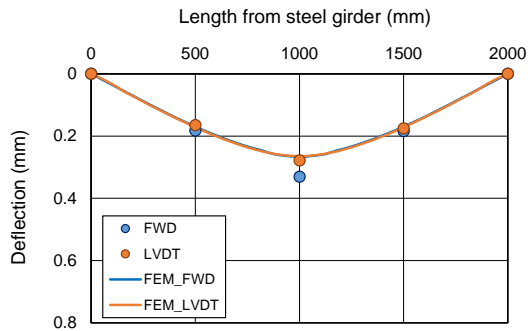
3.3 FEM 解析との比較

FWD 試験により得られた模擬 RC 床版の変形について、図-7に示すモデルを用いた3次元弾性 FEM 解析結果との比較検討を行った。床版コンクリートおよびアスファルト混合物はソリッド要素、主桁および横桁はシェル要素を用いてモデル化し、床版と主桁上フランジ、床版と横桁上フランジ、さらに、主桁下フランジと基礎コンクリート界面にはインターフェースを組み込み、鉛直方向圧縮力のみを伝達するようにした。コンクリートのヤング係数は圧縮強度を基に、アスファルト混合物のヤング係数は FWD 試験時のアスファルト混合物の平均温度を基に決定した。使用した材料定数を表-4に示す。

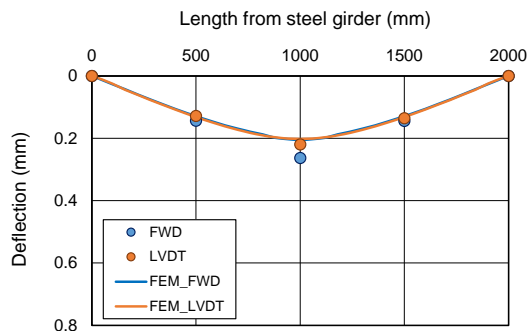
橋軸直角方向のたわみ分布について、床版単体の場合を図-8(a)に、アスファルト混合物 (厚さ40 mm および



(a) 床版単体



(b) アスファルト混合物 40 mm を有する床版①



(c) アスファルト混合物 70 mm を有する床版②

図-8 橋軸直角方向のたわみ分布

70 mm) を有する床版の場合を図-8(b)および図-8(c)に示す。なお、床版単体の測定結果は床版①と床版②の平均値であり、さらに補正後たわみも示してある。図-8(a)に示した補正後たわみは床版①、床版②のいずれもほぼ同じたわみに変換されており、異なる混合物厚さの床版であっても同様に補正できている。いずれにおいても載荷点のたわみは解析値の方が小さく、L/4 点はよく一致している傾向にある。また、アスファルト混合物を有する床版の下面たわみは解析値に近く、載荷点の上面たわみはそれらより大きい結果である。さらに、解析値の上面と下面のたわみ差は見られず、アスファルト混合物の平均温度が低いいため、載荷板下における混合物の圧縮変形は生じていない。

4. まとめ

本研究では、模擬 RC 床版上における FWD 試験を実施し、著者らがこれまで提案してきたたわみ補正の検証を行った。冬季のみの試験結果であることから、限られた範囲ではあるが、得られた知見をまとめると以下となる。

- (1) アスファルト混合物舗設前の模擬 RC 床版における測定たわみからは、FWD による上面たわみが変位計による下面たわみよりも 10%程度小さい結果であった。
- (2) アスファルト混合物舗設後の床版たわみは、舗設前より小さくなり、混合物の剛性が床版の変形に寄与している。舗設後の FWD による上面たわみを提案してきた方法により補正した結果、たわみ補正を行うことで、アスファルト混合物厚さに関係なくほぼ同じたわみに変換され、舗設前たわみに近づいた。しかし、FWD による舗設前たわみと比べて 10%程度大きい値であった。

謝辞

本研究成果の一部は、JSPS 科研費 JP19K04561 の助成を受けたものであり、また、試験補助に関わった近畿大学工学部社会環境工学科の中村廉氏、佐藤美菜子氏に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) Higashiyama, H., Mashito, H., Tsukamoto, M., Abe, N., Sekiguchi, M, and Nagami, T.: Study on Soundness Evaluation of Bridge Slabs by Falling Weight Deflectometer, International Journal of GEOMATE, Vol. 15, Issue 51, pp. 106-112, 2018.
- 2) 東山浩士, 増戸洋幸, 塚本真也, 阿部長門, 関口幹夫: FWD を用いた RC 床版の健全度評価における舗装たわみの温度補正に関する解析的検討, 第 10 回道路橋床版シンポジウム論文報告集, pp. 249-254, 2018.
- 3) Higashiyama, H., Tsukamoto, M., and Mashito, H.: Temperature prediction of asphalt concrete and correction of deflection on bridge slabs for FWD testing, Journal of JSCE, Division E: Pavement Engineering / Materials and Concrete Structures, Vol. 9, Issue 1, pp. 148-160, 2021.
- 4) 東山浩士, 塚本真也, 増戸洋幸: FWD を用いた床版の健全度判定方法に関する一提案, 第 11 回道路橋床版シンポジウム論文報告集, pp. 35-40, 2020.
- 5) 増戸洋幸, 梅田 隼, 塚本真也, 東山浩士: FWD による道路橋床版の健全度評価手法に関する検討, 第 19 回コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol. 19, pp. 623-628, 2019.

(2022 年 7 月 8 日受付)

(2022 年 9 月 9 日受理)