

令和 4 年 4 月 23 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04561

研究課題名（和文）FWDを用いた道路橋床版の健全度評価におけるたわみ測定の精度向上に関する研究

研究課題名（英文）Study on Accuracy Improvement of Deflection Measurement in Evaluating the Soundness of Road Bridge Slabs Using FWD

研究代表者

東山 浩士 (Higashiyama, Hiroshi)

近畿大学・理工学部・教授

研究者番号：60319754

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,500,000円

研究成果の概要（和文）： FWDを用いた道路橋床版の適切な健全度評価において、床版上のアスファルト舗装が床版のたわみに及ぼす影響を考慮したたわみ補正が重要となる。

本研究では、床版上のアスファルト舗装を模擬した試験体による舗装体内部の温度測定を1年間にわたり実施し、平均温度を推定できるモデルを構築した。次に、実橋床版を模擬した試験体上においてFWD試験を実施し、これまでに提案してきたたわみ補正方法の精度検証を行った。その結果、補正後のたわみは概ね10%程度の誤差で評価できることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

道路橋床版の適切な維持管理が求められるなか、その健全度評価を効率的かつ定量的に実施していくことが重要となっている。しかし、これまでの研究では、FWDを用いた定量的な健全度評価方法が確立されてきたとは言えない。そこで本研究では、床版上のアスファルト舗装の平均温度推定と重錘落下時における舗装の変形を考慮したたわみ補正方法を構築するとともに、その補正精度は社会実装を可能とするレベルであることを確認した。よって、道路橋床版の健全度を定量的に評価できる方法の構築ができたと言えます、今後の道路橋床版の維持管理に大いに活用できると考えている。

研究成果の概要（英文）： In the proper soundness evaluation of road bridge slabs using FWD, it is important to correct the deflection of slabs to account for the influence of stiffness of the asphalt pavement, which depends on its temperature.

In this study, the temperature measurement inside asphalt pavements on concrete slabs was conducted over a period of one year using specimens that simulated actual bridge slabs. From the measurement results, using some models that can estimate the average temperature of the asphalt pavements on the slabs, the predicting accuracy was compared among them. Consequently, it was confirmed that the predicting model can be used in the practical measurement using FWD. Next, FWD tests were conducted on specimens simulating real bridge slabs. The correction method proposed was verified using the measured deflection. The results revealed that the deflection after correcting was estimated with an error of approximately 10% against the measured deflection.

研究分野：橋梁工学

キーワード：道路橋床版 アスファルト舗装 健全度評価 たわみ

1. 研究開始当初の背景

道路橋鉄筋コンクリート（RC）床版における劣化損傷問題が顕在化してから50年以上が経過し、疲労損傷メカニズムが明らかにされてきた。近年では、凍結防止剤散布を伴う塩害やアルカリシリカ反応などの劣化要因によるRC床版のひび割れや鉄筋腐食、砂利化などが問題となっている。一方、道路橋床版の適切な維持管理が求められるなか、健全度評価や劣化損傷状態のスクリーニングに関する研究の重要性が益々高まっており、道路橋床版の劣化損傷実態の調査に各種非破壊検査手法を適用する研究が活発に行われている。その中でも、重錘を橋面上に落下させ、床版たわみを動的に測定する手法（Falling Weight Deflectometer：FWD）は、実橋床版のたわみを簡易に測定可能であることから、健全度評価方法として注目されており、実橋での測定を含め、これまで数多くの研究成果が発表されている。しかし、既往研究では、FWDによる測定方法やその解析方法に関する検討、個々の道路橋床版のたわみ測定から経時的な損傷程度の変化を評価するといった研究がなされてきた。

本研究代表者は、既往研究の健全度評価指標とは異なり、コンクリート舗装の健全度評価指標に用いられてきた“たわみ面積”を道路橋床版の健全度評価指標に適用することを検討してきた。ここで、たわみ面積とは、FWDにより測定された橋軸直角方向および橋軸方向の床版のたわみ分布から、それらを積分して得られる面積のことであり、これまでの解析的研究^{1)~3)}から、たわみ面積と載荷点直下のたわみには線形関係があることを明らかにしてきた。この線形関係を利用して、道路橋床版の健全度を評価することは健全度区分を設定するのに有利であると考えられる。

しかし、アスファルト舗装はそれ自体の温度により剛性や変形特性が変動することから、FWDにより測定されるたわみから床版たわみを精度よく求めるためには、測定時における舗装体内部の温度をパラメータとしたたわみ補正が不可欠となる。これまでのFWDでは土工部におけるアスファルト舗装の健全度評価に多用されてきたことから、土工部における舗装体内部の温度推定方法は数多く提案されている。しかし、道路橋床版上の橋面舗装についての知見はほとんどなく、その補正方法は未だ確立されていないようである。さらに、土工部における補正方法の適用性についても検証されていないのが現状である。よって、橋面舗装の変形影響を適切に補正しない限り、FWDによる床版のたわみおよび健全度は評価できないことになる⁴⁾。これまで3次元弾性FEM解析を中心とした研究から、橋面舗装の変形が床版のたわみに及ぼす影響をアスファルト舗装の平均温度および舗装厚をパラメータとして検討を行ってきた^{5),6)}。その結果、FWDの載荷点周辺における橋面舗装の変形が載荷点直下のたわみに顕著な影響を及ぼすことから、アスファルト舗装の平均温度および舗装厚を説明変数とした重回帰分析を行い、その補正方法を提案してきた。しかし、実験試験体あるいは実橋での計測による本補正方法の妥当性を検証するには至っていないのが現状である。

2. 研究の目的

上記の研究背景を踏まえ、本研究の目的は、FWDを用いた道路橋RC床版の健全度評価の高精度化に向けた橋面舗装の平均温度予測に関する実験的検討を行い、既往研究にて提案したたわみ補正方法の検証を行うことである。

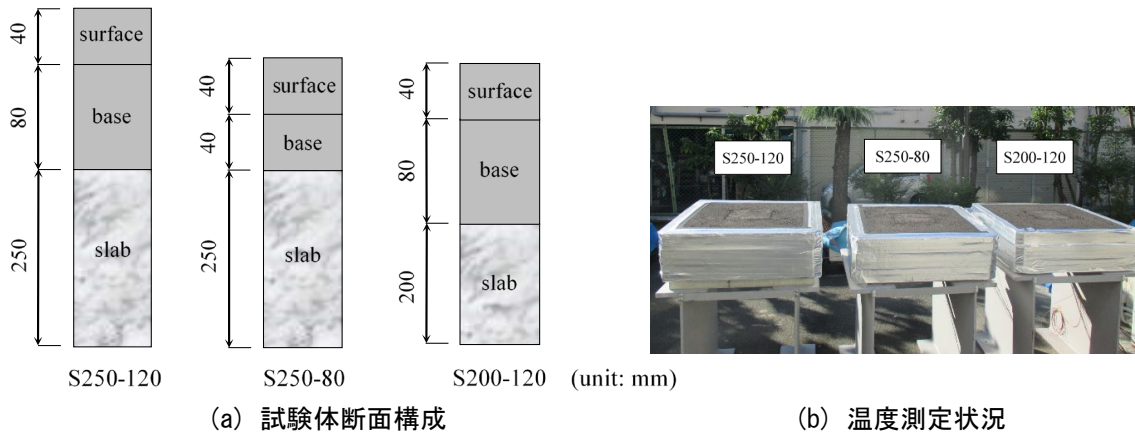
3. 研究の方法

(1) 床版上アスファルト舗装の平均温度推定方法の検討

コンクリート床版上に舗装したアスファルト舗装の内部温度について1年間を通じて測定し、これまでに提案されている土工部に舗装されたアスファルト舗装の内部温度推定モデルとの比較から、その適用性について検討を行う。具体的には、**図1**に示すように、コンクリート床版（辺長900×900mm、厚さ200mmおよび250mm）上に、厚さの異なるアスファルト舗装（厚さ80mmおよび120mm）を舗装し、その内部の各層に熱電対を埋込むことにより内部温度を測定する。また、外気温との関連性が顕著であるため、同時に外気温の測定を行う。これらの結果を基に、予めキャリブレーションした推定モデルの精度を確認する。

(2) FWDによる床版たわみの測定とたわみ補正方法の検証

図2に示す主桁上に模擬コンクリート床版（辺長2200×2300mm、厚さ180mm）2体を作製し、橋面舗装（厚さ40mmおよび70mm：**図3**）の舗装前後における床版のたわみをFWDにより測定する（**図4**）。いずれのRC床版も主鉄筋にはD16、配力鉄筋にはD13を用い、昭和40年代のRC床版を想定した配筋とした。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。FWD装置を搭載した車両をRC床版上に載せ、衝撃荷重49kNおよび75kNを円形載荷板（直径300mm）上に載荷した。それぞれの荷重に対して、1回目を予備載荷とし、載荷試験を合計5回実施してたわみを測定した。橋面舗装内部の平均温度推定式、ならびにFWDによる床版上面のたわみから、これまでに提案してきたたわみ補正方法の検証を行う。また、床版下面にも変形計を設置し、FWDによる測定たわみとの比較を行う。



(a) 試験体断面構成 (b) 温度測定状況
 図1 アスファルト舗装内部の温度測定状況



図2 模擬床版試験体



図3 アスファルト舗設状況



図4 FWD 試験状況

4. 研究成果

(1) 床版上アスファルト舗装の平均温度推定方法の検討

平均温度推定に用いたモデルは式(1)～式(3)である。式(1)および式(2)は既往研究のモデルであり、式(3)は本研究にて提案したモデルである。なお、実験係数は別途に作製した模擬コンクリート床版（辺長 1000×1000mm、厚さ 200mm）上に舗設したアスファルト舗装（厚さ 80mm）の1年間にわたる測定データを用いてキャリブレーションした結果を採用している。

$$T_{ave} = (aT_{sur} + bT_{air} + c) \cdot \alpha \cdot H_d^\beta \quad (1)$$

$$T_{ave} = aT_{sur} + bT_{air} + cT_{air_dif} + dH_d + e \quad (2)$$

$$T_{ave} = (aT_{sur} + bT_{air} + cT_{sur_dif} + d) \cdot \alpha \cdot H_d^\beta \quad (3)$$

ここに、 T_{ave} はアスファルト舗装の平均温度(°C)、 T_{sur} はアスファルト舗装の表面温度(°C)、 T_{air} は外気温(°C)、 T_{air_dif} は測定時とその1時間前の外気温差(°C)、 T_{sur_dif} は測定時とその1時間前の表面温度差(°C)、 H_d はアスファルト舗装厚さ(cm)、 a 、 b 、 c 、 d 、 e 、 α および β は実験係数である。

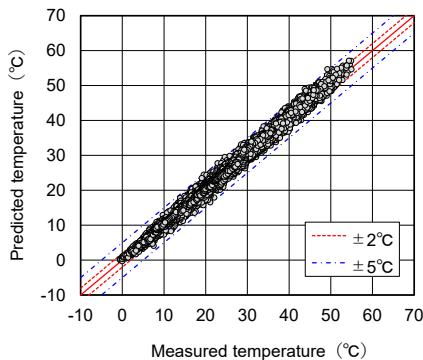


図5 式(3)による S250-80 の結果

表1 平均温度推定精度

Temperature difference range	Probability (%)		
	Eq. (1)	Eq. (2)	Eq. (3)
$-1^\circ\text{C} \leq \Delta T \leq 1^\circ\text{C}$	41.2	53.8	64.8
$-2^\circ\text{C} \leq \Delta T \leq 2^\circ\text{C}$	69.9	87.1	92.4
$-5^\circ\text{C} \leq \Delta T \leq 5^\circ\text{C}$	98.6	99.4	100

測定結果と推定式による平均温度の精度比較を行った。その一例として、図5に S250-80 の結果を、また、各推定式の精度比較を表1に示す。この結果、式(3)による推定精度が他の2式より高く、誤差範囲 $\pm 2^\circ\text{C}$ の範囲において、実用上、問題の無い精度を有する結果を得た。他の試験体についてもほぼ同様の結果であった。

(2) FWD による床版たわみの測定とたわみ補正方法の検証

図6は、本研究代表者が既往研究において示した FWD 試験による道路橋床版の健全度評価フローである。まず、FWD 試験により得られた載荷点たわみから主桁上たわみを差し引いた後のピーク値を D_0 たわみとして採用している。計測時のアスファルト舗装上下面温度および外気温を図7に示す。外気温の低い時期での測定であったことから、アスファルト舗装上下面の温度勾配は小さい。アスファルト舗装上に載荷した際の橋軸直角方向のたわみ分布を図8に示す。FWD による上面からのたわみと変位計 (LVDT) による下面からのたわみは比較的よい一致が見られる。ただし、載荷点たわみには、上面たわみと下面たわみに差が生じていることから、上面たわみには衝撃荷重によるアスファルト舗装の圧縮変形が含まれると考えられる。さらに、図8(a)と(b)を

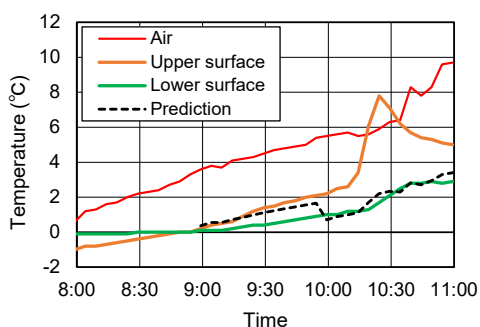
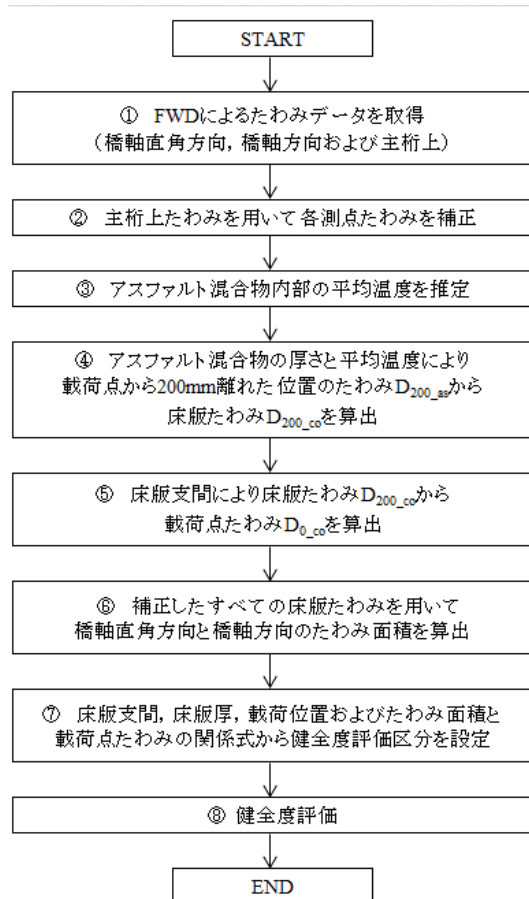
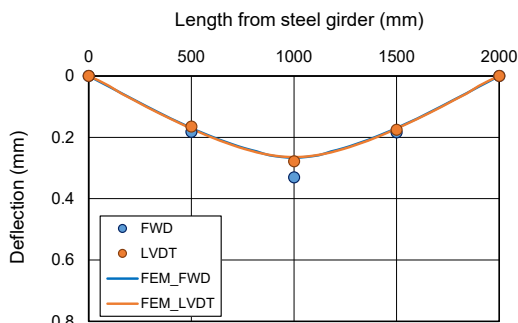
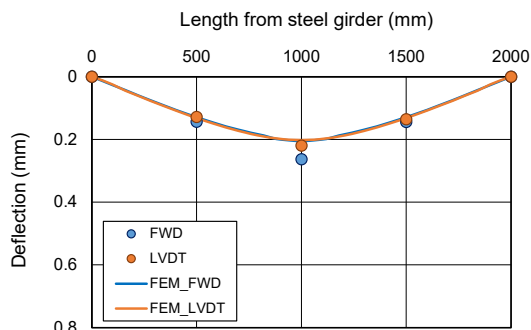


図7 温度履歴

図6 健全度評価フロー



(a) 床版① (舗装厚さ 40mm)



(b) 床版② (舗装厚さ 70mm)

図8 アスファルト舗装上に載荷した際の橋軸直角方向のたわみ分布

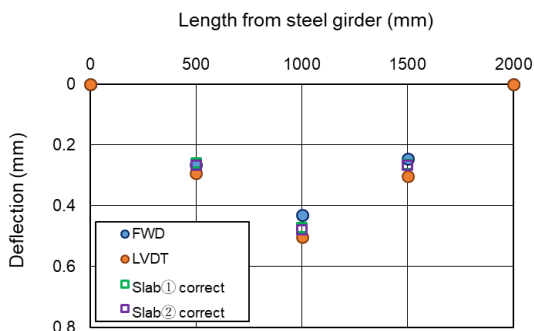


図9 補正後たわみと床版たわみ

表2 補正後たわみの比較

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)	比 (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

比較すると、舗装厚さが大きいと床版のたわみが全体的に小さくなっており、アスファルト舗装自体の剛性が床版のたわみに影響を及ぼすことがわかる。

次に、**図 6** のフローに従って、測定された $D_{200_{as}}$ たわみを式(4)により $D_{200_{co}}$ へ変換し、さらに式(5)により $D_{0_{co}}$ へ変換した結果を**図 9**に、また、変換した $D_{0_{co}}$ とアスファルト舗装舗設前の床版たわみを比較した結果を**表 2**に示す。

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

$$CF_2 = \left(\frac{D_{0_{co}}}{D_{200_{co}}}\right) = 0.0107L^2 - 0.0883L + 1.2139 \quad (5)$$

ここに、 $D_{200_{as}}$ は荷点から橋軸方向に 200mm 離れた位置のアスファルト舗装上の測定たわみ、 $D_{200_{co}}$ は荷点から橋軸方向に 200mm 離れた位置のアスファルト舗装が無い状態の RC 床版のたわみ、 H_a はアスファルト舗装の厚さ(mm)、 T はアスファルト舗装内部の平均温度($^{\circ}\text{C}$)、 $D_{0_{co}}$ はアスファルト舗装が無い状態の RC 床版の荷点直下のたわみ、 L は床版支間長(m)である。

図 8 および **図 9** に示した FWD によるたわみを比較すると、アスファルト舗装舗設後のたわみは、舗装自体の剛性によりたわみが小さくなっている。このことから、FWD を用いた道路橋床版の健全度を適切に評価するためには、アスファルト舗装の剛性を考慮した補正が不可欠であることがわかる。**図 9** に示した補正後たわみは、アスファルト舗装舗設前のたわみと比べて、その差は約 10% であることから、既往研究に示した式(4)および式(5)による補正方法は、FWD を用いた道路橋床版の健全度評価の社会実装に対して妥当な範囲であると判断する。ただし、アスファルト舗装の剛性はその温度変化に大きく左右されることから、さらなる測定機会と分析による検証が必要である。

<引用文献>

- 1) 東山浩土、塚本真也、阿部長門、関口幹夫：FWD による道路橋 RC 床版の健全度評価指標の検討、第 32 回日本道路会議、5001、2017.10.
- 2) 東山浩土、塚本真也、阿部長門、関口幹夫：FWD による道路橋床版の健全度評価指標の一提案、第 17 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.17、pp.273-278、2017.10.
- 3) H. Higashiyama, H. Mashito, M. Tsukamoto, N. Abe, M. Sekiguchi, T. Nagami: Study on Soundness Evaluation of Bridge Slabs by Falling Weight Deflectometer, International Journal of GEOMATE, Vol.15, Issue 51, pp.106-112, 2018.11.
- 4) 増戸洋幸、永見晃之、塚本真也、東山浩土：コンクリート床版のたわみ計測におけるアスファルト舗装の影響について、第 32 回日本道路会議、5002、2017.10.
- 5) 東山浩土、増戸洋幸、塚本真也、阿部長門、関口幹夫：FWD における橋面舗装たわみの温度補正に関する解析的検討、土木学会第 73 回年次学術講演会概要集、CS8-012, 2018.8.
- 6) 東山浩土、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.35-40、2018.11.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 H. Higashiyama, M. Tsukamoto, H. Mashito	4. 巻 9
2. 論文標題 Temperature prediction of asphalt concrete and correction method of deflection on bridge slabs for FWD testing	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of JSCE, E1: Pavement Engineering	6. 最初と最後の頁 148-160
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2208/journalofjsce.9.1_148	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

近畿大学理工学部社会環境工学科複合構造学研究室 http://cse-lab.sakura.ne.jp/index.html
--

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------