

## 論文

## 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

東山浩士\*, 増戸洋幸\*\*, 塚本真也\*\*, 阿部長門\*\*\*, 関口幹夫\*\*\*\*

\*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)

\*\*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)

\*\*\*工博, 東亜道路工業株式会社, 営業本部 (〒106-0032 東京都港区六本木 7-3-7)

\*\*\*\*東京都, 建設局土木技術支援・人材育成センター (〒136-0075 東京都江東区新砂 1-9-15)

道路橋 RC 床版の健全度評価手法のひとつとして, FWD を用いたたわみ測定がある. 著者らは健全度評価指標として, 橋軸直角方向および橋軸方向のたわみ分布から求められるたわみ面積に着目した検討を進めており, たわみ面積と載荷点たわみの関係は線形性を有していることを解析および実橋での計測から確認してきた. しかし, 実橋において FWD 試験から得られるたわみは橋面舗装の変形の影響を受け, さらにその値は舗装体の温度によって変動することから適切な補正が求められる. そこで, 本論文では橋面舗装の平均温度に応じてヤング係数を変化させた RC 床版の 3 次元弾性 FEM 解析結果から, 橋面舗装のたわみに関する温度補正方法を検討した. 提案した補正方法により算定した載荷点たわみは $-0.1\sim 2.5\%$ , たわみ面積は $-4.7\sim 1.7\%$ の誤差範囲で得られることを解析結果から確認した.

キーワード: FWD, RC 床版, 舗装たわみ, 温度補正係数

### 1. はじめに

昭和 40 年代前半から道路橋 RC 床版にひび割れやその一部が抜け落ちるなどの損傷事例が発生し始め, 輪荷重走行試験による RC 床版の疲労損傷メカニズムの解明がなされてきた<sup>1)</sup>. 近年では, 凍結防止剤散布に起因する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.

道路橋 RC 床版の適切な維持管理が求められる中, 健全度評価として, 床版下面のひび割れ発生状況やたわみ計測による評価指標が提案されている<sup>2)</sup>. たわみ計測では, 橋面からの測定方法として, 重錘落下による動的測定 (Falling Weight Deflectometer: FWD) が検討されてきた<sup>3)~7)</sup>. FWD 試験では, 橋面舗装上の橋軸直角方向と橋軸方向にたわみ測定センサーが設置され, 任意に設定された重錘による落下時のたわみが動的に測定される. 重錘落下時には橋梁全体が振動するため, 床版のたわみを得るために主桁上にもたわみ測定センサーが設置され, 測定後に各測点のたわみを補正することになる<sup>7)</sup>. 関口ら<sup>3)</sup>は, 実橋床版において FWD 試験により測定されたたわみとひび割れ密度との関係性を評価している. また, FWD

試験により測定されたたわみ分布から, 山口ら<sup>5)</sup>は先鋭度を, 横山ら<sup>6)</sup>は曲率を健全度評価指標として提案している.

著者らは, RC 床版の健全度評価指標として, 阿部ら<sup>4)</sup>が提案しているたわみ面積に着目し, 薄板理論に基づく弾性 FEM 解析により検討を進めてきた<sup>8)~10)</sup>. ここで, たわみ面積は FWD 試験により測定されたたわみ分布の積分値として得られる値のことである. これら既往の研究では, 損傷した RC 床版を模擬するためにコンクリートのヤング係数を変化させた解析を行っている. その結果, 橋軸直角方向および橋軸方向のたわみ面積は載荷点たわみと線形関係を有していることを確認するとともに, 橋面舗装敷設前の新設橋梁 (PCT コンポジット橋) の床版における FWD 試験<sup>11)</sup>から解析結果を検証してきた. しかし, この一連の研究では橋面舗装の影響を考慮せずに進めてきた. 実橋における FWD 試験では, 測定時における橋面舗装の温度により変化するたわみを適切に補正して床版の健全度を評価する必要がある.

そこで本論文では, 橋面舗装の温度および厚さをパラメータとした 3 次元弾性 FEM 解析を実施し, 橋面舗装のたわみの影響を検討するとともに, その補正方法を提案することにした.

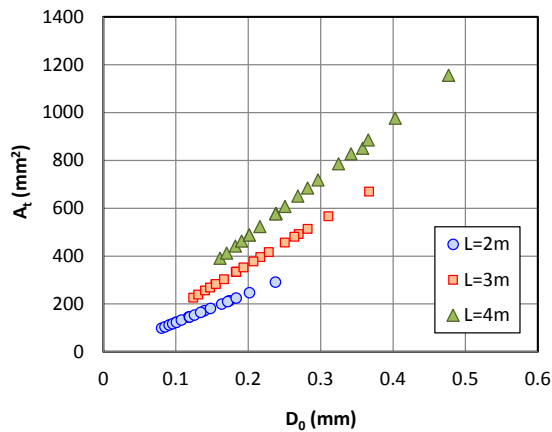


図-1 橋軸直角方向のたわみ面積と載荷点たわみの関係

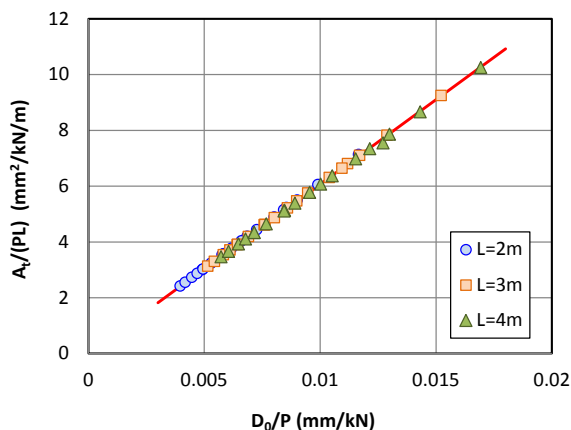


図-2 重錘落下荷重と床版支間長を考慮した橋軸直角方向のたわみ面積と載荷点たわみの関係

## 2. たわみ面積

ここでは、たわみ面積に関する既往の研究結果<sup>8)~10)</sup>についてその概要を説明する。

### 2.1 橋軸直角方向のたわみ面積

橋軸直角方向のたわみ面積は、主桁間のたわみ分布の積分値として求めることができる。図-1 は床版支間長 2m, 3m, 4m の 2 辺単純支持版について、コンクリートのヤング係数を変化させて損傷を模擬した RC 床版の解析結果である。それぞれの床版支間長に対して、橋軸直角方向のたわみ面積 ( $A_t$ ) と載荷点たわみ ( $D_0$ ) は線形関係にあることが分かる。ここで、FWD 試験では重錘落下荷重が任意に設定されることを考慮して、橋軸直角方向のたわみ面積 ( $A_t$ ) を重錘落下荷重 ( $P$ ) と床版支間長 ( $L$ ) で、また、載荷点たわみ ( $D_0$ ) を重錘落下荷重 ( $P$ ) で除しておくのが適切であると考えられる。上記の方法により図-1 の表現を変更すると、図-2 のように表すことができ、床版支間長に関係なく、ひとつの直線上にプロットされる。

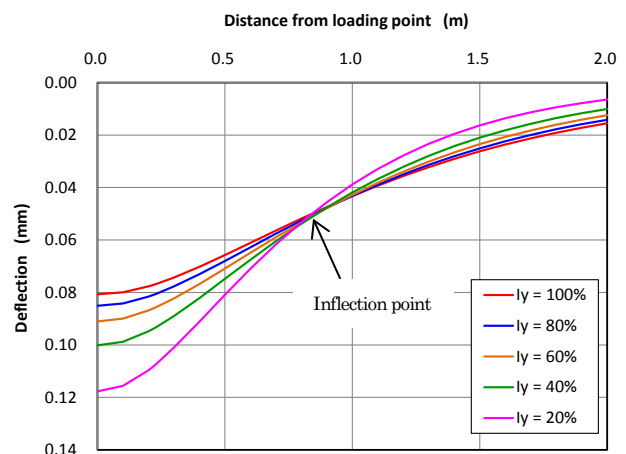


図-3 橋軸方向のたわみ分布

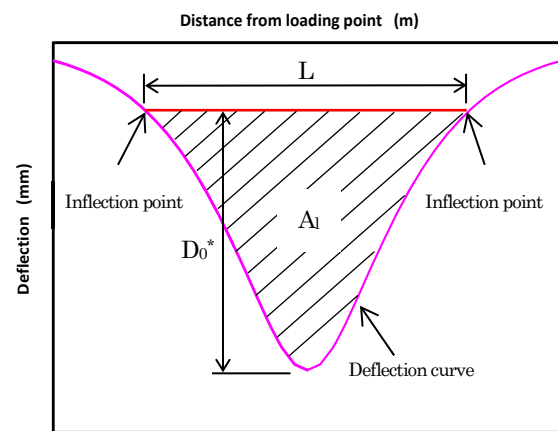


図-4 橋軸方向のたわみ面積の算出範囲と載荷点たわみ<sup>10)</sup>

### 2.2 橋軸方向のたわみ面積

橋軸方向のたわみ面積は、その算出範囲を決定しておく必要がある。図-3 は、橋軸直角方向断面（主鉄筋断面）の曲げ剛性を一定とし、橋軸方向断面（配力鉄筋断面）の曲げ剛性を変化させたときの橋軸方向のたわみ分布の一例である。載荷点からある距離だけ離れた箇所に変曲点が現れ、たわみ面積の算出範囲を適切に設定しなければ、たわみ面積にばらつきを生じさせることになる。この変曲点は載荷点から概ね床版支間長の 1/2 点近くであることから、既往の研究<sup>10)</sup>において、橋軸方向のたわみ面積の算出範囲と載荷点たわみを図-4 に示すように定義した。これに基づき得られた橋軸方向のたわみ面積 ( $A_t$ ) と載荷点たわみ ( $D_0^*$ ) との関係を図-5 に示す。また、橋軸直角方向と同様に、橋軸方向のたわみ面積 ( $A_t$ ) を重錘落下荷重 ( $P$ ) と床版支間長 ( $L$ ) で、また、載荷点たわみ ( $D_0^*$ ) を重錘落下荷重 ( $P$ ) で除した結果は図-6 のように表すことができ、橋軸直角方向と同様に、床版支間長に関係なく、ひとつの直線上にプロットされる。

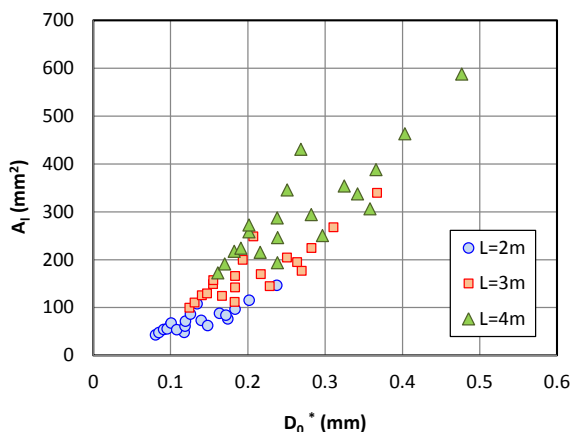


図-5 橋軸方向のたわみ面積と載荷点たわみの関係

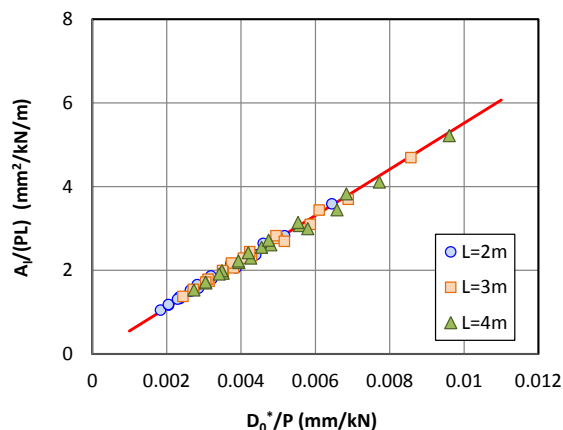


図-6 重錘落下荷重と床版支間長を考慮した橋軸方向のたわみ面積と載荷点たわみの関係

### 3. 橋面舗装のたわみ補正に関する3次元弾性FEM解析

#### 3.1 解析モデル

解析モデルは、床版支間長 2m, 3m, 4m の 2 辺単純支持版とし、橋軸方向の長さは床版支間長の 3 倍とした。床版厚は道路橋示方書<sup>12)</sup>からそれぞれ 190mm, 230mm, 270mm とし、舗装厚は 0mm, 40mm, 80mm, 120mm とした。本解析における載荷面積は、図-7 に示すように、FWD 試験に用いられる載荷板を直径 300mm の円形板と想定し、載荷荷重は 100kN とした。なお、解析モデルはその対称性から 1/4 モデルとしている。床版コンクリートのヤング係数は 25kN/mm<sup>2</sup> の一定値とし、橋面舗装のヤング係数は温度により変化することから、健全状態の橋面舗装の平均温度を 0°C, 20°C, 40°C, 60°C とした文献<sup>13)</sup>を参考にして表-1 に示す数値を用いた。

#### 3.2 解析結果

一例として、床版支間長 3m, 舗装厚 80mm の解析モデルの結果について、橋面舗装上面と床版上面の橋軸直角方向たわみ分布を図-8 に示す。橋面舗装と床版のたわみを比較すると、その差は橋面舗装の平均温度の上昇

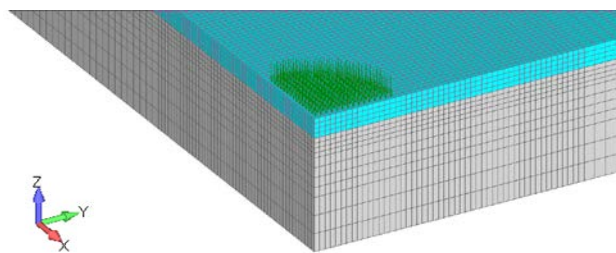


図-7 解析モデル

表-1 橋面舗装のヤング係数

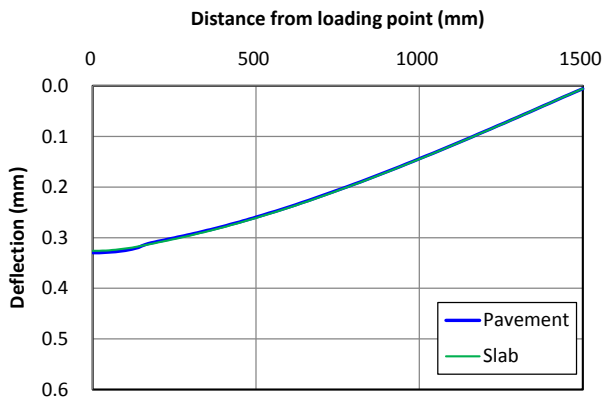
| 舗装の平均温度 (°C)               | 0      | 20    | 40    | 60    |
|----------------------------|--------|-------|-------|-------|
| ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> ) | 14,000 | 6,000 | 2,570 | 1,100 |

とともに大きくなるが、その影響範囲は載荷板周辺に留まっている。また、舗装厚が大きいほど、載荷板周辺の橋面舗装と床版のたわみの差は大きくなる結果であった。さらに、橋面舗装の剛性が床版のたわみに影響を及ぼしていることが分かる。

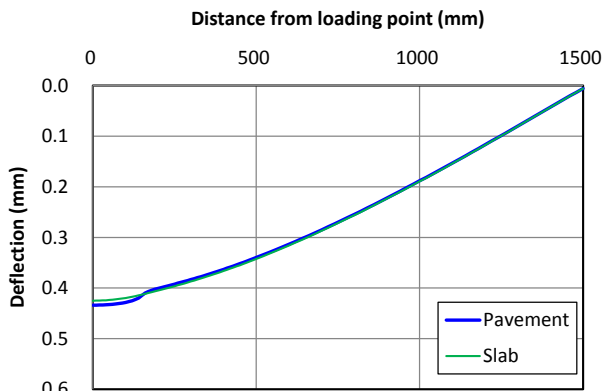
#### 3.3 橋面舗装のたわみ補正係数

図-8 に示したように、載荷板下のたわみは橋面舗装の圧縮変形の影響を受ける。本研究では、たわみ面積と載荷点直下のたわみから床版の健全度を評価することを目的としている。このことから、橋面舗装のたわみ補正を検討するにあたり、最終目標として、橋面舗装が無い状態（舗装厚ゼロ）の床版たわみが得られるように、橋面舗装のたわみに及ぼす温度の影響についての補正方法を考えることにした。

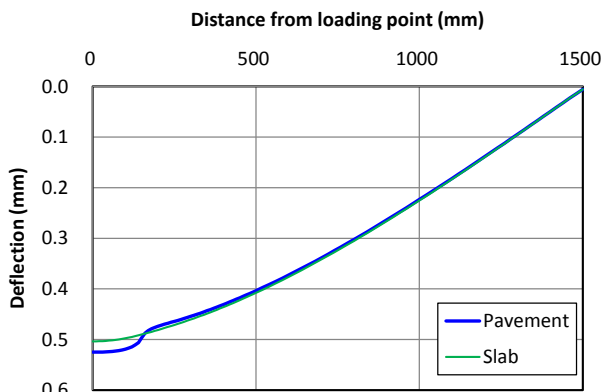
重錘落下荷重による橋面舗装の圧縮変形の影響が小さく、FWD 試験で測定可能な載荷点から橋軸方向に 200mm 離れた点の橋面舗装のたわみ  $D_{200,as}$  を用いる。これについては、本研究で対象としている FWD 試験機では橋軸直角方向の橋面舗装のたわみ  $D_{200,as}$  を測定できないためである。まず、橋面舗装が無い状態の床版における載荷点から橋軸方向に 200mm 離れた点の床版のたわみ  $D_{200,co}$  を算定するための補正係数について重回帰分析を行う。ここで、橋面舗装の温度には、厚さ方向に平均した温度を用いることとする。橋面舗装の平均温度に関する補正係数  $CF_1$  は  $D_{200,co}/D_{200,as}$  で表される。一例として、床版支間長 2m について、 $\log(CF_1)$  と舗装厚  $H_a$  の関係を図-9 に、また、 $\log(CF_1)$  と橋面舗装の平均温度  $T$  の関係を図-10 に示す。 $\log(CF_1)$  と舗装厚  $H_a$  の関係は、平均温度が低いと線形性を有しているが、平均温度が高くなるに伴って緩やかな非線形性を示している。また、 $\log(CF_1)$  と平均温度  $T$  の関係は全体的に非線形性を示している。そこで本研究では、舗装厚と橋面舗装の平均温度を説明変数とした式(1)に示す 2 次関数による重回帰分析を行うことにした。



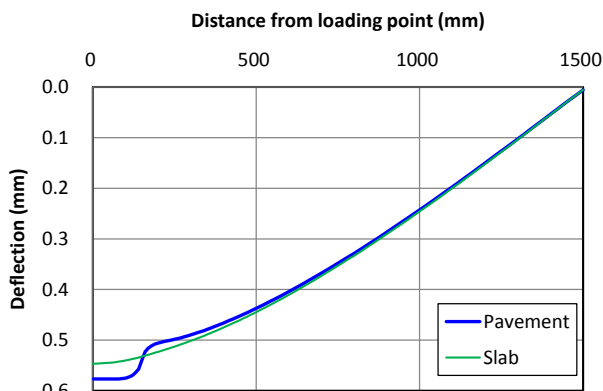
(a) 平均温度 0°C



(b) 平均温度 20°C



(c) 平均温度 40°C



(d) 平均温度 60°C

図-8 橋軸直角方向のたわみ分布

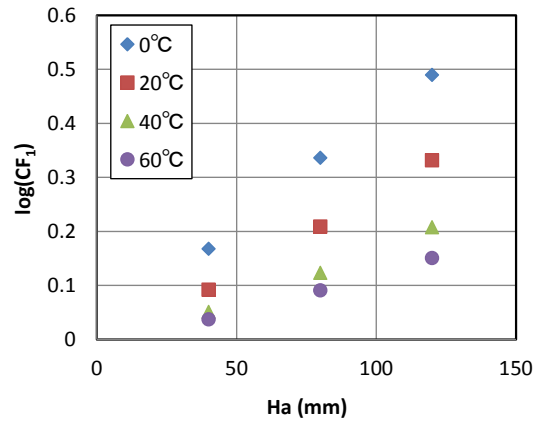


図-9 補正係数と舗装厚の関係

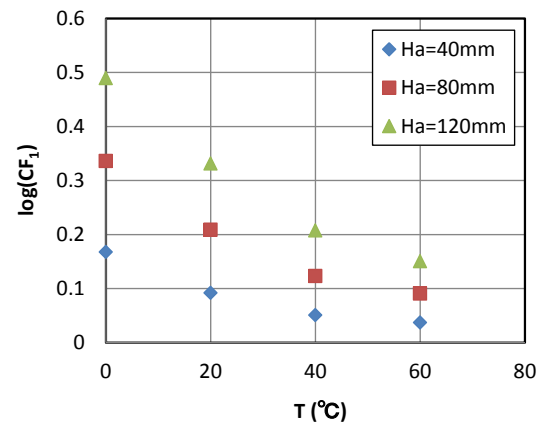


図-10 補正係数と平均温度の関係

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

ここに、 $H_a$  : 舗装厚(mm),  $T$  : 橋面舗装の平均温度(°C)

重回帰分析の結果、式(1)の各係数 (a~f) は表-2 に示すように、床版支間長の違いによる影響を考慮して、床版支間長毎に設定することにした。この補正係数を用いて、橋軸方向の橋面舗装のたわみ  $D_{200\_as}$  から床版のたわみ  $D_{200\_co}$  を算定したときの精度 (誤差率) を図-11 (左側) に示す。ここで、誤差率は橋面舗装が無い状態の床版のたわみ  $D_{200\_co}$  と算定値との誤差を表している。橋軸方向の  $D_{200\_co}$  は概ね±1.0%の誤差率で算定できることが分かる。また、上記の補正係数を用いて橋軸直角方向の  $D_{200\_co}$  についても算定した結果、図-11 (右側) に示すように、概ね±1.0%の誤差率であり、橋軸方向と同等に補正できることが分かる。これは、橋軸方向と橋軸直角方向の  $D_{200\_as}$  および  $D_{200\_co}$  の差異が小さいためである。ただし、舗装厚  $H_a$  が 120mm では誤差率の範囲が大きくなっており、想定した重回帰式が影響している可能性があるため、今後も引き続き検討していく。

次に、橋軸方向および橋軸直角方向の  $D_{200\_co}$  の平均値

表-2 重回帰式における各係数

| 係数 | L=2m                    | L=3m                    | L=4m                    |
|----|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| a  | $-5.455 \times 10^{-5}$ | $-4.041 \times 10^{-5}$ | $-3.028 \times 10^{-5}$ |
| b  | $4.155 \times 10^{-3}$  | $2.850 \times 10^{-3}$  | $2.011 \times 10^{-3}$  |
| c  | $-1.859 \times 10^{-2}$ | $-1.605 \times 10^{-3}$ | $4.940 \times 10^{-3}$  |
| d  | $1.180 \times 10^{-2}$  | $1.000 \times 10^{-2}$  | $8.612 \times 10^{-3}$  |
| e  | -1.290                  | -1.084                  | $-9.253 \times 10^{-1}$ |
| f  | 43.23                   | 35.07                   | 29.44                   |

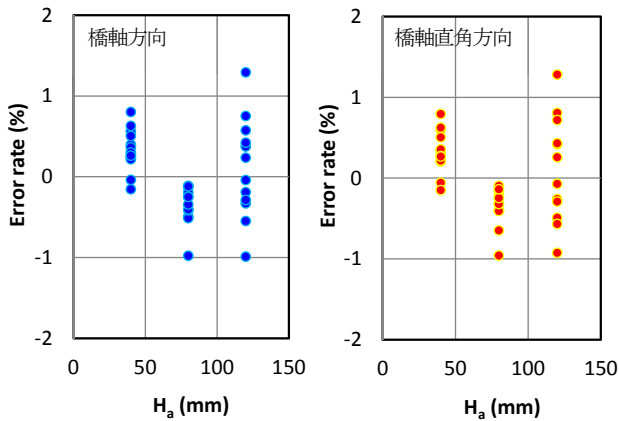


図-11  $D_{200,\infty}$ の算定精度

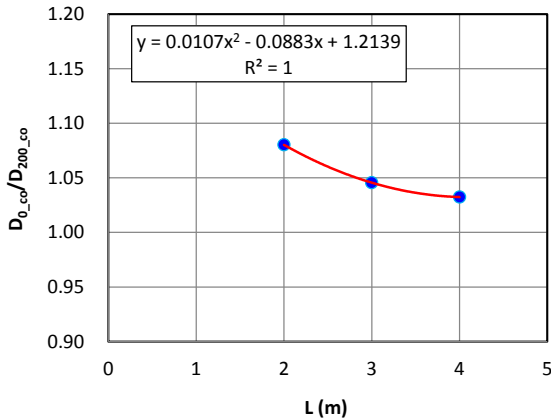


図-12  $D_{0,\infty}$ 推定の補正係数

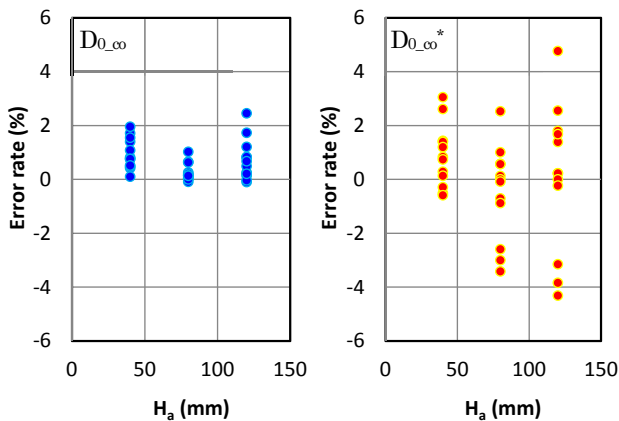


図-13  $D_{0,\infty}$ および $D_{0,\infty}^*$ の算定精度

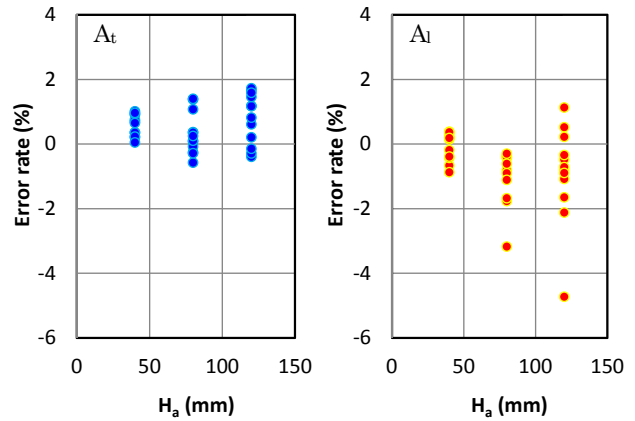


図-14 たわみ面積 ( $A_t$ および $A_i$ ) の算定精度

を用いて載荷点直下の床版のたわみ  $D_{0,\infty}$  を算定する。 $D_{0,\infty}$  を  $D_{200,\infty}$  (平均値) で除した値 ( $CF_2 = D_{0,\infty} / D_{200,\infty}$ ) と床版支間長との関係を図-12 に示す。この結果から本論では両者の関係を 2 次関数で表現することにした。この補正係数を用いて、 $D_{200,\infty}$  (平均値) から  $D_{0,\infty}$  を算定し、さらに、図-4 に示した  $D_{0,\infty}^*$  を算出した際の誤差率を図-13 に示す。ここで、誤差率は橋面舗装が無い状態の床版のたわみ  $D_{0,\infty}$  あるいは  $D_{0,\infty}^*$  と算定値との誤差を表している。その結果、 $D_{0,\infty}$  は  $-0.1 \sim 2.5\%$ 、 $D_{0,\infty}^*$  は  $4.3 \sim 4.8\%$  の範囲の誤差率であった。載荷点から 200mm 離れた床版のたわみに比べて、載荷点直下の  $D_{0,\infty}^*$  の誤差は橋面の舗装厚の影響を受けて大きくなる傾向にある。

以上の手順により補正した床版のたわみを用いて計算したたわみ面積の算定精度を確認する。その際、載荷板から 200mm 以上離れた箇所における橋軸方向および橋軸直角方向のたわみは式(1)により補正する。また、載荷点直下から 200mm までの範囲、すなわち、 $D_{0,\infty}$  と  $D_{200,\infty}$  の間のたわみは線形に変化すると仮定して計算した。橋軸直角方向および橋軸方向のたわみ面積（それぞれ、 $A_t$  および  $A_i$ ）の算定精度を図-14 に示す。ここで、誤差率は橋面舗装が無い状態の床版のたわみ面積と補正後のたわみ面積との誤差を表している。本研究で提案したたわみ補正により、橋軸直角方向のたわみ面積は  $-2.9 \sim 1.7\%$ 、橋軸方向のたわみ面積は  $-4.7 \sim 1.1\%$  の範囲の誤差率であった。

### 3.4 損傷 RC 床版のたわみ面積

床版支間長 3m、舗装厚 0mm および 80mm の解析モデルに関してのみ、床版コンクリートのヤング係数  $25\text{kN/mm}^2$  を 80、60、40% に低減して損傷を模擬した解析を行った。橋面舗装の平均温度は  $0^\circ\text{C}$ 、 $20^\circ\text{C}$ 、 $40^\circ\text{C}$ 、 $60^\circ\text{C}$  として、上記と同様に、表-1 に示す数値を用いた。その他の解析条件は上述したのと同様である。

これらの解析結果に対して、たわみ補正を行い、たわみ面積を算出した。重錘落下荷重と床版支間長を考慮した橋軸直角方向のたわみ面積 ( $A_i/PL$ ) と載荷点たわみ

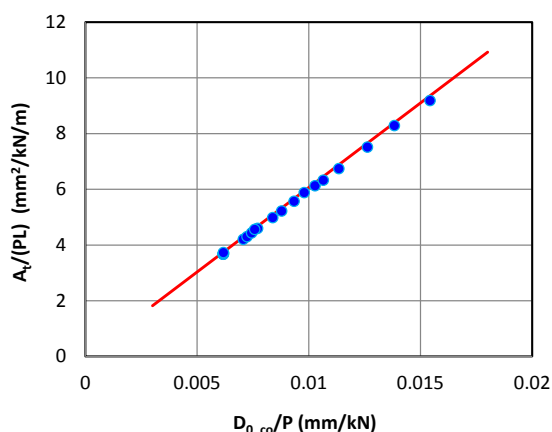


図-15 重錘落下荷重と床版支間長を考慮した橋軸直角方向のたわみ面積と載荷点たわみの関係

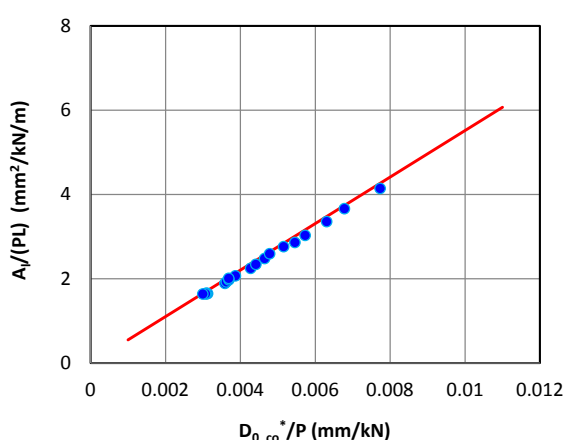


図-16 重錘落下荷重と床版支間長を考慮した橋軸方向のたわみ面積と載荷点たわみの関係

( $D_{0\_co}/P$ ) の関係を図-15 に示す。また、重錘落下荷重と床版支間長を考慮した橋軸方向のたわみ面積 ( $A_v/PL$ ) と載荷点たわみ ( $D_{0\_co}^*/P$ ) の関係を図-16 に示す。それぞれの図中には、図-2 および図-6 に実線で示した関係式<sup>10)</sup>も合わせて記載している。

補正後のたわみ面積と載荷点たわみは、橋面舗装の平均温度が異なる損傷を模擬した解析モデルに関しても橋軸直角方向および橋軸方向ともに既往の関係式<sup>10)</sup>上にプロットできることが分かった。

#### 4. まとめ

本論では、FWD 試験により測定されるたわみについて橋面舗装の影響を検討し、健全度評価指標を得るための補正方法について 3 次元弾性 FEM 解析結果を基に提案した。得られた知見をまとめると以下の通りである。

(1) FWD 試験の載荷板下における橋面舗装のたわみは、橋面舗装の平均温度の上昇とともに圧縮変形の影響を大きく受けるが、その影響範囲は載荷板周辺に留まっている。また、橋面舗装の剛性が床版のたわみ

の大小に影響を及ぼしている。

- (2) 橋面舗装の厚さと平均温度を説明変数とした 2 次曲線による重回帰分析を行い、 $D_{200\_as}$  から  $D_{200\_co}$ 、さらに、 $D_{200\_co}$  から  $D_{0\_co}$  の算定に関する補正係数を提案した。
- (3) 提案した補正方法により算定した床版のたわみ面積と載荷点たわみの関係は既往の解析結果<sup>10)</sup>と同一直線上にプロットされることを確認した。

#### 参考文献

- 1) 前田幸雄, 松井繁之: 輪荷重移動装置による道路橋床版の疲労に関する研究, コンクリート工学年次講演会論文集, Vol. 6, pp. 221-224, 1984.
- 2) 松井繁之, 前田幸雄: 道路橋 RC 床版の劣化度判定法の一考察, 土木学会論文集, 第 374 号/I-6, pp. 419-426, 1986.
- 3) 関口幹夫, 國府勝郎: FWD による床版の健全度評価手法の検討, 構造工学論文集, Vol. 50A, pp. 697-706, 2004.
- 4) 阿部長門, 関口幹夫: 小型 FWD による道路橋鉄筋コンクリート床版健全度評価への適用性の検討, 土木学会第 59 回年次学術講演会, V-620, 2004.
- 5) 山口恭平, 早坂洋平, 曾田信雄, 大西弘志: FWD を用いた既設 RC 床版の健全度評価手法に関する一提案, 構造工学論文集, Vol. 61A, pp. 1062-1072, 2015.
- 6) 横山 広, 牧 祐之, 角間 恒, 深田宰史, 榎谷 浩: 道路橋床版の曲率を用いた劣化度評価に関する研究, 構造工学論文集, Vol. 64A, pp. 551-559, 2018.
- 7) 関口幹夫: FWD による床版たわみ測定手法の検討, 土木学会第 58 回年次学術講演会, CS6-051, 2003.
- 8) 東山浩士, 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.
- 9) 東山浩士, 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) 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) 増戸洋幸, 永見晃之, 塚本真也, 東山浩士: 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.
- 12) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, 2017.
- 13) 雑賀義夫, 阿部長門, 姫野賢治, 丸山暉彦: FWD から得られる特性値の温度補正に関する検討, 舗装, Vol. 30, No. 8, pp. 10-15, 1995.

(2018 年 7 月 20 日受付)