

FWD による床版の健全度評価手法の検討

A Examination of Evaluation Method for Deterioration Rating of Highway Bridge Decks by FWD

関口幹夫*, 國府勝郎**

Mikio Sekiguchi, Katsuro Kokubu

*東京都土木技術研究所 技術部 (〒136-0075 東京都江東区新砂 1-9-15)

**工博 東京都立大学大学院 工学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

Many reinforced concrete (RC) decks of bridges are suffered severe traffic load and the repeated traffic load leads serious damage of fatigue cracks. Accordingly, it is important to evaluate the deterioration rating of RC decks under service. Crack observation and loading test on the RC decks are used for the surveys, but more reasonable methods are needed to develop to minimize the labor and cost for the evaluation.

This paper reports the evaluation of deterioration rating of RC deck with falling weight deflection meter (FWD) that is able to measure at once a set of several point deflections of the deck by impact load of falling weight. The measured deflections by the FWD on Tamasuido Bridge are discussed and the method is confirmed to be useful method to verify the deterioration rating of bridge deck.

Key words: FWD, deflection by impact load, Deterioration Rating, fatigue damage

キーワード: FWD, 動的たわみ, 健全度, 疲労損傷

1. はじめに

道路橋 RC 床版の健全度調査では、輪荷重による疲労損傷の状態を把握することが重要である。一般的な健全度調査法としては、ひび割れ発生状況の調査や載荷試験による床版のたわみの検討が有効である¹⁾。また、鋼板接着など床版裏面を補強した場合の補強効果の確認調査では、床版裏面のひび割れが確認できないため、打音点検による浮きや剥離状態の調査および載荷試験による力学的な検討が有効である。しかしながら、ひび割れの詳細な調査や打音調査は足場が必要であり、塗装の塗替え周期 10~15 年に併せて実施する場合が多い。また、都市内における載荷試験は、深夜から早朝の交通量の少ない時間帯に交通止めを行う必要があるため、代表的なパネルのサンプリング調査に限定される。特に載荷試験による調査は、準備や交通規制等多大な労力と経費が不可欠であり、全ての橋梁に適用することは極めて困難である。

そこで、簡便にたわみ量を測る方法として、舗装の動的たわみ測定機 (FWD: フォーリングウェイトデフレクトメータ) を活用して、舗装面から衝撃荷重を与えたときのたわみ量を基に健全度や損傷度を評価する手法について基本的な検討を行っている^{2,3)}。

FWD の特徴は、①調査に従来必要とした足場、荷重車、計測機器等が不要である。②FWD 本体にたわみセンサを

7 個から 10 個備えており、床版パネル単位のたわみ量を多数のセンサで同時に計測できるため、たわみ形状の評価が簡単に行える。③一箇所当たりの測定時間は 5 分程度であるため、橋梁全体または 1 径間の全数調査も可能である。

これらの特徴を活かすと FWD の調査は、現行の載荷試験に比べ、例えば橋長 20m 程度で 20 パネルの床版の調査では、調査日数で約 1/5 と簡便で、調査経費で約 1/10 と安価に 7~10 倍の大量のデータを取得することができる。したがって、新しい調査法に発展する可能性を有している。

一方、FWD は舗装のたわみ量を簡便に測定するために開発されたものであり、その測定機構は不動点を必要としない。橋梁に適用した場合には、衝撃荷重によって床版がたわむと床版を支持している支持桁もたわむことから、FWD で測定されるたわみ量には支持桁のたわみ成分も含まれ、支持桁を基準とする床版たわみ量と一致しない場合がある。しかし、一致しない場合でも下面たわみ量を数箇所同時に測定してキャリブレーションを適切に行うことにより、実用的な範囲で健全度の評価に活用できるものと考えられる。

本報文は、多摩水道橋(旧橋)の床版撤去時に仕様の異なる FWD2 機種を使用して荷重を 3 レベルに変えてたわみ量を測定し、たわみ量の変動や上下たわみ量の整合性

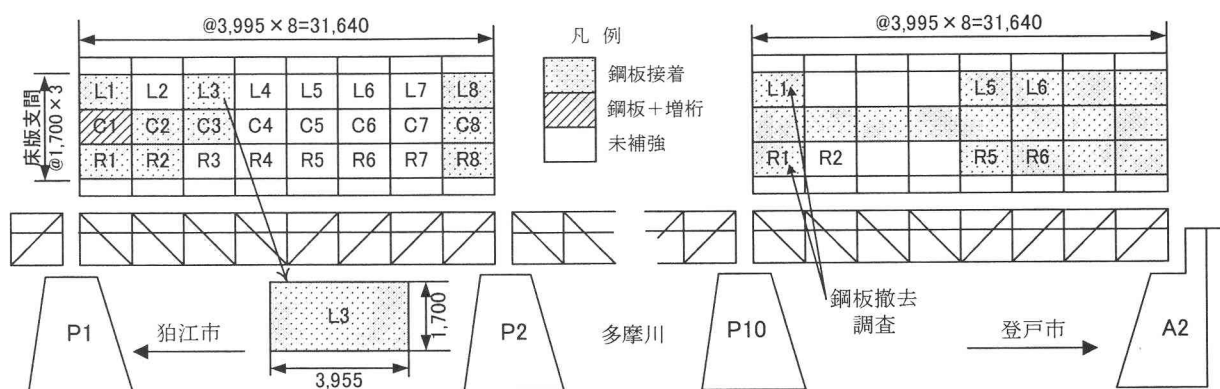


図-1 多摩水道橋の調査箇所図

など、FWD を橋梁床版に適用した場合の基本的な特性について検討を行った。また、文献 1) で提案しているたわみによる劣化度とひび割れ密度による劣化度による評価を行い、FWD たわみ量は健全度を評価し得る有効な調査方法であることを示すものである。

2. 調査概要

2.1 橋梁の概要

多摩水道橋（旧橋）は、東京都の多摩川に架かる写真-1 に示す単純トラス形式で、1953 年（昭和 28 年）竣工の橋長 355.6m の二等橋である。橋梁は図-1 に示す支間長 31.64m×11 径間で構成され、幅員は 9.5m（車道 6.5m の 2 車線、歩道 1.5m×2）である。床版支間は 1.7m、設計床版厚は 210 mm(RC 床版厚 160 mm+調整コンクリート 50 mm)、舗装厚 80 mm であり、ハンチ幅 100 mm 高さ 50 mm のフラットスラブ形式に近い非合成床版である。

床版の補修履歴は、昭和 58 年にひび割れが多く損傷の著しい床版を対象に鋼板接着工法により補強している。また損傷の著しい箇所には鋼板接着と縦桁増設工法の併用で補強している。本橋梁は、交通量の増大に伴う床版の耐荷力不足とトラス部材の腐食など劣化・損傷が進展していることから架け替えが平成 7 年度に行われた。新橋は 4 車線に拡幅され、車道幅員 14m 歩道 2.75m×2 となり、橋長は 358.8m の 3 径間連続ローゼ形式のアーチ橋になった。

本検討では、図-1 に示す旧橋の P1-P2 径間と P10 - A2 径間の床版を調査対象とした。

2.2 床版厚・配筋とコンクリートの品質調査方法

床版厚と配筋状態を確認するため P1-P2 径間の C4, R5, L6 の 3 パネルから直径 100 mm のコア各 3 本を採取して、圧縮強度、弾性係数、ポアソン比を調査した。併せて L4, L5 の 2 パネルから 1.5×2m の版を写真-1 に示すようにダイヤモンドカッターで切出し、床版厚と配筋

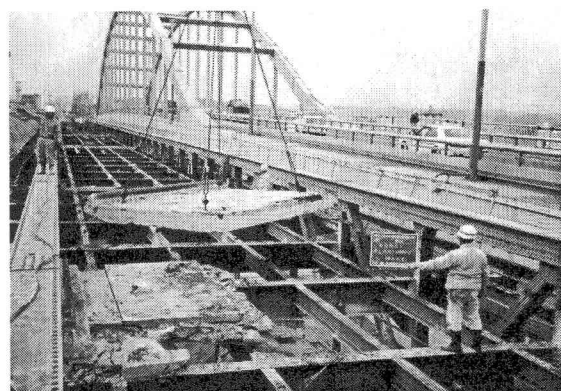


写真-1 多摩水道橋の旧橋床版撤去状況
(右のローゼ形式は新橋)

状態を確認した。

2.3 ひび割れ密度の調査方法

P1-P2 径間の未補強床版を調査対象に格子密度法によるひび割れ密度(Cr)を調査した。密度の算出範囲は支間方向 1.25m×3m に 125 mm 間隔の格子線を基準に求めた。また、ひび割れのうち角欠けしているひび割れ部分を抽出して角欠け密度 (Ck) とした。そしてひび割れ密度とたわみ量の関係についても検討を行なった。

2.4 FWD たわみ量の測定箇所

FWD によるたわみ量の調査は、図-1 に示した 2 径間のうち P1-P2 径間はすべての床版（未補強床版、鋼板接着補強床版、鋼板+縦桁増設併用補強床版）24 パネルについて、FWD を用いて舗装面から上面たわみ量の測定を行った。また、貫通ひび割れ部のたわみの挙動を検討するため、パネル C4 端部 (C3 側) に貫通ひび割れがあることから、この貫通ひび割れ部に載荷してたわみ量を測定した。P10-A2 径間では、図-1 に示すパネル番号の付与してある 7 パネルを調査対象とし、L1 と R1 の 2 パネルは、鋼板の撤去前・後に FWD たわみ量を測定して補強効果の確認を行なった。

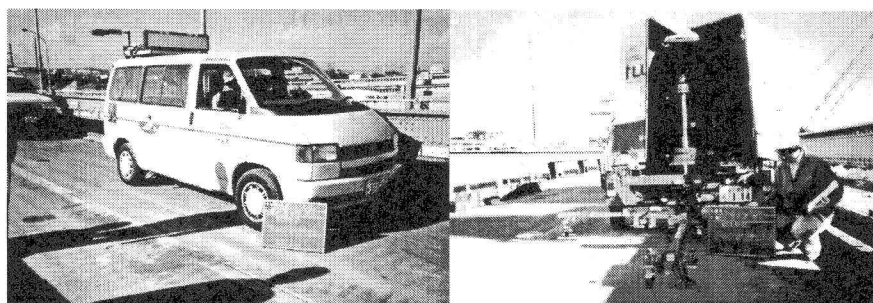


写真-2 FWD (左：フェニックス, 右：コマツ)

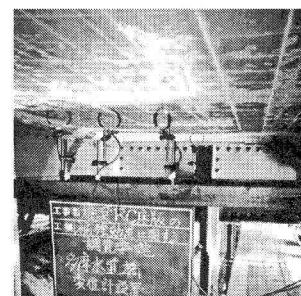


写真-3 下面たわみ計

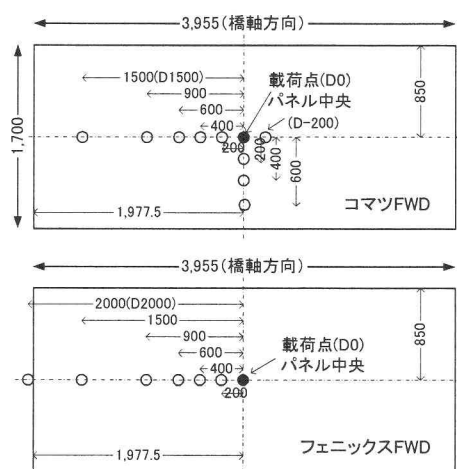


図-2 FWD センサ配置図

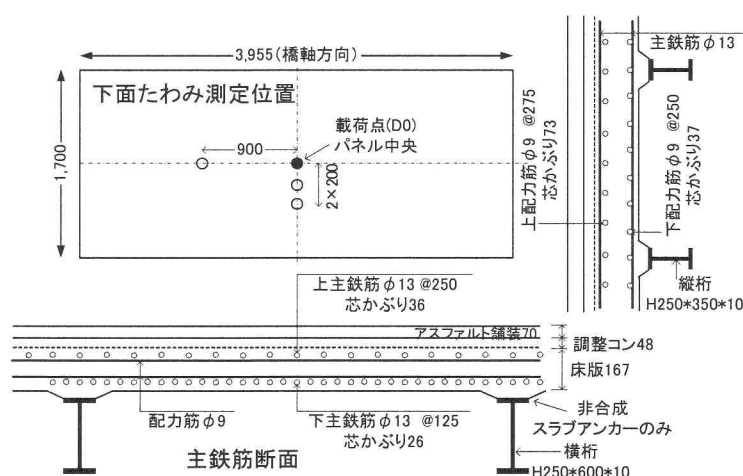


図-3 下面たわみ測定位置と床版形状寸法

2.5 FWD の仕様と測定方法

FWD の仕様を表-1 に示す。東京都で舗装のたわみ測定機として実績のあるたわみセンサの測定原理が異なる写真-2 に示す 2 機種を使用した。本調査の測定荷重は、両機種の標準発生荷重である表-1 に示す 3 レベルに設定して測定した。

FWD たわみセンサの配置は図 - 2 のとおりであり、取付け方向は、両機種とも搭載車両の中心軸上に一方方向（縦方向）に取付けられている。橋梁上で測定する場合は、橋軸方向のたわみを測定する機構になる。ただし、コマツ FWD は、本調査のため橋軸直角方向も測定できるアタッチメントを製作して、XY 両方向計測できるように改造した機種を使用した。たわみセンサ取付け位置は、フェニックス FWD では、荷重点からの距離(mm)に対応して D0 から D2000 の橋軸方向 7 点である。コマツ FWD は橋軸方向 D-200 から D1500 の 7 点、橋軸直角方向 D0 から D600 の 4 点である。

測定位置は、床版パネルの中心位置を橋面上にマーキングし、直径 300 mm の載荷板中心位置とのずれが概ね 50

mm以内になる条件で載荷した。測点 1 箇所あたりの測定回数は、フェニックスは同一荷重で 4 回測定し異常値を切捨て 3 回の平均値を測定値とした。一方、コマツは同一荷重で 5 回測定し、最小と最大を切捨て 3 回の平均値を測定値とした。なお、同時に路面温度と気温も計測した。また、P1-P2 径間は FWD の測定値の再現性や変動などを検討するため測定時期を 10 月と 12 月にずらして 49kN 載荷で 2 回測定した。

2.6 下面たわみ量の測定箇所と測定方法

FWD による上面たわみ量 D0 と通常の測定方法である下面に設置した変位計によるたわみ量との整合性を確認するため、P1-P2 径間の L3 と L4 パネルにおいて下面たわみ量を測定した。下面測定位置の詳細は図 - 3 に示すとおりで、床版中央と主筋方向 2 点（荷重点から 200 mm 間隔）、配力筋方向 1 点（荷重点から 900 mm）の合計 4 点とした。使用した変位計のタイプは、写真-3 に示すひずみゲージ式のリング変位計とした。計測方法は動ひずみ測定器に AD 変換器を介してパソコンで処理した。

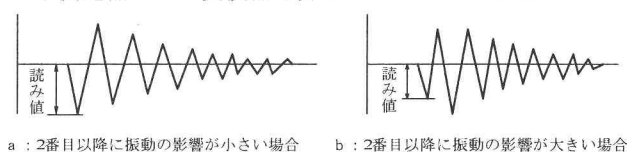


図-4 FWD たわみの振動波形

表-1 FWD の仕様

FWDタイプ	質量 (kg)	計測方式	最大測定 たわみ量	荷重 (kN)
フェニックス	2,700	ジオフォン	5mm	49, 78, 4, 98
コマツKM150	740	リニアゲージ	2mm	29, 4, 49, 68, 6

下面変位計の設置方法は、縦桁に変位計を取り付けるL形鋼を固定している。このため、床版上面からFWDによって、床版中央を加振すると振動の伝播は、床版→縦桁→L形鋼→変位計と伝播して、変位計の応答にも影響を及ぼす可能性がある。加振時の変位計の応答は、図-4に示すように第1波目にピークがあるものと2波目以降にピークが発生するタイプがある。過去の調査経験から2波目以降にピークがあるタイプは、桁のたわみ成分や変位計取付けL形鋼の振動成分などが付加されるなどの影響があるため、これらの影響が少ない第1波目の読み値を床版の下面たわみ量とした。

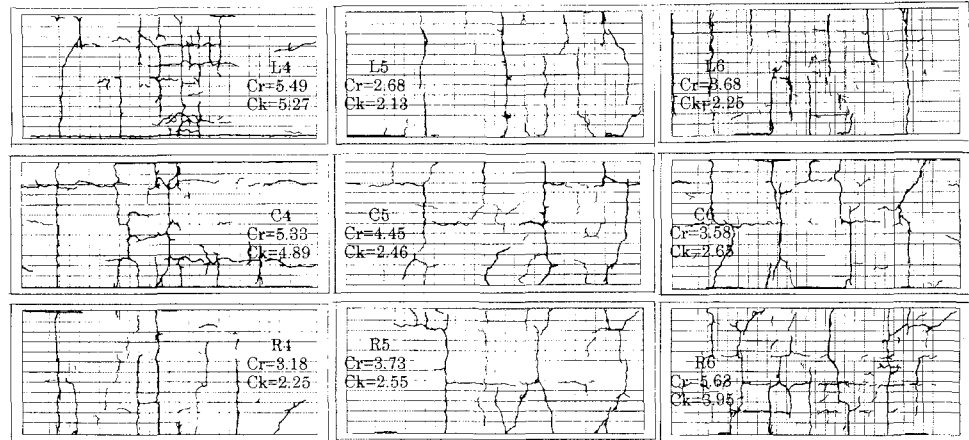
3. 調査結果と考察

3.1 床版厚・配筋とコンクリートの品質

配筋の状態を確認するため1.5m×2mの床版2枚を切出して調査した結果は図-3に示した。床版厚は、RC床版厚167mm+調整コンクリート48mm、舗装厚70mmであった。設計床版厚210mm(RC床版厚160mm+調整コンクリート50mm)、舗装厚80mmであることから、ほぼ設計値に一致していた。引張り主鉄筋は丸鋼φ13mmで125mmピッチ、芯かぶり25mmであった。圧縮主鉄筋は丸鋼φ13mmで250mmピッチ、下面からの鉄筋位置は125mmであった。引張り配筋筋は丸鋼φ9mmで250mmピッチ、圧縮配筋筋は丸鋼φ9mmで275mmピッチであった。なお、骨材は良質な河川砂利を使用しており、非常に密実で良好なコンクリートであった。3パネルの床版が

表-2 コアの試験結果

コア採取No.	C4-1	C4-2	C4-3	R5-1	R5-2	R5-3	L6-1	L6-2	L6-3	平均
圧縮強度(N/mm ²)	56.4	63.1	56.9	59.7	64.2	64.8	49.8	64.5	61.9	60.1
弾性係数(N/mm ²)	35,970	41,260	39,980	43,120	36,950	42,040	41,260	42,340	46,060	40,998
ポアソン比	0.21	0.21	0.18	0.11	0.17	0.22	0.20	0.25	0.18	0.19



凡例：Cr：ひび割れ密度 (m/m²) Ck：角欠け密度 (m/m²)

図-5 P1-P2 径間のひび割れ図

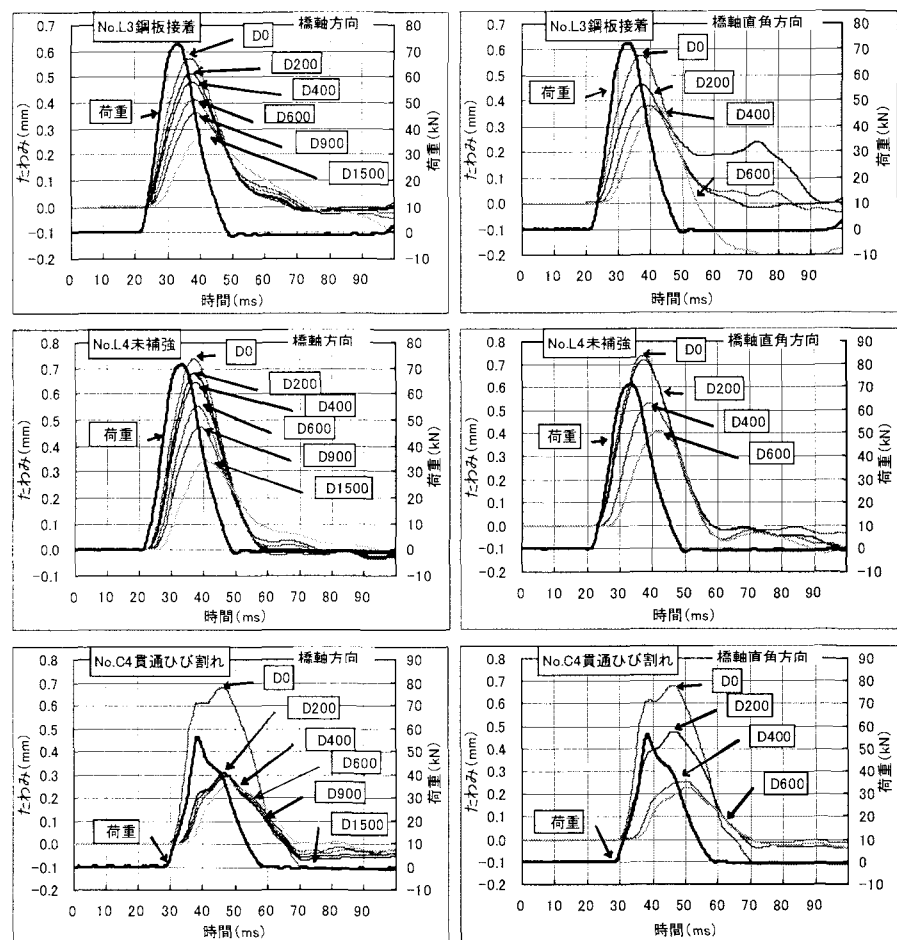


図-6 FWD 荷重-たわみ測定波形

ら各3本のコアを採取したコアの材令42年の試験結果を表-2に示した。圧縮強度の平均値は60.1N/mm²、弾性係

数の平均値は約 41,000 N/mm²，ポアソン比は 0.19 であった。なお中性化深さは最大 22.3mm であった。

3.2 床版のひび割れ状況

P1-P2 径間の未補強床版のひび割れ状況を図-5 に示す。平均ひび割れ密度は 4.24 m/m² と大きくはないが，橋軸直角方向に入っているひび割れ幅が大きく，一部の床版では桁に漏水が見られ，鉄筋の腐食が進行している。

3.3 FWD たわみ測定波形

コマツ FWD のたわみセンサと荷重検知用のロードセルの出力結果の代表例を図-6 に示す。データのサンプリング間隔は 0.2ms である。調査パネルは，図-1 に示す P1-P2 径間の L3 (鋼板接着床版)，L4 (未補強床版)，C4 (未補強で貫通ひび割れがあり，舗装面に「鳥の巣状」にひび割れがあってやや陥没の兆候がある床版) の橋軸方向と橋軸直角方向の出力例である。通常の舗装における荷重では，荷重のピークが 10～30ms の範囲⁴⁾ になるようバッファ (スプリング系や衝撃緩和用ゴム) で調整されている。L3，L4 のピーク荷重発生時間は約 13ms，C4 は約 10ms であり許容範囲内にある。また，舗装の場合には荷重の応答波形は L3，L4 の出力例のように実際の走行荷重に近いハーバーサイン波あるいはハーフサイン波⁴⁾ とされており，床版に適用した場合にも同様な応答波形が得られる。荷重が同じレベルでは荷重点の D0 の最大たわみ量は，床版の剛性すなわち健全性に依存して，L4 未補強床版 > L3 鋼板接着床版の結果が得られている。L3 鋼板接着床版の応答では，ピーク後の波形の橋軸直角方向 D400 (荷重点と支持桁との中間点) が乱れており，鋼板の接着部の剥離や完全合成でない状態を感知しているものと推察される。C4 の未補強貫通ひび割れ部の応答波形では，荷重のピーク波形が階段状に変化しており，貫通ひび割れ部の荷重伝達に遊びが感知され，D0 と D200 に不連続な応答が確認された。この影響は特に橋軸直角方向で顕著に現れている。なお，フェニックス FWD は，応答波形を出力できないため，荷重と各センサの最大値を出力した。

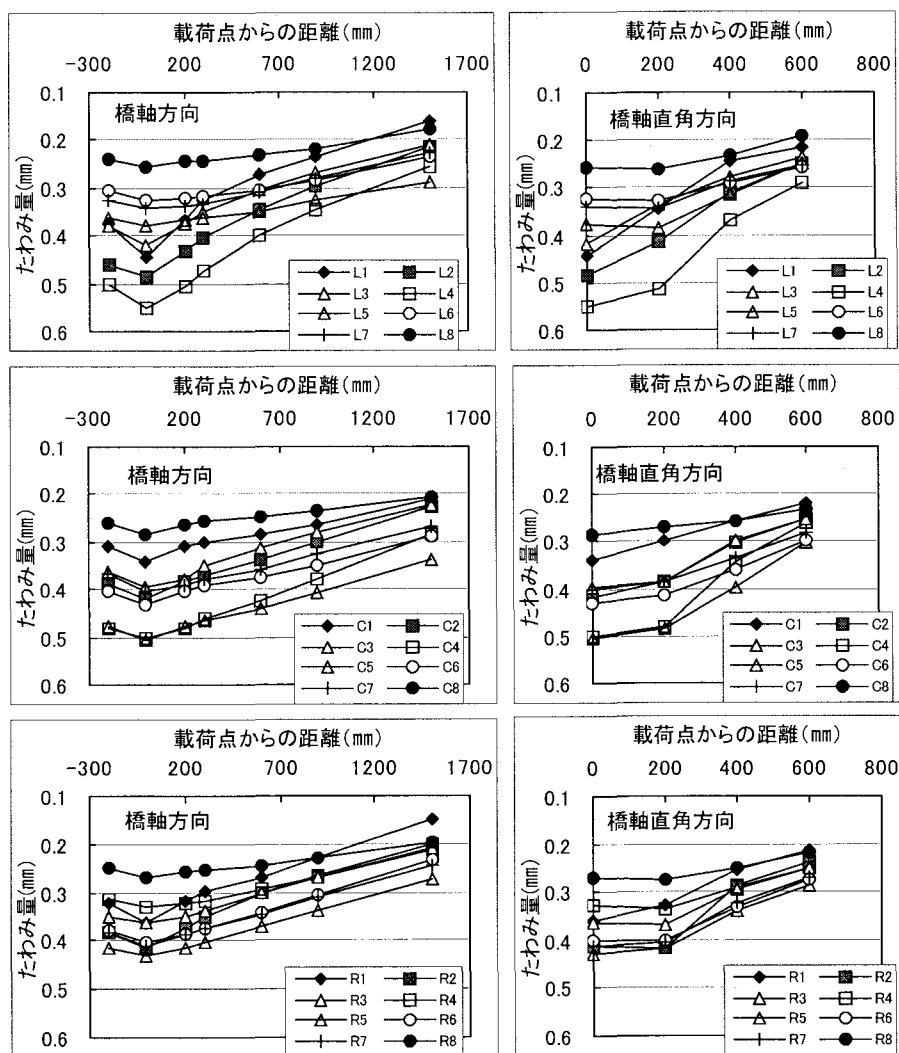


図-7 P1-P2 径間床版のコマツ FWD49kN たわみ測定結果

3.4 P1-P2 径間 FWD たわみ量の測定結果

P1-P2 径間のコマツ FWD49kN の全床版パネルの各センサの最大たわみ量の測定結果を図-7 に示す。なお，図のデータは，下面たわみ量に基づく補正を行っていないが，P1-P2 径間全体の各床版のたわみ性状の関係が把握できる。例えば，一番損傷していると思われる床版は，D0 が一番大きい L4 である。L8，C8，R8 などの鋼板接着床版は，たわみ量が小さく，たわみ面の曲率の形状も滑らかで補強効果が発揮されており，他のパネルに比べ損傷の程度は小さいと判断される。また，たわみ面の曲率の形状を比較することにより，各パネルの剛性や損傷の程度を相対的に評価することが可能であり，極めて有効なデータである。

FWD のたわみ量の測定では，図-7 に示すたわみ曲線を簡単に求めることができる。従来の下面に変位計をセットして計測する方法では，大量の床版に適用することは不可能に近く，このような詳細なたわみの検討は困難である。

荷重を3ランクに変化させて測定した2機種の主な測点の上面たわみ量の統計量を表-3に示す。個数48個は、49kN 荷重で測定日を変えた2回分のデータである。荷重の変動係数は、フェニックスは1~3%と安定していたがコマツは荷重が小さいほど変動係数が大きく安定していない。基準荷重に校正したたわみ量 D0 の変動係数は、フェニックスでは15.3~23.8%、コマツでは18.8~23.6%とほぼ同じ変動幅であり、2機種とも同一の測定結果が得られる。

表-3 P1-P2 径間 24 パネル測定値の統計量

機種	フェニックス			コマツ				
	荷重(kg)	D0(mm)	D900(mm)	荷重(kg)	D0(mm)	D200(mm)	D400(mm)	D900(mm)
個数	48	48	48	24	24	24	24	24
最小	4828	0.227	0.186	2601	0.096	0.093	0.092	0.090
最大	5386	0.638	0.429	3689	0.249	0.215	0.194	0.139
平均	5046	0.422	0.292	3024	0.152	0.143	0.135	0.115
標準偏差	134	0.100	0.062	460	0.036	0.030	0.024	0.014
変動係数	2.7%	23.8%	21.2%	15.2%	23.6%	20.8%	17.6%	12.1%
個数	24	24	24	48	48	48	24	48
最小	7436	0.485	0.353	4860	0.203	0.184	0.184	0.182
最大	7789	0.915	0.576	5733	0.550	0.513	0.433	0.408
平均	7607	0.681	0.458	5172	0.359	0.341	0.294	0.273
標準偏差	89	0.104	0.059	295	0.079	0.072	0.055	0.047
変動係数	1.2%	15.3%	12.8%	5.7%	21.9%	21.1%	18.9%	17.1%
個数	24	24	24	24	24	24	24	24
最小	9646	0.581	0.432	7098	0.333	0.314	0.314	0.286
最大	10139	1.105	0.722	7391	0.704	0.652	0.605	0.487
平均	9812	0.816	0.562	7231	0.488	0.462	0.441	0.379
標準偏差	114	0.130	0.077	75	0.092	0.082	0.072	0.052
変動係数	1.2%	16.0%	13.7%	1.0%	18.8%	17.7%	16.4%	13.7%

3.5 測定日による再現性

測定日を約2ヵ月ずらして測定したP1-P2径間の24パネルのFWD49kN換算荷重時のD0たわみ量平均値の1回目と2回目の相関を図-8の上段に示した。フェニックスは1回目(1995.10.17 路面温度8℃)に対して2回目(1995.12.14 路面温度4℃)の測定値が全体に荷重0の回帰式の推定値で0.186mmほど大きく測定されていることから機械の調整が不十分だった可能性がある。一方、コマツは1回目(1995.9.10 路面温度29℃)に対して2回目(1995.10.17 路面温度8℃)が全体に小さく測定されている。図-8の下段には同一測定日と2機種の2回の平均値の相関を示した。両者の測定値には高い相関があることから、いずれの機種で測定しても同様なたわみ量が得られるが完全に一致しない。一致しない原因の一つとして、たわみセンサを固定しているバーの支持方法がフェニックスは本体から吊り下げているのに対し、コマツは路面からバネで直接支持している構造であり、2機種のセンサ支持方法の違いの影響が考えられる。

3.6 上下たわみの整合性と補正方法

2機種の載荷板直下D0上面たわみ量と下面たわみ量の関係は図-9に示とおりである。下面たわみ量と荷重の関係では、2機種とも荷重0の回帰式の推定値はほぼ0で正確に計測されている。一方、2機種の上なたわみ量は下面変位計のたわみ量に比べ大きく測定され一致していない。荷重とD0たわみ量はリニアな関係にあるが、荷重が大きくなるにしたがって上下たわみ量の比率は大きくなるが判る。また、荷重0の推定値もコマツはマイナス側にあ

(注) 荷重は測定値、たわみ量はそれぞれの基準荷重に校正した値。コマツD200, D400は橋軸直角方向センサの値。

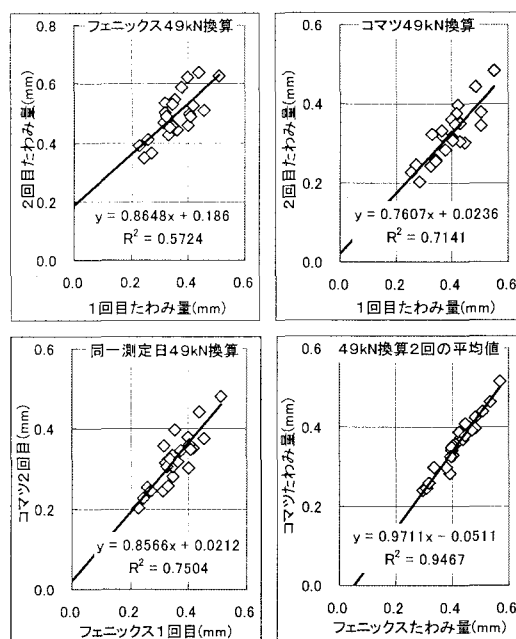


図-8 FWD 2機種の測定値の相関

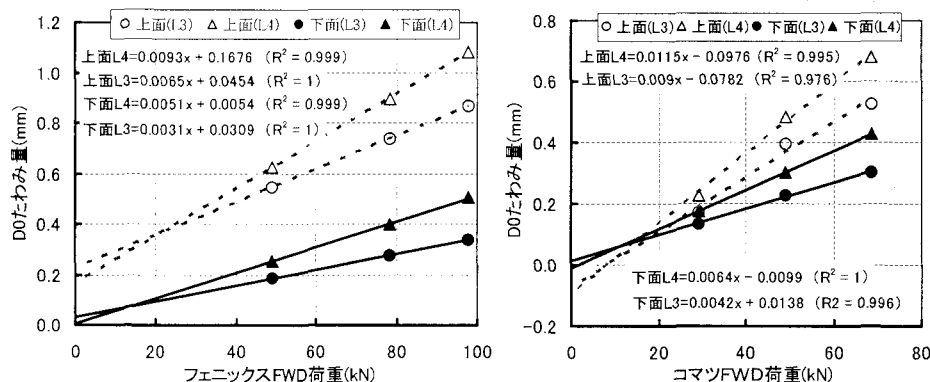


図-9 荷重レベルを変えた場合の上下たわみ量の関係

り、フェニックスは大きくプラス側にシフトしている。したがって、FWD たわみ量は、本調査橋梁においては支持桁間のたわみ量を正確に測定できない。しかしながら、下面たわみ量と比例関係にあることから、たとえば、ここに示したように下面たわみ量を同時に測定して次式の補正係数(α)を求めることにより、実用的な範囲でたわみ量を補正することができる。

$$\text{補正たわみ量} = \text{測定たわみ量} / \alpha$$

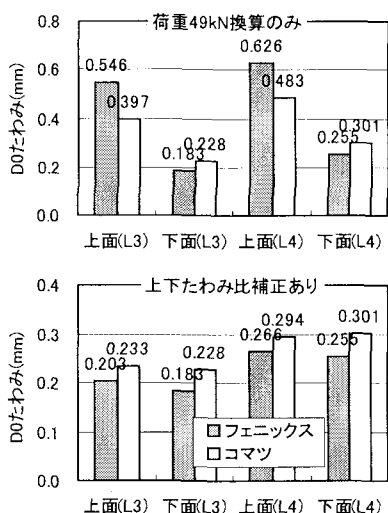


図-10 上下たわみ比による補正結果

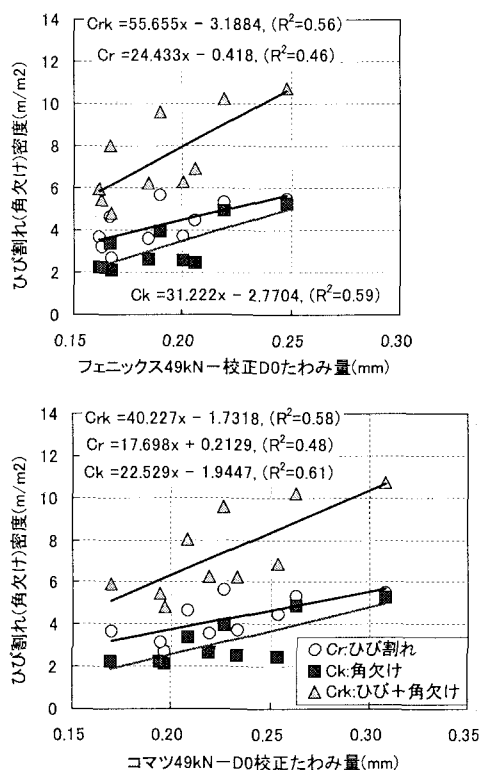


図-11 ひび割れ密度とたわみの関係

ここに、

$$\text{補正係数}(\alpha) = \text{上面たわみ量} / \text{下面たわみ量}$$

FWD2 機種種の同一荷重である 49kN 載荷時の下面たわみと上面たわみの関係を図-10 に示す。下面たわみ比による補正前の下面たわみ量は、コマツの方がフェニックスに比べ約 L3 では 0.045 mm, L4 で 0.046 mm 大きい。また、上面たわみ量の比較では、フェニックスの方がコマツに比べ L3 で 0.149 mm, L4 では 0.143 mm 大きく測定されている。一方、図-10 下段の補正後上面たわみ量は下面たわみ量に対して 10% 程度の誤差になるが、機種間の差は解消されない。機種によって載荷方法やたわみセンサの形式や FWD 本体の質量が異なるなどの影響が考えられる。

舗装の FWD 試験方法では、アスファルト舗装の場合特に温度の依存性が高いため、標準温度として 20℃ に換算して評価する方法がとられている。本橋でも路面温度が 29℃ と 5～10℃ のデータで比較した範囲では、アスファルト舗装厚が 70 mm と床版厚 210 mm に比べ薄い場合、29℃ の方が多少大きいたわみ量であったものの、その影響は少ないと考えられる。

3.7 たわみとひび割れ密度の関係

FWD の D0 たわみ量とひび割れ密度の関係を図-11 に示す。図中の「角欠け」はひび割れの中で角欠けしているひび割れを抽出したときのひび割れ密度である。回帰式の相関係数は $Cr=0.5 \sim Ck=0.6$ であり、必ずしも良い相関とは言えないものの、たわみ量は健全度や劣化度の評価指標として活用できる。

3.8 貫通ひび割れ部のたわみ評価

図-12 は、C4 床版の C3 よりの床版端部約 400 mm の位置にある貫通ひび割れ位置のデータと L3, L4 のデータを比較したものである。L3 (鋼板接着) と L4 (未補強) との比較から明らかに C4 (貫通ひび割れ部) は、たわみ形状が相違しており、貫通ひび割れの存在も判断可能であると思われる。このようにたわみ曲線の勾配に着目すれば、滑らかでないたわみ曲線の床版は、貫通ひび割れの可能性が高いと判断することができる。

3.9 鋼板接着床版の補強効果の評価

PI0-A2 径間の D0 たわみ量の結果を図-13 に示す。床版 R2 以外は鋼板接着補強床版である。床版 R1 は他の床版に比べたわみ量が大きく、補強効果が小さいと判断される。L1 と R1 については、鋼板接着補強効果を調べるため鋼板を撤去した後もたわみ量を測定して次式で補強効果を評価した。

$$\text{補強効果 (たわみ低減率)} = ((\text{鋼板撤去後たわみ} - \text{鋼板撤去前たわみ}) / \text{鋼板撤去後たわみ} \times 100)$$

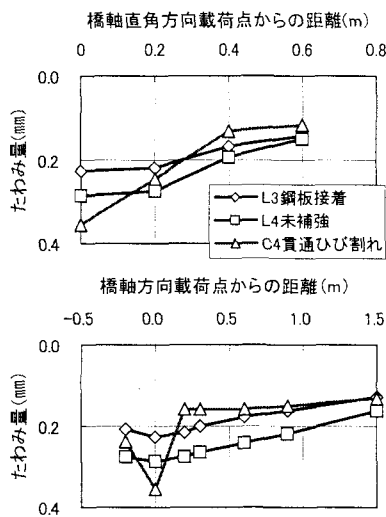


図-12 貫通ひび割れ部のたわみ比較

として評価した結果を図-14に示す。L1のたわみ低減率は、荷重の小さい29.4kNでは低減率20%と効果が大きく、49kNおよび68.6kNでは低減率が約10%でいずれの荷重レベルでも効果が認められたが、R1はいずれの荷重レベルでも1%以下であり、ほとんど補強効果が認められない結果となった。また、鋼板撤去後に接着材の剥離の確認状況を図-15に示す。R1は鋼板周辺部とアンカーボルト4箇所に円形の浮きを確認される。なお、L1の右半分中央上側の大きい剥離部は、撤去した際に剥離した可能性があるものの判然としないため剥離部として図示している。

4. 劣化度による健全度評価

4.1 道路管理者（東京都）の健全度評価

多くの道路管理者の現行の床版健全度評価手法は、床版下面に発生するひび割れ、漏水、鉄筋腐食などの損傷要因や劣化の状況を定性的に評価する方法が一般的に用いられている。東京都では5年間隔の頻度で橋梁の定期点検（目視調査）を行い、床版に著しい損傷が発見された場合や急速に進行すると思われる場合には詳細健全度調査を行う。詳細健全度調査は下面に足場を設け接近して調査を行うものであり、ひび割れに着目した健全度評価ランクは表-4に示す5段階で評価を行っている。通常、健全度ランクCの状態はできるだけ早い段階に補強や補修を行う対応を要求し、ランクDでは各種補強工法による対策をとることになっている。東京都の場合はランクCに劣化すると鋼板接着工法による補強対策が多用されてきた。鋼板接着補強床版の健全度評価は、経年に係わらず通常一義的にランクCに評価される。鋼板を接着するとひび割れの確認ができないことから、補強効果が持続しているかどうかの判断は、赤外線や超音波探査など研究段階にあり、打音点検による接着材層の剥離で判断

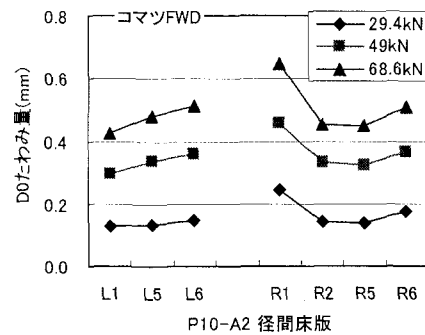


図-13 鋼板接着補強床版のたわみ

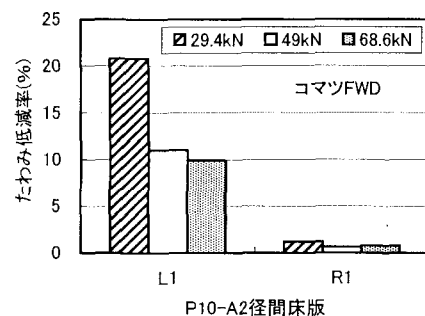


図-14 鋼板接着床版のたわみ低減率

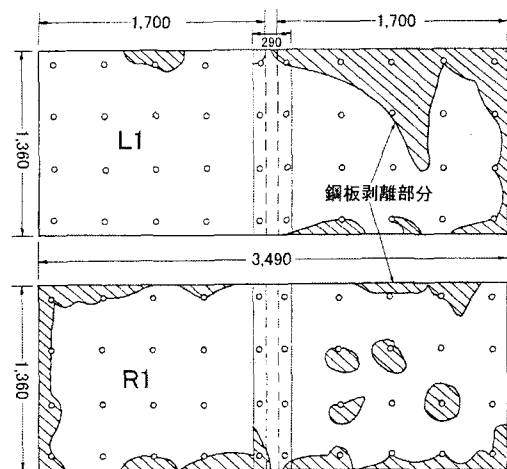


図-15 鋼板撤去後の接着状況

表-4 東京都の床版健全度ランク

健全度ランク	ひび割れ密度	ひび割れ間隔	ひび割れ幅
A	2m/m ² 未満	1.0m以内	0.2mm以内
B	2~6m/m ² 未満	0.7~1.0m以内で部分的に0.4m~0.7mの間隔でつながる	0.2mm以上が少しい
C	6~10m/m ² 未満	全体的に0.4~0.7mの間隔でつながる	0.2mm以上がかなりある
D	10~14m/m ² 未満	0.3~0.4mの間隔でつながり、部分的には主鉄筋または配力筋と同程度のピッチで入る	0.2mm以上がほとんどである
E	14m/m ² 以上	0.3m以下	0.5mm以上が多い

する方法以外に有効な調査方法はないというのが実情である。また、打音点検を実施するためには足場が不可欠であり、塗装の塗替え時の足場を代用して行う方法が取られる。この場合の頻度は10年から15年間隔となる。このことから、打音点検に代わる簡便な評価方法が求められている。

4.2 たわみ量に基づく劣化度

松井らの文献1)によれば、実橋と輪荷重走行疲労実験によりひび割れ密度とたわみ量の関係を調査した結果、ひび割れ密度とたわみの使用限界を基準に、それぞれの劣化度を次式で表現すると両者の関係は比例関係にあることから、いずれの劣化度も有効な指標であるとしている。そこで、次式によってたわみ量による劣化度(Dδ)を求める。

$$D\delta = (W - W_0) / (W_c - W_0) \cdots \cdots (1)$$

ここに、

Dδ：たわみ量に基づく劣化度

W：ある荷重のたわみ量 (mm)

W₀：全断面有効とする等方性版理論による計算たわみ量 (mm)

W_c：引張りコンクリートを無視した直交異方性版理論による計算たわみ量 (mm)

L3, L4の下面たわみ量の比を校正係数とするD0補正たわみ量は、表-5のとおりである。理論たわみ量を求め

表-5 49kN 載荷 D0 補正たわみ量 (mm)

床版No.	1	2	3	4	5	6	7	8
L	0.213	0.265	0.233	0.294	0.188	0.162	0.171	0.137
C	0.170	0.221	0.203	0.251	0.242	0.210	0.202	0.140
R	0.194	0.226	0.199	0.185	0.223	0.217	0.217	0.147

るための計算条件と計算結果は表-6のとおりである。床版厚と配筋は切出し床版の平均断面から設定した。床版厚は調整コンクリートが完全に一体として機能していたことから、調整コンクリートを含む厚さを床版厚として計算した。なお、調査が秋季から冬季であり、アスファルト舗装も考慮すべきと考えられるが、ひび割れが入っている箇所も散見されることから、計算では考慮しないこととした。また、載荷板の形状は直径300mmとし、載荷荷重は49kNの計算たわみである。

4.3 ひび割れ密度に基づく劣化度

文献1)によるひび割れ密度に基づく劣化度(D_c)は、(2)式で定義されている。

$$D_c = C_d / 10.0 \cdots \cdots (2)$$

ここに、

C_d：ひび割れ密度 (m/m²)

10.0：使用限界のひび割れ密度 (m/m²)

ひび割れ密度に関する調査結果は図-5に示したとおりであり、ひび割れ密度(C_r)のほかにひび割れの角欠

表-6 計算条件と49kN載荷計算たわみ量

床版厚 (mm)	コア強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)	ポアソン比	主鉄筋		配力筋		計算たわみ量(mm)	
				上段:圧縮	有効高	上段:圧縮	有効高	全断面	引張り
				下段:引張	(mm)	下段:引張	(mm)	有効	無視
215	60.1	41000	0.19	φ13@250	84	φ9@275	121	0.066	0.500
				φ13@125	189	φ9@250	178		

表-7 たわみとひび割れに関する劣化度

床版No.	L4	L5	L6	C4	C5	C6	R3	R4	R5	R6
劣化度Dδ	0.526	0.282	0.221	0.427	0.406	0.331	0.306	0.275	0.362	0.347
劣化度DC _r	0.549	0.268	0.368	0.533	0.445	0.358	0.462	0.318	0.373	0.563
劣化度DC _k	0.527	0.213	0.225	0.489	0.246	0.265	0.340	0.225	0.255	0.395
劣化度DC _{rk}	0.538	0.241	0.297	0.511	0.346	0.311	0.401	0.271	0.314	0.479

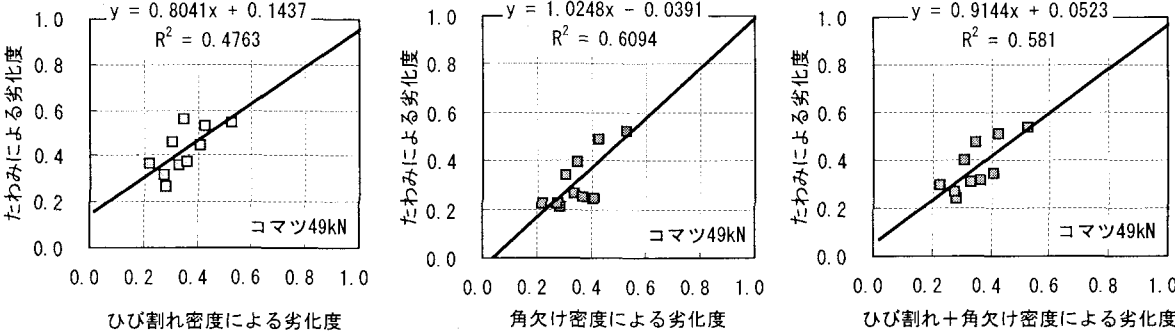


図-16 ひび割れ密度による劣化度とたわみによる劣化度の関係

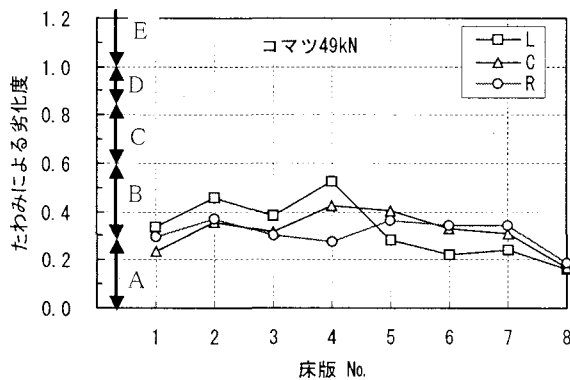


図-17 たわみによる劣化度の評価

たわみ量による劣化度 $D\delta$ とひび割れに関する 3 指標 (Cr, Ck, Crk) の劣化度の関係を図-16 に示した。ひび割れ密度とたわみ量に基づく劣化度の関係より角欠け密度とたわみ量に基づく劣化度の関係の方が若干相関は良い結果となった。文献 1) によるたわみ量に基づく劣化度と健全度ランクの関係を本調査橋梁の A1-P1 径間の 24 床版パネルに適用すると図-17 に示す結果が得られる。評価結果は健全度ランク A (劣化度 0~0.3 未満) と健全度ランク B (劣化度 0.3~0.6 未満) に集中している。

ここで、表-4 の目視観察を主体とする技術者による健全度ランクとたわみ量に基づく劣化度の評価結果を表-8 に示す。上段は現行の技術者による健全度評価ランクであり、鋼板接着および縦桁併用補強床版のランクは一義的にランク C に評価されている。一方、下段は FWD たわみ量を文献 1) のランク分けで評価した場合の例であり、たわみ量に基づく判定は、目視による現行の判定をカバーし、かつ鋼板接着床版のランクを一義的に判定することなく、より合理的な評価結果を得ることができる。

5. まとめ

多摩水道橋 (旧橋) の RC 床版にたわみセンサの異なる舗装用 FWD2 機種を使用して調査した結果より、以下の結論が得られた。

- (1) コマツ FWD の荷重と各たわみセンサの応答を調べた結果 L3, L4 のピーク荷重発生時間は約 13ms, C4 は約 10ms であり、通常舗装のピーク荷重発生時間 (10~30ms) の許容範囲内であった。また、荷重の応答波形は、舗装の場合に実際の走行荷重に近いハーバーサイン波あるいはハーフサイン波⁴⁾とされているが、床版に適用した場合にも同様な応答波形が得られた。したがって、床版に衝撃荷重を与える有効な装置であると考えられる。
- (2) FWD で測定される上面たわみ量は、本橋梁では下面たわみ量と一致しない。一致しない原因は、基本的に FWD が不動点の要らない舗装のたわみ量測定装置

表-8 技術者評価とたわみ量による劣化度の評価

技術者の健全度評価								
No.	1	2	3	4	5	6	7	8
L	C	C	C	D	C	C	C	C
C	鋼板+縦桁	C	C	D	D	C	D	C
R	C	C	C	C	B	C	C	C

コマツ FWD たわみ量に基づく評価例								
No.	1	2	3	4	5	6	7	8
L	B	B	B	B	A	A	A	A
C	鋼板+縦桁	B	B	B	B	B	B	A
R	B	B	B	A	B	B	B	A

凡例
 鋼板接着
 鋼板+縦桁
 未補強

$D\delta$ の凡例
 A=0.3 未満
 B=0.3~0.6
 C=0.6~0.85
 D=0.85~1.0
 E=1.0 以上

であり、床版に適用した場合、ジオフォンタイプの FWD は床版を支持している桁の変位成分が付加されて計測される。また、リニアゲージタイプの FWD では、センサの支持パネの影響が考えられる。

- (3) FWD 上面たわみ量は、代表的な箇所の下面たわみ量を同時に計測して適切にキャリブレーションすることにより、下面に変位計を設置する通常の計測法と同様の精度でたわみ量を簡単かつ安価に測定できる。
- (4) 適切に校正された FWD たわみ量は、床版のひび割れ密度および角欠け密度と相関があり、健全度評価に有効な指標である。
- (5) 鋼板接着など下面を補強した床版は、ひび割れが確認できないため、打音点検が有効であるが、FWD たわみ量による評価は補強床版を一義的に判定することなく、より客観的指標を与える。

FWD によるたわみ量の測定は、橋梁の振動が無い状態が理想であるが、車線規制を行った中での調査も可能である。安価で大量なデータを短時間に計測できる特徴を活かし、今後より多くの橋梁に適用して検証を行い、より合理的な評価手法を確立する。

参考文献

- 1) 松井繁之, 前田幸雄: 道路橋 RC 床版の劣化度判定法の一提案, 土木学会論文集 第 374 号, pp.419-426, 1986.
- 2) 阿部忠行, 関口幹夫, 小原利美: 土木構造物の維持更新と機能向上技術開発, 平 8. 都土木技研年報, pp.115-126, 1996.
- 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, 土木学会第三回道路橋床版シンポジウム講演論文集, pp.145-150, 2003.
- 4) 土木学会: FWD および小型 FWD 運用手引き, 舗装工学ライブラリー 2, 2002.

(2003 年 9 月 12 日受付)