

4. 鋼・コンクリート合成床版の実橋調査 — 鎧橋の載荷実験と非破壊検査 —

技術委員会 床版小委員会
倉田 幸宏 春日井 俊博
大久保 宣人 橋吉 宏

1. はじめに

床版の健全度評価法は、ひび割れ性状や床版たわみで劣化度を判定する方法が一般的である。東京都土木技術支援・人材育成センター（以下、東京都と略す）では、RC床版の劣化度を床版たわみで判定できる実用的で簡便性のある衝撃加振によるたわみの計測方法を開発している^{1)~4)}。鋼・コンクリート合成床版（以下、合成床版と略す）ではひび割れ性状を目視確認できないため、文献⁵⁾では劣化度の判定は床版たわみを指標としている。本報告は、東京都が開発した衝撃加振によるたわみの計測方法を、実橋の合成床版で実施してその適用性について検討した結果である。なお、本検討は、東京都との共同研究で行ったものである。

ここで計測対象とした橋梁は東京都管理の国道411号線の青梅市軍畑に位置する「鎧橋」であり、合成床版施工後、計測時で供用24年を経ている。

2. 鎧橋の概要

鎧橋（写真-1）は2径間連続トラスと活荷重合成桁から構成され、計測対象の活荷重合成桁部は、谷側半幅員の3主I桁橋で支間長18.0m、床版支間1.8mで、昭和60年11月（1985年）に床版厚18cmの合成床版に打替えられている⁶⁾。鎧橋の一般図とたわみ計測点を図-1に示す。合成床版の構造（図-2）は、底鋼板に板厚10mmの縞鋼板（材質SM41A）を用い、頭付きス

タッド（φ13×100mm）を間隔250mmで配置したロビンソン型である。コンクリートの設計基準強度は300kgf/cm²で、早強セメントの膨張コンクリート（膨張材量30kg/m³）で施工されている。現状の一方方向交通量は3,000台/日、大型車混入率は8.5%である。

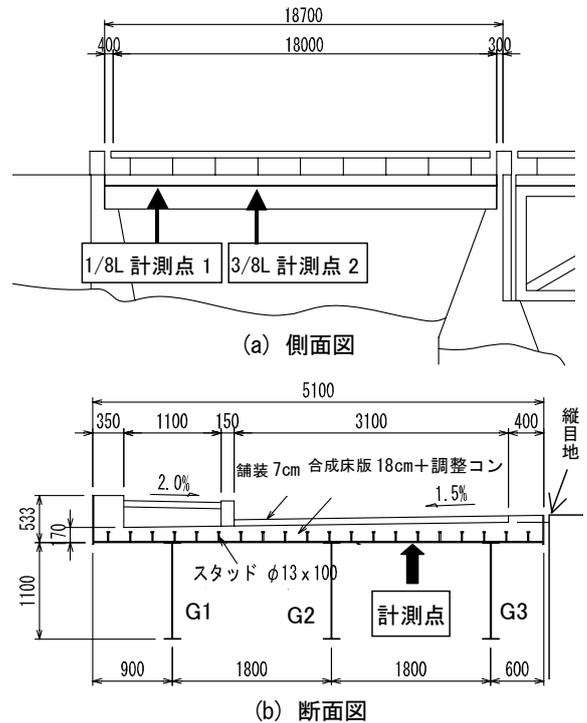


図-1 鎧橋（活荷重合成桁部）の一般図とたわみ計測点

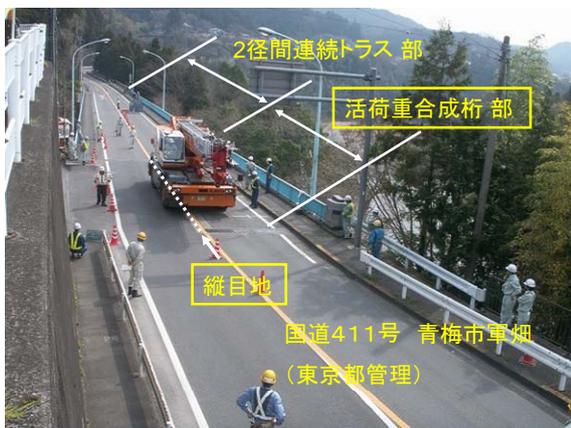


写真-1 鎧橋の概要

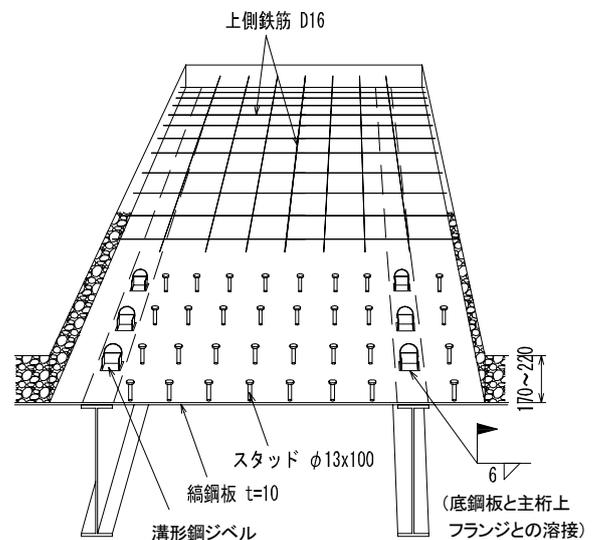


図-2 合成床版の構造

3. 鎧橋で実施した調査項目

橋建協のテキスト「鋼・コンクリート合成床版維持管理の計画資料⁵⁾」に示された点検調査の基本方針は、通常および定期点検では、「舗装路面の異常と床版下面からの漏水の有無を重点的に点検する」こと、および詳細調査では、「床版のたわみで損傷状態を評価する」ことである。さらに、詳細調査では、必要に応じて各種非破壊検査を適用して調査するのが良いとされている。上記の基本方針に基づき、鎧橋で実施した調査項目は以下とした。

- ① 外観調査
- ② 合成床版に対する非破壊検査法の適用
- ③ 床版たわみ計測と床版剛性の評価

また、鎧橋は竣工時に載荷試験を実施していたため、FEM再現解析による経年劣化の推定も実施した。

なお、合成床版の実橋調査は、これまでに、首都高速道路の「枝川ランプ橋⁷⁾」、九州電力苓北発電所の「苓陽橋⁸⁾」でも実施している。

3.1 外観調査

外観調査では、顕在化が予測される変状(図-3)に着目して実施した。伸縮装置からの漏水による発錆が一部に見られたが、全体的に良好な状態であった。

合成床版は、底鋼板があるため内部のコンクリートの状態は目視確認できないことが、維持管理上の課題の一つである。本橋では、内部のコンクリートのモニタリング用として、支点部から約1m離れた歩道近くの床版下面に直径30cmのハッチを2ヶ所設けている。竣工より24年経過時点のハッチ部コンクリート面の状態(写真-2)は、ひび割れの発生がなく、また雨水等の侵入・滞水もない健全な状態であった。

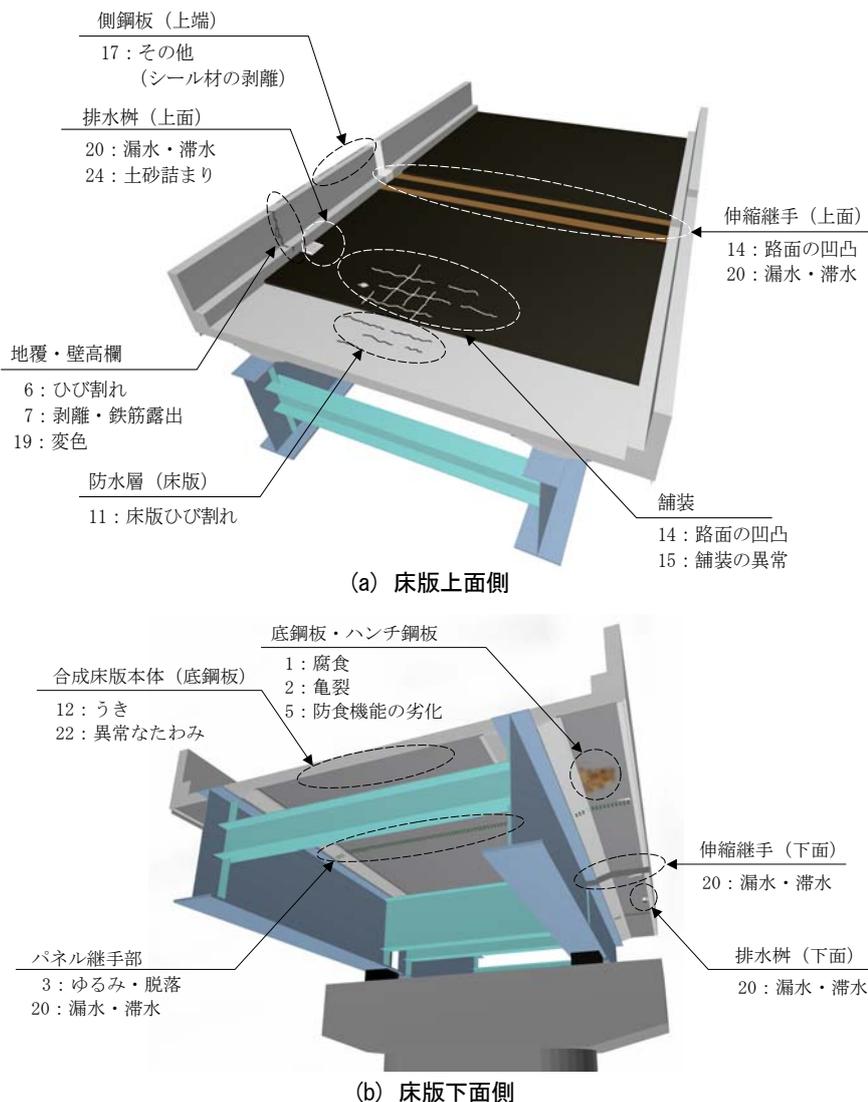


図-3 顕在化が予測される変状⁵⁾



写真-2 点検用ハッチ（蓋を取り除いた状態）

3. 2 非破壊検査

非破壊検査では、床版下面から底鋼板のうき、剥離、内部滞水の有無、底鋼板の板厚を調べた。

ハンマによるたたき試験（写真-3）では異常は確認されなかった。また、打音法（写真-4）と弾性スイー



写真-3 ハンマによるたたき試験



(a) 検査状況



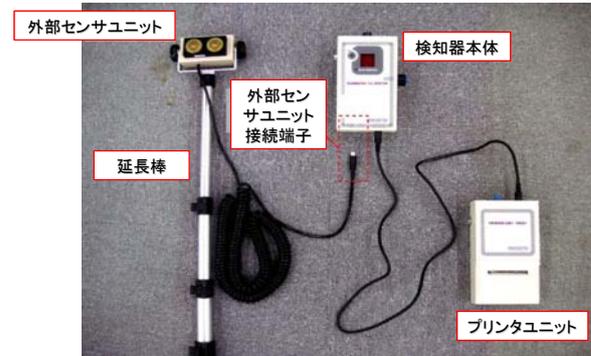
(b) 使用機器

写真-4 打音法

ブ波法（写真-5）も実施した。打音法は、インパルスハンマで底鋼板をたたき反射音を集音して波形解析から内部の状態を推定する方法である。弾性スイープ波法は、底鋼板を弾性スイープ波の発生する探触子で起動し、反射音を集音して波形解析から内部の状態を推定する方法である。いずれの方法でもうき、剥離、内部滞水などの異常は確認されなかった。



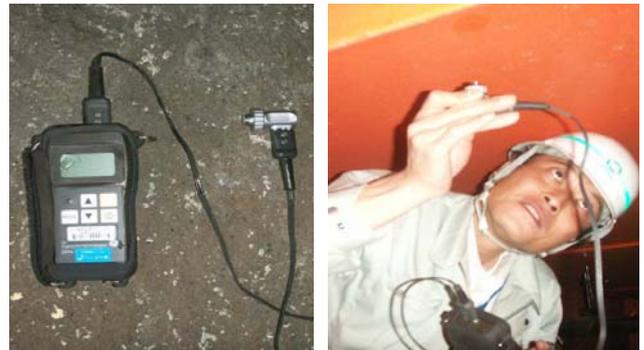
(a) 検査状況



(b) 使用機器

写真-5 弾性スイープ波法

底鋼板（縞鋼板、板厚 10 mm）の内部腐食を調べるため、板厚を写真-6 に示す超音波板厚計（ゼネラルエレクトリック社製）で測定し、減厚なしを確認した。凹凸のある縞鋼板でも精度の高い測定が可能であった。



(a) 使用機器

(b) 測定状況

写真-6 超音波板厚計による測定

3. 3 床版たわみ計測方法

床版たわみを計測した箇所は、**図-1**に示すG2~G3桁間の床版中央で、橋軸方向には支間Lの1/8、3/8の位置の2箇所である。**表-1**に示す3つの方法で床版たわみを計測して考察を行った。方法1、方法2は重錘を落下させる衝撃加振であり、たわみの計測位置と使用したセンサーがそれぞれ異なる。方法3は荷重車を用いた静的載荷である。方法1~3の詳細は、以下で述べる。

表-1 床版たわみの計測方法

名称	方法1	方法2	方法3
載荷種別	衝撃	衝撃	静的
載荷方法	重錘落下	重錘落下	荷重車
荷重範囲[kN]	35~147	35~147	93.4
たわみ計測位置	路面上	床版下面	床版下面
センサー	変位速度センサー	変位計	変位計

(1) 方法1

方法1では、衝撃加振によるたわみ計測機 (Impulse Input System Apparatus²⁾、以下、I I Sと略す) (**写真-7**)を用いた。I I Sは、質量100kgの重錘を自由落下させることができ、衝撃荷重データと主桁上と床版中央に設置した変位速度センサーからのデータを収録して、パソコンによりたわみ変換演算を行う装置である。

I I SはRC床版のたわみ計測用として開発されたものであり、合成床版はRC床版に比べて床版剛性が大きいいため、衝撃加振力が不足することが懸念された。



写真-7 衝撃加振によるたわみ計測機 (I I S)

そこで、衝撃加振力がI I Sよりも大きい重錘落下式たわみ測定装置 (Falling Weight Deflectometer、以下、FWDと略す)の重錘を利用した計測も実施した。たわみ計測のセンサーおよび配置については、上記と同じであるが、荷重はFWDの荷重計データを用いた。

計測に用いたFWDは**写真-8**に示すKuab社製 (重錘質量350kg、載荷板直径φ300mm、最大載荷荷重は98kN)とCarl Bro社製 (重錘質量400kg、載荷板直径φ300mm、最大載荷荷重は147kN)の2機種を用いた。



(a) Kuab社製



(b) Carl Bro社製

写真-8 重錘落下式たわみ測定装置 (FWD)

(2) 方法2

方法2は、載荷は方法1と共通で、床版たわみの計測位置を床版下面としたものである。方法1のたわみ計測と同時に、動的に変位を計測した。変位計は、主桁に固定した門型フレームに設置した (**写真-9**)。

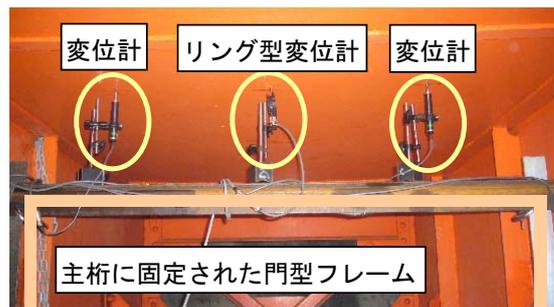


写真-9 床版下面に配置した変位計

(3) 方法3

方法3は、動的なたわみ計測とは別に、写真-10に示す50t吊ラフテレーンクレーンを荷重車として静的なたわみを計測したものである。計測は、写真-9の変位計を用いて後輪をたわみ計測点に載荷して行った。タイヤの接地面の寸法は35×39cm、輪重は93.4kNであった。



写真-10 荷重車 (50t 吊ラフテレーンクレーン)

4. 床版たわみ計測結果と考察

図-4に計測点1における計測結果を、図-5に計測点2における計測結果を示す。計測値はそれぞれの計測方法で3回実施した平均値をプロットした。

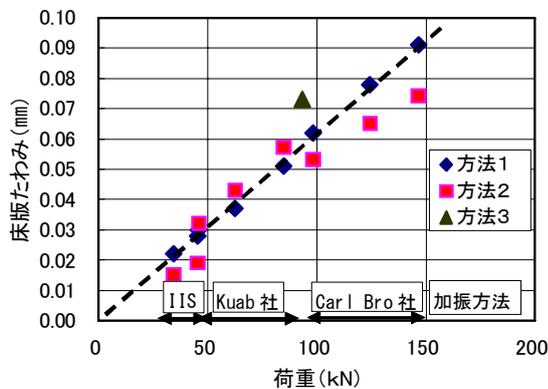


図-4 たわみ計測結果 (計測点1)

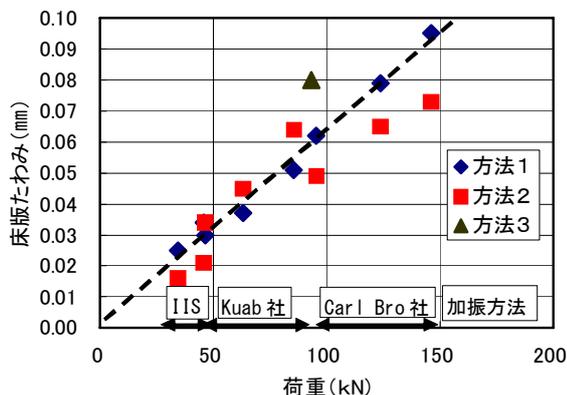


図-5 たわみ計測結果 (計測点2)

グラフの横軸は、載荷板に作用する衝撃荷重の最大値であり、方法3は荷重車の輪重の値である。方法1のIISの変位速度センサーを用いた床版たわみ計測では、衝撃加振の方法がIIS、FWD(2機種)にかかわらず荷重-床版たわみ関係に線形性があり安定している。方法2では、衝撃加振の方法によって傾向が変わるので、何らかの補正が必要であることがわかる。方法1の動的な計測方法と従来からの静的なたわみ計測方法の方法3との比較を行うと、93.4kNの荷重では0.01~0.02mm程度、方法1のたわみ値が小さい傾向であった。厳密に計測精度を検証するには計測値自体が小さいので無理があるが、一般に床版たわみの計測精度は1/100mmあれば十分であることを考慮すると、方法1は十分に適用性があると考えられた。

5. 静的載荷試験

静的載荷のたわみと応力度の測定結果について、FEM解析を行い比較検討する。また、24年前の竣工時(S60)に行った測定値についても再現解析を行う。表-2に荷重車の諸元を示す。

表-2 荷重車の諸元

年度	S60		H21
	2軸ダンプ	3軸ダンプ	2軸ラフター
前軸荷重(kN)	45.1	60.3	185.6
後軸荷重(kN)	153.8	140.1	186.7
総重量(kN)	198.9	200.4	372.4
ホイールベース(mm)	4500	4175	4900
前輪中心間隔(mm)	1840	2010	2495
後輪中心間隔(mm)	1830	1950	2495

注:3軸の後軸重は合計、ホイールベースは後軸中心

5.1 FEM解析

橋梁全体を立体としてモデル化(図-6)し、床版はシェル要素とした。コンクリートは、施工時の品質管理記録から、膨張材入りの早強セメントで、設計基準強度(σ_{ck})は300kgf/cm²、材齢7日の圧縮強度は340~360kgf/cm²であることを確認したが、ヤング係数(EC)は不明であった。ちなみに、設計基準強度300kgf/cm²でのヤング係数の目安は、昭和53年道示によれば300,000kgf/cm²(30kN/mm²)、ポアソン比は0.17である。

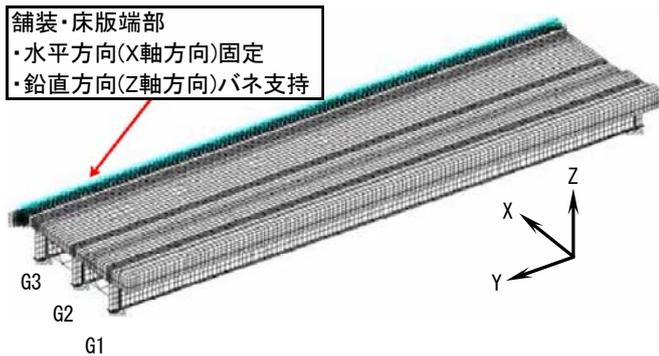


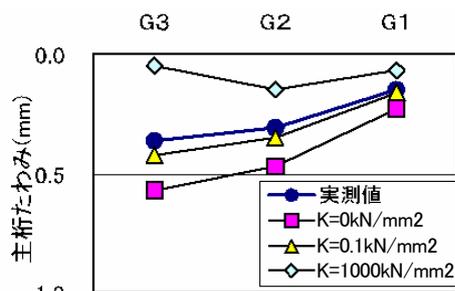
図-6 FEM/FEM 解析モデル

解析における主桁のたわみ量は、計測点 1 (1/8L) と計測点 3 (1/2L) で検討した。G3 桁側張出し床版は、山側の擁壁と縦目地で接続していることから、擁壁に接触または弾性支持されていると推察した。そこで計算では、縦目地に接続する床版端部の鉛直方向の支持条件をバネ支持に仮定し、そのバネ剛性 (バネ値 K) を変化させた。バネの状態 1 は、フリーの状態を仮定してバネ値 $K=0.0\text{kN/mm}^2$ とした。状態 2 は、ゆるい弾性支持状態を仮定してバネ値 $K=0.1\text{kN/mm}^2$ とした。状態 3 は、固定に近い状態を仮定してバネ値 $K=1000\text{kN/mm}^2$ とした。

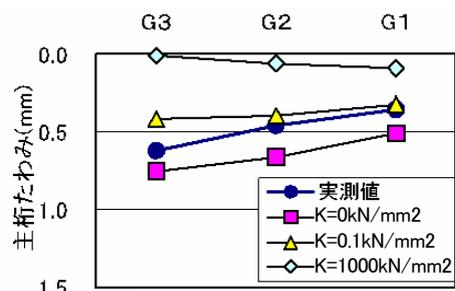
荷重ケース 1 は、後輪 1 輪のみを計測点 1 に荷重する場合である。また、荷重ケース 2 は、後輪を計測点 2 に荷重 (前輪も作用) する場合、荷重ケース 3 は、

後輪を支間中央の計測点 3 に荷重 (前輪も作用) する場合である。

各荷重ケースのコンクリートのヤング係数を 32kN/mm^2 に仮定した場合の主桁たわみの計算結果を図-7~9 に示す。いずれの荷重ケースも実測値に近い解析条件は、バネ剛性を 0.1kN/mm^2 に仮定した状態 2 であり、縦目地部はゆるい弾性支持状態であることが解析的に確認できた。

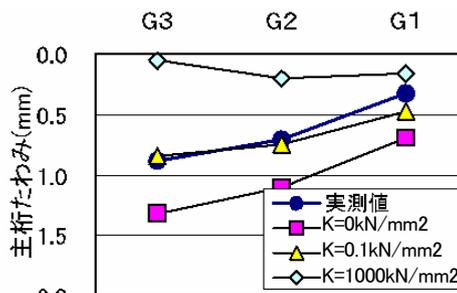


(a) 測点 1/8L

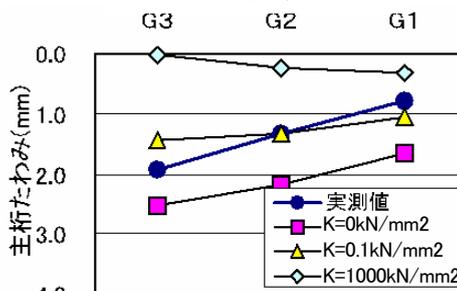


(b) 測点 1/2L

図-7 主桁たわみ (荷重ケース 1)

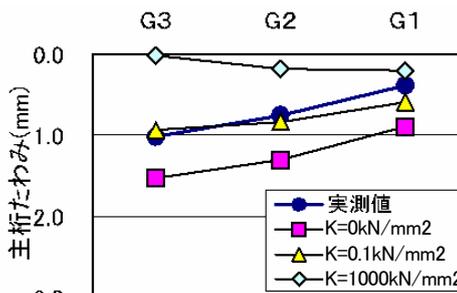


(a) 測点 1/8L

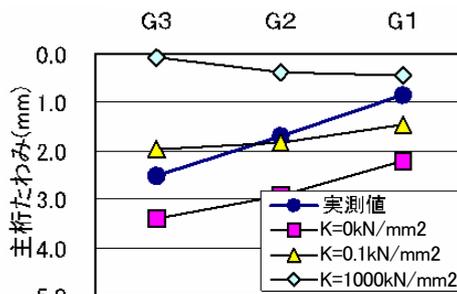


(b) 測点 1/2L

図-8 主桁たわみ (荷重ケース 2)



(a) 測点 1/8L



(b) 測点 1/2L

図-9 主桁たわみ (荷重ケース 3)

図-10 に荷重ケース 1 の変位図を示す。弾性支持のバネ値 K が小さい場合に、主桁のねじり剛性が小さいことから G2 桁と G1 桁での首振り現象が顕著に生じる解析結果となっている。

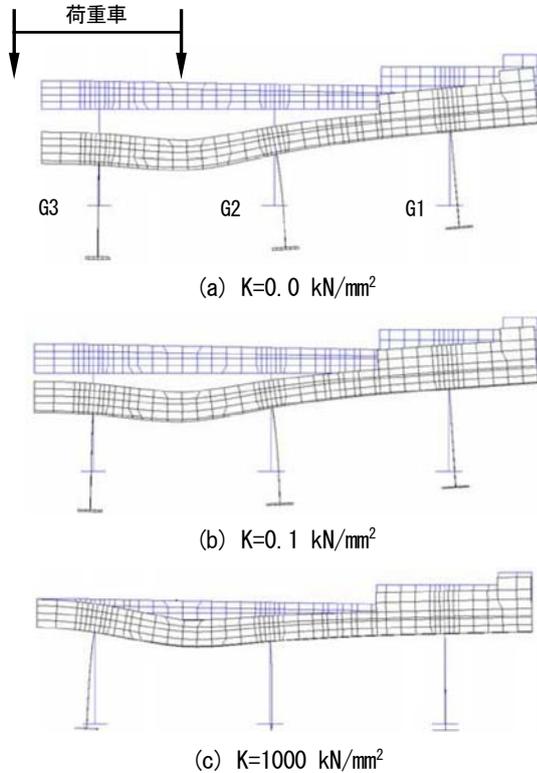


図-10 縦目地のバネ値と変形形状

床版たわみの計測点 1 の計算では、図-11 に示すようにヤング係数を $24 \sim 35 \text{ kN/mm}^2$ に変化させ、全断面有効として感度解析を行った。各計測点の計測値は、ヤング係数 $EC=35 \text{ kN/mm}^2$ の計算値より全体にやや小さい傾向にある。また、床版厚は、施工時の記録より $+10 \text{ mm}$ のはらみ出しがあり、これを考慮した場合の荷重位置

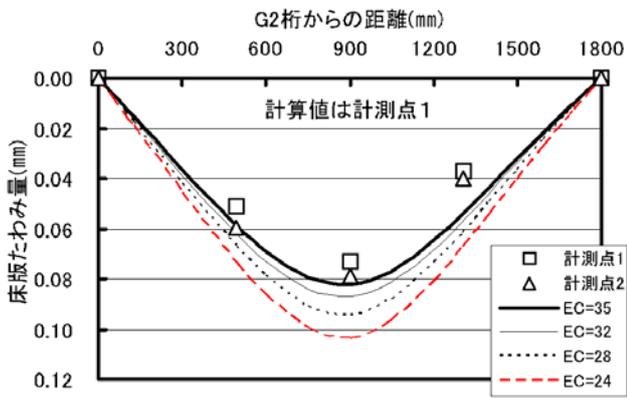


図-11 床版たわみの計測値と FEM 計算値

の $EC=32 \text{ kN/mm}^2$ の計算値は 0.08 mm であり、施工誤差を考慮しない場合の 0.087 mm に比べて約 8% 小さく算定され、計測値 0.073 mm と近い値となる。床版厚に $+10 \text{ mm}$ の施工誤差を考慮し、ヤング係数を 32 kN/mm^2 程度と推定するのが適当と考えられる。

床版たわみの計測値は、全断面有効の解析値より小さいことから、床版がきわめて健全であることがわかった。

5.2 FEM解析による竣工時荷重試験の検証

竣工時の荷重試験の検討では、縦目地の支持条件は考慮していなかった。そこで、FEM解析による再検証を行った。竣工時の荷重試験では、荷重車の諸元は文献6)より、表-2に示した値であり、2軸車と3軸車を写真-11に示す従列荷重で、主桁のたわみとひずみを計測している。計測位置は計測点3 ($1/2L$) である。再現解析では、図-12に示す荷重ケースで、床版コンクリートのヤング係数を $EC=32 \text{ kN/mm}^2$ 、ポアソン比を 0.17 として、主桁のたわみと主桁の上縁・下縁の応力度を計算した。

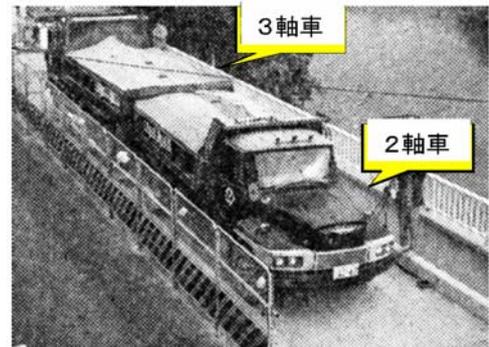


写真-11 竣工時の荷重試験状況

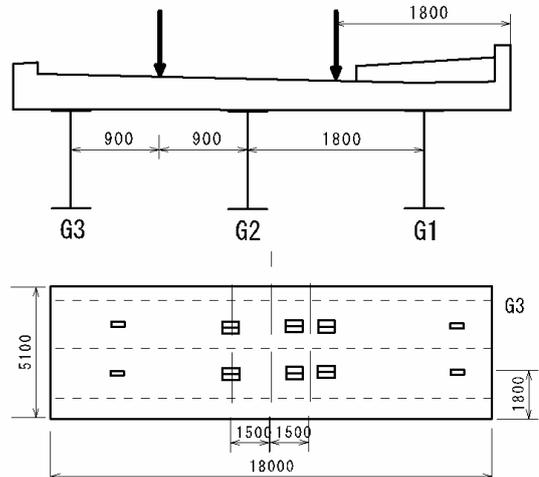


図-12 竣工時の荷重ケース

解析結果を図-13に示す。S60 設計計算値は、当時の単純版での計算結果であり G2 桁を跨ぐ様に載荷しているため G2 桁のたわみが G1 および G3 桁の約 2 倍の値になっている。G2 桁のたわみ計測値は、床版の剛性が大きいために荷重分配効果が期待できることから S60 設計計算たわみより小さい。また、たわみ計測値は、FEM 解析値に近いが縦目地がゆるい弾性支持の現状解析値より小さい。また、主桁上縁・下縁の応力度についても G3 桁が小さく、たわみ同様に現状の状態と比較すると、竣工時の縦目地は現状より強い弾性支持状態にあったと推定される。

本計測の実施では、東京都西多摩建設事務所の関係者各位には多大なご協力をいただきました。ここに謝意を表します。

[参考文献]

- 1) 関口幹夫, 國府勝郎, 青木孝憲: 重錘落下たわみによる R C 床版の健全度評価法, 平 17. 都土木技研年報, pp. 79-92, 2005
- 2) 関口幹夫: 重錘落下たわみによる R C 床版の健全度評価要領 (案), 平 17. 都土木技研年報, pp. 257-262, 2005
- 3) 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 回年次学術講演会講演概要集, CS6-051, pp. 253-254, 2003. 9
- 4) 関口幹夫: FWD による床版の健全度評価手法の検討, 土木学会構造工学論文集, Vol. 50A, pp. 697-706, 2004. 3
- 5) 社団法人日本橋梁建設協会: 鋼・コンクリート合成床版維持管理の計画資料, 2007. 3
- 6) 関口幹夫: 鋼板合成床版による合成桁橋の補修, 昭 62. 都土木技研年報, pp. 193-203, 1987
- 7) 林暢彦, 野呂直以, 吉良浩二: 供用 27 年を経た鋼・コンクリート合成床版の経年調査結果, 第六回道路橋床版シンポジウム論文報告集, pp. 243-248, 2008. 6
- 8) 春日井俊博, 野呂直以, 石川孝, 土井保彦: 供用 18 年を経た鋼・コンクリート合成床版の経年調査結果, 土木学会第 64 回年次学術講演会講演概要集, I-369, pp. 737-738, 2009. 9

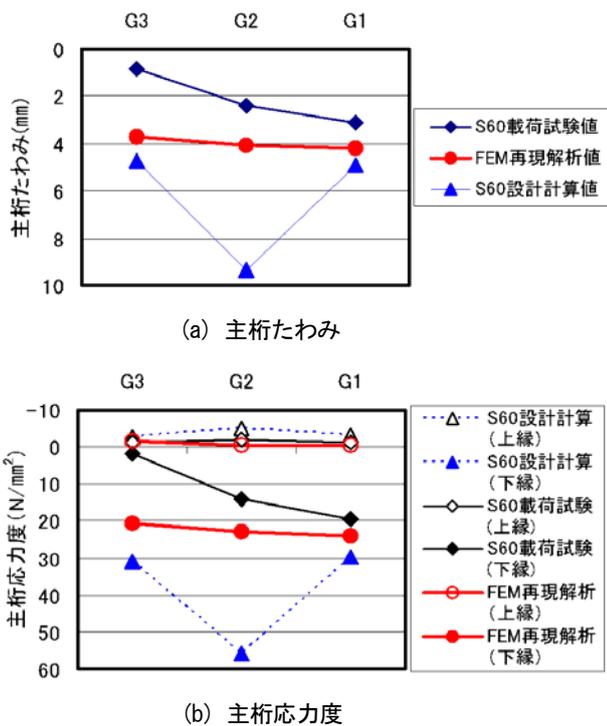


図-13 竣工時の計測値と FEM 解析結果

6. あとがき

FWDの衝撃加振力を利用した I I S 速度センサーによるたわみ計測方法は、実橋合成床版においても適用性があることが確認できた。この方法は、足場を必要とせず、対象とする床版支間部のみの通行規制で床版たわみが計測できるため、詳細調査の合理化の観点から有効な方法である。

ここで実施した外観調査、非破壊検査、および床版たわみ計測により、竣工より 24 年経過した合成床版の健全性に問題のないことが明らかとなった。