

論文 衝撃加振による橋梁床版の発生変位と床版劣化度評価利用に関する研究

門寺将志*1, Nguyen Thu Nga*2, 山口嵩文*3, 榎谷浩*4

要旨: 近年, 高度経済成長期に建設された多くの橋梁で老朽化が進み, 劣化度を評価する必要性が高まってきている。本研究では, 衝撃加振装置によって衝撃力を与え, 床版変位測定を行った。劣化した橋梁床版では, 健全な箇所と比べ変位が大きいことを明らかにした。また, 橋梁の FEM モデルを作成し, 衝撃荷重を与え, 衝撃試験によって得られた測定変位と解析結果の比較検討を行った。この結果, 載荷点の変位を除いて, 床版変位が解析的にも再現可能であることを明らかにした。また, 載荷点は舗装の影響を受けることを明らかにし, 今後, 衝撃加振実験により舗装の影響を考慮して劣化度評価を行うことができることを示した。

キーワード: 衝撃力, コンクリート床版, 変位分布, 劣化度評価

1. はじめに

北陸地方整備局が管理している道路橋は, 2013 年 4 月 1 日現在, 1740 箇所あり, このうち, 約 4 割がおよそ 50 年前の高度成長期に建設され, また 20 年後には約 6 割が建設後 50 年を超えることとなる。さらに近年の車両大型化による疲労損傷や, 塩害などによる重大な損傷も相まって, 定期的な点検・診断や早期の補修の実施が求められている¹⁾。国土交通省は道路橋定期点検要領²⁾を作成し, 点検方法について, 基本は近視目視により行い, 必要に応じて触診や打音等の非破壊検査等を併用して行うと定めている。しかしながら, 道路橋を管理する自治体によっては点検に携わる土木技術者が非常に少ないことや, 老朽化に対応するために本来なら増やすべき維持修繕予算の減少および, 技術力不足などの課題のため対応可能な範囲で進められてきたのが現状である。今後の地方における橋梁では, 貴重な道路橋を効率的で合理的な点検方法と経済的な補修方法が求められている³⁾。松井・前田らの研究⁴⁾では RC 床版道路橋について, たわみによる劣化度評価式の提案がなされ, これ以降, 床版のたわみに着目した研究がいくつか行われてきた。しかしながら, 変位計等を床版や桁に設置して, 実橋梁で載荷試験を行う場合, 一般にかなりの労力と時間が必要とされる。また, 舗装された橋上面で行う試験でも舗装の影響は明確にされていない。このことから, 定量的に簡易に橋梁の劣化度を判定できる手法の確立が望まれる。

したがって, 本研究では舗装された実橋梁床版に対し

て, 開発した自走式衝撃加振機 SIVE(Self-propelled Impact Vibration Equipment)により衝撃力を与える実験を行い, 発生変位について検討した。そして, その計測値を分析し, 劣化床版での変位特性を明らかにした。また, 実橋に対して有限要素法を用いた解析を実施し, 実挙動を再現可能なことを示した。

2. 対象橋梁

本研究で検討対象とした橋梁は, 北陸の山岳地の国道にある橋梁である。4 本の鋼桁と RC 床版から成る橋長 36m, 幅員 9.2m の合成鋼桁橋である。図-1 に橋梁の概略図を示す。この橋梁は代替え道路がなく, 地域住民にとっては他地域に移動する唯一の幹線道路である。また, 供用開始後 44 年経過しており, 長年にわたり使用されてきたが, これまでに床版や配筋などにおける補修は一切行われてきていなかった。現在, この橋梁床版裏面において濡れが各所認められ, 特に桁端部付近では湿りの程度が顕著で白い析出物の付着, 漏水などが認められている(写真-1, 2)。

3. 衝撃加振試験

3.1 実験方法

(1) 衝撃加振装置

FWD(Falling Weight Deflectometer) は車両に直接搭載されるものがあり, 一般に舗装の検査に使用される^{5,6)}。しばしば, このような FWD や可搬タイプの小型 FWD

*1 金沢大学 理工学域環境デザイン学類 (学生会員)
 *2 金沢大学 自然科学研究科博士後期課程環境デザイン学専攻 M.Eng.(学生会員)
 *3 金沢大学 自然科学研究科博士前期課程環境デザイン学専攻
 *4 金沢大学 金沢大学教授, 理工研究域環境デザイン学系 工博(正会員)

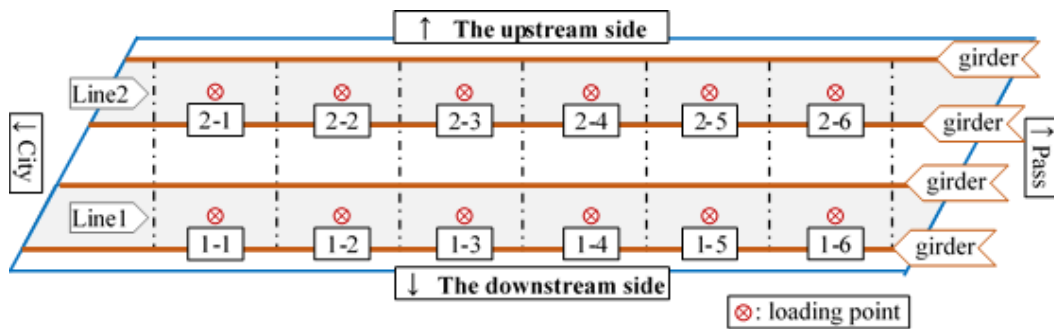


図-1 対象橋梁概略図と床版の衝撃載荷位置



写真-1 床版下面 パネル 1-6 桁端部の状況



写真-2 床版下面 パネル 2-1 漏水状況



写真-3 自走式衝撃加振装置 SIVE

条件を変更することができる。重錘を所定の高さまで上げ、そこから低反発ゴムの緩衝材が固定された荷重伝達盤の上に落下させ、衝撃力を発生させる。そして発生した衝撃力を荷重伝達盤、ロードセル、面積 70650mm² の載荷板と伝達させ、載荷板から衝撃力を橋梁の舗装面に与える仕組みとなっている。なお、低反発ゴムの並びについては本研究の実験前に実施した事前実験から、15 個の円錐ゴムを使用することにした。

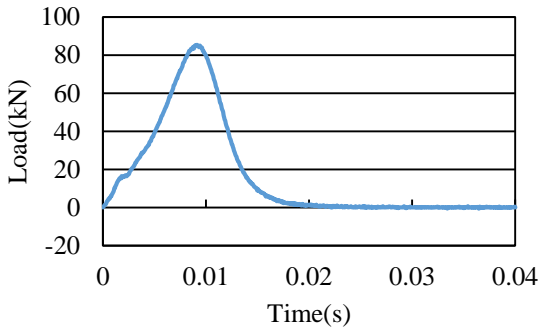
衝撃加振装置の重錘は 220 kg のものを使用し、落下高さは全て 300mm に統一した。載荷位置は図-1 に示す 12 点とした。床版を鋼桁と対傾構に沿って複数の区画に分け（以降、それぞれの区画をパネルと呼ぶことにする）、そのうち図-1 で示した対象のパネルについて、その中央点に載荷した。また各パネルにおける載荷は、それぞれ 3 回ずつ行った。

(2) 計測方法

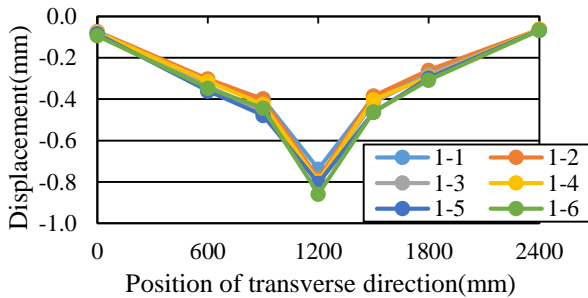
載荷荷重値の計測は、載荷板と荷重伝達盤の間に設けられたロードセルにより計測した（東京測器社、KCE-500KNA）。各載荷において、各点の加速度を加速度測計で測定した（東京測器社、ARJ-200A）。加速度計は橋軸直角方向に並んで設置した。測定位置は載荷点および載荷点から左右に 300mm、600mm、1200mm の計 7 点とした。荷重と加速度は 20kHz で 0.5 秒間測定を行った。加速度計設置位置の変位は、加速度を時間で 2 回積分を行うことで算出した。なお、この対象橋梁は交通量が少なかった

は橋の床版の検査のために使用される場合もある^{7,8)}。

本研究では、任意位置の橋梁床版に載荷できるように開発した自走式衝撃加振装置 SIVE(Self-propelled Impact Vibration Equipment)を用いた^{9,10)}。この装置では、重錘の質量、落下高さ、クッション材として使用されるゴムの

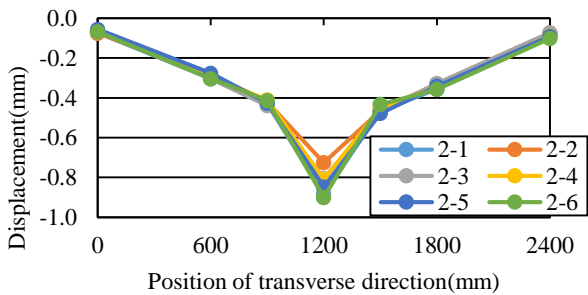


図—2 衝撃荷重の時間波形の一例
(パネル1-4の1回目)



張出床版側←位置関係→センター側

図—3 Line1 変位分布



センター側←位置関係→張出床版側

図—4 Line2 変位分布

たため、車の通らないときを見計らって試験を行ったので、通行車両の影響は無いといえる。また、実験時(2017年5月10日)における気温やアスファルトの温度を測定していないが環境条件としては当時の気温が18℃～12℃の間で天候が雨であったため、アスファルトの温度は15℃周辺であったと思われる。

3.2 実験結果

(1) 衝撃荷重と载荷時間

衝撃荷重最大値は、平均で85.2kN、作用時間は平均0.020sであった。衝撃荷重の時間変化の一例を図—2に示す。落錘時の荷重値は、時間とともに急激に増加し、85.4kNのピーク到達後は緩やかに減少、20ms程度で終了している。なお、本実験での荷重の時間波形は、い

れもここに示したものとほぼ同様な波形であった。

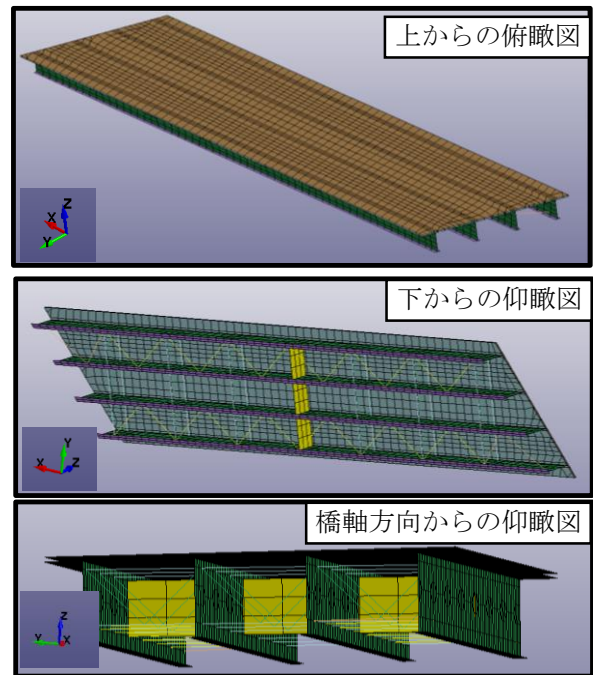
(2) 载荷荷重と载荷時間

各計測、各加速度計における、舗装上変位の計測結果を図—3、図—4に示す。なお、各パネルで3回行った衝撃試験では3回とも似た値が得られたため、このグラフで用いた値はその平均値を用いている。変位は上方向変位を正の値、下方向変位を負とした。ここで示した変位は、载荷点変位が最大値を示す時と同時刻の変位を示す。橋軸直角方向位置0mmと2400mmは桁上、1200mmは载荷位置である。図—3、図—4より、载荷点における変位が非常に大きいことが分かる。载荷点の変位は、橋の下流側のLine1では、橋梁端部に近い1-6、橋の上流側のLine2でもやはり橋梁端部に近い2-6で大きくなっている。これは、床版の濡れが他の部分に比べ著しく床版劣化が懸念される床版裏面の状況に対応している。

4. FEMによる解析

4.1 解析方法

本研究で対象にした橋梁について、実験時と同等の作用時間の衝撃荷重を各パネルに载荷した時の変位分布を



図—5 解析モデル

表—1 解析に使用した材料特性値

Material	Young's modulus (kN/mm ²)	Poisson's ratio
Concrete	21.5	0.2
Steel	200	0.3
Asphalt	10.0 (for 5 °C)	0.35
	7.00 (for 15 °C)	
	0.937 (for 40 °C)	

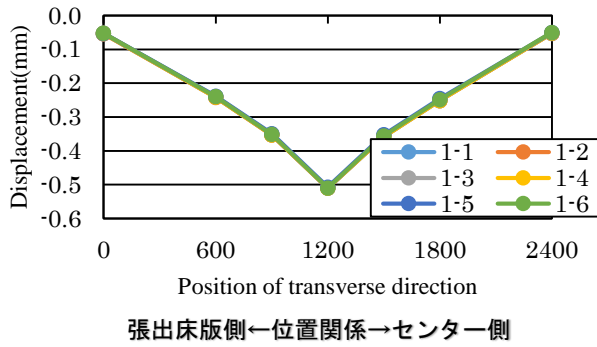


図-6 解析結果 Line1

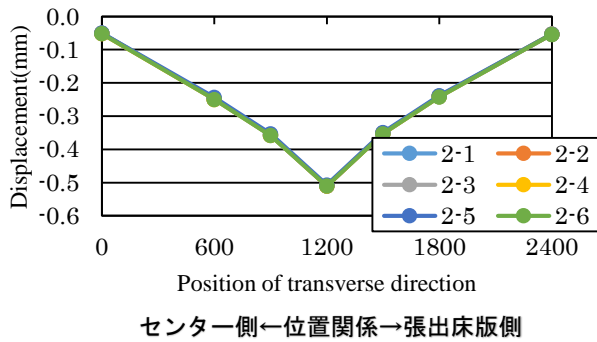


図-7 解析結果 Line2

再現するために有限要素法による解析 (LS-DYNA) を行った¹¹⁾。解析に使用したモデルを図-5に示す。鋼桁、補剛材、RC床版、舗装にはシェル要素を、対傾構などのその他の部材にはビーム要素を用いた。RC床版厚は190mm、舗装厚は50mmである。境界条件について、桁両端における下フランジの変位のみ拘束した。接触条件について、RC床版と舗装の位置関係を実際の橋梁と同じにするために、これらの部材を接触させた。

各物性については表-1に示す。全ての部材の材料特性は線形弾性体とした。コンクリートの弾性係数は実験実施時のコア抜き試験結果を使用することによって床版のコンクリートのひび割れを考慮した。舗装の弾性係数に関しては、文献12)に掲載の式を使用した。なお、コンクリートは解析モデル上において全断面有効の弾性領域であるため、配筋による影響はほぼ無いものと見なし、この解析モデル上には配筋を入れていない。また、実験で計測されたパネル2-3の1回目における衝撃荷重の波形の最大値が50kNとなるように補正した荷重波形を解析に用いた。また、この荷重波形を各パネルの中央に集中荷重として載荷し、作製した解析モデルにおいて、実験時に実際に計測が行われた加速度計位置の点の舗装表面変位、床版下面変位を調べた。

4.2 解析結果

舗装の弾性係数を $E=7\text{kN/mm}^2$ (15°C) とした場合の各パネルの床版変位分布を図-6、図-7に示す。なお、

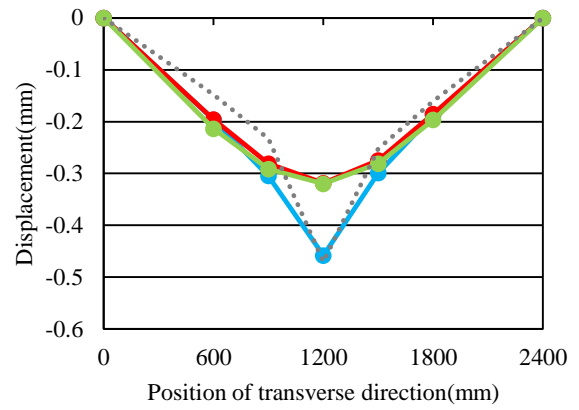


図-8 舗装、床版における変位分布の違い

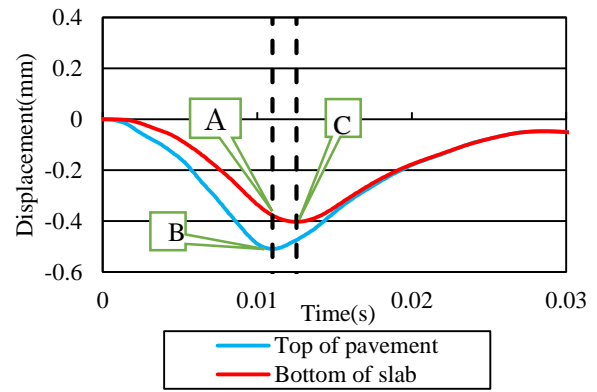


図-9 舗装面、床版下面の載荷点変位の時間変化

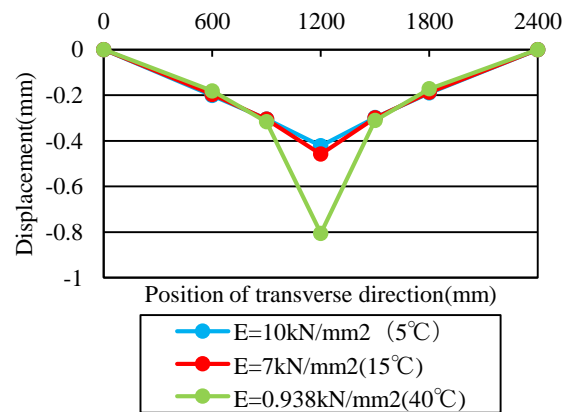


図-10 舗装の弾性係数による変位分布の違い

変位の値の正負のとり方は前章と同様に下方向を負としている。衝撃載荷時の桁の変位は床版の変位に比べ小さいため、どのパネルもほぼ同程度の変位分布を示している。このことから、対象橋梁が各パネルで衝撃荷重を受ける時、橋軸方向のパネル位置による変位分布の大きさに影響ないことが明らかになった。実験で認められた載

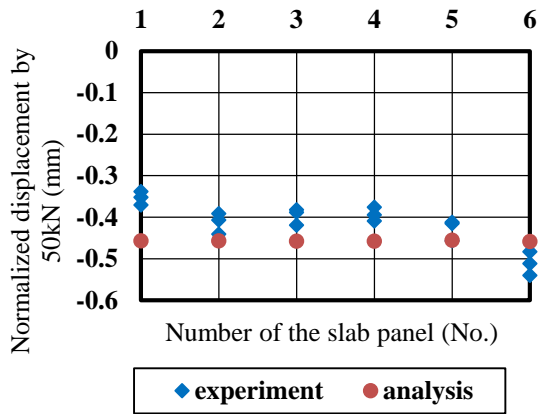


図-11 実験と解析における舗装上変位 (Line1)

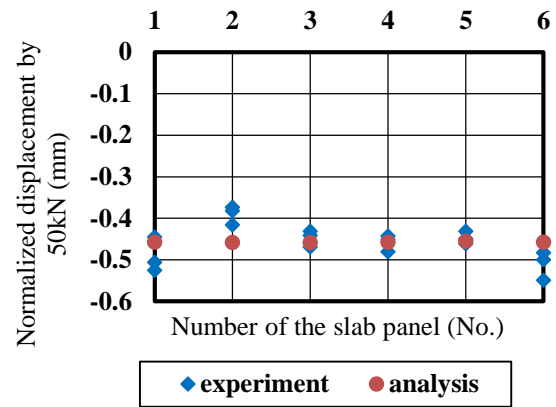


図-12 実験と解析における舗装上変位 (Line2)

荷位置で各パネルにおける相違は床版の劣化状況が反映していることが推論できる。

(1) 舗装表面および床版下面における変位

舗装と床版で桁の部分で変位差が生じたため鋼桁の変位を差し引いた舗装および床版の相対的な変位分布を舗装の弾性係数を $E=7 \text{ kN/mm}^2$ (15°C) とした場合の違いで、2-3の1回目を一例として図-8に示す。なお、Aは舗装表面の載荷点変位が最大値をとる時の変位分布、BはAの分布の時と同時刻の床版変位分布、Cは床版について載荷点変位が最大値をとる時の変位分布である。また参考に解析により得られた値との比較のため2-3の1回目の舗装表面の実験変位を50kN換算したものを示した。さらに、A、B、Cの鋼桁の変位も含めた載荷点変位について、それらの時刻歴を図-9に示す。

図-8よりAとBを比較すると、Bは滑らかな放物線であるのに対し、Aは載荷点の変位だけが大きい分布であることが分かる。また、舗装上で計測された変位の実験結果とAの分布形状が同様となっている。このことから、AとB及び実験値を比較した結果、実験においてBの変位分布を測定していないが、載荷点以外の変位は概ね一致しており、載荷点の変位のみが大きくなっているのは舗装の影響であるといえる。なお、この傾向は舗装の弾性係数が $E=10 \text{ kN/mm}^2$ (5°C) および $E=0.938 \text{ kN/mm}^2$ (40°C) の場合においても認められた。また、BとCを比較すると、互いに比較的近い値を示していることが分かる。即ち、舗装の載荷点が最大変位となる時の床版の相対変位分布は、床版の載荷点が最大変位となる時の床版の相対変位分布と一致するといえる。この傾向は、舗装が他の弾性係数を示す場合でも同様であった。

(2) 舗装の弾性係数の違いの影響

舗装の弾性係数の違いによる鋼桁変位を無視した舗装の載荷点変位最大時の変位分布について、舗装の弾性係数が $E=7 \text{ kN/mm}^2$ (15°C)、そして $E=10 \text{ kN/mm}^2$ (5°C)、

$E=0.938 \text{ kN/mm}^2$ (40°C) それぞれの場合における変位分布を、2-3を一例として図-10に示す。図中の3つの分布について、 $E=0.938 \text{ kN/mm}^2$ (40°C) の場合は、その他2つの分布に比べ、かなり大きい変位となっている。一方で後の2つに関しては、舗装の弾性係数に違いが見られるものの、ほぼ同じ値を示している。即ち、温度の範囲が 5°C から 15°C あたりの範囲であれば、舗装の弾性係数の違いによる載荷点変位への影響は小さいといえる。

5. 実験結果と解析との比較

前章で示したように、鋼桁の変位を差し引く場合、舗装の載荷点が最大変位となる時の床版の変位分布が、床版の載荷点が最大変位となる時の床版の変位分布とほぼ一致するということが解析的に明らかになった。つまり、載荷点の舗装表面の変形の影響を除去しないと、床版の載荷点の最大変位を実験値から評価することができないため、舗装表面の載荷点を補間するなどして床版の載荷点変位の近似値を求め、解析と比較することにより床版の劣化度評価ができるのでないかと考えられる。また、舗装の温度が 5°C からおよそ 15°C の範囲であれば、舗装の載荷点変位はあまり差がないことが確認された。なお、実験時の気温は測定していないが、測定日の天気予報の気温から実験時のアスファルトの温度は 15°C 付近であると予測できる。

ここで、鋼桁の変位を差し引いた舗装表面の相対的な変位を、Line1、Line2の各パネルについて実験結果と、舗装の弾性係数 $E=7 \text{ kN/mm}^2$ の時の解析結果を各々図-11、図-12に示す。Line1について、実験値はほとんどのパネルで解析値よりも大きな変位は見られなかったが、1-6においては実験値が解析値を上回る傾向が見られた。このことは、2章で示した桁端部付近で白い析出物や漏水が見られたという観測結果より、桁端部付近で劣化が進んで、床版の弾性係数は $E=21.5 \text{ kN/mm}^2$ を下

回っていることが考えられるため、解析値を実験値と比較することによって床版の劣化度の評価が可能であることを示していると考えられる。これらは写真—2で示した劣化した床版に対応している。Line2について、ほとんどのパネルにおいては計測変位が解析による算出変位とほぼ同じ値を示した。一方で、2-1 および 2-6 の桁端部に近いパネルにおいては解析値を実験値が上回る結果となり、これも桁端部付近の劣化がより進展している状況を反映している可能性が考えられる。

ここでは、ある橋梁床版における衝撃載荷試験結果について、解析結果を用いて考察を行った。この結果だけでは、具体的な床版の劣化度についての判断を行うことはできない。しかしながら、少なくとも衝撃載荷点の変位が他の点や解析から求められた変位に比べて大きい床版は、何らかの劣化が表れたと推論できる。

6. まとめ

本研究では、衝撃加振装置 SIVE により実橋梁床版に対して舗装上から衝撃力を与え、その時の橋梁の変位を舗装上から計測した。また橋梁をシェルモデルによって表現して有限要素解析による再現解析について検討した。得られた結果を下記に示す。

- 1) 衝撃加振実験で得られた変位は、載荷点の変位が比較的大きい変位であることが観測された。解析より、舗装と床版における載荷点変位は必ずしも一致するとは限らないことが明らかとなった。
- 2) 衝撃載荷点の変位は、漏水などが見られた劣化が進んでいる床版では健全な箇所と比べ大きいことが実験的に明らかとなった。
- 3) 舗装がコンクリート床版より弾性係数が低いいため実験結果における載荷点変位が大きくなることを明らかにした。したがって、載荷点の計測変位には舗装の変形が影響していると考えられる。
- 4) 解析において各パネルにおける載荷点以外の変位は、舗装と床版で比較すると、それぞれ載荷点変位が最大値を示す時の変位は概ね一致する傾向が明らかになった。

今後、健全な橋梁を含め各種の実際の劣化した橋梁床版の衝撃載荷試験を行い、舗装の影響を考慮した橋梁床版の劣化度診断に役立てたいと考えている。

謝辞

この研究を進めるに当たり、金沢大学環境デザイン学類構造工学研究室の卒業生と学生諸氏に実験において協力をいただいた。また、横山広氏（大日本コンサルタン

ト株）には、多くのご助言ご協力を賜りました。なお、この研究は内閣府・科学技術振興機構による戦略的イノベーション創造プログラム「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」の支援をいただきました。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 国土交通省北陸地方整備局：橋梁長寿命化修繕計画，p.1, 2014.
- 2) 国土交通省道路局：道路橋定期点検要領，p.2, 2014.
- 3) 社会資本整備審議会道路分科会：道路の老朽化対策の本格実施に関する提言，p.5, 2014.
- 4) 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/1-6, pp.419-426, 1986.
- 5) 日本道路建設化協会：FWD(舗装構造評価装置)，一般社団法人日本道路建設化協会，www.dohkenkyo.net/pavement/kikai/fwd.html（閲覧日 2018 年 1 月 6 日）
- 6) 阿部長門，丸山暉彦，姫野賢治，林正則：たわみ評価指標に基づく舗装の構造評価，土木学会論文集，No. 460/V-18, pp. 41-48, 1993.
- 7) 関口幹夫，國府勝郎：FXD 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, 2003.
- 8) 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.
- 9) Hiroshi Masuya, Hiroshi Yokoyama, Chen Xu, Saiji Fukada, Yoshimori Kubo: The development of self-propelled falling weight deflectometer equipment for the evaluation of the deterioration degree of bridge slab, Proceedings of 14th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, CD-ROM, Ho chi minh city, Vietnam, 2016.
- 10) Nga Thu NGUYEN, Hiroshi MASUYA, Chen XU, Hiromitsu KAI, Takafumi YAMAGUCHI and Hiroshi YOKOYAMA: SELF-PROPELLED IMPACT VIBRATION EQUIPMENT FOR THE UTILIZATION OF INSPECTION OF BRIDGE DECK, 第九回道路橋床版シンポジウム論文報告集, pp89-92, 2016
- 11) JSOL : LS-DYNA 使用の手引き Second Edition, 2016.
- 12) 松本大二郎，中村和博，佐藤正和，神谷恵三：高速道路におけるアスファルト舗装の補修設計に用いる材料定数に関する研究，土木学会論文集 E1 (舗装工学)，Vol.69, No.3 (舗装工学論文集第 18 巻)，I_101-I_108, 2013.