

論文

RC床版の衝撃荷重載荷試験によるたわみ性状について

門寺将志*, 横山広**, Nguyen Thu Nga***, 梶谷浩****,

*金沢大学大学院自然科学研究科 環境デザイン学専攻 博士前期課程 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

**博(工), 大日本コンサルタント, インフラ技術研究所 (〒330-6011 埼玉県さいたま市新都心11-2)

*** 金沢大学大学院自然科学研究科 環境デザイン学専攻 博士後期課程 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

**** 工博, 金沢大学 理工研究域 地球社会基盤学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

道路橋床版の損傷対策を検討する際には、ひび割れなどの外観性状だけではなく、必要な場合載荷試験によりその耐荷性能が把握される。一般的には橋梁の床版下面側に足場を設置して、荷重車による静的載荷が実施される。その場合、計測準備に時間を要し費用も高額となる。そこで本研究では、床版全体の耐荷性能を簡便に把握することを目的として、開発した衝撃荷重載荷試験機(SIVE)による実橋試験を実施し、FEM解析結果との比較検討により劣化度評価を試みた。

キーワード: RC床版, 耐荷性能, 衝撃荷重載荷試験機, 実橋試験

1. はじめに

国内に存在する橋長15m以上の橋梁は約167,000橋であり、床版橋やボックスカルバートを除いた床版構造は約133,000橋である。それらの中では交通不能や通行が制限されているものが約7,500橋に上っており、厳しい環境下にある構造物に劣化が目立ち始め、老朽化の進展が維持管理における課題になってきている¹⁾。現在、1954年～1973年頃まで続いた高度経済成長期に建設された構造物も供用期間が50年経ち、鋼橋では部材の破断や亀裂、塗装剥離による腐食等が、コンクリート橋ではコンクリート部のひび割れや鉄筋のような鋼材の腐食や破断などが見られてきている²⁾。高速道路ではRC床版の健全度判定は近接目視点検による「遊離石灰およびひび割れ法」³⁾を基準に、一部開削(舗装剥ぎ取り)調査や舗装のポットホール発生状況の確認により行っている。しかしこれでは、外観性状による損傷を推定するのみであり、損傷評価ができていないと言いが難い。それゆえ、目視による点検に加えて定量的な性能評価が求められる⁴⁾。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。また、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、一般に多くの労力と時間が必要とされる。さらに、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。

そこで本研究では道路橋床版に用として開発した自走式衝撃加振装置 SIVE(Self-propelled Impact Vibration Equipment)⁵⁾⁶⁾により衝撃力を与える実験を行い、発生する変位を簡単に設置できる計測機で舗装上から計測した。そして、その計測値を分析するとともに、有限要素法を用いた解析を行い比較検討を行った。これにより、本試験で用いた試験機の精度及び、劣化度評価手法の確立に繋がる結果が得られるかを検討した。

2. 対象橋梁

本研究で対象とした橋梁は茨城県の国土技術政策総合研究所の試験走路内に位置する土木研究所所有の1径間の合成鈹桁橋であり、主桁本数が4本で床版種類は鉄筋コンクリート(以下、RCと称す。)である。橋長30.80m、幅員8.50m、床版厚210mm、舗装厚80mmとなっている。試験時の目視では、対象橋梁舗装面のひび割れ、床版下面のひび割れと白色析出物(写真-1)が観察される箇所が一部で確認された。

3. 衝撃加振試験

3.1. 試験方法

1). 衝撃載荷装置

FWD(Falling Weight Deflectometer)には車両に直接搭載

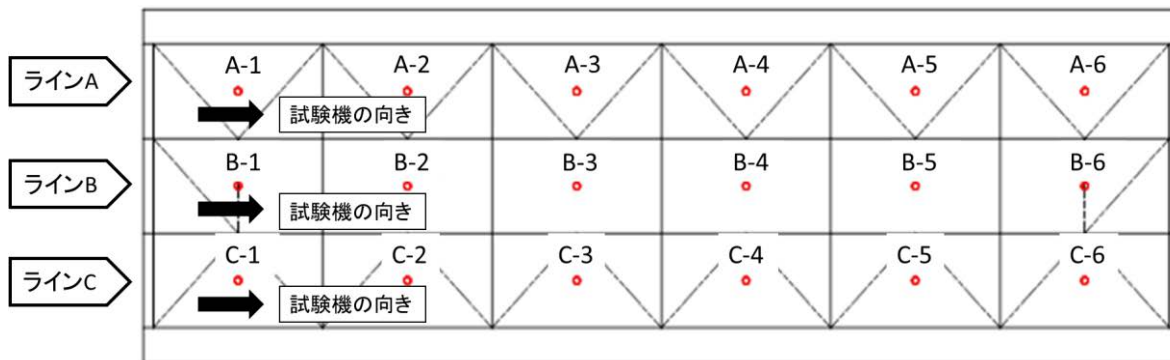


図-1 載荷点位置概略図 ○ : Loading point



写真-1 床版下面のひび割れと白色析出物

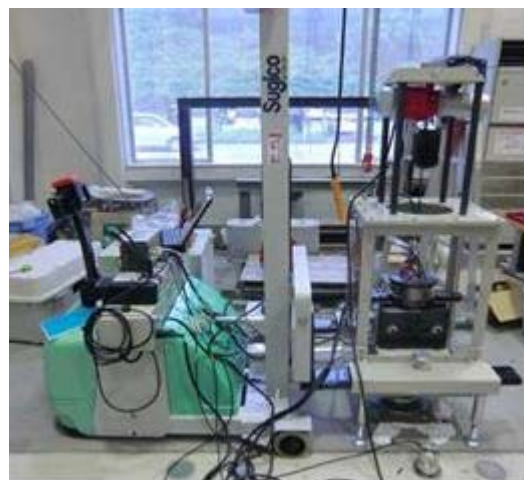


写真-2 自走式衝撃加振装置 SIVE

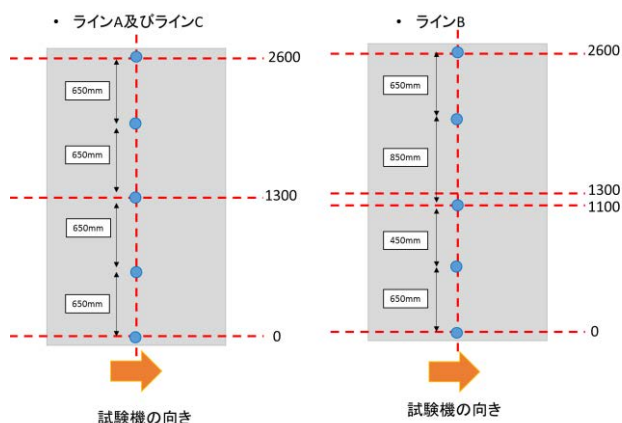


図-2 加速度計設置位置



写真-3 載荷点加速度計

されたものがあり、一般には舗装の検査に用いられる。また、小型の可搬が可能な FWD は道路橋の床版を評価されるのに用いられることがある。本研究では可搬可能な自走式衝撃加振装置 SIVE(Self-propelled Impact Vibration Equipment, 写真-2)を用いることで、任意の位置に載荷を行った。なお、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載荷板の

上に落下させ、衝撃力を発生させた。衝撃力は荷重載荷板、ロードセル、従来のような載荷板 1 枚だけによる載荷ではなく、写真-3 のような 3 本の脚を持つ載荷板により伝達させた。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 250kg のものを使用し、落下高さは全て 150mm に統一した。載荷位置は図-1 に示すように 1 列あたり 6 点とした。各載荷位置における載荷は、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、載荷板と低反発ゴム設置板の間に設けられたロードセルにより計測した(東京測器研究所, KCE-500KNA)。各載荷において、各点の加速度を加速

度計で測定した（東京測器研究所，ARJ-200A）．図-2のように加速度計は橋軸直角方向に並べて設置した．Aライン及びCラインにおける測定位置は，載荷点および載荷点から左右に650mm，1300mmの計5点とした．Bラインの測定位置は，床版中央の舗装に段差が見られたため，左右に置かれた加速度計と載荷位置を床版中央から200mmラインC方向に移動させた．なお，載荷点においては，ロードセル内に設置した加速度計，そして3つの載荷板中央に設置した加速度計(写真-3)から測定を行った．荷重と加速度は10kHzで1秒間測定を行った．加速度計設置位置の変位は，加速度を二回積分することで算出した．

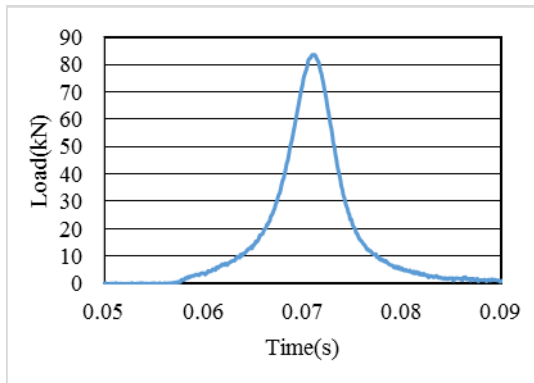


図-3 荷重波形一例（載荷点 A-3）

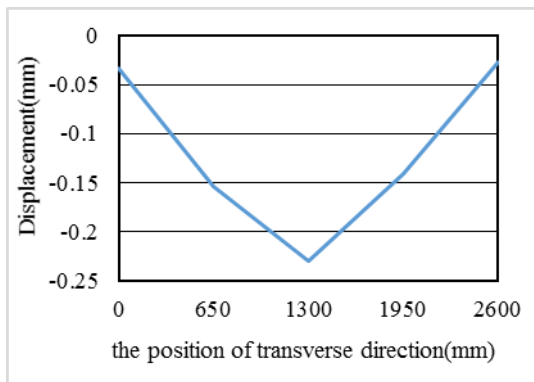


図-4 変位分布の一例（載荷点 A-3）

3.2. 実験結果

1). 衝撃荷重と載荷時間

衝撃荷重最大値は，平均で 80.2kN，作用時間は平均 0.031s であった．衝撃荷重の時間変化の一例を図-3に示す．落錘時の荷重値は，時間とともに急激に増加し，83.6kN のピーク到達後は急激に減少した後緩やかに減少し 31ms 程度で消失している．本研究で用いた SIVE は緩衝ゴムの違いや重錘の質量そして衝突速度を変化させ異なった荷重波形はを発生させることが可能である．その違いにより一般に床版の応答も異なる．しかしながら，本実験での荷重の時間波形は，いずれもここに示したものと同様な波形であった．

2). 衝撃荷重による変位分布

A-3 と B-4 における加速度から算出した打撃点が最大値をとる時間の舗装上変位の結果を変位計の結果と共に図-4 と図-5 に示す．なお，各載荷位置で3回行った衝撃試験ではほぼ同じ値が得られたため，このグラフでは1回目における値を示した．この結果における載荷点に関しては，ロードセル外部に設置した加速度計から測定された値を採用した．

3). 載荷点の加速度計における変位分布の違い

載荷点におけるロードセル内に設置した加速度計とロードセル外部に設置した加速度計における測定結果の比較を図-6，図-7 に示す．その結果，鋭角に尖がったような形状ではなくなった．既存の研究⁹⁾から判明さ

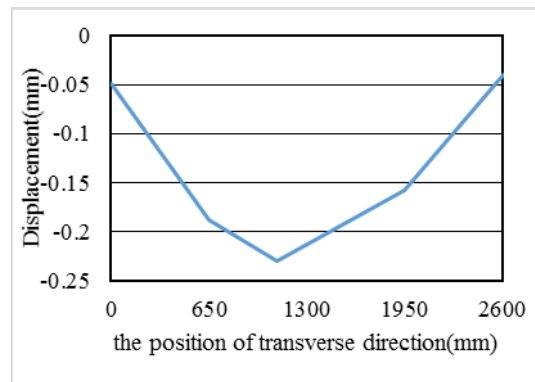


図-5 変位分布の一例（載荷点 B-4）

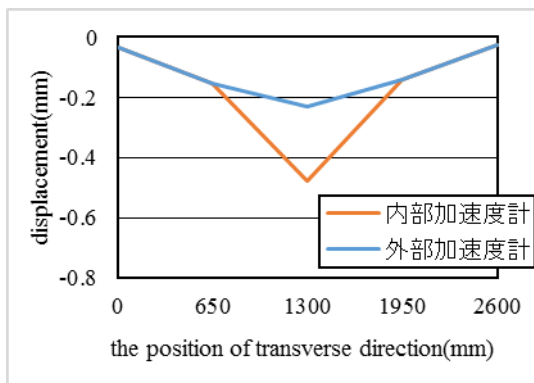


図-6 変位の比較一例（載荷点 A-3）

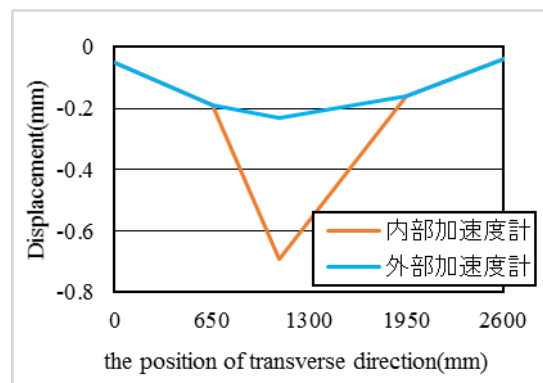


図-7 変位の比較の一例（載荷点 B-4）

れているように内部加速度計を用いて算出した載荷点変位が舗装の変形の影響で大きいものに対し、ロードセル外部に設置された加速度計を用いることにより、滑らかな変位分布が得られ大幅に改善されたと考えている。

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載荷した時の変位分布を再現するために有限要素法による解析 (LS-DYNA) を実施した⁸⁾。解析に使用した全橋モデルを図-8に示す。鋼桁、補剛材にはシェル要素を、RC床版、舗装にはソリッド要素を、対傾構などその他の部材にはビーム要素を用いた。RC床版厚は210mm、舗装厚は80mmである。境界条件については、単純支持とした。また、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。各材料特性値は表-1に示す。全ての部材の材料特性は線形弾性体とした。舗装の弾性係数に関しては、文献8)に掲載の式を使用した。コンクリートの弾性係数に関してはシュミットハンマー(以下、SMTと称す。)による計測値、設計強度、弾性係数比 $n=15$ (使用限界状態)、 $n=30$ (終局限界に近い状態)⁹⁾を用いた。なお、既往研究1)よりコンクリートのヤング係数を変化させることによる評価で実用上問題ないことがわかっているので内部鉄筋はモデル化していない。各載荷点において実験で計測した衝撃荷重の波形の最大値が50kNになるように補正した荷重波形を解析に用いた。また、この荷重波形を図-8の全橋モデルにおいて実験時と同様に各パネルの中央に集中荷重として載荷し、作製し

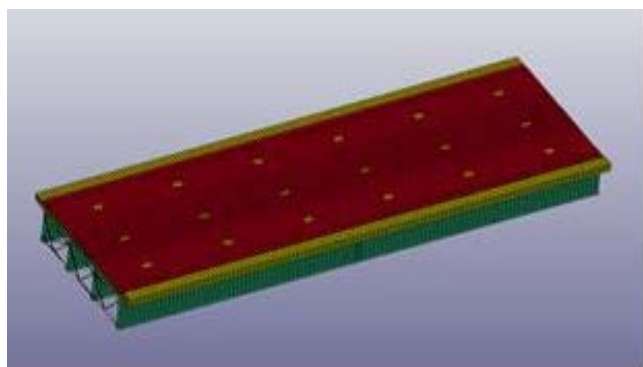


図-8 試験橋梁 全橋モデル

表-1 材料特性

	弾性係数	ポアソン比	詳細
コンクリート	32.2	0.3	SMT計測値
	24.3	0.3	設計強度
	13.3	0.3	$n=15$
	6.67	0.3	$n=30$
アスファルト	1.65	0.35	50°C
鋼	200	0.2	

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の変位、床版下面変位を算出した。

4.2 解析結果

床版の弾性係数を $E_c=32.2\text{kN/mm}^2$ (SMT 計測値), $E_c=24.3\text{kN/mm}^2$ (設計強度), $E_c=13.3\text{kN/mm}^2$ ($n=15$, 使用限界状態), $E_c=6.67\text{kN/mm}^2$ ($n=30$, 終局限界に近い状態)とした場合を一例として、A-3における舗装上面からの変

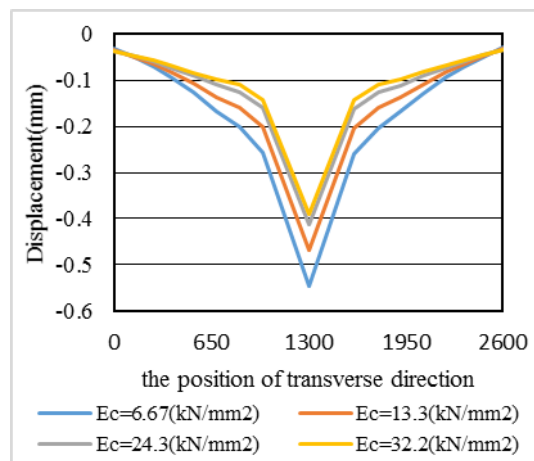


図-9 弾性係数における舗装上面変位 (載荷点 A-3)

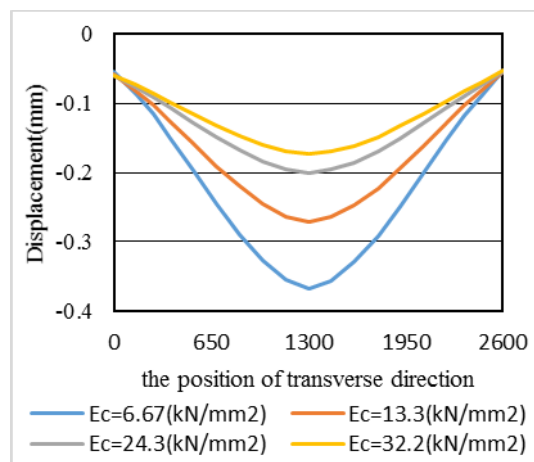


図-10 弾性係数における床版下面変位 (載荷点 A-3)

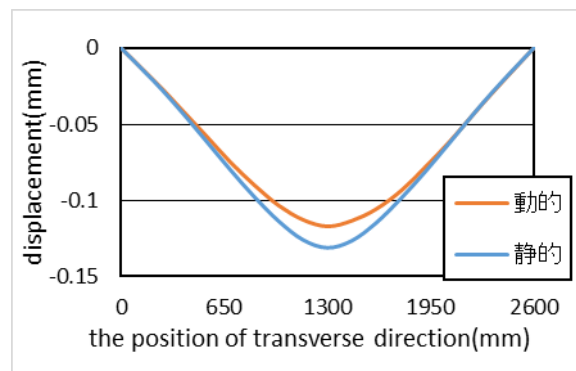


図-11 動的載荷と静的載荷の比較 (載荷点 A-3)

位分布(図-9)、床版下面からの変位分布(図-10)を以下に示す。なお、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。衝撃载荷時の桁の変位は床版の変位に比べ小さいため、どのパネルもそれぞれのコンクリートの弾性係数において、ほぼ同程度の変位分布を示した。

図-9、図-10ともに载荷点変位が最大となった時刻において、コンクリートの弾性係数における変位を比較した。その結果、どちらもコンクリートの弾性係数によって変位分布の変位の大きさが変化している。このことから、コンクリートの弾性係数を変化させて解析を行い、実験値との比較をすることにより、劣化度評価ができると考えた。

4.3 静的と動的における解析結果比較

動的の時と同様にして、パネル中央において50kNの荷重を静的に载荷した結果と動的に载荷した結果を比較した物の一例を図-11に示す。その結果として、静的に载荷したものと動的に载荷を行ったものでは、差が小さく動倍率0.89程度であることが分かった。このことから、実験において動的に载荷した結果補正したものから静的に载荷した結果を比較することは有効であると考えられる。

5. 実験結果と解析結果の比較

最大荷重を50kN換算した実験値と、解析から得られた床版変位を $E_c=32.2\text{kN/mm}^2$ (SMT測定値)、 $E_c=13.3\text{kN/mm}^2$ ($n=15$, 使用限界状態)、 $E_c=6.67\text{kN/mm}^2$ ($n=30$, 終局限界に近い状態)⁷⁾で载荷点変位を評価することとした。なお、図-11~図-13は桁変位を補正した床版変位のみでの比較である。その結果、最大荷重を50kN換算した実験値はAライン、Bライン、Cラインともに設計強度より変位が小さい結果が得られ、SMTによって測定された弾性係数を用いたFEM解析による変位とほぼ同じになる傾向がみられた。

以上より、対象橋梁の損傷状態としては、計算上の初期強度の変位より小さい変位がラインA、ラインB、ラインCから観測されているため、健全であると推測できる。また、シュミットハンマーの計測における弾性係数によって算出された値と試験における载荷点の外部加速度計から算出された計測値がほぼ同じ値を示したことから、解析結果と試験における値の比較による劣化度評価は、可能であると言える。このことから、橋梁点検で損傷進展が確認された際に、今回と同様の载荷試験の実施が損傷程度の把握から見ても有効であることと考えられる。

6. まとめ

本研究では、自走式衝撃加振装置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、橋梁をソリッドモデルによって表現し、有限要素解析による再現解析について検討した。得られた結果を以下に示す。

- 1) 内部加速度計と外部加速度計による载荷点変位の比較から、従来研究から判明している载荷点変位の舗装による影響を除去することが可能であること

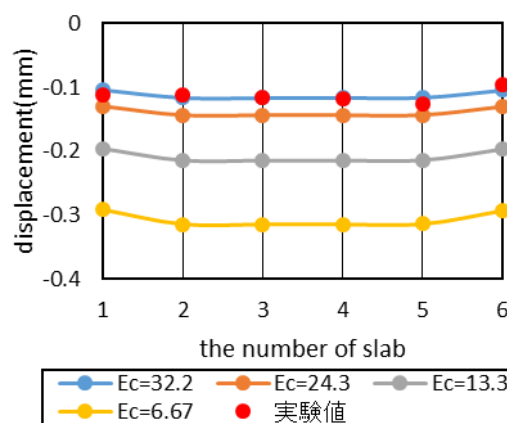


図-12 ラインA

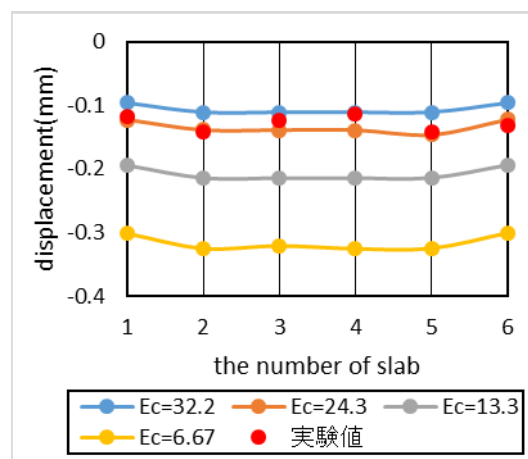


図-13 ラインB

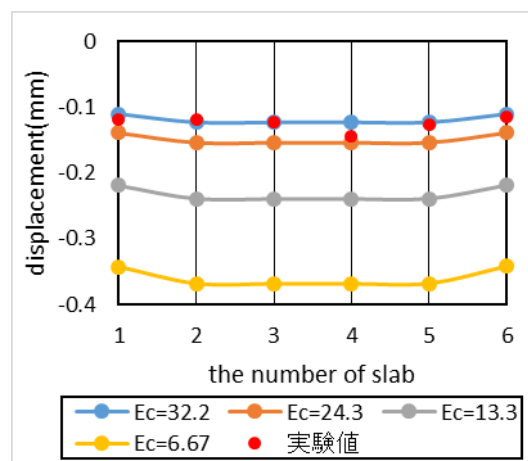


図-14 ラインC

を明らかとした。

- 2) 載荷試験による外部加速度計の載荷点変位と FEM 解析の比較から、シュミットハンマーによって計測された弾性係数における解析変位と試験による外部加速度計の載荷点変位がほぼ一致したことから、解析結果と試験値の比較は有効であると考えられる。
- 3) 次回の橋梁点検で損傷進展が確認された際に、今回と同様の載荷試験の実施が損傷程度の把握から見ても有効であると考えられる。

今後、健全な橋梁を含めた様々な橋梁床版の衝撃載荷試験を行い、試験結果による橋梁床版の劣化度診断の検討を行うことにより、衝撃載荷試験の精度を高めていきたいと考えている。今回の載荷試験は、試験機の載荷板を改良後の初めて試験であったため、明らかに劣化した橋梁において載荷試験を行い、変位分布に違いが現れるか確認していく予定である。なお、本研究は土木学会鋼構造委員会に設置された道路橋床版の点検診断の高度化と長寿命化技術に関する小委員会が企画した実験橋試験に参加して得られたものである。

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きました。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) 横山広, 角間恒, 佐藤孝司, 榎谷浩: 活荷重作用時の道路床版の曲率に関する研究, 構造工学論文集, Vol.63A,p1296-p1303,2017,3
- 2) 玉越隆史, 大橋章, 中谷昌一: 道路の定期点検に関する参考資料—橋梁損傷事例写真集一, 国土技術政

策総合研究所資料 No.196, 2004.12

- 3) 東日本高速道路(株): 設計要領第二集橋梁保全編, 2014,7
- 4) 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,p1062-p1072,2015,3
- 5) 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.
- 6) 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
- 7) 門寺将志, Nguyen Thu Nga, 山口嵩文, 榎谷浩: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.40,No.2,2018
- 8) JSOL : LS-DYNA 使用の手引き Second Edition, 2016.
- 9) 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.

(2018 年 7 月 20 日受付)