論文

実橋を用いたFWD試験の弾性解析と有限要素法による健全性評価に関する解析的検討

亀田浩昭*，横山広**，川淵貴人***，桝谷浩****，久保善司*****

*株式会社国土開発センター技術開発研究所（〒924-0838 石川県白山市八束穂 3-7）
**博士(工学), 大日本コンサルタント株式会社大阪支社技術部（〒541-0058 大阪市中央区南久宝寺町 3-1-8）
***株式会社日本海コンサルタント技術事業本部構造保全部（〒921-8042 石川県金沢市泉本町 2-126）
****工学博士，金沢大学教授，理工研究域環境デザイン学系（〒920-1192 石川県金沢市角間町）
*****博士(工学),　金沢大学准教授，理工研究域環境デザイン学系（〒920-1192 石川県金沢市角間町）

高度成長期に建設された道路橋床版では，疲労だけではなく塩害，凍結融解，アルカリシリカ反応が複合した劣化事例が多く見られる．それらの床版の老朽化が懸念される現状では，劣化度評価を合理的に行うための信頼性の高い点検方法が求められている．本研究では，北陸地方山間部の劣化床版を有する実橋に対して FWD による衝撃荷重載荷試験を行ったので，その結果を報告するとともに，弾性計算や有限要素法を用いた解析的な検討結果を報告する．結果として，衝撃荷重載荷試験の結果と弾性計算を組み合わせることによって健全性評価が可能であること，有限要素法によって試験結果の再現が可能であることが示された．
キーワード：劣化床版，衝撃荷重載荷試験，弾性計算，有限要素法

1. はじめに

道路橋鉄筋コンクリート床版（以下, RC 床版という.）の劣化に関しては，昭和 40 年代に大型車，特に過積載車両の繰返し載荷による疲労が顕在化した後に，輪荷重走行試験機でその劣化プロセスが解明されたという経緯がある．しかしながら近年になって材料劣化による床版劣化が報告されるようになり，特にスパイクタイヤ規制後の凍結防止剤の大量散布による影響も加わり，塩害だけではなく，外部からのアルカリ供給で助長されるアルカリシリカ反応（以下 ASR という.）での床版構造の劣化が散見されるようになってきている．それらは積雪寒冷地で特に顕著であり，梁とは異なりねじりの影響を受ける板構造では，ASR による微細ひび割れが悪影響を及ぼすことは容易に推察できる．

そこで本研究では，ASR による劣化が生じた積雪寒冷地に位置する道路橋の，RC 床版の劣化の程度を把握するために，重錘落下による載荷試験を実施し，弾性理論から誘導されるたわみの厳密解を閾値としてその健全度の評価を行った．さらに，動的挙動を再現するために有限要素法による解析も実施し，その再現性を評価するものとした．

重錘落下による計測は，衝撃荷重の載荷点の変位を速度計，もしくは加速度計で得られる波形から積分処理により変換した値をたわみとするもので，橋梁の下面側への変位計設置が不要であることから，短時間に多くの床版パネルの剛性評価が可能となる．

近年，社会資本の老朽化対策が喫緊の課題となっており，これまで道路橋補修の分野で最も多くの資本が投入されている床版でも維持管理への効果的な対応が求められるようになってきている．現在では橋梁定期点検要領に準じた調査で損傷状況の確認は実施されているが，その対策を検討する際には，劣化床版の耐荷性が把握できなければ供用継続可否の判断もできないのが実状であり，その解決策として本研究は意義のあるものである．

2. 対象橋梁と FWD 試験

調査対象橋梁は 3 主桁の単純鋼合成鈑桁橋で，過去に床版のひび割れ損傷対策として鋼板接着工法（鋼板厚 t=4.5mm）が実施されている．鋼板接着工法の補強効果は本橋で過去に実施された静的載荷試験の結果から著者らで評価しており，その鋼板ひずみを解析値と比較することではく離の可能性が高いことを指摘した [1]．対象橋梁の床版は上面の劣化に起因する舗装の損傷が顕著となり，抜本的対策として打替え工法が採用された．写真－1 に舗装撤去後の床版上面の状況を示すが，部分的に被りコンクリートが砂利化し，容易に内部鉄筋が露出

写真－1　舗装撤去後の床版上面の状況

写真－2　車載型 FWD による衝撃荷重載荷試験

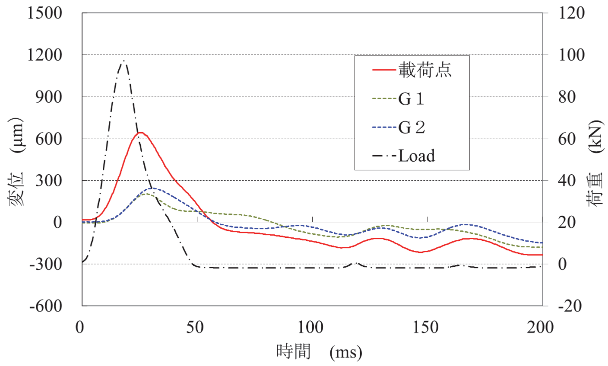
する状況であった．衝撃荷重載荷試験は床版打替え施工中でアスファルト舗装撤去前に実施しており，劣化床版の撤去前に鋼板の付着状況を確認したところ，その殆どがはく離していた．ASR は反応性骨材とセメント中のアルカリ，水分との化学反応であり，上面から浸透した雨水が床版下面の鋼板によって床版コンクリート内に滞留することとなり，劣化が促進されはく離が進展した可能性が高いものと推察される．

重錘落下による載荷試験には，舗装構造の健全性を評価するために開発された車載型 FWD（Falling Weight Deflect meter）を用いるものとした（写真－2）．採用した理由は荷重作用位置でたわみ変形を取得できるようにシステム化されていることと，国内の稼働台数には限りがあるものの，比較的試験装置の入手が容易であることによる．載荷荷重の大きさは衝撃荷重で 100kN であり，データ取得では 1 箇所当たり 3 回程度載荷してほぼ同等の値が得られているかを確認した．載荷板の接地面積は直径 200mm の円形である．なお，荷重載荷の影響で支持桁も変位するため，載荷点直近のたわみ値の他に支持桁上にも変位計を設置してたわみ値を計測し，その値を載荷点直近のたわみから減じることで床版本体の変位とした．

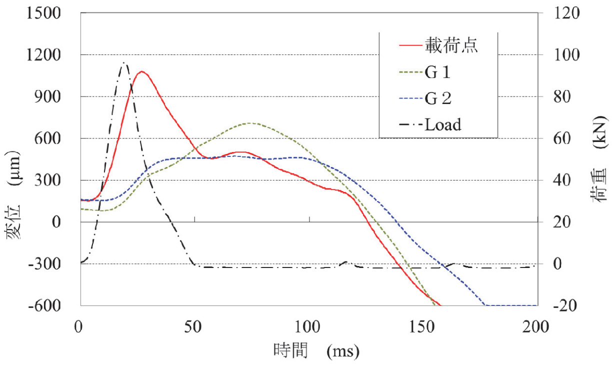
3. 試験結果

3.1　衝撃試験波形

衝撃荷重載荷試験で得られた変位，荷重の波形データを図－1 に示す．図－1(a)は支点側の床版パネルの結果であり，(b)は支間中央パネルの結果である．載荷点のたわみが最大値となった後に支持桁が変形し，その最大となる時間にはずれが生じている．本研究では，支持桁変位を載荷点の値から減じる処理を行っているが，載荷点で最大値を示した時間で統一して減じることとしている．なお，変位が最大を示した後の波形が支点側と支間中央では異なっているが，これは支持桁の変形による影響である．

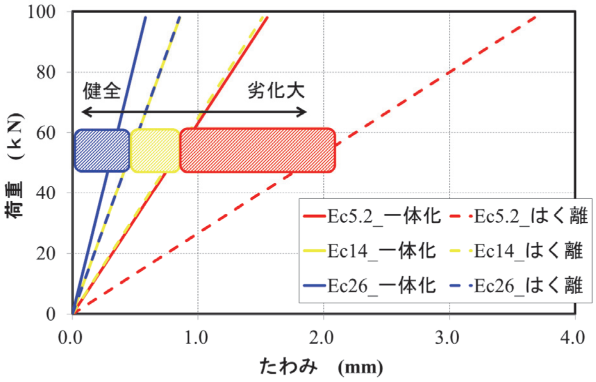


(a)　支点側パネル

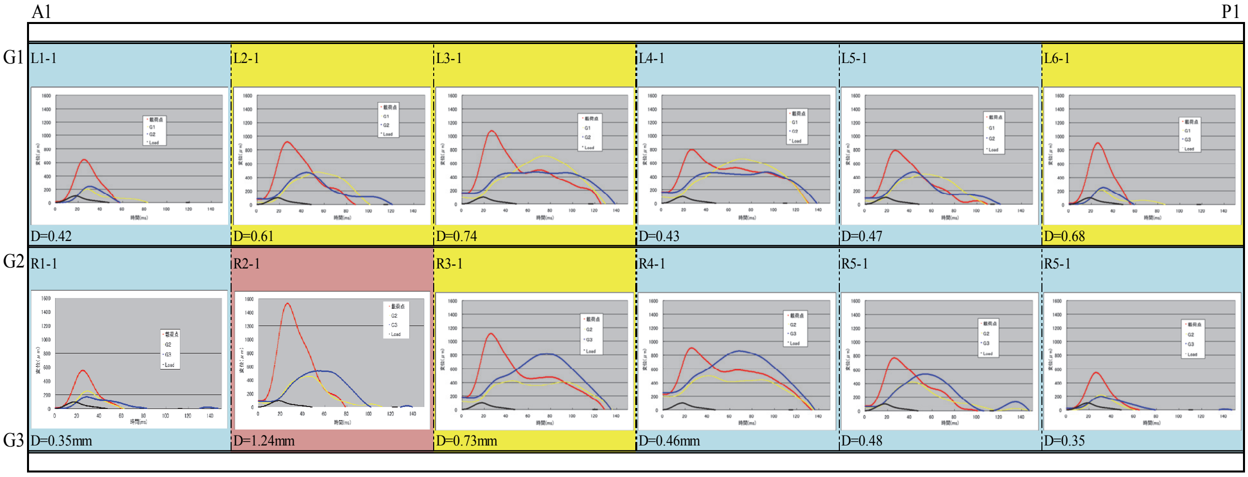


(b)　支間中央パネル

図－1　衝撃荷重による波形データ



図－2　弾性計算による健全度の設定



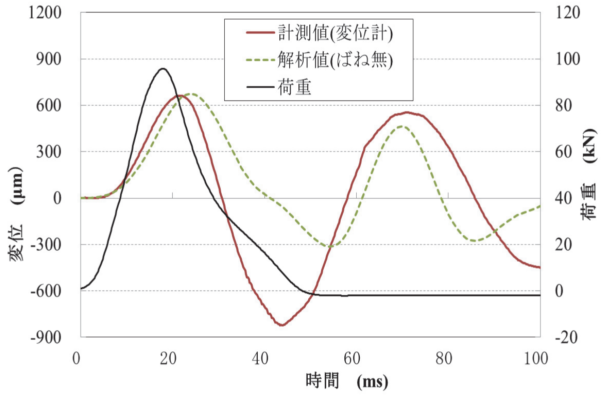
図－3　床版パネル毎のたわみ波形と健全度（赤線の計測たわみの大きさに着目）

3.2　弾性計算による健全度に関する検討

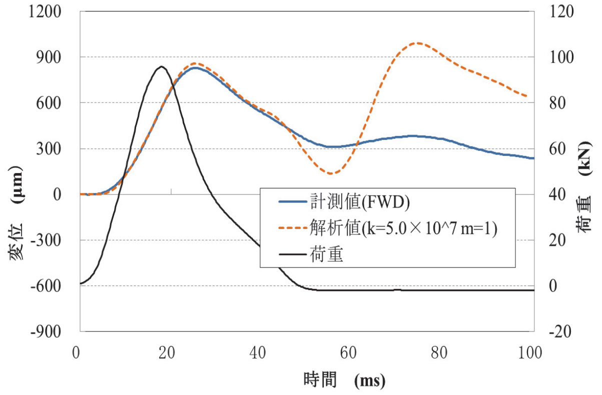
床版の健全性を評価する指標の一つにたわみ劣化度が挙げられ，疲労劣化では解析上の引張無視のたわみ値を実床版のたわみ値が超過した時点で使用限界に到達したとする手法が提案されている．これは輪荷重走行試験で得られた劣化過程で，載荷時たわみの弾性成分が引張無視の計算値を超過した後に終局に至ることが確認されているからである [2]．本研究でも，床版の使用限界をたわみ劣化度を考慮して設定するものとする．その理由は床版が輪荷重を直接支持する部材であることを考慮すると，耐荷性，即ち床版剛性が健全度を評価する指標として妥当性が高いと考えるからである．

図―2 はヤング係数をパラメータとして算出した弾性理論解によるたわみと載荷荷重の関係の計算結果であり，計算で設定したヤング係数は床版から採取したコンクリートコアによる圧縮試験で得られた値のうち，最小値の $Ec=5.2kN/mm^2$ を劣化が進行した状態とし，もう一方の $Ec=26.0kN/mm^2$ を健全な状態として計算した．なお，$Ec=14.0kN/mm^2$ は鋼材とのヤング係数比を n=15 としたもので，解析上の引張無視として評価した．床版の計算モデルは連続鈑版で主桁剛性を考慮し，床版支間は実橋に合わせている．重錘落下試験では衝撃荷重で 100kN が作用するが，静的荷重に換算するとその 50%程度の約 50～60kN になることが既往の研究で分かっている．図では その荷重範囲とヤング係数毎に解析した結果を重ね合わせて，試験結果の評価ができるようにエリアを設定した．なお，図中のはく離は鋼板接着工法で鉛直方向以外の応力伝達が無いように解析上操作した状態である．

図―3 に対象支間の平面図にたわみの計測結果である波形図を重ね合わせた図を示す．載荷試験は計 12 パネルで行っている．なお，図―2 の劣化度を設定した範囲に対応する着色を施した．図によれば R2-1 のパネルで載荷試験によるたわみが大きく，床版コンクリートの劣化進行が懸念される状態であることが判る．その周辺部である L2-1，L3-1，R3-1 のパネルのたわみも大きく引張無視の状態の範囲に含まれていることから，床版劣化は局所的ではなく比較的大きな面積で進行していたことに加えて，全体が一様に劣化していないことが示された．よって，たわみ劣化度による使用限界を適用した場合に



(a)　床版下に設置した変位計



(b)　FWD の変位計

図－4　衝撃荷重載荷試験で得られた変位と有限要素法解析結果の比較

は，本橋床版はその限界を超えており鋼板接着補強が施された後の再補修であることを考慮すれば，打替えによる床版更新は適切な判断であると考える．

3.3 有限要素法による再現性に関する検討

有限要素法による解析には，衝撃非線形問題であることを考慮して汎用コードのLS-DYNA[3)]を使用した．解析条件はソリッド要素で厚さ方向に3層とし，コンクリートのヤング係数はコア採取で得られた最小値を採用した．版形状は床版パネルを切り出した矩形版モデルとし，主桁上では連続版を再現するため固定支持とした．なお，解析では試験で得られたロードセルによる荷重変動を与えてその際の変位の挙動を確認することとした．

現地で実施した衝撃荷重載荷試験では，FWD での変位計測の他に床版下にも変位計を設置している．図－4に変位と解析結果の比較を示すが，図－4(a)は床版の下面に設置した変位計で得られた結果で，主桁の変形は含まれていない．変位計は主桁に固定した山形鋼に設置したことからその変形の影響を受けないため，有限要素法による解析では主桁のバネを設定せず，固定版として計算した．計算の結果，床版の変位は同等となるものの，最大値を示す時間は僅かであるがずれが生じている．図－4(b)は FWD の変位計で得られた結果と解析結果を示したものであり，変位計は載荷位置と支持桁上の床版上面に設置されていることから，主桁の変形の影響を受けることになる．そこで，主桁位置にバネを設定して試算を繰り返した結果，バネ値 $k=1.25\times10^3$ とし，質量 $m=1$ で計測結果と同等となった．よって，有限要素法で衝撃荷重載荷試験結果が再現可能であることが示された．よって，橋種，支間長をパラメータとしてバネ値の適正値を得ることができれば，床版の劣化度判定の選択肢が弾性計算だけではなく，有限要素法でも可能となり，相互の検証による精度向上にも繋がることが推察される．

4. まとめ

本研究では ASR による劣化が生じた鋼板接着補強済み床版で実施した衝撃荷重載荷試験の結果から，弾性計算による健全度判定と有限要素法による試験結果の再現を試みた．以下に得られた知見を列挙する．

① 弾性計算による健全性評価では，採取コアによる圧縮強度試験で得られたヤング係数で劣化程度を設定することで床版パネル毎の状態を検討した．衝撃荷重載荷試験は橋面上のみでデータ取得が可能で，弾性計算と組み合わせることにより，評価が可能であることが示された．

② 有限要素法による計測結果の再現では，主桁の影響をバネ換算することによって近似することが可能であり，床版の健全性が有限要素法でも評価でき，弾性計算と組み合わせることによって精度向上が期待できる．

衝撃荷重載荷試験では主桁の影響を適切に考慮することが重要であり，今後は橋梁全体をモデル化した有限要素法による計算でその影響を検討する予定である．

参考文献

1) 亀田浩昭，堀川都志雄，横山広，久保善司，桝谷浩：鋼板接着補強された ASR 劣化床版の載荷試験と厚板解析による評価，第 67 回土木学会年次講演会概要集，pp.1171-1172，2012.9.
2) 横山広，篠原晃，関口幹夫，堀川都志雄：ゴムタイヤ式輪荷重走行試験機による道路橋床版の疲労耐久性評価手法，構造工学論文集 Vol.50A，pp.999-1006，2004.3.
3) JSOL : LS-DYNA ver971 USER'S MANUAL Vol.1，2007