

論文

疲労劣化した RC 床版の有限要素法による動的挙動解析に関する研究

横山広*, 榎谷浩**, 土井智晴***, 関口幹夫****, 久保善司*****

*博士(工学), 大日本コンサルタント株式会社大阪支社 (〒541-0058 大阪市中央区南久宝寺町 3-1-8)

**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)

*** JR 西日本敦賀地域鉄道部敦賀施設管理室 (〒914-0055 福井県敦賀市鉄輪町 1-2-34)

****東京都 土木技術支援・人材育成センター (〒136-0075 東京都江東区新砂 1-9-15)

*****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)

疲労などによるひび割れ損傷を受けた道路橋床版の事例が数多く報告されている。それらの維持管理の現場では、劣化度の合理的で信頼性の高い点検方法・解析による再現方法が強く求められている。そこで、本研究では東京都が実施した輪荷重走行試験機を使用して、疲労損傷を与えた床版への衝撃荷重載荷試験に対して有限要素法を用いた解析によるたわみのピーク値の再現を試みた。結果として、衝撃荷重載荷試験で劣化過程のたわみ性状の確認が可能であることが示され、道路橋の供用範囲での劣化状態ではヤング係数の変化によって解析的再現が可能であること。終局に近づくと版としての剛性変化を考慮すれば再現できることが示された。

キーワード：道路橋床版，疲労劣化，衝撃荷重載荷試験，有限要素法解析

1. はじめに

高度成長期に建設された道路橋鉄筋コンクリート床版（以下、RC 床版という）に疲労損傷が顕在化し、これまでに数多くの疲労に関する研究が実施されてきた。当時の道路橋示方書¹⁾では床版厚さが薄く設定されており、配力鉄筋量も少なかった。それに加え過積載車両の影響もあったため、昭和 40 年代後半には RC 床版の陥没損傷が頻発した。その後道路橋示方書が改訂され、床版厚さが大きくなることにより疲労耐久性は飛躍的に増大している。しかしながら、昭和 40 年代に建設された数多くの橋梁は半世紀近く経過し高齢化しており、補修・補強を繰り返しながら供用されているのが現実である。よって、その維持管理が重要な課題であることは疑いが無い。

近年、橋梁の長寿命化計画が全国的に策定されるようになり、点検結果を基に維持管理の長期計画が立案されている。橋梁の点検では橋梁定期点検要領²⁾に基づき、主に目視やタタキ点検で健全性を把握することになるが、RC 床版に関しては疲労で発生するひびわれ間隔や性状、幅によって損傷程度が区分されている。実際の維持管理の現場では、立案された計画に則って補修・補強が実施されるが、その際には見かけの損傷程度の情報では有効な対策検討が困難な場合も多く、対策工法の検討の精度を向上させる為の、劣化床版の保有耐荷性能を調査する必要が生じる場合も少なくない。現状では大型車両によ

る載荷試験が耐荷性能を評価する有力な方法の一つであるが、数多くの橋梁を対象とする場合や長大橋では費用が嵩み非現実的なものとなる。さらに足場仮設などの作業も必要となることから、試験が長期化することとなり容易に採用されるような状況ではない。

そこで本研究では、床版の耐荷性能を容易に把握する手法として衝撃荷重載荷試験に着目し、解析による動的挙動の再現を目的として、東京都による輪荷重走行試験の劣化過程で実施された衝撃荷重載荷試験結果を基に、有限要素法による動的挙動解析を実施した。解析によるたわみのピーク値の再現が可能になれば、実橋での衝撃荷重載荷試験の検証が可能となり耐荷性能の評価の精度が向上することから、効果的な対策立案が可能となることは明白である。

2. 輪荷重走行試験及び衝撃荷重載荷試験の概要

2.1 試験方法

使用した輪荷重走行試験機は東京都が所有する大型航空機用ゴムタイヤを装着したもので、走行荷重は 157kN で一定とした^{3,4)}。タイヤの 157kN 載荷時の接地面積は幅 330mm×長さ 380mm である。走行試験では 2 枚の供試体を並べて実施しており、試験対象供試体の載荷範囲は図-1 に示すように端部から 3250mm の範囲で往復運動させている。輪荷重走行試験での供試体変位は床

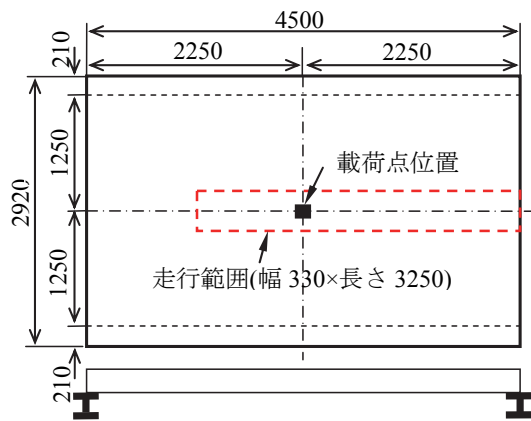


図-1 供試体形状と輪荷重走行範囲

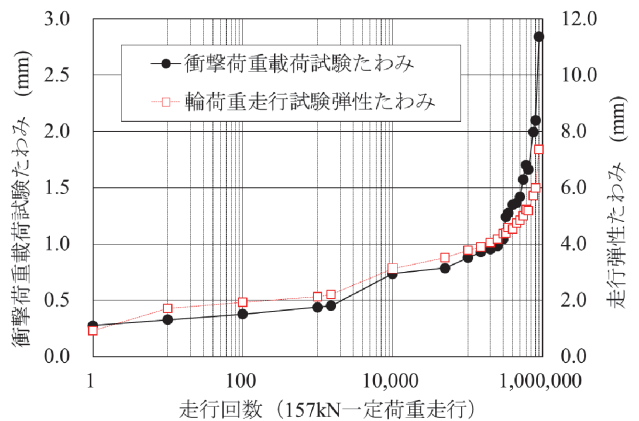


図-3 輪荷重走行試験での弾性たわみと
衝撃荷重走行試験のたわみ性状比較

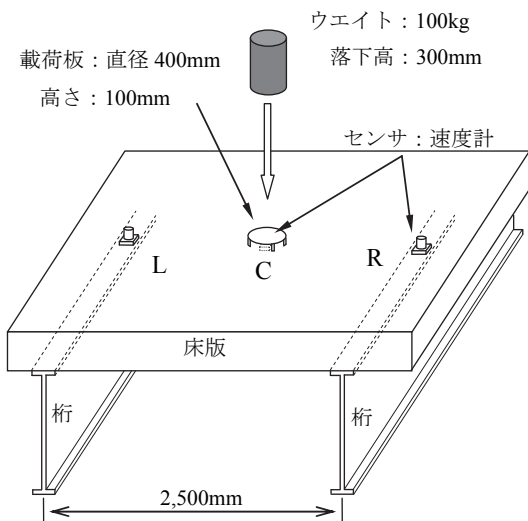


図-2 衝撃荷重走行試験

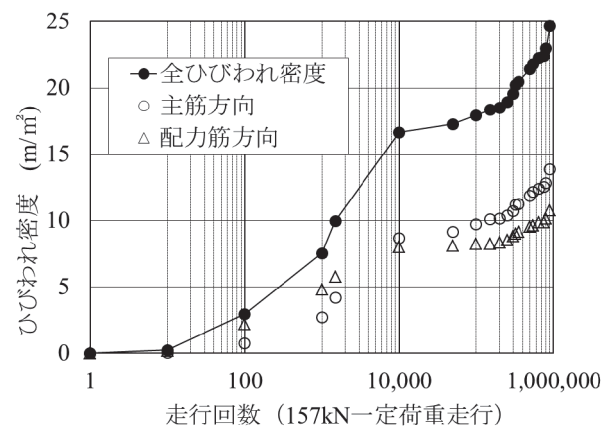


図-4 輪荷重走行試験のひび割れ密度の経時変化

版下に設置したレーザ変位計で計測した。

衝撃荷重走行試験は図-2に示すように直径400mmの載荷板上に100kgのウェイトを落下させる方法で、変位は載荷点と支持桁上に設置した速度センサの積分処理で計測し支持桁の変位も考慮している。計測タイミングは輪荷重走行試験の走行回数0回、100回、40万回、60万回、90万回で実施した。

輪荷重走行試験では載荷時の変位と除荷時の変位を計測し、載荷時の値から除荷時の残留成分の値を差し引いたものを弾性たわみとしてその経時変化で耐荷性能の変化を評価することになる。図-3は走行試験結果の弾性たわみと衝撃荷重走行試験で得られたたわみの経時変化を示したものである。載荷荷重が異なるものの、たわみの増加傾向は類似しており、衝撃荷重走行試験で道路橋床版の載荷試験が可能で有ることが認められる。

2.2 床版供試体

試験供試体(図-1参照)は昭和47年の道路橋示方書に準拠したもので床版厚さは200mm、内部鉄筋は引張主鉄筋がD19を125mmで引張配力鉄筋はD16を200mm

ピッチで配筋している。なお、試験終了後のコアボーリングでの採取資料による圧縮試験の結果、供試体コンクリートの圧縮強度は $\sigma_{ck}=32.57\text{N/mm}^2$ で、ヤング係数は $E_c=25.70\text{kN/mm}^2$ 、ポアソン比は $\nu=0.23$ であった。

図-4は走行試験過程でのひび割れ密度の変化であり、載荷1万回までで $16.67\text{m}^2/\text{m}^2$ まで増加し、その後は微増する傾向であった。

3. 有限要素法による動的挙動解析

3.1 疲労劣化過程の検討

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-DYNA⁹⁾を使用した。解析条件はソリッド要素で床版供試体の物性、支持条件を反映させ、非線形性は考慮せず弾性体として取り扱い、減衰は考慮していない。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、特にピーク位置での計算結果との差異を確認することとした。図-5は解析モデルの要素分割図で厚さ方向に3分割とした。

図-6 は走行回数 0 回での荷重値，ならびに変位の経時変化を示したものである．最大たわみは試験値で 0.276mm，解析値は 0.262mm となり，解析値が試験値の 95%程度であった．ピーク位置での時間差は 0,003 秒であり，解析値が先行しているものの試験での動的挙動が解析で再現できたと考えられる．輪荷重走行試験では実橋の疲労劣化過程が再現され，走行回数の増加に合わせてひび割れが増加し弾性たわみが増大する．それらの版としての曲げ剛性の変化を解析によって評価する際にはヤング係数の変化として捉えることが一般的であることから⁹⁾，本研究でもヤング係数を変化させて試験値を再現することとする．

図-7 は支持条件を同一としヤング係数を変化させたもので，図-7(a)~(d)が走行回数 100 回，40 万回，60 万回，90 万回に対応している．走行回数 40 万回まではヤング係数の変化としてピーク値，時間の近似が可能であるが，それを超える回数では近似できない結果となった．因みに，既往の研究では実橋床版での疲労劣化した状態はヤング係数比 $n=31$ ($E_c=6.45\text{kN/mm}^2$) の弾性計算結果が一致するとの報告⁷⁾があり，今回の解析では走行回数 40 万回での解析でヤング係数が $E_c=3.27\text{kN/mm}^2$ であることから，実橋床版で疲労劣化を評価する際にはヤング係数の変化で対応できるものと推察される．

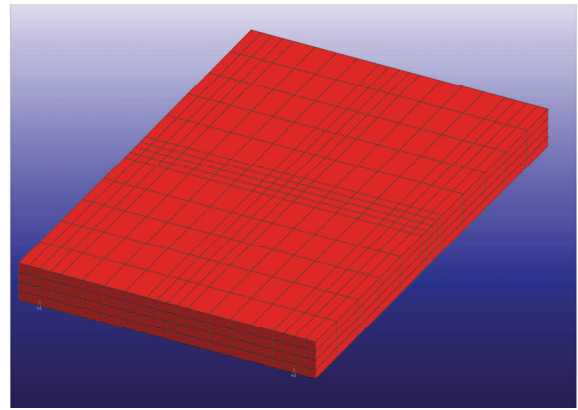


図-5 有限要素法の解析モデル

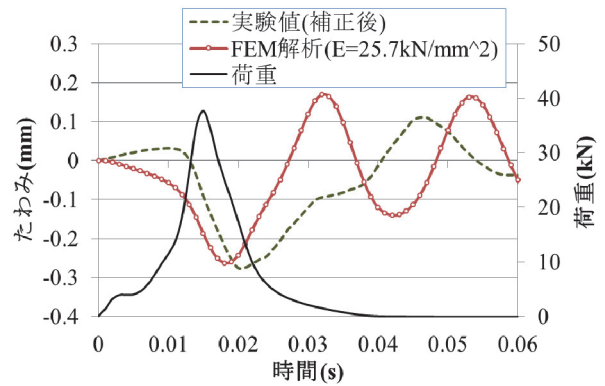
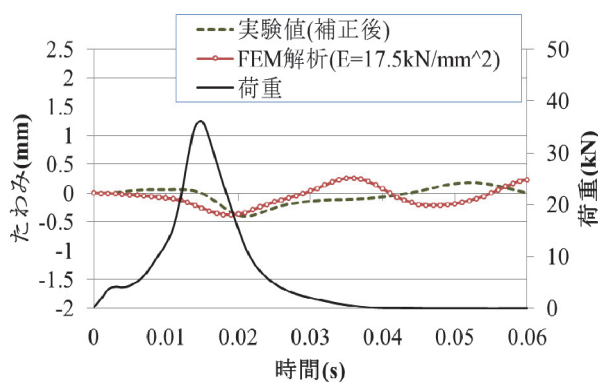
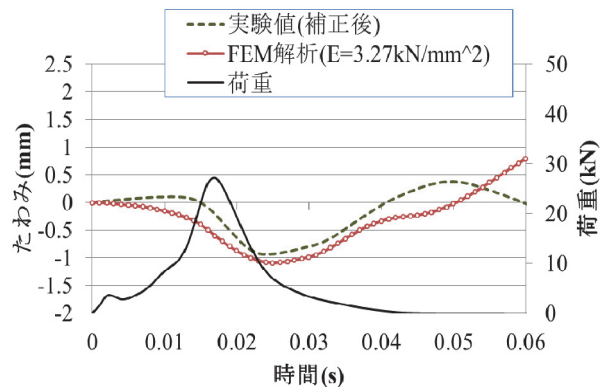


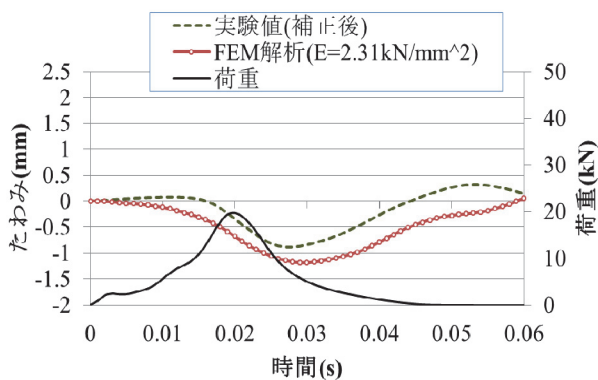
図-6 走行回数 0 回での動的挙動



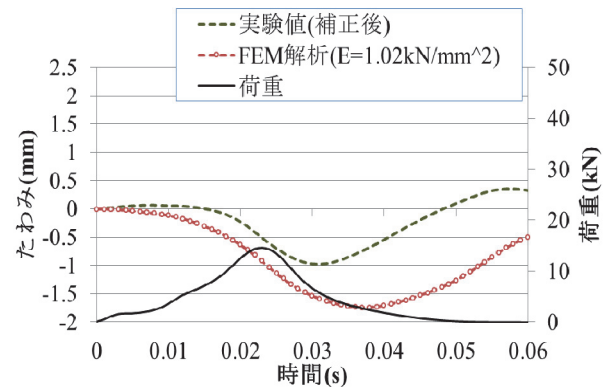
(a) 走行回数 100 回



(b) 走行回数 40 万回



(c) 走行回数 60 万回



(d) 走行回数 90 万回

図-7 ヤング係数を変化させた動的挙動

3.2 終局時の検討

疲労劣化が進展した際の衝撃荷重载荷では物性値の変化だけではなく、版としての剛性も影響すると想定し4層のソリッド要素で床版供試体をモデル化し、層数を減じる処理で試験値と比較することとした。ヤング係数は圧縮試験の値を使用し、減じた層ではその1/100とした。図-8(a), (b)に60万回走行と90万回走行の試験と解析値を図化した。何れも積層数を2まで減じた解析値が試験値に類似する結果となり、60万回走行で解析値/試験値が108.1%で90万回走行が80.5%であった。よって、疲労劣化が進展して終局に近づいた際には剛性変化を考慮する必要のあることが解る。

4. まとめ

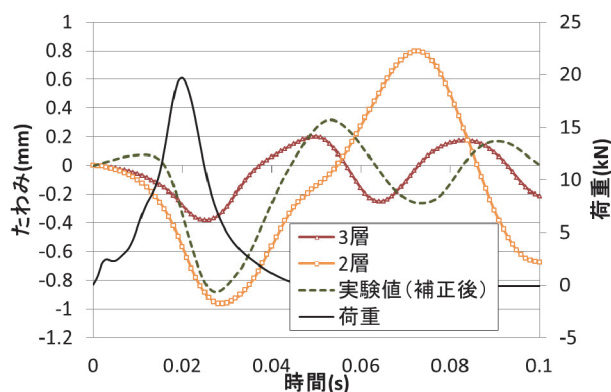
本研究では輪荷重走行試験による疲労劣化過程で衝撃荷重载荷試験を実施し、解析的に再現するものとして有限要素法による動的挙動の解析を実施した。以下に得られた知見を列挙する。

- ① 輪荷重走行試験過程で得られる弾性たわみと衝撃荷重载荷試験でのたわみはその傾向が類似し、衝撃荷重载荷試験で道路橋床版の载荷試験が可能である。
- ② RC床版の疲労劣化過程での動的挙動は、実橋床版で観察されている劣化床版のヤング係数比までの劣化であればその変化で有限要素法による解析で評価できる。
- ③ 劣化が進展して終局に近づくとヤング係数の変化ではその挙動が再現できないが、積層板としてモデル化してそれを減ずる剛性変化で再現することが可能となる。

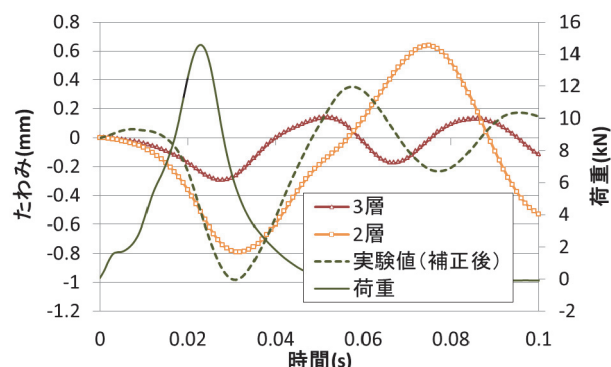
本研究では、ヤング係数と剛性を分けて検討したが、それらを組み合わせることでさらに再現性が向上することは容易に想像できる。よって、今後は組み合わせの最適化に関する検討を進める予定である。

参考文献

- 1) 日本道路協会：鋼道路橋設計示方書，1964.6.
- 2) 国土交通省道路局国道・防災課：橋梁定期点検要領(案)，2004.3.



(a) 走行回数 60 万回



(b) 走行回数 90 万回

図-8 層数を減じた解析による動的挙動

- 3) 関口幹夫，國府勝郎，青木孝憲：重錘落下たわみによるRC床版の健全度評価法，都土木技研年報，Annual Report I.C.E of TMG 2005，pp.79-92，2005.
- 4) 関口幹夫：重錘落下たわみによるRC床版の健全度評価法要領，Annual Report I.C.E of TMG 2005，pp.257-262，2005.
- 5) JSOL：LS-DYNA ver971 USER'S MANUAL Vol.1，2007
- 6) 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.
- 7) 関口幹夫，横山広，堀川都志雄：リブ付き多層版解析による各種補強床版の実測たわみの評価，構造工学論文集 Vol.54A，pp.442-451，2008.3.