

擬似クラック法に基づく疲労応答解析と 既設RC床版の余寿命推定

前川 宏一¹・藤山 知加子²・Tang XueJuan³・小林 薫⁴

¹東京大学大学院 工学系研究科 社会基盤学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

²法政大学 デザイン工学部 都市環境デザイン工学科 (〒162-0843 東京都新宿区市谷田町2-33)

³清華大学 土木水利学院 水利水電学科 (北京市海淀区清華園1号)

⁴JR東日本研究開発センターフロンティアサービス研究所 (〒331-8513 さいたま市北区日進町2-479)

既設床版の目視調査で得られる床版表面のクラックの位置と幅の情報から、数値解析上で既存損傷を再現する擬似クラック(quasi-cracking)法を提案した。これにコンクリート構造の高サイクル疲労応答を再現する経路積分型非線形有限要素解析を組み合わせ、既設RC床版の余寿命推定プログラムを開発した。実橋床版のひび割れ調査データと実疲労寿命の実験結果について検討を行った結果、擬似クラック法は損傷を含む実部材の剛性を過大側に算出する傾向にあるが、疲労損傷の進行を良好に再現できることを示した。

キーワード 既設RC床版, 疲労, 擬似クラック法, 余寿命推定

1. 研究・技術開発の概要

(1) 研究の背景

床版の損傷は上面では交通機関の走行安全性確保、下面ではかぶりコンクリート剥落などによる第三者被害防止の観点から、橋梁の維持管理上の重要課題のひとつである。一方で、損傷を発見して床版の補修・補強工事を行うには交通規制を伴う場合も多く、その間の社会的損失を適切に評価することも重要である。橋梁管理者は、路線と橋梁の供用計画に対して、現状の余寿命を適正に把握し、必要十分な対策を講じることが求められている。

(2) 研究・技術開発の概要

本研究は、従来の目視調査による現状把握に数値解析の技術を取り入れて、既存床版の余寿命を推定する手法の開発を目指すものである。はじめに、既設床版の目視調査で得られる床版表面のひび割れの位置と幅の情報のみから空間平均化された等価ひずみを算出し、これをもとに各有限要素に擬似クラックを数値モデル上に実体化し、既存損傷を有する部材を仮想的に構築する手法(擬似クラック法)を提案する。

次に、筆者らがこれまで開発してきたコンクリートの高サイクル疲労を再現する経路積分型数値解析法¹⁾を適用し、提案手法による損傷再現後の部材モデルでの疲労損傷シミュレーションから、余寿命を推定する方法を提案したい。数値実験ならびに実損傷を受けたRC床版の

余寿命実験結果を用いて、擬似クラック法の妥当性・適用性の検証を行うとともに、点検業務で用いられる損傷区分に対応する数値計算上の部材余寿命を算定する。

2. 擬似クラック法

(1) 入力ひずみデータ換算プロセス

擬似クラック法は、二つのプロセスによって構成される。一つは、目視調査で得られたひび割れ情報を数値解析入力データに変換するプロセス、もう一つは、変換されたひずみデータを用いて解析モデルに強制的に損傷(擬似クラック)を生じさせるプロセスである。

目視調査で得られたひび割れ情報を数値解析入力データに変換するプロセスを図-1に示す。はじめに、目視調査で得られたクラックの方向と幅の情報を、有限要素解析に用いるメッシュモデルの寸法に対応した区画ごとの空間平均ひずみに換算する(図-1のstep 1)。

$$\varepsilon_{x_0}^1 = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cos \theta_i}{l_x}, \quad \varepsilon_{y_0}^1 = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \sin \theta_i}{l_y} \quad (1)$$

ここで、 ε_x および ε_y はひび割れ幅 w_i を x と y 方向に投影換算し、要素メッシュ各辺の長さ l_x と l_y で除して算出した要素平均ひずみである。上付文字の1は、床モデルの最下層面のひずみであることを示す。

通常床版のひび割れは、多くの場合、下面からのみ観察可能であるため、中間層のひび割れ幅は、下面で得られたひび割れ幅を最大値、上面でゼロと仮定して線形補

間して求めることとする (step 2) . x 方向を例に示すと、各層のひずみは以下で表される。

$$\begin{aligned} \text{下から} p \text{層目} \quad \varepsilon_{x_0}^p &= \varepsilon_{x_0}^1 \times \frac{\sum_{j=p}^m t_j}{\sum_{j=1}^m t_j} \\ \text{最上層} \quad \varepsilon_{x_0}^k &= \varepsilon_{x_0}^1 \times 0 \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 m は版の厚み方向の分割数 (メッシュの層数) で、分割した版の1層あたりの厚さは t 、ひずみを算出する平面の数は $k=m+1$ で表すことができる。上面での平均ひずみが実測可能な場合は、上下面で線形補間する。

ここまでの過程で得られた擬似ひずみは、荷重作用後のひび割れをひずみに換算したものであり、残留ひずみにほぼ相当する。この残留ひずみから、材料が過去に受けた最大応力と最大ひずみを推定するのが図-1のstep 3である。 x 方向を例に、以下で推定する。

$$\varepsilon_{x_1}^k \cong \alpha \varepsilon_{x_0}^k \quad (\beta < \varepsilon_{x_0}^k) \quad (3a)$$

$$\varepsilon_{x_1}^k \cong \varepsilon_{x_0}^k \quad (\varepsilon_{x_0}^k \leq \beta) \quad (3b)$$

ここで、 $\varepsilon_{x_1}^k$ は過去に経験した最大ひずみであり、 α と β はコンクリート強度と拘束条件で決まる係数である。

(2) 擬似クラック生成プロセス

要素構成節点の変位を完全拘束した状態で、上記の空間平均ひずみの符号を反転した仮想強制ひずみを与えることで、擬似クラックを構築する。 x 方向を例にすれば、各要素に引張内部応力 $\sigma_{x_1}^k$ が生じることとなる。

$$0 = -\varepsilon_{x_1}^k + \varepsilon_{x_1}^k \rightarrow \sigma_{x_1}^k = E_T \cdot \varepsilon_{x_1}^k \quad (4)$$

ここに、 E_T はひずみ $\varepsilon_{x_1}^k$ が生じた時点でのコンクリートの弾性係数である (図-2のstep 4, step 5) . 生じた内部応力がコンクリートのひび割れ強度を超えると、損傷 (擬似クラック) が再現され、その履歴が要素ごとに配置された計算記憶領域に書き込まれることとなる。

本手法は、観察されたひび割れの発生原因にかかわらず、一軸圧縮—引張状態で得られる材料構成則を介して過去に経験した最大応力—ひずみ状態を推定していることに相当する。換言すれば、目視検査のみでは特定不能なコンクリートの疲労圧縮損傷は、ここでは厳密に再現していない。したがって、本研究では擬似クラック法の工学上に適用性を後章にて検証、確認する。

擬似クラック構築の後、各節点の拘束を解放することで、隣接要素間の応力釣り合いを満足する変形が算定される (図-2のstep 6) .

擬似クラック生成過程と釣り合い安定状態への移行に対応して、順次、数値解析で使用する構成則の履歴変数が更新される結果となる。筆者らが開発したコンクリートの高サイクル疲労を再現する非線形有限要素解析の材料構成則は全てrate-type型なので、引き続き解析を行えば、損傷後の余寿命が算定される (図-3) .

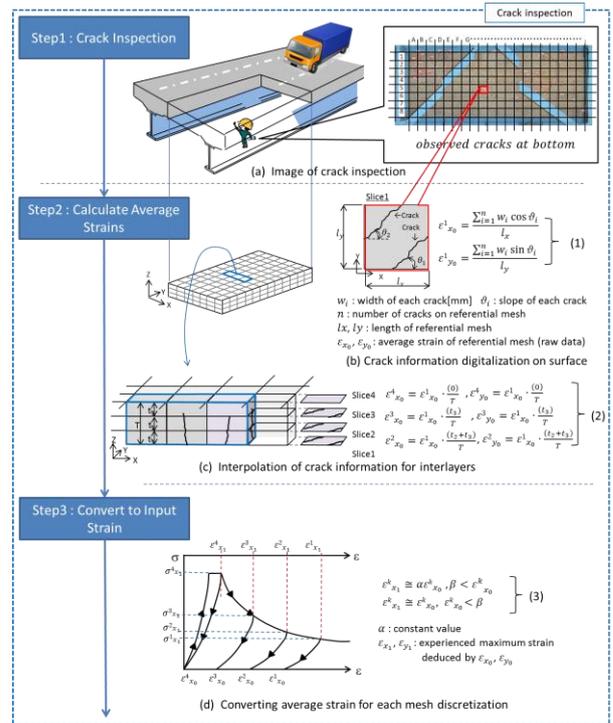


図-1 ひび割れ情報を数値解析データに変換するプロセス

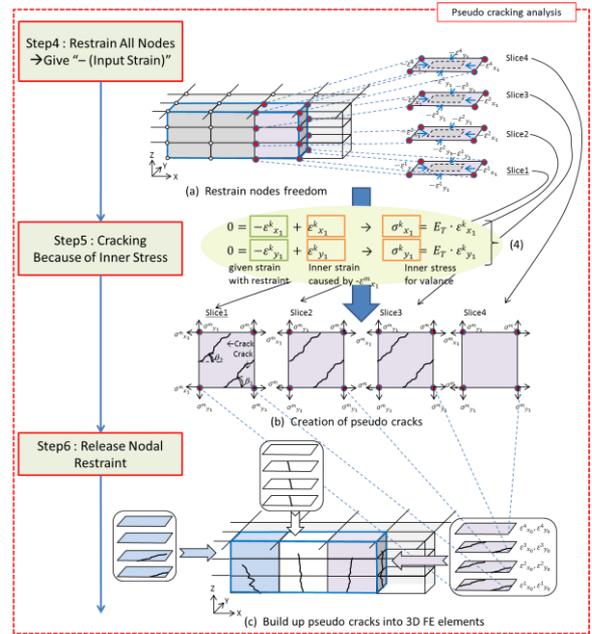


図-2 擬似クラック生成プロセス

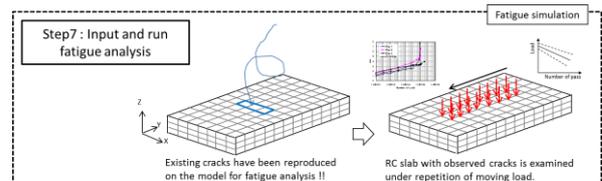


図-3 擬似クラック法による損傷導入後の疲労解析イメージ

3. 擬似クラック法の検証

(1) 実床版クラック情報に基づく損傷再現解析

岡田ら²⁾は、7年間供用した実橋梁から切出した床版のひび割れ状況を記録するとともに、この床版と同じ諸元の無損傷試験体を作成して、双方の押抜きせん断耐力試験と定点繰返し載荷試験（疲労試験）の結果を比較した。切出し床版の載荷前ひびわれ状況は、下面では格子状に発達したひび割れが観察され、幅0.2mm以上の主要なひび割れの間隔は200~500mm程度、上面のひび割れは1方向のみで、間隔も広がったと記されている。本研究では岡田らの一連の実験を対象に、擬似クラック法による再現解析を試みた。

載荷前に観察された主要なひび割れを、数値解析に用いるメッシュモデルに重ねて表示した例を図-4に示す。式(1)~(3)をもとにひび割れをひずみに換算し、擬似クラック法によって仮想内力(引張)と、それに対応する損傷を強制的に発生させた(図-2のstep 5)。その時の版下面の主応力分布図を図-5に示す。比較的高い応力が発生している領域と主要なひび割れ位置(図-4)はほぼ一致し、その要素にはひび割れ履歴が記録、更新される。

(2) 余寿命予測解析

上記の手法で損傷を導入したケースO1およびO2と、損傷のない新設試験体N1とN2について、静的耐力試験と定点繰返し疲労試験の荷重-たわみ関係をまとめたものが図-6である。対応する数値解析結果を図-7に示す。

新設試験体を模擬したN1およびN2の解析では、いずれも実験結果との良好な一致を示している。荷重を段階的に増やしながらかつて200万回を超える定点繰返し荷重を作用させたN2のたわみ進展状況が、精度よく再現されていることがわかる。

擬似クラック法により損傷を導入したO1とO2の解析では、解析で得られる初期剛性は実験に比べて幾分大きい。本研究での擬似クラック法では、過去に経験した最大ひずみを推定する際(step 3)、ひび割れ間のコンクリートの乾燥収縮と弾性変形分を考慮していない。換言すれば、ひび割れ間のコンクリートを剛体として等価ひび割れを簡易的に求めるために、ひび割れに起因するひずみを過小側に評価することとなる。また、前述の通り、コンクリートの圧縮疲労損傷度(破壊パラメータ)の履歴変数は更新されない。

しかし、その後230万回におよぶ繰返し荷重によるたわみの増加については、実験の6.7mmに対して解析は5.7mmと算出しており、大差ない。実験に用いた実橋床版は疲労や乾燥収縮の影響に加え、丸鋼を用いていたため付着が低下していた可能性もある。それらの影響を含まない目視検査のみによる簡易推定の範囲で、実験よりたわみが小さめに算出されることは妥当と判断される。

表-1 実橋切出し床版および新設床版載荷試験条件一覧

No.	試験体寸法(mm)	コンクリート圧縮強度(kgf/cm ²)	鉄筋降伏強度(kgf/cm ²)	載荷パターン	備考
O1	2500x3750x180	323	3300	Static	実橋から切出
O2	2500x3750x180	323	3300	Pulsating	実橋から切出
N1	2500x3800x180	255	2800	Static	新規作成
N2	2500x3800x180	301	2800	Pulsating	新規作成

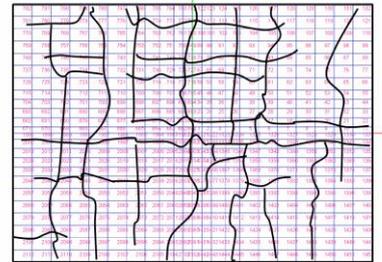


図-4 主要なひび割れ(O1下面)と解析モデルのメッシュ

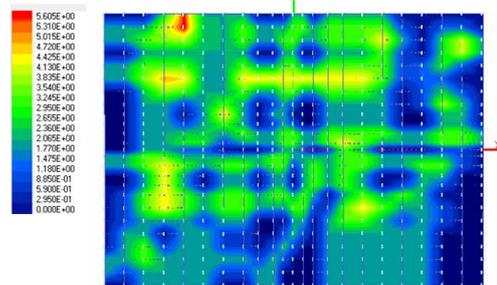


図-5 擬似クラック法により発生した応力の分布(版下面)

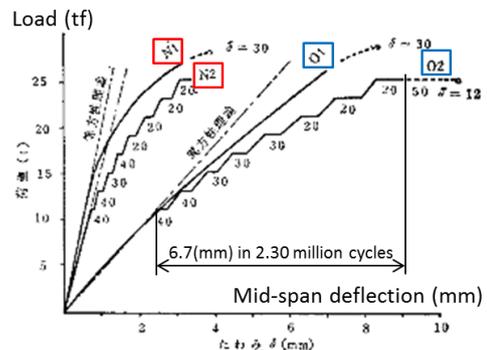


図-6 実橋切出し床版および新設床版 荷重-たわみ関係²⁾

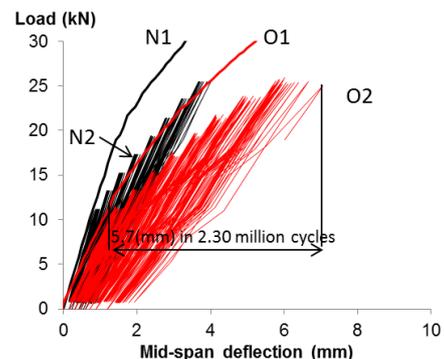


図-7 擬似クラック法による解析結果

検査情報の高度化と合わせて今後の改良点としたい。

4. 目視調査による評価を用いた検討

(1) 点検、維持管理業務の活用

本研究は、目視調査のみによる情報と数値解析の技術を結びつけ、簡便な手法で、かつ実用に堪える精度の既存床版余寿命を目指している。前節までに述べた擬似クラック法はひびわれの位置や幅といったひび割れ目視情報に基づいて実施されるが、実際の橋梁維持管理の現場では、時間や費用の制約から、詳細なひび割れ調査データが得られない場合も少なくない。そこで、本節では、道路管理者が比較的簡便に実施できる、平均的なひびわれ幅とひびわれ間隔に着目した損傷度評価³⁾に基づく余寿命予測を行い、さらに簡便な方法の検討を行うこととした。国土交通省の橋梁定期点検要領(案)に基づく損傷度の区分を表-2に示す。

表-2 ひびわれ幅と間隔に着目した損傷度評価区分³⁾

損傷度	ひびわれ幅	ひび割れ方向、間隔	劣化過程の目安
a	0.05mm以下	1方向のみ 最小間隔が1m以上	潜伏期
b	0.1mm以下が主	1方向が主 間隔0.5~1.0m程度	潜伏期
c	0.2mm以下が主	格子状直前 間隔0.5m程度	進展期
d	0.2mm以上が目立つ	格子状 間隔0.5~0.2m	加速期
e	0.2mm以上	格子状 間隔0.2m以下	劣化期

(2) パラメトリックスタディー

a) 解析条件

検討に用いるモデル床版の概要を図-8に示す。長手方向3.0m、幅2.0m、厚さ190mm、端部の鉛直方向を単純支持する支間2.0mのRC版である。コンクリートの圧縮強度は30N/mm²、鉄筋の降伏強度は345N/mm²とした。

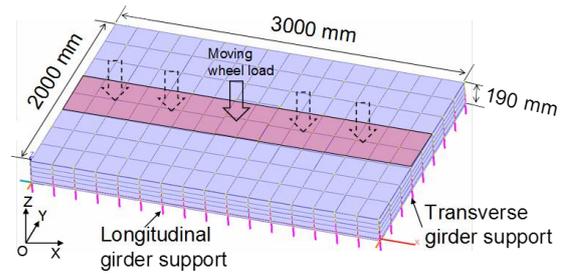
擬似クラック法により損傷度a~eをパラメータとした5種類の床版モデルを作成した。それぞれ、移動荷重を模擬して、支間中央に進行方向200mm、幅500mmの分布荷重領域を順次移動させ、移動荷重による疲労解析を行った。荷重の大きさは一定で、300kN~550kNの6種類について解析を行った。

損傷度評価区分による評価は、各ひび割れの位置、方向、幅を規定するものではなく、版全体の平均的なひび割れ間隔と代表的なひび割れ幅の観察に基づいている。したがって、擬似クラック法での入力でも、ひび割れは版全体に一樣に分布していると想定し、版全体に平均化した換算ひずみを与えるものとした。

b) 解析結果

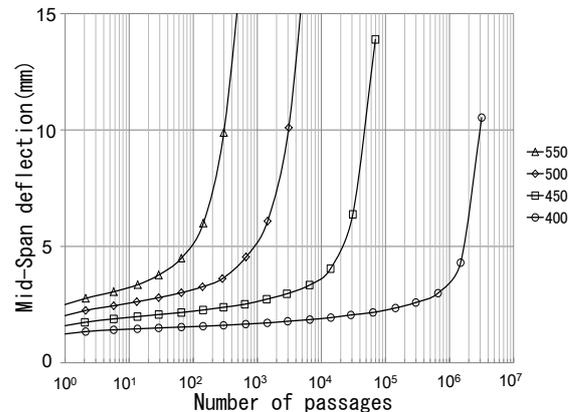
最も損傷が少ない損傷度 a と最も損傷が深刻な損傷損傷度 e について、移動荷重の繰り返し载荷に伴う活荷重たわみ最大値の推移を図-10に示す。損傷度 a では、荷重が350kN 以下では载荷回数が 10⁷ を超えてもたわみの増加がみられず、また損傷度 e では、500kN 以上の荷重を与えると 10 回未満で破壊に至ったため、いずれも本検討の対象外とした。

損傷度 a の場合、たわみの増加が一定である期間を経た後、破壊に至る急激なたわみの増加(但し、対数時間軸上において)に移行する傾向が概ね見られる。一方、損傷度 e では損傷度 a に比べてその傾向は明確でなく、比較的、早期に破壊に至っている。

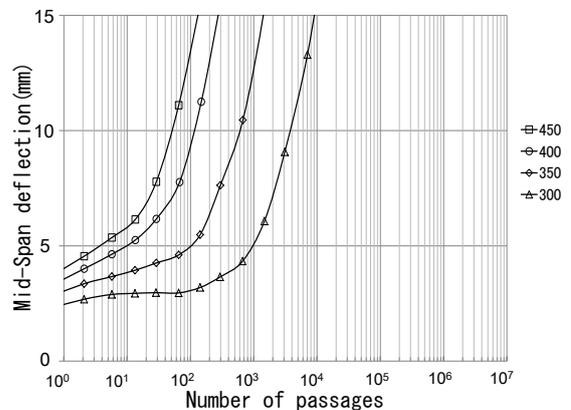


配筋状況	主鉄筋(支間方向)	配力鉄筋(長手方向)
上面	D16ctc180	D13ctc400
下面	D16ctc90	D13ctc250

図-8 解析モデル



(a) 損傷度a



(b) 損傷度e

図-10 活荷重たわみ最大値の推移

このことから、既設床版のたわみ観測を行う際は、たわみの絶対値の評価よりも、定期的な観測（モニタリング）から得られるたわみの増加量、変化率を評価することが、余寿命推定には有用であると推察される。実際問題、既設床版の供用開始時のたわみの初期値が記録、保存されているケースは希少であり、そもそも、たわみの絶対値から所要剛性や余寿命を評価するのは現実的でない。

次に、活荷重たわみが支間長の 1/400 となる 5mm に達したときを供用の限界状態に対応する破壊基準とし、それに至る載荷回数から疲労寿命を算出した。荷重の大きさと疲労寿命の関係図（S-N 図）を図-11 に示す。

本研究で設定した床版諸元の条件では、潜伏期から進展期に相当する損傷度 a~c については、S-N 図で予測される余寿命には大きな差はみられなかった。一方、二方向ひび割れの間隔が狭まり、格子状のひび割れが発達する d、さらにひび割れ幅の増加を想定した e では、余寿命の大幅な低下がみられた。損傷度 d および e は、点検要領では加速期~劣化期に相当しており、解析結果は損傷度区分による簡易な評価法を裏付けるものとなっている。経験的に設定された損傷度評価と擬似クラック法による定量評価法は、概ね整合していると言える。

以上より、本研究開発において提案した手法は、実橋梁の維持管理において詳細なひび割れ調査データが得られない場合においても、既往の損傷度判定手法と組み合わせることで既設床版の余寿命を大まかに推定できるものと考えられる。

5. 結論

目視調査で確認された床版表面のクラックの位置や幅の情報をもとに、数値解析上で既存損傷を再現する手法（擬似クラック法）を提案した。また、提案手法を用いて既往の実験の再現解析を実施するとともに、目視調査による損傷度評価区分をパラメータとした余寿命推定解析事例を示し、開発技術の実用化について考察を行った。本研究で得られた結論を列挙する。

- 1) 提案手法で損傷を導入したモデルを用いた解析では、初期剛性は実験に比べて大きめに算出される傾向がある。これは、擬似クラック法で過去に経験した最大応力を推定する際、観察されたひび割れの発生原因にかかわらず、一軸圧縮一引張の静的試験から得られた材料構成則を適用しているためと考えられる。

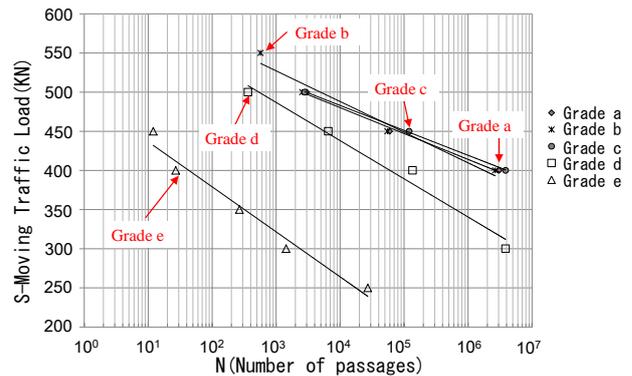


図-11 損傷度評価別の余寿命予測例

- 2) 損傷導入後230万回におよぶ繰返し荷重によるたわみの増加量は、解析で概ね精度よく算出することができた。
- 3) 既往の目視調査による損傷度評価区分に対応するモデルを用いた解析では、移動荷重を繰返し作用させた際のたわみの進展が損傷度区分によって異なることを示した。
- 4) 解析で得られたS-N図からは、損傷進展期以前に比べ、加速期~劣化期にある床版の余寿命減少が顕著であった。

本研究で提案された手法は、精度検証と適用範囲の調査のため、実橋床版のひび割れ調査データや損傷をうけた床版の疲労載荷実験データを収集し、引き続き検討を行う所存である。

謝辞：本研究は平成22年度および23年度、国土交通省・建設技術研究開発助成制度（課題名：非線形疲労応答解析に基づくコンクリート系橋梁床版の余寿命推定システム）の助成を受けて行われたものである。

参考文献

- 1) Maekawa, K., Toongoenthong, K., Gebreyouhannes, E. and Kishi, T. (2006). "Direct path-integral scheme for fatigue simulation of reinforced concrete in shear", *Journal of Advanced Concrete Technology*, JCI, 4(1), 159-177.
- 2) 岡田清, 岡村宏一, 園田恵一郎, 島田功 (1982) : 道路橋鉄筋コンクリート床版のひび割れ損傷と疲労性状, 土木学会論文報告集, 第 321 号, pp.49-61.
- 3) 国土交通省国道・防災課：橋梁定期点検要領（案），平成16年4月。