

PC 床版の輪荷重走行試験再現解析

新日鉄住金エンジニアリング(株) 正会員 北 慎一郎
(株)コムスエンジニアリング 正会員 土屋 智史, ○米津 薫

1. 検討の目的

既設道路橋のコンクリート床版の移動繰り返し荷重による疲労損傷(環境作用による影響と複合した損傷を含む)が顕在化している。この問題に対しては、古くから輪荷重走行試験による検討¹⁾が行われており、多くの成果が報告されている。一方、近年では、非線形有限要素解析²⁾によっても高い精度で応答を評価できるようになっており、任意の境界・荷重条件に適用でき、環境作用の影響を直接考慮できる拡張性も有していることから、その重要性が高まっている。しかし、RC 床版や合成床版の繰り返し載荷に対する非線形有限要素解析の適用は多数報告されている^{3),4)}などものの、PC 床版への適用事例は少ないのが現状である。本検討では、今後の非線形解析の一層の活用を念頭に、PC 床版の輪荷重走行試験の再現解析を実施し、その適用性について確認する。

2. 解析対象とモデル化の概要

コンクリート床版の輪荷重走行試験の結果が包括的にまとめられている文献⁵⁾のデータのうち、平成8年版道路橋示方書⁶⁾に準拠した PC8-1 床版を解析対象に選定する。階段状載荷を行った実験では、図-1 のように、輪荷重 353 kN 時の 403,748 回目の載荷でたわみが急増し、押抜きせん断破壊に至ったと報告されている⁵⁾。PC8-1 床版は、2800×4500×版厚 180 mm の寸法で、有効高さは 144 (37) mm である。

解析ツールには、RC 床版や合成床版の繰り返し載荷に対して適用実績を有する、COM3D²⁾を用いる。COM3D では、コンクリートの高サイクル疲労損傷が、圧縮、引張、ひび割れ面せん断伝達の各基本構成則レベルで考慮されている。

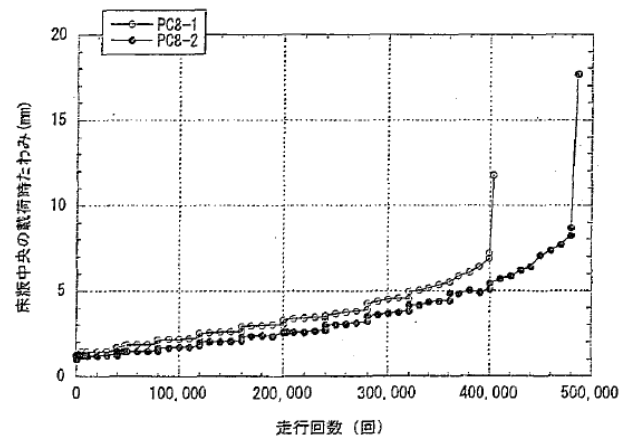
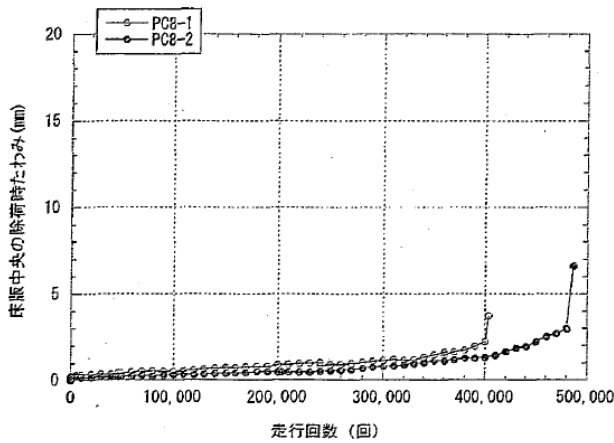
載荷方法や境界条件は実験時を再現して、モデル化を行う。解析要素モデルの概要図を図-2 に示す。モデル化に際しては、対称性を考慮した 1/2 モデルとし、X 方向：橋軸方向(輪荷重走行方向)、Y 方向：橋軸直角方向、Z 方向：鉛直方向として定義している。対称面の Y 方向節点変位を拘束し、長辺の単純支持辺はピン・ローラー支持としてモデル化する。実験では、短辺は弾性支持されているが、ここでは長辺方向に十分長い領域をモデル化範囲とすることで代用する。載荷装置の鋼棒や鋼板、浮き上がり防止装置等はモデル化しない。床版は 8 節点ソリッド要素にてモデル化し、鉛直方向は下から 30.0, 40.0, 40.0, 40.0, 30.0 mm の 5 層に分割する。鉄筋配置部には RC 要素を配置して Tension Stiffening を考慮し、そうでない領域には無筋コンクリート要素を適用する。引張軟化係数²⁾として、前者には 0.4、後者には要素長と破壊エネルギーに応じた値を用いる。プレストレス鋼材は、図-2 の濃色部の要素鋼材比(橋軸直交方向)として平均的に考慮し、初期プレストレインを付与することで簡易的にモデル化する。

材料特性は既往の報告⁵⁾より、試験値を参照して、入力値を設定する。ただし、コンクリート引張強度は乾燥等の影響を勘案して、材料試験値を低減した値を入力する。ここでは、コンクリートの圧縮強度 42.9 N/mm²、引張強度 2.196 N/mm²、弾性係数 26.7 kN/mm²、ポアソン比 0.166 とした。

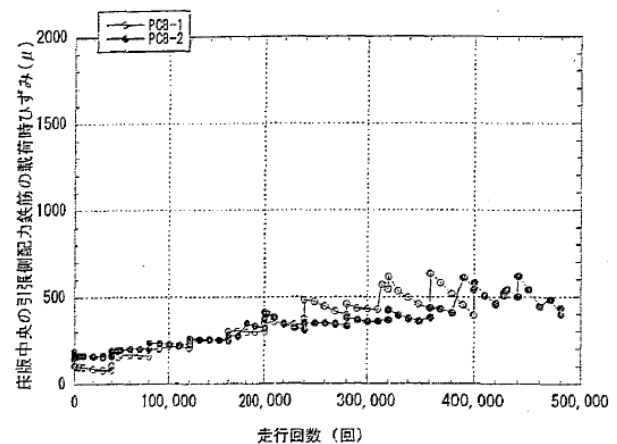
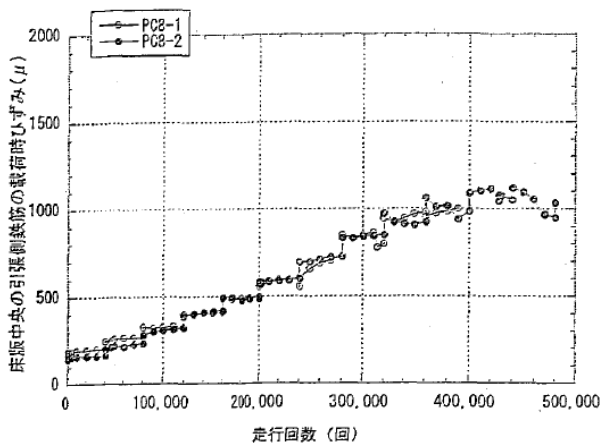
荷重条件は、土研方式の階段状荷重漸増載荷試験方法を模擬する。すなわち、157 kN を初期荷重として、走行回数 4 万回(2 万往復)ごとに 19.6 kN ずつ荷重を増加させ、床版が破壊に至るか、または 392 kN(走行回数 52 万回)まで繰り返し走行を行うものである。ここでは、自重を考慮せず、移動荷重による荷重制御にて疲労繰り返し載荷を行う。なお、対数積分法⁷⁾を導入して計算時間の軽減を図るとともに、載荷速度が実験とおおよそ一致するように時間間隔を設定する。

キーワード PC 床版、三次元有限要素非線形解析、疲労輪荷重繰り返し載荷

連絡先 〒113-0023 東京都文京区向丘 1-1-17 (株)コムスエンジニアリング TEL : 03-3868-0580 E-mail : satoshi@comse.co.jp



(1) 走行回数と除荷時たわみおよび載荷時たわみの関係



(2) 走行回数と主鉄筋および配力筋ひずみの関係

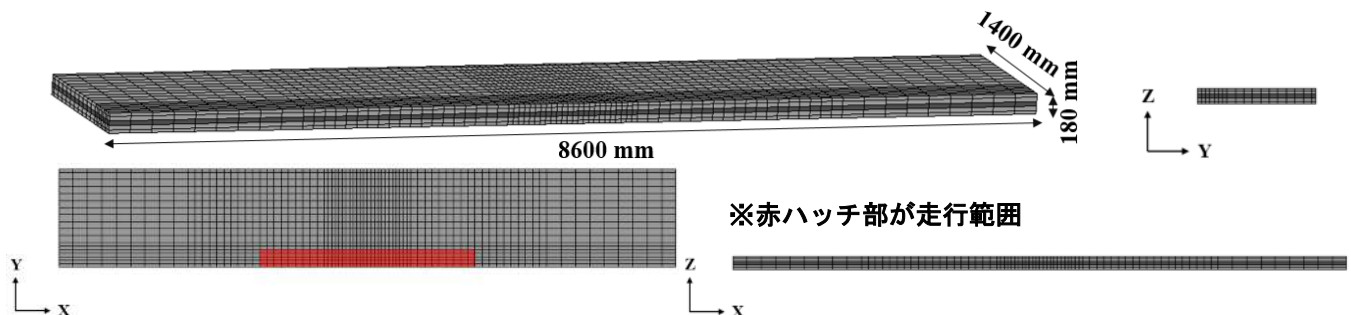
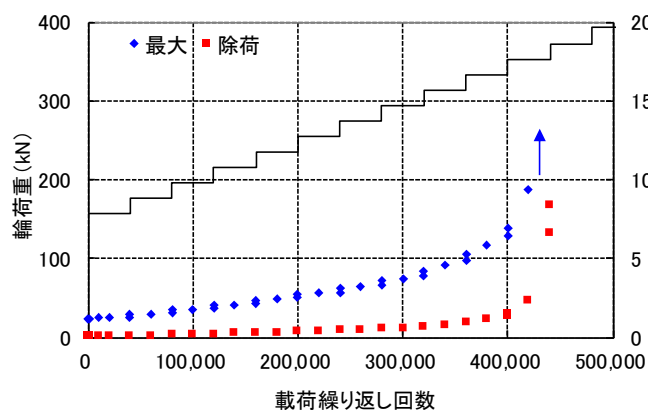
図-1 実験結果の概要⁵⁾

図-2 三次元有限要素モデル

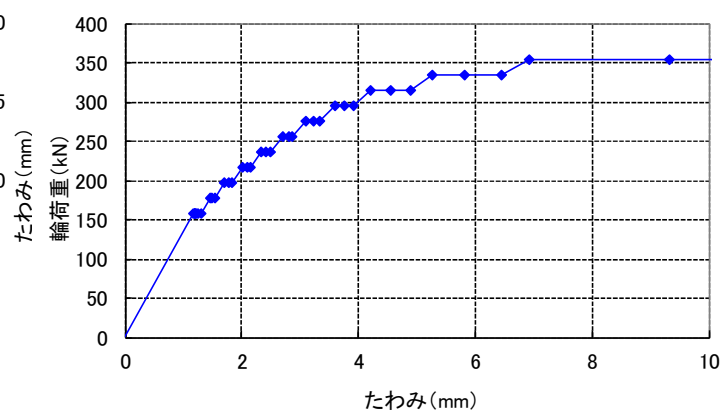
3. 解析結果

代表的な解析結果の概要を図-3 に示す。(1), (2)のスパン中央でのたわみの進展では、解析においても、輪荷重 353 kN の前後からたわみが徐々に増大し始めていることが分かる。図-1(1)の実験結果と比較して、変形が過大となる 400,000 回程度までの走行回数において、概ね妥当な精度で再現できていると考えている。また、(3)では 400,000 回の走行回数までの範囲において、床版下面中央の鉄筋ひずみの最大値を示している。解析でも鉄筋は降伏しておらず、完全には一致していないものの、定性的な傾向としては図-1(2)の実験と同様な結果が得られている。

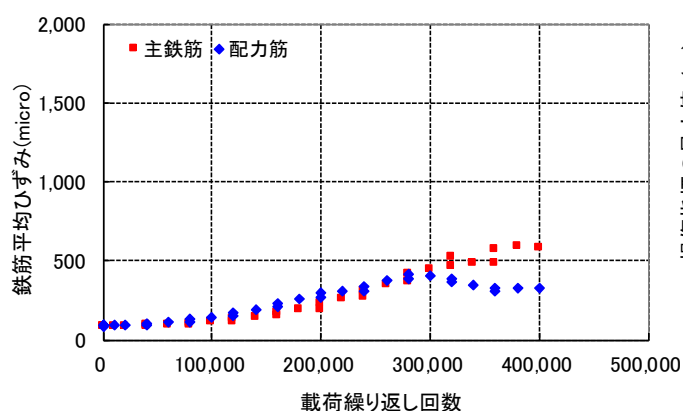
代表的な解析 STEP における変形図を図-4 に示す。ここでは、両端の要素を除外し、変形量を 50 倍に拡大して表示している。繰り返し載荷に伴い、変形が少しずつ大きくなってきている様子が確認でき、床版中央の対称面ではせん断変形が徐々に卓越してくる。図-5 には、図-4 と同じように、代表的な解析 STEP におけるコンクリートのひび割れ損傷を表す偏差ひずみ第二不変量 $\sqrt{J_2}$ (平均化半径を 150 mm とした非局所値)⁸⁾ のコンター図を示した。床版の内部で、非曲げ型のひずみ(ひび割れ)損傷が蓄積していく様子が確認できる。



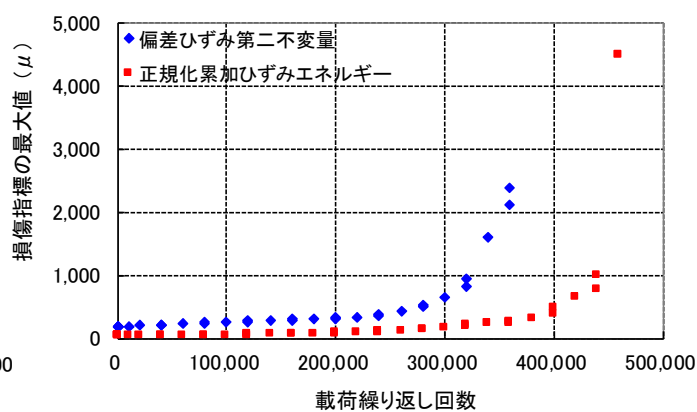
(1) たわみの進展図



(2) 輪荷重—たわみの最大値関係

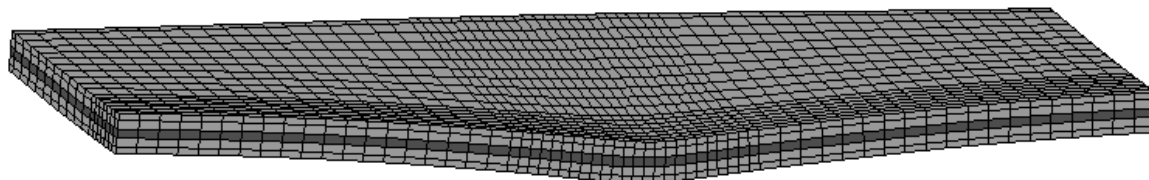


(3) 鉄筋ひずみ最大値の進展図

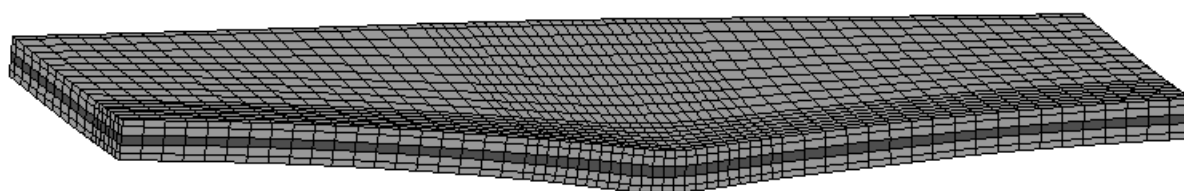


(4) 損傷指標 (非局所値) の最大値の進展図

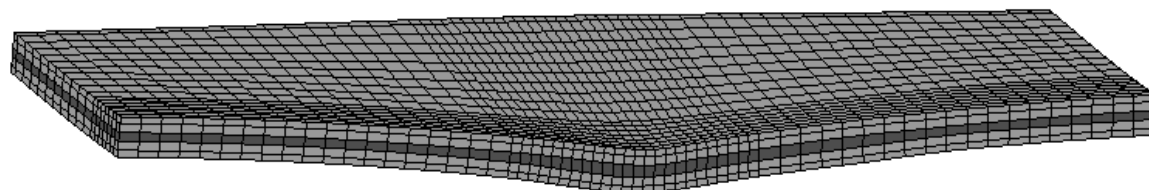
図-3 PC8-1 床版の解析結果グラフ



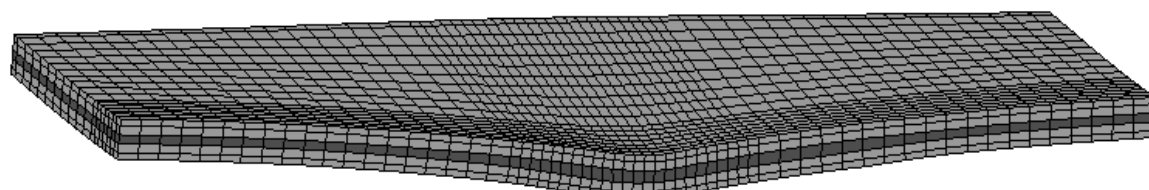
(1) 314kN-320,001 回載荷時



(2) 314kN-340,000 回載荷時



(3) 314kN-360,000 回載荷時



(4) 333kN-360,001 回載荷時

図-4 変形図 (変形を 50 倍に拡大)

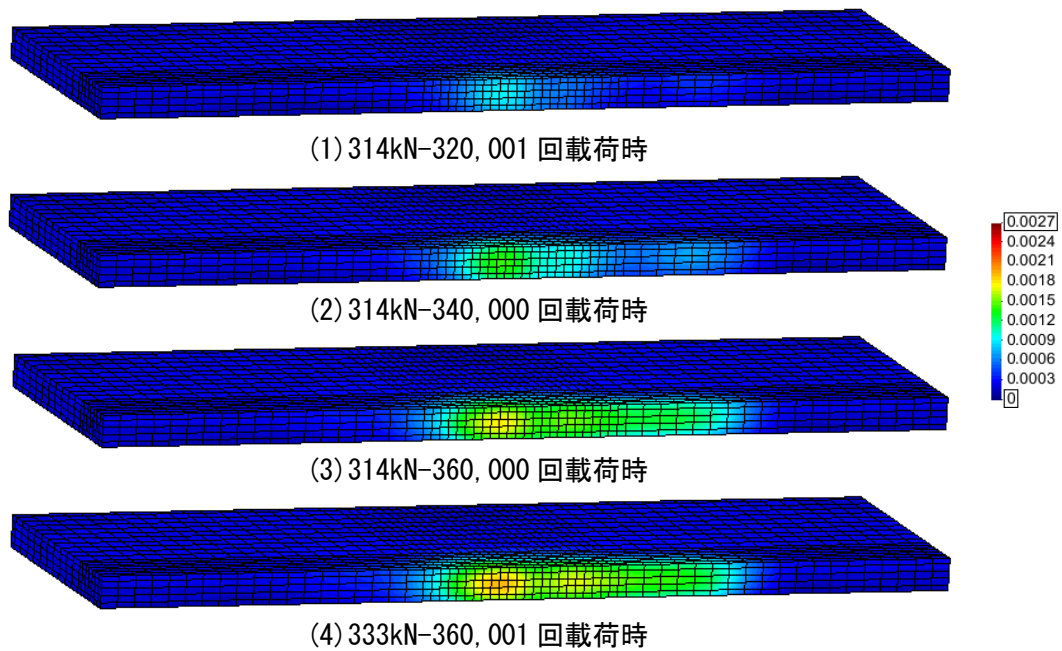


図-5 偏差ひずみ第二不変量(非局所値)のコンター図

図-3(1)と(4)より、たわみの最大値の推移は、コンクリート標準示方書〔設計編〕⁸⁾に記載されている偏差ひずみの第二不変量 $\sqrt{J_2}$ (非局所値)の最大値の推移と相関がありそうである。これは、繰返し載荷および荷重の漸増に伴うたわみの増大はひび割れ損傷の蓄積の結果であることを意味しており、PC床版においても、この指標により解析では損傷と破壊の判定を行うことができる可能性がある。なお、要素分割等の影響を受けるため、平均化処理した非局所値を用いることが望ましい。参考までに、平均化半径を150 mmとした場合、1000 μ 到達時の載荷繰返し回数は 3.22×10^5 回、同1500 μ 到達時は載荷繰返し回数 3.37×10^5 回であった。本例の場合、安全側に評価する傾向にあり、今後の詳細な検討を必要とするが、材料の損傷と関連付けられた指標を用いることで輪荷重走行試験の挙動を評価できる見込みがあると思われる。

4. まとめ

既往⁵⁾のPC床版を対象に輪荷重走行試験の非線形有限要素解析を実施し、その再現性を確認したところ、これまでに実施済みのRC床版や合成床版と同様に、概ね妥当な精度で再現することができた。あわせて、解析的な損傷評価に関して、床版の繰返し載荷にともなうたわみの進展は、コンクリートのひび割れ損傷の進展と相関があることを示した。

参考文献

- 1) 松井繁之：道路橋床版 設計・施工と維持管理，森北出版，2007。
- 2) Maekawa, K., Pimanmas, A. and Okamura, H.: Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, SPON Press, 2003.
- 3) Maekawa, K., Gebreyouhannes, E., Mishima, T. and An, X.: Three-dimensional fatigue simulation of RC slabs under traveling wheel-type loads, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.4, No.3, pp.445-457, 2006.
- 4) 藤山知加子，商峰，櫻井信彰，前川宏一：直接経路積分法に基づく鋼コンクリート合成床版の疲労寿命推定と損傷モード，土木学会論文集 A, Vol.66, No.1, pp.106-116, 2010.
- 5) 国土交通省 国土技術政策総合研究所：道路橋床版の疲労耐久性に関する試験，国土技術政策総合研究所資料第28号，2002年3月
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，1996。
- 7) Maekawa, K., Toongoenthong, K., Gebreyouhannes, E. and Kishi, T.: Direct path-integral scheme for fatigue simulation of reinforced concrete in shear, Journal of Advanced Concrete Technology, 4(1), pp.159-177, 2006.
- 8) 2012年制定 コンクリート標準示方書〔設計編〕，2013