

論文 数値解析によるプレキャスト PC 床版の疲労耐久性評価方法の検討

楠畑 菜津子*1・藤山 知加子*2

要旨：本研究では、プレキャスト PC 床版の輪荷重走行試験の再現解析を行った。適切な物性値や力学特性を考慮することで、実験と同等のたわみの挙動や床版内でのひずみ分布を再現することが出来た。またひずみ指標と床版の曲率の挙動を用いて損傷判定を行い、床版内部の損傷に着目した S-N 曲線を提案した。既往の PC 床版の疲労試験の結果を概ね安全側に判定することができた。

キーワード：プレキャスト PC 床版, 数値解析, S-N 曲線

1. はじめに

近年多くの道路橋床版が、供用年数の経過や大型交通量の増加によって劣化しており、床版取り換えを行っている。床版には鉄筋コンクリート床版（以下、RC 床版と記す）が最も一般的に使われてきたが、RC 床版よりも耐久性が優れているプレキャストプレストレストコンクリート床版（以下、プレキャスト PC 床版と記す）への取り換え工事が増加している。RC 床版の疲労耐久性については、輪荷重走行試験や S-N 曲線、数値解析を用いた検討が数多く行われてきた。PC 床版では、RC 床版と同様に梁状化して押し抜きせん断破壊に至ることに着目して S-N 曲線で評価する松井ら¹⁾や安松ら²⁾の評価方法や、走行回数に伴うせん断力の低下に着目した竹田ら³⁾の評価方法が報告されている。しかし未だ PC 床版の疲労実験の例は RC 床版と比較して少なく、また数値解析によって検討した例はない。

そこで本研究では、数値解析を用いてのプレキャスト PC 床版の輪荷重走行試験の再現解析を行い、PC 床版の損傷分析を行い S-N 曲線を提案する。

2. 再現解析

2.1 解析モデル概要

本解析モデルは、3次元非線形要素解析ソフト「COM3D」⁴⁾を用いた。本研究での再現解析は(株)高速道路総合技術研究所で行われた輪荷重走行試験を対象にした⁵⁾。表-1に本研究で行った3種類の解析モデルの諸元とモデル名を示す。モデル名には載荷荷重の最大荷重を記している。また図-2に解析モデルの全体図を示す。解析モデルはすべてソリッド要素で作成した。配力筋・主鉄筋高さにはソリッド要素に鉄筋の特性値と鉄筋比を設定し、分散的に表現した RC 要素とした

表-1 対象試験体諸元

モデル名	床版寸法	床版支間
490kN ケース	2800×4300×220(mm)	2.5(m)
450kN ケース	2800×4500×220(mm)	2.5(m)
400kN ケース	2800×4500×220(mm)	2.5(m)

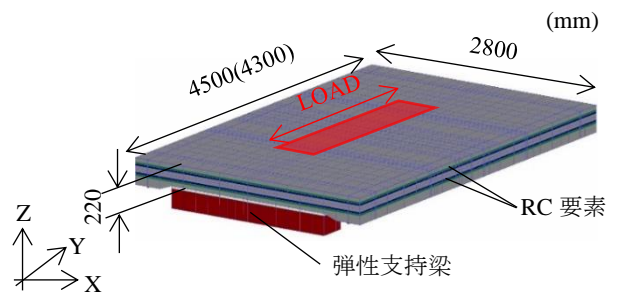


図-1 解析モデル全体図

(図-1の青色と緑色の部分)。また PC 鋼材は LINE 要素でモデル化し、プレストレスは LINE 要素に初期ひずみを導入することで表現した。また弾性支持梁は、I 型鋼と断面 2 次モーメントが等価な矩形断面の要素で表現した。

2.2 拘束条件・載荷条件

すべての解析モデルでの拘束は、床版下面で単純支持を模擬した拘束とした。

また載荷範囲は、図-1に示すように 500×3000(mm)の部分である。所定の荷重を節点に繰り返し載荷することで移動載荷を模擬した解析とした。それぞれの解析モデルでの載荷条件を表-2に示す。すべてのモデルで載荷荷重 250kN を 10 万回行っている。これは PC 床版が 100 年相当の耐久性を有することを確認する載荷である⁶⁾。

*1 法政大学大学院 デザイン工学専攻都市環境デザイン工学専攻 (学生会員)

*2 横浜国立大学 大学院都市イノベーション研究院 准教授 (正会員)

2.3 材料特性値

現解析の対象とした試験体のコンクリートの材特性値を表-3に示す。床版コンクリートは高強度コンクリートであるため、圧縮強度 50N/mm² 以上の場合は、ひび割れ後のひび割れ面の平滑化によるせん断伝達力の低下を考慮する必要がある⁷⁾。したがって高強度コンクリートに相当するせん断伝達低減係数を設定した⁸⁾。またコンクリートの乾燥収縮による初期引張応力の低下を仮定し、表-3の材料試験によって得られたコンクリートの引張強度を70%もしくは80%とした。初期ひずみはPC鋼材のヤング係数及び、断面積、プレストレス導入量から算出しており、490kN ケースでは0.00295、450kN ケース、400kN ケースでは0.00297を設定している。

2.4 解析結果

(1) たわみ

図-2にそれぞれのケースでの走行回数—たわみを示す。490kN 荷重ケースでは、走行回数 10 万回以降で荷重変更後の急激なたわみ増加の傾向を解析でも表現出来た。また 400kN 荷重ケースにおいて解析値は、走行回数 10 万回目以降から約 1mm 程度実験値よりも小さい値であるが、走行回数 300 万回から破壊に至るよ

表-2 荷重条件

モデル名	STEP	荷重荷重	荷重回数
490kN ケース	1	250(kN)	10(万回)
	2	490(kN)	破壊するまで
450kN ケース	1	250(kN)	10(万回)
	2	400(kN)	10(万回)
	3	450(kN)	破壊するまで
400kN ケース	1	250(kN)	10(万回)
	2	400(kN)	破壊するまで

表-3 試験でのコンクリート物性値

試験体名	490kN ケース	450kN ケース	400kN ケース
項目			
ヤング係数 [kN/mm ²]	43.767	34.433	33.99
圧縮強度 [N/mm ²]	78.4	63.02	64.07
引張強度 [N/mm ²]	4.217	4.430	4.700

うな急激なたわみ増加がみられ、概ね実験を再現できた。また 450kN 荷重ケースでは荷重荷重 450kN に変更後からの解析値と実験値でのたわみの差が約 1mm 程度であったが、概ね増加傾向は解析で再現出来た。

(2) ひずみ分布

図-3に最終走行回数時での床版中央橋軸方向断面の厚さ方向のひずみを示す。ひび割れ発生相当である

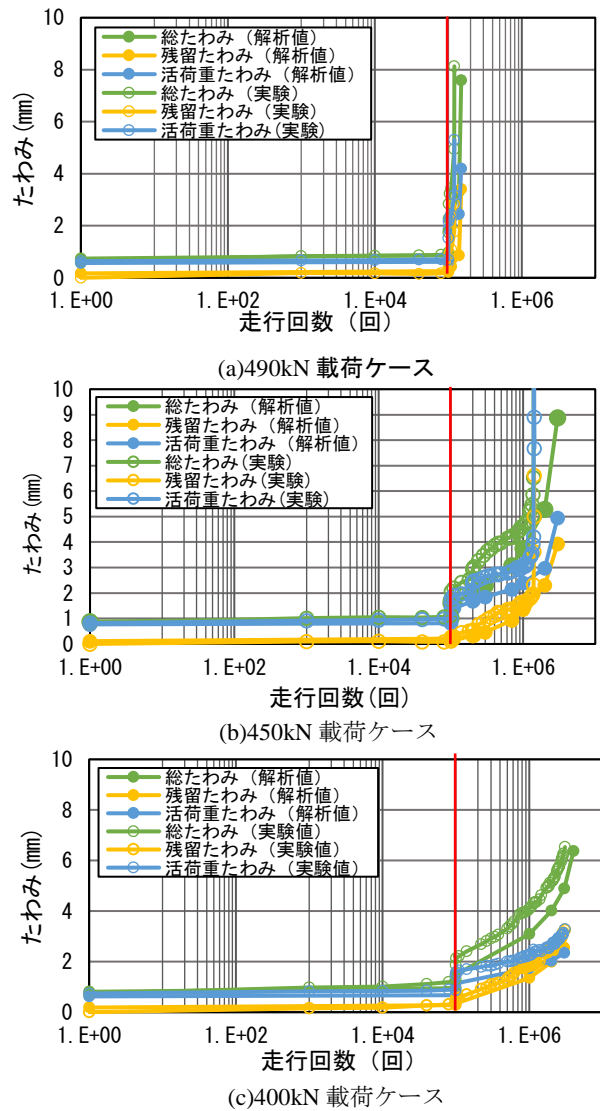


図-2 走行回数—たわみ

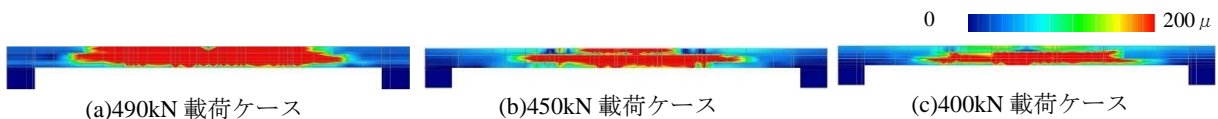


図-3 橋軸方向断面の高さ方向のひずみ (解析結果)

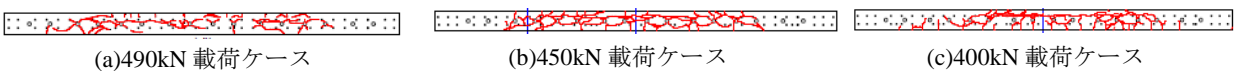


図-4 試験での橋軸方向断面のひび割れ性状⁵⁾

ひずみが、それぞれの解析モデルケースで、床版内部で PC 鋼材高さに生じていた。また試験では、床版内部で PC 鋼材を繋ぐようなひび割れが生じていた (図-4)。解析でも試験でのような PC 鋼材高さ付近でのひび割れの挙動を再現することが出来た。

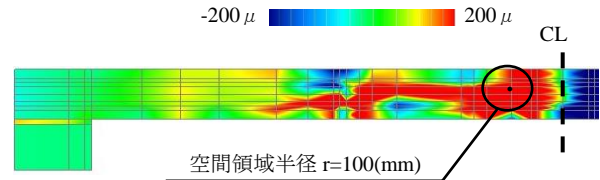


図-5 着目位置 (せん断ひずみコンター図)

3. 損傷分析方法の検討

3.1 ひずみ指標について

コンクリート構造物や部材の損傷評価として、有限要素法により求めたひずみを用いる方法について多くの究がされている^{9,10}。引張・せん断損傷を評価する指標である偏差ひずみの第二不変量 $\sqrt{J'_2}$ (式 (1))⁷を用いて、移動載荷後における床版の疲労損傷の評価を行った。また解析によって得られるひずみや応力は使用する要素分割に依存するため、式 (2)⁷を用いて定めた領域で空間平均化する。

$$\sqrt{J'_2} = \sqrt{\frac{2}{3} \left\{ \left(\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_y - \varepsilon_z}{2} \right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_z - \varepsilon_x}{2} \right)^2 \right\} + \left(\frac{\gamma_{xy}}{2} \right)^2 + \left(\frac{\gamma_{yz}}{2} \right)^2 + \left(\frac{\gamma_{zx}}{2} \right)^2} \quad (1)$$

$$\bar{D} = \frac{\int_V D \cdot w(s) dV}{\int_V w(s) dV} \quad (2)$$

3.2 ひずみ指標を用いた PC 床版のせん断損傷分析

図-5 にせん断損傷着目位置と指定した範囲を示す。空間領域半径は $r=100\text{mm}$ とした。図-6 に走行回数と偏差ひずみの第二不変量の関係、図-7 にたわみ量と偏差ひずみの第二不変量の関係を示す。490kN ケースでは 15 万回走行で $\sqrt{J'_2} = 2863\mu$ (たわみ量 7.6mm)、450kN ケースでは $\sqrt{J'_2} = 1037\mu$ (たわみ 5.3mm)、200 万回で 400kN ケースでは 400 万回で $\sqrt{J'_2} = 1036\mu$ (たわみ量 5.9mm) であり、損傷限界値である $\sqrt{J'_2} = 1000\mu$ ⁷を超え

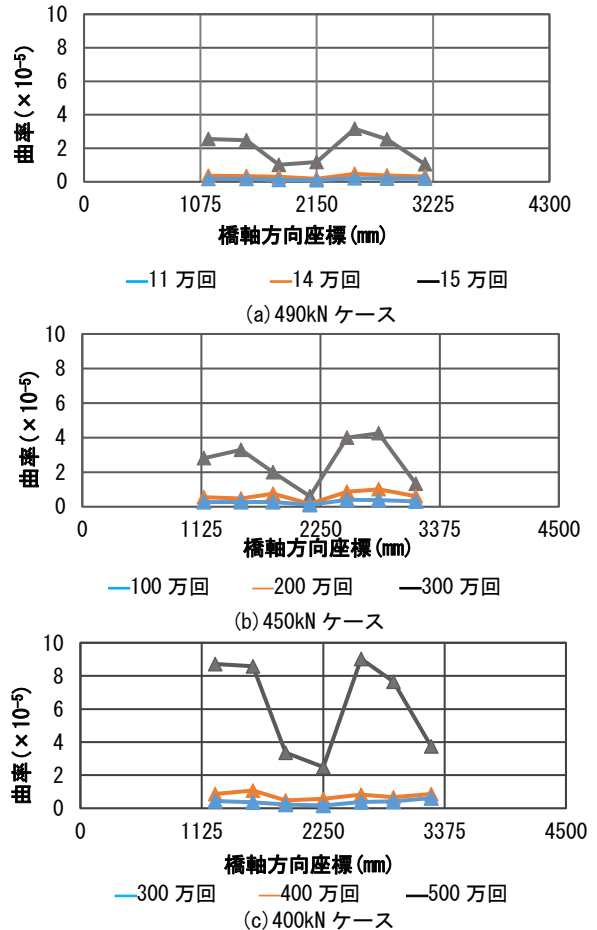


図-8 走行回数に伴う曲率変化

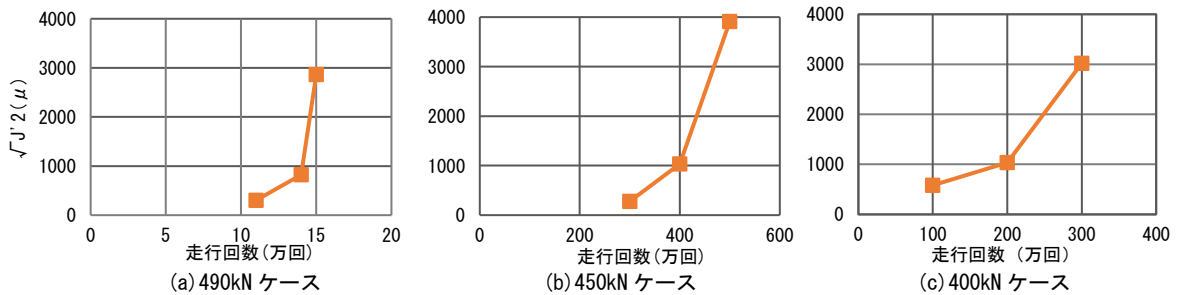


図-6 走行回数と $\sqrt{J'_2}$ の関係

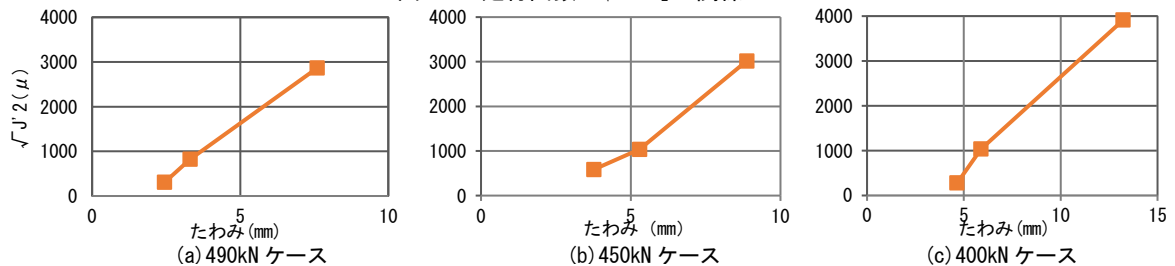


図-7 総たわみと $\sqrt{J'_2}$ の関係

た。また線形補完により $\sqrt{J'_2} = 1000\mu$ を超えたときの走行回数を算出すると、490kN ケースでは約 14 万回、450kN ケースでは 191.7 万回、400kN ケースでは約 346 万回となった。試験時での破壊判定走行回数は 490kN ケースでは約 12 万回、450kN ケースでは 141.8 万回、400kN ケースでは約 338 万回であったため、せん断損傷に着目した $\sqrt{J'_2}$ を用いた際の破壊回数は実験での破壊回数と概ね一致した。

3.3 床版の曲率

床版下面のたわみから、走行回数ごとの曲率を算出し、走行回数に伴う床版の変形挙動を確認した。曲率は床版の要素分割の関係で、床版中央橋軸方向での床版下面 300~350mm 間隔で算出している。図-8 に走行回数ごとの曲率を示す。曲率の変化が大きいのは走行回数が、490kN ケースでは 14~15 万回、450kN ケースでは 200~300 万回、400kN ケースでは 400~500 万回であった。またひずみ指標で限界値 1000 μ を達した走行回数は、490kN ケースで約 14 万回、450kN ケースで約 191.7 万回、400kN ケースで約 346 万回であった。ひずみ指標では、床版内部での損傷を見ているため、最終的

に曲率が急激に大きくなって破壊した走行回数よりも前に限界値 1000 μ に達しているのは妥当であると考えられる。また破壊形態として急激に曲率が増加していることから、押し抜きせん断破壊と考えられる。

4. S-N 曲線作成

4.1 パラメトリックスタディ

(1) 解析概要

S-N 曲線を作成するためにパラメトリックスタディを行う。解析モデルは図-1 の解析モデル (2800×4500×220mm) を使用する。またコンクリートの材料特性値は表-3 の 400kN ケースを設定する。また 2 章と同様にせん断伝達低減係数・引張強度を考慮し、引張強度は

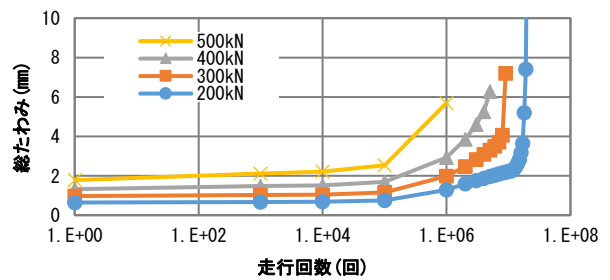


図-9 走行回数—たわみ

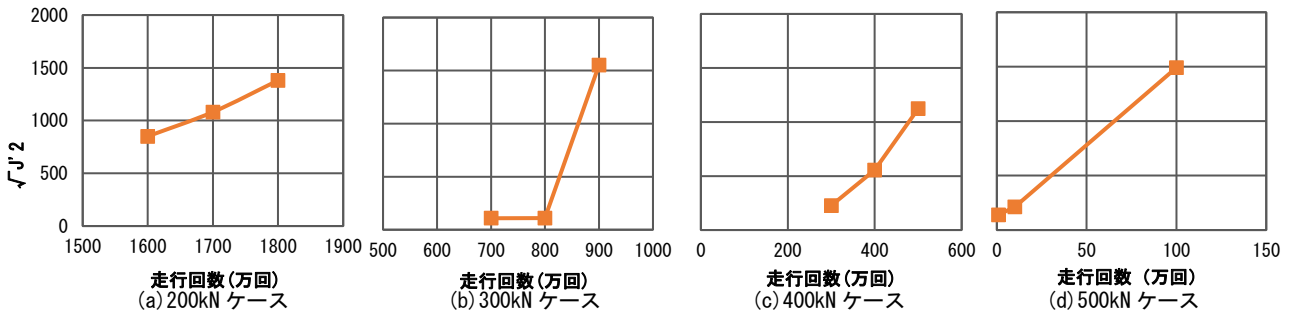


図-10 走行回数と $\sqrt{J'_2}$ の関係

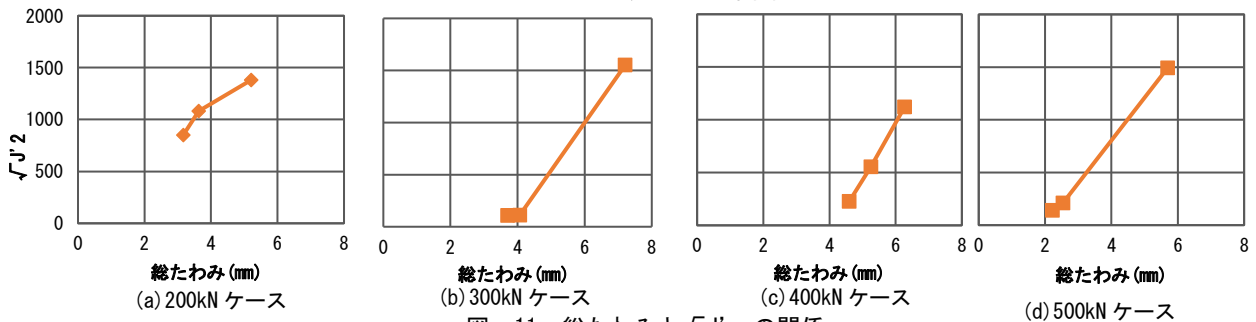


図-11 総たわみと $\sqrt{J'_2}$ の関係

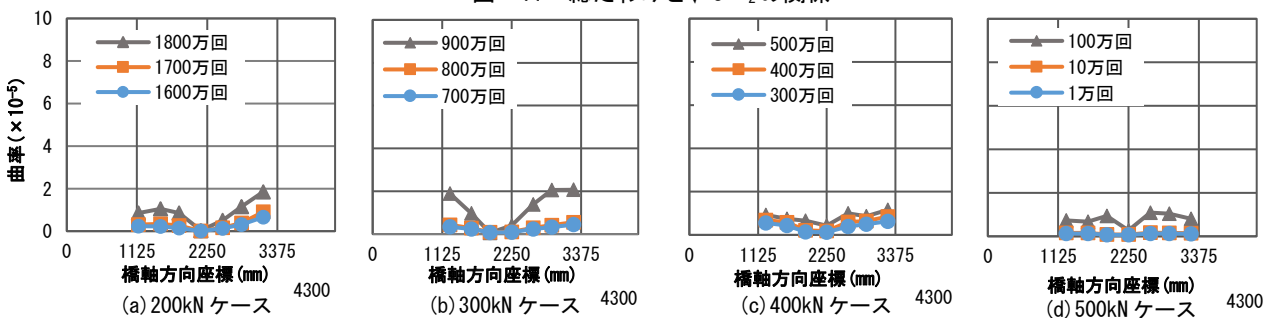


図-12 走行回数に伴う曲率変化

実験値の70%とした。載荷条件は図-1に示す載荷範囲(500×3000mm)で載荷荷重200kN・300kN・400kN・500kNの4パターンの一定荷重で移動載荷を行う。

(2) 損傷分析

3章と同様に空間平均化した偏差ひずみの第二不変量を用いて、損傷分析を行った。着目位置は3章と同様の点であり、図-5に示す。図-9にそれぞれのパターンの総たわみを示す。また図-10に走行回数と偏差ひずみの第二不変量の関係、図-11にたわみ量と偏差ひずみの第二不変量の関係を示す。線形補完によって、損傷限界値である $\sqrt{J_2} = 1000(\mu)$ での走行回数は、200kNケースで1664.8万回、300kNで864.7万回、400kNケースで478.3万回、500kNで65.4万回であった。また限界値1000(μ)のときの総たわみは、200kNケースで3.5(mm)、300kNケースで6.0(mm)、400kNケースで6.0(mm)、500kNケースで4.5(mm)であった。200kNケースでは、たわみが他のケースよりも小さい時に、内部での損傷が生じていることから、200kNケースでの破壊挙動が他のケースと異なると思われる。また図-12に走行回数ごとの曲率の変化を示す。3章での再現解析では、たわみが急増すると共に曲率が急激に大

きくなっていたが、一定荷重ではたわみが増加しても、再現解析のときのような曲率の変化は見られなかった。

4.2 S-N 曲線 作成

それぞれの解析モデルの押し抜きせん断耐荷力は静的載荷した際の最大耐荷力とした(表-4)。1章の再現解析の結果と4章の一定荷重でのひずみ指標によって求めた疲労寿命を、押し抜きせん断耐荷力で正規化したものを図-13に示す。また再現解析のケースでは階段載荷であるため、それぞれの最大輪荷重のマイナー12.76乗則で換算した走行回数を用いた。さらに図中に松井らによるRC床版のS-N曲線¹¹⁾(式3)と解析結果をひずみ指標より疲労寿命を求めた結果を近似した解析近似曲線式(4)を示す。

$$\text{Log}(P/P_{sx}) = -0.07835 \text{log}N + \text{log}1.52 \quad (3)$$

$$\text{Log}(P/P_{sx}) = -0.1131 \text{log}N + \text{log}2.00 \quad (4)$$

松井らのS-N曲線よりも解析近似曲線のほうが、傾

表-4 数値解析より求めた押し抜きせん断耐荷力

400kN ケース	490kN ケース	450kN ケース	一定荷重 ケース
984 (kN)	1,044 (kN)	920 (kN)	987 (kN)

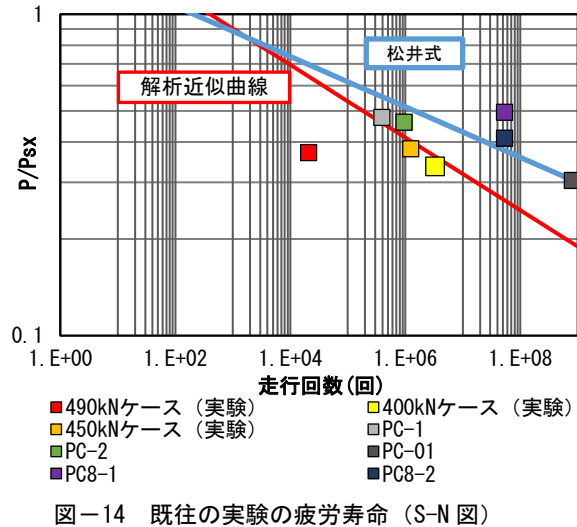
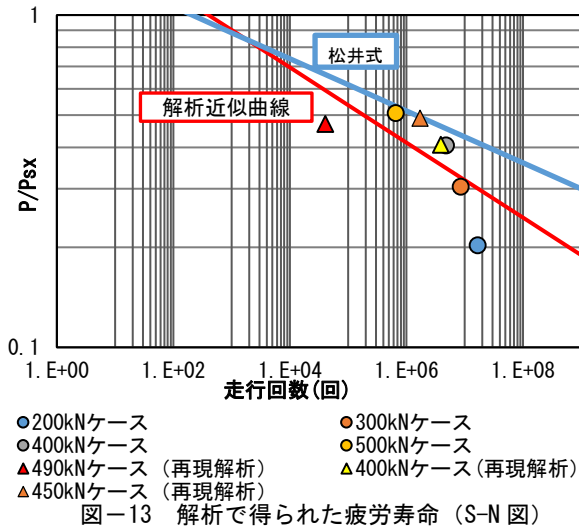


表-5 既往の疲労実験のまとめ

試験体名	供試体寸法 (m)	載荷方法	破壊回数 (回)	圧縮強度 (N/mm ²)	P _{sx} (kN)
PC-1 ¹⁾	1.48 × 1.00 × 0.600	輪荷重 19.6kN 破壊まで	391,486	44.4	44
PC-2 ¹⁾			950,526	41.8	42
PC-01 ¹²⁾	4.00 × 7.00 × 0.25	160kN × 31万回, 200kN × 10万回 以降4万回ごと20kNずつ荷重増加	657,000	54.5	708
PC8-1 ¹³⁾	4.50 × 2.80 × 0.18	157kN から 4万回ごと20kNずつ荷重増加	403,748	42.9	832
PC8-2 ¹³⁾			486,253	54.5	817
490kN ケース ⁵⁾	表1, 表2 参考		120,900	78.4	1319
450kN ケース ⁵⁾			1,418,000	64.1	1188
400kN ケース ⁵⁾			3,376,000	63.0	1179

きが大きくなる結果となった。松井らの S-N 曲線と異なり、今回求めた解析近似式は床版全体が破壊する前の内部損傷に着目したものである。輪荷重が低荷重の場合、走行回数の増加とともに床版が破壊する前に、内部損傷が限界状態に達したことが原因だと考えられる。

また既往の実験^{1,2,12,13)}の走行回数と押し抜きせん断耐荷力で正規化した結果をプロットし、解析近似式と比較する(図-14)。またこの場合での押し抜きせん断耐荷力は、安松ら²⁾による PC 床版の押し抜きせん断耐荷力推定式である式(5)を用いて算出した。

$$P_{sx} = 2B(\tau_{max} \cdot X_m \cdot \alpha_m + \sigma_{tmax} \cdot C_m) \quad (5)$$

既往の研究の供試体諸元^{2, 8-10)}と実験での破壊回数(換算前)、式(5)より算出した押し抜きせん断耐荷力を表 5 に示す。また試験体 PC-1, PC-2, PC-01, PC8-1, PC8-2 は、輪荷重 200kN・マイナー12.76 乗則で換算した。それ以外は、輪荷重の最大荷重でマイナー12.76 乗則で換算している。既往の実験では概ね、解析近似曲線よりも安全側に位置する結果となった。490kN ケースのみ、輪荷重変更後に急激なたわみ増加が見られ、他の試験体のケースと異なる挙動を示し、これは実験でも報告されている⁵⁾。

以上より、本研究において数値解析を用いてひずみ指標より床版内部の損傷状態を基準として提案した S-N 曲線は、概ね評価が可能であることを示した。

5. まとめ

本研究において、得られた結果を以下に示す。

- 1) プレキャスト PC 床版の輪荷重走行試験は、使用材料の力学特性を考慮してせん断伝達低減係数や引張強度を試験値の 70~80%に設定することで再現可能であることが分かった。
- 2) 平均化した偏差ひずみの第二不変量を用いて静的載荷時のせん断損傷に着目して評価を行った場合、床版の曲率変化からも、床版の内部での損傷の評価が可能であることが示唆された。
- 3) 平均化した偏差ひずみの第二不変量を用いた損傷分析から求めた疲労寿命から、S-N 曲線を作成した。内部損傷に着目して作成した S-N 曲線は、概ね既往の実験結果を安全側に評価する結果となった。検討例が少ないことや用いるマイナー則や P_{sx} の算出式の違いによっては結果が異なることなどさらなる検討が必要である。

謝辞

本研究を行うにあたり、(株)高速技術研究所の後藤俊吾氏、柴崎晃氏に貴重な助言を頂いた。ここに感謝の意を

表する。

参考文献

- 1) 東山浩士, 松井繁之: 橋軸方向にプレストレスしたコンクリート床版の走行荷重に対する疲労耐久性に関する研究, 土木学会論文集, 1998. 10
- 2) 安松敏雄, 長谷俊彦, 篠原修二, 長瀬嘉理: 交通荷重実態を考慮した鋼橋床版の疲労設計に関する検討, 第一回鋼橋床版シンポジウム講演論文集, 77-82, 1998
- 3) 竹田京子, 佐藤靖彦: 輪荷重走行試験における PC 床版の疲労寿命に関する検討, プレストレストコンクリート工学会第 27 回シンポジウム論文集, 173-176, 2018. 11
- 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, 106-116, 2010. 3
- 5) 後藤俊吾, 長谷俊彦, 原田拓也, 松本政徳, 勝呂翔平: プレキャスト PC 床版の輪荷重走行試験による押し抜きせん断破壊状況, 令和元年度土木学会全国大会第 74 回年次学術講演会, I-351, 2019
- 6) 長尾千瑛, 広瀬剛: プレキャスト PC 床版継手の疲労耐久性照査試験, プレストレストコンクリート工学会第 26 回シンポジウム論文集, 189-192, 2017. 10
- 7) 土木学会: 2017 年制定 コンクリート標準示方書設計編, 2017
- 8) 土屋智史, 三島徹也, 前川宏一: 高強度構成材料を用いた RC 梁部材のせん断破壊と数値性能評価, 土木学会論文集, No. 697, V-54, 65-84, 2002. 2
- 9) 斉藤成彦, 牧剛史, 土屋智史, 渡邊忠朋: 非線形有限要素法解析による RC はり部材の損傷評価, 土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), Vol. 67, No. 2, 166-180, 2011
- 10) 米津薫, 藤山知加子, 土屋智史, 牧剛史, 斉藤成彦, 渡邊忠朋: 非線形解析に基づく各種合成部材及び接合部の損傷評価, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol. 72, No. 5, II 124-II 134, 2016
- 11) 松井繁之: 道路橋床版の長寿命化技術, 2016
- 12) 長谷俊彦, 上東泰, 安松敏雄: 長支間 PC 床版の移動輪荷重走行疲労試験による耐久性評価: コンクリート工学年次論文報告集. Vol. 21, No. 3, 1999
- 13) 川間重一, 西川和廣, 内田賢一: 一方向をプレストレスした PC 床版の疲労耐久性に関する検討. 第二回道路橋床版シンポジウム講演論文集, 2000