

輪荷重走行試験におけるPC床版の疲労寿命予測に関する検討

早稲田大学大学院 学生会員 修士(工) ○竹田 京子
早稲田大学 正会員 博士(工学) 佐藤 靖彦

Abstract : Prestressed concrete slab (PC slab) has greater durability performance than that of reinforced concrete slabs (RC slabs). However, we cannot assess such a performance quantitatively and besides a fatigue life prediction method has not been developed. In this study, authors investigated a fatigue life prediction method for PC slabs under traveling wheel-type loading test. At first, the punching shear strength equation for PC slabs is developed based on the equation for RC slabs proposed by authors. Then a new evaluation method for stepped incremental loading test is proposed. Finally, applicability of the proposed method is described through the comparison between predicted fatigue life and fatigue life observed in previous experiment.

Key words : Fatigue life prediction, PC slab, Traveling wheel-type load, Stepped incremental load

1. はじめに

RC床版の疲労破壊については古くから多くの実験や検討が行われてきた。RC床版は繰返し移動輪荷重を受けることで橋軸直角方向にひび割れが進展して梁状化し、やがて押抜きせん断破壊に至ることが知られている。さらに、道路橋床版にみられる典型的な押抜きせん断破壊は、定点繰返し載荷試験では再現できず、輪荷重走行試験で再現可能であることが知られている¹⁾。著者らは複数の研究機関で実施された輪荷重走行試験結果に基づいて検討を行い、実験データを統一的に評価可能で、なおかつ、せん断抵抗機構および破壊機構に基づいたRC床版の疲労寿命予測式を提案している³⁾。

道路橋においてPC床版は耐久性に大きな利点を持ち、近年はRC床版に替わって数多く導入されている。一方で、PC床版の疲労寿命評価法は確立しているとはいえず、その有用性の定量的評価が行われていない。そこで本論文では、過去に実施されたPC床版の輪荷重走行試験の実験結果を用いて、疲労寿命予測法について検討を行う。具体的には、まず、著者らがこれまでに開発した輪荷重走行試験におけるRC床版の疲労寿命予測式に基づき、PC床版の押抜きせん断耐力を算出する。続いて、走行回数増加に伴うせん断耐力の低下を疲労損傷の蓄積として考慮することで、輪荷重走行試験における階段状漸増載荷における疲労寿命の評価を行う。

2. 提案するPC床版の疲労寿命予測式

輪荷重走行試験におけるPC床版の破壊形式は、RC床版同様に押抜きせん断破壊であることが報告されている²⁾。そこでPC床版の押抜きせん断耐力の算出には、著者らが過去に提案しているRC床版の疲労寿命予測式³⁾⁴⁾を拡張して用いる。この疲労寿命予測式は、押抜きせん断耐力式とS-N曲線式からなる。9つの研究機関で実施された輪荷重走行試験結果を用いた検討を行って、土木学会コンクリート標準示方書(設計編)⁵⁾における棒部材のせん断耐力式(以下、土木学会式と呼ぶ)に基づく形で開発したものである。文献3)において著者らは、床版の疲労寿命予測には主鉄筋比に加えて配力鉄筋比の影響を考慮する必要があることを示した。そこで、土木学会式に対して配力鉄筋の影響を考慮する項(後述の β_{p1} および β_{p2})を新たに導入し、もっとも小さいばらつきで多数の実験データの疲労寿命を評価できるようその係数を決定した。さらに、支持条件が疲労寿命に与える影響について検討を

行い、支持条件の差異を表す項を導入した³⁾⁴⁾。

本論文において、この提案式に 2012 年版コンクリート標準示方書の棒部材のせん断耐力式と同様のプレストレスの影響を考慮する項 β_n を取り入れることで、PC 床版の押抜きせん断耐力式へと拡張する。提案式は以下のように表される。

$$V_{bc} = \alpha_e \cdot \alpha_B \cdot \beta_{p1} \cdot \beta_{p2} \cdot \beta_n \cdot \beta_d \cdot f_{vmcd} \cdot b_{w,e} \cdot d \quad (1)$$

ここで、 $\beta_n = \sqrt{1 + \sigma_{cg}/f_{vtd}}$ (ただし $\beta_n > 2$ となる場合は 2 とする)、 σ_{cg} : 断面高さの 1/2 の高さにおける平均プレストレス、 $f_{vtd} = 0.23f'_{cd}{}^{2/3}$ 、である。また、 α_e は環境条件を表す係数 (乾燥条件では 1.0, 湿潤条件では 0.69)、 α_B は支持条件を表す係数 (二辺単純・二辺弾性支持の場合には 1.0, 二辺単純・二辺自由として扱える場合には 0.64, 四辺単純支持として扱える場合には 1.5)、 β_{p1} は主鉄筋の影響、 β_{p2} は配力筋の影響を表す項であり、次式により表される。

$$\beta_{p1} = (100p_1)^{\{\frac{1}{3} + 0.5(100p_2)\}} \quad (2)$$

$$\beta_{p2} = 1 + 0.125 \frac{p_2}{p_1} \quad (3)$$

ここで、 p_1 : 主鉄筋比、 p_2 : 配力鉄筋比、 $\beta_d = \sqrt[4]{1/d}$ (ただし $\beta_d > 1.5$ となる場合は 1.5 とする)、 d : 主鉄筋の有効高さ、 $f_{vmcd} = 0.32\sqrt[3]{f'_{cd}}$ 、 f'_{cd} : コンクリート圧縮強度、 $b_{w,e}$ は腹部の幅であり、松井¹⁾による梁幅の予測式により求める。

$$b_{w,e} = b + d_d \quad (4)$$

ここで、 b : 載荷板の橋軸方向の辺長、 d_d : 配力筋の有効高さ、である。

また、疲労寿命は次の S-N 曲線式により得る。

$$S = \frac{P}{2V_{bc}} = 1 - K \log N \quad (5)$$

ここで、乾燥条件の場合 $K=0.057$ 、湿潤条件の場合 $K=0.061$ 、 P : 輪荷重、 N : 繰返し回数、である。

なお、2007 年版コンクリート標準示方書においては、プレストレスの影響を、 $\beta_n = \sqrt{1 + 2M_0/M_{ud}}$ (M_0 : 設計曲げモーメントに対する引張縁において軸方向力によって発生する応力を打ち消すのに必要な曲げモーメント、 M_{ud} : 軸方向力を考慮しない純曲げ耐力) により考慮することになっているが、本論文の範囲においては 2012 年版および 2007 年版で、ほぼ同じ耐力となることを確認している。

PC 床版の疲労寿命予測式の検討には、国土技術政策総合研究所による PC 床版 2 体の輪荷重走行試験の実験結果²⁾を用いた (供試体番号 PC8-1, PC8-2)。対象の PC 床版には、橋軸直角方向に 242kN/1 本の PC 鋼材が 250mm 間隔で配置されている。断面計算において、破壊時に想定される中立軸から約 60mm 下方に PC 鋼材が位置していることから、PC 鋼材は引張材として十分寄与していると考えられる。そこで本論文においては、引張主鉄筋の断面積 A_s に加えて PC 鋼材の断面積 A_p を主鉄筋比に考慮することとした。実際には PC 鋼材の断面積 A_p に、引張主鉄筋の有効高さ d に対する PC 鋼材の有効高さ d_p の比を乗じることで、引張主鉄筋と PC 鋼材の有効高さの差異を考慮することとした。

提案式 (式(1)-(3)) と 2012 年版・2007 年版コンクリート標準示方書におけるそれぞれの β_n を用いて算出した PC 床版の押抜きせん断耐力を表-1 に示す。また参考のため、プレストレスの影響 β_n を考

表-1 PC 床版のせん断耐力の算出値

供試体番号	提案式 V_{bc}		β_n を考慮しない 場合の V_{bc}	土木学会における 棒部材のせん断耐力式	
	2012年版	2007年版		2012年版	2007年版
PC8-1	181	182	106	100	101
PC8-2	184	185	111	102	102

(kN)

慮しない場合の算出値, および β_n を考慮した土木学会の棒部材のせん断耐力式による算出値を合わせて示す。提案式はプレストレスの影響を考慮しない場合よりも約 1.7 倍の押抜きせん断耐力となった。

3. 階段状漸増载荷を受けるPC床版の疲労寿命評価

検討に用いた PC 床版では, 段階的に輪荷重を上げていく階段状漸増载荷試験が採用されており, S-N 図などを用いての疲労耐久性評価を行うことができない。そこで本章では, まず階段状漸増载荷を受ける場合の疲労寿命の評価法を決定し, その手法を用いて実験結果との疲労寿命の比較を行う。

3. 1 提案評価法の基本コンセプト

輪荷重走行試験では, 経済的・時間的制約から, 段階的に輪荷重を上げていく階段状漸増载荷試験が広く用いられている。著者らは, 将来的にランダムな交通荷重を受ける道路橋実床版の評価を行うことを念頭に, 階段状漸増载荷の評価法を開発した⁴⁾。まずマイナー則を用いた評価について検討を行い, その結果, 線形和では RC 部材の疲労損傷を適切な評価は到底できず, 非線形性の考慮が不可欠であると考えた。輪荷重走行試験において, 繰返し回数の増加に伴って床版のせん断耐力は非線形的に低下すると考えられる。これはせん断抵抗機構であるアーチ機構を形成する圧縮

ストラットにおいて, コンクリートの圧縮強度が疲労損傷によって低下すると考えられるためである。疲労損傷が進行し, せん断耐力が与えられる輪荷重を下回ったときに起こるせん断破壊が疲労破壊であると解釈できる。著者らは文献 4)において, これを輪荷重走行試験における疲労破壊と定義した。一般に, 繰返し载荷下における部材剛性, すなわち疲労損傷の程度は, 初期段階に著しく進行し (図-1における Stage I), ほぼ損傷しない領域を経たのち (Stage II), 破壊直前に再び急激に損傷が進行する (Stage III)。この損傷進行過程を図-1に破線による3直線で示す。本計算においては簡便性を重視し, 図-1に実線で示すように, せん断耐力の低下を2直線によって表現した。せん断耐力低下線を表す2直線が交わる点の繰返し回数を, 式(5)によって算出される疲労寿命の約95%に設定している。その点でのせん断耐力は, $S=0.9$ の場合には95%まで低下し, $S=0.3$ の場合には低下しないものとして, その間のせん断耐力の低下割合を直線補完するように S に応じた低下線を用意した。

階段状漸増载荷を評価する際の先行荷重による疲労損傷の考え方を図-2に示す。1段階目において P_1 なる輪荷重が N_1 回だけ与えられ, 輪荷重が P_2 まで引き上げられた際には, 低下線に基づきせん断耐力が V_0 から V_0' まで低下する。2段階目の载荷ではこの V_0' を初期のせん断耐力として, 新たに低下線を与えると, 3段階目の初期せん断耐力が V_0'' となる。すなわち, それぞれの段階における初期せん断耐力を低減することで先行荷重による疲労損傷を考慮する。

3. 2 提案評価法に基づくPC床版の疲労寿命評価

提案する評価法を用いてPC床版の疲労寿命を算出し, 実験における疲労寿命との比較を行う。図-3に階段状漸増载荷パターンと, 実験破壊点および算出破壊点を示す。また, 図-4に疲労寿命の $\log N$ の実験値と算出値の比較を示す。参考のため, 図-3および図-4には同研究所で行われたRC床版の実験値²⁾および算出値を合わせて示す。図-3の実験破壊点について, RC床版はPC床版より早く破壊する場

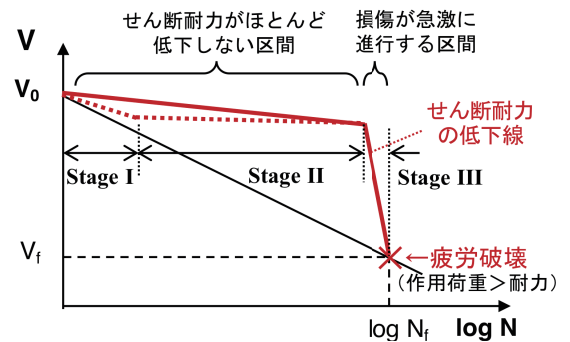


図-1 せん断耐力低下線と疲労破壊の定義

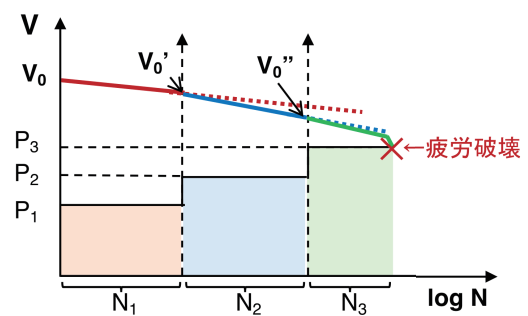


図-2 階段状漸増载荷試験におけるせん断耐力の低下

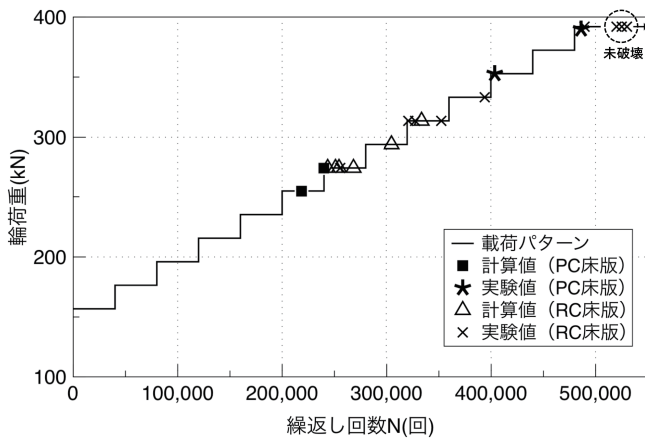


図-3 実験破壊点と算出破壊点

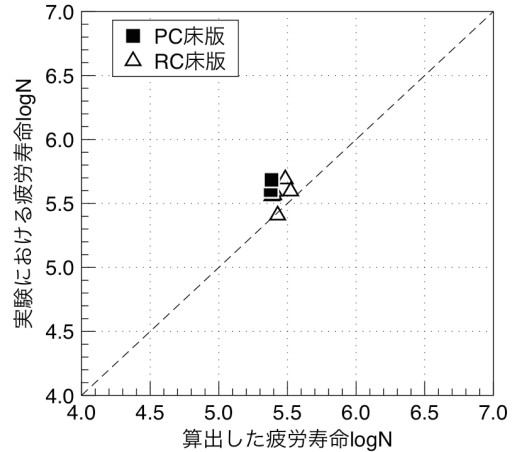


図-4 疲労寿命の実験値と算出値の比較

合と、PC床版の寿命を超えて未破壊で試験終了する場合はそれぞれ複数体存在し、ばらつきがある。算出破壊点については、PC床版とRC床版で同程度か、PC床版のほうがやや短く算出された。

一般に、輪荷重走行試験における破壊時繰返し回数は数万～数十万回となるため、疲労寿命を対数で扱うことが適切と考えられる。このため、図-4に示すように、提案するPC床版の疲労寿命予測式および階段状漸増載荷の評価法を用いることで、RC床版同様に、PC床版の疲労寿命をある程度の精度で評価可能であるといえる。ただし、本論文で扱ったPC床版の輪荷重走行試験結果は、諸元と載荷パターンを同じくする2体のみと非常に限定された範囲での検討に留まっている。輪荷重走行試験におけるPC床版の疲労寿命の評価法については、引き続き検討を重ねる必要があると認識している。

4. まとめ

本論文では、輪荷重走行試験結果を用いて、PC床版の疲労寿命予測に関する検討を行った。著者らが過去に開発したRC床版の疲労寿命予測式にプレストレスの影響を考慮する項を導入することで、PC床版の疲労寿命予測式へと拡張した。また、繰返し回数の増加にともなうせん断耐力の低下を考慮することで階段状漸増載荷を評価する手法を示した上で、階段状漸増載荷を受けるPC床版の疲労寿命評価を行った。PC床版の疲労寿命の予測算出値と実験値、およびRC床版の算出値と実験値の比較を行い、本論文の範囲においてはある程度の精度でPC床版の疲労寿命予測が可能であることを示した。

参考文献

- 1) 松井繁之：橋梁の寿命予測 (RC 床版の疲労寿命予測)，安全工学，Vol. 30，No. 6，pp. 432-440，1991
- 2) 中谷昌一，内田賢一，西川和廣，神田昌幸，宮崎和彦，川間重一，松尾伸二：道路橋床版の疲労耐久性に関する試験，国土交通省国土技術総合研究所資料第 28 号，2002
- 3) 竹田京子，濱田那津子，佐藤靖彦：輪荷重走行試験における RC 床版の疲労寿命予測に関する一検討，第 26 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp. 129-134，2017
- 4) Kyoko Takeda, Yasuhiko Sato : Development of Fatigue Life Prediction for RC Slabs under Traveling Wheel-type Loading, IALCCE2018 conference, The Sixth International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, 2018
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書 設計編，土木学会，2012