

論文 移動荷重下の床版疲労寿命に影響を及ぼす各種要因の数値解析に基づく分析

藤山 知加子^{*1}・GEBREYOUHANNES Esayas^{*2}・千々和 伸浩^{*3}・前川 宏一^{*4}

要旨: 実大鉄筋コンクリート床版を対象として、有限要素法により疲労損傷の解析を行った。定点繰返し荷重下および移動荷重下において主応力、主ひずみとその方向角に着目し、移動荷重による疲労損傷の進行過程を示した。2方向の鉄筋比、版厚、プレストレスの量と方向をパラメータとした複数の床版モデルについて、移動荷重による疲労解析を行い、各種要因が床版疲労寿命与える影響を分析した。これらより、橋軸方向のプレストレス導入が床版の疲労強度の向上に有効であることのメカニズムを示すことができた。

キーワード: 床版, 疲労, 定点繰返し, 移動荷重, 床版厚, プレストレス

1. はじめに

1960年代に問題となった橋梁床版の疲労による深刻な損傷は、輪荷重走行試験機が導入された1980年代以降、数々の実験的研究により、そのプロセスが以下のように明らかにされた¹⁾²⁾³⁾。

- ・床版打設後の乾燥収縮や沈降ひび割れ等により橋軸直角方向に初期ひび割れが発生
- ・活荷重による2方向ひび割れの発生・進展、橋軸直角方向の貫通ひび割れ(版の梁状化)
- ・雨水の浸透によるコンクリート疲労強度低下
- ・ひび割れ面相互の摩擦による損傷の進行
- ・耐荷力喪失, 破壊(押抜きせん断破壊)

このような床版損傷のプロセスが広く認識されるようになって以降、新設・既設(補修・補強)床版において、膨張剤の使用あるいは床版のプレキャスト化、プレストレスの導入、鋼コンクリート合成床版の開発等、様々な対策が講じられた。これらは輪荷重走行試験により疲労耐久性が確認されている⁴⁾⁵⁾。

実用に即した様々な床版の研究開発が進む一方で、疲労寿命に影響を及ぼす各種要因を定量的に評価できるまでの体系化には至っていない。

各機関で試験が行われた床版は、材料特性も耐荷力機構も異なり、相互比較が必ずしも容易でないことも一因にある。

本稿では、疲労損傷を考慮した非線形解析によるパラメータ解析を行い、各種要因が移動荷重下の床版疲労寿命に及ぼす影響について検討した。なお、本解析には乾燥ひび割れ等の初期損傷および水の影響を含まず、構造特性のみに着目している。

2. 解析詳細

2.1 解析に用いた構成則

本解析は、繰返し荷重による鉄筋コンクリートの疲労損傷挙動を再現することのできる高サイクル経路依存型構成モデル⁶⁾を用いた。このモデルは鉄筋コンクリートの引張、圧縮およびひび割れ面でのせん断伝達を表す3つの構成則から成り、多方向のひび割れに伴う挙動を表現するものである。繰返し荷重による疲労損傷は、時間に依存する塑性変形の増分と、剛性低下により説明することができるとしている⁶⁾⁷⁾。

これらの構成則を用いた対数直接積分法⁶⁾で

*1 東京大学 大学院工学系研究科社会基盤学専攻 (学生会員)

*2 東京大学 大学院工学系研究科社会基盤学専攻 (正会員)

*3 東京大学 大学院工学系研究科社会基盤学専攻 (学生会員)

*4 東京大学 大学院工学系研究科社会基盤学専攻教授 工博 (正会員)

求められた時間—変形の履歴が、繰返し荷重を受ける構造物の疲労損傷過程を良好に再現することが実験により確認されている^{6,7)}。

2.2 解析諸元

解析に用いたモデルを図-1に、諸条件を表-1~3示す。床版支間は橋軸直角方向2.0m、橋軸方向3.0mで、4辺単純支持版とした。床版厚および配筋は昭和47年以降の道路橋示方書を参考にして決定した。以降、この床版モデルを基本床版RC1とする。

本解析では静的載荷（単調載荷）、定点繰返し荷重、移動荷重いずれのケースも、荷重を節点に直接作用させるものとした。走行試験での載荷幅を考慮し、移動荷重の設置幅を10cmとした。すべてのケースにおいて、節点周辺に局所的な破壊が生じないことを確認している。

3. 解析結果（移動荷重の影響）

3.1 静的解析と疲労破壊の判定

(1) 床版の静的耐力

床版中央4点に強制変位を与えた際の、支点反力の合計を図-2に示す。ピーク時の値 S_{max} は594.0(kN)、このときの版中央下面のたわみ δ_{max} は7.7(mm)であった。

図-3にピーク時の拡大変形図（断面図）を示す。橋軸・直角両方向とも集中的なせん断変形が見られ、解析の上でも押抜きせん断破壊に至ったことがわかる。

(2) 疲労破壊の判定

床版中央の鉛直変位が急激に増加し、(1)で算出した δ_{max} に達した時点をもって解析での疲労破壊と判定した。また、(1)で算出した S_{max}

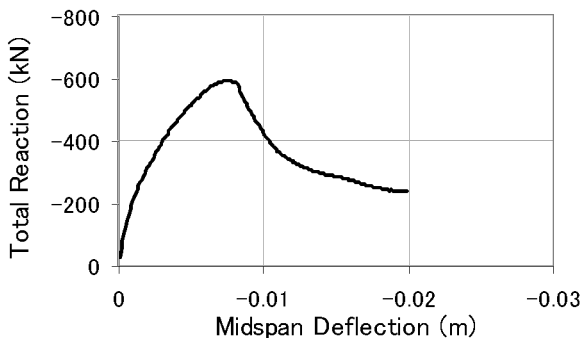


図-2 RC1 荷重-変位図（静的載荷）

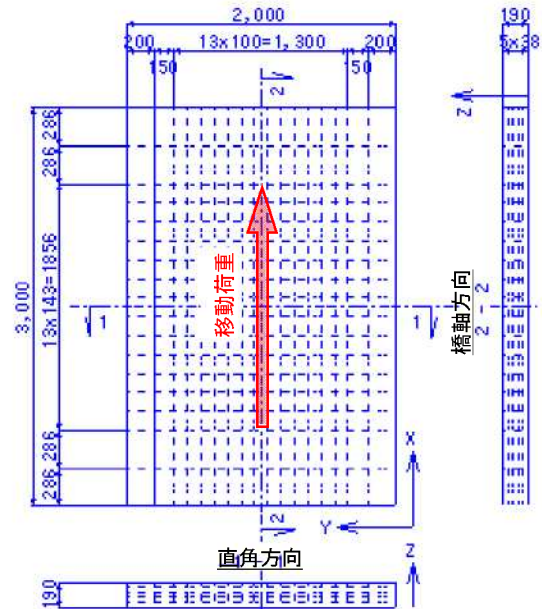


図-1 解析モデル（単位：mm）

表-1 材料特性

材料強度	弾性係数 (N/mm ²)	特性値 (N/mm ²)
コンクリート	2.5×10^4	圧縮強度 24.0
鉄筋	2.1×10^5	降伏点 295.0

表-2 床版配筋

配筋	直角方向	橋軸方向
上面	D16 ctc 200 相当	D16 ctc 260 相当
下面	D16 ctc 100 相当	D16 ctc 130 相当

表-3 疲労解析に用いた載荷パターン

載荷条件	Time (sec)	カウント方法
定点繰返し荷重	0.12	載荷と除荷で1サイクル
移動荷重	0.84	1方向通過7.96 (km/h)

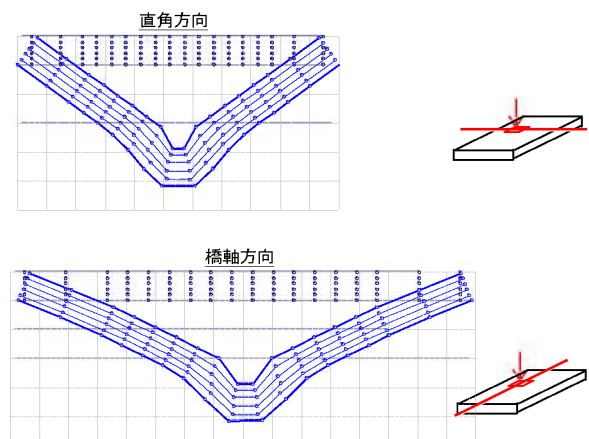


図-3 RC1 断面図（静的載荷・変位100倍）

に対し 40%, 60%, 80%の荷重を用いて疲労載荷を行い、載荷荷重と破壊までの載荷回数の関係を S-N 図として表すものとした。

3.2 疲労解析結果

定点繰返し荷重および移動荷重について、載荷回数と床版中央の鉛直たわみの関係 (40%荷重時) を図-4 に示す。いずれの載荷ケースでも、たわみが急激に増加して破壊に至るが、たわみが増加し始める載荷回数には、対象ごとに大きな差がみられた。

RC1 の S-N 図を図-5 に示す。縦軸は載荷荷重を押抜きせん断耐力で無次元化した。定点荷重の解析結果に、コンクリート標準示方書の算定式による疲労寿命 (定点荷重) も併せて示す。定点繰返し荷重と移動荷重の解析結果を比較すると、高応力領域 (80%) から低応力領域 (40%) まで、疲労寿命に概ね 3 オーダーの差が生じた。これは、既往の実験結果を用いて本解析手法を検証した文献⁷⁾と、よく一致している。本解析は、定点繰返し荷重と移動荷重のいずれも、疲労損傷を概ね再現していると言える。

3.3 定点荷重と移動荷重の違い

移動荷重の走行下 (橋軸方向) 断面を取り出し、版厚中心・支間中央から約 300mm にある要素に着目した。図-6 および図-7 より、この要素は定点荷重下での初期応力 (ひずみ) は極めて小さいが、移動荷重下では初期段階でひび割れを生じる (ひずみ 100~300 μ) 荷重を受けることがわかる。また、図-8 より、移動荷重下でこの要素に作用する主応力の方向は、度々反転を繰り返していることがわかる。一度生じたひび割れに対し方向の変動する応力が働いており、ひび割れ面に交番せん断力が生じていることを裏付けている。

以上より、移動荷重下での疲労損傷の著しい進行は、数値解析において次のように考察される。

- 1) 定点荷重下では殆ど応力の生じない部位でも、移動荷重により早期にひび割れが生じる。
- 2) 移動荷重下にひび割れを生じたコンクリート

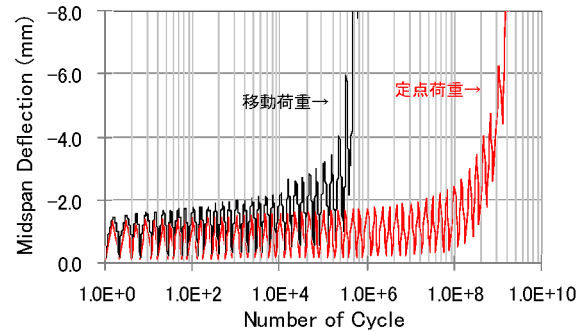


図-4 RC1 たわみ図 (40%荷重時)

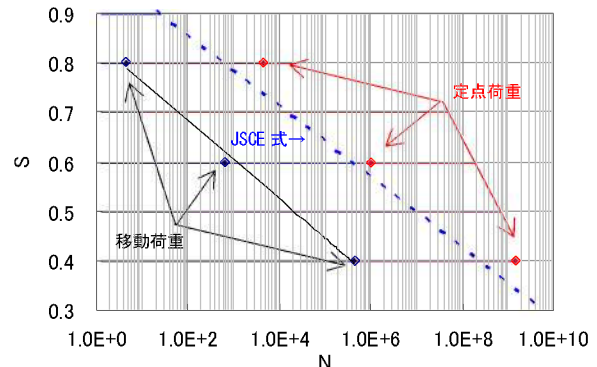


図-5 RC1 S-N 図 (移動荷重の影響)

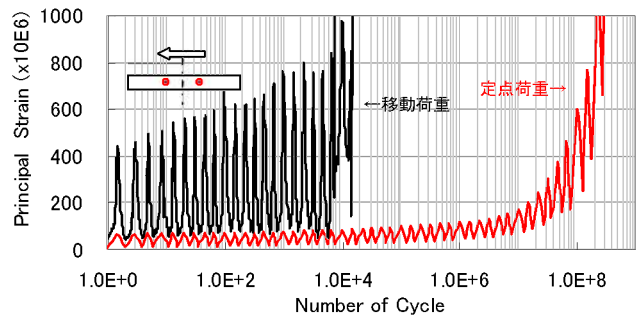


図-6 主ひずみ (移動荷重の影響)

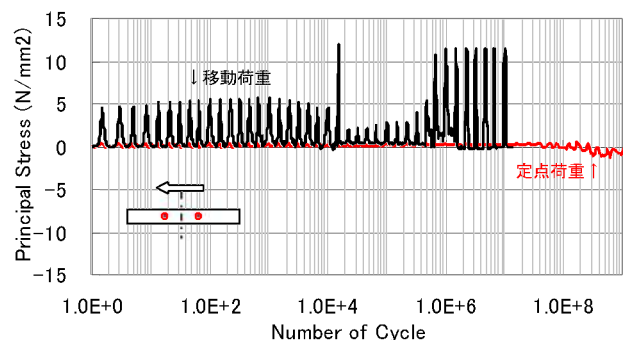


図-7 主応力 (移動荷重の影響)

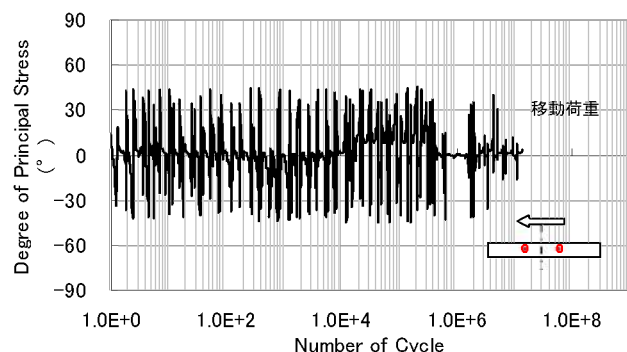


図-8 主応力作用角 (移動荷重の影響)

に対して、ひび割れ面には交番せん断力が繰返し作用する。

3) ひび割れ面相互の摩擦によりせん断伝達機能が低下し、部材の耐力に影響を及ぼす。

4. 疲労寿命に影響を及ぼす各種要因の検討

4.1 版厚の影響

床版厚 190mm の RC1 に対し、版厚のみ 160mm, 220mm と増減させた二つのモデルを作成し、疲労強度の比較検討を行った。この際、配筋は不変とした。図-9 に、縦軸を無次元化しない場合の S-N 図を示す。版厚の増加に伴い押抜きせん断耐力は比例的に増加した。縦軸を各押抜きせん断耐力で無次元化した S-N 図を、図-10 に示す。厚さの異なる床版であっても、S-N 図上では疲労寿命はほぼ同一曲線で表現できる。

以上より、床版厚を増加させた場合、押抜きせん断耐力の向上に応じて、疲労寿命も比例して増加することがわかった。

4.2 配筋の影響

配筋が床版疲労寿命に及ぼす影響を調べるため、表-4 に示す一連の解析を行った。

かつて深刻な疲労損傷が発見された際、その原因が配力鉄筋の不足であると指摘された（昭和 39 年道路橋示方書準拠床版）。同時に、道路橋示方書の改訂に従い配力筋の比率を 70-80% とした床版は、先の床版に比べ疲労寿命が向上することが、輪荷重走行試験結果により報告されている²⁾⁴⁾⁵⁾。そこで、基本床版 RC1 と配力筋減 RC2 との比較により、これを検証するものとした。また、上下面および 2 方向を同量配筋とした RC4、さらに極端なケースとして、直角方向のみに鉄筋を配置した RC5 を加えた。本稿は各種影響要因分析のための比較検討を行うものであり、設計基準類の規定を超えて、鉄筋量の増減を行っている。

このシリーズの押抜きせん断耐力を表-5 に示す。本解析の条件では、配筋の違いによる押抜きせん断耐力の差は、最大で 6% 程度であった。次に、移動荷重による疲労解析の結果を、縦軸

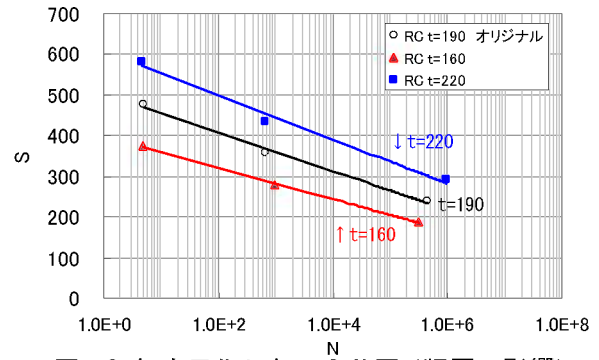


図-9 無次元化しない S-N 図 (版厚の影響)

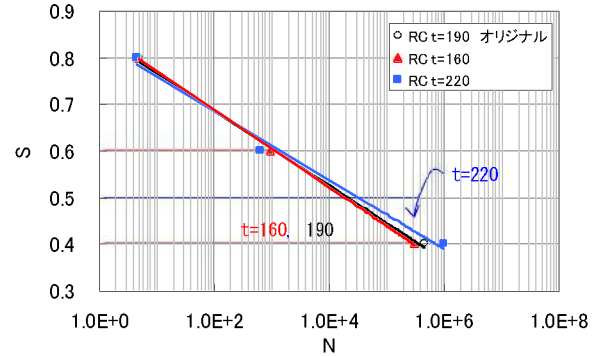


図-10 S-N 図 (版厚の影響)

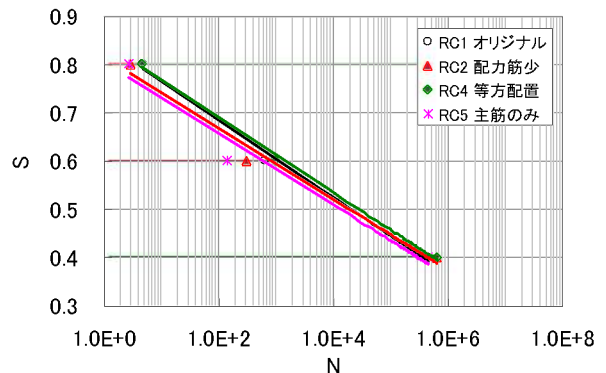


図-11 S-N 図 (配筋の影響)

表-4 検討ケースの鉄筋比 (配筋の影響)

解析ケース	直角方向 (主鉄筋)	橋軸方向 (配力筋)
基本床版 RC1	0.0106 (0.0054)	0.0080 (0.0040)
配力筋減 RC2	0.0106 (0.0054)	0.0026 (0.0014)
等方配筋 RC4	0.0070 (0.0070)	0.0070 (0.0070)
一方向版 RC5	0.0106 (0.0054)	0.0000 (0.0000)

* 全高断面に対する鉄筋比を示す () 内は圧縮側

表-5 押抜きせん断耐力 (配筋の影響)

解析ケース	Smax (kN)	δ max (mm)
基本床版 RC1	594.03 (1.00)	7.7
配力筋減 RC2	582.01 (0.98)	8.3
等方配筋 RC4	560.01 (0.94)	8.6
一方向版 RC5	559.55 (0.94)	8.1

を押抜きせん断耐力で無次元化した S-N 図として、図-11 に示す。本解析のように、乾燥収縮によるひび割れ等の初期欠陥がない理想的な状態では、本検討の範囲内の配筋の違いでは、さほど疲労寿命に大きな差は生じなかった。

以上のことから、配筋筋の増加による疲労寿命の延長は、初期損傷を制御するという観点から有効である、と推察される。

4.3 プレストレスの影響

(1) プレストレス量の影響

本研究では、指標 $P = \sigma_p / f'_c$ を用いてプレストレス導入量を表現するものとした。ここに、 σ_p はプレストレスにより生じる断面圧縮応力、 f'_c はコンクリートの圧縮強度である。また、本解析で言うプレストレスは、版に直接軸力のみを与えるもので、新たな鋼材は配置しない。よって、鉄筋量、材料特性はすべて RC シリーズと同じである。軸力は、断面全体に均等に作用させた。以上の条件で、橋軸直角方向にプレストレスを導入した 3 ケース、 $P=0.05$ (PCT1)、 0.10 (PCT2)、 0.20 (PCT3)について解析を実施した。

図-12 に、 $P=0.05$ (PCT1)で静的载荷した時の断面図を示す。軸力を与えた直角方向断面において、曲げが卓越すると思われるたわみ変形性状が見られた。これは RC1 の押抜き破壊モードとは異なっており、プレストレス導入により破壊モードが曲げ・せん断複合型に移行した結果である。また、押抜きせん断耐力を表-6 に示す。プレストレス導入量に応じて押抜きせん断耐力は比例的に増加し、変位は減少した。

図-13 に、疲労解析の結果を、無次元化しない S-N 図として示す。PCT1、PCT2、PCT3 の 3 ケースは、S-N 図において耐荷力の絶対値が上がるのみでなく、RC1 に比べ近似曲線の勾配が緩やかになっていることがわかる。これにより、低応力レベル (40%) の疲労問題の領域に着目すれば、3 ケースとも RC 床版に比べて疲労寿命が 1 オーダー以上長くなる結果となった。ただし、3 ケースのみを比較すると、その勾配はほぼ同等であることがわかる。

以上より、プレストレスの導入は、押抜き耐力を向上させるのみならず、低応力レベルの疲労損傷の抑制に有効な補強手段であると言える。

(2) プレストレス方向の比較

移動荷重下の損傷機構に対するプレストレスの効果を明らかにするため、橋軸方向のみに $P=0.05$ でプレストレスを導入した PCL1、橋軸・直角両方向に各 $P=0.05$ でプレストレスを導入した 2PCTL1 の 2 ケースを用いて、検討を行った。鉄筋量、材料特性等は全てこれまでのシリーズと同じである。

押抜きせん断耐力を表-7 に示す。PCL1 では、

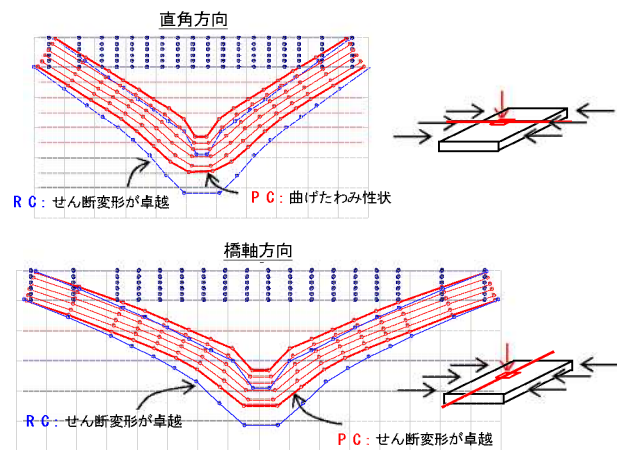


図-12 断面図 (プレストレスの影響・変位 100 倍)

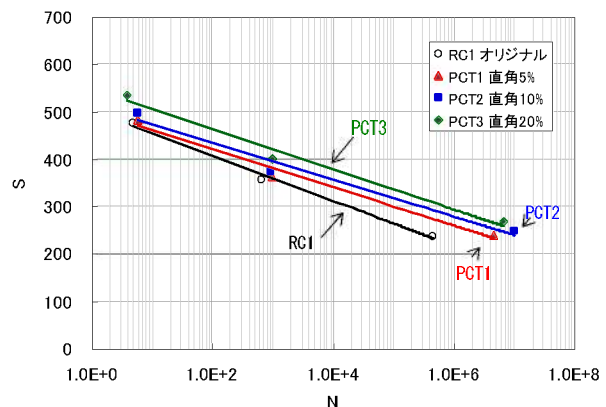


図-13 S-N 図 (プレストレスの影響)

表-6 押抜きせん断耐力 (プレストレスの影響)

解析ケース	S _{max} (kN)	δ _{max} (mm)
基本床版 RC1	594.03 (1.00)	7.7
P=0.05 PCT1	601.28 (1.01)	6.4
P=0.10 PCT2	620.74 (1.04)	5.9
P=0.20 PCT3	667.71 (1.12)	5.8

RC1 に比較してたわみが小さくなったものの、押抜きせん断耐力の増加は見られなかった。一方、2PCTL1 の場合、たわみは1方向のみプレストレスを導入した PCT1 および PCL1 と同じであったが、押抜きせん断耐力が 5%程度向上した。

移動荷重下の疲労に着目すると、異なる傾向が見られる (図-14)。低応力レベル (40%) での疲労寿命は、橋軸方向にプレストレスを導入した PCL1 が、PCT1 を 4 倍程度上回っていた。また、両方向に導入したケース 2PCTL1 は、S-N 図上 PCL1 とほぼ同一曲線上にあった。

以上のことから、移動荷重下においては、移動荷重進行方向に沿ったプレストレスの導入によって、より効果的な疲労寿命の向上が予想される。今後の実証研究を待ちたい。

5. まとめ

本稿では疲労試験に代えて多数のケースに対して数値感度解析を行うことにより、床版疲労損傷に関する要因について以下の考察を得るとともに、既往の知見が解析上でも確認された。

- 1) 移動荷重下の鉄筋コンクリートは、定点繰返し荷重下に比べ、疲労損傷の進行が著しい。
- 2) 移動荷重下では、ひび割れ面に交番せん断力が生じ、損傷が顕著に進行する。
- 3) プレストレス導入により、移動荷重下の床版疲労寿命が向上する。

その結果、プレストレスによる疲労寿命の向上は、プレストレスを移動荷重進行方向に導入した場合、最も期待できることが予想された。初期損傷および水の影響についても、今後明らかにする必要がある。

参考文献

- 1) 前田, 松井: 輪荷重移動装置による道路橋床版の疲労に関する研究, 第6回コンクリート工学年次後援会論文集, 1984, pp221-224.
- 2) 日本道路公団試験所コンクリート研究室: 試験所技術資料第413号 道路橋鉄筋コンクリ

表-7 押抜きせん断耐力 (プレストレス方向比較)

解析ケース	Smax (kN)	δ max (mm)
基本床版 RC1	594.03 (1.00)	7.7
P=0.05 PCT1	601.28 (1.01)	6.4
P=0.05 PCL1	586.03 (0.99)	6.4
P=0.05 2PCTL1	624.79 (1.05)	6.4

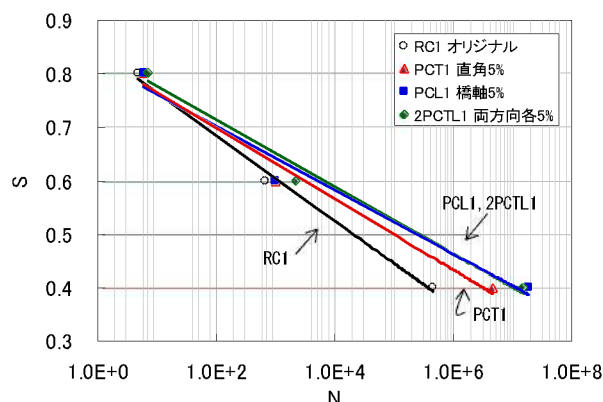


図-14 S-N 図 (プレストレスの影響)

ート床版の損傷機構に基づく健全度判定と補修工法の選択, 1985.3.

- 3) 松井繁之: 移動荷重を受ける道路橋RC床版の疲労強度と水の影響について, コンクリート工学年次論文報告集, 9-2, pp.627-632, 1987.
- 4) 建設省土木研究所他: 道路橋床版の輪荷重走行試験機における疲労耐久性評価手法の開発発給に関する共同研究報告書 (その1) - (その5), 共同研究報告書第221,233,250,262,277号 1999.3~2001.3.
- 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, 2002.3
- 6) 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), 2006, pp.159-177.
- 7) 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*, 4(3), 2006, pp.445-457.