

論文 繰返し移動荷重を受ける鉄筋コンクリート床版のひび割れ挙動に関する検討

長屋 優子^{*1}・村越 潤^{*2}・田中 良樹^{*3}

要旨：繰返し移動荷重を受ける鉄筋コンクリート床版の疲労損傷機構については既に研究されているが、ひび割れが進行し床版がはり状化した後の、はり部分内部のひび割れの挙動は必ずしも明確にされていない。本文では、床版供試体 1 体の輪荷重走行試験を実施し、計測結果に基づく RC 床版の内力の変化を検討した結果、繰返し移動荷重により比較的早期に床版内部にせん断ひび割れが発生して、走行範囲にわたってアーチ機構が形成されることを確認した。また、アーチ機構形成時での繰返し数は、中立軸下降開始時点の繰返し数 N_s と概ね一致することがわかった。

キーワード：鉄筋コンクリート床版、輪荷重走行試験、せん断ひび割れ、アーチ機構、疲労

1. はじめに

昭和 40 年前後に建設された道路橋の鉄筋コンクリート床版（以下、RC 床版）では、過大な輪荷重を繰返し受けることに起因して、これまでに疲労損傷が多く報告されている¹⁾。こうした RC 床版の疲労損傷実態を踏まえて、道路橋示方書（以下、道示）や旧建設省通達で配筋量及び最小版厚の増加、鉄筋許容応力度の引き下げ等の改訂が順次行われてきており^{1), 2)}、RC 床版の疲労耐久性の向上が図られている。

この疲労現象解明のために行われた松井による輪荷重走行試験結果³⁾によれば、床版の疲労損傷機構は図-1 のとおりとされている。同試験において押し抜きせん断破壊が発生した繰返し数（破壊回数） N_F に対する繰返し数 N の比 N/N_F が 0.05～0.3 の段階でひび割れ密度が破壊時の 90～95% に達し、この段階の終わりを配筋方向のコンクリートの連続性がなくなり、はり状化に至る状態としている。このときに、床版中央点の活荷重たわみ（試験荷重載荷時たわみから残留たわみを差し引いた値）が引張側コンクリートを無視した直交異方性版理論によるたわみ計算値（以下、計算たわみ）に到達するとしている。なお、せん断ひび割れの状態については、支間中央の配筋方向断面（切断面）には斜めせん断破壊の形跡が見られなかったとしている³⁾。しかし、RC 床版がはり状化したときの、はり部分内部におけるせん断ひび割れ発生までの挙動は必ずしも明確にされていない。

著者らは、RC 床版の疲労損傷機構に関する基礎検討として、旧土木研究所（以下、旧土研）で実施された RC 床版供試体の輪荷重走行試験結果⁴⁾を再整理するとともに、RC 床版の損傷過程をより詳細に把握するため、鉄筋の動的ひずみの計測点数を増した RC 床版 1 体（供試

体 N）の輪荷重走行試験を新たに実施した。

本文では、供試体 N の試験結果を用いて、輪荷重走行試験下における RC 床版のせん断抵抗機構とせん断ひび割れを含むひび割れ挙動について検討する。また、その結果を踏まえ、既往の試験結果を用いて床版内部のせん断ひび割れ発生までの回数に関する検討を行う。

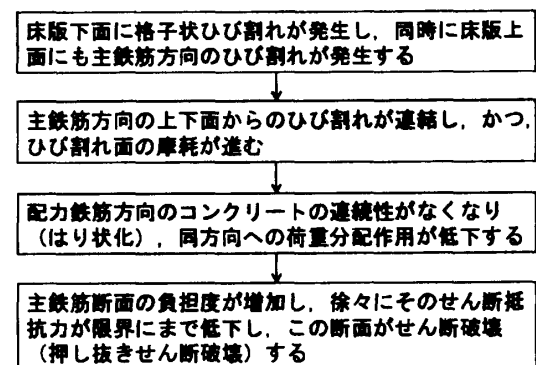


図-1 輪荷重走行試験における床版供試体の疲労損傷機構³⁾

表-1 旧土研における既往の試験結果^{4), 5)}

供試体名	載荷荷重	破壊回数	コンクリート圧縮強度	備 考
	kN	回	N/mm ²	
S39RC-1	157	27,392	26.9	床版厚 190mm 配筋筋比 S39RC-2 0.30 上記以外 0.33
S39RC-2	176	59,078	28.6	
S39RC-3	105	1,423,112	13.6	
S39RC-4	196	881	29.7	
S39RC-5	167	45,034	31.1	
S39RC-6	147	130,828	28.4	
S39RC-7	152	272,329	25.4	
S39RC-8	118	2,750,073	27.1	
S39RC-9	157	224,764	26.6	
S39RC-J	157	1,344,006	30.7	床版厚 200mm 配筋筋比 0.87
S47RC-1	210	148,927	29.9	

*1（独）土木研究所 構造物研究グループ橋梁チーム研究員（正会員）

*2（独）土木研究所 構造物研究グループ橋梁チーム上席研究員

*3（独）土木研究所 構造物研究グループ橋梁チーム主任研究員（正会員）

2. 本検討に用いる既往の試験結果

旧土研で実施した RC 床版の輪荷重走行試験のうち、本文では表-1 に示す昭和 39 年道示適用床版（以下、39 床版）9 体及び昭和 47 年道示適用床版（以下、47 床版）1 体の結果⁴⁾を使用する。また著者らが別途実施した 39 床版 1 体（S39RC-J）の試験結果⁵⁾も使用する。

3. 試験方法

3.1 供試体

供試体 N の形状寸法を図-2 に示す。配筋については、主鉄筋：D16@150， $d=164\text{mm}$ （引張側），D16@300， $d'=35\text{mm}$ （圧縮側），配力筋：D13@300， $d=151\text{mm}$ （引張側），D10@300， $d'=49\text{mm}$ ）である。表-1 に示した旧土研供試体の 39 床版と同じ仕様である。床版支間は 2.5m（3m の連続版を想定）であり、版厚は 192mm である。ここに、鉄筋位置と版厚は、試験後の切断面で計測した値である。支持条件は旧土研の試験と同様、2 辺単純支持、2 辺弾性支持⁴⁾とした。走行試験開始日の材料試験結果では圧縮強度 26.8N/mm^2 ，弾性係数 $2.65 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ ，ポアソン比 0.215 であった。

3.2 載荷方法及び計測項目

載荷条件は 157kN の一定荷重載荷とし、3m の走行範囲に対して速度 15rpm で車輪を繰返し移動させた。試験には（独）土木研究所の輪荷重走行試験機を使用した。

本文で使用している計測項目は、変位計による下面のたわみ、ひずみゲージによる鉄筋ひずみ及び π ゲージによるひび割れ幅である。ひび割れについては、一定回数毎に上下面の状態を観察するとともに、試験終了後に切断した断面での状態を観察した。全てのひずみ及び変位は、走行中約 0.05sec 間隔で計測した（以下、DT データ）。また、床版中央での静的載荷を 1, 2, 10, 100 回目、200 回以降は 200 回ピッチ、16 万回以降は 5,000 回ピッチで行い、157kN 時と除荷時の静的データ（以下、SS データ）を計測した。

4. 試験結果

4.1 破壊に至るまでのひび割れ分布

図-3 に、床版下面及び切断面のひび割れ図を示す。下面については透視図としており、カメラ撮影部では目視観察を行っていない。下面における走行直角方向ひび割れは、走行前における静的載荷の 88kN 載荷時に中央の主鉄筋に沿って発生した（目視及び π ゲージによる）。繰返し数 100 回で走行方向にもひび割れが発生し、2,000 回で既に格子状のひび割れが形成されていた。繰返し数

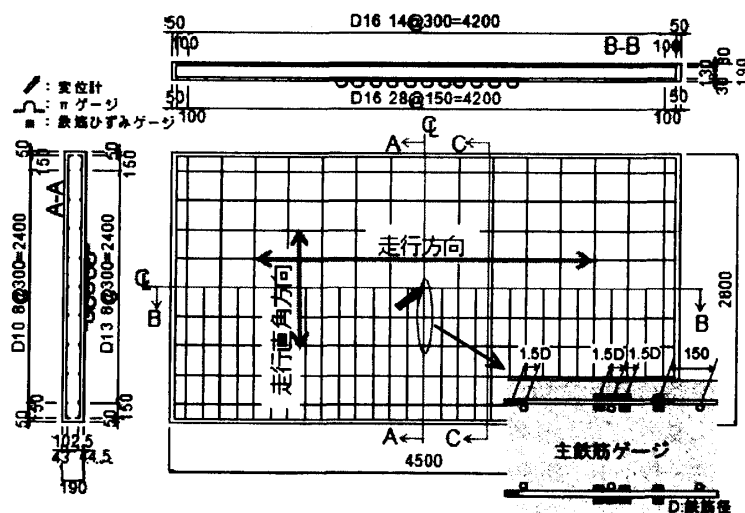


図-2 供試体 N の形状・寸法及び計測位置図

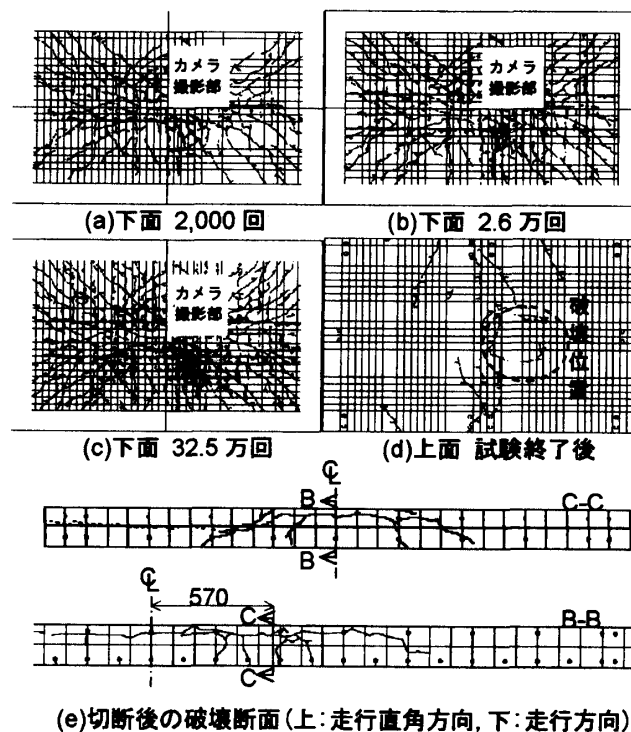


図-3 ひび割れ図（目視観察）

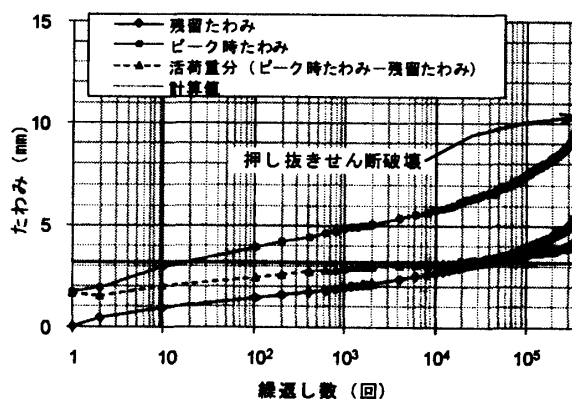


図-4 供試体中央点のたわみの変化（SS データ）

36 万回で中央から走行方向に約 600mm の位置に押し抜きせん断破壊が生じた。

4.2 たわみ

図-4 に中央点のたわみの変化を示す。計測値は荷重除荷時の残留たわみ、157kN 荷重時（以下、ピーク時）たわみ、ピーク時たわみから残留たわみを差し引いたたわみ（以下、活荷重分）で示し、計算たわみも併記した。計算たわみは、2 辺単純支持、2 辺自由とし、引張側コンクリートを無視し、3.1 に示した諸元を用いて直交異方性版理論により算定した。たわみの変化は、従来の結果と同様に活荷重たわみが計算たわみに達してから（繰返し数約 1.3 万回時）、進展が早くなる傾向が見られた。

4.3 中立軸

図-5 に、供試体中央の走行直角方向断面を対象とし、上下主鉄筋の鉄筋ひずみ分布から求めた中立軸の変化を計算値とともに示す。これらの中立軸は、ひび割れの発生・進展とともに繰返し数約 2 万回時で下降に転じた。

4.4 ひび割れ幅

図-6 に、下面の π ゲージによるひび割れ幅（輪荷重走行中の最大値及び最小値）の分布を示す。走行直角方向では、初期には中央（PIL14）でひび割れ幅が大きくなっているが、繰返し数 1 万回では両隣（PIL13 及び PIL15）のひび割れ幅が卓越していた。これらのひび割れ幅の増加は、1,000 回以降遅くなった。また、走行直角方向では残留ひび割れが大きいのにに対して、走行方向では残留ひび割れが小さい傾向にある。なお、供試体 N の格子密度法によるひび割れ密度は、1,000 回で増加が遅くなり始め、計算たわみ到達時や中立軸下降開始時の繰返し数（1 万～2 万回）で破壊時の 7 割を超え、約 10 万回で破壊時の 9 割に達した。

5. 考察

5.1 RC 床版の疲労損傷過程におけるせん断ひび割れの形成

供試体 N のたわみは荷重の繰返し数とともに破壊まで増加し続ける（図-4）。一方、走行直角方向の中立軸は走行開始後から徐々に上昇するが、ある段階で下降し始める（図-5）。供試体 N の場合、繰返し数 2 万回前後で中立軸の下降が始まっていた。中立軸の上昇は、曲げひび割れの発生・進展、引張鉄筋と周囲のコンクリートとの付着切れの進行によるものと考えられるが、中立軸が下降する現象については、曲げひび割れの進展、鉄筋の付着切れ以外の要因が関与していると考えられるため、以下の検討を行った。

せん断補強鉄筋のない RC はりのせん断ひび割れが生じた後のせん断抵抗は、式(1)のとおり、コンクリートのビーム機構(右辺第1項)とアーチ機構(右辺第2項)の組合

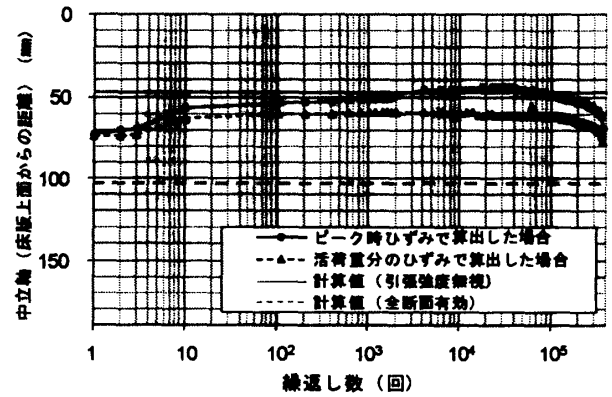
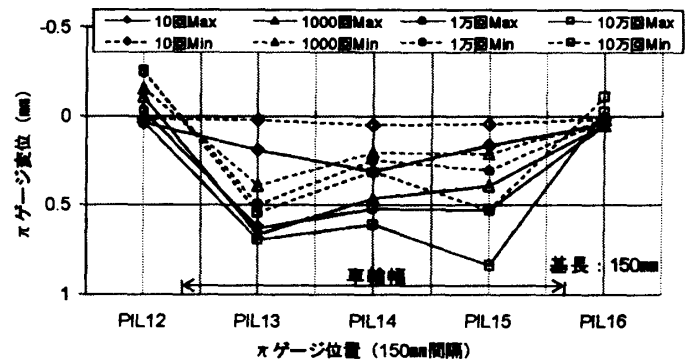
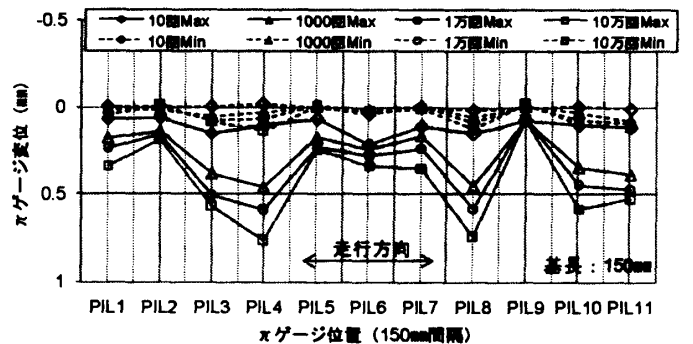


図-5 中立軸の変化 (SS データ)



(a) 走行直角方向



(b) 走行方向

図-6 下面の π ゲージによるひび割れ幅 (DT データ)

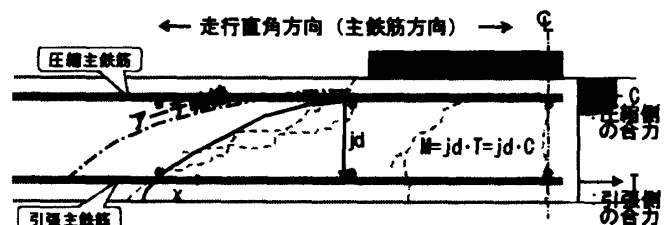


図-7 アーチ機構の模式図

せで説明される⁶⁾。

$$V = jd \frac{dT}{dx} + T \frac{d(jd)}{dx} \quad (1)$$

ここに、 V :せん断力, jd :アーム長, T :引張側の合力(本文では引張主鉄筋軸力), x :位置座標(本文では走行直角方向)

図-7に, はりのアーチ機構を床版に置き換えた場合の模式図を示す。供試体中央付近の上下主鉄筋のひずみ計測結果を用いて, 引張主鉄筋の軸力 T (=圧縮合力 C) を求め, 式(2)から jd を算定した。それらの結果を支間方向の分布で図-8, 9に示す。

$$jd = b (M_x - \frac{v}{\sqrt{\alpha}} M_y) / T \quad (2)$$

ここに、 M_x, M_y : 走行直角方向, 走行方向の曲げモーメント, v : コンクリートのポアソン比, α : 直交異方性を表す剛性比($=D_y/D_x$), b : 引張主鉄筋の間隔 (150 mm), D_x, D_y : 主鉄筋, 配力筋の曲げ剛性

引張主鉄筋軸力 T の分布は, 繰返し数 50 回では, 載荷点直下で大きく, 支点に近づくほど小さく, 概ね曲げモーメント分布に応じた分布であった。また, 同 50 回のときの jd の位置 x による変化は 5 万回の場合に比べると小さかった。一方, 繰返し数 5 万回では, T の分布の傾きはほとんどなく, 位置に関係なく支間中央と同程度の軸力が作用していた。また, jd の分布は傾きが顕著に現れた。これらの結果より, 繰返し数が 50 回の段階では, ビーム機構がほとんど支配的であり, せん断ひび割れは生じていなかったが, 繰返し数 5 万回ではほとんどアーチ機構に移行していたと考えられる。これらの繰返し数の間に, 床版内部にせん断ひび割れが既に発生していた可能性があると考えられる。

図-10, 11に, 繰返し数に伴う T の分布の傾き (dT/dx) 及び jd 分布の傾き q' の変化を示す。この結果より, ビーム機構からアーチ機構への変化 ($dT/dx, q'$ の変化) は繰返し数とともに徐々に生じていたが, 繰返し数約 2,000 回から 1 万回の間に停滞する期間が見られる。これらと, 中立軸の下降が始まった繰返し数約 2 万回から, この停滞期間内にせん断ひび割れが徐々に発生し始め, 1~2 万回のあたりでせん断ひび割れの進展が停滞し, アーチ機構での疲労載荷に移行したものと考えられる。

図-12に, 破壊箇所付近 (CL から 600 mm) の中立軸の変化を, 供試体中央 (CL) の中立軸の変化と合わせて示す。図より, せん断ひび割れの形成, アーチ機構への移行が, 支間中央付近だけでなく, 走行範囲にわたって発生していたことがわかる。荷重が走行移動していることから, せん断ひび割れが広範囲にわたって形成されるまでにある程度の繰返し数を要し, このことは q' 等の変化が一旦停滞したことと関連があるものと推察される。

はりのせん断疲労試験において, せん断スパン比 a/d (a :せん断スパン, d :有効高さ) が小さい場合にはせん

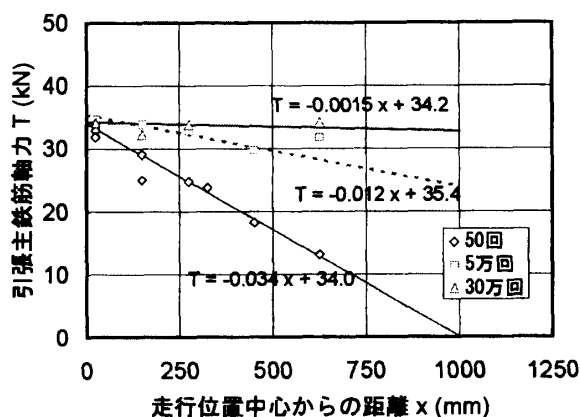


図-8 引張主鉄筋軸力分布の変化 (DT データ)

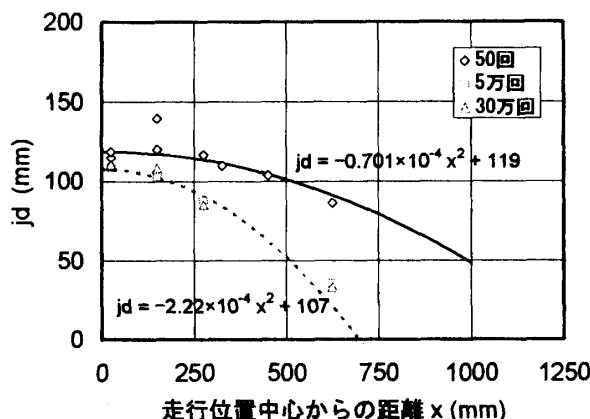


図-9 主鉄筋方向の jd 分布の変化 (DT データ)

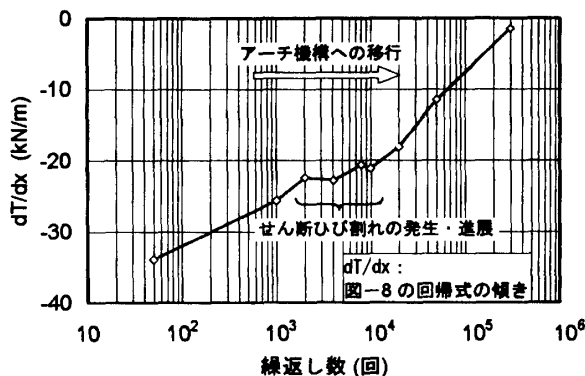


図-10 引張主鉄筋軸力分布の傾きの変化 (DT データ)

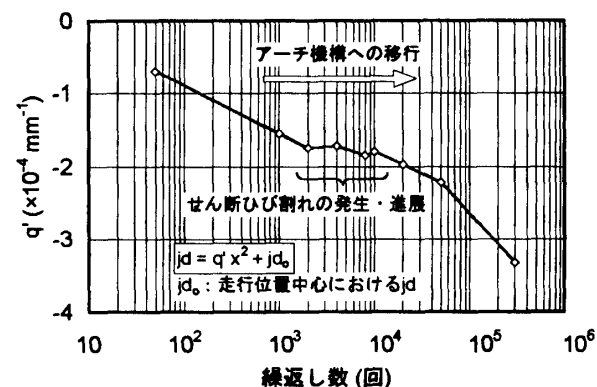


図-11 主鉄筋方向の jd 分布の傾き q' の変化 (DT データ)

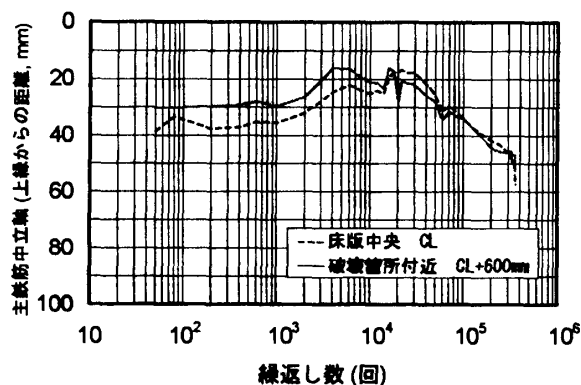
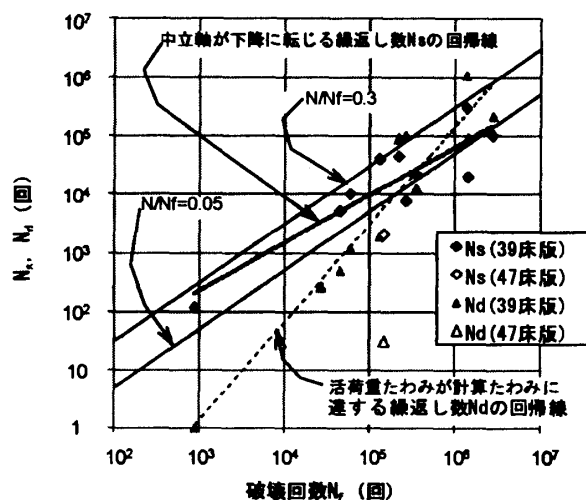


図-12 破壊箇所付近の中立軸の変化 (DT データ)

図-13 破壊回数に対する N_s , N_d の相関

断ひび割れ発生後も直ちに破壊に至らず、 a/d が大きい場合はせん断ひび割れ発生とともに破壊に至るとされている⁸⁾。栓貝の研究では、その a/d の境は概ね 5 前後であった⁸⁾。本供試体の場合、 a を単純に 1000mm とすると、 d が 164mm であることから a/d は約 6 であるが、せん断ひび割れ形成後に直ちに破壊に至っていない。床版の場合も a/d の影響を受ける可能性はあるが、配力筋の影響、曲げモーメント分布の違い、走行載荷の影響などを考慮する必要があると考えられる。

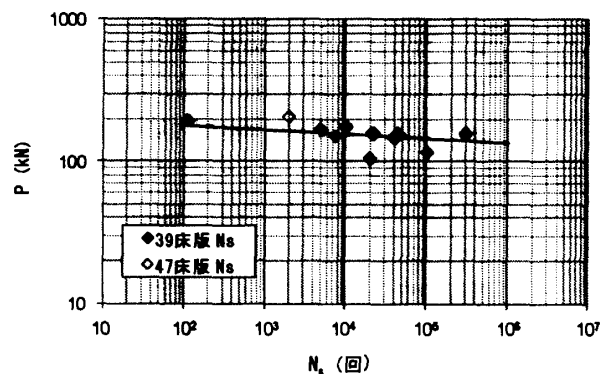
5.2 せん断ひび割れ形成までの S-N 線

(1) 中立軸が下降に転じる繰返し数

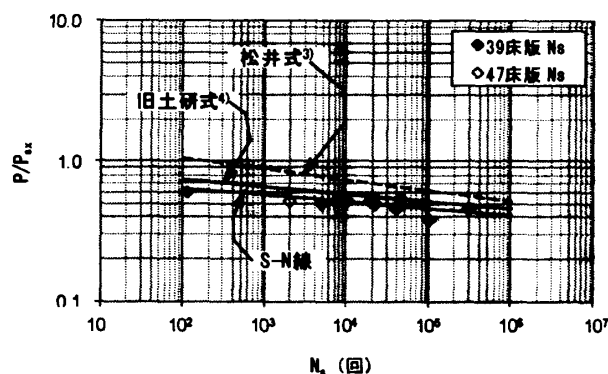
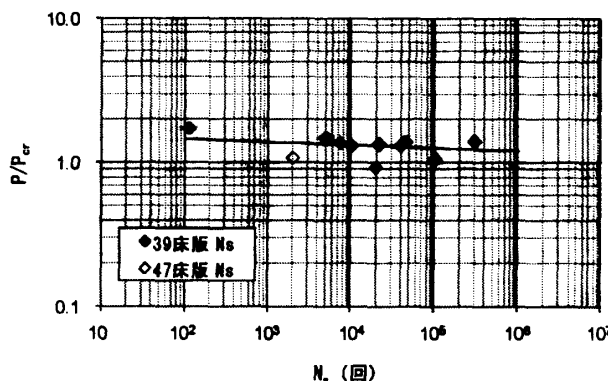
5.1 の検討を踏まえ、表-1 に示す既存の試験結果のうち 39 床版のデータを用いて、中立軸が下降に転じる繰返し数 N_s 及び活荷重たわみが計算たわみに達する繰返し数 N_d を破壊回数 N_f との関係で図-13 に示す。 N_s は N_d よりも大きい傾向にあった。 N_s は、従来言われているひび割れ密度が破壊時の 9 割以上に達する繰返し数 $0.05 \sim 0.3N_f$ ³⁾ の範囲に概ね入っていた。

(2) N_s による S-N 線

ここでは、中立軸が下降する時点でせん断ひび割れが発生していると想定し (著者らは供試体 N の場合、2,000



(a) P

(b) P/P_{sx} (c) P/P_{er} 図-14 N_s による S-N 関係

(回帰はいずれも 47 床版の結果を含まない)

回～2 万回の間に走行範囲にわたって徐々にせん断ひび割れが発生・進展していたと考えている。), N_s について以下の指標を縦軸にそれぞれ用いた S-N 線を図-14 (a)～(c) に示す。使用したデータは、表-1 の旧土研供試体、共通試験の供試体、供試体 N の結果である。各図中の S-N 線は、39 床版のデータに基づき回帰した。S39RC-4 については、初期の静的載荷で中央たわみが計算たわみを超えていたので、回帰には含めていない。図中の縦軸には、以下の 3 種類の値をそれぞれ用いた。

- 1) P (試験時の走行荷重)
- 2) P/P_{sx}

$$P_{sx} = 2B\{\tau_{smax} \cdot X_m + \sigma_{tmax} \cdot C_m\} \quad (3)^9$$

ここに、 P_{sx} ：はり状化した後の静的押し抜きせん断耐力、 B ：はり化幅 ($=b_b + 2d_d$)、 b_b ：載荷ブロックの走行方向辺長、 d_d ：配筋筋の有効高さ、 τ_{smax} ：コンクリートの最大せん断応力 ($=0.252f_c - 0.000246 f_c^2$)、 σ_{tmax} ：コンクリートの最大引張応力 ($=0.583f_c^{2/3}$)、 X_m ：主鉄筋断面の中立軸計算値、 C_m ：主鉄筋のかぶり厚さ、 f_c ：コンクリートの圧縮強度

3) P/P_{cr}

ここに、 P_{cr} ：曲げひび割れ幅をある程度以下に抑える荷重(引張主鉄筋の発生応力の最大値が 120N/mm^2 に達する荷重)

輪荷重走行試験結果は、 P_{sx} などの静的耐力で無次元化して表すのが一般的であるが、まず P のみで傾向を見ることとした。また、せん断ひび割れ発生までは曲げ挙動を示すことから、ひび割れ幅をある程度以下に抑える荷重 P_{cr} でも傾向を確認することとした。計算値 P_{cr} は、直交異方性版理論により引張主鉄筋の発生応力の最大値が 120N/mm^2 に達する荷重を仮に P_{cr} とした。 120N/mm^2 と曲げひび割れ幅の対応付けは必ずしも明確でないが、計算値 P_{cr} は鉄筋応力と線形関係であるので、本検討の範囲では曲げの指標として特に支障がないと考えた。なお、47床版の結果は1点のみであるが、合わせて各図中に示すこととした。

これらの図では、縦軸にいずれの値を用いてもある程度の相関が認められた。47床版を除くと、圧縮強度に差があるものの、いずれも配筋や版厚に大きな違いはないことから、 P のみで整理しても高い相関が得られた (図(a))。

図(b)より、 N_s はせん断の指標である P/P_{sx} でよく表されることがわかる。なお、本図には松井式³⁾及び旧土研式⁴⁾を併記した。ただし、図(a)のように、47床版を含め、かつ縦軸に P を用いてもある程度の相関があることを考慮すると、 P_{sx} と N_s の関係については今後さらに検討が必要である。

表-2 に、39床版及び47床版それぞれの P_{cr} 及び P_{sx} を、39床版に対する比で示す。参考として、平成8年道示適用床版 (以下、H8床版) についても示す。図(c)において47床版の結果が39床版の結果よりも下方にプロットされたのは、47床版において主鉄筋及び配筋筋の鉄筋量の増加により曲げ抵抗が改善されたものの、版厚の増加が小さく、せん断抵抗の改善が小さかったため、疲労耐久性の改善が小さかったことによると考えられる。

以上のことから、せん断ひび割れ形成に起因する N_s は、曲げではなく P_{sx} あるいはその式中の因子に影響を受けることが考えられる。

表-2 各試験体の P_{cr} と P_{sx}

供試体	P_{cr}	P_{sx}
39床版	1.00 (115kN)	1.00 (307kN)
47床版	1.67 (193kN)	1.38 (426kN)
H8床版	1.88 (217kN)	1.84 (566kN)

※上段：39床版の値との比、下段：計算値

6. まとめ

本検討の結果、以下の結論が得られた。

- 1) 主鉄筋のひずみ分布を用いてRC床版の内力の変化を検討した結果、繰返し移動載荷により、比較的早期に床版内部にせん断ひび割れが発生して、走行範囲にわたって広範囲にアーチ機構が形成されることがわかった。
- 2) アーチ機構形成時での繰返し数は、中立軸が下降し始める時点の繰返し数 N_s と概ね一致していた。また、 N_s は従来言われているひび割れ密度が破壊時の9割以上に達する回数 $0.05 \sim 0.3N_f$ の範囲に概ね入っていた。

参考文献

- 1) 国広哲男：道路橋床版の問題点、橋梁と基礎、pp.1-5、1968.7.
- 2) 松井繁之、大田孝二、西川和廣：RC床版とその損傷 (その2)、橋梁と基礎、pp.47-50、1998.6.
- 3) 松井繁之：道路橋コンクリート系床版の疲労と設計法に関する研究、大阪大学博士論文、1984.11.
- 4) 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、国総研資料 No.28、2002.3.
- 5) (財)災害科学研究所：各種の輪荷重走行試験装置下での床版疲労耐久性とS-N疲労曲線の統一化についての総合評価 (28社共同研究で委託)、2006.3.
- 6) Park, R. and Paulay, T. : Reinforced Concrete Structures, John Wiley & Sons, 1975.
- 7) 渡辺博志：正負交番荷重が作用する道路用鉄筋コンクリート棒部材および隅角部のせん断強度に関する実験的研究、京都大学博士論文、2007.2.
- 8) 梶貝勇：鉄筋コンクリートはりのせん断破壊に関する基礎研究、土木学会論文報告集、279号、pp.113-126、1978.1.
- 9) 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.