

## RC床版の劣化予測と補修・補強技術

## - 道路橋RC床版の残存疲労寿命推定用S-N曲線について -

○ 日大生産工 (非常勤) 川井 豊 日大生産工 阿部 忠  
日大生産工 木田哲量 日大生産工 (研究員) 高野真希子

## 1. はじめに

道路橋RC床版(以下RC床版と称する)は、車両の走行ごとに作用する繰返し輪荷重を直接支持することから、その経年劣化は輪荷重の繰返し走行による疲労に起因することが多い。そのため、これまで多くの移動輪荷重疲労試験が行われ、床版の支持条件や設計基準の相違を考慮できる統一的なS-N曲線作成の努力が続けられている<sup>1)</sup>。しかし、これまでのところ図-1に示すように、研究者ごとの実験結果に最小二乗法を用いて両対数軸上で直線回帰した多数の平均S-N曲線が個別に示されており、RC床版の疲労寿命のばらつきに着目し統計的に整理されたS-N曲線がないのが現状である。

本研究では、過去に実施された移動輪荷重試験結果を再解析することにより、破壊確率PをパラメータにしたS-N曲線(P-S-N曲線)によるRC既存床版の残存寿命推算法について検討を行った。

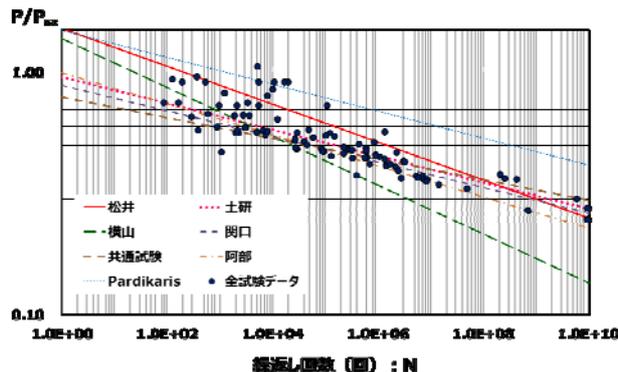


図-1 主な既往研究成果によるS-N曲線

## 2. 既往研究成果の整理と再解析

## 2.1 回帰分析の方法

RC床版のS-N曲線は、輪荷重変動範囲;  $S$  と破壊までの繰返し回数;  $N$  を両対数軸上の直線式(1)で表される。

$$\log S = -m \cdot \log N + \log C \quad (1)$$

再解析に用いるデータ群を( $S_i, N_i$ )とすると、最小二乗法を用いて平均S-N曲線の勾配;  $m$ , 切片;  $\log C$  は次式で与えられる。

$$m = \frac{\sum_{i=1}^j (\log N_i - \overline{\log N})(\log S_i - \overline{\log S})}{\sum_{i=1}^j (\log N_i - \overline{\log N})^2} \quad (2)$$

$$\log C = \overline{\log S} - m \cdot \overline{\log N} \quad (3)$$

ここに、 $\overline{\log S}$ ,  $\overline{\log N}$  はそれぞれデータの平均値を示す。

信頼限界を考慮した疲労寿命;  $N_{CL}$  は、データ数が十分に多いこと、疲労寿命を推算する応力値が対数応力の平均値からかけ離れていない範囲であると仮定すると、次式で与えられる。

$$\log N_{CL} = \log N_k \pm t \left[ \frac{\sum (\log N_i - \log N_C)^2}{j-2} \right]^{1/2} \quad (4)$$

ここに、 $j$  はデータ数、 $t$  は信頼係数(Studentの $t$ 検定における $t$ 値)を表す。

式(4)は、平均S-N線と平行となる信頼限界を与え、標準偏差;  $\sigma$  を用いて以下のように書き換えることができる<sup>2)</sup>。

$$\log N_{C,L} = (\log S_k - \log C \pm t \cdot \sigma) / m \quad (5)$$

$t$  値は要求する信頼度とデータ数に依存するが、 $t \geq 2$  で95%信頼限界を、 $t \geq 1$  で90%の信頼限界を与える。上述した統計的処理を既往研究データに対し行いRC既存床版の残存寿命推算法について検討を行う。

RC床版の設計基準は、昭和47年度改訂道示において大型車交通量により設計曲げモーメントの割増しが行われるとともに、配力鉄筋方向の設計曲げモーメントが与えられた。その後、平成8年度には設計輪荷重の改訂および大型車交通量による床版の最小全厚の割増しが行われており、昭和47年度準拠床版を境として配力鉄筋量の相違により繰返し荷重による破壊性状が異なると考えられる<sup>3)</sup>。本検討では、昭和47年度前後の道示に準拠した床版に対する移動輪荷重試験結果を異なる二つのデータ群と仮定し、再解析を行うこととした。

## 2.2 昭和39年道路橋示方書準拠RC床版

昭和39年度道示に従って設計された試験体に対する最初のS-N曲線は、松井らにより与えられた<sup>4)</sup>。本S-N曲線では、荷重変動範囲;  $S$  の代わりに梁状化した床版の押抜きせん断耐力;  $P_{xy}$  で輪荷重変動範囲;  $P$  を無次元化した(1)式で表される松井式<sup>6)</sup>が用いられ、試験体の諸元に影響されない統一的なS-N曲線として以後の研究においても慣用的に基準S-N曲線として使われている<sup>9)</sup>。

S-N Curves of Highway Bridge Deck Slabs for Estimation of Residual Fatigue Life

Yutaka KAWAI, Tadashi ABE, Tetsukazu Kida and Makiko Takano

$$\log(P/P_{sx}) = -0.0783 \log(N) + \log 1.520 \quad (6)$$

上記研究においては、ほぼ同時期に行われた園田らの小型試験体の移動輪荷重試験データ<sup>8)</sup>が引用されているが、それらの試験体と道示との関係は明らかではない。その後、土木研究所において1体の階段載荷と8体の一定移動輪荷重疲労試験が実施された<sup>9)</sup>。階段載荷試験の結果は、S-N 曲線の勾配を式(6)で与えられる  $m=12.76$  として線形累積疲労被害則を適用し、一定移動輪荷重疲労試験のデータに換算している。試験荷重の範囲が狭いことから、本データのみを用いて S-N 曲線を求めると、データのばらつきが S-N 曲線の勾配に対して強く影響し、 $m=-0.03786$  と式(6)に比べ極めて緩やかな勾配となる。

本研究以降、床版の疲労耐久性を比較的短時間に効率的に評価できる試験方法として載荷荷重を所定の回数毎に段階的に増加する一種の促進試験方法が定着し、合成床版などを含め多くの疲労耐久性の検証に用いられている。しかし、本法による疲労試験データを、累積疲労被害則を用いて一定移動輪荷重疲労試験のデータに定量的に変換するために必要な S-N 曲線の勾配； $m$  についての系統的な研究は行われておらず、慣用的に松井により与えられた式(6)の勾配； $m=-0.07835$  が用いられている。

その後、輪荷重走行試験装置を保有する試験研究機関の増加に伴い試験データ数が増加したことから、試験装置保有機関が連携し統一的、総合的な試験が実施されている<sup>13)15)</sup>。ここでは、各試験機において再現される RC 床版の疲労損傷メカニズムを比較検討し、試験方法および評価方法の統一化が試行された。本試験では、松井式(6)と比較するため昭和 39 年道示に準拠する試験体が用いられている。

階段載荷移動輪荷重疲労試験データを、 $m=-0.07835$  として線形累積疲労被害則を適用して一定移動輪荷重疲労試験データに変換し、最近行われた試験データ<sup>16)</sup>を含む全てのデータを再解析することにより、非破壊確率 50%および 95%に対する P-S-N 回帰曲線として式(7)が得られる。

50%非破壊

$$\log(P/P_{sx}) = -0.06504 \log N_{C,F} + \log 1.0730 \quad (7.a)$$

95%非破壊

$$\log(P/P_{sx}) = -0.06504 \log N_{C,F} + \log 0.7911 \quad (7.b)$$

図-2 には、園田らの小型試験体のデータ<sup>5)</sup>を除いた昭和 39 年道示準拠試験体のみデータと松井らのデータを再解析して求めた 50%および 95%非破壊 S-N 曲線を比較して示す。50%非破壊 S-N 曲線が式(6)の平均 S-N 曲線に相当する。本再解析の結果では、S-N 曲線の勾配は、 $m=-0.06504$  となり、式(6)の勾配とは異なるもののほぼ近い値が得られた。しかし、これら最近の実験データは松井らの実験データの下の

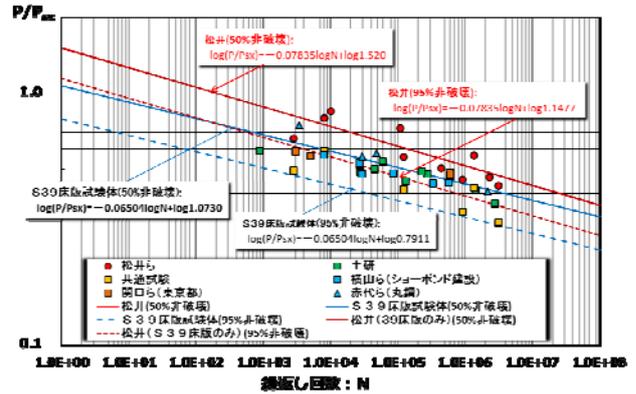


図-2 昭和 39 年道示準拠床版の P-S-N 曲線

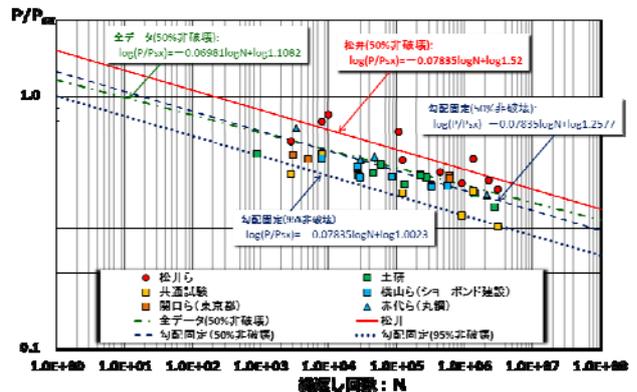


図-3 昭和 39 年道示準拠床版の P-S-N 曲線(勾配一定法)

限值、すなわち 95%非破壊 S-N 曲線付近にプロットされる。その理由として床版空間の影響や載荷ブロックの影響などの試験条件、試験機の相違等が指摘されているが、未だ明確にはされていない。

以上では、S-N 曲線の勾配； $m$  および切片  $\log C$  を統計変数として式(2)、式(3)により求めたが、本方法では研究者ごとに得られた S-N 曲線が異なるうえ、データのばらつきが比較的大きい短寿命側のデータが勾配に影響を与える。一方、残存寿命推定の観点からは、一般的に  $P/P_{sx}$  が 0.4~0.3 以下の長寿命側の領域が重要となることから、短寿命側の影響を強く受けた S-N 曲線を用いて長寿命側に外挿して疲労耐久性を検査すると大きくぶれが生じる恐れがある。また、実験データが追加される毎に S-N 曲線回帰式の勾配が変化することが予想され、実験データを単に回帰分析し S-N 曲線を求めることには課題が多いと考えられる。このような課題を解決する方法として、勾配； $m$  を固定し切片； $\log C$  のみを統計量とする方法を以下に示す。具体的には、統計変数として式(2)で求められる  $m$  を固定値とし、式(3)を用いて切片を求めるものである。以降、勾配を一定値とすることから便宜的に勾配一定法と呼ぶ。式(3)からも分かるように、本方法はデータ群の重心点を通る勾配  $m$  の直線を求めることに相当する。 $m$  値として、松井式の勾配； $m=-0.0783$  を用いて勾配一定

法で50%, 95%信頼限界を求めると式(8)が得られる。

50%非破壊

$$\log(P/P_{sx}) = -0.07835 \log N_{C,F} + \log 1.2577 \quad (8.a)$$

95%非破壊

$$\log(P/P_{sx}) = -0.07835 \log N_{C,F} + \log 1.0023 \quad (8.b)$$

図-3には、勾配一定法で求めた昭和39年道示準抛床版に対するP-S-N曲線を示すが、95%非破壊P-S-N曲線がほぼ全てのデータの下限をカバーすることが分る。

### 2.3 昭和47年以降の道路橋示方書準抛床版

昭和47年度以降の道示に準抛した床版に対する移動輪荷重試験による研究は比較的少なく、土木研究所における研究<sup>9)</sup>、関口らの研究<sup>11),12)</sup>、筆者ら<sup>17),18)</sup>の研究の三データ群のみである。

土木研究所の研究<sup>9)</sup>では、昭和47年度道示準抛試験体1体の一定荷重試験と平成8年度道示準抛試験体8体の階段載荷移動輪荷重疲労試験が行われ、階段載荷試験結果を、松井らのS-N曲線式の傾きを用いて線形疲労被害則により等価繰返し回数に変換し整理している。また、関口らの研究<sup>11),12)</sup>では、平成47年4体と平成8年2体の試験体を用いて一定荷重移動輪荷重疲労試験が行われている。さらに、筆者らの研究<sup>17),18)</sup>では、平成55年度道示に準抛した試験体10体を用いた階段載荷移動輪荷重疲労試験を行い、昭和39年度道示により設計された試験体と疲労破壊機構が異なることを指摘した。また、この破壊機構の相違に着目し、基本耐力力として新たに提案した押抜きせん断強度を用いてS-N曲線を整理した。さらに、階段載荷試験結果を土研と同様に松井らのS-N曲線式の傾き( $m=-0.07835$ )を用いて線形疲労被害則により等価繰返し回数に変換し、式(9)で表されるS-N曲線を提案した。

$$\log(P/P_{sx}) = -0.06417 \log N + \log 0.996 \quad (9)$$

式(9)を昭和55年以降の道示に準抛した床版の疲労寿命評価に適用し耐用年数を試算することによりその妥当性の検討を行った。しかし、累積疲労被害側の適用時に松井式(6)のS-N曲線の勾配を用いて一定移動輪荷重疲労試験結果に換算し最小二乗法により直線回帰すると、回帰S-N曲線の勾配と異なるという課題があった。特に、昭和47年度以降の道示に準抛した試験体を用いた移動輪荷重疲労試験には、一定荷重試験条件下でのデータ数が少ないうえ疲労寿命が $10^5 \sim 10^6$ 回の狭い範囲に集中していることから、これらのデータは勾配の妥当性の検証には余り寄与しない。そこで、この矛盾を解決する方法として前述した勾配一定法を適用し、P-S-N曲線を求めることとした。

$m=-0.07835$ として勾配固定法を用いて求められたP-S-N曲線は式(10)で与えられる。

50%非破壊

$$\log(P/P_{sx}) = -0.07835 \log N_{C,F} + \log 1.3454 \quad (10.a)$$

95%非破壊

$$\log(P/P_{sx}) = -0.07835 \log N_{C,F} + \log 1.0371 \quad (10.b)$$

図-4には、線形累積疲労被害則の適用時にのみ $m=-0.07835$ を用い、一定荷重移動輪荷重疲労試験結果に換算し最小二乗法により直線回帰して得られるS-N曲線と、 $m=-0.07835$ を用いて勾配固定法により求めたP-S-N曲線を比較して示す。図から、勾配固定法により求めた95%非破壊P-S-N曲線は、既往の研究データの下限を示すととも長寿命側では十分安全側の推定寿命を与えることが分る。

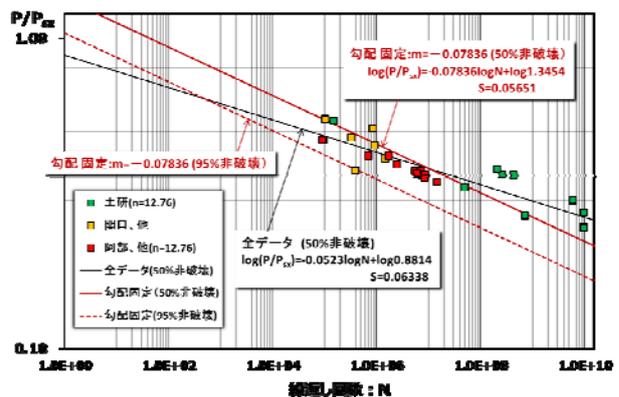


図-4 昭和47年以降道示準抛床版のP-S-N曲線

### 3. 残存疲労推算用S-N曲線の一例

既往疲労データの再解析に基づき得られた疲労寿命照査用P-S-N曲線を以下に示す。

図-5には、本研究に用いた全データと勾配固定法による昭和39年度道示準抛床版と昭和47年以降道示準抛床版のP-S-N曲線を比較して示す。

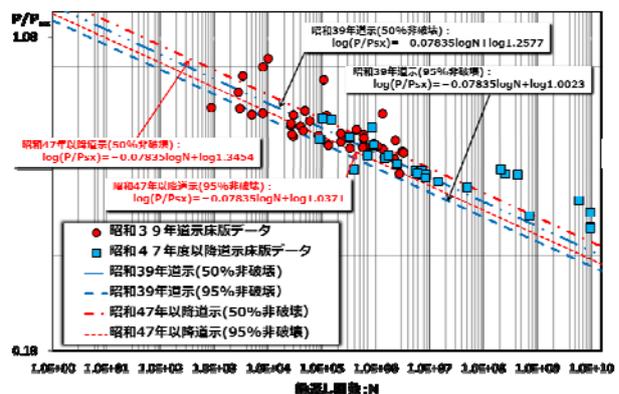


図-5 勾配一定法によるP-S-N曲線のまとめ

以上のP-S-N曲線は、50%非破壊(平均)S-Nにおいても式(6)で与えられる松井式より短寿命側の寿命予測値を与えることになるが、この傾向は既往研究の結果と一致する。

文献3)に基づく輪荷重の繰返し回数推算と、本

P-S-N 曲線を用いた疲労寿命推定手順の一例を示す。

交通センサにより設定される対象橋梁位置での大型車交通量  $ADTT$  (台/日) から、センサ年度における基本輪荷重の繰返し回数  $N_Y$  (台/年) が算定される。基本輪荷重( $P=10\text{tf}=98\text{kN}$ )の1日当たり繰返し回数  $N_d$  は、平成6年~12年に全国81箇所の車両重量調査結果を基に設定された式(11)を用いて、大型車交通量を基本輪荷重の繰返し回数に換算し求められる。

$$N_d = 4 \times 10^{-7} \times (ADTT / 2)^{2.29} \quad (11)$$

ここに、 $N_d$  : 1日当たりの基本輪荷重の繰返し回数 (台/日)、 $ADTT$  : 大型車交通量 (台/日)

基本輪荷重の年当り繰返し回数は、 $N_Y = N_d \times 365$  により求められ、疲労耐久年数  $Y_F$  は、式(11)および式(8),(10)を用いて計算される疲労寿命  $N_{CF}$  を用いて次式で与えられる。

$$Y_F = N_{CF} / N_Y \quad (12)$$

$$\text{ここに、} N_{C,L} = 10^{[\log(P/P_{sx}) - \log C \pm t \cdot \sigma] / m} \quad (13)$$

表-1 には、昭和39年道示準拠 RC 床版を対象に、基本荷重  $P=10\text{tf}=98\text{kN}$ 、衝撃係数  $i=0.385$  として  $ADTT=15,000$ (台/日)、 $ADTT=20,000$ (台/日)に対する疲労寿命の推算結果の一例を示す。

表-1 昭和39年道示準拠床版の疲労寿命推定結果

	95%非破壊	90%非破壊	50%非破壊
$P_{sx} =$	434.10		
$P =$	135.73		
$P/P_{sx} =$	0.313		
$\log(C) =$	0.001	0.050	0.100
$N_F =$	2.865E+06	1.596E+07	6.793E+07
$Y_F(ADTT=15000)$	<b>26.2 年</b>	111.7 年	475.4 年
$Y_F(ADTT=20000)$	<b>13.6 年</b>	57.8 年	246.0 年

#### 4. まとめ

本研究では、過去に実施された移動輪荷重試験結果を用いて、破壊確率  $P$  をパラメータにした S-N 曲線 (P-S-N 曲線) による再解析を試みた。既往データは、配力鉄筋量の異なる昭和39年道示準拠床版と昭和47年度以降道示準拠床版を異なるデータ群として取り扱い、別々の P-S-N 曲線を求めた。

また、従来、勾配  $m$  と切片  $\log C$  を統計量として最小二乗法による直線回帰式として研究者ごとに S-N 曲線が求められ、線形累積疲労被害則に用いる  $m$  と直線回帰式の  $m$  が一致しないという矛盾があった。この矛盾を便宜的に解決する一つの方法として、勾配  $m$  を固定し切片  $C$  のみを統計量として整理する勾配固定法を用いることにより、階段載荷試験結果を一定荷重移動輪荷重疲労試験結果に換算し、この矛盾が生じない RC 床版の疲労寿命推定用の

P-S-N 曲線の一例を示した。

#### <参考文献>

- 1) 道路橋床版設計・施工と維持管理：松井繁之編著，森北出版，2007.10
- 2) Fatigue reliability analysis of highway bridges: Pedro Albrecht, Transportation Record 871, pp.73-80,
- 3) 道路橋の計画的管理に関する調査研究—橋梁マネジメントシステム(BMS)—，国土技術政策総合研究所，国総研資料第523号，平成21年3月
- 4) 輪荷重移動装置による道路橋床版の疲労に関する研究：前田幸雄，松井繁之，第6回コンクリート工学年次講演会論文集，pp.221-224，1984
- 5) Fatigue test of reinforced concrete slab of highway bridge by wheel running machine：Yukio Maeda, Shigeyuki Matsui and Takeshi Okumoto, Transaction of Japan Concrete Institute, Vol.6, 1984
- 6) 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：松井繁之，大阪大学学位論文，1984
- 7) 橋梁の寿命予測：松井繁之，安全工学，Vol.30, No.6, pp.432-440，1991
- 8) 輪荷重の反復作用下での道路橋 RC 床版の低サイクル疲労特性：園田恵一郎，堀川都志雄，土木学会論文集，第390号/V-8，1988.2
- 9) 道路橋床版の疲労耐久性に関する実験：国総研資料，第28号，2002
- 10) 自走式試験機による道路橋床版の使用限界の評価：横山広，長屋優子，関口幹夫，堀川都志雄，第4回道路橋床版シンポジウム講演論文集，pp.49-54，2004
- 11) RC 床版の輪荷重走行疲労実験：関口幹夫，宍戸薫，平成11年東京都土木研究所年報，pp.107-116，1999
- 12) RC 床版の輪荷重走行疲労実験：関口幹夫，宍戸薫，森俊介，平成14年東京都土木研究所年報，pp.89-100，2002
- 13) 輪荷重走行疲労試験機を用いた道路橋床版の共通試験：関口幹夫，平成18年東京都土木研究所年報，pp.67-73，2006
- 14) 輪荷重走行試験結果の統一的评价に関する検討：大西弘志，上條崇，関口幹夫，長屋優子，水越秀和，肥後孝倫，堀川都志雄，構造工学論文集，Vol.55A，pp.1497-1508，2009.3
- 15) ゴムタイヤ式輪荷重走行疲労試験機による RC 床版の幅の検討：関口幹夫，長屋優子，横山広，大西弘志，上條崇，堀川都志雄，構造工学論文集，Vol.55A, pp.1521-1528, 2009.3
- 16) 丸鋼鉄筋を用いた RC 床版の疲労特性に関する実験的研究：赤代恵司，三田村浩，渡辺忠朋，岸徳光，構造工学論文集，Vol.57A，pp.1297-1304, 2011.3
- 17) 輪荷重走行疲労実験における車輪寸法が RC 床版の耐疲労性に及ぼす影響および評価法：阿部忠，木田哲量，水口和彦，川井豊，構造工学論文集，Vol.57A，pp.1305-1315，2011.3
- 18) 道路橋 RC 床版の押抜きせん断耐力および耐疲労性の評価：阿部忠，木田哲量，高野真希子，川井豊，土木学会論文集 A1，Vol.67, N0.1, pp39-54, 2011