

# 論文 累積損傷度を考慮した下面増厚補強 RC 床版の疲労寿命に関する研究

金田 尚志\*1・吉川弘道\*2・小玉 克巳\*2・佐藤 貢一\*3

要旨：鉄筋コンクリート床版下面に補強材を取り付け、ポリマーセメントモルタルで一体化させた下面増厚補強 RC 床版の最大耐荷力向上、たわみ量低減、疲労寿命延長などの補強効果が過去の実験で確認することができた<sup>1),2)</sup>。本研究では滞水環境下における定点移動繰返し載荷試験の結果について、せん断力影響線とマイナー則を用いて累積損傷度を算出し、各載荷位置における載荷回数の影響を考慮した疲労寿命を換算して、その疲労寿命に関する検討を行った。

キーワード：鉄筋コンクリート床版, 下面増厚補強, せん断力影響線, 累積損傷度, 疲労寿命

## 1. はじめに

平成4年より本学において下面増厚補強した RC 床版の静的載荷試験と滞水環境下における定点移動繰返し載荷試験を行い、その補強効果を確認した。実橋 RC 床版の移動輪荷重載荷状態に近づけるため、載荷板を移動させる定点移動繰返し載荷で実験を行ってきた。本実験の場合、載荷点は3点とし、任意の載荷回数で別の載荷点に荷重を移動して、最初に押抜きせん断破壊したところで実験を終了した。この場合の疲労破壊回数は、全ての載荷位置における載荷回数の合計とする場合が多い<sup>3)</sup>。しかし、ここでは載荷板形状や載荷位置等が床版の疲労寿命に及ぼす影響を正しく評価することができない。載荷位置間距離が長ければ隣の載荷位置への影響は少く、短ければ、影響が大きい。そこで、その影響を考慮した疲労寿命を算出し、それを換算回数としてS-N線を描いた。また疲労性状と補強工法についても検討を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体と特徴

実験に用いた供試体は実橋床版の80%のモデルで、図-1に示すとおり主鉄筋にはSD-

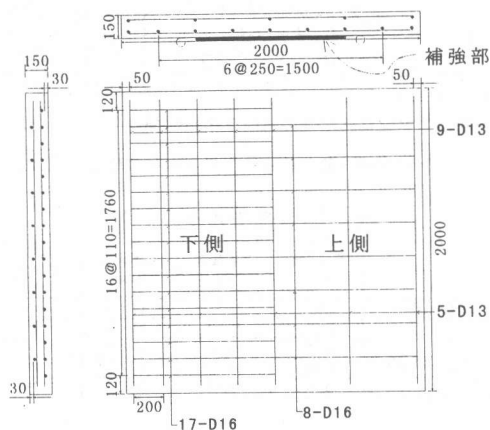


図-1 供試体概略図

295A-D16 を 110mm ピッチで、配力筋には SD-295A-D13 を 250mm ピッチとし、上側にはその半分を配筋し、主筋かぶりは 30mm とした。コンクリート材令 28 日の圧縮強度は 22.6MPa であった。補強部は床版下面 1m×2m で、コンクリート脆弱部をディスクサンダーで取り除いてから増厚を行い、補強ポリマーセメントモルタルの付着力とアンカーボルト (6 本/1m<sup>2</sup>, 1 本当 16kN の引抜き耐力) で母床版と増厚部を一体化させている。補強工法と補強部の性状は表-1~表-3 に示すとおりで、各供試体は次の

\*1 武蔵工業大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員)

\*2 武蔵工業大学教授 工学部土木工学科, 工博 (正会員)

\*3 奈良建設(株) 技術研究所主任研究員 (正会員)

表-1 補強概要と静的試験結果

供試体 No.	補強工法	補強部モルタル	静的耐力 (kN)
	補強材料	補強厚 (cm)	
N-1, 2, 3	無補強	-	377.3 (419.4)
①	プレキャスト版接着	アクリル酸エステル系①	490.3 (498.8)
	CFRP	1.3	
②	プレキャスト版接着	アクリル酸エステル系①	485.4 (517.4)
	PC 鋼線	1.5	
③	型枠流し込み	アクリル酸エステル系②	445.2 (513.0)
	D6 鉄筋メッシュ	2.0	
④	型枠流し込み	スレゾブ シンコム系	490.3 (513.0)
	D6 鉄筋メッシュ	2.0	
⑤	コテ塗り	77リル系	470.7 (513.0)
	D6 鉄筋メッシュ	2.0	
⑥, ⑦	吹き付け	77リル系	529.8 (513.0)
	D6 鉄筋メッシュ	2.0	
⑧	吹き付け	77リル系	441.9
	D6 鉄筋メッシュ	2.0	

( )は松井式による理論値<sup>4)</sup>

表-2 補強材料性状

	弾性係数 (MPa)	1本あたりの断面積 (cm <sup>2</sup> )		破断強度 (MPa)	
	降伏点応力 (MPa)	ピッチ (cm)		引張剛性 (kN)	
		主鉄筋	配力筋	主鉄筋	配力筋
鉄筋 D6	1.88 × 10 <sup>4</sup>	0.3187		519.4	
	356.7	7.0	5.0	84151	117812
CFRP	3.43 × 10 <sup>4</sup>	0.1248		2648.0	
	-	10.0	2.5	42806	171225
PC 鋼線	1.98 × 10 <sup>4</sup>	0.0605		2107.0	
	-	8.0	2.0	14823	59290

引張剛性=(単位幅あたりの総断面積)×(弾性係数)

弾性係数と断面積の異なる補強材料を引張剛性で評価できる

表-3 補強部モルタル性状

	曲げ強度 (MPa)	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (MPa)	付着強度 (埋研式) (MPa)
PAE 系①	9.085	21.36	1.17 × 10 <sup>4</sup>	2.450
PAE 系②	6.203	17.35	0.96 × 10 <sup>4</sup>	1.205
SBR 系	9.996	28.71	1.84 × 10 <sup>4</sup>	2.754
77リル系コテ塗り	8.420	30.00	1.03 × 10 <sup>4</sup>	2.290
77リル系吹き付け	10.200	38.80	1.14 × 10 <sup>4</sup>	3.760

ような特徴を持つ。①：補強部の剛性が高く、たわみ量や母床版の鉄筋応力の低減効果が大きい。②：PC 鋼線と補強モルタルの付着が低いために、そこにずれが生じて母床版の変形に追従し、疲労試験においてかえって良い結果が得られた。③弾性係数が低く、付着強度が低いモルタルで補強。④：弾性係数が高く、付着強度が高いモルタルで補強。⑤⑥⑦：弾性係数が低く、付着強度が高いモルタルで補強しこの材料でコテ塗り、吹き付けの2つの工法で施工した。⑧：無補強床版を乾燥状態で中央点載荷におけるたわみが劣化度<sup>5)</sup>1.0 となるまで、上限荷重 166.6kN 下限荷重 29.4kN で B 点 15 万回、A, C に 5 万回繰返し載荷を行って劣化させ、その後アクリル系吹き付けにて補強した。

## 2.2 実験方法

載荷条件は図

-2 のように、40cm × 16cm × 1cm(道路橋示方書寸法値の80%)の載荷板を介して行い、二

辺自由二辺単純支持とした。静的載荷試験は、中央の B 点で行い、疲労試験は供試体 No. ⑤, ⑥, ⑦, ⑧は載荷板間隔を中央から 25cm, それ以外の供試体は 50cm とした。疲労試験は床版上面に水を張り(写真-1)一番過酷な条件とし、交通震動を想定して約 5Hz で載荷した。

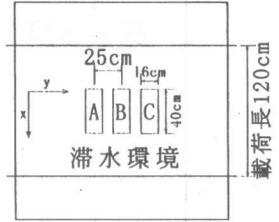


図-2 載荷条件

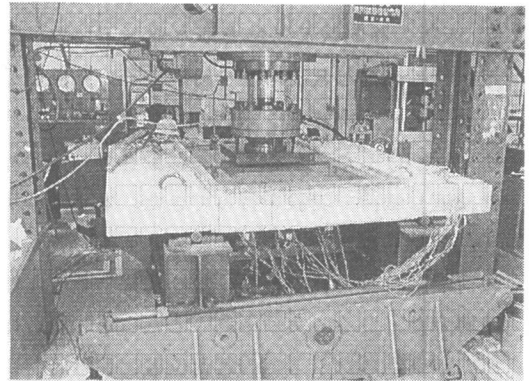


写真-1 滞水環境疲労試験状況

## 3. 実験結果

疲労試験の破壊形態は全て、押抜きせん断破壊であり、破壊した時点で試験を打ち切りとし、実験結果を表-4 に示す。試験終了後の床版下面を写真-2 に示す。供試体 N-2, ②, ⑦は 3 点とも 200 万回載荷終了後も破壊に至らなかったため上限荷重を上げた。下面増厚補強により、疲労寿命を延長できることが確認できる。供試体③, ④は、試験開始直後に補強部の剥離が発生した為に補強効果が得られず、早期に破壊した。これは、補強工法と補強部のモルタル性状が疲労試験に好ましくなかったと考えられる。⑧は、試験前に劣化を再現しているため、同じ条件の⑥, ⑦と比べると早く破壊しているが、無補強と比較すると寿命が延びている。

表-4 疲労試験結果

供試体 No.	上限荷重 (kN)		載荷回数 (回)		
	下限荷重 (kN)		A 点	B 点	C 点
N-1	145.0		$3.0 \times 10^5$	$5.0 \times 10^3$	-
	19.6				
N-2	98.0		$2.0 \times 10^6$	$2.0 \times 10^6$	$2.0 \times 10^6$
	14.7				
	137.2		$8.2 \times 10^5$	$5.0 \times 10^5$	$5.0 \times 10^5$
	14.7				
N-3	166.6		-	$2.5 \times 10^5$	-
	29.4				
①	166.6		$4.3 \times 10^4$	-	$1.6 \times 10^6$
	29.4				
②	166.6		$2.0 \times 10^6$	$2.0 \times 10^6$	$2.0 \times 10^6$
	29.4				
	215.6		$3.6 \times 10^4$	-	$3.8 \times 10^3$
	29.4				
③	166.6		$9.8 \times 10^4$	$3.0 \times 10^5$	-
	29.4				
④	166.6		-	$3.9 \times 10^5$	-
	29.4				
⑤	166.6		$1.6 \times 10^6$	$2.0 \times 10^6$	-
	29.4				
⑥	166.6		$2.0 \times 10^6$	$2.0 \times 10^6$	$1.7 \times 10^6$
	29.4				
⑦	166.6		$2.0 \times 10^6$	$2.0 \times 10^6$	$2.0 \times 10^6$
	29.4				
	196.1		-	$6.0 \times 10^4$	-
	29.4				
⑧	166.6		-	$7.0 \times 10^5$	-
	29.4				

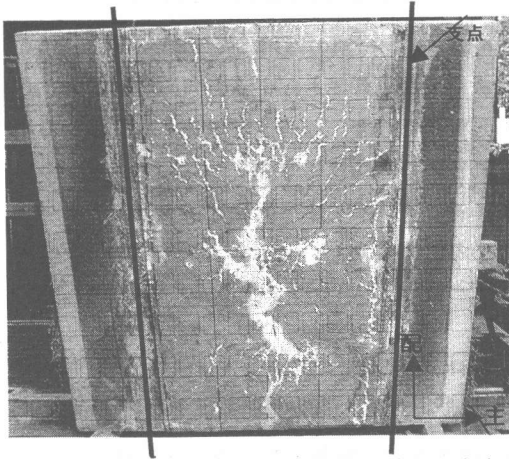


写真-2 疲労試験後の床版下面

く実験ができる。また載荷点を移動することにより、床版の広範囲を劣化させることができ、ある程度輪荷重をシミュレートできる利点がある。しかし、各載荷点に1回ずつ載荷させることは不可能であり、実際にはある回数まで載荷した後別の載荷点に載荷するという方法で試験を行い、疲労破壊した時点で実験を終了する。一般に、各載荷点の載荷回数の合計を疲労破壊回数  $N$ 、(上限荷重/静的耐荷力)を荷重比  $S$  として  $S-N$  線を描いているが、載荷回数の合計を疲労破壊回数とするのは問題である。載荷板の形状や、載荷位置間の距離等の影響を考慮する必要がある。

#### 4.2 破壊形態

松井らの研究<sup>6)</sup>において、輪荷重走行試験機での床版のせん断破壊の  $S-N$  線を求めるのに、幅  $B$  の梁のせん断力  $P_{SX}$  を用いている。載荷回数が増えると、主筋方向に一定間隔でひび割れが進展後、版構造から梁状し、せん断破壊するためである。本実験の床版の疲労試験における破壊形態は、図-3 のように載荷板から支点に向かって押抜かれており、松井らの実験結果と似ている。しかし、載荷板を介しての繰返し載荷の為、梁状にはなっておらず、載荷板から配力筋方向にも押抜かれている。



図-3 せん断破壊横断面図

### 4. 換算回数の算出

#### 4.1 定点移動繰返し載荷試験の特徴

RC 床版の疲労試験として輪荷重走行試験が行われており、松井らによる研究によって乾燥状態と水張り環境における  $S-N$  線が得られている<sup>5)</sup>。輪荷重走行試験ができる施設も限られており、費用も膨大となる為、載荷点を移動する定点移動繰返し載荷試験を行っている研究機関も多いのが現状である。定点移動繰返し載荷試験は、試験機の制約を受けず、比較的費用も安

#### 4.3 せん断力分布の算出

床版の破壊形態が押抜きせん断破壊であったことから、疲労破壊の主要原因は載荷によって発生するせん断力であるといえる。まず各載荷位置における発生せん断力の分布を求める。このときの床版の主筋方向 ( $x$  方向とする) と配力筋方向 ( $y$  方向とする) の剛性を考慮し、FEM 解析でせん断力を算出する。ここでは薄板として扱っているため、板厚がせん断力分布に及ぼす影響は無視した。直交異方性度はひび割れの発生

を考慮し、主筋方向と配力筋方向の断面二次モーメント(配筋状態や中立軸位置を考慮)の比から定めた。A, B, C 点すべての載荷点上限荷重を載荷したときに発生するせん断力を主筋方向、配力筋方向にそれぞれ  $Q_x$ ,  $Q_y$  とする。 $Q_x$  と  $Q_y$  を比較すると、 $Q_x$  のほうが大きく、破壊形態からみても、主筋方向から押抜かれており、押抜き角度も大きいことから、 $Q_x$  に着目する。各点における  $Q_x$  の分布は図-4, 5 (例として供試体 No. ⑤) のようになり、最大せん断力発生位置は載荷板縁で、そのせん断力を  $Q_{xmax}$  とする。

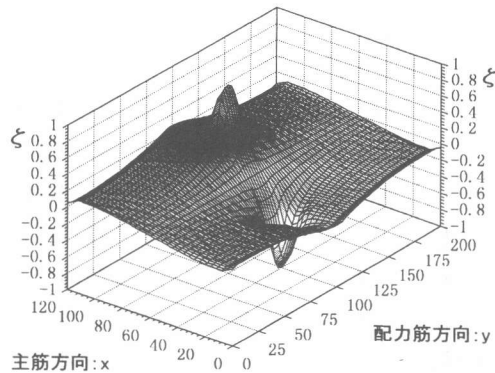


図-4 せん断力分布:  $Q_x$  (B点載荷)

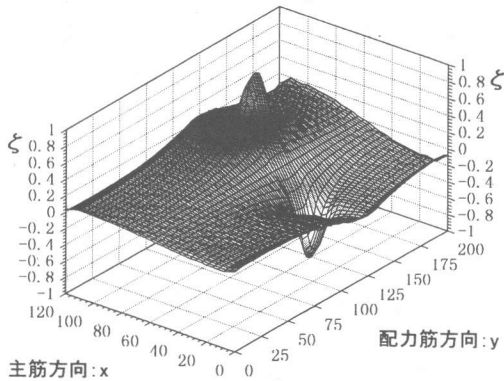


図-5 せん断力分布:  $Q_x$  (C点載荷)

#### 4.4 せん断力影響線

最大せん断力発生位置である支点から 40cm のラインで、図-6(例として供試体 No. ⑤) のように載荷板縁を 1 とした影響線を算出する。この影響線から、せん断力影響係数を求め、各載荷位置における主筋方向のせん断力を式(1)に表す。

$$\begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \zeta_{11} & \zeta_{12} & \zeta_{13} \\ \zeta_{21} & \zeta_{22} & \zeta_{23} \\ \zeta_{31} & \zeta_{32} & \zeta_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{1max} \\ Q_{2max} \\ Q_{3max} \end{bmatrix} \quad (1)$$

ある載荷位置:  $j$  に載荷したときに、その載荷板縁:  $k$  に作用するせん断力にせん断力影響係数  $\zeta_{jk}$  を乗じることにより、他の載荷位置に作用している橋軸直角方向のせん断力が算出できる。

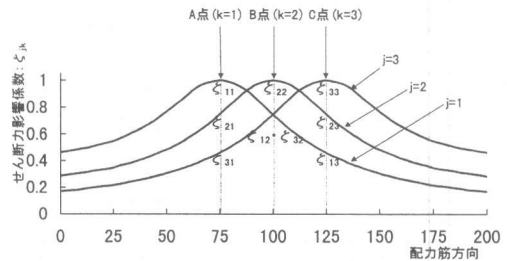


図-6 せん断力影響線例 (No. ⑥)

#### 4.5 マイナー則の適用

載荷位置以外にも、主筋方向のせん断力が作用しているので、載荷位置以外にも損傷が蓄積されている。既往の研究で、コンクリートの疲労に対して、マイナー則を適用することが可能であることが明らかになった<sup>7)~9)</sup>。一般にマイナー数  $M$  は式(2)のように表すことができる。

$$\Delta M_k = \frac{n_k}{N_k}, \quad M = \sum_{k=1}^n \Delta M_k = \sum_{k=1}^n \frac{n_k}{N_k} \quad (2)$$

$n_k$ : ある応力振幅下 ( $Q_k$ ) において受けた回数,  
 $N_k$ :  $Q_k$  が単独に作用したときの疲労寿命

各載荷段階における損傷度を算出する。各供試体の載荷パターンは図-7 のように分類される。荷重比  $S = (\text{上限荷重} / \text{松井式})$ <sup>4)</sup> による静的理論値とする。各供試体で載荷荷重と載荷位置、載荷回数の履歴が異なる。各載荷位置における各荷重段階での損傷度を算出し、累積損傷度からその供試体の疲労寿命の推定を試みる。マイナー則を適用するにあたって、必要となる基本 S-N 線はこれまでの実験結果<sup>1), 2)</sup> と他の文献<sup>3)</sup> から次のように定めた。

表-5 マイナー数増分表

	A点の 損傷度	B点の 損傷度	C点の 損傷度
A点に n <sub>1</sub> 回載荷 j=1	$\Delta M_{11} = \frac{n_1}{N(Q_1)}$	$\Delta M_{12} = \frac{n_1}{N(Q_2)}$	$\Delta M_{13} = \frac{n_1}{N(Q_3)}$
B点に n <sub>2</sub> 回載荷 j=2	$\Delta M_{21} = \frac{n_2}{N(Q_1)}$	$\Delta M_{22} = \frac{n_2}{N(Q_2)}$	$\Delta M_{23} = \frac{n_2}{N(Q_3)}$
C点に n <sub>3</sub> 回載荷 j=3	$\Delta M_{31} = \frac{n_3}{N(Q_1)}$	$\Delta M_{32} = \frac{n_3}{N(Q_2)}$	$\Delta M_{33} = \frac{n_3}{N(Q_3)}$
累積損傷度: M <sub>k</sub>	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub>

損傷度を算出し、各点における累積損傷度 M<sub>k</sub> を算出する。例として供試体 No. ⑥のマイナー数を表-6 に示す。

表-6 マイナー数算出例 (No. ⑥)

	載荷位置					
	A点 (k=1)		B点 (k=2)		C点 (k=3)	
	ΔM	M	ΔM	M	ΔM	M
A点 200万回載荷	0.893	0.893	0.143	0.143	0.001	0.001
B点 200万回載荷	0.099	0.992	0.893	1.036	0.099	0.100
C点 187万回載荷	0.001	0.993	0.117	1.153	0.736	0.836

4.6 S-N線の算定

実験終了後、一番損傷度の大きい点 (M<sub>k</sub> が最も高い点) に着目して、それ以外の載荷点の影響を差引きその載荷点に単独で載荷があった場合の予想疲労寿命を換算回数とし、次式で求め、

$$N_k = n_k \times \sum_{j=1}^3 \frac{\Delta M_{jk}}{\Delta M_{kk}} \quad (j=1, 2, 3) \quad (6)$$

例として供試体 No. ⑥の換算回数を示す。

$$N_2 = 200万 \times \left( \frac{0.893}{0.893} + \frac{0.143}{0.893} + \frac{0.117}{0.893} \right) \quad (7)$$

この換算回数を求めることにより、全ての載荷位置での載荷回数を考慮することができたので、この換算回数をその供試体の疲労寿命として、S-N線を算出する。上限荷重比 S: P/P<sub>0</sub> (上限荷重/松井式<sup>4)</sup>による理論値) と換算回数を表-7に示し、換算回数を用いたS-N曲線を図-10に示す。実験途中で上限荷重を上げたものについては、その前の載荷段階の損傷度を考慮し、二段階載荷は上の荷重でプロットした。供試体 No. ③, ④は、試験開始直後に補強部が剥離し

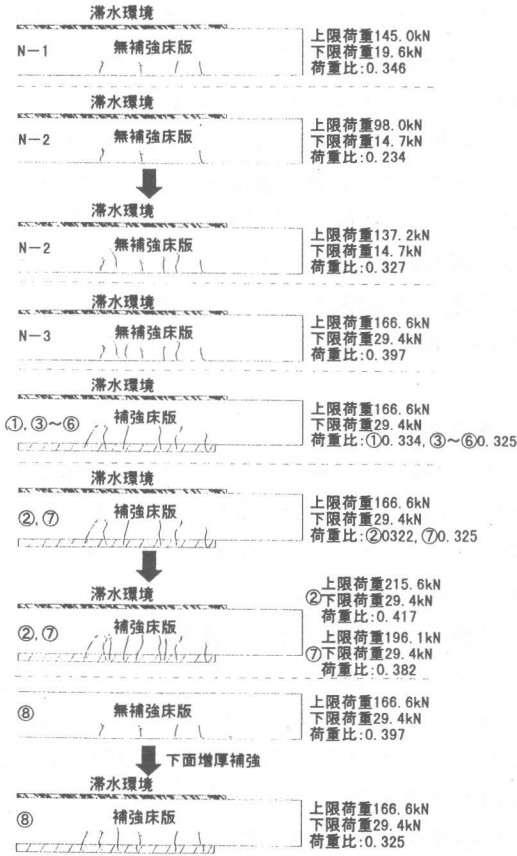


図-7 疲労試験載荷パターン

滞水環境:  $\log S = -0.056 \log N + \log 0.736$  (3)  
 乾燥状態:  $\log S = -0.056 \log N + \log 1.324$  (4)  
 この基本 S-N 線は荷重レベルであるので、本研究ではこれをせん断力レベルに変換してからマイナー則を適用した。載荷している点を j とし、着目する点を k としているので、このときのマイナー増分  $\Delta M_{jk}$  は次のように表せる。

$$\Delta M_{jk} = \frac{n_j}{N(Q_j^i)}, \quad M_k = \sum_{j=1}^3 \Delta M_{jk} \quad (5)$$

$\Delta M_{jk}$ : j 点に載荷しているときの k 点のマイナー増分,  $n_j$ : j 点に載荷した回数,  $Q_j^i$ : j 点に載荷しているときに k 点に作用するせん断力,  $N(Q_j^i)$ :  $Q_j^i$  が単独に作用した場合の疲労寿命各点のマイナー増分の例を表-5 に示す。実験途中で上限荷重を上げたものや、劣化を与えてから補強した No. ⑧についても、各荷重段階で

て早期に破壊した為、近似式から除いた。

表-7 荷重比と換算回数

供試体 No.	荷重比 : S	換算回数 : N
N-1	0.346	$3.02 \times 10^5$
N-2	0.327	$8.65 \times 10^5$
N-3	0.397	$2.50 \times 10^5$
①	0.334	$1.65 \times 10^6$
②	0.417	$3.98 \times 10^4$
③	0.325	$3.03 \times 10^5$
④	0.325	$3.90 \times 10^5$
⑤	0.325	$2.32 \times 10^6$
⑥	0.325	$2.59 \times 10^6$
⑦	0.382	$2.07 \times 10^5$
⑧	0.325	$7.00 \times 10^5$

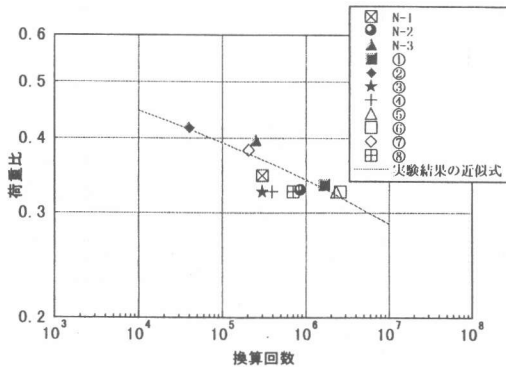


図-10 S-N線

### 5. まとめ

せん断力影響線とマイナー則を用いて、換算回数を算出した。これにより、定点移動繰返し載荷試験において、すべての載荷位置における載荷回数を考慮することができた。累積損傷度を考慮することにより、実験途中で上限荷重を上げたものについては評価できたが、母床版を劣化させてから補強し、疲労試験を行った No. ⑧のようなタイプについては、適用することに疑問が残る。無補強床版を乾燥状態で上限荷重 166.6kN における疲労寿命は  $10^7 \sim 10^8$  と推定され、マイナー増分は微々たるものだが、補強後比較的早期に破壊している。劣化再現で発生したひび割れから水が浸入したためと考えられる。補強工法、材料性状により、補強床版の疲労寿命に影響が出てくる。以下のように補強することで、疲労寿命の延長が期待できる。付着強度が高く、弾性係数の低いポリマーセメントモル

タルで補強する。補強部の剛性を小さくし、母床版の変形に追従させ、母床版と補強部の界面に応力が生じないようにする。本研究は、本実験モデルのみを対象としているが、基本 S-N 線とせん断力分布を得ることができれば、色々なタイプのモデル床版に適用することができると考えられる。今後は床版を橋軸方向に離散化し、せん断力影響線とマイナー則を用いて輪荷重走行環境下での損傷度を算出し、本実験結果との比較、検討を行っていく。

### 参考文献

- 1) 永井 健・小玉 克己・佐藤 貢一：下面増厚補強した鉄筋コンクリート床版に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 15，No. 2，pp. 341-346，1993. 6
- 2) 佐藤 貢一・小玉 克己：下面増厚した RC 床版の疲労に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 17，No. 2，pp. 917-922，1995. 6
- 3) 例えば，木曾 茂・神谷 誠・飯東 義夫：橋梁床版の補強に関する実験的研究，土木学会第 48 回年次学術講演会，第 1 部，pp. 278-279，1993. 8
- 4) 前田 幸男・松井 繁之：鉄筋コンクリート床版の押抜きせん断耐力の評価式，土木学会論文集，第 348/V-1，pp. 133-141，1984. 8
- 5) 松井 繁之・前田 幸男：道路橋 RC 床版の劣化度判定法の一提案，土木学会論文集，第 374/I-6，pp. 419-426，1986. 10
- 6) 松井 繁之：移動輪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，Vol. 9，No. 2，pp. 627-632，1987. 6
- 7) 阪田 憲次・矢村 潔・西林 新蔵：ランダム荷重を受けるコンクリートの疲労特性に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 7，pp. 317-320，1985. 5
- 8) 岡田 清編著：コンクリートの耐久性，朝倉書店，1986. 1
- 9) 石井 孝男：疲労寿命を考慮した鋼橋 RC 床版の設計法と維持管理に関する研究，1994. 1