

走行輪荷重によるRCモデルはりの疲労強度実験

EXPERIMENTS ON FATIGUE STRENGTH OF RC MODEL BEAMS UNDER A RUNNING LOAD

川口昌宏* 柳沼善明** Victor R. MACAM Jr.*** 飯井幸弘****

By Masahiro KAWAGUCHI, Yoshiaki YAGINUMA,

Victor R. MACAM Jr. and Yukihiro II

Reinforced concrete simple beams without shear reinforcement were tested under a static load, a repeated load on a fixed point of a beam or a running load on a beam. The dimensions of the beams were 5 cm wide and 8 cm high. They had four variations of spans from 40 to 100 cm. A significant reduction of the fatigue strength was observed under a running load. A running load seemed to give wide or alternative stress amplitude to the beams and to give the beams more serious damage than the load on a fixed point.

1. まえがき

著者らは橋梁のモデルRC床版の疲労強度に関する研究を行なっている。床版については、固定した同一の場所に繰返し荷重を作用させた場合よりも、輪荷重を走行させた場合の疲労強度が著しく低下することが多くの実験から明らかにされている。これらの実験結果は、走行する輪荷重が構造物の疲労強度に顕著な影響を及ぼしていることを示している。走行輪荷重による床版の疲労の研究¹⁾が実施されてからかなり最近になって、走行輪荷重下におけるはりの疲労強度の重要性が認識されるようになってきた。そこで、本研究は走行輪荷重の疲労に及ぼす影響を詳細に理解するために、単純はりの疲労実験を行なった。

2. 材料と供試体

使用したマイクロコンクリートの配合(表-1)は、著者のモデル床版の実験^{2),3)}と同じ配合である。ここでのマイクロコンクリートはモルタルの一種であり、骨材の最大寸法は2.5mmで、早強ボルトランドセメントを使用した。

* 工博 日本大学教授 理工学部交通土木工学科 (〒274 船橋市習志野台7-24-1)

** 工博 日本大学専任講師 理工学部交通土木工学科

*** 日本大学研究生 理工学部交通土木工学科

**** 日本大学副手 理工学部交通土木工学科

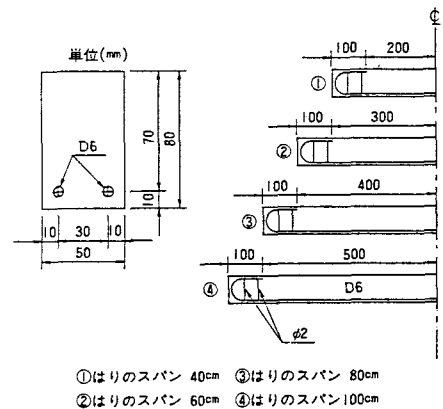
表－１ マイクロコンクリートの配合

水セメント比 W/C(%)	砂セメント比 S/C(%)	重 量 百 分 率(%)			最大骨材 寸法(mm)	骨材粒度
		水	セメント	砂		
65	250	15.7	24.1	60.2	2.5	未調整

主鉄筋には異形鉄筋D6を用い、その引張強さと降伏点強さはそれぞれ55.3kgf/mm²と40.1kgf/mm²であった。また、はり端部のスターラップには直径2mmの焼きなまし鋼線を用い、その引張強さと降伏点強さはそれぞれ33.1kgf/mm²と25.8kgf/mm²であった。

実験に用いた供試体のはりの断面寸法は、幅5cm、高さ8cmで、はりの全長は60、80、100、120cmの4種類である(図－1)。はりの鉄筋比は1.8%であった。

はり側面が下になるように型枠内に鉄筋を配置して、マイクロコンクリートを打設した。マイクロコンクリート中の気泡は型枠を振動させて取り除いた。はりは打設から24時間後に脱型し、その後10日間水中養生を行なった。さらに、疲労実験を実施するまでの28日間気中養生を行なった。



図－1 供試体の寸法と配筋

3. 実験－1 (4種類の異なるスパンに関する実験)

輪荷重が走行する時の疲労状況を詳しく観察するために、まず最初の実験として4種類の異なるスパンのはりについて、次の静的載荷実験ならびに輪荷重の走行実験を実施した。

3. 1 静的載荷実験

はりの静的載荷実験はアムスラー試験機(容量50tf)を用いて行なった。両端をピンで直接支持した単純ばりに、幅3cm、厚さ1.5cmの木製の板を通して荷重を加えた。この静的載荷実験結果を表－2に示した。また、このときの材料の強度試験の結果を表－3に示した。材料強度試験には円柱供試体(φ5x10cm)5個を1組として行い、それぞれ圧縮強度と引張強度の変動係数は5%から8%の間であった。表－2中のa/d>2でせん断破壊したはりについて、岡村・檜貝⁵⁾によるのせん断耐力の計算値は実験値と良く一致した。せん断耐力の実験値と計算値との比の平均値は1.11、変動係数は2.7%であった。

破壊に至るまでのひびわれの伸展状況を図－2に示した。すべてのスパンにおいて、鉛直方向の曲げひびわれが載荷点下面に生じ、その後斜めひびわれがスパンの片側に生じた。SC-1、SC-2、SD-1を除いて、この斜めひびわれが伸展して破壊に至った。はりのたわみは、破壊直前に突然増大する傾向にあった。このことは、はりのせん断破壊は急激に起こることを示している。SC-1、SC-2、SD-1の供試体は曲げ破壊であった。

表-2 静的載荷実験の結果 (実験-1)

スパン長 (cm)	供試体名	支点からの荷重 位置(cm)	静的耐荷力 (kgf)
40	SA-1	20	1151
	SA-2	10	851
	SA-3	10	1960
	SA-4	10	1075
60	SB-1	30	1084
	SB-2	20	936
	SB-3	10	1240
80	SC-1	40	895
	SC-2	40	946
	SC-3	20	888
100	SD-1	50	765

表-3 各はりの材料強度

スパン長 (cm)	圧縮強度 (kgf/cm^2)	引張強度 (kgf/cm^2)
40	368	47.1
60	388	34.9
80	481	41.7
100	453	42.1

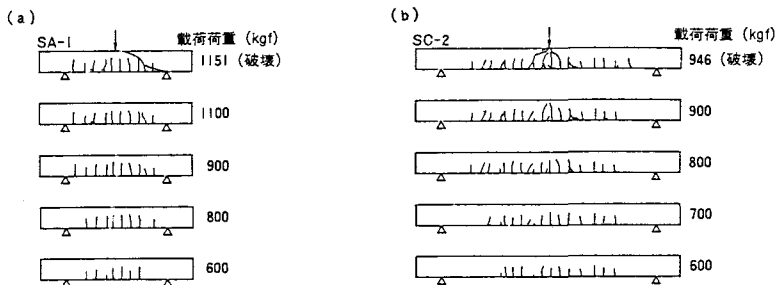


図-2 静的載荷実験でのはりのひびわれ

3.2 輪荷重の走行実験

(1) 輪荷重の走行実験装置

輪荷重の走行実験装置(図-3)は、水平方向に可動できる台の上にはりを取り付けるもので、エアーストンにより1分間に15回動かすことができる。荷重は、おもりとレバーにより車輪を通してはりに作用するものである。車輪は硬質ゴムタイヤをつけた鉄製で、市販されている²⁾。はりの支持条件は、はりを台の上に固定するためヒンジ構造とした。

(2) 結果と考察

輪荷重の走行実験結果を表-4に示した。疲労実験において、破壊荷重の実験値を用いて算出した荷重比は、基準となる破壊荷重が実験から得られる値であるため、供試体の条件あるいは他の要因で変動する。そのため、本論ではせん断耐力式の計算から求まる値を基準の破壊荷重として荷重比を求め、疲労実験結果を整理した。基準荷重の計算は、実験結果に最も適合すると考えられる岡村・檜貝によるせん断耐力式⁵⁾(式

表-4 輪荷重の走行実験結果 (実験-1)

スパン長 (cm)	供試体名	走行荷重 (kgf)	荷重比	破壊回数
40	MA-1	600	0.477	2996
	MA-2	550	0.438	64236
	MA-3	593	0.472	1452
60	MB-1	600	0.591	796
	MB-2	550	0.541	1658
	MB-3	500	0.492	104532
	MB-4	500	0.492	36506
	MB-5	450	0.443	138444
80	MC-1	600	0.606	1192
	MC-2	550	0.556	498
	MC-3	500	0.505	42114
	MC-4	475	0.480	159038
	MC-5	525	0.531	30442
100	MD-1	500	0.544	1082
	MD-2	400	0.435	305978
	MD-3	450	0.490	61402

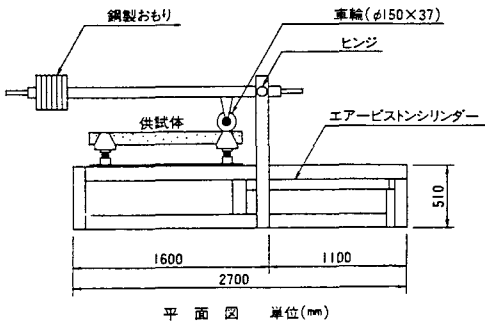


図-3 輪荷重の走行実験装置

-1)を用いた(付録参照)。

$$V = 0.94 f_c'^{1/3} [0.75 + 1.40 / (a/d)] (1 + \beta_p + \beta_d) b_w \cdot d \quad (1)$$

ただし、 $\beta_p = p_w^{1/2} - 1$ 、 $\beta_d = (100/d)^{1/4} - 1$

ここに、 V はせん断耐力、 f_c' はコンクリートの圧縮強度、 a は荷重作用点から支承までの距離、 d は有効高さ、 b_w は部材の幅、 p_w は鉄筋比である。走行輪荷重下ではりが破壊したとき、支点から破壊に至る支配的な斜めひびわれの先端の位置までの長さは $2d$ から $3d$ であった。したがって、せん断耐力は a/d を2.5として計算した。

図-4、図-5に示したように、すべての破壊形式はせん断破壊であった。4種類の異なるスパンの供試体において、ひびわれの進行する過程はほぼ同じであった。まず、曲げひびわれが斜めひびわれへと発展し、そのひびわれが最終的にはり上縁へと伸展する。破壊につながる致命的なひびわれは、アーチ型のものであった。供試体MB-3の主鉄筋に沿って発生したひびわれは(図-4)、付着疲労による損傷を示していると思われる。輪荷重の走行時では、付着応力の振幅が大きくなるか、あるいは交番しているものと考えられる。斜めひびわれの成長が遅く、疲労の過程に長い定常状態をもつはりは、疲労寿命が長かった。

以下の3.3に述べるように、走行輪荷重下での疲労強度は、定常繰返し載荷下での疲労強度よりも著しく低下した。このことは、橋梁の設計において、輪荷重の走行による疲労実験が重要であることを示唆していると言える。

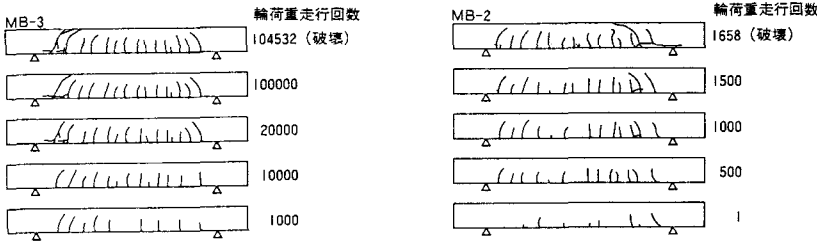


図-4 走行輪荷重下でのひびわれの進行 (MB供試体)

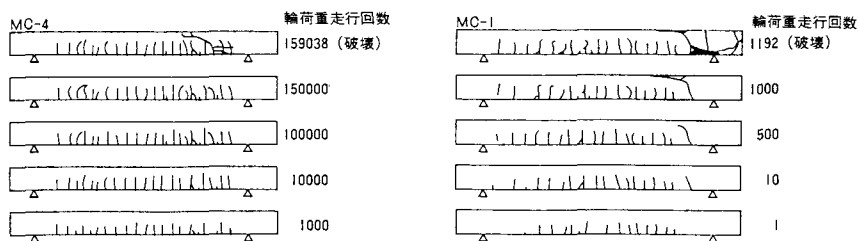


図-5 走行輪荷重下でのひびわれの進行 (MC 供試体)

3. 3 定点繰返し載荷実験

定点繰返し載荷におけるはりの疲労強度については多くの研究が報告されている^{4), 6)}が、輪荷重の走行による疲労と定点繰返し載荷による疲労との関連についてはほとんど何も分かっていない。

(1) 実験方法

荷重の載荷位置は、40cmと60cmのスパン長のはりに対して、輪荷重の走行時に疲労破壊が起きた位置とした。それは、疲労破壊が生じた時、走行している輪荷重は支配的な斜めひびわれの先端に位置していると仮定したためである。したがって、荷重の載荷位置はスパンごとに異なる。定点繰返し載荷実験は疲労試験機により行い、載荷周期は4 Hzである。輪荷重の走行実験の載荷周期とは異なるが、疲労強度への影響はないものと判断している。はりの支持条件は静的載荷実験と同じである。

(2) 結果と考察

はりの破壊状況を図-6に示した。はりの破壊に至る過程は、まず曲げひびわれが発生し、斜めひびわれへと発達した。表-4の輪荷重の走行実験結果と表-5の定点繰返し載荷実験結果をまとめて図-7に示した。図中のS-N曲線は最小自乗法により求めた。

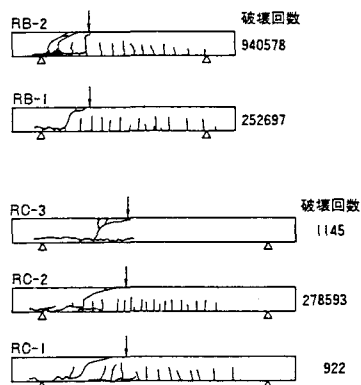


図-6 定点繰返し荷重下での破壊時のひびわれ

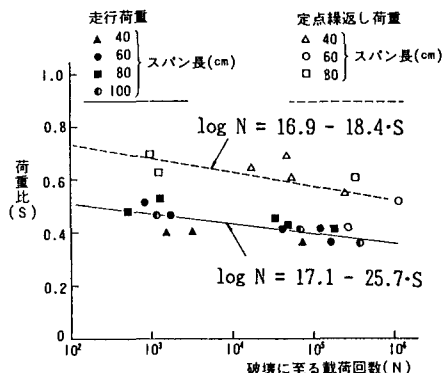


図-7 走行輪荷重下と定点繰返し荷重下での疲労強度

表－５ 定点繰返し載荷実験の結果（実験－１）

スパン長 (cm)	供試体名	載荷限界		支点からの 荷重位置(cm)	上限荷重比	破壊回数
		上 限	下 限			
40	RA-1	860	100	15	0.710	17500
	RA-2	750			0.619	281928
	RA-3	810			0.668	53551
	RA-4	920			0.759	50010
60	RB-1	500	100	18	0.492	252697
	RB-2	600			0.591	940578
80	RC-1	780	100	30	0.767	922
	RC-2	685			0.674	278593
	RC-3	710			0.698	1145

４． 実験－２ （スパン80cmの単純ばりの実験）

ここではスパン80cmのはりの実験を行なった。この実験－２では、より正確なS－N曲線を統計的に求めることと、はりのたわみを測定することにより疲労の過程を詳細に観察することを行なった。実験方法は、実験－１と同じである。

４．１ 静的載荷実験

この静的載荷実験では車輪を用いてはりに荷重を加えた。この車輪は輪荷重の走行実験で使用したものと同じものである。また、支持条件は実験－１の静的載荷実験と同じである。

実験結果を表－６に示した。すべての供試体について、マイクロコンクリートの圧縮強度は340kgf/cm²であった。また、静的耐荷力の実験値は、岡村・檜貝式⁵⁾による計算値とはほぼ一致した。この実験値と計算値との比の平均値は1.03、変動係数は7.8%であった。岡村・檜貝式⁵⁾による計算値を、実験－１と同様に疲労実験の基準値とした。

４．２ 輪荷重の走行実験

たわみの測定には非接触変位計により行なった。この走行実験は1日2万回から3万回の回数で行なった。実験を途中で休止した場合は、12時間以内に再開した。

（１） 疲労強度

実験結果を疲労寿命の短い順にならべて表－７に示した。表中の生存確率pは次式で算出した。

$$p = 1 - r / (n + 1) \quad (2)$$

ここに、pは同一荷重比で実験したn個の供試体の中で、r番目に短い寿命だったはりの生存確率を表わす。疲労寿命がコンクリートと同じように対数正規分布する³⁾と考えれば、実験結果の統計上の分布は次式で表わされる。

$$t = A \cdot \log N + B \quad (3)$$

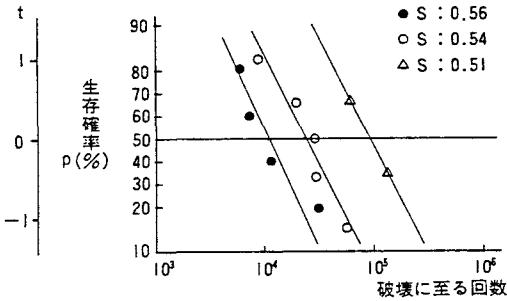
ここに、tは正規分布曲線の対象軸からの距離で、正規積分表⁷⁾より前出のpの値を求めることができる。

表－6 静的載荷実験の結果（実験－2）

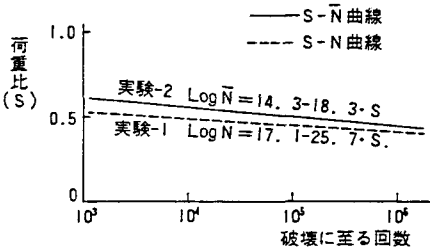
供試体名	支 点 からの 荷重位置 (cm)	静的耐荷力 (kgf)
sa-1 sa-2 sa-3	40	1003 939 988
sb-1 sb-2 sb-3	30	1000 889 865
sc-1 sc-2	25	903 917
sd-1 sd-2 sd-3 sd-4	20	875 741 914 750

表－7 輪荷重の走行実験の結果（実験－2）

供試体名	走行輪荷重 (kgf)	圧縮強度 (kgf/cm ²)	荷重比	破壊回数	生存確率 p (%)
ma-1 ma-2	475	400 400	0.51	65466 137832	66.7 33.3
mb-1 mb-2 mb-3 mb-4 mb-5	500	388 400 400 388 395	0.54	8524 20270 30390 32640 62512	83.3 66.7 50.0 33.3 16.7
mc-1 mc-2 mc-3 mc-4	525	400 400 388 400	0.56	5778 7444 11738 33510	80.0 60.0 40.0 20.0
md-1	550	315	0.64	812	—
me-1	600	315	0.70	170	—



図－8 走行輪荷重の大きさによる生存確率



図－9 実験－2のS－ $\bar{N}$ 曲線と
実験－1のS－N曲線

平均寿命 $\bar{N}$ は、 $p = 0.5$ に対して $t = 0$ を式に代入することにより次のように求まる。

$$\log \bar{N} = -B/A \quad \text{または} \quad \bar{N} = 10^{-B/A} \quad (4)$$

実験結果を図－8の正規対数確率紙に示した。図中の各荷重比の3本の直線はほぼ平行となった。荷重比のごくわずかな増加により、疲労寿命は著しく減少した。

S－ $\bar{N}$ 関係を実験－1のS－N曲線とともに図－9に示した。図－8のp－N関係と同様に、疲労寿命は広い範囲にばらついているため、設計にS－N関係を適用することは非常に困難なことであると思われる。

(2) ひびわれの観察

ひびわれの進行を図－10に示した。図中の横軸は輪荷重の走行回数を、縦軸はひびわれの長さを表わしている。ひびわれのパターンを図－11に示した。図－10、11より、曲げひびわれがまず発生し、それが斜めのひびわれへと伸展し、ついにははり上縁まで達してはりは破壊した。スパンの両側に大きな斜めひ

ひびわれが生じていた。スパン中央付近の曲げひびわれはそれほど進行していないが、走行回数が増えるにしたがい支点近くのひびわれは着実に伸展した。疲労破壊するまでの間、ひびわれの進行はあるひとつのひびわれに集中して起こるのではなく、ほとんどすべてのひびわれが同時に伸展した。決定的なひびわれは、疲労寿命の最終段階になってから初めて発達した。

疲労破壊のはりのひびわれの中で最大のひびわれについて観察を行い、ひびわれ長さと載荷回数との関係について図-12にまとめて示した。横軸は各はりの疲労破壊回数に対する載荷回数の割合を示している。最大のひびわれは、疲労寿命の約80%あたりから急に成長し破壊するように思われる。

(3) たわみ

たわみの増大は、破壊に支配的であるひびわれの進行と対応していると考えられる(図-12参照)。実験が一時中断したとき、この停止中に残留たわみは回復したが、実験再開後はもとの曲線に戻った。はりのたわみは、弾性たわみと永久たわみを含む総たわみである。

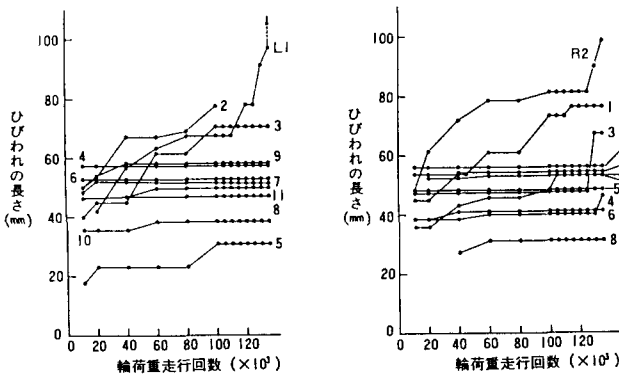


図-10 走行輪荷重下でのひびわれの進行

L1, L2..., R1, R2...は図-11に示す

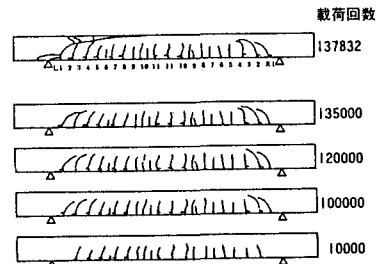


図-11 走行輪荷重下でのひびわれパターン

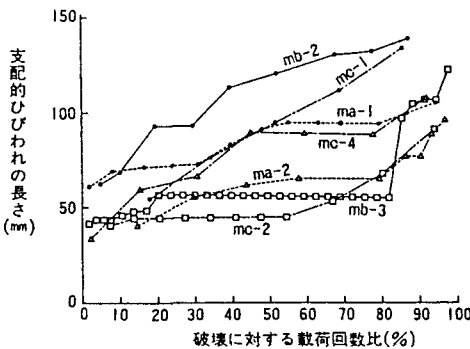


図-12 支配的ひびわれの進行

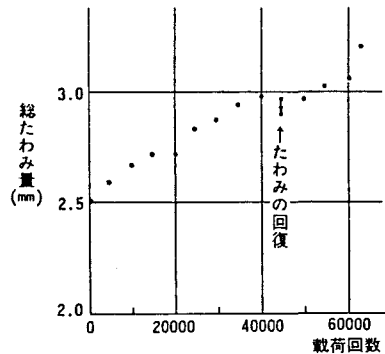
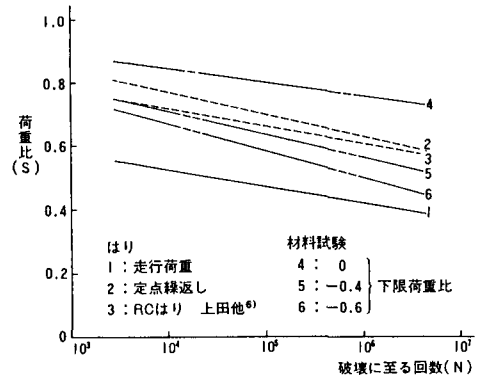


図-13 走行輪荷重下のma-1のたわみ

表－8 定点繰返し載荷実験の結果 （実験－2）

供試体名	載荷限界(kgf)		上限荷重比	破 壊 回 数
	上 限	下 限		
ra-1	775	100	0.84	96677
rb-1	800	100	0.87	642
rb-2				4208
rb-3				5920
rb-4				98664
rc-1	825	100	0.90	43
rc-2				348
rd-1	850	100	0.93	631



図－1 4 はりとマイクロコンクリートのS－N曲線

4. 3 定点繰返し載荷実験

この定点繰返し載荷実験で用いた実験装置は実験－1と同じである。載荷周期は4Hzで、荷重の載荷位置は輪荷重の走行実験で疲労破壊が生じた支点から25cmの点とした。実験結果を表－8に示した。

ひびわれの過程は、輪荷重の走行実験の場合とほぼ同じであった。たわみは走行実験ほど増加しなかった。また、破壊近傍でさえ著しいたわみの増加は観察されなかった。

5. む す び

5. 1 S－N曲線

実験－1、2より得られたS－N曲線は、マイクロコンクリートの疲労強度⁵⁾とともに図－1 4にまとめて示した。はりの疲労強度は輪荷重の走行時では著しく低下することがわかる。輪荷重の走行により生じる交番応力は、はりの疲労強度と材料の疲労特性とを比較したとき、はりの疲労強度を低下させるという重要な役割を果たしているものと思われる。

5. 2 疲労破壊の予測

はりの破壊回数はかなり広い範囲にばらついているので、S－N曲線により個々のはりの疲労寿命を予測することは困難である。しかし、破壊近傍でひびわれと総たわみが大きくなってくることが、実験により認められた。ひびわれと総たわみの急激な進行は疲労寿命の80%付近で起きている。したがって、この急激なひびわれの進行の観察から、次のような疲労寿命の簡単な式が導き出される。

$$Y = X + 0.2X \quad (5)$$

ここに、Yは疲労寿命、Xはひびわれとたわみに急激な変化が見られた時の載荷回数を表わす。

6. 謝 辞

本実験は著者の指導のもとに、日本大学理工学部交通土木工学科の卒業研究として行なわれた。実験を行なった学生は1987年卒業の佐藤弘一氏（日本構造エンジニアリング）、寺井大典氏（住工コンサルタント）、1988年の鈴木浩二氏（青木建設）、高橋修氏（東北電力）である。四氏には深く感謝の念を表したい。輪荷重の走行実験装置は、V.R. マカムJr. の設計、岩田製作所の製造である。また、本論文の作成に当たり、小野浩一氏（新宿区役所）、高島美粧嬢（日本鋼管）にご協力いただいた。

付 録

実験－1、2の静的載荷実験で得られたせん断耐力の実験結果について、各せん断耐力式による計算結果との比較を付表－1にまとめて示した。付表－1は $a/d > 2$ でせん断破壊したRCモデルはりについて計算したものである。せん断耐力式は、岡村・檜貝の式⁵⁾、土木学会の式⁸⁾ならびにACIの式⁹⁾である。付表－1から、岡村・檜貝の式はせん断耐力を精度良く計算できた。したがって、岡村・檜貝のせん断耐力式による計算値を疲労実験で使用する荷重比の基準荷重とした。

付表－1 せん断耐力の計算値と実験値との比

せん断耐力の式	岡村・檜貝の式	土木学会の式	ACIの式
$\frac{\text{平均値}}{\text{変動係数}(\%)}$ $\frac{d}{a} \quad t \quad a \quad 数$	1.095 $\frac{1}{1.7}$ 1.9	0.761 $\frac{1}{8.7}$ 1.9	0.678 $\frac{1}{8.4}$ 1.9

参考文献

- 1) 園田恵一郎ほか：輪荷重作用下での2径間連続RCばりの低サイクル疲労特性、コンクリート工学年次論文報告集、第10号、pp.285-291、1988.
- 2) 川口昌宏ほか：模型橋梁床版の疲労実験と余寿命診断の試み、土木学会論文集、第380号/I-7、pp.283-292、1987.4.
- 3) 川口昌宏ほか：マイクロコンクリートの疲労強度、土木学会論文集、第378号/V-6、pp.81-88、1987.2.
- 4) 檜貝 勇：鉄筋コンクリートばりのせん断破壊に関する基礎研究、土木学会論文報告集、第279号、pp.113-126、1978.11.
- 5) H.Okamura & T.Higai：Proposed Design Equation for Shear Strength of Reinforced Concrete Beams without Web Reinforcement、土木学会論文集、第300号、pp.131-141、1980.8.
- 6) 上田多門ほか：せん断補強鉄筋のないはりのせん断疲労強度 — 荷重振幅のせん断疲労強度に及ぼす影響 —、コンクリート工学、Vol.20、No.9、pp.89-98、1982.
- 7) P.J.Hoel：Elementary Statistics, John Wiley & Sons, 1966.
- 8) 土木学会：コンクリート標準示方書〔設計編〕、1986
- 9) ACI318：Building Code Requirements for Reinforced Concrete, ACI318-83, 1983.

(1991年9月30日受付)