

繰返し荷重を受ける RC はりの曲げ挙動について

井上正一*・西林新蔵*・福田浩**

(1978年5月31日受理)

Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams under Repeated Loads

By

Shoichi INOUE* , Shinzo NISHIBAYASHI* and Hiroshi HUKUDA**

(Received, 31st of May, 1978)

Recently, much attention has begun to be paid to the fatigue characteristics of structural members. There are two important backgrounds, the first the design condition such as vehicle load and frequency of applied load become gradually severity, and the other the design method and estimate of the safety for reinforced concrete structure is shifting to ultimate state from allowable stress state.

From this point of view, in this study, to make clear the fatigue characteristics of reinforced concrete beam, a series of test program have been planned.

This report describes about the results of static and fatigue test carried out on 25 reinforced concrete beams having balanced-reinforced section (A beam) and under-reinforced section (B beam), respectively. The section of A beam was determined with the working stress design method and intended to occur the fatigue failure due to fracture (yield) of reinforcement. While the section of B beam was designed by the ultimate strength design method and expected to failure due to crushing of compressive concrete zone. Thus, the reinforced steel ratio (that is, the amount of reinforcement) of B beam is about twice of that of A beam.

This report mainly deals with the fundamental behavior of reinforced concrete beam having different amount of reinforcement mentioned above, under static and dynamic load applied, that is the effects of the cycle number of applied load on the fatigue characteristics such as the strength at 2 millions cycles and deformation included deflection and crack width.

1 ま え が き

材料が繰返し荷重を受ける場合、静的強度以下の応力でも破壊に至ることがある。このような現象を疲労または疲労破壊という。この材料の疲労破壊は、作用する応

力の種類や大きさ、および繰返し回数などに関係する。一般に、無限回の繰返しに耐えうる応力の限界を耐久限界または疲労限度などといい、所定の繰返し回数に耐えうる応力の限界を疲労強度あるいは時間強度という。

* 土木工学科 Department of Civil Engineering

** ピー・エス・コンクリートK.K. (PS concrete Co., Ltd)

この疲労という現象は金属材料では古くから知られていたが、コンクリートにもこのような現象の存在することが今世紀になって Van Ornum¹⁾ によって明らかにされた。それ以来、プレーンコンクリート、鉄筋、P C 鋼材などの材料の疲労、さらに、これらの複合材料としての鉄筋コンクリート（以下R Cという）やプレストレストコンクリート部材の疲労に関する多くの研究が行なわれてきた。

最近になって、再び各国でコンクリート部材の疲労について強い関心が持たれ始めているが、これには2つの側面が関係している。第1は、車輛の大型化・重量化に伴う荷重の増大、交通量や列車運行の急激な増加に伴って構造物の耐用期間中に受ける荷重の繰返し回数が増大に関する作用荷重の側面である。もう一つは、終局強度設計法の採用によって、高強度コンクリートや高張力鋼が積極的に利用されるようになったことと新しい構造形式の出現に関係する、設計法や新材料の側面によるものである。

また、最近における各国の設計法の動向は限界状態設計法に移行せんとしている。この設計法は、材料強度や荷重の特性値を確率論的に決定し、部材の設計においては終局限界状態と使用限界状態を規定したものである。しかしながら、現行の許容応力度設計法から限界状態設計法に移行するためには、静的な試験はもちろんのこと疲労や振動などが各種の限界状態に及ぼす影響についての情報集約の問題は早急に解決しなければならない重要な課題である。

本研究は、このような情勢をかんがみ、繰返し荷重がR Cはりの強度特性や変形特性に及ぼす影響を検討し、併せて静的破壊試験によるそれらの特性との比較の上で若干の考察を加えたものである。

2 実験概要

2.1 使用材料と示方配合

Table I Mix proportion

Slump (cm)	Air (%)	W/C (%)	C (kg/m ³)	W (kg/m ³)	s/a (%)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)	Admixture P _z - 8
4 ± 1	5.0	45	329	148	38	687	1147	C×0.25%

* 1 ACI Building Code に従うが、圧縮強度 (σ_c') には疲労試験時の値 (500kg/cm²程度) を仮定した。この場合、つり合い鉄筋比 (p_b) は $p_b = \frac{0.85\beta\sigma_c'}{\sigma_{sy}} \cdot \frac{6300}{6300 + \sigma_{sy}} = 0.0665$ となり、Bシリーズのはりの鉄筋比は $p \doteq 0.75p_b$ となる。

使用したセメントは宇部興産社製の普通ポルトランドセメントで、骨材には、細骨材として海砂と砕砂を土木学会標準粒度範囲内に入るように調整した混合砂（比重 2.59, F.M. : 2.73）を、粗骨材には碎石（最大寸法 20mm, 比重 2.65）を使用した。

コンクリートの配合設計条件は、28日目標強度 400 kg/cm², スランプ 4 ± 1 cm で、Table I に示すような配合を試し練りによって決定した。

はり供試体に使用した鉄筋は新日鉄社製で、主鉄筋には異形鉄筋 (S D 30) を、スターラップ ($\phi 9$) および組立鉄筋 ($\phi 6$) には普通丸鋼 (SR24) を用いた。

2.2 供試体の種類と作製

はり供試体の主鉄筋量は、弾性設計法によるほぼつり合い鉄筋比 (A シリーズ: $A_s = 2D 19 = 5.73\text{cm}^2$) と圧縮域のコンクリートが疲労破壊することを想定し、塑性設計法^{*1} によって決定した過少鉄筋比 (B シリーズ: $A_s = 2D 25 = 10.13\text{cm}^2$) の2種類とした。また、スターラップ筋の所要量は曲げ破壊時の算定せん断力に対して A C I 規準に基づいて設定した。

コンクリートの練混ぜは、強制攪拌式ミキサーによって行ない、1分間の空練り後、注水し2分間の本練りを行なった。

供試体は Fig. 1 に示すような断面寸法のはりと、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の円柱供試体である。はり供試体は主鉄筋とスターラップをあらかじめ型枠内に配置し、コンクリートを2層に分けて打設し、棒状パイプレータで締固めた。

はりおよび円柱供試体は打設後3時間で湿布養生を行ない、材令1日で脱枠し、以後27日間水中養生を施した。材令28日で一部の円柱供試体の圧縮試験を行ない、その他の供試体は試験時材令まで実験室内に放置した。

2.3 試験方法

はりの載荷試験には容量20トン(静的50トン)のパルセータ型疲労試験機(前川試験機社製)を用い、載荷は Fig. 1 に示すような3等分点載荷とした。静的試験にお

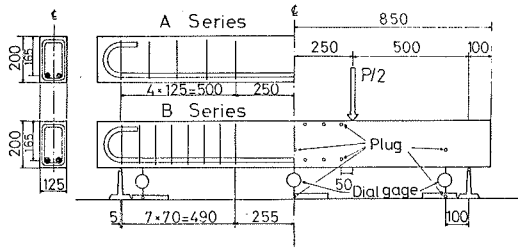


Fig. 1 Sections of test beam

ける荷重階は 0.5 トン刻みと 1 トン刻みを併用し、ひびわれ発生付近では 0.1 トン刻みとした。

曲げスパン内の上縁から 1 cm の位置と鉄筋図心位置のコンクリート側面にひずみ測定用プラグを貼付し、これを介してホイットモア型ひずみ計(検長 10 in.)ではり供試体のコンクリートひずみを測定した。また、コンクリート打設前にあらかじめ貼付しておいた電気抵抗線ひずみ計(検長 1 cm)で、鉄筋のひずみも測定した。たわみの測定はスパン中央と支点から 10 cm の位置にセットしたダイヤルゲージ(1/100mm)で行なったが、とくに荷重が 0 のときの残留たわみは、ダイヤルゲージ位置のコンクリート側面とその下にセットした鉄板との間の相対変位をホイットモア型ひずみ計で測定することによって決定した。さらに、これらと並行してマイクロスコープ(最小目盛 0.05mm)を用いてひびわれ幅の測定も行なった。

疲労試験における荷重速度は 300 c.p.m. で、荷重と時間との関係は正弦波である。設定下限荷重ははり供試体の終局耐力の 10% と一定とした。一方、上限荷重比(S)は、終局耐力に対する百分率で選び、その大きさは A シリーズで S=90, 80, 70, 60%, B シリーズでは S=80, 70, 60, 50% とした。

供試体は、繰返し回数が所定の回数(1, 100, 300, ……150万, 200万)に達したとき、いったん機械の運転を停止して残留ひずみと残留たわみを測定した後、荷重階 1 トン刻みで設定上限荷重に至るまでの静的試験を行なった。なお、繰返し回数が 200 万回に達した場合には疲労試験を中止し、直ちに静的試験によってはり供試体を破壊に至らしめた。

3 静的試験における解析方法

3.1 曲げ応力(ひずみ)

コンクリートと鉄筋の応力～ひずみ関係を Fig. 2 に

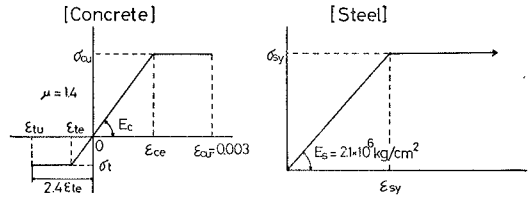


Fig. 2 Idealized stress-strain curves

示すような弾性完全塑性体で近似した。この場合、コンクリートの弾性係数は圧縮と引張に対し同一とし、圧縮の応力～ひずみ曲線に対する 1/3 割線弾性係数を求めてヤング係数とした。また、コンクリートの最大引張ひずみは引張塑性率 μ (引張弾性ひずみに対する塑性ひずみの比) を 1.4²⁾ と仮定した。

曲げ応力の計算にあたっては、鉄筋とコンクリート間の付着は完全であるとし、ひずみは平面保持の仮定に従うものとした。

計算は、断面上縁のコンクリートの圧縮ひずみ(ϵ_c : ここでは $\epsilon_c = 25 \times 10^{-6}$ 刻み)を任意に与え、次式(1)の軸方向のつり合いを満足する中立軸の位置(X)を求めた後、式(2)によってモーメントを算定する方法を採った。

$$C_c(X) = T_c(X) + T_s(X) \quad (1)$$

$$M = C_c(X)(X - Y_{cc}) + T_c(X)(Y_{Tc} - X) + T_s(X)(d - X) \quad (2)$$

ここに

$C_c(X)$: コンクリートの圧縮合力

$T_c(X), T_s(X)$: それぞれコンクリートの引張合力と引張鉄筋の引張力

Y_{cc}, Y_{Tc} : $C_c(X), T_c(X)$ の作用位置から断面上縁までの距離

d : 有効高さ

3.2 ひびわれ耐力と破壊耐力

曲げひびわれ耐力は、はり下縁のコンクリートひずみが最大引張ひずみに達したときにひびわれが発生すると仮定して求めた。一方、終局耐力は前記(3.1)の方法でコンクリートの最大圧縮ひずみを 0.003 と仮定して求めた。

4 結果の考察

はり供試体の疲労試験実施時の材令は、A シリーズで

100日以上, Bシリーズでは6ヶ月以上経過しており, コンクリートの強度は十分に安定状態に達しているものと考えられる。

4.1 曲げ応力 (ひずみ)

Fig. 3 に, 静的試験における A シリーズおよび B シリーズのはり上縁より 1 cm の位置におけるコンクリートの荷重~ひずみ関係と鉄筋のひずみ (絶対値) を示す。

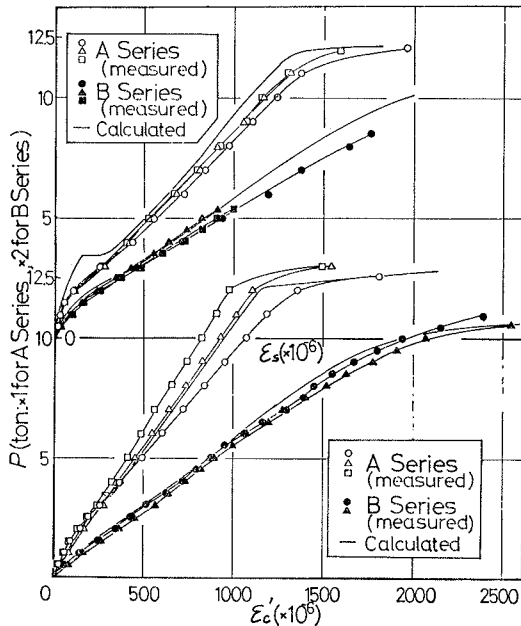


Fig. 3 Relationships between P and ϵ_c, ϵ_s (ϵ'_c : strain of concrete ϵ_s : strain of steel)

コンクリートひずみの実験値と計算値は, Aシリーズのひびわれ荷重の近傍を除き, 両シリーズとも低荷重域から破壊に至るまで良く一致している。一方, 鉄筋のひずみは, Bシリーズで破壊近傍まで十分な測定を行なえなかったこと, およびAシリーズはりのひびわれ発生前を除いては, 実験値は計算値よりもやや大きめの値を示すが, 一般的に両者はよく一致しているといえる。したがって, 前記の解析法を用いることによって, コンクリートおよび鉄筋の応力をかなりの精度で推定できるものと考えられる。

Fig. 4 に, 繰返し荷重を受けた場合の, はり上縁より 1 cm の位置における荷重~ひずみ曲線の一例を示す。

一般に, 荷重~ひずみ曲線は, 作用荷重の大きさ・鉄筋

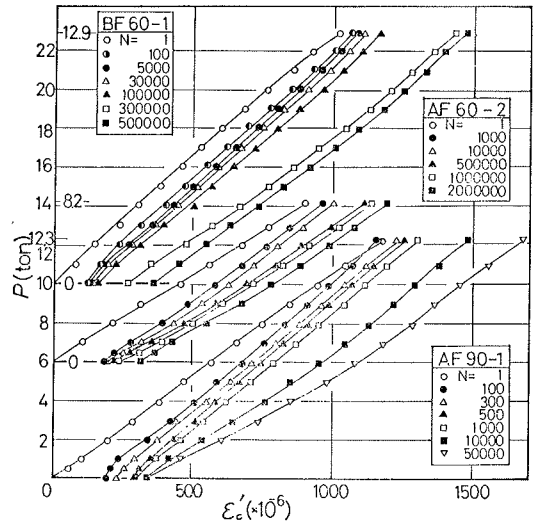


Fig. 4 Relationships between P and ϵ'_c (fatigue test)

量の多少に関係なく, 処女載荷時には上に凸な形状を示し, 繰返し回数の増加とともに直線状となり, その後は下に凸な形状を示し, さらに破壊近傍で曲線は S 字形となるものと推察される。この傾向は, 一軸圧縮繰返し荷重下におけるコンクリートの応力~ひずみ曲線の形状³⁾と類似するもので, R C はりの圧縮域コンクリートの曲げ疲労とコンクリートそのものの圧縮疲労破壊が機構的に近いことを示している。

低荷重比 ($S=50, 60\%$) と高荷重比 ($S=80, 90\%$) における曲線形状の差異は, 低荷重比の場合, 繰返し回数の初期から破壊近傍まで直線的で弾性的な挙動を示すのに対し, 高荷重比の場合には荷重~ひずみ曲線が曲率をもつということである。一方, 鉄筋量の多少による曲線の相違は, 荷重比が同一の場合, 鉄筋量の多い B シリーズの方が A シリーズよりも繰返し回数に伴うひずみの変化が大きいということである。これは, B シリーズのはりの破壊様式がコンクリートの圧縮疲労破壊であってコンクリートの損傷が荷重の繰返し回数とともに漸進的に進行するためと考えられる。

4.2 ひびわれ耐力と終局耐力

Table II に, 各打設日ごとの材令 28 日および疲労試験実施時におけるコンクリートの強度と主鉄筋の引張強度の平均値を示す。また, Table III に各打設日ごとに 1 本ずつ無作為に抽出したはり供試体の静的試験結果および

Table II Strengths and modulus of elasticity (M. of E.)

Sampling day	28 days			Ages of fatigue test								
	Compressive strength			Compressive strength			Tensile strength			M. of E.		
	σ_{c28} (kg/cm ²)	r	C. V. (%)	σ_{cu} (kg/cm ²)	r	C. V. (%)	σ_t (kg/cm ²)	r	C. V. (%)	E_c ($\times 10^5$ kg/cm ²)	r	C. V. (%)
8/8, 8/10	420	6	5.3	546	15	5.4	46.3	8	3.2	3.71	15	8.0
8/19	432	6	3.3	594	8	2.3	47.3	6	3.8	3.68	6	6.5
8/24	401	6	4.8	506	8	3.4	45.7	5	4.5	3.64	6	5.6
8/31	423	5	4.1	564	8	3.6	46.5	5	5.0	3.73	7	7.8

r : number of test pieces

C.V. : coefficient of variation

疲労試験結果を一括して示す。

Table II からわかるように、各打設日ごとでコンクリートの強度に若干の差があるため、以下の考察においては実験値と計算値との比で比較することにする。

(i) ひびわれ耐力

静的破壊試験および疲労試験に供したはりの処女載荷時におけるひびわれ耐力比（実験値と計算値の比）は、A・B両シリーズとも平均 0.96 である。すなわち、計算値は 4%程度危険側にあるが、上記の解析法によってひびわれ耐力をかなりの精度で推定できることがわかる。

(ii) 終局耐力

静的破壊試験における A シリーズはりの終局耐力比 (α) は 1.08 から 1.10 の範囲にある。一方、B シリーズはりのそれは 1.00 から 1.02 の範囲にある。鉄筋量の少ない A シリーズの終局耐力比が B シリーズのそれよりも 8%程度大きいことを除けば、両シリーズとも平均値からのばらつきは小さく 1%以内にあることがわかる。したがって、3 で述べた終局耐力の算定法は、コンクリート強度に若干の差がある場合にも適用でき、かなりの精度で実験値と計算値は一致する。このことより、疲労試験に供する各はりの終局耐力には、鉄筋量の差異も考慮して、計算値にそれぞれのシリーズの平均終局耐力比 (α) を乗じた値を採用し、これをもとにして上・下限荷重を決定した。

つぎに、200 万回までの繰返し載荷で破壊しなかったはりの終局耐力は、静的破壊試験を行なったはりのそれよりもやや大きくなる傾向を示している。これは、はり

そのものの終局耐力が大きかったために 200 万回の繰返し荷重に耐えたのではなく、荷重履歴を受けることになって、圧縮域のコンクリートが一種のひずみ硬化現象を起すこと、ひびわれの分散によって応力分布が均一化し、応力集中が減少することなどによって終局耐力が増加したものと考えられる。

4.3 破壊様式

破壊様式は Table III に併記した。静的破壊試験（ここでは 200 万回の繰返し荷重履歴を受けても破壊しなかったはりを含む）では、A・B両シリーズとも、鉄筋が降伏した後に曲げスパン内のコンクリートが圧潰することによって破壊した。

疲労試験においては、A シリーズの場合、荷重比 90%のはり 1 本がコンクリートの圧縮疲労破壊したことを除き、残りの全てのはりは鉄筋の疲労破断によって破壊した。一方、B シリーズの場合には、荷重比 50%のはり 1 本が鉄筋の疲労破断で破壊したことを除き、他は全て曲げスパン内のコンクリートの圧潰で疲労破壊した。

このことより、繰返し荷重を受けるはりの破壊様式は、作用する荷重が大きい場合にはコンクリート圧潰型の破壊になり、作用荷重が小さく繰返し回数が多いはりでは鉄筋の疲労破断型の破壊になりやすくなるものと推察される。

4.4 S-N 線図と疲労強度

一般に、コンクリートにおいては金属材料のような明確な疲労限度は認められていない。したがって、コンクリート構造物の疲労を論ずる場合には、疲労限界を特性

Table III The results of static and fatigue test

kinds of test	Kinds of beam	Cracking load		P_c / P_{cr}	Ultimate load		α P_u / P_{cu}	Number of cycles to failure (N_u)	Mode of failure	
		measured P_c (t)	calculated P_{cr} (t)		measured P_u (t)	calculated P_{cu} (t)				
A Beam	Static tests	AS — 1	3.5	3.55	0.99	13.5	12.49	1.08	—	C
		AS — 2	3.4	3.55	0.96	13.7	12.49	1.10	—	C
		AS — 3	3.4	3.63	0.94	13.9	12.58	1.10	—	C
	Fatigue tests	AF90—1	3.4	3.55	0.96	—	12.49	—	4,500	C
		AF90—2	3.2	3.55	0.90	—	12.49	—	19,000	F
		AF90—3	3.4	3.55	0.96	—	12.49	—	51,000	F
		AF80—1	3.4	3.55	0.96	—	12.49	—	85,000	F
		AF80—2	3.2	3.55	0.90	—	12.49	—	107,000	F
		AF80—3	3.4	3.55	0.96	—	12.49	—	140,000	F
		AF70—1	3.5	3.55	0.99	—	12.49	—	348,000	F
		AF70—2	3.4	3.55	0.94	—	12.58	—	403,000	F
		AF70—3	3.4	3.63	0.96	—	12.49	—	413,000	F
B Beam	Static tests	AF60—1	3.5	3.55	0.99	—	12.49	—	2100,000	F
		AF60—2	3.4	3.55	0.96	14.2	12.49	1.14	>2000,000	C
	Fatigue tests	BS — 1	4.2	4.27	0.98	22.0	21.51	1.02	—	C
		BS — 2	4.1	4.23	0.97	21.0	21.03	1.00	—	C
		BF80—1	3.7	4.27	0.87	—	21.51	—	3,500	C
		BF70—1	4.1	4.27	0.96	—	21.51	—	145,000	C
		BF70—2	3.9	4.27	0.91	—	21.51	—	209,000	C
		BF60—1	4.5	4.27	1.05	—	21.51	—	473,000	C
		BF60—2	4.0	4.23	0.95	—	21.03	—	630,000	C
		BF60—3	4.0	4.23	0.95	—	21.03	—	647,000	C
BF50—1	4.2	4.27	0.98	—	21.51	—	1560,000	F		
BF50—2	4.1	4.27	0.96	22.9	21.51	1.06	>2000,000	C		
BF50—3	4.0	4.27	0.94	23.4	21.51	1.09	>2000,000	C		

note : Kinds of beams

A F 90 — 1

A—A series F—Fatigue Maximum load level Numbers of beam
 B—B series S—Static $S = P/P_u \times 100$ (%)

F—failure due to fracture of steel
 C—concrete failure in compression

値に採らず、繰返し回数 200 万回に対する疲労強度を採用している。

Fig. 5 に荷重比と疲労寿命との関係を示す。図からわかるように、同一荷重比であっても疲労寿命にはかなりのばらつきが認められる。このばらつきは、コンクリート強度や鉄筋強度のばらつきに起因するよりも、RC

はりの疲労破壊性状そのものによる本質的な性質に起因するものと考えられる。さらに、コンクリートの圧潰型で破壊する傾向が大きいはり（すなわち荷重比が大きいはり、または鉄筋量が多いはり）ほど、このばらつきが著しくなる。このことは、疲労寿命のばらつきは鉄筋よりもコンクリートの方がより大きいことを示唆するもの

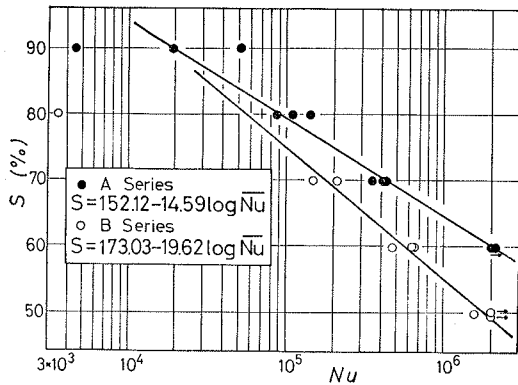


Fig. 5 S-N diagrams

である。したがって、鉄筋の疲労破断を伴う過少鉄筋断面に対してはもちろんのこと、過大鉄筋断面の場合で、とくにコンクリートの疲労破壊が先行するような断面に対しては、その疲労寿命を推定する際に確率論的な手法を用いる必要があることを示している。しかし、本研究においては、供試体数が少ないため、各荷重比におけるはりの平均疲労寿命の推定には破壊回数の算術平均を採用することにした。このようにして求めた平均疲労寿命 (\bar{N}_u) と荷重比の間には、ほぼ直線関係が認められる。そこで回帰直線を $S = A + B \log \bar{N}_u$ として、最小

自乗法によってA, Bを定めると、

Aシリーズ: $S = 152.12 - 14.59 \log \bar{N}_u$

Bシリーズ: $S = 173.03 - 19.62 \log \bar{N}_u$

となる。上式に $\bar{N}_u = 200$ 万回を外挿して疲労強度を求めると、Aシリーズのはりで 60.2%、Bシリーズのはりで 49.4%となる。すなわち、鉄筋量の少ないAシリーズのはりの方が、疲労強度は約 10%程度大きくなる。さらに、終局耐力の算定式 (3.2) から疲労強度を比較するとAシリーズの方が 18%程度大きくなることがわかる。

つぎに、コンクリートの強度と弾性係数がほぼ等しいA・B両シリーズのはりについて、各荷重比に相当する荷重が作用した場合の、処女載荷時における曲げスパン内のコンクリート上縁応力 (σ_c) と鉄筋の応力 (σ_s) を、曲げ応力の項で述べた解析法によって計算した結果をTable IV に示す。同様に、Fig. 6 に 200 万回疲労強度に相当する荷重がはりに作用した場合の応力状態を示す。

図よりAシリーズの鉄筋応力の計算値は 2472kg/cm², Bシリーズのそれは 1865kg/cm²となり、これは降伏点応力度のそれぞれ 68%と 48%に相当する。一方、土木学会の疲労を考慮した場合の許容応力度設計法を本実験に使用した鉄筋にあてはめると、SD30の許容応力度は 1600kg/cm²で、これは公称降伏点応力度の 53%に相当する。したが

Table IV Calculated internal stress corresponding to maximum load level

Maximum load level (S)	Steel			Concrete			
	Strain $ \epsilon_s $ ($\times 10^{-6}$)	Stress σ_s (kg/cm ²)	σ_s / σ_{sy}	Strain ϵ_c ($\times 10^{-6}$)	Stress σ_c (kg/cm ²)	σ_c / σ_{cu}	
A series	90	3561	3650	1	1731	546	1
	80	1591	3341	0.92	1197	444	0.81
	70	1381	2900	0.79	1054	391	0.71
	60	1173	2463	0.67	908	337	0.61
B series	80	1508	3167	0.81	1586	564	1
	70	1303	2736	0.70	1397	521	0.92
	60	1103	2316	0.59	1203	449	0.80
	50	909	1907	0.49	1011	377	0.67

Remarks : A series $\sigma_{sy} = 3650 \text{ kg/cm}^2$ $\sigma_{cu} = 546 \text{ kg/cm}^2$ $E_c = 3.71 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$
 B series $\sigma_{sy} = 3900 \text{ kg/cm}^2$ $\sigma_{cu} = 564 \text{ kg/cm}^2$ $E_c = 3.73 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$

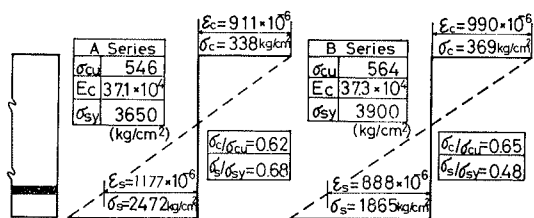


Fig. 6 Calculated strain (ϵ) and stress (σ) corresponding to fatigue strength at 2 millions cycles

って、疲労終局限界状態から考えると、許容応力度設計法で設計され、鉄筋の疲労破断が先行するようにはりでは、土木学会の推奨値は、15%程度安全側であると考えられる。しかし塑性設計法によると、過少鉄筋断面を保証しても、静的な終局耐力を増加させる目的で鉄筋比を増やすことは、コンクリートの圧潰で疲労破壊する傾向を助長することになり、さらに繰返し回数が多くなると鉄筋は小さな応力で疲労破断する可能性も生じてくる。つぎに、コンクリートの疲労で破壊する傾向を示したBシリーズのはりについて考えてみると、はり上縁コンクリート応力の計算値は 369kg/cm² で、これより算定したコンクリートの疲労強度は 65%となる。一方、Aシリーズはりはコンクリートで疲労破壊するものではないが、この場合のコンクリートの上縁応力は圧縮強度の 62%となる。

偏心圧縮繰返し載荷試験を行なった従来⁴⁾⁵⁾によると、応力勾配を有するコンクリートの疲労強度は一軸圧縮下のそれより大きくなり、さらに応力勾配が大きいほど疲労強度が大きくなることが指摘されている。本研究においても、応力勾配の大きなAシリーズはりは、はり上縁に大きな曲げ応力が作用した場合 (Table IV)でもコンクリート側で破壊せず、このような傾向のあることがうかがわれる。しかし、Bシリーズのはりでは、阪田ら⁶⁾の行なった一軸圧縮応力下のコンクリートの疲労強度 69.6%とほぼ一致している。このことは、コンクリートの圧潰で破壊する傾向を示すはりでは、疲労強度に及ぼす応力勾配の影響を過大に評価するべきでないことを示唆するものである。

以上のことを総合すると、繰返し荷重を受けるRCはりを設計する場合、耐力面のみから考えれば、鉄筋の疲労破断が先行するような過少鉄筋断面によって、コンクリートと鉄筋の強度特性を十分に発揮させることが得策

であると考えられる。

4.5 たわみ

疲労試験における荷重～たわみ曲線の一例を Fig. 7 に示す。一般に、繰返し荷重を受けるはりの荷重～たわみ曲線は、前記の荷重～ひずみ曲線と同様の傾向を示す。この傾向は荷重比の大きいものほど顕著で、とくに鉄筋量の多いBシリーズで著しい。

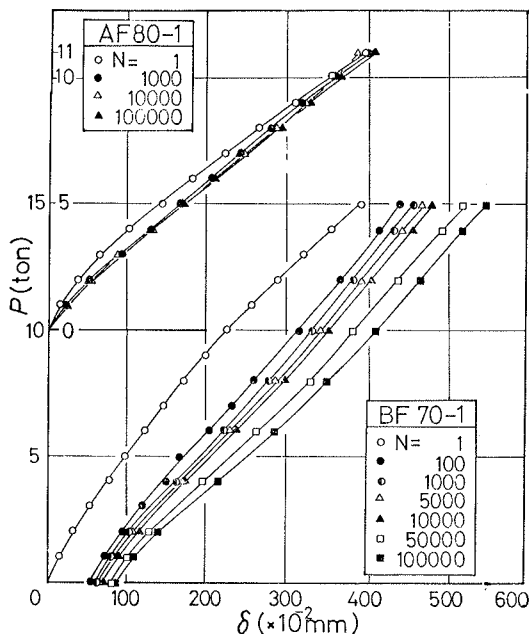


Fig. 7 Relationships between load and deflection (fatigue test)

Fig. 8 に、残留たわみを考慮しない場合の、繰返し回数とたわみとの関係を示す。同図は、縦軸に所定の繰返し回数 (N) における上限荷重時のたわみと処女載荷時 ($N=1$) におけるたわみとの比を、横軸に繰返し回数比 (N を各はりの疲労寿命 (N_u) で除した値) を採ったものである。一般に、たわみは、荷重比の大きさ、鉄筋量の多少に関係なく、繰返し回数の初期と破壊近傍で大きな増加を示す。このたわみの増加は、荷重比の大きなものほど大きく、荷重比が同一の場合には鉄筋量の多い方が大きくなる。

4.6 ひびわれ幅

Fig. 9～10 にAシリーズおよびBシリーズの鉄筋位置におけるひびわれ幅と繰返し回数比との関係を示す。

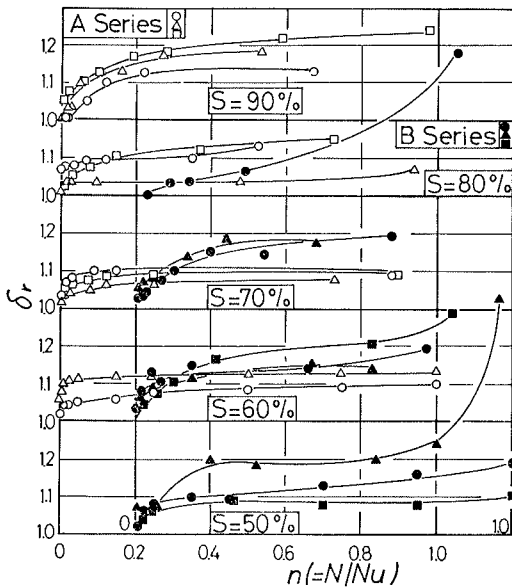


Fig. 8 Increase of deflection during fatigue test

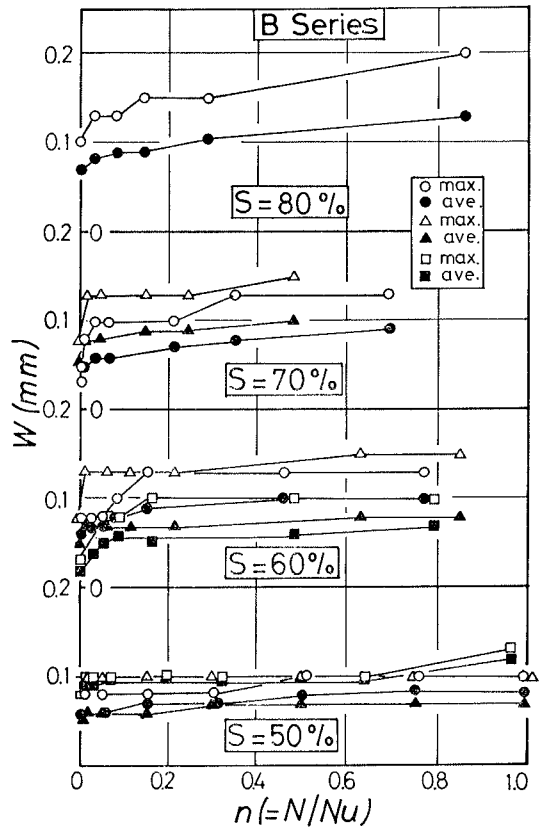


Fig. 10 Development of crack width during fatigue test

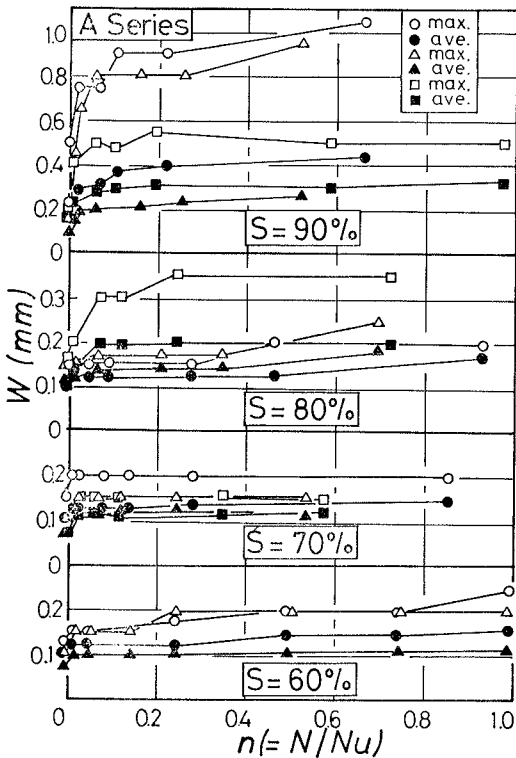


Fig. 9 Development of crack width during fatigue test

一般に、ひびわれ幅は、荷重比の大きさや鉄筋量の多少に関係なく、繰返し回数の初期で大きな増加を示すが、その後は破壊近傍まで一定値を保つか、やや増加する程度で大きな変化は認められない。

Aシリーズについてみると、処女載荷で鉄筋が降伏する荷重比90%と鉄筋が降伏しない80%以下でひびわれの挙動は異なることがわかる。すなわち、荷重比90%の場合には、最大ひびわれ幅は、繰返し回数の比較的少ない間に0.5mmまで急増し、その後しばらく平衡を保ったのち、大きなひびわれの開口をみて破壊に至っている。さらに、この間の最大ひびわれ幅と平均ひびわれ幅との差は、繰返し回数の増加に伴って大きくなり、ひびわれが分散せず一ヶ所に集中する傾向を示している。一方、荷重比80%以下の場合の最大ひびわれ幅は、荷重比90%の場合と比べてかなり小さくなる。また、ひびわれの分散も良好で、最大ひびわれ幅と平均ひびわれ幅の差が小さ

くなる。この傾向は荷重比の小さなものほど顕著である。このように、荷重比 90%と 80%以下の場合とでひびわれ幅に大きな相違を生じたのは、荷重比 90%におけるひびわれ幅の増加は鉄筋の塑性変形によるもので、その増加は急激に起こるものと考えられる。

Bシリーズの場合のひびわれ幅の特徴は、同一荷重比におけるAシリーズのものに比べて、最大ひびわれ幅が小さくなること、および最大ひびわれ幅と平均ひびわれ幅との差が小さくなることである。

以上の点から、主鉄筋量を多くすることはひびわれ幅の制限に有効であることがわかる。

つぎに、ひびわれ幅の限界状態について考えてみる。一般に許容ひびわれ幅は 0.2mmに制限される場合が多い。この場合、Bシリーズのはりの 200万回疲労強度 49%はひびわれ幅の制限条件を満たすが、Aシリーズのはりの疲労強度 60%ではこの条件を満足しない。したがって、限界状態設計法を考慮する場合には、Aシリーズのはりでは疲労終局限界状態よりもむしろひびわれ幅に関する使用限界状態を満す条件が厳しくなり、部材の設計は使用限界状態によって支配される可能性があるものと考えられる。さらに、Bシリーズの疲労強度レベルでも、構造物が侵食性の環境条件に置かれ、しかも水密性を必要とする場合の許容ひびわれ幅 0.1mmの条件を満足しなくなる。このようにひびわれ条件が厳しい場合には、鉄筋量を多くするよりもむしろ過少鉄筋断面として疲労強度を大きくし、ひびわれ制御に対してはプレストレスを導入するなどの方策をとる方が賢明であると考えられる。

5 結 び

本論文は、繰返し荷重下における鉄筋コンクリートのはりの強度特性と変形特性に関する試験の結果を述べ、若干の考察を加えたものである。

本研究においては、疲労強度に影響を及ぼす種々の要因のうち極く限られたものを探ただけで、しかも疲労寿命のばらつきについてもほとんど言及していない。疲労を詳しく論ずるためには、種々の要因を組合わせた試験を行なうとともに、得られた結果に対して何らかの数学的処理を施さなければならない。今後は、これらの実験上、解析上の問題を解決すべく研究を継続して行きたいと考えている。

ここでは、本研究で明らかになった点を列挙し、結論

にかえる。

- (1) 静的破壊試験における鉄筋コンクリートのはりのひびわれ耐力、終局耐力および曲げ応力（ひずみ）は、ここで述べた方法（式(1), (2)）を用いることによって、かなりの精度で算定できる。
 - (2) 繰返し荷重を受けるのはりの圧縮域のコンクリートの荷重～ひずみ曲線および荷重～たわみ曲線は、処女載荷時には上に凸な形状を示し、その後直線状となり、繰返し回数増加とともに下に凸な形状を示す。さらに、破壊近傍ではS字形の形状を示すものと推察される。
 - (3) 200万回の繰返し荷重に耐えたのはりの終局耐力は静的破壊試験を行ったのはりのそれよりやや大きくなる。
 - (4) 静的破壊試験におけるのはりの破壊様式が鉄筋の降伏が先行し、最終的にはコンクリートの圧潰で破壊するタイプであっても、繰返し載荷を行った場合には、荷重比が小さく疲労寿命が長くなると鉄筋破断型、荷重比が大きく疲労寿命の短いものはコンクリートの圧潰型になる傾向を示す。
 - (5) S—N 線図から求めた 200 万回疲労強度は、Aシリーズで 60.2%、Bシリーズで 49.4%となり、鉄筋量の少ない方が疲労強度は大きくなる。
 - (6) 荷重の繰返しによるひびわれ幅の増加は、鉄筋量の多いものほど、荷重比の小さいものほど小さい。
- 本研究を実施するにあたり、大宮正弘氏（現鳥取大学大学院）・矢積俊文氏（現米子産業KK）の協力に負う所が極めて大であり、ここに深甚なる謝意を表す次第である。

参 考 文 献

- 1) Van Ornum, J. L. : The Fatigue of Cement Products, Trans. ASCE, V.41, 1903
- 2) 西林新蔵, 小林和夫, 吉岡保彦: 人工軽量骨材コンクリートを用いたのはりの曲げおよびせん断特性に関する研究, 土木学会論文報告集, No. 155, 1968
- 3) Nordby G. M. : Fatigue of Concrete—A Review of Research, Jour. of ACI, V.30, No.2, 1958
- 4) Opel, F. S., Jr. & Hulsbos, C. L. : Probable Fatigue Life of Plain Concrete with Stress Gradient, Jour. of ACI, 63-1, Jan. 1966
- 5) 浜田純夫, 成岡昌夫: 軽量コンクリートの圧縮疲労強度に関する一実験, 土木学会論文報告集, No. 176, 1970. 4.
- 6) 阪田憲次, 木山英郎, 西林新蔵: 統計的処理によるコンクリートの疲労寿命に関する研究, 土木学会論文報告集, No. 198, 1972. 2