

繰返し荷重を受ける RC はりの曲げ破壊様式について

井上 正一*・大宮 正弘*・村上 朗*・黒崎 俊行*

(1979年6月30日受理)

Failure Modes of Reinforced Concrete Beams under Repeated Loads

by

Shoich INOUE*, Masahiro OHMIYA*, Akira MURAKAMI* and Toshiyuki KUROSAKI**

(Received, 30st of June, 1979)

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 vehicles 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, static and fatigue tests carried out on 40 small beams having balanced-reinforced section that was determined with the working stress design method.

In the fatigue tests, minimum load was fixed to be 10% of the static ultimate load (S. U. L.), while upper load level were varied in ranges from 60% to 90% of S. U. L..

This report mainly deals with ① the estimate of fatigue life by statistic treatment ② the effect of upper load level on the failure pattern ③ the effect of failure pattern on the fatigue life.

From the results of fatigue test, it seems to determine the failure pattern from upper load level (applied load/S. U. L.), that is generally, steel failure in fatigue occurred at low load level while concrete failure due to crushing occurred at high load level.

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が、このような現象を疲労あるいは疲労破壊と呼んでいる。

この現象は、自動車や列車の走行によって大きな繰返し活荷重を受けるコンクリート構造物、とくに橋梁やスラブ、まくら木などの設計において重要視されなければならない要因である。

コンクリートにも疲労現象の存在が明らかにされて以来、プレーンコンクリートの疲労破壊機構の解明、あるいはコンクリート部材の設計に疲労を採り入れた設計法の確立に、多くの研究時間が費されてきた。しかしながら、コンクリート構造物においては、作用荷重の種類、大きさ、方向によって疲労強度や破壊様式が異なること、疲労試験の実施には長時間を要すること、実験結果のばらつきが大きく結果の解析が難しいなどの理由のため

* 土木工学科 Department of Civil Engineering
** 福吉組 K.K. (Fukuyoshi Construction Co., Ltd)

めに、その歴史に比べ研究結果も少なく、未だコンクリートの疲労性状を的確に把握するには至っていない。

本研究は、RCはりの疲労性状を究明するために計画したものである。すなわち、弾性設計法によって決定したほぼつり合い鉄筋比を有するRCはりを採り上げ、繰返し荷重の大きさが破壊様式におよぼす影響を検討し、続いてRCはりの疲労破壊を確率過程の問題としてとらえ、実験結果を取扱う際には統計的な手法を用いて処理している。さらに、RCはりをコンクリートと鉄筋素材とから成る複合材料とみなし、これら素材の応力と疲労寿命の関係について若干の考察を加えている。

2 実験概要

2.1 使用材料と示方配合

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、細骨材として普通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、粗骨材には砕石（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日目強度400kg/cm²スランプ4 ± 1 cmで、Table I に示すような配合を試練りによって決定した。

はり供試体を使用した鉄筋は新日鉄社製で、主鉄筋には D19mm の異形鉄筋 (SD 30) を、スターラップ (φ 9mm) および組立鉄筋 (φ 6mm) には普通丸鋼 (SR 24) 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、弾性設計法によって求めたほぼつり合い鉄筋比 ($A_s = 2 \text{ D19mm} = 5.73 \text{ cm}^2$, $\rho_s = A_s / bd = 0.028$) とした。スターラップの所要量は、曲げ破壊時の算定せん断力に対して、ACI 規準に基づいて決定した。

供試体は Fig. 1 に示すような断面寸法のはりと、圧縮強度（静弾性係数の測定を含む）、引張強度測定用の φ 10 × 20 cm の円柱供試体である。コンクリートの打設は5回に分けて行ない、各打設日ごとに、静的試験用

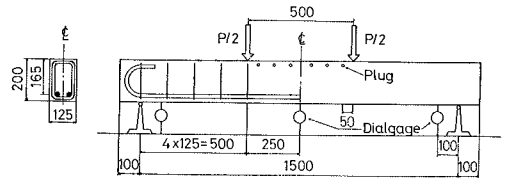


Fig. 1 Section of test beams

1本と疲労試験用7本、計8本のはり供試体と円柱供試体20本を作製した。

はりおよび円柱供試体は打設3時間後から湿布養生を行ない、材令1日で脱枠、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。

静的試験における荷重階は1トン刻みとし、ひびわれ発生荷重付近では0.1トン刻みとその間隔を小さくした。はり供試体の曲げスパン内の上縁から1cm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、ホイットモア型ひずみ計（検長10in.）を用いてコンクリートのひずみを測定した。また、コンクリート中に埋込まれた鉄筋のひずみは、電気抵抗線ひずみ計（検長1cm）で測定した。さらに、これらの測定と並行して、たわみ（ダイヤルゲージ：1/100mm）、ひびわれ幅（マイクロSCOPE：最小目盛0.05mm）の測定も行なった。

疲労試験における載荷速度は300c.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、一方、上限荷重比(S)は、終局耐力に対する百分率で選び、ここではS=60%から90%までを5%おきに7水準とした。

疲労試験は、はり供試体が破壊するまで行なうのを原

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%

則としたが、繰返し回数が 200 万回以上に達した場合には、疲労試験を中止し、直ちに静的試験によって破壊に至らしめた。

3 静的試験における断面解析

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、コンクリートの静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 （塑性ひずみと弾性ひずみの比）を 1.4¹⁾ と仮定して求め、さらに、鉄筋のヤング係数は 2.1×10^6 kg/cm² とした。

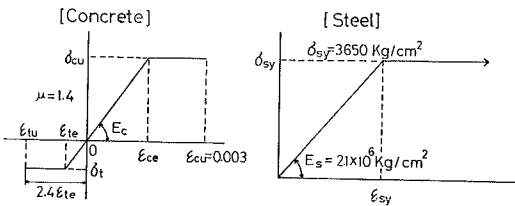


Fig. 2 Idealized stress-strain curves

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。

計算手順は、先ず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) の軸方向力の 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。

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

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

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のひずみが最大引張ひずみに達したときに、コンクリートに曲げひびわれが発生すると仮定して求めた。一方、終局耐力は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 結果と考察

はり供試体の試験実施時の材令は 100 日以上経過しており、コンクリートの強度は十分に安定状態に達してい

Table II Strengths and modulus of elasticity

Sampling day	28 days			Ages of fatigue test								
	Compressive strength			Compressive strength			Tensile strength			M. of E.		
	σ_{c28} (kg/cm ²)	k	C. V. (%)	σ_{cu} (kg/cm ²)	k	C. V. (%)	σ_t (kg/cm ²)	k	C. V. (%)	E_c ($\times 10^5$ kg/cm ²)	k	C. V. (%)
8/10	420	5	5.3	546	10	5.4	46.3	5	3.2	3.71	10	8.0
8/19	432	6	3.3	593	8	6.3	47.3	6	3.8	3.68	6	6.5
6/16	424	6	4.4	563	8	5.2	46.9	6	5.4	3.74	6	9.6
7/ 6	417	4	5.8	542	10	7.4	46.5	6	4.6	3.73	5	7.5
7/13	419	4	3.6	534	10	4.6	44.8	6	4.2	3.68	5	7.6

Steel	k	Yield strength σ_{sy} (kg/cm ²)	C. V. (%)
	5		3650

k : number of test pieces
C. V. : coefficient of variation

るものと考えられる。

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円柱強度と、主鉄筋の降伏点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疲労試験結果を一括して示す。

4.1 曲げ応力（ひずみ）

Fig. 3 に、静的試験時のはり上縁から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

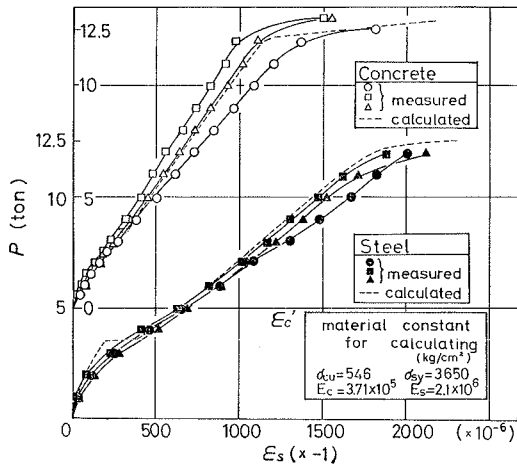


Fig. 3 Relationships between P and ϵ_c' , ϵ_s (ϵ_c' : strain of concrete, ϵ_s : strain of steel)

を示す。図より、鉄筋ひずみの測定値は計算値よりもやや大きく現われているが、一般的に見ればコンクリート、鉄筋ひずみとも測定値と計算値とは良く一致しているといえる。したがって、3.1 に示した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。

Table IV に、各荷重比に相当する荷重が始めて作用した場合（処女載荷時）の曲げスパン内におけるコンクリート上縁応力 (σ_c) と鉄筋応力 (σ_s) の計算値を、塑性設計法によって決定した過少鉄筋比を有するはりの結果²⁾ とともに示す。表より、本実験に供したはりにおいては、荷重比85%以上で鉄筋は降伏するものと考えられる。

4.2 破壊様式

破壊した位置と破壊様式を Table III に併記する。静的試験（200万回の繰返し荷重履歴を受けても破壊せず、静的に破壊させたはりを含む）では、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して破壊した。疲労試験においては、荷重比85%以上の場合、荷重比90%のはり2本が鉄筋の疲労破断で破壊したことを除き、曲げスパン内のコンクリートの圧潰で疲労破壊した。一方、荷重比80%以下では、全てのはり鉄筋の疲労破断によって破壊した。これらの事実から、繰返し荷重を受けるはりの破壊様式は、処女載荷時に鉄筋が降伏するような高荷重を受ける場合には、コンクリート圧潰型の可能性が著しくなり、一方作用荷重が小さく繰返し

Table III The results of static and fatigue test

kinds of beam	Static test							Position of failure
	Cracking load		P_c/P_{cr}	Ultimate load		α P_u/P_{uc}	Mode of failure	
	Measured P_c (t)	Calculated P_{cr} (t)		measured P_u (t)	calculated P_{uc} (t)			
S—1	3.5	3.6	0.97	13.5	12.5	1.08	C	Bending span
S—2	3.4	3.6	0.94	13.7	12.4	1.10	C	"
S—3	3.5	3.6	0.97	13.7	12.5	1.10	C	"
S—4	3.4	3.6	0.94	13.8	12.6	1.09	C	"
S—5	3.5	3.6	0.97	13.9	12.5	1.11	C	"
F60—2	3.5	3.6	0.97	13.9	12.5	1.11	C	"
F60—3	3.4	3.6	0.94	14.2	12.5	1.14	C	"

Fatigue test							
Kinds of beam	Upper load level S (%)	P_c (t)	Number of cycles to failure N	r	Probability of survival p (N)	Mode of failure	Position of failure
F90-1	90	3.4	500	1	0.857	C	Bending span
F90-2		3.5	800	2	0.714	C	"
F90-3		3.4	4500	3	0.571	C	"
F90-4		3.4	5500	4	0.429	C	"
F90-5		3.2	19000	5	0.286	F	"
F90-6		3.4	51000	6	0.143	F	"
F85-1	85	3.2	4100	1	0.800	C	"
F85-2		3.5	10200	2	0.600	C	"
F85-3		3.4	16000	3	0.400	C	"
F85-4		3.4	27000	4	0.200	C	"
F80-1	80	3.4	79000	1	0.857	F	"
F80-2		3.4	85000	2	0.714	F	"
F80-3		3.2	107000	3	0.571	F	"
F80-4		3.4	140000	4	0.429	F	"
F80-5		3.3	147000	5	0.286	F	"
F80-6		3.4	255000	6	0.143	F	"
F75-1	75	3.4	237000	1	0.833	F	"
F75-2		3.2	251000	2	0.666	F	"
F75-3		3.4	267000	3	0.500	F	Shear span
F75-4		3.3	315000	4	0.333	F	Bending span
F75-5		3.4	383000	5	0.167	F	"
F70-1	70	3.5	348000	1	0.857	F	"
F70-2		3.4	403000	2	0.714	F	"
F70-3		3.4	413000	3	0.571	F	"
F70-4		3.5	422000	4	0.429	F	"
F70-5		3.3	490000	5	0.286	F	"
F70-6		3.4	623000	6	0.143	F	Shear span
F65-1	65	3.3	559000	1	0.833	F	Bending span
F65-2		3.4	890000	2	0.667	F	Shear span
F65-3		3.4	1090000	3	0.500	F	Bending span
F65-4		3.2	1270000	4	0.333	F	"
F65-5		3.3	1560000	5	0.167	F	"
F60-1	60	3.5	2100000	1	—	F	"
F60-2		3.5	>2000000	2	—	—	—
F60-3		3.4	>2000000	3	—	—	—

Note : Mode of failure C—concrete failure due to crushing failure F—failure due to fracture of steel

Table IV Calculated internal stress corresponding to upper load level

Upper load level	Steel			Concrete		
	Strain $ \epsilon_s $ ($\times 10^{-6}$)	Stress σ_s (kg/cm ²)	σ_s/σ_{sj}	Strain ϵ_c ($\times 10^{-6}$)	Stress σ_c (kg/cm ²)	σ_c/σ_{cu}
S						
(%)						
90	3561	3650	1.00	1731	546	1
85	1697	3563	0.98	1267	470	0.86
80	1591	3341	0.92	1197	444	0.81
75	1486	3120	0.85	1126	418	0.77
70	1381	2883	0.79	1054	391	0.72
65	1227	2681	0.73	976	362	0.66
60	1173	2463	0.67	908	337	0.62
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 : $\sigma_{sj}=3650\text{kg/cm}^2$ $\sigma_{cu}=546\text{kg/cm}^2$ $E_c=3.71\times 10^5\text{ kg/cm}^2$
 * Reference 2) : $A_s=2\text{ D}25=10.13\text{cm}^2$ $p_s=A_s/bd=4.9\%$
 $\sigma_{sj}=3900\text{kg/cm}^2$ $\sigma_{cu}=564\text{kg/cm}^2$ $E_c=3.73\times 10^5\text{ kg/cm}^2$

回数の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。

なお、このような破壊様式の相違の兆は肉眼によっても観察される。すなわち、はりの破壊がコンクリートの圧潰型を示す場合には、ひびわれの開口部からコンクリートの粉をふき出し(すり減り現象)、徐々にその量を増して破壊に至る比較的ゆるやかな破壊過程を経る。一方、はりの破壊が鉄筋の破断型を示す場合、コンクリートのすり減り量は少なく、破壊はほとんど前兆を示すことなく急激に生ずる。

4.3 疲労寿命の統計的処理と平均疲労寿命

RCはりやPCはりの疲労寿命は、荷重比が同一であってもかなりのばらつきを示すことが認められている。^{3),4)} このばらつきは、コンクリートの強度や鉄筋強度のばらつきに起因するよりも、はりの疲労性状そのものによると考えられる。

信頼性の概念によると、任意の時刻 T まで破壊が起こらず、引き続き単位時間内に破壊の発生する割合 $\lambda(T)$

を故障率と呼び、これと時間 T まで破壊しない確率(一般に信頼度といわれているが、ここではとくに生存確率と呼ぶ $p(T)$)との間には次式のような関係が成立する。

$$\lambda(T) = - \frac{d \log p(T)}{dT} \dots\dots\dots(3)$$

一定応力振幅下での金属材料等の疲労試験においては、繰返し回数 N を連続変数と考え、式(3)の遅れ破壊時間 T と同様な取扱いがなされている。この場合、式(3)は次式で表わされる。

$$\lambda(N) = - \frac{d \log p(N)}{dN} \dots\dots\dots(4)$$

なお、順序統計量の理論⁵⁾によれば、 $p(N)$ は次式によって計算される。

$$p(N) = 1 - \frac{r}{n+1} \dots\dots\dots(5)$$

ここに、 n は同一荷重比で試験された供試体の総数であり、 r は疲労寿命の小さいものからの序数である。

$\lambda(N)$ の繰返し回数に伴う変化を疲労寿命のデータから推定するには、式(4)によればよい。すなわち、片対数紙の縦軸(対数目盛)に生存確率を、横軸(普通目盛)に疲労寿命 N を採って描いた右下がりの曲線の勾配から $\lambda(N)$ が求められる。なお、 $\lambda(N)$ が繰返し回数に関係せず一定の場合、疲労寿命の分布は1次のポアソン分布(指数分布)に従うことになる。

金属材料において、横堀⁶⁾はある繰返し回数 N_c (潜在繰返し回数)以後の破壊の発生は確率過程の問題であるとして、 N_c 以後の $\lambda(N)$ を一定とみなすことによって、疲労寿命の分布は近似的に指数分布で表わされるとしている。同様の手法を用い、阪田⁷⁾は、普通コンクリートの疲労寿命の分布は $\lambda(N) = \lambda$ の一次のポアソン分布を呈する。軽量コンクリートにおいては、岩石の場合⁸⁾と同様に、 $\log p(N) - N$ 曲線は下に凸な形状を示し、疲労寿命の分布は一次のポアソン過程の和で表わされるとしている。

Fig. 4 に、本実験に供したRCはりの $\log p(N) - N$ 曲線を示す。データの数が少ないが、全般的には次のこ

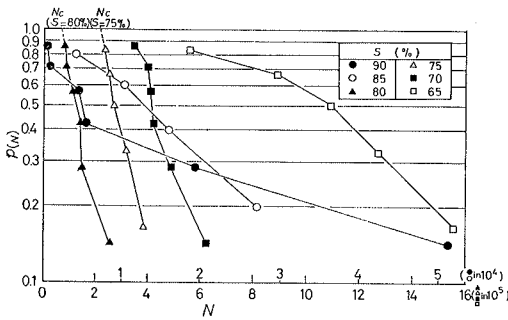


Fig. 4 $\log p(N)-N$ diagram

とがいえる。

$\log p(N)-N$ 曲線の形状は、破壊様式の影響を強く受けるものと考えられる。すなわち、RCはりの破壊がコンクリート圧潰型を示した荷重比85%の場合には、 $\lambda(N)$ はほぼ一定値を示す。コンクリートの圧潰型と鉄筋破断型の破壊が混在する荷重比90%の場合には、繰返し回数の初期でコンクリートの圧潰型を示す部分で $\lambda(N)$ は大きく、その後鉄筋破断型の破壊に移行するとともに $\lambda(N)$ は低下する。これに対し、荷重比80%以下で、鉄筋破断型の破壊を示す場合には、ある潜在繰返し回数 N_c が存在し、それ以降の $\lambda(N)$ は一定値を示す傾向のあることがうかがわれる。これらの事実より、RCはりの疲労寿命は、金属材料あるいはプレーンコンクリートで行なわれている統計的処理が可能であると考えられるが、供試体数が少ないため明確な結論を得るまでには至っていない。

そこで、疲労寿命の分布をさらに明確にするため、対数正規分布への当てはめを検討した。一般に、実験によって観察された観察度数を正規分布に当てはめることができるのは、その度数分布が対称な鐘状を呈している場合に限定されている。しかし、クリープ破壊時間や疲労寿命のように非対称な度数分布を呈することも少なくない。このような場合、横軸に变量を対数目盛で、縦軸に期待累加相対密度を採ると対称分布（対数正規分布）に近づくことが知られている。この分布は横軸を対数目盛に採った正規確率紙上では直線となる。したがって、観測された度数分布をこの対数正規確率紙上にプロットしてそれが直線になれば、その度数分布は対数正規分布にあてはまるとみなすことができる。

Fig. 5 は、各荷重比におけるRCはりの疲労寿命 (N) と式(5)で算定した生存確率を対数正規確率紙にプロットしたものである。図より、疲労寿命と生存確率と

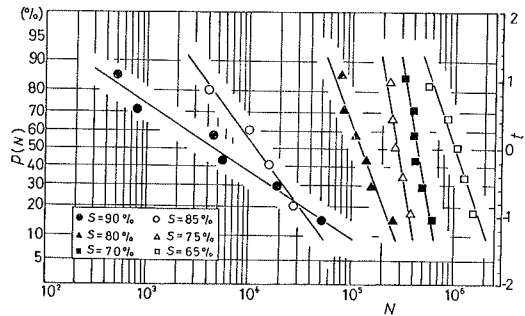


Fig. 5 $p(N)-\log N$ diagram

の間には明確な直線関係が認められ、各荷重比における疲労寿命の分布は対数正規分布を呈するとみなせる。このとき、回帰直線式は次式(6)で示される。

$$t = A \log N + B \dots\dots\dots (6)$$

ここに、

t : 正規分布曲線の対称軸からの距離で $p(N)$ の値より正規分布表を用いて求められる。

A, B : 実験から求まる定数

したがって、 $p(N) > 50\%$ のとき $t > 0$ で、 $p(N) < 50\%$ のときは $t < 0$ である。式(6)において $t = 0$ としたとき $p(N) = 50\%$ となり、その時の N の値が平均疲労寿命 (\bar{N}) を表す。このとき、

$$\log \bar{N} = -B/A, \quad \bar{N} = 10^{-B/A} \dots\dots\dots (7)$$

となり、ばらつきの大きさを表す指標として、 $\log N$ の標準偏差 $V(\log N)$ あるいは変動係数 (C.V.) を用いる場合、 $V(\log N)$ あるいは C.V. は式(8)、(9)で表わされる。

$$V(\log N) = 1/A \dots\dots\dots (8)$$

$$C.V. = V(\log N) \times 100/\log \bar{N} = 100/B(\%) \dots\dots (9)$$

Table V に、式(6)を最小二乗法によって決定した A, B および平均疲労寿命、 $V(\log N)$ 、C.V. の計算結果を示す。表より、疲労寿命のばらつきは、破壊様式の影響を強く受け、①コンクリートの圧潰型と鉄筋破断型の破壊が混在する荷重比 ($S=90\%$)、②コンクリートの圧潰型の破壊 ($S=85\%$)、③鉄筋破断型の破壊 ($S=80\%$ 以下)、の順に小さくなる。なお、 $S=70\%$ より小さな荷重比 ($S=65\%$) でやや大きなばらつきが現われているのは、応力レベルの減少とともに疲労寿命のばらつきが大きくなるという鋼の疲労特性が、鉄筋の破断型を示すRCはりにおいても現われたものと考えられる。

Table V Statistical analysis of fatigue test

S	A	B	\bar{N}	$V(\log N)$	C. V.
90	-0.985	3.609	4610	1.015	27.7
85	-2.044	8.308	11600	0.485	12.0
80	-3.981	20.288	125000	0.251	4.9
75	-8.533	46.558	286000	0.117	2.1
70	-8.438	47.639	442000	0.119	2.1
65	-4.304	25.849	1014000	0.232	3.9

4.4 $p(N)$ - S - N 線図

Fig. 6 に、生存確率 $p(N)=50, 80\%$ および $p(N)=99\%$ (仮想生存確率: 疲労寿命分布の左側の裾野の値) に対応する S - N 線図を示す。図中の N の点は、疲労寿命の分布が式(6)に従うとして求めたものである。 $p(N)=50\%$ と 80% の曲線形状には明確な差は認められないが、 $p(N)=99\%$ の曲線は疲労寿命のばらつきの影響を強く受けるものと考えられる。すなわち、 $p(N)=99\%$ の曲線は、ばらつきが小さい $S=75$ と 70% の間で $p(N)=50\%$ の曲線に最も近づき、 $S=90\%$ で最も離れる上に凸な形状を示す。この形状は、RC はりの $p(N)$ - S - N 線図の特性を示すものと考えられる。このことより、設計繰返し回数の多い (例えば海洋環境) RC 部材を設計する場合や、繰返し回数は比較的少ないが作用荷重の大きい (例えば地震時) 場合には、破壊確率 (あるいは生存確率) の採り方によって、疲労強度や疲労寿命は $p(N)=50\%$ の場合のそれとはかなり違ったものになることを考慮する必要があると考えられる。

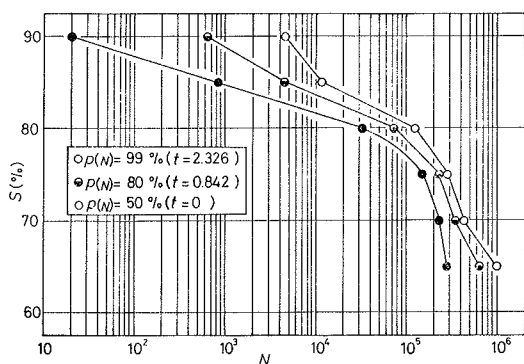


Fig. 6 $p(N)$ - S - N diagram

4.5 S - \bar{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。

従来から S - \bar{N} 関係として次式 (10), (11) が用いられている。

$$S = A + B \log \bar{N} \dots (10), \quad S = A \bar{N}^B \dots (11)$$

本実験の荷重比範囲に上式を適用し、最小二乗法によって A, B を決定すると、

$$S = 126.18 - 9.76 \log \bar{N} \text{ あるいは } S = 2.159 \bar{N}^{-0.055}$$

となる。これらの式に $\bar{N} = 200$ 万回を外挿して疲労強度を求めると、いずれの式からでも $S = 65\%$ となる。

Fig. 7 に、式(10)を採用した場合の S - \bar{N} 線図を示す。図より、この場合の直線性は明確でなく、さらに疲労強度65%の値は、荷重比65%では全てのりは 200万

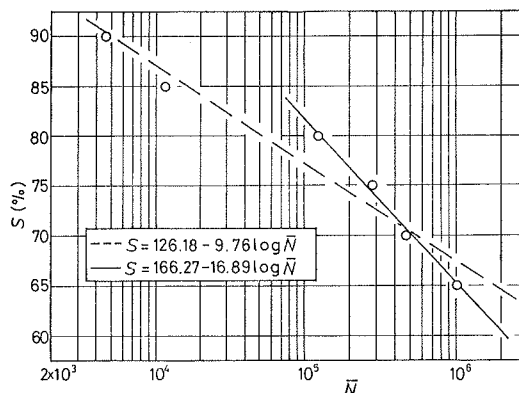


Fig. 7 S - \bar{N} diagram

回以内に破壊しているという Table III の実験結果に比べて、大きい値を与えている。そこで、ほぼ直線関係にある荷重比80%以下、すなわち、全てのりは同一の破壊様式を示したデータに対して式 (10) を適用すると、

$$S = 166.27 - 16.89 \log \bar{N}$$

となる。この場合、200万回疲労強度は60%となり、実験結果に近い値を与えている。これらのことは、RC はりのような複合材料の疲労強度は、作用荷重の大きさ

るいは繰返し回数に關係する破壊様式をも考慮して推定されるべきであることを示している。すなわち、コンクリートの圧潰型の破壊を示すような高荷重比の領域と鉄筋破断型の破壊を示すような寿命領域とを同一の疲労現象として取扱うべきでないことを示唆しているものと考えられる。

4.6 コンクリートおよび鉄筋応力と疲労寿命

普通コンクリートに対する中心圧縮および偏心圧縮疲労試験から得られた $S_c - \bar{N}$ 曲線式^{9)~14)}を Table VI に示す。表からもわかるように、偏心荷重によって応力勾配を受けるコンクリートの疲労強度は、偏心距離 $e = 0$ の一様圧縮を受けるコンクリートのそれよりも大きくなる。この疲労強度の増加は、応力勾配が大きくなるに伴って増大し、とくに偏心距離 $e = h/6$ (h : 供試体の高さ)の三角形分布の圧縮を受ける場合には、一様圧縮のそれよりも17%以上も大きくなることが報告されている。^{14), 15)}

曲げを受けるRC部材においてもコンクリート圧縮域に応力勾配が存在する。しかし、コンクリート縁応力や鉄筋応力は、クリープやひびわれ伝播の影響を受けて繰返し回数の増加とともに変化し、これに伴って応力勾配も変化することになる。このため、任意の繰返し回数におけるこれらの応力や応力勾配を正確に推定することは極めて困難である。したがって、ここでは処女荷荷時に

おけるコンクリートおよび鉄筋応力の計算値 (Table IV) に基づいて考察することにする。

Fig. 8 は、縦軸にはり上縁におけるコンクリートの圧縮強度比 (計算値と圧縮強度の比: $S_c = \sigma_c / \sigma_{cu}$) を、横軸に疲労寿命を採っている。図中の斜線領域は、Table VI による中心圧縮疲労試験における $S_c - N$ 曲線式の上限と下限値の範囲を、直線 B は偏心荷重 ($e = h/6$) のそれを表わしたものである。図より、コンクリート圧潰型の破壊を示した点 (●) に着目すると、コンクリートの強度比が大きくとくに $S_c = 0.9$ 以上においては、点は全て偏心荷重試験における直線 B の上側にある。一方、強度比 0.9 以下においては、点は直線 B

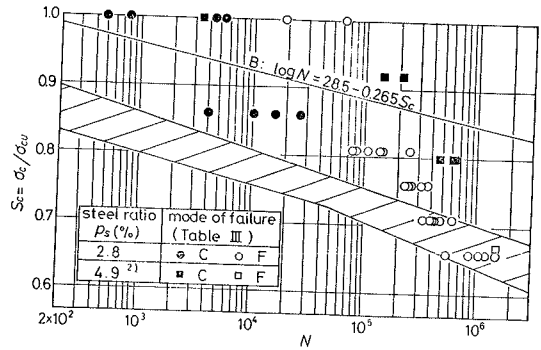


Fig. 8 Relationships between S_c and N

Table VI Equations of $S_c - \bar{N}$ diagram

Investigator	$S_c - \bar{N}$ equation	F. S. (%)	Type of loading
Antrim ⁹⁾	$\log \bar{N} = 20.5 - 0.214 S_c$	66.4	Concentric ($e = 0$)
Bennet ¹⁰⁾	$\log \bar{N} = 21.6 - 0.232 S_c$	65.9	
Raju ¹¹⁾	$\log \bar{N} = 16.1 - 0.157 S_c$	62.4	
Sakata ¹²⁾	$\log \bar{N} = 19.4 - 0.191 S_c$	68.6	
Matsushita ¹³⁾	$\log \bar{N} = 18.4 - 0.198 S_c$	61.1	
Ople ¹⁴⁾	$\log \bar{N} = 18.2 - 0.182 S_c$	65.4	
Ople ¹⁴⁾	$\log \bar{N} = 28.5 - 0.265 S_c$	87.5	Eccentric ($e = h/6$)

Note : F. S. : Fatigue strength at 2×10^6 cycles

の下側にあり、強度比の減少とともに中心圧縮試験における斜線領域に近づく傾向が見られる。このことは、引張域にひびわれが存在するRCはりの $S_c - N$ 関係は、中心圧縮荷重あるいは偏心圧縮荷重試験における $S_c - N$ 関係よりも N の増加に伴う S_c の低下率が大きくなることを示すものである。したがって、強度比が小さくて疲労寿命の長いコンクリート部材の設計においては、応力勾配の存在によって疲労強度が増加するという現象を過大に評価すべきでなく、中心圧縮疲労試験で得られた $S_c - \bar{N}$ 関係に基づいてコンクリートの疲労強度を決定するのが適切であると考えられる。

同様に、Fig. 9 に鉄筋の強度比 (計算値と降伏点強度との比: $S_s = \sigma_s / \sigma_{sy}$) と疲労寿命の関係を示す。図より、鉄筋の強度比が

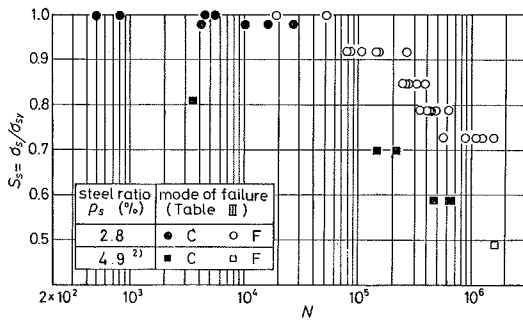


Fig. 9 Relationships between S_s and N

同一の場合、鉄筋破断型の破壊 (○□) を示すはりの疲労寿命は、コンクリート圧潰型のそれに比べてかなり長くなるのがわかる。このことは、耐用期間中の設計荷重や設計繰返し回数に対して、鉄筋で破断するような鉄筋比を選定することによって、疲労強度をやや大きく採ることのできる可能性があることを示唆している。

4.7 つり合い鉄筋比に関する検討

静的荷重下において過少鉄筋断面であっても、繰返し荷重下のRCはりの破壊様式は、作用荷重が大きい場合にはコンクリートの圧潰型に、荷重比が小さく繰返し回数が多い場合には鉄筋破断型の破壊になりやすいことは先に記した。いま、繰返し荷重を受けるRCはりのつり合い鉄筋比を、コンクリートの圧潰と鉄筋の破断が同時に起る、すなわち、コンクリートの圧潰型と鉄筋破断型の破壊が混在する場合の鉄筋比と定義することにする。

Fig. 10 は、縦軸にコンクリートの強度比を、横軸に鉄筋の強度比を採ったものである。図中●は、コンクリートの圧潰型と鉄筋破断型の破壊が混在したことを表わしている。また、ゾーンAは、鉄筋量が多い場合の領域ではりはコンクリートの圧潰型の破壊を呈する。一方、ゾーンCは、鉄筋量が少ない場合の領域で、鉄筋破断型の破壊が起りやすい領域である。以下、本実験結果からつり合い鉄筋比の有無を検討する。

繰返し回数 200万回以内で破壊するRCはりにおいては、ゾーンBに示されるように鉄筋比 ρ_s が 4.9% と 2.8% の間で、「コンクリート圧潰型から鉄筋破断型に移行している。したがって、これらの鉄筋比の間に、いわゆるつり合い鉄筋比が存在するものと考えられる。しかし、このつり合い鉄筋比のはりでは、コンクリートの圧潰型と鉄筋破断型の破壊が混在する可能性があり、とくにコンクリート圧潰型の破壊を呈すると疲労寿命が短く

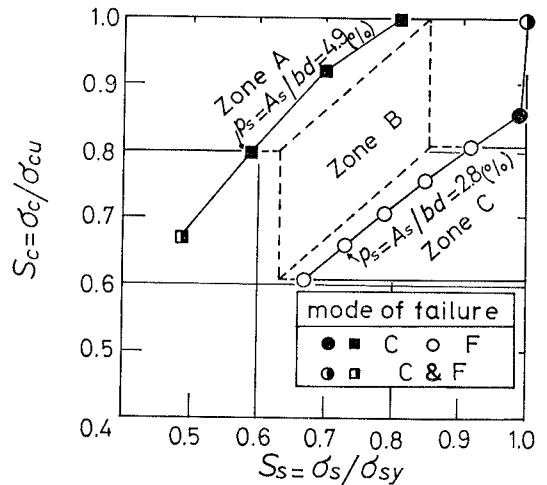


Fig. 10 Relationships between S_c and S_s

なる。このことより、疲労強度のみから考えれば、つり合い鉄筋比よりやや少ない鉄筋比を選定して、鉄筋破断ではりを破壊するように設計するのが得策であると考えられる。しかし、このつり合い鉄筋比は、繰返し荷重の大きさや繰返し回数の増加とともに変化することにも留意しておく必要がある。

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はりの強度特性に関する試験の結果について述べ、若干の考察を加えたものである。

本研究においては、実験に供した供試体数が少なかつたこと、選んだ鉄筋比が1種類であること、一定上限荷重条件の試験で実際のはりに作用するランダム荷重と異なること、RCはりの疲労破壊の内部機構に対してなら言及していない点など、今後の研究に待つべき種々の問題を残している。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) 静的試験におけるRCはりのコンクリートおよび鉄筋の荷重一ひずみ曲線は、ここで述べた方法 (3.1) を用いることによってかなりの精度で推定できる。

2) 弾性設計法によるほぼつり合い鉄筋比を有するはりの繰返し荷重下における破壊様式は、鉄筋が降伏するような高荷重を受ける場合には、コンクリート圧潰型の、

作用荷重が小さく繰返し回数が多いはりでは鉄筋破断型の破壊になりやすい。

3) RCはりにおける故障率 $\lambda(N)$ は、コンクリート圧潰型の破壊を示す場合にはほぼ一定、鉄筋破断型の破壊を示す場合にはある潜在繰返し回数以後ほぼ一定、コンクリート圧潰型と鉄筋破断型の破壊が混在する場合には繰返し回数の増加に伴って減少する傾向がある。

4) 各荷重比における疲労寿命の分布は対数正規分布に従う。

5) 疲労寿命のばらつきは、作用荷重の大きさと破壊様式の影響を受け、①コンクリートの圧潰型と鉄筋破断型の破壊が混在する荷重比 ($S=90\%$)、②コンクリート圧潰型の破壊 ($S=85\%$)、③鉄筋破断型の破壊 ($S=80\%$ 以下)、の順に小さくなる。

6) RCはりの $\rho(N)-S-N$ 線図は、荷重比 $S=75$ と 70% の間で $\rho(N)=50\%$ の曲線に最も近づき、 $S=90\%$ で最も離れる上に凸な形状を示す。

7) RCはりのような複合材料の疲労強度は、作用荷重の大きさや繰返し回数に関係する破壊様式をも考慮して推定されるべきである。

8) 引張域にひびわれが存在するRCはり圧縮域コンクリートの S_c-N (コンクリートの強度比-疲労寿命) 関係は、プレーンコンクリートに対する中心圧縮載荷あるいは偏心圧縮載荷試験から得られた $S_c-\bar{N}$ 関係よりも N の増加に伴う S_c の低下率が大きくなる。

9) コンクリート中の鉄筋応力が同一であっても、鉄筋破断型の破壊を示すRCはりの疲労寿命は、コンクリート圧潰型のそれに比べてかなり長くなる。

本研究を遂行するにあたり、工学部・西林新蔵教授の御指導を賜りました。ここに深く感謝します。また、実験を実施するにあたり、福用浩氏(現 P. S. コンクリート K. K.)をはじめ、鳥取大学材料研究室諸氏の御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る次第である。

参 考 文 献

- 1) 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年7月
- 2) 井上正一, 西林新蔵, 福田浩: 繰返し荷重を受けるRCはりの曲げ挙動について, 鳥取大学工学部研究報告, 第9巻第1号, 1978年9月
- 3) Tien S. Chang and Clyde E. Kesler: Fatigue behavior of reinforced concrete beams, Jour. of ACI, 55-14, Aug. 1958
- 4) William J. Venuti: A statistical approach to the analysis of fatigue failure of prestressed concrete beams, Jour. of ACI, 62-74, Nov. 1965
- 5) Gumbel E. J. (河田竜夫ら訳): 極値統計学, 広川書店, 1963, pp. 45~51
- 6) 横堀武夫: 材料強度学, 技報堂, 1955, pp. 178~182
- 7) 阪田憲次: 持続および繰返し荷重下におけるコンクリートの塑性的挙動に関する基礎的研究, 京都大学博士論文, 1976年6月, pp. 137~171
- 8) Yuichi Nishimatsu and R. Heroeswojo: The statistical distribution of fatigue life and the fracture mechanism of rock, The Thirteenth Japan Congress on Material Research—Non-Metallic Materials, March 1970
- 9) Antrim, J. C. and J. F. McLaughlin: Fatigue study of air-entrained concrete, Jour. of ACI, Vol. 55, No. 70, May 1959
- 10) Bennet, E. W. and Muir, S. E.: Some fatigue test of high strength concrete in axial compression, Mag. of Concrete Research, Vol. 19, No. 59, June 1967
- 11) Raju, N. K.: Comparative study of fatigue behavior of concrete, mortar and paste in uniaxial compression, Jour. of ACI, Vol. 67, June 1970
- 12) 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年2月
- 13) 松下博通, 徳光善治: コンクリートの圧縮疲労試験, 土木学会第27回年次学術講演概要集, 第5部, 昭和47年10月
- 14) Ople, F. S., Jr. and Hulbos, C. L.: Probable fatigue life of plain Concrete with stress gradient, Jour. of ACI, 63-1, Jan. 1966
- 15) 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年4月