

# 低サイクル荷重下における軽量 コンクリートの累積損傷の検討

## AN EXAMINATION ON CUMULATIVE DAMAGE OF LIGHTWEIGHT CONCRETE UNDER LOW CYCLE LOAD

都 築 和 夫\*・成 岡 昌 夫\*\*

By Kazuo Tsuzuki and Masao Naruoka

### 1. ま え が き

著者ら<sup>1)2)</sup>は、すでに、500 cpm 下での軽量コンクリートの圧縮疲労強度に関する実験を行ない、その研究結果を発表した。プレーンコンクリートの疲労強度が、繰返し荷重をうける鉄筋コンクリート構造物の設計において、一つの重要な要素となることはいうまでもない。この方面の研究の発展が望まれる。

構造物の疲労は、変動応力および変動ひずみを受ける材料における、累進的かつ、永続的な内部構造の変化の過程であり、その大部分は損傷である。

コンクリートの場合、損傷の程度を表わすパラメータとして、微視的にはマイクロクラックの影響による弾性定数の変化および超音波伝播速度、巨視的にはクラックの進展などが考えられる。また、損傷を物理的にみれば、繰返し数の比  $n/\bar{N}$  (ここで、 $n$  はある応力レベルの繰返し数、 $\bar{N}$  はそのときの平均疲労寿命、である) で表わすことができる。

しかしながら、ほとんどの構造物はランダムな実働荷重を受けており、破壊に至るまで、ある一定範囲の繰返し応力のもとで得た  $S-N$  曲線から、構造部材が実際に受けている荷重応答を評価することは、困難である。すなわち、損傷の累積を予測することはむずかしい。

累積損傷とは、構造物が多くの異なった種類の応力範囲 ( $S_{max} \sim S_{min}$ ) の繰返し荷重をランダムに受けたとき、おのおのの応力レベルの繰返し数で逐次生ずる損傷の累加をいう。したがって、単に、損傷の線形累積という場合には、 $\sum_{i=1}^m n_i/\bar{N}_i$  を意味する。

変動荷重下における疲労寿命の研究は、1924年に、Palmgren がはじめて論文を発表し、1945年に、Miner<sup>3)</sup> がアルミニウム合金試験片を用いて、Palmgren の仮説

を実験的に実証した。よく知られるいわゆる Palmgren-Miner の仮定—損傷の線形累積を仮定している—である。その後、1959年に、Corten と Dolan<sup>4)</sup> とは、ランダム荷重に度数分布を考え、Palmgren-Miner 仮定の修正式を示した。

1966年に、Hilsdorf と Kesler<sup>5)</sup> は、コンクリート疲労の研究に、はじめて変動荷重を扱った。かれらは、3種類の変動曲げ疲労試験を行ない、累積損傷に対し、Palmgren-Miner 仮定を適用した。また、1970年に、Ballinger<sup>6)</sup> は、同じく、変動曲げ疲労下での累積損傷実験を行なった。しかし、Kesler および Ballinger らの実験結果によれば、450 cpm 下でのコンクリートの累積損傷は、Palmgren-Miner 仮定によって、十分表わすことができないとしている。

著者らは、軽量コンクリートを用いて、 $S_1, S_2$  の2種類の応力レベルの組合せにより、2 cpm の低サイクル変動荷重下における累積損傷の実験を試みた。本研究での目的は、Kesler, Ballinger らの結果より、不確定な要素の多い高サイクル疲労をさけ、低サイクル圧縮荷重および曲げ荷重の2シリーズによって、損傷の線形累積を検討し、低サイクル荷重下におけるプレーンコンクリートの疲労特性と非弾性挙動について述べることにある。

### 2. 変動荷重下における疲労寿命の研究

#### (1) Palmgren-Miner の仮定

Miner は、アルミニウム合金の試験片 (長さ 35 cm, 厚さ 5 cm) を用いて、片振り引張および両振り引張の2シリーズについて、変動繰返し試験を行なった。かれは、繰返し荷重下の累積損傷が100%にいったとき供試体が破壊するという、Palmgren の仮説に基づいて、次のようなアプローチを試みた。

$i$  番目の応力レベル  $S_i$  における繰返し数  $n_i$  と、同じ

\* 正会員 工修 日本工営(株)設計第1部

\*\* 正会員 工博 名古屋大学教授 工学部土木工学教室

応力レベルにおける一定振幅での平均疲労寿命  $\bar{N}_i$  との比を、すべての  $i$  について加えたものが 1 に等しい、すなわち、

$$\sum_{i=1}^m n_i/\bar{N}_i = 1 \dots\dots\dots (1)$$

のとき破壊が起こる、と考えた。

2 シリーズでの実験結果から、 $\sum n_i/\bar{N}$  の平均値は、それぞれ 0.98, 1.05 であった。また、ばらつきの範囲は、0.61~1.49 であり、損傷の線形累積は、よくあうことを示した。

(2) Corten-Dolan の式

Corten と Dolan とは、Palmgren-Miner 仮定を度数分布におきかえ、多段多重およびランダム荷重にまで拡張した。

1 周期内の応力の全繰返し数を  $n_g$ ,  $S-N$  曲線を  $NS^b = K$  とおき、式 (1) に代入すると、変動荷重下の寿命  $N_f$  は、

$$N_f = N_1 / \left\{ \sum_{i=1}^m \alpha_i \left( \frac{S_i}{S_1} \right)^b \right\} \dots\dots\dots (2)$$

となる。ここで、 $\alpha_i = n_i/n_g$  は、応力ひん度曲線で応力  $S_i$  の度数の比でもある。

(3) 変動荷重下の  $S-N$  曲線

Palmgren-Miner 仮定は、累積損傷が  $S_1, S_2$  の応力下で生ずる損傷に近似しており、したがって、変動荷重下での結果は、一定繰返し試験で得られた  $S-N$  曲線と比較できる。

すなわち、 $S_1$  で生ずる損傷は、式 (1) より

$$n_1/\bar{N}_1 = D_1$$

で表わされ、損傷  $D_1$  に対する  $S_2$  での繰返し数  $n_2(d_1)$  を換算すると、

$$n_2(d_1) = \bar{N}_2 \cdot D_1 \dots\dots\dots (3)$$

で表わされる。

したがって、 $S_2$  の応力下での破壊に至る全繰返し数は、式 (3) の  $n_2(d_1)$  に、 $S_2$  の応力下で実際に作用した繰返し数  $n_2$  を加えた総和となる。

$$n_2(\text{total}) = n_2(d_1) + n_2 \dots\dots\dots (4)$$

以上が現在までの研究の総括である。

3. 供試体および実験方法

(1) 供試体

圧縮シリーズは、 $\phi 10 \times 20$  cm の円柱供試体を、曲げシリーズは、断面  $12 \times 12$  cm, 長さ 50 cm のはりを用いた。実験に用いたコンクリートは、Table 1 の示方配合

Table 1 Details of concrete mix

Material	Cement (kg)	Water (kg)	Fine aggregate (kg)	Coarse aggregate (kg)	Slump (cm)
Lionite	354	163	519	592	4.0±1

による。細粗骨材はともに、大阪セメント社の軽量骨材ライオナイトで、セメントは、同社の普通ポルトランドセメントである。細粗骨材の比重は、1.84 および 1.40 である。コンクリートの締固めには、12000 rpm の棒状パイプレータを使用した。養生は、すべて 2 日目に脱型後、20°C 水中養生を行ない、材令 28 日以後は、恒温室 (20±1°C, RH=90%) で養生した。

疲労試験時の材令は、打設後コンクリートの強度が安定する 100 日以上経ている。

(2) 静的試験

圧縮シリーズについては、一定繰返し試験直前、および、累積損傷試験直前に、各バッチごとに、3 個ずつ抽出し、静的強度試験を行なった。載荷においては、Fig. 1 に示すように、拘束摩擦をさけるため、両面にシリコングリスをぬり、テフロンシート (厚 0.1 mm) を使用した (一定繰返し試験および累積損傷試験の場合も、この方法で行なった)。

曲げシリーズについては、同じく、各バッチごとに、3 個ずつ抽出し、Fig. 2 に示すように、三等分載荷とし、静的試験を行なった。

静的試験は、すべて島津製作所 Riehle 型万能 100 t 試験機で行ない、ひずみ測定には、ポリエステルゲージ (共和, KC-70, gage factor 2.10, 120 Ω) を用いた。

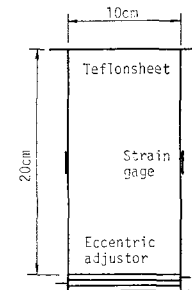


Fig. 1 Setup of compressive specimen

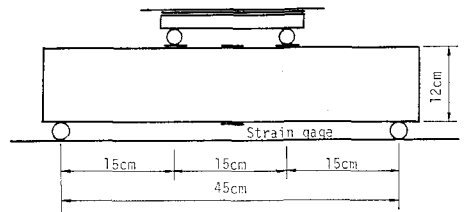


Fig. 2 Setup of flexural specimen

(3) 一定繰返し試験

低サイクル荷重は、島津製作所 Riehle 型万能 100 t 試験機に付属している自動荷制御装置を連動して行なった。繰返し載荷速度は、2 cpm とし、荷重と時間の関係は、Fig. 3 の山形波形で示されている。

最小応力は、圧縮シリーズについては、静的圧縮強度の10%、曲げシリーズについては、静的曲げ強度の40%とした。

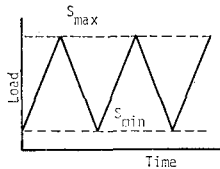


Fig. 3 Load-Time relationship of applied loading

(4) 累積損傷試験

累積損傷試験は、変動応力  $S_1, S_2$  の2種類の組合せからなり、圧縮および曲げシリーズの詳細を Fig. 4 に示した。繰返し載荷速度は、一定繰返し試験と同じく、2 cpm とした。

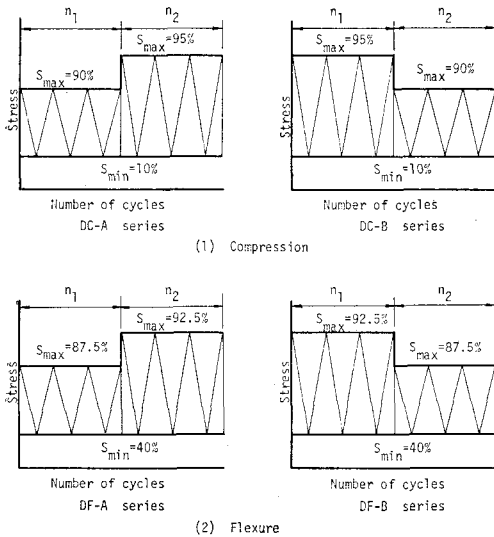


Fig. 4 Cumulative damage test

なお、一定繰返し試験、および、累積損傷試験におけるひずみ測定は、静的載荷試験の場合と同じく、電気抵抗抗線ひずみ計を用い、逐次、任意の繰返し数において、ヒステリシスループを indicator によって調べた。ポリエステルゲージは、破壊まで有効に働き、2 cpm の低サイクル疲労に対して、この方法は、弾性ひずみの変化を十分追跡することができた。

4. 実験結果

(1) 静的試験の結果

各バッチごとに、圧縮および曲げシリーズの静的試験の

Table 2 Results of static test

Batch	at 28days		at Test			
	Compressive strength	Elastic modulus	Compressive strength	Elastic modulus	Flexural strength	Tensile elastic modulus
Average	406	$1.850 \times 10^5$	539	$1.851 \times 10^5$	32.4	$1.972 \times 10^5$
Standard deviation			11.7	$0.061 \times 10^5$	4.2	$0.090 \times 10^5$

(unit: kg/cm<sup>2</sup>)

結果を平均して、Table 2 にまとめた。

(2) 一定繰返し試験の結果

圧縮および曲げシリーズの一定繰返し試験の結果を、Table 3 に要約する。

Table 3 Results of low cycle fatigue test

(1) Compression					(2) Flexure				
$S_{max}$	r	$N_f$	$\log N_f$	P	$S_{max}$	r	$N_f$	$\log N_f$	P
95.0	1	5	0.698	0.857	92.5	1	11	1.041	0.888
	2	13	1.113	0.714		2	13	1.114	0.777
	3	16	1.204	0.571		3	15	1.176	0.666
	4	17	1.230	0.429		4	19	1.279	0.555
	5	21	1.322	0.286		5	28	1.447	0.444
	6	28	1.447	0.143		6	36	1.556	0.333
92.5	1	25	1.397	0.875	7	40	1.602	0.222	
	2	33	1.518	0.750	8	40	1.602	0.111	
	3	34	1.531	0.625	90.0	1	42	1.623	0.857
	4	37	1.568	0.500		2	60	1.778	0.714
	5	51	1.707	0.375		3	83	1.919	0.571
	6	52	1.716	0.250		4	92	1.963	0.429
	7	59	1.770	0.125	5	106	2.025	0.286	
90.0	1	82	1.913	0.875	6	135	2.130	0.143	
	2	106	2.025	0.750	87.5	1	217	2.336	0.666
	3	108	2.033	0.625		2	300	2.477	0.333
	4	124	2.093	0.500					
	5	143	2.155	0.375					
	6	156	2.193	0.250					
	7	187	2.271	0.125					

\*  $P=1-(r/n+1)$  : Probability of survival

(3) 累積損傷試験の結果

圧縮および曲げシリーズの累積損傷試験の結果を、Table 4 に要約する。

Table 4 Results of cumulative damage test

Specimen number	(1) Compression			$n_1$	$n_2$	$N_f$
	Stress level (%)					
	$S_{min}$	$S_{max(1)}$	$S_{max(2)}$			
DC-A1	10	90	95	67	4	71
DC-A2	10	90	95	88	11	99
DC-A3	10	90	95	38	15	53
DC-A4	10	90	95	62	9	71
DC-A5	10	90	95	61	9	70
DC-A6	10	90	95	30	12	42
DC-A7	10	90	95	65	14	79
DC-A8	10	90	95	97	7	104
DC-B1	10	95	90	8	62	70
DC-B2	10	95	90	9	92	101
DC-B3	10	95	90	13	18	31
DC-B4	10	95	90	13	48	61
DC-B5	10	95	90	4	105	109

(2) Flexure

Specimen number	Stress level (%)			$n_1$	$n_2$	$N_f$
	Stress level (%)					
	$S_{min}$	$S_{max(1)}$	$S_{max(2)}$			
DF-A1	40	87.5	92.5	151	14	165
DF-A2	40	87.5	92.5	35	20	55
DF-A3	40	87.5	92.5	15	29	44
DF-A4	40	87.5	92.5	72	10	82
DF-B1	40	92.5	87.5	19	11	30
DF-B2	40	92.5	87.5	4	200	204
DF-B3	40	92.5	87.5	8	68	76
DF-B4	40	92.5	87.5	13	44	57
DF-B5	40	92.5	87.5	19	112	131

\*  $n_1$  is the number of cycles which was repeated in  $S_{max(1)}$ .

5. 考 察

(1) 累積損傷の検討

a) 累積損傷の意味

Palmgren-Miner 仮定の損傷は, Fig. 5 に示すように, 繰返し数の累積比  $\alpha = \sum n_i / \bar{N}$  と損傷度  $D$  との関係

$$D = \alpha \dots \dots \dots (5)$$

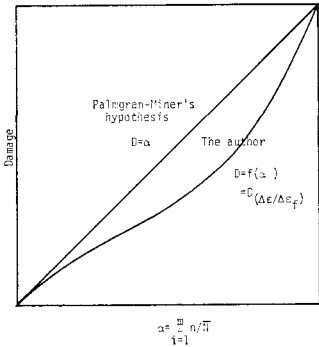


Fig. 5 Expression of damage hypothesis

を意味し, 疲労損傷は, 直線的に進行すると仮定している。しかし, Kesler らの実験結果より,  $D$  と  $\alpha$  との関係は複雑であり, 式 (5) の関係は, 必ずしもなりたないようである。

そこで, 今回測定した破壊にいた

る弾性ひずみの変化について注目してみる。初回に最大応力を加えたときのひずみを  $\epsilon_0$ ,  $N_s$ 。回線返し荷重を加えたときの最大応力時のひずみを  $\epsilon_s$  とすれば, ひずみ増加率  $\Delta\epsilon$  は, つぎのように表わされる。

$$\Delta\epsilon = (\epsilon_s - \epsilon_0) / \epsilon_0 \dots \dots \dots (6)$$

また, 破壊時におけるひずみ増加率を  $\Delta\epsilon_f$  とする。上述の関係を用いて, 弾性ひずみ増加率の比  $\Delta\epsilon / \Delta\epsilon_f$  を損傷度  $D$  と考えて, つぎのようにおく。

$$D = \Delta\epsilon / \Delta\epsilon_f = f(\alpha) \dots \dots \dots (7)$$

Fig. 6, 7 において, 各応力レベルの間における  $\Delta\epsilon / \Delta\epsilon_f$  の差異は, わずかであり, 応力が途中, 上昇あるいは下降変動する場合にも,  $\Delta\epsilon / \Delta\epsilon_f$  の変化は, 連続である

ものと仮定する。

Fig. 6, 7 の  $\Delta\epsilon / \Delta\epsilon_f$  を対数目盛で表わすと,  $\Delta\epsilon / \Delta\epsilon_f$  による損傷度  $D_{(\Delta\epsilon)}$  と  $\alpha$  との間には, 次の関係が成立する。

$$\log D_{(\Delta\epsilon)} = 0.882 + 0.011 \alpha \quad (\text{圧縮シリーズ}) \dots \dots \dots (8)$$

$$\log D_{(\Delta\epsilon)} = 0.847 + 0.012 \alpha \quad (\text{曲げシリーズ}) \dots \dots \dots (9)$$

ここで,  $D_{(\Delta\epsilon)}$  (%),  $\alpha = \sum n_i / \bar{N}$  (%) である。

圧縮および曲げシリーズの損傷試験結果に対し, Palmgren-Miner 仮定と,  $\Delta\epsilon / \Delta\epsilon_f$  による式 (8), (9) の損傷仮定とを適用した。その結果を, Fig. 8, 9, 10, 11 に示す。

Palmgren-Miner 仮定による累積損傷度は, 圧縮については, 平均値が 1.08, ばらつきが 0.76~1.34, および, 曲げについては, 平均値が 0.92, ばらつきが 0.69~1.21 を示した。

$\Delta\epsilon / \Delta\epsilon_f$  による累積損傷度は, 圧縮については, 平均値が 1.19, ばらつきが 0.49~2.06, および, 曲げについては, 平均値が 0.98, ばらつきが 0.46~1.88 と, かなり広い範囲の値を示した。

以上の結果から, Palmgren-Miner 仮定と  $\Delta\epsilon / \Delta\epsilon_f$  の仮定とを比較すると, 実験値は, Palmgren-Miner 仮定にかなり近い損傷過程であることが認められる。

一方,  $\Delta\epsilon / \Delta\epsilon_f$  による損傷仮定が, いくらかばらつきを示した原因には, つぎのことが考えられる。

(1) Palmgren-Miner 仮定の累積損傷が  $\alpha = 85 \sim 100\%$  のとき,  $\Delta\epsilon / \Delta\epsilon_f$  は, 式 (8), (9) において,  $D_{(\Delta\epsilon)} = 65 \sim 180\%$  に対応しており, 累積損傷が広い分布を示す結果となっている。

これには, 疲労データのばらつきが加味してくる。

(2) Fig. 6, 7 において, 変動応力に際しても,  $\Delta\epsilon / \Delta\epsilon_f$  の損傷は, 比例的に連続するとした式 (8), (9) の仮定に問題があると考えられる。

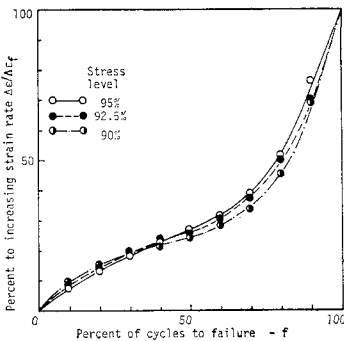


Fig. 6 Variation of percent to increasing strain rate in compression

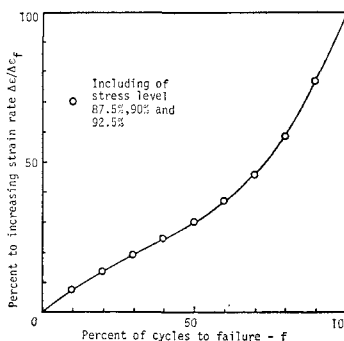


Fig. 7 Variation of percent to increasing strain rate in flexure

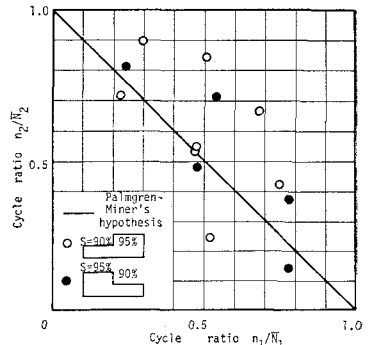


Fig. 8 Results of cumulative damage test due to  $\sum n_i / \bar{N}$  in compression

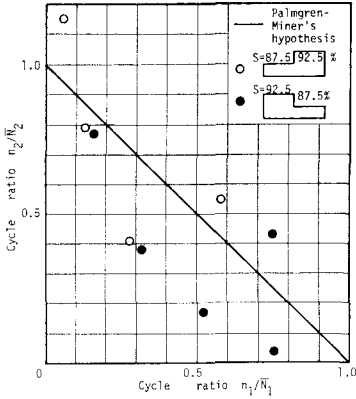


Fig. 9 Results of cumulative damage test due to  $\Sigma n/\bar{N}$  in flexure

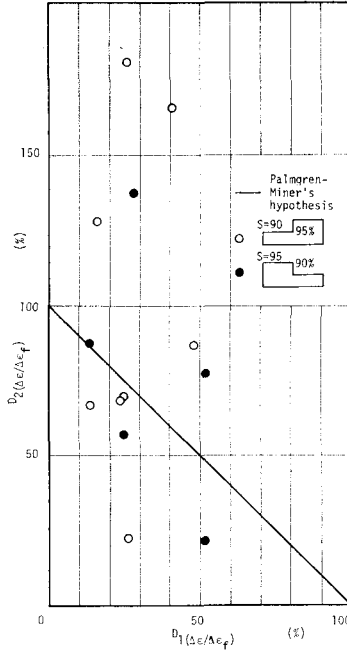


Fig. 10 Results of cumulative damage test due to  $D_{c,d}$  in compression

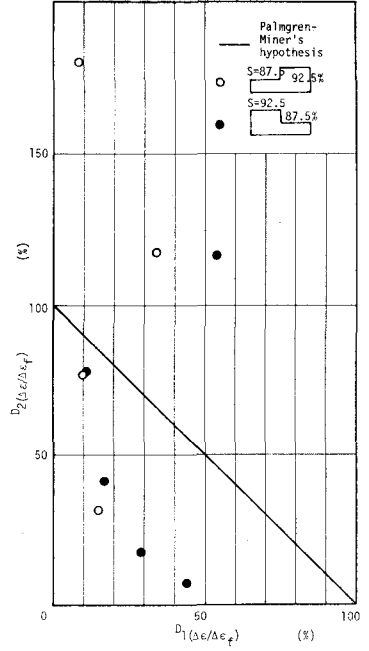


Fig. 11 Results of cumulative damage test due to  $D_{c,d}$  in flexure

そこで、以下に (2) の検討を行なう。

静的試験で得られた最大応力 90%, 95% の弾性ひずみを、それぞれ  $\epsilon_{0.90}^*$ ,  $\epsilon_{0.95}^*$  とし、いま、変動応力を  $S_1=90\%$  から  $S_2=95\%$  に高めるものとする。ある繰返し数  $n$  回での 90% 弾性ひずみを  $\epsilon_{0.90}^n$  とし、95% に変動した  $(n+1)$  回での 95% 弾性ひずみを  $\epsilon_{0.95}^{n+1}$  とする。

したがって、破壊に対するパーセント  $f_i$  (ここで、 $f_i=n/\bar{N}_i$  を意味し、 $f_i \approx n+1/\bar{N}_i$  に近似する) における 90% 応力レベルの  $\Delta\epsilon$ 、および、 $S_1$  レベルの破壊パーセント  $f_i$  に相当する 95% 応力レベルの  $\Delta\epsilon$  は、

$$\left. \begin{aligned} \Delta\epsilon_{0.90} &= (\epsilon_{0.90}^n - \epsilon_{0.90}^*) / \epsilon_{0.90}^* \\ \Delta\epsilon_{0.95} &= (\epsilon_{0.95}^{n+1} - \epsilon_{0.95}^*) / \epsilon_{0.95}^* \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

となる。

実験データに対し、式 (10) で計算した結果を、Fig. 12 に示す。ここで、90% から 95% に上昇する場合は、変動応力に際しても式 (8) の累積損傷は、比例的に連続することが認められ、仮定は正しかったことになる。しかし、95% から 90% に下降する場合は、弾性ひずみが strain softening の現象を示し、変動時の  $\Delta\epsilon_{0.90}$  が 95% 応力レベルの損傷に相当するひずみ増加率  $\Delta\epsilon(f)_{0.90}$  よりも大きな結果を示した。すなわち、Fig. 12 からわかるように、変動時には、すでに、 $\alpha$  に換算して、ほぼ 5~10% 損傷が進行しており、式 (8) で仮定した  $\Delta\epsilon/\Delta\epsilon_f$  の連続性は、応力下降の場合、成立しないことがわかった。

以上の検討は、圧縮シリーズについてであり、曲げについては、変動応力に際し弾性ひずみの差が微小であり、ばらつきが大きいいため、ここでは検討を省略する。

圧縮および曲げシリーズにおいて、応力下降の場合は、Palmgren-Miner 仮定の平均が、いずれも  $\Sigma n/\bar{N} \leq 1$  の傾向を示している。これは、検討 (2) の strain softening がおもな要因であると説明できよう。

b) 変動応力下における S-N 曲線

累積損傷実験の結果に式 (4) を適用すると、変動応力下における S-N 曲線は、Fig. 13, 14 に示すようである。一定繰返し試験で得られた S-N 曲線と比較すると、 $N=100$  の疲労強度の差異は、圧縮シリーズで 0.5%、曲げシリーズで 0.1% ときわめてわずかであり、ほぼ一致することが認められた。

したがって、Palmgren-Miner 仮定は、軽量コンクリートの低サイクル累積損傷にかなり合致することが、この S-N 曲線からも説明できた。

一般に、高サイクル疲労下では、マイクロクラック、クリープなどの不確定要素が伴い、累積損傷において、単に、繰返し数の比、いわば材料の入力的な量のみで扱うことに問題がある。

一方、低サイクル疲労においては、繰返し数が負荷エネルギーとして、累積損傷に直接に影響する要素となる。これは、低サイクルの荷重波形が線形であり、変動

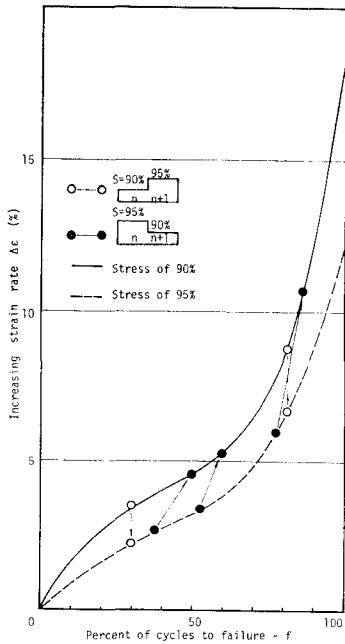


Fig. 12 Variation of increasing strain rate under variable load in compression

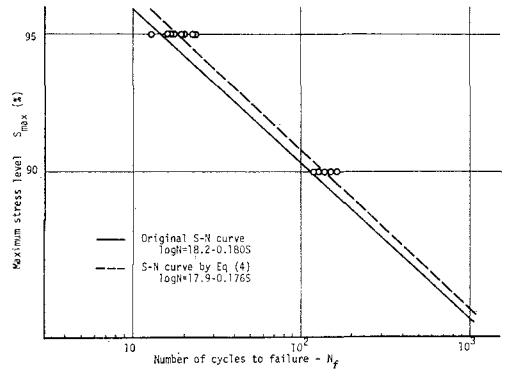


Fig. 13 S-N curve under variable load in compression

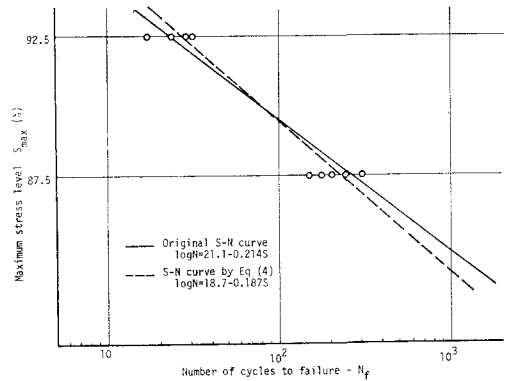


Fig. 14 S-N curve under variable load in flexure

負荷に対する内部挙動の応答も、幾何学的に波形と一致しており、この点が、正弦波形をなす高サイクル疲労と性質を大きく異にするものと思われる。

(2) 低サイクル荷重下における疲労特性

a) S-N 曲線と疲労寿命の分布

Fig. 15 において、圧縮シリーズと曲げシリーズの S-N 曲線は、S(%) で比較すると、ほぼ一致を示して

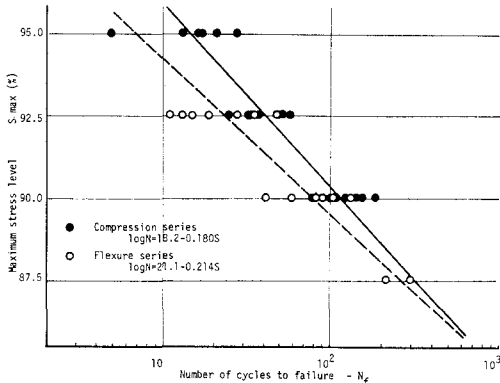


Fig. 15 Results of low cycle fatigue test

いる。これは、一般に高サイクル疲労において、1000 万回時の疲労強度が、圧縮および曲げのいずれもほぼ 55% であることから、低サイクル疲労時の破壊過程においても、類似性を有することが得られた。

畑野と渡辺<sup>7)</sup>は、材令 28 日の普通コンクリートの円柱供試体  $\phi 10 \times 20$  cm を用いた 28 cpm の圧縮繰返し試験結果を発表している。今回の実験結果と比較することは、材令および荷重波形が異なり、やや問題があるが、

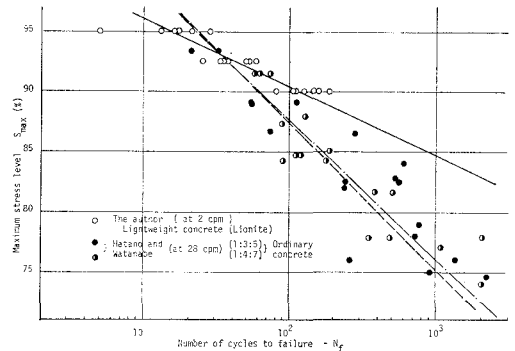


Fig. 16 Comparison of low cycle fatigue test in compression

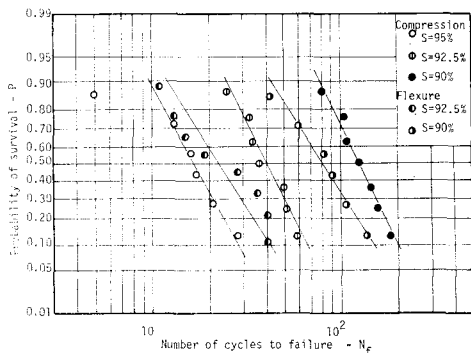


Fig. 17 Distribution of fatigue life

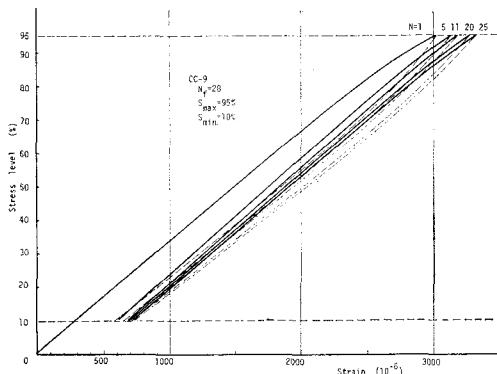


Fig. 18 Variation of stress-strain curve with number of cycles in compression

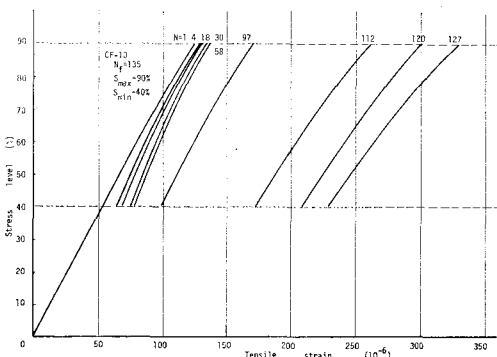


Fig. 19 Variation of stress-strain curve with number of cycles in flexure

Fig. 16 に両者の結果を示した。

Fig. 16 において、普通コンクリートと軽量コンクリートとの低サイクル疲労強度の差異は、 $N=100$  で、軽量コンクリートの方が3%ほど強い結果となっている。

しかし、現在のところ、コンクリートの低サイクル疲労の資料は、わずかであり、今後の実験に待ちたい。

著者の一人<sup>8)</sup>は、すでに、コンクリートの疲労寿命のばらつきが対数正規分布する考えを示したが、阪田・木山・西林<sup>9)</sup>は、軽量および普通コンクリートを用い、300 cpm 下の圧縮疲労試験の結果、各応力比の疲労寿命の分布が、対数正規分布に従うことを示している。

Fig. 17 は、今回の 2 cpm 下での圧縮および曲げシリーズについて、各応力比のデータの分布を示した。P は、生存確率であり、順序統計量より、 $P=1-(r/n+1)$  で表わされる。Fig. 17 から、低サイクル疲労に対しても、各応力比で対数正規分布することが認められた。

b) 接線弾性係数の変化

Fig. 18, 19 は、応力-ひずみ曲線の変化の代表例を示した。さらに、最大応力の  $2/3 \cdot S$  での接線弾性係数の変化を、Fig. 20, 21 にプロットした。

圧縮および曲げシリーズの接線弾性係数の変化は、それぞれつぎのようである。

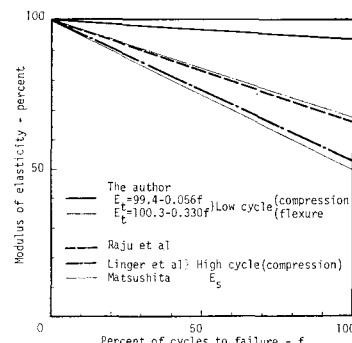
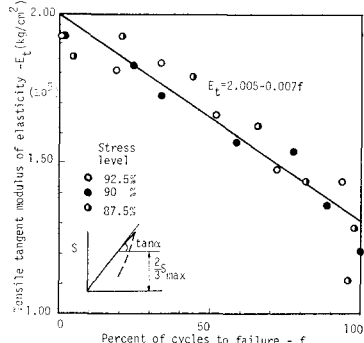
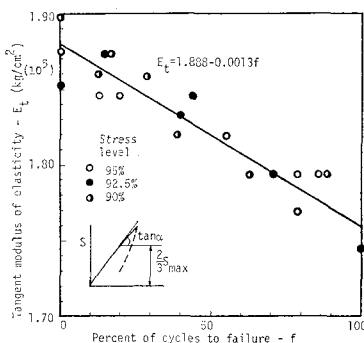


Fig. 20 Decrease of tangent modulus of elasticity in compression

Fig. 21 Decrease of tensile tangent modulus of elasticity in flexure

Fig. 22 Decrease of modulus of elasticity under repeated loading

$$\left. \begin{aligned} E_t &= 1.888 - 0.0013 f \text{ (圧縮シリーズ)} \\ E_t &= 2.005 - 0.007 f \text{ (曲げシリーズ)} \end{aligned} \right\} \dots (11)$$

ここで、 $E_t$  の単位は  $10^5 \text{ kg/cm}^2$  であり、曲げについては、引張接線弾性係数を意味する。 $f$  は、破壊にいたるパーセントである。

式 (11) を接線弾性係数比で表わすと、Fig. 22 に示すように、圧縮シリーズでは、破壊時に最初の値のほぼ 93%、曲げシリーズでは、ほぼ 61% に減少する。

Raju<sup>10)</sup>, Linger<sup>11)</sup>, 松下<sup>12)</sup>らは、高サイクル圧縮荷重下において、割線弾性係数が破壊時に、ほぼ、最初の50%~60% になるとしており、今回の低サイクル圧縮荷重での実験では、わずかな減少にすぎない。

今回の実験では、マイクロクラックの影響が少なく、応力-ひずみ曲線において、高サイクル疲労に現われるS字型が認められず、破壊がきわめて巨視的に進行したのが要因であると考えられる。

c) 疲労破壊時の弾ひずみと静的破壊ひずみの関係

Fig. 23 は、圧縮シリーズにおけるひずみ増加率と静的破壊時の弾性ひずみとの関係を示した。Fig. 23 からそれぞれの応力での疲労破壊時のひずみ増加率が、静的破壊時の弾性ひずみに対するそれと、ほぼ同じであることがわかる。

畑野と渡辺は、一連の研究結果<sup>7),13)</sup>から、繰返し一軸圧縮荷重のもとでは、

$$\epsilon_f = \epsilon_c = \text{const} \dots \dots \dots (12)$$

が成立し、疲労破壊時ひずみと静的破壊時ひずみが等しいことを示している。

著者らは、今回の実験結果より、軽量コンクリートに

おいても、式 (12) が妥当であることを認めた。

曲げシリーズについては、Fig. 24 に示すように、繰返し荷重下では、静的試験時の引張弾性ひずみのほぼ2.0 倍に達して、破壊した。

6. 結 語

上述の研究結果を個条書きにすると、つぎのようになる。

(1) Palmgren-Miner 仮定は、 $d\epsilon/d\epsilon_f$  の損傷仮定および変動荷重下の S-N 曲線からも、軽量コンクリートの低サイクル累積損傷に合うことが実験的に認められた。圧縮および曲げシリーズの  $\Sigma n/\bar{N}$  の平均値は、それぞれ、1.08, 0.92 であった。

(2) 圧縮シリーズと曲げシリーズの S-N 曲線は、S(%) で比較すると、ほぼ同じである。

(3) 各応力比におけるコンクリートの疲労寿命は、低サイクル下においても、対数正規分布に従う。

(4) 圧縮および曲げシリーズの接線弾性係数は、破壊時には最初の 90%~93%、および、61% に減少する。

(5) 繰返し圧縮荷重下において、破壊時の弾性ひずみは、静的破壊時の弾性ひずみにほぼ一致した。

本研究は、軽量コンクリートの低サイクル疲労について扱ったが、現在のところ、土木構造物の低サイクル研究は、ほとんどなされていない。しかし、今後、構造物の種類によっては、低サイクル疲労の見地から設計する必要があり、本研究の結果が、なんらかの資料となれば幸いである。

この研究は、昭和 46 年度の文部省科学研究費によるものである。ここに記して謝意を表したい。

参 考 文 献

- 1) 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，第 176 号，1970 年 4 月，pp. 83-88.
- 2) 都築和夫・成岡昌夫：軽量コンクリートの圧縮疲労強度に関する研究，第 25 回セメント技術大会年報，1971 年 6 月，pp. 291-295.
- 3) Miner, M.A. : Cumulative Damage in Fatigue, Journal of Applied Mechanics, Vol. 12, A. 159-164, Sept. 1945.
- 4) Liu, H.W. and Corten, H.T. : Fatigue Damage During Complex Stress Histories, NASA, TN D-256, Nov. 1959, p. 25.
- 5) Hilsdorf, H.K. and Kesler, C.E. : Fatigue Strength of Concrete under Varying Flexural Stresses, Journal of ACI, Vol. 63, 1966, pp. 1059-1076.
- 6) Ballinger, C.A. : The Cumulative Fatigue Damage Characteristics of Plain Concrete, Office of Research, Federal Highway Administration and U.S. Department of Transportation, Aug. 1970, p. 34.

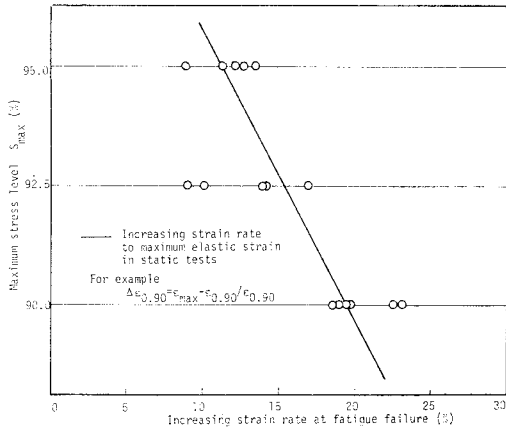


Fig. 23 Comparison of increasing strain rate at failure from static and fatigue test in compression

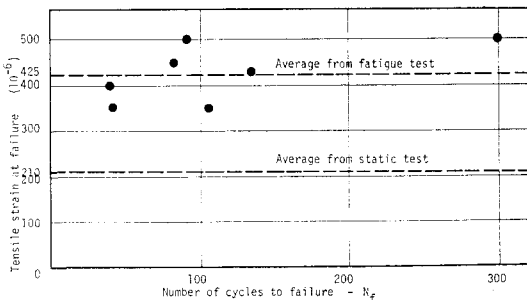


Fig. 24 Comparison of maximum tensile strain at failure from static and fatigue test in flexure



- 7) 畑野 正・渡辺啓行：周期的圧縮荷重によるコンクリートの疲労破壊，土木学会論文報告集，第 185 号，1971 年 1 月，pp. 51-60.
- 8) 浜田純夫・中川建治・成岡昌夫：疲労試験における途中打切りデータの処理に関する研究，土木学会論文報告集，第 198 号，1971 年 5 月，pp. 99-105.
- 9) 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，第 189 号，1972 年 2 月，pp. 197-114.
- 10) Bennett, E.W. and Raju, N.K. : Cumulative Fatigue Damage of Plain Concrete in Compression, International Conference on Structures, Solid Mechanics and Engineering Design in Civil Engineering Materials, University of Southampton, Apr. 1969, p. 14.
- 11) Linger, D.A. and Gilkspie, H.A. : A Study of the Mechanism of Concrete Fatigue and Fracture, Highway Research News, No. 22, Highway Research Board, Feb. 1966, pp. 40-51.
- 12) 松下博通：コンクリートの疲労に関する実験的研究，土木学会第 26 回年次学術講演会，V-2，1971 年 10 月，pp. 5-8.
- 13) 畑野 正：コンクリートの如き脆性体のひずみに立脚した破壊論，土木学会論文集，第 153 号，1968 年 5 月，pp. 31-39.

(1972. 4. 3・受付)