

[30] コンクリートの疲労寿命に及ぼす前繰返し応力の影響

正会員 ○松 下 博 通 (九州大学工学部)

玉 井 裕 行 (九州大学工学部)

1. まえがき

コンクリートが繰返し応力を受けると、その大きさが静的強度より小さいものであっても破壊に至ることがあり、これを疲労破壊と呼んでいる。コンクリートの疲労破壊に関する研究は、主として一定の大きさの繰返し応力により疲労破壊するまでの繰返し回数(疲労寿命)を求めることによって疲労強度を推定することが行われてきている。しかしながら、構造物コンクリートが受ける繰返し応力は、その大きさや周期が時間的に変化する変動応力であり、この変動繰返し応力を受ける場合の疲労寿命を、一定繰返し応力下の疲労寿命から推定する方法が必要となってくる。コンクリートが疲労破壊に至るまでの応力繰返しによる損傷の進行速度や破壊条件となる疲労破壊時の損傷度が明らかであれば、変動繰返し応力下の疲労寿命も理論的に推定することができるが、その損傷度の表現に何を考えればよいかも明らかでない現状では、変動繰返し応力下の疲労寿命の推定方法を明らかにするには実験によらねばならない。本研究は、変動繰返し応力のうち最も簡単な形である応力の大きさが一度だけ変化する二段階疲労試験を実施し、第一段階繰返し応力の大きさや繰返し回数が第二段階繰返し応力による疲労寿命にどのように影響するかを調べるとともに、繰返し応力による変形特性をエネルギー量から考察することにより、疲労損傷の進行速度について求め、このことから応力の変動方法により、前繰返し応力の影響が異なってくることを明らかにしようとするものである。

2. 試験方法

試験供試体は  $\phi 75 \times 15 \text{ cm}$  の円柱供試体であり、コンクリートの配合は、水セメント比が 50% と 63% の 2 種類のものを使用した。試験時の供試体は、コンクリートの水和反応による強度増進や乾湿条件の差による強度変化を避けるため、材令を 3 ヶ月以上とし、試験開始 3 週間前から普通室内に放置して気乾状態とした。試験時のコンクリートの静的圧縮強度は、 $W/C = 50\%$  の供試体で  $514 \text{ Kg/cm}^2$ 、 $W/C = 63\%$  の供試体で  $381 \text{ Kg/cm}^2$  である。二段階疲労試験の応力プログラムは、図-1 に示すように、繰返し応力の最小応力を静的圧縮強度の 8% に固定し、最大応力の大きさを第一段階の  $S_I$  から第二

段階の  $S_{II}$  に応力の大きさを増加する A~E グループと、 $S_I$  から  $S_{II}$  に応力の大きさを減少させる F~I グループの 2 シリーズとした。繰返し応力の大きさはすべて静的圧縮強度に対する比で表示し、第一段階の  $S_I$  の大きさおよび繰返し回数  $n_1$  を種々に変化させて、第

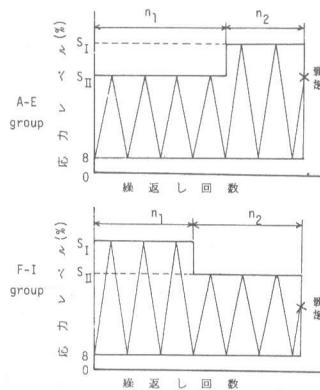


図-1 応力プログラム

表-1 各グループの試験プログラム

Group	応力比 $S_I$ (%)	応力比 $S_{II}$ (%)	前繰返し回数 ( $n_1$ )	供試体本数	平均疲労寿命 ( $\bar{N}_1$ )	$\log \frac{n_1}{\bar{N}_1}$
A	8-50	8-80	$10^2$	8	$3.24 \times 10^9$	-7.51
			$10^3$	7		-6.51
			$10^4$	7		-5.51
			$10^5$	5		-4.51
			$10^6$	5		-3.51
B	8-60	8-80	$10^2$	7	$4.06 \times 10^7$	-5.61
			$10^4$	8		-4.61
			$10^5$	6		-3.61
			$10^6$	8		-2.61
			$10^6$	6		-1.61
C	8-65	8-80	$10^2$	6	$4.55 \times 10^6$	-4.66
			$10^3$	7		-3.66
			$10^4$	7		-2.66
			$10^5$	6		-1.66
			$10^6$	5		-0.66
D	8-70	8-80	$10^2$	5	$5.09 \times 10^5$	-3.71
			$10^3$	6		-2.71
			$10^4$	6		-1.71
			$10^5$	12		-0.71
			$2.5 \times 10^5$	36		-0.31
$4.0 \times 10^5$	4	-0.10				
E	8-75	8-80	$10^2$	5	$6.61 \times 10^4$	-2.82
			$10^4$	5		-1.82
			$10^4$	7		-0.82
			$2.65 \times 10^4$	7		-0.40
F	8-85	8-80	$10^2$	6	$8.30 \times 10^2$	-0.92
G	8-80	8-70	$1.2 \times 10^3$	7	$3.55 \times 10^3$	-0.47
			$3.0 \times 10^3$	11		-0.07
			$4.8 \times 10^3$	9		0.13
H	8-80	8-75	$10^2$	5	$3.55 \times 10^3$	-1.55
			$10^3$	5		-0.55
I	8-85	8-75	$10^2$	5	$8.30 \times 10^2$	-0.92

二段階の  $S_{II}$  による疲労寿命  $n_2$  を測定した。繰返し応力はいずれも 300 回/分の速度の正弦変化応力である。これらの試験条件をまとめて表-1 に示す。二段階疲労試験に供した供試体本数は 239 本である。表-1 中の平均疲労寿命  $\bar{N}$  は、第一段階の  $S_I$  の応力レベルの一定繰返し応力を繰返しした場合の平均疲労寿命であり、 $S_{II} = 75\%$ 、 $80\%$  および  $85\%$  については実測値から、その他の場合については既報<sup>(1)</sup> の推定式  $\log \bar{N} = 17.5 \times (100 - S_1) / (100 - S_2)$  (ここで  $S_1, S_2$  は一定繰返し応力の最大、最小応力比) から求めたものである。なお、第一段階の  $S_I$  を繰返し載荷中に疲労破壊した供試体および第二段階の  $S_{II}$  を 200 万回繰返しても疲労破壊せずに試験を中止した供試体などは、いずれもデータに含めて考えた。

### 3 二段階疲労試験による寿命分布と平均疲労寿命

試験結果の一例として  $S_I = 50\%$  の第一段階繰返し応力を  $n_1 = 10^4$  回繰返した後、 $S_{II} = 80\%$  として疲労破壊

までの  $S_{II}$  の繰返し回数  $n_2$  を測定した結果を表-2 に示す。疲労寿命は大きくばらついており、この傾向は他のグループについても同様であった。このため、統計的な処理が必要である。今、

$$M = n_1/\bar{N}_1 + n_2/\bar{N}_2$$

( $\bar{N}_1, \bar{N}_2$  は、 $S_I, S_{II}$  の応力レベルの一定繰返し応力を受けた時の平均疲労寿命) とすれば、 $M$  の分布は図-2 に示すように対数正規分布として近似される。他のグループの試験結果も同様であった。

$M$  が対数正規分布すれば、回帰式は  $t = A \log M + B$  ( $t$  は正規分布曲線の対称軸からの距離、 $A, B$  は定数) で示され、 $\log M$  の平均値  $\overline{\log M}$ 、標準偏差  $D(\log M)$  は、それぞれ、 $\overline{\log M} = -B/A$ 、 $D(\log M) = 1/A$  で示される。各グループごとに、回帰式  $\overline{\log M}$ 、 $D(\log M)$  の値を求めて、表-3 に示す。

### 4 平均寿命に及ぼす前繰返し応力の影響

平均寿命  $\overline{\log M}$  が第一段階の応力繰返し回数によってどのように変化する

表-2 疲労寿命測定結果例 ( $S_I = 50\%$ ,  $N_1 = 10^4$ ,  $S_{II} = 80\%$ )

$n_1$	$n_2$	$M$	$\log M$
100	90	0.025	-1.596
100	510	0.144	-0.843
100	980	0.276	-0.559
100	2870	0.808	-0.092
100	12900	3.634	0.560
100	16140	4.546	0.658
100	18560	5.228	0.718
100	78740	22.180	1.346

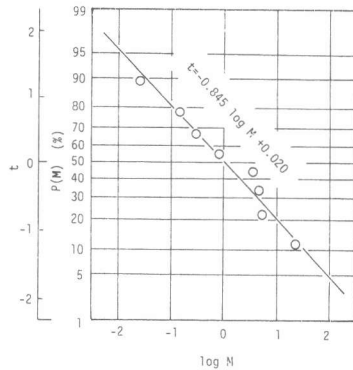


図-2 M の対数正規分布へのあてはめ

表-3 疲労寿命分布,  $\log M$ ,  $D(\log M)$

Group	前繰返し回数 ( $n_1$ )	回帰直線式	$\overline{\log M}$	$D(\log M)$
A	$10^2$	$t = -0.845 \log M + 0.020$	0.024	1.183
	$10^3$	$t = -1.101 \log M + 0.036$	0.036	0.990
	$10^4$	$t = -1.149 \log M - 0.073$	-0.064	0.870
	$10^5$	$t = -1.547 \log M + 0.025$	0.016	0.647
	$10^6$	$t = -1.732 \log M + 0.342$	0.197	0.578
B	$10^2$	$t = -1.364 \log M - 0.003$	-0.002	0.733
	$10^3$	$t = -1.332 \log M - 0.084$	-0.063	0.751
	$10^4$	$t = -1.607 \log M + 0.226$	0.141	0.624
	$10^5$	$t = -0.778 \log M + 0.207$	0.265	1.285
	$10^6$	$t = -1.215 \log M + 0.342$	0.267	0.823
C	$10^2$	$t = -1.223 \log M - 0.045$	-0.037	0.818
	$10^3$	$t = -1.290 \log M - 0.082$	-0.064	0.775
	$10^4$	$t = -2.629 \log M + 0.271$	0.103	0.380
	$10^5$	$t = -1.628 \log M + 0.237$	0.146	0.614
	$10^6$	$t = -0.919 \log M + 1.265$	1.377	1.088
D	$10^2$	$t = -1.020 \log M - 0.058$	-0.057	0.980
	$10^3$	$t = -3.341 \log M + 0.261$	0.078	0.299
	$10^4$	$t = -2.050 \log M + 0.246$	0.120	0.488
	$10^5$	$t = -0.957 \log M + 1.045$	1.092	1.045
	$2.5 \times 10^5$	$t = -0.684 \log M + 0.390$	0.571	1.463
E	$10^2$	$t = -1.072 \log M - 0.003$	-0.003	0.933
	$10^3$	$t = -1.035 \log M + 0.317$	0.306	0.996
	$10^4$	$t = -2.024 \log M + 0.659$	0.326	0.494
	$10^5$	$t = -0.710 \log M - 0.051$	-0.071	1.408
	$2.65 \times 10^4$			
F	$10^2$	$t = -1.243 \log M - 0.689$	-0.554	0.804
G	$1.2 \times 10^3$	$t = -1.248 \log M + 0.236$	-0.189	0.801
	$3.0 \times 10^3$	$t = -1.671 \log M + 0.128$	0.076	0.598
	$4.8 \times 10^3$	$t = -1.086 \log M - 0.017$	-0.015	0.921
H	$10^2$	$t = -2.630 \log M - 2.000$	-0.742	0.371
	$10^3$	$t = -0.721 \log M - 0.111$	-0.149	1.351
I	$10^2$	$t = -1.213 \log M - 0.561$	-0.462	0.825

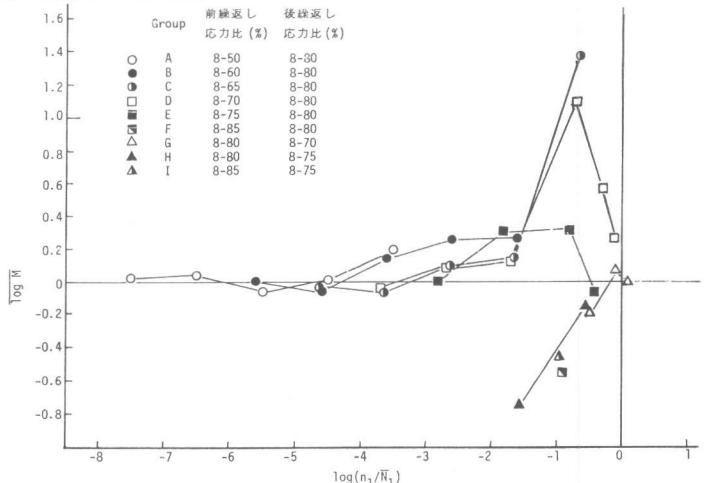


図-3  $\log(n_1/\bar{N}_1)$  による  $\log M$  の変化

かを求め図-3に示す。この結果、応力の変動方法によって、 $\overline{\log M}$ の変化曲線の傾向が異なっていることが示されている。すなわち、第一段階繰返し応力から第二段階繰返し応力へ応力の大きさを増大させるA~Eグループの試験結果では、 $n_1/\bar{N}_1$ が小さい領域では $\overline{\log M} \approx 0$  ( $\bar{M} \approx 1$ )であるが、 $n_1/\bar{N}_1$ の増加とともに次第に $\bar{M}$ の値が増大し $\log(n_1/\bar{N}_1) = -1$  ( $n_1/\bar{N}_1 = 0.1$ )前後でピーク値を示し、以後再び減少して、 $n_1/\bar{N}_1 = 1$ で $\overline{\log M} = 0$ となっている。また、このピーク値の大きさは、 $S_1 = 65 \sim 80\%$ の領域では、 $S_1$ が小さいほどピーク値が大きい。一方、応力の大きさを減少させる二段階疲労試験を行なったF~Iグループでは、 $n_1/\bar{N}_1$ が小さい領域での試験結果がなく不明ではあるが、 $n_1/\bar{N}_1 = 0$ の点では $\overline{\log M} = 0$ であることを考慮すると、 $n_1/\bar{N}_1$ が0~1に変化することにより、 $\overline{\log M}$ は下に凸の曲線、すなわち $\overline{\log M}$ は $n_1/\bar{N}_1$ の増加とともに次第に減少して後、再び増大し、 $n_1/\bar{N}_1 = 1$ で $\overline{\log M} = 0$ となると推定される。このように、応力の変動方法によって $\overline{\log M}$ の変化が異なることから、少くともコンクリートの疲労過程を累積損傷過程と考えたとき、その損傷速度は繰返し回数に対して一次的なものとはいえない。

### 5 二段階疲労試験による変形特性

二段階疲労試験における応力ひずみ曲線の変遷の測定結果として、 $S_1 = 70\%$  ( $n_1 = 10^5$ ) から  $S_{II} = 80\%$  に変動させた場合を図-4に、 $S_1 = 80\%$  ( $n_1 = 3 \times 10^5$ ) から  $S_{II} = 70\%$  に変動させた場合を図-5に示す。いずれの場合にも、変動後の応力ひずみ曲線は下に凸になっており、その形状は一定繰返し応力下のものと大同小異と考えられる。一方、最大ひずみ量の変化曲線を図-6、7に示す。一定繰返し応力下の最大ひずみ量の変化曲線は、繰返し初期と破壊近傍でひずみ量の変化量が大きい遷移領域と加速領域にはさまれた、一定ひずみ速度をもつ定常領域が大部分を占めていた<sup>(2)</sup>が、変動繰返し応力下の場合には、応力変動後のひずみ量の変化曲線をみると、応力を増大させる変動では、一定繰返し応力下と同様に3つの領域が認められるものの、応力を減少させる変動の場合には、遷移領域が明確には表われてこないことが多い。このことは、応力を増大させる変動によりコンクリ

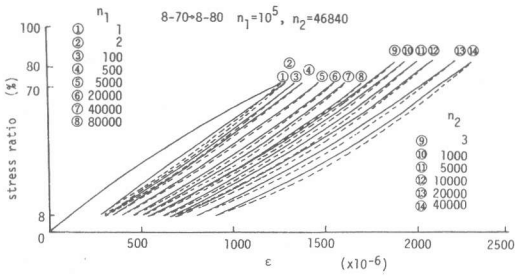


図-4 応力ひずみ曲線の変遷 ( $S_1 = 80\%$ ,  $n_1 = 10^5$ ,  $S_{II} = 70\%$ )

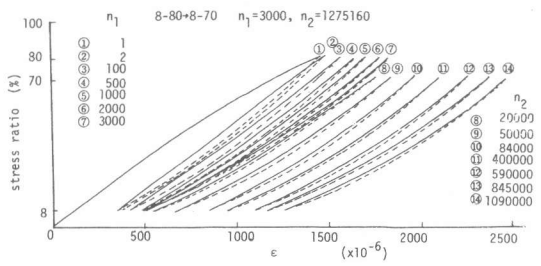


図-5 応力ひずみ曲線の変遷 ( $S_1 = 70\%$ ,  $n_1 = 3000$ ,  $S_{II} = 80\%$ )

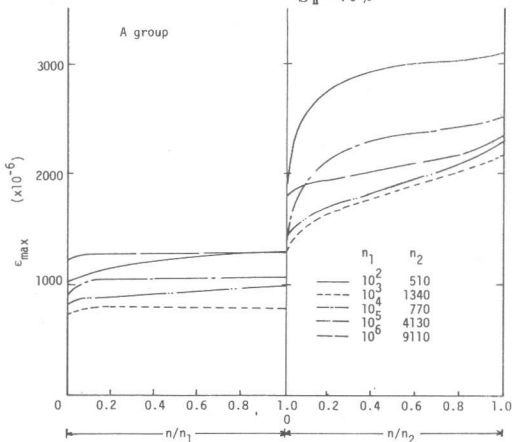


図-6 最大ひずみ量の変化 ( $S_1 = 50\%$ ,  $S_{II} = 80\%$ )

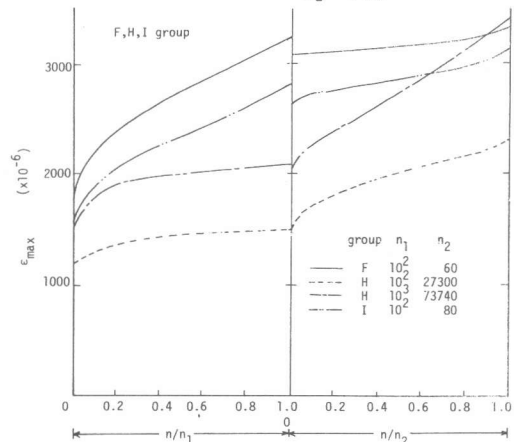


図-7 最大ひずみ量の変化 (応力減少の場合)

ート内部には新たなひびわれの発生があるが、応力を減少させる変動では新たなひびわれの発生が少ないためと考える。破壊時近傍のひずみ量の大きさは、図-6,7に示されているように一定ではなく、疲労破壊条件に一定ひずみ破壊説はあてはまらない。また、第二段階繰返し応力によるひずみ速度と $n_2$ の関係をプロットすると図-8のとおりであり、一定繰返し応力下の場合と大差ない。 $n_1/\bar{N}_1$ により $\log M > 1$ となるケースがあるにもかかわらず、 $\dot{\epsilon}$ と $n_2$ に両対数グラフ上で直線関係が認められ、そのばらつきも小さいことを考えあわせると、応力変動により $\bar{M}$ に変化があらわれるのは、ひずみ速度の変化に起因すると考えられよう。

#### 6 累積損傷過程のエネルギー的考察

変動繰返し応力下のコンクリートの破壊条件式として、繰返し応力により、変形量が増大するために消費されるエネルギー量が一定となる条件が考えられる<sup>(3)</sup>。図-9は、応力ひずみ曲線の包絡線に囲まれる面積を示したもので、第一段階繰返し応力によって $A_1$ のエネルギーが変形増大のため消費され、応力変動後に $A_2$ のエネルギーが同様に消費されるとすれば、 $A = A_1 + A_2$ の大きさがある一定値になったとき疲労破壊が発生することになる。実験によって $A_2$ を求めることは、F点のひずみ量が明確にとらえられないことからかなりのばらつきがあると考えられるのが、各グループごとに1本づつで求めた結果は表-4の通りであり、コンクリートの配合が一定であればAの大きさは一定になると考えてよいことが予想される。

次に第一段階繰返し応力による疲労損傷は、エネルギー的には $A_1/A$ によって表現できるが、 $n_1/\bar{N}_1$ に対して $A_1/A$ の変化を表-4から求めてみると図-10のとおりである。損傷度 $A_1/A$ は、第一段階の応力比が小さいほど損傷の程度が緩やかな曲線を描くようである。Minerの法則では、 $n_1/\bar{N}_1$ により疲労損傷が直線的に変化しているが、全ての試験結果ではこの曲線より上に損傷度があらわれている。このことは $n_1/\bar{N}_1$ を普通目盛でとると疲労損傷曲線は上に凸になることを示すもので、この観点から変動応力下の寿命の推定が可能になることが予想される。

本研究遂行にあたり、白川淳一君（現電々公社）に実験の労を頂いた。ここに御礼申し上げます。

- 参考文献 (1) 松下, 徳光: 生存確率を考慮したコンクリートの疲労強度に関する研究, 土木学会論文報告集 6 284  
 (2) 松下, 牧角: 繰返し応力を受けるコンクリートの変形性状, 1979年コンクリート工学年次講演会論文集  
 (3) 松下: コンクリートの圧縮疲労過程のエネルギー変化による考察, 昭55年度土木学会年講概要集第V部

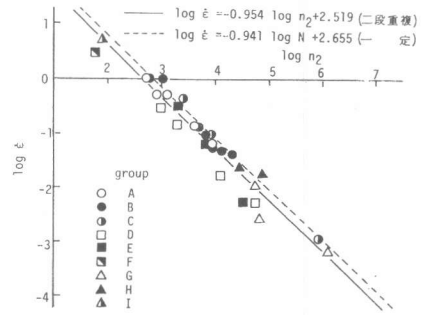


図-8 ひずみ速度と疲労寿命の関係

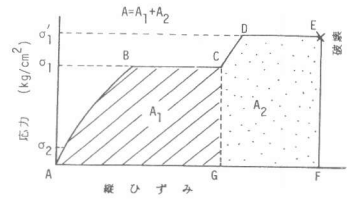


図-9 変形に要したエネルギー量

表-4  $A_1, A_2$ の大きさの測定値

Group	前繰返し回数 ( $n_1$ )	後繰返し回数 ( $n_2$ )	面積 $A_1$	面積 $A_2$	面積 A
A	$10^2$	510	145	511	656
	$10^3$	1340	84	412	496
	$10^4$	770	120	428	548
	$10^5$	4130	122	359	461
	$10^6$ *	5110	164	434	598
B	$10^2$	13160	120	429	549
	$10^3$	1080	131	440	571
	$10^4$	5620	183	383	566
	$10^5$	20820	250	361	611
	$10^6$	8860	308	234	542
C	$10^2$	640	156	309	465
	$10^3$	4980	208	485	693
	$10^4$	2550	305	391	696
	$10^5$	8440	293	279	572
	$10^6$	845120	382	327	709
D	$10^2$ *	15390	268	262	470
	$10^3$ *	1950	226	215	441
	$10^4$ *	980	275	188	463
	$10^5$ *	56710	392	243	635
	E	$10^2$	33520	220	209
$10^4$		2080	333	234	567
$10^5$		6130	313	158	471

\*印は、W/C=5の系、その他はW/C=6.3系の配合のコンクリートである。

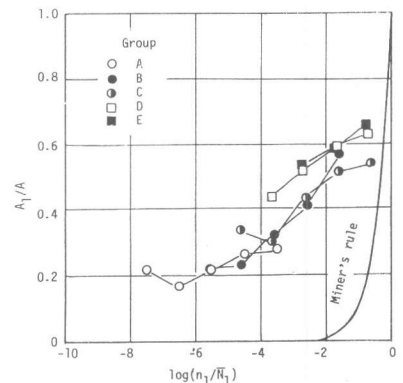


図-10 疲労損傷の進行曲線