変動繰返し圧縮荷重下におけるコンクリートの 疲労寿命に関する研究[†]

西 林 新 蔵* 矢 村 潔* 井 上 正 一*

Fatigue Life of Concrete under Varying Repeated Compressive Load

by

Sinzo NISHIBAYASHI, Kiyoshi YAMURA and Shoich INOUE

(Faculty of Engineering, Tottori University, Tottori)

In order to investigate the fatigue life of concrete under varying repeated load, several stress fatigue tests were performed. In these tests, concrete cylinder specimens were subjected to the repeated load in which load levels were selected as to be between a constant minimum stress level and five different maximum stress level S_j (72~82 percent of the ultimate static strength at each interval of 2.5%). The triangular-, normal-, uniform-, and exponential-distributions were used as the shape of the stress block for the varying repeated load. The order of the applied maximum stress level was selected at random.

From the experimental results, it can be concluded as follows. ①. At each test condition, the sum of cycles ratio follows a logarithmic normal distribution. ②. Miner's rule may possibly be applied to predict the fatigue life under varying repeated load in which the magnitude of stress is changed quite very frequently.

(Received July 2, 1982)

キー・ワード：疲労，累積繰返し回数比，疲労寿命，マイナー則

1 緒 言

コンクリート部材や構造物の設計を合理的に行い，かつ耐用期間中に構造物がその機能を十分に発揮することを保証するためには，コンクリートの疲労特性を明確化し，これを設計に的確に反映させることが非常に重要である。

本研究は，ランダム荷重を受けるコンクリートの疲労特性，とりわけ実構造物の使用限界に関連する疲労寿命を推定する方法を確立することを目的として行ったものである。そのうち，2段階応力試験の結果については先に報告したので，ここでは，外力荷重のパターンとして，応力レベルとその作用頻度を表すモデルに数種の代表的な確率密度関数を用いた多段階重複応力（以下変動応力と称する）について試験を実施し，これらの試験で得られた疲労寿命の結果を，累積繰返し回数比¹⁾の概念を用いて評価し，その確率分布特性を明確にしている。さらに，一定応力試験の結果から，ランダム荷重下の疲労寿命を推定しうる可能性を検討し，併せてマイナー則の適用性とその適用限界についてはランダム荷重の性質や境界状態設計法との関連に

おいて若干の考察を加えている。

2 実験概要

2・1 使用材料と供試体

セメントは普通ポルトランドセメント，粗骨材には高機産砕石（最大寸法 15 mm，比重 2.69）を，細骨材には野州川産川砂（比重 2.59，F.M.=2.58）を使用した。コンクリートの配合条件は，28日目目標強度 34 MPa，スランプ 5±1 cm，空気量 5%， $s/a=46\%$ で，単位セメント量 280 kg，水セメント比 61%の配合が試験りによって決定された。

供試体は $\phi 7.5 \times 15$ cm の円柱で，28日間標準養生を施し，以後疲労試験実施（材令 120 日以上）まで実験室内に保存した。

2・2 試験方法

疲労試験は，一定応力試験と変動応力試験からなっている。これらの試験は，容量25トンの電気油圧式サーボ機構を有する疲労試験機（MTS 社製）を用い，繰返し載荷速度 5 Hz，荷重と時間との関係は正弦波形のもとで行った。設定した上限応力比（ S ：以下応力比と称す）は，試験開始前に行った各打設バッチごと 8 本の供試体のそれぞれの平均圧縮強度（ $\bar{\sigma}_c=40.1 \sim 42.6$ MPa，変動係数の最大値 3.4%）に対する百分

[†] 原稿受理 昭和57年7月2日

* 正 会 員 鳥取大学工学部 鳥取市湖山町

率で選び、下限応力比はすべて $\bar{\sigma}_e$ の10%とした。

変動応力試験は、応力比 (S) とその応力比が作用する頻度 ($p^*(S)$) の関係を表すモデルとして、Fig. 1 に示すようなヒストグラムを採用し、これを1応力ブロックとする载荷を行った。Fig. 1 に示す分布モデルのうち、三角形 (略号 T) 分布は、実橋の1等橋において疲労損傷に大きな影響を及ぼすと考えられる11トン以上の輪荷重の頻度結果がほぼ三角形分布を呈すること、正規 (略号 N) 分布は、車線内における車両の車輪通過位置の分布が正規分布を示すので、荷重一定のもとで橋軸直角方向の所定断面におけるモーメントが正規分布になるとの仮定から設定した。また、指数 (略号 F と E) 分布モデルは、海洋における波高とその生起する回数の関係が片対数紙上で直線になり、さらに波高と構造物内の応力との間には線形関係が成立するという事実を参考にして選定した。その他の分布モデル三角形 (略号 B) と矩形 (略号 U) は、応力比の作用頻度が疲労寿命に及ぼす影響を検討するために選んだものである。

Fig. 1. Details of varying stress fatigue tests (S : Stress level, $p^*(S)$: Frequency, T , B dis.: Triangular distribution, N dis.: Normal distribution, U dis.: Uniform distribution, F , E dis.: Exponential distribution.

応力ブロック内の荷重順序 j ($j=1, \dots, 5$) 番目の応力比 (S_j) は、設定応力比 ($S=①72, \dots, ⑤82\%$) に番号を付け、各供試体ごとに①～⑤までの一様乱数を発生させ、5けたの数字の順列を作ることによって決定した。つぎに、各応力比 ($S=S_j$) における载荷回数 $n_i(S_j)$ は、 $i(i=1, \dots, u)$ 番目の応力ブロック内の総载荷回数 (N_i) を与えることによって、 $n_i(S_j) = N_i \times p^*(S=S_j)$ で算定される。試験は、すべての設定応力比を少なくとも1回は受けるよう N_1 に小さな値を選び、1番目の応力ブロック内の $n_1(S_1)$ から順次载荷し、 u 番目の応力ブロック内の第 k 番目の応力比で供試体が破壊するときの回数 $n_u(S_k)$ を測定した。

3 結果と考察

3.1 一定応力試験

一定応力試験によるコンクリートの疲労寿命の分布形は、対数正規分布に良く適合することがすでに認められている。

Fig. 2 は、各応力比における疲労寿命 (N) と式(1)から求めた生存確率 (p) の関係を、対数正規確率紙上に図示したものである。

$$p=1-r/(l+1), t=\phi^{-1}(p) \quad (1)$$

ここに、 l は同一試験条件に用いた供試体総数、 r は順序統計量で、疲労寿命 (N) あるいは後記の M を小さい順に並べたときの序数である。また、 t は正規確率密度関数の対称軸からの距離で、任意の p の値に対して標準正規積分表 ($p=\phi(t)$) より求められる。

Fig. 2. $P-N$ diagram ($\phi 10 \times 20$ cm, $\bar{\sigma}_e=25$ MPa)¹⁾.

図より、プロット点はほぼ直線上にあり、各応力比ごとの疲労寿命の分布は、式(2)で表される対数正規分布に従うとみなせる。

$$t=A \log N+B \quad (2)$$

上式で、 $t=0$ ($p=0.5$) を代入して求めた N の値が平均疲労寿命 ($\bar{N}$) となる。また、 $\log N$ の平均値を $m(\log N)$ と、ばらつきを表す指標として $\log N$ の標準偏差を採って $V(\log N)$ と表記すれば、それぞれ次式で表され、式(2)を最小2乗法によって決定した Fig. 2 に付記した直線式から求まる。

$$\left. \begin{aligned} \bar{N} &= 10^{-B/A}, m(\log N) = -B/A \\ V(\log N) &= 1/|A| \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

コンクリートの場合、応力比 (S) と平均疲労寿命 ($\bar{N}$) の関係を示す式として、次式の形の $S-\bar{N}$ 線式がよく用いられる。

$$S=A_1 \log \bar{N}+B_1 \quad (4)$$

Fig. 3 に示す $S-\bar{N}$ 線式より、コンクリートの配合、強度、供試体の寸法に関係なく、 $S-\bar{N}$ 線式は同一の

Fig. 3. $S-\bar{N}$ diagram

式で表されるようである。なお、図中の破線は、土木学会“コンクリート構造の限界状態設計法試案”⁴⁾の基礎となった $S-N$ 線式を示したものである。これらの式に、 $\bar{N}$, $N=200$ 万回を外挿した疲労強度は、本研究結果では69.8%, 土木学会式では56.3%となる。

3・2 変動応力試験

Table I に変動応力試験の結果の一例を示す。表中、 r : 順序統計量, p , t : 生存確率と標準正規変量でそれぞれ式(1)より求まる。 S_j : 荷重順序 j 番目の応力比, u , S_k : 破壊時の応力ブロック数と応力比, $\sum n$: 破壊に至るまでの総繰返し回数である。 M は累積繰返し回数比で、 $u=1$, $j=2$ の2段階応力試験においては式(5)で定義したが、ここでは変動応力試験の M を式(6)で定義して疲労寿命を評価することにする。

$$M = n_1/\bar{N}_1 + n_2/\bar{N}_2, \quad R_1 = n_1/\bar{N}_1 \quad (5)$$

$$M = \sum_{i=1}^{u-1} \left(\sum_{j=1}^5 \frac{n_i(S_j)}{\bar{N}(S_j)} \right) + \sum_{j=1}^k \frac{n_u(S_j)}{\bar{N}(S_j)} \quad (6)$$

ここに、 $\bar{N}_1$, $\bar{N}_2$ は、一定応力試験で得られた応力比 $S=S_1$, S_2 における平均疲労寿命で Fig. 3 中のプロット点の値を用いる。 n_1 , n_2 は、それぞれの応力比の载荷回数、さらに R_1 は先行応力比 $S=S_1$ における繰返し回数比である。また、 $\bar{N}(S_j)$ は応力比 $S=S_j$ における疲労寿命で $S-\bar{N}$ 線式に $S=S_j$ を代入して求めた $\bar{N}$ の値を用いる。Table 中の M , M_1 は、Fig. 3 に示した $S-\bar{N}$ 線式および土木学会式で N を $\bar{N}$ と表記した $S-\bar{N}$ 線式を用いて算定した値である。

3・2・1 故障率と疲労破壊の特性 コンクリートの疲労破壊の機構を考察するため、ここでは器機の寿命を検討する際によく用いられている故障率の概念を適用する。故障率は、ある時間 T まで破壊せず、これに続く単位時間内に破壊する割合で定義され、式(7)で表される。

$$\lambda(T) = -\frac{d \log p}{dT} \quad (7)$$

式(5), (6)の M を T で置き換えると、 $\lambda(M)$ は M をパラメータとする故障率になる。

Fig. 4 は、 p と M の関係を各試験条件ごとに図示したものである。変動応力試験のプロット点の傾きは、 $M=2$ を境にややゆるやかになる傾向があるが、全般的には一定応力試験の場合と同様にほぼ一定とみなせる。一方、2段階応力試験の故障率は、先行応力比における繰返し回数比、すなわち、荷重の大きさを変化させた点 $M=R_1$ を境に、先行応力比 (S_1) が後行応力比 (S_2) よりも小さい場合には減少、 S_1 が S_2 よりも大きい場合には増大し、最終的には M の増加に伴って減少する傾向を示す。この場合、疲労寿命を推定するためのパラメータ M の検討に際しては、故障率が荷重順序の相違によって影響されることを考慮する必要がある。一方、本研究のようなランダム荷重下においては、故障率はほぼ一定値を示すので、荷重順序の影響を考慮する必要はなく、 M で疲労寿命の推定が行える可能性のあることを示している。

Table I. Results of varying stress fatigue test.

r	P	t	B distribution						E distribution				M	M ₁
			O S S _j	At failure			M	M ₁	O S S _j	At failure				
				u	S _k	Σ n				u	S _k	Σn(×10)		
1	0.952	1.665	34.215	2	82	2.480	0.25	29	82.77.72	1	72	2.181	0.25	38
2	0.905	1.311	23.451	2	82	2.900	0.40	45	77.72.82	2	77	7.339	0.36	64
3	0.857	1.067	53.124	3	82	3.390	0.52	58	77.82.72	2	77	7.634	0.42	75
4	0.810	0.878	45.312	3	82	3.880	0.54	58	77.72.82	2	72	10.426	0.49	90
5	0.762	0.713	15.432	4	82	5.220	0.71	80	77.72.82	2	72	11.518	0.50	95
6	0.714	0.565	25.413	4	82	5.490	0.74	84	82.77.72	2	72	12.486	0.62	110
7	0.667	0.432	51.342	5	82	7.010	0.94	106	72.77.82	3	72	17.484	0.70	125
8	0.619	0.303	24.135	5	79.5	7.450	0.95	110	82.77.72	3	82	14.572	0.72	131
9	0.571	0.179	54.321	5	77	8.400	1.18	135	77.82.72	3	82	14.958	0.82	143
10	0.524	0.060	42.153	6	82	10.120	1.32	150	82.77.72	3	72	15.212	0.88	150
11	0.476	−0.060	51.243	6	82	9.720	1.42	159	72.77.82	4	72	21.729	0.98	177
12	0.429	−0.179	43.521	7	82	12.080	1.56	178	77.72.82	4	72	32.752	1.48	276
13	0.381	−0.303	35.241	8	79.5	14.640	1.93	224	72.77.82	4	77	42.547	1.53	276
14	0.333	−0.432	25.314	9	82	15.730	2.16	243	77.72.82	4	72	39.896	1.59	300
15	0.281	−0.565	13.254	10	79.5	18.490	2.51	282	77.82.72	4	72	26.648	1.70	306
16	0.238	−0.713	41.523	13	82	24.040	3.25	367	77.82.72	4	72	41.520	1.94	346
17	0.190	−0.878	12.345	14	77	25.560	3.36	380	82.77.72	5	72	59.516	2.86	509
18	0.143	−1.067	52.431	16	82	29.590	4.06	458	72.77.82	6	72	76.546	3.13	580
19	0.095	−1.311	32.145	22	77	41.310	5.50	623	72.87.72	9	72	134.483	5.97	1080
20	0.048	−1.665	13.542	30	77	57.220	7.65	864	77.82.72	10	72	189.208	7.78	1390

Note O S. (Order of stress) example, 34.251

S₁=③77%, S₂=④79.5%, S₃=②74.5%, S₄=⑤82%, S₅=①72%

O S example, 82.77.72

S₁=82%, S₂=77%, S₃=72%

Fig. 4. S - M diagram.

つぎに、 M が疲労寿命の評価値として適切であるかどうかを供試体の破壊状況から考えてみよう。

Fig. 5 は、変動応力試験における設定応力比($S=S_j$)とその応力比で破壊した供試体数 $l(S)$ との関係の一例を示したものである。図中の計算値は、それぞれの分布モデルに対し次式から算定したものである。

$$l(S=S_j) = l \times R_j / \sum_{j=1}^5 R_j \quad (8)$$

ここに、 l は供試体総数、 R_j は第1応力ブロック内の各応力比における繰返し回数比で、式(6)において $R_j = n_1(S_j) / \bar{N}(S_j)$ と置いたものである。

図より、 $S=82$, 79.5%の高応力比での設定繰返し回数比(R_j)が大きく、 $S=72$, 74.5%の低応力比の R_j が小さな三角形、正規、矩形分布モデルの試験においては、各応力比における供試体破壊個数は実験値と計算値でほぼ等しくなる。このことは、上述したような高応力比での損傷の程度の著しいモデルの場合、応力比 $S=S_j$ 1回の载荷によって $1/\bar{N}(S_j)$ だけ損傷し、以後の载荷においては、これらの和として疲労損傷が進行していることを示唆している。一方、低応力比での R_j が比較的大きい指数分布モデルにおいては、実験値と計算値との間に違いのあることが認められる。この差異は Fig. 4 と関連づけることによって定性的に説明できる。すなわち、2段階応力試験の結果に見られるように、低応力比から高応力比に移行した直後の故障率は小さく、高応力比から低応力比に変化したとき故障率は大きくなっている。指数分布モデルにおいては、応力比の変化に伴う故障率の影響が現れ、供試体は高応力比で破壊しにくく、それに続く低応力比で破壊しやすくなったものと推察される。一方、高応力比での損傷の程度の大きいモデルの場合には、低応力比での载荷回数が比較的小いため、高応力比から低応力比へ移行するときの故障率の増加による影響を受けず、供試体はそれに続くより高い応力比で破壊したものと考えられる。しかし、本研究においては、荷重順序をランダムに選定し、応力比の大きさをかなり頻繁に変化させたため、各分布モデルの故障率には顕著な差はなく、したがってランダム荷重を取扱う場合には、疲労損傷は線形的に累積進行し、 M は疲労寿命

Fig. 5. Relationship between stress level S and number of specimens broken at S .

推定のパラメータとして適切なものであると解してもよいようである。

3・2・2 累積繰返し回数比(M)の分布形 式(7)において $\lambda(T)$ が一定のとき、その分布形は指数分布で表される。しかし $\lambda(M)$ は厳密には一定でなく、一定応力試験の疲労寿命の分布形への適合性は対数正規分布の方が指数分布よりも優れているようである³⁾。したがって、ここでは、変動応力試験における M に対して、次式で表される対数正規分布への当てはめを検討することにする。

Fig. 6. P - M diagram (a), (b): Two-stage stress fatigue test)

$$t = A \log M + B \quad (9)$$

Fig. 6 は, 生存確率 p と M との関係を, 各試験条件ごとに対数正規確率紙上にプロットしたもので, 図には 2 段階応力試験の結果も示している. また図中の直線式は式(9)を最小 2 乗法によって決定したものである. いま, M の分布がこれら直線式で与えられる対数正規分布に従うと仮定して $K-S$ 検定⁶⁾を行った. その結果, 各試験条件ごとの M の分布は有意水準 20% で仮定した対数正規分布に従うことが明らかとなった.

3・2・3 平均累積繰返し回数比 ($\bar{M}$) と標準偏差 $V(\log M)$ M の分布が式(9)で表されたとき, $t=0$ ($p=0.5$) に相応する M の値, すなわち, 平均累積繰返し回数比 ($\bar{M}$), $\log M$ の平均 (期待) 値 $m(\log M)$ およびその標準偏差 $V(\log M)$ は次式(10)で与えられる.

$$\left. \begin{aligned} \bar{M} &= 10^{-B/A}, \quad m(\log M) = -B/A \\ V(\log M) &= 1/|A| \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

一定応力試験において, 疲労寿命 N が式(2)で表される対数正規分布に従うとき, N を平均疲労寿命 $\bar{N}$ で除すと, $M = N/\bar{N}$ となる. 両辺の対数を採れば

$$\left. \begin{aligned} \log M &= \log N - m(\log N) \\ \text{となり, これより次式の関係が得られる.} \\ \bar{M} &= 1, \quad m(\log M) = 0 \\ V(\log M) &= V(\log N) = 1/|A| \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

上式は, $\log N$ の標準偏差 $V(\log N)$ と $\log M$ の標準偏差 $V(\log M)$ が等しく, $V(\log M)$ は先に決定した Fig. 2 の直線式から算定できることを示している.

Fig. 7, 8 は, 式(10), (11)から算定した $\bar{M}$, $V(\log M)$ を各試験条件ごとに示したものである. なお, 一定応力試験の $\bar{M}$ の値は 2 段階応力試験の $R_1=0$ 上にプロットしてある. 2 段階応力試験による $\bar{M}$ の値は 0.57 から 1.54 の範囲にあり, この値は, 先行応力比 (S_1) と後行応力比 (S_2) の大小関係 (荷重順序) に影響を受け, S_1 が S_2 より小さい場合には 1 以上, S_1 が S_2 より大きい場合には 1 以下の値となる. 荷重順序が同一の場合, 先行応力比の繰返し数比 (R_1) が $\bar{M}$ に及ぼす影響は荷重順序の影響に比して小さいといえる. 一方, 変動応力試験による $\bar{M}$ の値は 1.12 から 1.42 の範囲にある. この場合, $\bar{M}$ の範囲が 2 段階応力試験の場合よ

Fig. 7. Relationship between $\bar{M}$ and test condition.

りも小さいのは, 選定した分布モデルの相違, すなわち, 各応力比における繰返し回数比の相違が $\bar{M}$ にあまり影響を与えないこと, さらに応力比の大きさを順次変えたため, 2 段階応力試験に見られたような荷重順序の影響が現れにくくなったことによると考えられる. このため, 変動応力試験で得られた $\bar{M}$ の値は, 2 段階応力試験において荷重順序を変えて得られた $\bar{M}$ の値のほぼ中間的な値を示したものと推察される.

以上の結果より, $\bar{M}$ の値はランダム荷重の性質によって変化するので, $\bar{M}=1$ を破壊条件とするマイナー則の疲労寿命の推定への適用は厳密には限界がある. しかし, 荷重の大きさが短期間で変化するようなランダム荷重下においては, マイナー則によって疲労寿命の推定が安全側で推定できるものと考えられる.

Fig. 8 に $\log M$ の標準偏差 $V(\log M)$ を示す. 図より, 変動応力試験による $V(\log M)$ は 0.40 から 0.46 の範囲にあり, その算術平均は 0.44 となる. この値は一定応力試験における $V(\log M)$ の範囲 0.39 から 0.46, その算術平均 0.44 と等しい値を示している. このことは, ランダム荷重下における M のばらつきは, 一定応力試験の $V(\log N)$ によって推定できる可能性のあることを示唆している.

Fig. 8. Relationship between standard deviation and test condition.

3・2・4 累積繰返し回数比 ($\bar{M}$) の確率分布特性 コンクリート構造設計において, $M=1$ で設計した場合, 破壊確率 ($p_f=1-p$) はかなり大きくなる. したがって, 海洋コンクリート構造設計では $M=0.2$ を設計用値として用いている⁷⁾. 一方, 土木学会限界状態設計法試案では, 式(6)の $\bar{N}(S_j)$ に Fig. 3 において破線で示したような $S-N$ 線式から算定した値を用い, 安全性を確保しようとしている.

Table II は, Fig. 6 の直線式に $M=0.2$ を代入して求めた破壊確率 (p_f), および変動応力, 2 段階応力試験に土木学会の $S-N$ 線式を適用し, $\bar{M}$, $V(\log M)$, $M=1$ における p_f のオーダを算定したものである.

表より, 土木学会式に基づいて算定した $\bar{M}$ の値は, 本実験室より求めた $\bar{M}$ (Fig. 7) の 100 倍程度の値を示し, $\bar{M}$ は M を評価する際に用いる $S-\bar{N}$ 線式の違いによって大きく変わることがわかる. 一方, $V(\log M)$ は $\bar{M}$ の値に比べてきわめて小さく, $S-\bar{N}$ 線式の違い

Table II. Results of regression analysis.

Test	Distribution		$M=0.2$	$t=A \log M+B$		$\bar{M}$	$V(\log M)$	$M=1$
			P_f	$-A$	B			P_f
Varying st.	T		0.02	2.514	5.738	191	0.40	10^{-6}
	B		0.03	2.246	4.986	159	0.44	10^{-7}
	N		0.03	2.235	4.969	167	0.45	10^{-7}
	U		0.04	2.235	4.806	141	0.45	10^{-7}
	F		0.03	2.172	5.074	217	0.46	10^{-7}
	E		0.05	2.160	4.974	201	0.46	10^{-7}
Two-stage st.	S	R_1	P_f	$-A$	B	$\bar{M}$	$V(\log M)$	P_f
	$S_1=75$	0.4	0.06	2.727	6.227	192	0.37	10^{-10}
	↓	0.6	0.05	2.904	6.794	219	0.34	10^{-11}
	$S_2=85$	0.8	0.08	2.577	6.015	216	0.39	10^{-10}
	$S_1=75$	0.25	0.21	1.335	2.486	73	0.75	10^{-8}
	↓	0.50	0.08	1.648	3.163	83	0.61	10^{-4}
	$S_2=85$	0.75	0.06	2.206	3.951	61	0.45	10^{-5}

によってもほとんど変化しない。さらに、これらの結果より、最も危険なランダム荷重の組合せは、いずれの $S-\bar{N}$ 線式から評価しても先行応力比が後行応力比よりも大きな2段階応力試験で得られている。この場合、土木学会の試案に基づいた破壊確率は、強度の特性値を決定するために一般に用いられている非超過確率5%と同程度の値となっている。しかし、一般的なランダム荷重下においては、土木学会試案はかなり小さな破壊確率を想定していることになる。

4 結 論

本研究は、変動繰返し荷重下におけるコンクリートの圧縮疲労特性を把握することを目的として行ったものである。本研究の範囲内で明らかになったことを列挙し、結論とする。

(1) 累積繰返し回数比で評価した故障率は、一定応力、変動応力試験のいずれにおいてもほぼ一定値を示し、疲労損傷は線形的に進行すると考えられる。

(2) 一定、2段階、変動の各応力試験における累積繰返し回数比の分布は対数正規分布に従う。

(3) 変動応力試験で得られた平均累積繰返し回数比($\bar{M}$)は、2段階応力試験において荷重順序の違いで得られた $\bar{M}$ を上・下限値とするそれらのほぼ中間の値を採用。一方、累積繰返し回数比の対数の標準偏差は、一定応力試験の場合とほぼ等しい値を採用。

(4) 荷重の大きさが順次変化するようなランダム荷

重下のコンクリートの疲労寿命の推定に、マイナー則は安全側で適用できるものと考えられる。

(5) 平均累積繰返し回数比の値は、累積繰返し回数比(M)を評価する際の $S-\bar{N}$ 線式の違いによって大きく変化するが、対数で表した M の標準偏差の変化はきわめて小さい。

本研究は、著者の一人に交付された文部省科学研究費による成果の一部であり、また著者の一人が京都大学に流動研究員として派遣されている際に行った研究の一部をも含んでいる。ここに、京都大学工学部・岡田清教授をはじめ関係各位に深甚の謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 西林新蔵, 阪田憲次, 井上正一, 材料, **31**, 1114(1982).
- 2) 国広哲男, 構造工学シンポジウム論文報告集, 22(1976).
- 3) 阪田憲次, 木山英郎, 西林新蔵, 土木学会論文報告集, 198 (1972).
- 4) 土木学会編, “コンクリート構造の限界状態設計法試案”, p. 17 (1981).
- 5) 岡村弘行, 板垣 浩, “強度の統計的取扱い”, p. 53 (1979) 培風館
- 6) 伊藤 学, 亀田弘行訳, “土木・建築のための確率統計の基礎”, p. 274 (1977) 丸善
- 7) F.D. Lydon, “Development in Concrete Technology-1”, p. 132 (1977) Science Publishers Ltd.