V-149　変動繰返し荷重下におけるコンクリートの疲労寿命の確率分布特性について

鳥取大学　正員　○井上正一
岡山大学　正員　阪田憲次
京都大学　正員　岡田清

1　まえがき

本研究は，ランダム荷重下におけるコンクリートの圧縮疲労寿命を把握するために計画した。すなわち，一定応力試験と，外力荷重のパターンとして，応力レベルとその作用頻度の関係を数種の確率分布モデルで置き換えた疲労試験を実施し，これら試験で得られた累積繰返し回数比の確率分布特性を検討した結果について報告する。

Slump (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³) C	W	S	G
5±1	5	61	46	280	170	817	1004

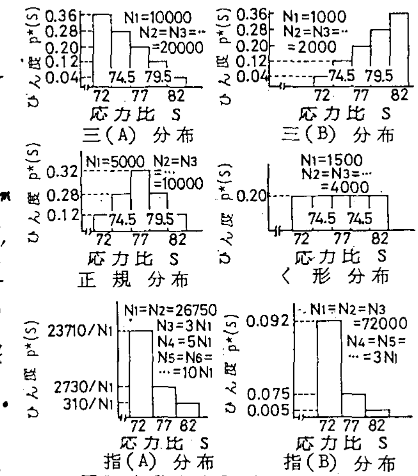

図1 変動応力試験の詳細

2　実験方法

セメントには普通ポルトランドセメントを，粗骨材は最大寸法13mmの砕石を，細骨材には川砂と砕砂の混合砂を用いた。コンクリートは，28日目標強度350 kgf/cm²で，表1に示す配合を試練りによって決定した。疲労試験は，一定応力試験と変動応力試験からなる。これらの試験は容量25トンの油圧サーボ疲労試験機（MTS社製）を用い，繰返し載荷速度5Hz.，荷重と時間との関係は正弦波形のもとで行った。試験に設定した上限応力比（S：以下応力比と称す）は，コンクリートの静的平均圧縮強度（$\overline{\sigma}_c$）に対する百分率で数水準を選び，下限応力比は全て$\overline{\sigma}_c$の10％と一定とした。変動応力試験は，図1に示すようなヒストグラムを一応力ブロックとし，各分布モデルごとの設定応力比（S=①72％…⑤82％）に番号を付け，①～⑤までの一様乱数を発生させることによって荷重順序を決定した。荷重順序（$S=S_j$：$j=1,\cdots,5$，指数分布 $j=1,\cdots,3$）が決定すると，各応力比における載荷繰返し回数 $n_{i,j}(S_j)$ は，i（$i=1,\cdots,u$）番目の応力ブロックにおける総繰返し回数(N_i)を与えることによって，$n_{i,j}=N_i\cdot P^*(S=S_j)$で算定される。試験は，$n_{1,1}(S_1)$から順次載荷し，$u$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まで行い，$n_{u,k}(S_k)$を測定した。

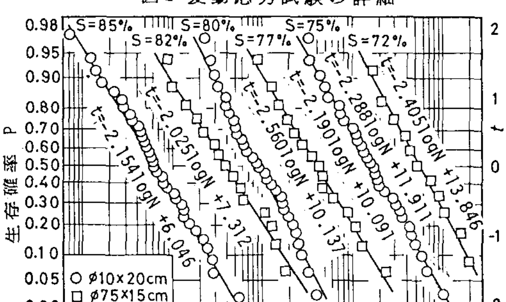

図2　P－N 関係

3　解析方法

図2，4，6に示す生存確率Pは，順序統計量の理論を用いて次式から求めた。　$P=1-r/(l+1)$，$t=\Phi^{-1}(P)$ —— (1)

ここに，lは同一試験条件に用いた供試体総数，rは疲労寿命(N)あるいは後記の累積繰返し回数比(M)を小さい順に並べたときの序数，tは任意のPの値に対して標準正規積分表($\Phi(t)$)より求まる。

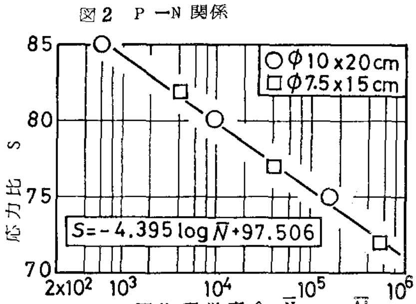

図3　S－N̄ 線図

4　結果と考察

一定応力試験：図2は，疲労寿命(N)の結果を対数正規確率紙上にプロットしたものである。図より，プロット点は，ほぼ直線上にあり，Nの分布は対数正規分布に従うといえる。このとき回帰式は　$t=A\log N+B$ —— (2)　で表わされ，平均疲労寿命（$\overline{N}$：$P=0.5$（$t=0$）のときのNの値），$\log N$の標準偏差$V(\log N)$は次式で与えられる。

$\bar{N} = 10^{-B/A}$,　$V(\log N) = 1/|A|$　——— (3)

図3は，式(2)を最小2乗法によって決定した図2中の直線式から算定した平均疲労寿命($\bar{N}$)と応力比(S)の関係と，その$S-\bar{N}$線式を示している。

変動応力試験：Mを累積繰返し回数比と称し，次式で定義する。

$$M=\sum_{i=1}^{u-1}\left(\sum_{j=1}^{5\,or\,3}\frac{n_{i,j}(S_j)}{\bar{N}(S_j)}+\sum_{j=1}^{k}\frac{n_{u,k}(S_j)}{\bar{N}(S_j)}\right) \quad —— (4)$$

ここに，$\bar{N}(S_j)$は応力比$S=S_j$における平均疲労寿命である。一定応力試験においては，式(4)は

$$\left.\begin{array}{l} M = N/\bar{N} \Longrightarrow \log M = \log N - m(\log N) \\ m(\log M) = 0 \Rightarrow \bar{M}=1,\ V(\log N) = V(\log M) = 1/|A| \end{array}\right\} —(5)$$

と書ける。上式は，Nが対数正規分布に従うとき，Mも対数正規分布に従うこと，$\log M$ の平均(期待)値が0，すなわち，$\bar{M}=1$であること，$\log M$と$\log N$の標準偏差$V(\log M)$，$V(\log N)$が等しいことを示している。このような事実を踏え，ここでは式(4)の$\bar{N}(S_j)$に図3中の$S-\bar{N}$線式から算定した応力比$S=S_j$における疲労寿命を用い，Mの対数正規分布への当てはめを検討した。

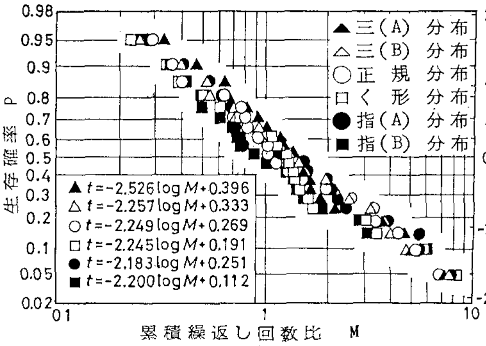

図4　P — M 線図

表2　2段階応力試験の結果

荷重順序 S (%)	回数比 R1	A	B	$\bar{M}$	V(logM)
S_1=75%	0.4	-1.779	0.322	1.52	0.562
↓	0.6	-1.834	0.342	1.54	0.545
S_2=85%	0.8	-1.756	0.204	1.31	0.569
S_1=85%	0.25	-1.794	-0.439	0.57	0.557
↓	0.5	-2.460	-0.327	0.73	0.407
S_2=75%	0.75	-2.952	-0.481	0.69	0.339

図4に，変動応力試験のMと生存確率の関係を示す。図より，Mは対数正規分布に従うといえる。図中の直線式は次式を最小2乗法によって求めたものである。　$t = A \log M + B$　——— (6)

このとき，平均累積繰返し回数比($\bar{M}$)および$\log M$の標準偏差は次式で与えられる。$m(\log M) = -B/A \Rightarrow \bar{M} = 10^{-B/A}$，$V(\log M) = 1/|A|$ —(7)

式(7)を式(6)に代入すると式(8)が得られる。

$$\log M = m(\log M) - t \cdot V(\log M) \quad ——(8)$$

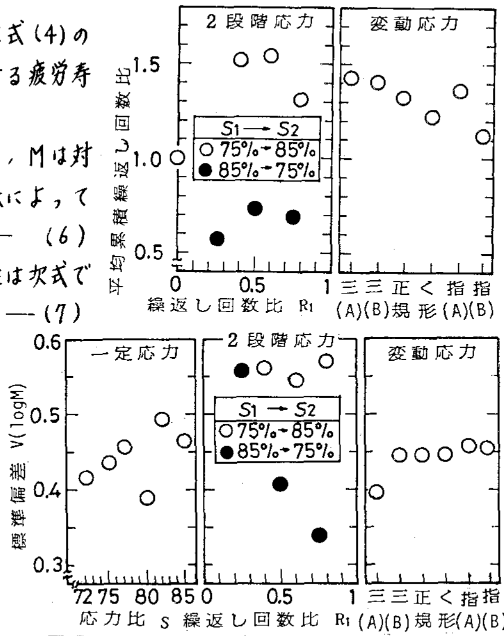

図5　試験要因ごとのM および V (log M)

表2に，既報*)の2段階応力試験の結果を示す。図5より，変動応力試験によるMの確率分布特性を表わす1母数$V(\log M)$は一定応力試験の$V(\log M)$とほぼ等しくなる。もう一つの母数$\bar{M}$は1に近い値を示し，かつ2段階応力試験の荷重順序の相違によって得られる$\bar{M}$の中間的な値を採る。図6のP～M関係において右下りの傾きは故障率と呼ばれている。一定応力，変動応力試験による故障率はほぼ一定とみなせ，この場合 線形の被害則が成立していることを示唆している。これらの事実は，式(8)の$m(\log M)$として，荷重の大きさが頻繁に変化するランダム荷重下においては0を，危険側の荷重を想定した場合には，先行応力比が後行応力比よりも大きな2段階応力試験による$m(\log M)$を，また，$V(\log M)$には一定応力試験による$V(\log N)$の値を用いることによって，疲労寿命がそのばらつきをも含めて推定できる可能性のあることを示している。

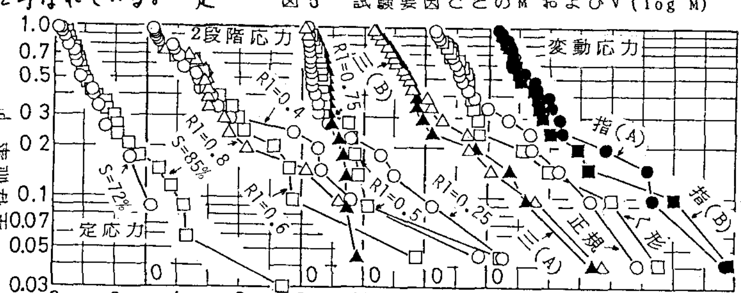

図6　P—M 関係

*)第35回年次学術講演集，V，pp.295