

## コンクリートの疲労に関する従来の研究

松 島 博\*

### Introduction to Study on Fatigue of Concrete

By Hiroshi Matsushima\*

**Synopsis:** Knowledge of fatigue properties of the concrete is essential to clear the design method of the concrete members considering their fatigue behavior.

Many literatures offer us the valuable data on this subject and the summary of these literatures is shown in this report.

要旨：コンクリート構造物の疲労を考慮した設計法に関する研究の一環として、著者は現在、コンクリート部材のねじり疲労挙動の解明に当たっている。その研究を進めるために必要な材料としてのコンクリートの疲労性状を知る目的をもって、これに関する多くの文献を整理し要約した。

#### 1. はじめに

静的強度以下の大きさの荷重であってもこれが繰返しで作用するとき部材は破壊することがある。この疲労という現象は実際の構造物において、例えば動荷重の繰返しや地震等の場合にしばしば起るにも拘らず、コンクリート構造物の疲労性状やこれを考慮した設計法はまだ十分に解明されているとは言い難い。

著者はコンクリート部材のねじり疲労挙動の解明を行っているが、その研究成果をまとめるに先立って材料としてのコンクリートの疲労性状に関する従来の研究について多くの文献を参照しながらこれを要約した。

初期の研究としては1903年の Van Ornum のものがあり、コンクリートのような脆性材料の疲労破壊にも金属に適用されてきた S—N 関係が導入できることや、荷重の繰返しに伴って  $\sigma$ — $\epsilon$  曲線は上に凸の状態から次第に直線状となり、ついで破壊近くで上に凹となることを示した。1910年頃 Berry や Mehmehl らは荷重の繰返しによって残留ひずみが増加することや、静的強度の増加という金属のひずみ硬化と類似の現象を観察した。1934年頃、Graf & Brenner はコンクリートの疲労現象に従来金属に用いられてきた修正 Goodman 図を導入した。

このような経過をへて1950年以降になると材料として

のコンクリートおよび鉄筋の疲労に関する研究成果が次々と発表され、またコンクリート部材の疲労試験が行われてきた。しかし部材に関する研究は、曲げや軸力の繰返しに関するものが大部分であり、静的に作用しても危険な破壊性状をもつせん断やねじに関するものは極めて少ない現状にある。

#### 2. コンクリートの破壊機構

コンクリートの脆性破壊機構は静的応力下でも繰返し応力下でも本質的な差異はないと思われる。

##### 2.1 破壊の定義<sup>1)</sup>

破壊とは対象とするレベルでの系または材料の耐荷力の喪失である。

a) 原子レベル 原子結合の破断によるへき開破壊 (cleavage fracture) とすべり破壊 (shear fracture) とがある。結合面に対して前者は垂直に後者は平行に破壊が起る。

b) 微視的な結晶レベル 材料の潜在的欠陥に起因するひびわれの発生と伝播の結果として、結晶粒の分離による粒内破壊 (transcrystalline fracture) または粒界破壊 (intercrystalline fracture) が起る。一般に前者は延性破壊で後者は脆性破壊である。

c) 巨視的な連続体系でのレベル 応力集中源からのひびわれ発生と伝播の結果として不安定領域が次第に集積されて系全体が不安定となるのが破壊である。

##### 2.2 コンクリートシステムの破壊<sup>1)</sup>

\* 土木工学科教授，工学博士  
Professor, Civil Engineering Division, Dr. of  
Engineering

コンクリートシステムはペースト、モルタルおよびコンクリートのレベルに大別できる。ペーストは未水和のセメント粒子を包んで形成されるコロイド状のセメントゲル粒子が互いに結合したもので、それらの間に空水隙が散在している。モルタルは砂粒子をそれとほぼ同体積のセメントペーストで結合したもので、一般に砂粒子程度のひびわれや空水隙が散在している。コンクリートは粗骨材をそれとほぼ同体積のモルタルで結合したもので、モルタルのひびわれの外に粗骨材とモルタル間の空水隙が潜在している。

コンクリートはその硬化過程での乾燥収縮、発熱および水分の移動等によって骨材周辺には大きい応力集中が起って載荷前でもひびわれが生じており、またブリージング等による空水隙があつて、骨材周辺は力学的な不連続域となっている。

コンクリートの破壊は潜在的欠陥周辺の応力集中によるひびわれ発生に始まり、比較的安定したひびわれ伝播過程を経て、不安定ひびわれの成長と伝播、ひびわれ網の生成と局部的破壊域の形成から系全体の不安定状態に至る。一軸圧縮試験では静的強度の0.4~0.6倍の応力度までは巨視的にみて内部構造にほとんど変化はなく  $\sigma$ - $\epsilon$  関係はほぼ直線で、その後約0.8倍までは多数のひびわれが発生し、局部的な不安定域の形成が始まって  $\sigma$ - $\epsilon$  関係は曲線に転じ、それ以上の応力レベルで不安定域が次第に増大干渉して破壊に至る。

このような破壊過程は、静的破壊の場合だけでなくクリープおよび疲労破壊の場合もほぼ同様である。

### 2.3 コンクリートの変形<sup>2)</sup>

圧縮応力下のコンクリートの破壊に至る挙動について、とくにその変形特異点に着目して述べる。

コンクリートは図1に示すように、圧縮応力度の増加に伴う幾つかの変形上の特異点を持っている。図1において、

$\epsilon_x$  : 縦ひずみ

$\epsilon_y$  : 横ひずみ

$\epsilon_v$  : 容積ひずみ

$\sigma_a$  : 圧縮強度

$\sigma_l = 0.30 \sigma_a$ ……持続応力下で初めてひびわれが発生する限界値

$\sigma_L = (0.50 \sim 0.70) \sigma_a$ ……内部ひびわれが発達して内部組織の緩みが始まり、ポアソン比はこれまでの直線的変化から曲線に変る。クリープ破壊を起す下限値である。

$\sigma_u = 0.75 \sigma_a$

$\sigma_U = (0.80 \sim 0.95) \sigma_a$ ……変形特異点で、内部組織に著しい緩みを生じ始め、 $\epsilon_v$  が減少から増大に転じる。こ

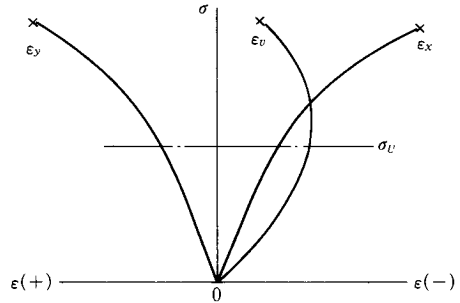


図1 (a)  $\sigma$ - $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_v$

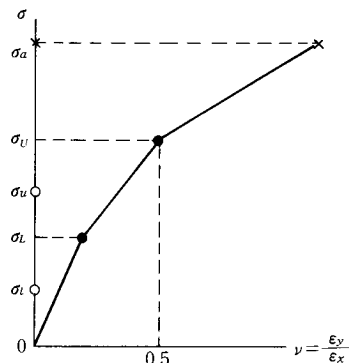


図1 (b)  $\sigma$ - $\nu$

のときポアソン比  $\nu = \epsilon_y / \epsilon_x = 0.5$  である。これはまたクリープ破壊を起す上限値である。

この間の挙動はつぎの通りである。

$0 \rightarrow \sigma_l$  : ペースト硬化体中や骨材周辺の微小空隙における応力集中によって微小ひびわれが発生する。応力度がこれ以下では持続応力下でもひびわれは成長しないが、これを越えるとひびわれが発達する。

$\sigma_e \rightarrow \sigma_L$  : 持続応力下でもひびわれは成長し、新しいひびわれが発達する。しかし  $\nu$  は直線的に変化し内部組織の緩みは生じていない。

$\sigma_L \rightarrow \sigma_U$  : 内部にひびわれが発達して組織の緩みが始まる。 $\nu$  は曲線の変化に転じ、持続応力下ではクリープ破壊が始まる。

$\sigma_U \rightarrow \delta_{max}$  : 内部組織に著しい緩みを生じて  $\epsilon_v$  が減少から増大に転じて破壊に至る。持続応力下では比較的短期間にクリープ破壊を起す。

### 3. コンクリートの疲労

コンクリートは一般に疲労限度をもたないと言われているが、Murdoch J. W. ら<sup>3)</sup> はその実験結果から少く

も1,000万回までは疲労限度を見出し得ないとした。繰返し回数1,000万回に伴う破壊確率50%に対する疲労強度は、圧縮、引張および曲げに対してそれぞれの静的強度の約55%である。疲労に関する実験データはパラキツが大きいので、統計的に吟味して表現する必要がある。

### 3.1 データの表示

繰返し応力下での生存確率  $p(N)$  は次式で示される。

$$p(N_r) = 1 - \frac{r}{n+1}$$

これは供試体総数  $n$  で試験したとき破壊に至る繰返し回数  $N_r$  が少ない方から数えて  $r$  番目のときのものである。疲労寿命は対数正規分布するものとして確率紙上に横軸に  $\log N$  を縦軸に  $p(N_r)$  をとって示される。このグラフから回帰直線式がつかないように求められる。

$$t = A \log N + B$$

$t$ : 正規分布曲線の対称軸からの距離で正規積分表を用いて  $p(N_r)$  の値から求められる。

$A, B$ : 実験定数

一般に疲労寿命の代表値として平均疲労寿命  $\overline{\log N}$  を用いるが、これは  $p(N)=50\%$  のときの  $\log N$  である。また  $\log N$  の標準偏差を  $D(\log N)$  で表わせば、これらは、

$$\overline{\log N} = -\frac{A}{B}, \quad D(\log N) = \frac{1}{A}$$

から上記の回帰直線式を用いて求められる。

また数種類の応力度別に画いた  $p(N)-\log N$  曲線から  $p(N)=50\%$  すなわち  $t=0$  のときの  $\overline{\log N}$  と応力度を求めて  $S-\bar{N}$  曲線図を画くことができる。疲労に関するデータの表示法として一般に用いられる  $S-N$  曲線はこのように破壊確率50%のときのものである。しかし  $p(N)-\log N$  曲線を用いれば任意の破壊確率に対応する  $S-N$  曲線が求められる。

この  $S-\bar{N}$  直線から  $S-\log N$  の回帰直線式が

$$\log N = C \times S + D \quad C, D: \text{定数}$$

として求められる。この式によれば任意の  $N$  回疲労強度  $S$  が、また逆に任意の応力度に対する破壊確率50%の繰返し回数  $N$  が求められる。また前述のように任意の破壊確率での  $S-\log N$  回帰直線式を用いれば、その破壊確率に対応する繰返し回数  $N$  が求められるわけである。

最小応力度と最大応力度の差すなわち応力振幅と疲労寿命との関係を示すものとして修正 Goodman 図がある。これは横軸に最小応力度比を、縦軸に最大応力度比をとり、横軸には実験に用いた値を、縦軸には  $N$  回疲労強度  $S$  を用いてグラフを画けば、ある  $N$  回に対応する修正 Goodman 図が得られる。

さらにまた、最小応力度/最大応力度比と平均疲労寿命との関係、換言すれば最小応力度を考慮した  $S$  (最大応力度)  $-\bar{N}$  曲線を描くこともできる。これは横軸に  $(100 - S_1)/(100 - S_2)$  をとり縦軸に  $\overline{\log N}$  をとったグラフである。ここで  $S_1$  は最大応力度比で  $S_2$  は最小応力度比である。このグラフからつぎのような回帰直線式を求めておけば利用に便利である。

$$\overline{\log N} = K \frac{100 - S_1}{100 - S_2} + K_2$$

### 3.2 セメントペースト、モルタルおよびコンクリートの疲労性状の差異

S. P. Shah ら<sup>4)</sup> は  $7.5 \times 7.5 \times 20$  cm の角柱を用いた圧縮繰返し試験から図2のような  $S-N$  直線を求め、回帰直線式を定めた。

$$\text{コンクリート: } \log N = -0.157S + 16.065$$

$$\text{モルタル: } \log N = -0.177S + 17.950$$

$$\text{ペースト: } \log N = -0.174S + 17.791$$

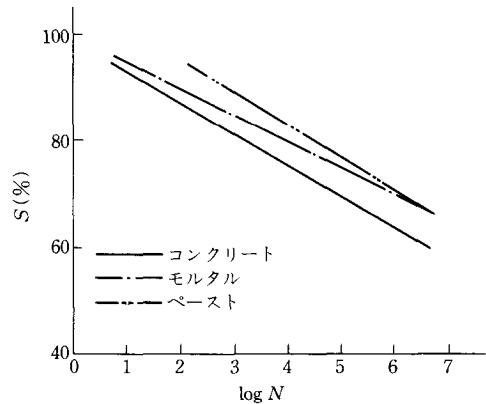


図2  $S-N$  直線

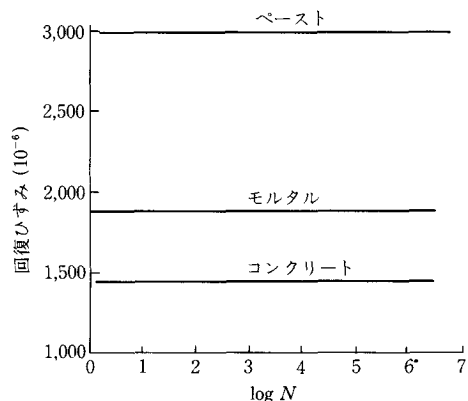


図3 回復ひずみ

これらの試験はいずれも  $\sigma_{28} \div 420 \text{ kg/cm}^2$  で繰返し速度は 190 cpm とし、最小応力度を静的強度の 3 ~ 5 % で行ったもので、その結果から  $S-N$  関係はいずれの場合も近似的に同一直線とみなせるとした。

ただし破壊挙動については差異があり、ペーストの破壊はその粘性流動によるが、コンクリートの場合は内部ひびわれの漸進的発達によるとした。また、コンクリートの疲労破壊挙動は静的の場合に比べて脆さが少ないが、これは疲労に伴う大きい体積膨張の結果であるとした。ペーストの場合はこのような現象はみられない。

### 3.3 繰返し応力とひずみおよびヤング係数

繰返し応力下における破壊直前の回復ひずみは N. K. Raju<sup>6)</sup> によれば図 3 に示すように静的応力のものと同じでペースト、モルタルおよびコンクリートで異なる値を示す。静的強度以下の繰返しで破壊した場合でも破壊時ひずみは静的破壊の場合よりも大きい。

無筋コンクリートの曲げ試験における破壊時引張ひずみが静的の場合の約  $180 \times 10^{-6}$  に対して、それ以下の応力度の繰返しに対して  $250 \times 10^{-6}$  であったという実験データが報告されているが、疲労破壊時の極限引張ひずみに関する確定的データはない。

$\sigma-\varepsilon$  曲線は一定の応力レベル以下では、最初は若干上に凸であるものが数サイクル後には直線状となり、ついで次第に下に凸となる。また初期接線係数は初期と破壊直前に低下するがその中間における低下は比較的緩やかである。それらの状況を図 4 に示す。

荷重の繰返しに伴う弾性々状の変化については、さらにつぎのような研究がある<sup>7)</sup>。

$\phi 10 \times 20 \text{ cm}$  の円柱供試体を用いた割裂方法による繰返し引張試験結果によれば、 $\sigma-\varepsilon$  曲線の変化については圧縮の場合と同じ傾向が認められた。また圧縮疲労試験のとき繰返し 1 万回以降は  $E_u(\sigma \text{ が } 0 \rightarrow \sigma_u \text{ のとき})$  の傾きが小さくなるがこれは内部組織の微小破損のためと考え

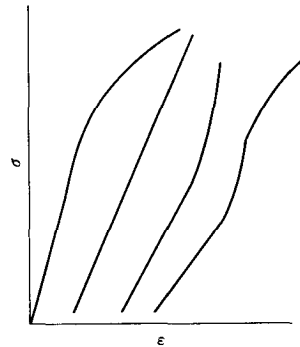


図 4  $\sigma-\varepsilon$  曲線の変化

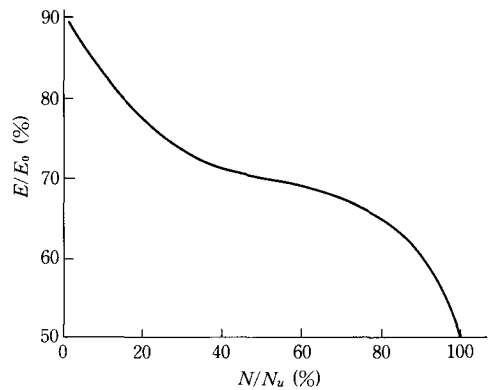


図 5  $E$  の変化

られる。これに対して  $E_0(\sigma \text{ が } \sigma_u \rightarrow 0 \text{ のとき})$  は破壊に至るまではほぼ一定値を保つ。

疲労試験は一般に長時間を要し、その残留ひずみ  $\varepsilon_r$  はクリープ成分  $\varepsilon_k$  と繰返しによる純疲労成分  $\varepsilon_r^0$  との和である。ここで、 $\varepsilon_r^0$  を知るために疲労と回復の試験を、さらに  $\varepsilon_k$  を求めるために静的圧縮強度の 50% と 70% の持続応力でクリープ試験を行った。その結果は図 6 および

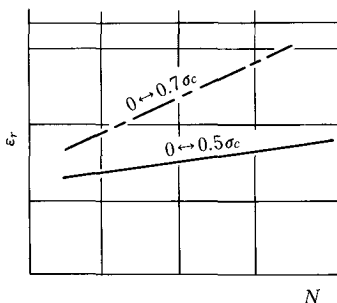


図 6  $\varepsilon_r$

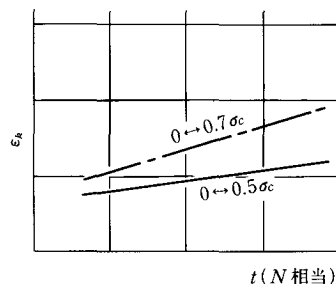


図 7  $\varepsilon_k$

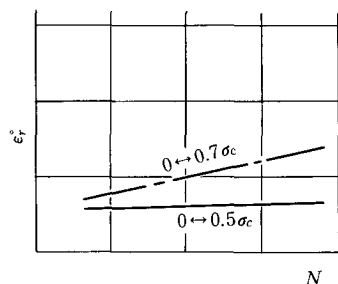


図 8  $\varepsilon_r^0$

7の通りで、これから  $\epsilon_r^o-N$  の関係が図8のように求められる。

これによれば、 $S=(0\sim 50)\%$  のときは繰返しに伴って純疲労ひずみは増加せず、増加した残留ひずみは実際にはほとんどクリープひずみである。一方、 $S=(0\sim 70)\%$  のときは純疲労ひずみが繰返しに伴って徐々に増加している。このように繰返しに伴うひずみ性状はその応力度の大きさで変化する。

### 3.4 荷重繰返しと静的強度の変化

藤田ら<sup>9)</sup> は  $\phi 10 \times 20\text{cm}$  の円柱供試体を用いた割裂疲労試験で  $S_{\max}=(0.70\sim 0.85)\sigma_{cu}$ 、 $S_{\min}=0.25S_{\max}$  の応力レベルで所定回数の繰返しを行った後で静的破壊試験を行った。その結果  $N=1 \times 10^4$  後には静的強度に変化がなく  $N=5 \times 10^4$  後には  $(4\sim 9)\%$  の増加がみられた。このような傾向は圧縮および曲げ試験でも観察されているが、とくに割裂および曲げ試験においてひびわれが発生し成長した後も静的強度が増進したことは興味深い。

### 3.5 圧縮による疲労

圧縮応力下のコンクリートの疲労については多くの研究が行われてきたが、それらのほとんどは実験結果の紹介に終わっているものが多い。その中で、確率の概念を導入して圧縮疲労強度について検討した松下<sup>7)</sup> の特色のある研究がある。ここではその論文を中心に述べることにする。

疲労寿命分布については Freudenthal A. M<sup>8)</sup> が金属材料について、阪田ら<sup>9)</sup> はコンクリートについて対数正規分布をすることを示した。前述のように破壊確率は  $r/(n+1)$  で、生存確率の期待値は  $1-r/(n+1)$  で示される。

実験は  $\phi 7.5 \times 15\text{cm}$  の円柱供試体を用いて 300 cpm で行い、応力レベルは静的強度に対して最小は 2, 5, 8, 30, 60% とし最大は 60~90% とした。静的強度は約 300 kg/cm<sup>2</sup> であった。

実験データについて破壊確率を求め、確率紙上に  $p(N_r)-\log N_r$  の関係を描いたものが図9である。これにより回帰直線式を求めれば次の通りとなる。

$$t = -0.922 \log N_r + 4.443$$

従って平均疲労寿命は、 $\log N_r = 4.443/0.922 = 4.819$

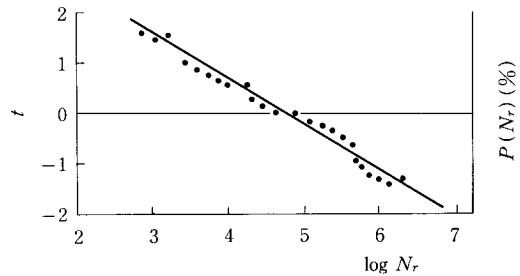


図9  $p(N_r)$

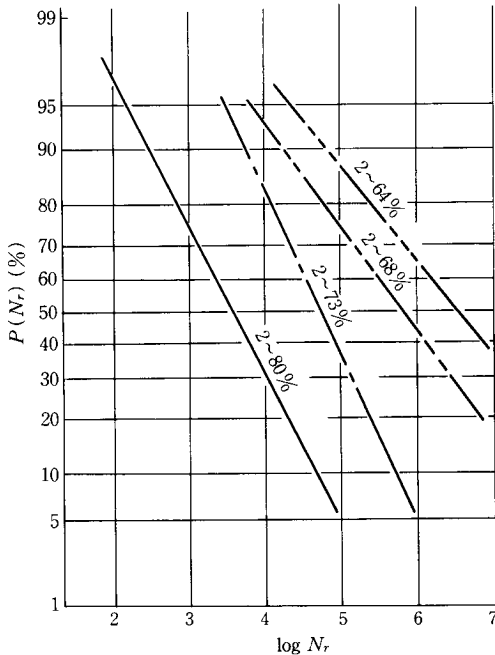


図10  $p(N_r)-\log N_r (S_{\min} \text{一定})$

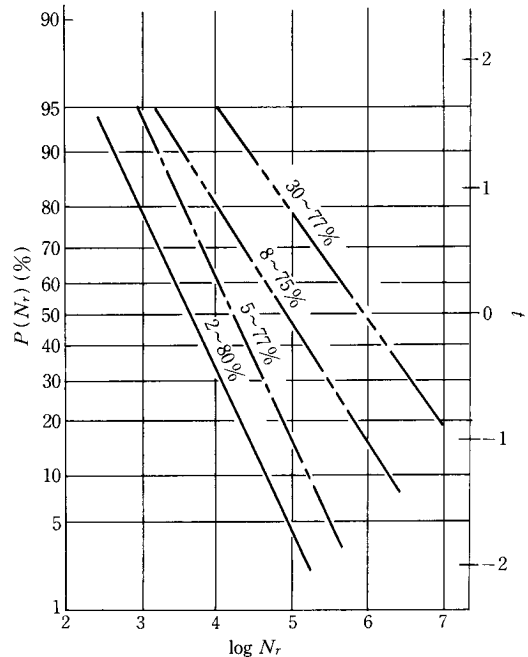


図11  $p(N_r)-\log N_r (S_{\max} \text{一定})$

で、 $\log N_r$  の標準偏差  $D(\log N_r)$  は  $1/0.922=1.085$  である。

コンクリートの配合や材令を変化させたとき疲労強度が静的強度に対する一定の比で表現でき、しかも疲労強度のバラツキがその配合や材令に影響されないならば、静的強度に影響する因子は同程度に疲労強度に影響を与えるものと考えてよい。そこで、配合を変えて圧縮強度を  $164\text{kg/cm}^2$ ,  $301''$  および  $318\text{kg/cm}^2$  とし、材令を1週と17ヶ月に変えた4シリーズについて  $p(N_r)-\log N_r$  関係をグラフに書き、これから回帰直線式を求めればつぎの通りである。最小応力度は8%で最大応力度は80%であった。

- ①  $\sigma_c=318\text{kg/cm}^2$ , 材令17月  
 $t=-1.550 \log N_r + 5.279$   $D(\log N_r)=0.65$
- ②  $\sigma_c=193\text{kg/cm}^2$ , 材令1週  
 $t=-1.883 \log N_r + 6.599$ ,  $D(\log N_r)=0.53$
- ③  $\sigma_c=301\text{kg/cm}^2$ , 材令18月  
 $t=-1.065 \log N_r + 3.773$ ,  $D(\log N_r)=0.94$
- ④  $\sigma_c=164\text{kg/cm}^2$ , 材令16月  
 $t=-0.879 \log N_r + 3.317$ ,  $D(\log N_r)=1.14$

これによれば各グループとも、ほぼ近似した分布をしているものと考えてよい従って、疲労寿命は配合や材令には無関係にそのときの静的強度に対する比で表現できる。

$p(N_r)-\log N_r$  の関係について、 $S_{\min}$  を一定にして  $S_{\max}$  を変化させたときのものを図10に、 $S_{\max}$  をほぼ一定にして  $S_{\min}$  を変化させたときのものを 図11 に示す。これによれば、 $S_{\min}$  が一定でも  $S_{\max}$  が大きいとき、および  $S_{\max}$  が一定でも  $S_{\min}$  が小さいときはいずれも疲労寿命は小さい。このことは、疲労現象は応力の繰返しに主として起因することを示している。

表1に繰返し応力度比ごとに  $t-\log N$  の回帰直線式と  $\log N$  を示す。

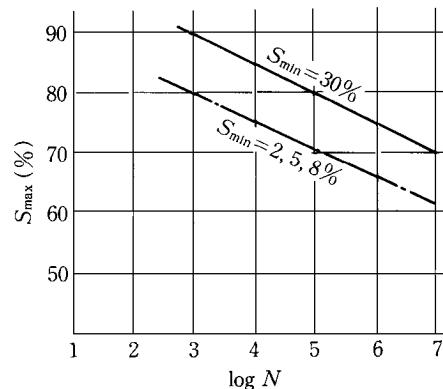
これらの値を用いて  $S_{\min}$  ごとに  $S_{\max}-\log N$  の関係を 図12に示す。

この図から  $S_{\min}$  ごとに  $S_{\max}-\log N$  曲線式と  $N$  回疲労強度  $S_{\max, N}$  が表2のように求められた。以上の経過で得られた  $S_{\max}-N$  曲線を他の研究者によるものと比較して表3に示す。この表から、コンクリートの配合や供試体の形状寸法が異っても片振り  $S-N$  曲線が近似していることから、疲労強度は静的強度比で表現できることが再確認された。

疲労寿命を論ずるときに  $S_{\min}$  を無視することはできないが、 $S_{\min}-S_{\max}$  の関係は耐久線図で示される。金属には疲労限度があり耐久線図が求められているが、コン

表1  $t-\log N$  回帰直線式

応力比(%)	回 帰 直 線 式	$\log N$
2 ~ 64	$t = -0.676 \log N + 4.459$	6.60
2 ~ 68	$t = -0.826 \log N + 4.884$	5.91
2 ~ 73	$t = -1.351 \log N + 6.622$	4.90
2 ~ 80	$t = -1.266 \log N + 4.633$	3.66
5 ~ 70	$t = -1.075 \log N + 5.892$	5.48
5 ~ 77	$t = -1.370 \log N + 5.890$	4.30
8 ~ 75	$t = -0.922 \log N + 4.443$	4.82
8 ~ 80	$t = -1.316 \log N + 4.671$	3.55
8 ~ 85	$t = -1.282 \log N + 3.744$	2.92
30 ~ 77	$t = -1.000 \log N + 5.890$	5.89
30 ~ 84	$t = -0.990 \log N + 4.089$	4.13
30 ~ 88	$t = -1.235 \log N + 4.494$	3.64
60 ~ 90	$t = -0.840 \log N + 3.723$	4.43

図12  $S_{\max}-\log N$ 表2  $S_{\min}$  ごとに  $N$  回疲労強度

$S_{\min}$ (%)	$S_{\max}-N$ 関係式	$N$ 回疲労強度 $S_{\max, N}$ (%)		
		$10^6$	$2 \times 10^6$	$10^7$
2	$\log N = -0.185 S_{\max} + 18.5$	67.6	65.9	62.2
8	$\log N = -0.190 S_{\max} + 19.0$	68.4	66.8	63.2
30	$\log N = -0.210 S_{\max} + 22.0$	76.2	74.8	71.4

クリートでは疲労限度が実験的に求められていないので  $N$  回までに破壊しない  $S_{\min}-S_{\max}$  の関係として時間耐久線図を求める。ここで  $S_{\max}$  と  $S_{\min}$  の関係は直線関係にあると見なしてよく、任意繰返し回数に対する時間耐久線図にも修正 Goodman 図が成立する。

$\sigma_{\min}$  および  $\sigma_{\max}$  と  $\log N$  の間の関係は、阪田、Ople および Raju らによれば、

表3 研究者別の  $S_{\max}-N$  関係式

研究者名	W/C	供試体	静的強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	数	cpm	$\sigma_{\min}$ (%)	$S_{\max}-N$ 関係式	$2 \times 10^6$ $\sigma_{\max}$ (%)
N. K. Raja	80	角柱	420	31	190	5	$\log \bar{N} = -0.157S + 16.1$	62.4
F. S. Ople	63	"	422	52	500	10	$\log \bar{N} = -0.182S + 18.2$	65.4
J. C. Antrim	61	円柱	288	28	1000	2	$\log \bar{N} = -0.214S + 20.5$	66.3
E. W. Benet	35~50	角柱	400~650	45	240~480	14~22	$\log \bar{N} = -0.233S + 21.6$	65.7
K. Sakata	56	円柱	233	33	300	8.6	$\log \bar{N} = -0.191S + 19.4$	68.3
H. Matsushita	63~78	"	297	21	300	2	$\log \bar{N} = -0.185S + 18.5$	65.9
				34		8	$\log \bar{N} = -0.190S + 19.0$	66.8

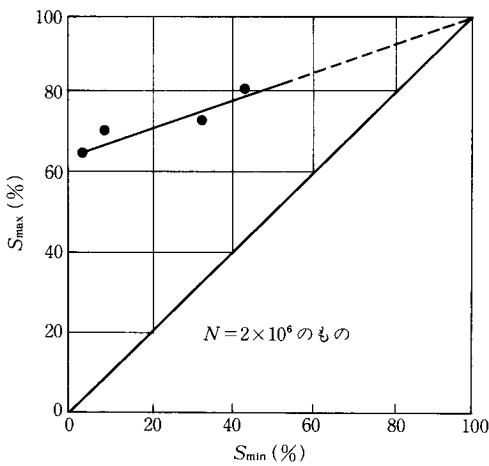


図13 修正 Goodman 図

$$\log \bar{N} = 16.4 \times \frac{100 - S_{\min}}{100 - S_{\max}} + 0.29$$

松下によれば,

$$\log \bar{N} = 17.0 \times \frac{100 - S_{\min}}{100 - S_{\max}} + 0.23 \text{ で, 実用的には}$$

$$\log \bar{N} = 17.5 \times \frac{100 - S_{\min}}{100 - S_{\max}} \text{ としてよい。}$$

E. W. Bennett らは<sup>10)</sup> 1976年に, 従来のコンクリートの疲労は低強度のものが中心であるから高強度コンクリートの疲労性状について解明することが必要であるとして,  $\sigma_{28} = 420 \sim 595 \text{ kg/cm}^2$  のものについてテストした。実験結果から前述の S. P. Shah らの  $S-N$  関係に近いものが得られたが, このことは,  $S$  をその静的強度に対する比で表わせば  $S-N$  関係は, セメントペースト, モルタルおよびコンクリートに対し, またコンクリートの配合, 材令およびその静的強度とは無関係にほぼ同じ式で表わせることを示すものである。

### 3.6 引張および曲げによる疲労

松下ら<sup>11)</sup>は割裂試験によってコンクリートの引張疲労

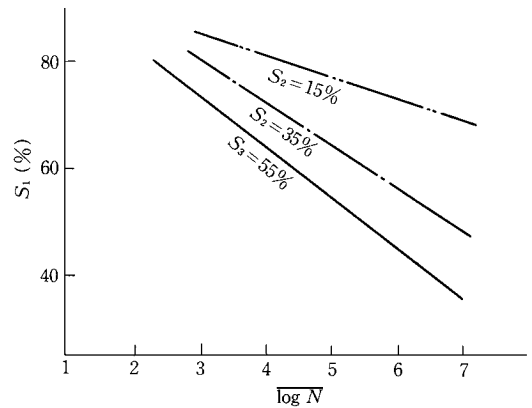


図14  $S_1 - \log \bar{N}$

強度を検討した。 $\phi 7.5 \times 15 \text{ cm}$  の円柱供試体を用い  $W/C = 89, 70$  および  $63\%$  で, 引張強度はそれぞれ  $18.5 \text{ kg/cm}^2, 25.7$  および  $37.2 \text{ kg/cm}^2$  であった。

得られた度験データから最小応力度比  $S_2$  ごとに最大応力度比  $S_1 - \log \bar{N}$  直線を画けば図14の通りである。これより次の関係式が求められる。

$$\log \bar{N} = 18.3 \times \frac{100 - S_1}{100 - S_2}$$

圧縮のときは係数が17.5であったが, 静的強度を基準にとれば疲労強度は圧縮および引張ともに同じであるものと考えてよい。また上図から分るように, 最大応力度比  $S_1$  が同じであっても応力振幅が大きい場合は疲労強度は低下する。

繰返しに伴う  $\sigma-\epsilon$  曲線の変化は圧縮の場合と同様であった。

藤田ら<sup>9)</sup>は, 同一配合のコンクリートを用いて引張りには  $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$  を39本, 圧縮は同じものを11本および曲げは  $15 \times 15 \times 55 \text{ cm}$  のもの11本を用いて疲労試験を行った。その結果を整理して  $\sigma_{\max}/\sigma_{\min} - \sigma_{\max}$  の関係を求めたものが図15である。これは引張り, 曲げおよび圧縮に

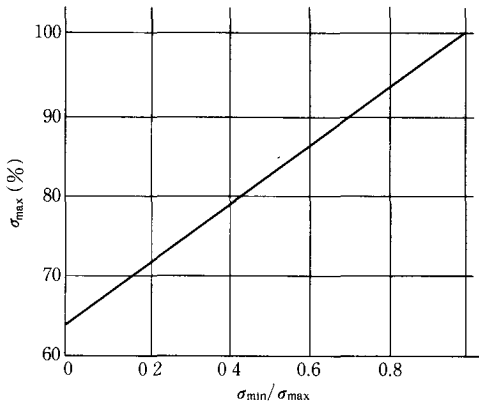
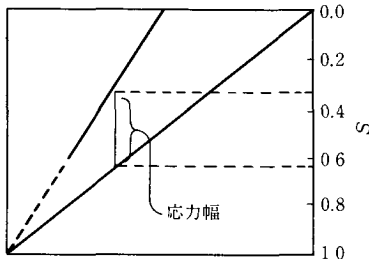
図15  $\sigma_{\max}-\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ 

図16 修正 Goodman 図

ついてはほぼ共通であり、養生条件、材令や強度にかなりの差があっても近似的に同一直線で表わせることを示している。

### 3.7 疲労に影響する因子

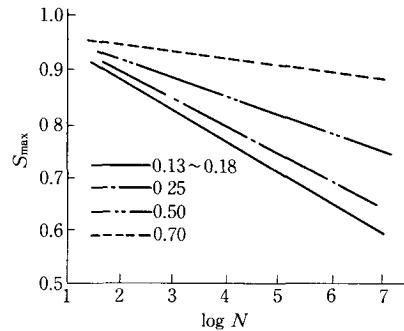
これまでに述べてきたところによれば、疲労強度は圧縮、引張りおよび曲げのいずれの場合でもそれぞれの静的強度に対する比で表すことができたが、このことは、静的強度に影響を与える因子は同様に疲労強度にも影響することを示している。ここではそのほかの因子で疲労強度に与える大きい影響を与えるものについて述べる。

#### 3.7.1 応力幅

この影響は修正 Goodman 図で表わされる。一定の繰返し回数で破壊した場合についてその  $S_{\min}$  と  $S_{\max}$  の関係から図16のような関係を求めておけば任意の  $S_{\min}$  のときその繰返し回数で破壊する  $S_{\max}$  を知ることができる。また、一定の繰返し回数において、応力幅が減少すれば  $S_{\max}$  が増大することが分る。

W. M. Johns ら<sup>3)</sup> は、 $15 \times 15 \times 160$  cm の断面寸法をもちコンクリート強度が  $315 \text{ kg/cm}^2$  の無筋はりの曲げ疲労試験を行い、 $N=10^7$  の疲労強度を静的曲げ強度に対する比として次のように求める。

$$\sigma_{\min}/\sigma_{\max}=0.13 \sim 0.18 \dots\dots 61\%$$

図17  $S_{\max}-\log N$ 

"	=0.25	.....63%
"	=0.50	.....73%
"	=0.75	.....85%

これらの関係を図17に  $S_{\max}-\log N$  図で示す。

#### 3.7.2 応力度の変動<sup>12)13)</sup>

多くの研究では一定の大きさの最小および最大応力度の繰返し実験が行われているが、これは実際の構造物における荷重状態を必ずしも正しく表現してはいない。そこで、変動荷重の影響を明らかにするために次のような実験が行われた。

試験体は  $15 \times 15 \times 150$  cm の無筋コンクリートはりで、 $W/C=52\%$ 、 $\sigma_{28}=350 \text{ kg/cm}^2$  であった。載荷は材令150～300日の間に450 cpmで繰返し曲げを加え  $S_{\min}/S_{\max}=0.17$  と一定とした。応力度が一度だけ変化する場合について応力レベルを図18のようにして行った実験結果を図19に示す。ここで、

$N_1, n_1 : S_1$  でのそれぞれ破壊までの、および実際に加えた回数

$N_2, n_2 : S_2$  について同上。

マイナーの法則によれば  $\sum n/N=1$  のときに破壊する

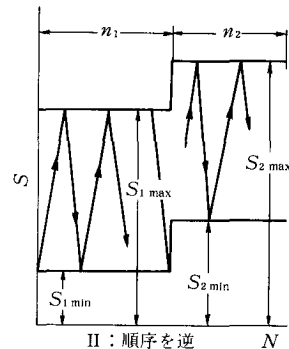


図18 応力の変動 (I, II)



ことになるが、実際には若干違った結果が得られた。 $S_1$ での繰返し載荷は $S_2$ での疲労強度を $n_2/N_2 < 1.0$ のときに減少させ、 $n_2/N_2 = 1.0$ のとき影響を与えず $n_2/N_2 > 1.0$ のときは増加させたことになる。これによれば、I ( $S_1 < S_2$ )のときは $S_1$ によって $S_2$ の疲労寿命は大きく減少するが、II ( $S_1 > S_2$ )のときは $n_1/N_1$ の値が0.4以下と小さいときは $S_2$ での疲労寿命をむしろ大きくする。さらに

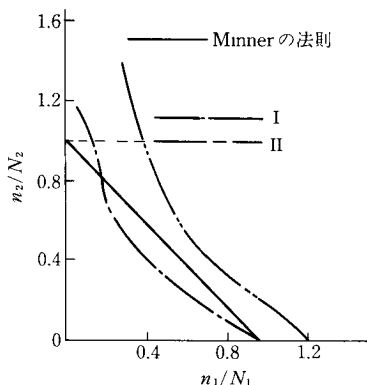


図19 実験結果

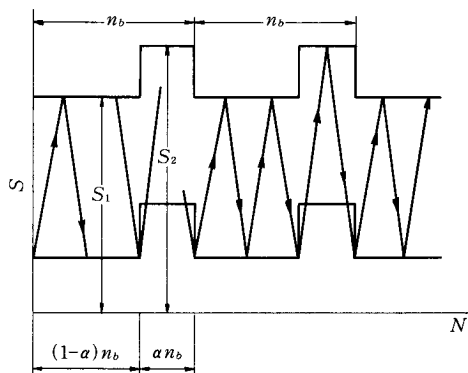


図20 応力の変動 (Ⅲ)

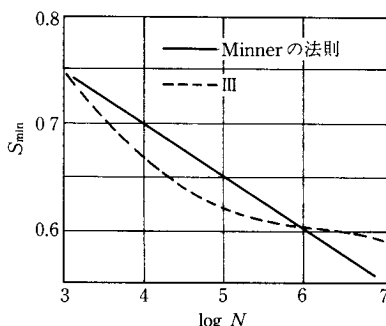


図21 実験結果

図20に示すようなⅢの場合で、高応力レベル繰返し回数と低応力レベル繰返し回数の比が大きいときは、疲労寿命が小さい。また最大応力レベルが一定のとき上下応力レベルの差が大きく振幅が大きいときは疲労寿命は小さい。

$S_{min}$ と $\log N$ との関係を図21に示す。このとき  $S_{min}/S_{max} = 0.17$ ,  $\alpha$  (図20) = 0.315 で $S_2$ と $S_1$ との差は8%であった。図19と図21によれば Minner's rule は高応力レベルでは危険側の、低応力レベルでは過度に安全側の結果を与えることに注意しなければならない。

### 3.7.3 応力履歴<sup>14)</sup>

ここでは応力の履歴によってもたらされる内部の損傷がその後のコンクリートの静的強度に影響を与えるかどうかを考察する。

G. Winter らによれば、鋼材のひずみ硬化と同様にコンクリートの場合も静的強度の90%以下の荷重が数サイクル加えられるとき、ひずみ硬化現象を起して静的強度が若干増加した。このひずみ硬化限界は圧縮によってコンクリートの体積が減少から増大に転じる、いわゆる変形特異点の近くにあるように考えられる。

Clemmer によれば、小さい応力が予じめ繰返し作用したとき静的強度は約5%増加したとし、また Bennett<sup>10)</sup>によれば高強度コンクリートに静的強度の50~70%の応力を数百万回作用させたとき、その後の静的強度は約11%増加した。

### 3.7.4 応力変化の速度<sup>14)</sup>

$\sigma$ - $\epsilon$  関係式に時間  $t$  を導入して一般化すれば、変形速度の異なる現象すなわち衝撃、疲労およびクリープ等を体系づけることができよう。

静的載荷時のコンクリートの降伏点 ( $\sigma$ - $\epsilon$  関係で曲率の急変する点) 以前の  $\sigma$ - $\epsilon$  曲線は  $\epsilon = a\sigma + b\sigma^2$  で示される。この式に載荷速度の条件を入れて、 $a$  と  $b$  とを載荷速度  $v = d\sigma/dt$  の関係で表わし得るものとすれば上式は

$$\epsilon = f_1(v)\sigma + f_2(v)\sigma^2$$

となる。そこで、 $f_1(v)$  と  $f_2(v)$  を求めるために次の条件で実験を行った。

$$v = 1.3, 2.6, 3.8, 5.1, 6.4, 55.0 \text{ kg/cm}^2/\text{sec}$$

$$\sigma_c = 150, 250, 400 \text{ kg/cm}^2$$

その結果、例えば  $\sigma = 400 \text{ kg/cm}^2$  のとき静的強度の60~75%以下の範囲について次の値が得られた。

$$f_1(v) = (3.037 - 0.008v) \times 10^{-6},$$

$$f_2(v) = 0.251 v^{-0.108} \times 10^{-8}$$

このような解析を押し進めてゆけば疲労の問題を理論的に解明するための一つの手がかりが得られよう。

C. E. Kesler ら<sup>13)</sup> によれば繰返し速度が (70~900)

cpmの範囲では疲労強度にほとんど変化はないが10 cpm程度のゆっくりした速度では疲労強度は僅かに小さくなるとした。後者の現象はクリープの影響のためであろうと思われる。

### 3.7.5 繰返しの休止

Hubert K. H と Clyde E. K の研究がある<sup>18)</sup>。彼らは  $15 \times 15 \times 150$  cm の無筋コンクリートはりを用いて3等分点荷重を加えた。コンクリートは  $W/C=52\%$  で  $\sigma_{as} \approx 350$  kg/cm<sup>2</sup> で材令は150~300日でテストした。応力範囲は  $\sigma_{min}/\sigma_{max}=0.17$  で載荷速度は450 cpmである。

図22に示すように、 $S_{max}$  で4,500回繰返し載荷した後、 $S_{min}$  の応力レベルを保ちながら一定時間(1, 5, 10, 20, 27分)休止させて、これを破壊まで繰返した。

$S_{max}-\log N$  の関係は図23の通りであった。5分の休止で疲労強度の増加が認められ、それ以上の10, 20, 27分までは5分の休止と同様であったので、これらは一本の曲線で示してある。実験結果を破壊確率  $p(N)$  と繰返し回数  $\log N$  で図24のように示せば、休止による疲労強度の増加がさらに明らかに認められる。

また休止時間と  $S_{max}$  の関係を図25に示す。

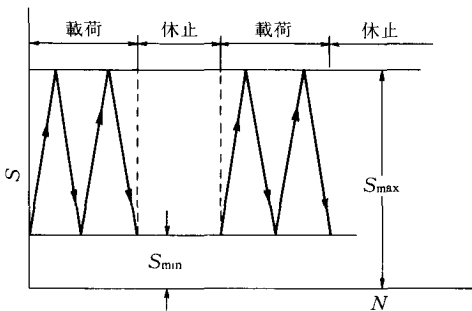


図22 載荷条件

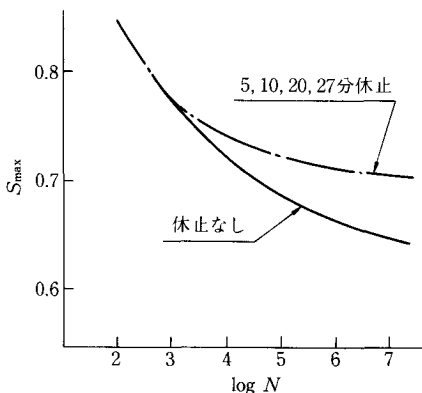


図23  $S_{min}-\log N$

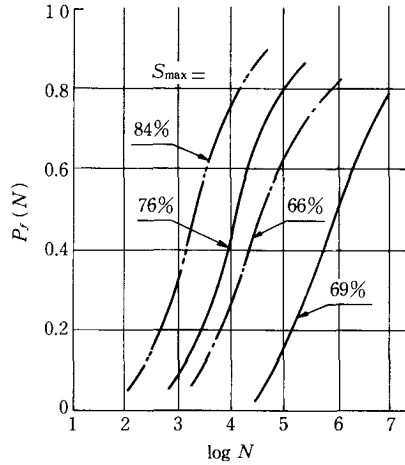


図24  $p(N)-\log N$

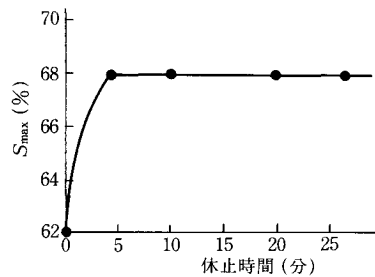


図25 休止時間- $S_{max}$

リラクセーションの場合も同様であるが、供試体の変形回復速度は初期に大きくその後次第に減少して、ある時間後には変形回復は終了する。従って、休止時間が5分までは疲労強度は増加するがそれ以上の休止時間による変化は認められない結果が得られたのであろう。

### 3.7.6 供試体の乾湿

静的圧縮強度は気乾状態のときの方が湿潤状態のときよりも大きいことが知られている。これはコンクリートの空隙中に含まれる水分の作用によるものであろう。

海洋や河川に設けられるコンクリート構造物はほとんど常に湿潤状態にあり、これが波力等による繰返し荷重を受けるときの安全性の検討のためには疲労強度に対するコンクリートの乾湿の影響を明らかにする必要がある。

この問題に関する最も新しい研究として松下<sup>19)</sup>のものがああり、水中におけるコンクリートの圧縮疲労強度について実験的に検討した結果の概要を述べる。

供試体は  $\phi 7.5$  cm  $\times$  15 cm のものを用い普通コンクリートで  $W/C$  は50, 63および70%とし、試験時材令は3

ヶ月以上とした。繰返し載荷は水中で行い、 $S_{min}=10, 30$  および50%とし  $S_{max}$  は55~85%に設定した。供試体数は91本である。

コンクリートの静的圧縮強度は試験時の供試体の乾湿条件で大きく異なるが、このことを示す一例として H. J. Gilkey の実験結果を図26に示す。筆者はまた水中での圧縮疲労強度も水中静的強度に対する比で表現できるとしている。

実験結果から得られた破壊確率と  $\log N$  との関係を対数正規分布するものとして確率紙上に一例として  $S_{min}=10\%$  のときのものを図27に示す。

それらの回帰直線式から平均疲労寿命  $\overline{\log N}$  を求め、 $S_{max}$ - $\log N$  曲線を図28の通りに画く。

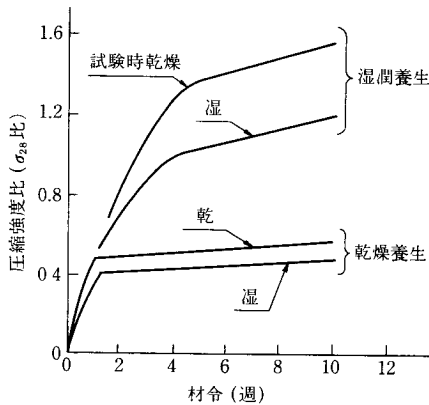


図26 乾湿の影響

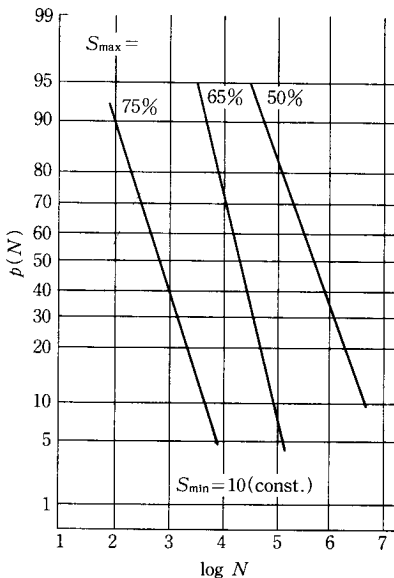


図27  $p(N)$ - $\log N$

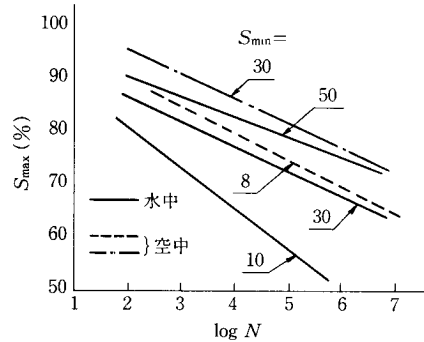


図28  $S_{max}$ - $\log N$

表4  $S_{max}$  (%)

条件		$N$	$10^6$	$2 \times 10^6$	$10^7$
水	中		67.7	66.3	63.0
空	水		76.2	74.8	71.4

このグラフによっても水中疲労強度の低下が観察されるが、さらに  $S_{min}=30\%$  のときの  $S_{max}$ - $N$  曲線 (図28) から疲労強度  $S_{max}$  (%) を求めれば表4の通りでその差が明らかに現われている。

また筆者は水中疲労寿命のパラッキは空中のものよりかなり小さいことを確かめた。これは、水中のとき内部空隙がすべて水で飽和されていて供試体の乾湿差がないからであろう。

結論として、空中強度に比較して水中強度はすでに10~20%低下しており、しかも水中疲労強度 (水中静的強度比) は空中疲労強度 (空中静的強度比) より約20%小さい。このことから湿潤状態のコンクリート構造物が繰返し荷重を受けるときは疲労に対する安全性に十分に注意すべきことが分る。

### 3.7.7 応力の勾配

この問題に関しては F. S. Ople と C. L. Hulsbos の研究<sup>16)</sup>がある。これによれば作用応力の勾配は圧縮疲労に大きい影響を与え、応力が三角形分布するときの疲労強度は等分布するときと比較して約17%大きかった。この結果から等分布圧縮応力の疲労強度はコンクリートの圧縮疲労によって決まる曲げ部材の疲労寿命に対する下限値推定のために用いてよいことが分った。

実験は  $10 \times 15 \times 30$  cm の角柱を用い  $W/C=58 \sim 67\%$  で  $\sigma_{28} \approx 330$  kg/cm<sup>2</sup>, テスト時は  $\sigma_c = 390$  kg/cm<sup>2</sup> であった。テストグループはつぎに示す通りである。

Group 1a, 2a, Group 1b, 2b, Group 1c, 2c

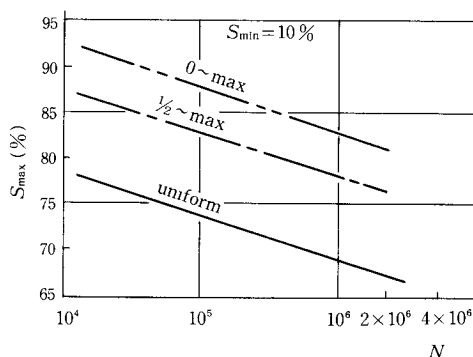


図29 応力勾配の影響

表5 実験結果

グループ	$S_{max}$ (%)	数	$\log N$
2 a	80.0	3	4,194
	75.2	10	4,619
	72.5	8	5,051
	70.0	12	5,324
	67.5	9	5,879
	65.0	5	—
2 b	95.0	3	4,089
	92.5	3	4,538
	90.0	8	4,682
	87.5	12	5,291
	85.0	8	5,979
2 c	85.0	6	4,535
	80.0	7	5,403
	77.5	4	5,917

ここで1は静的で2は繰返し、aは応力が均等分布 ( $e=0$ ) でbは応力分布が  $0 \rightarrow \max$  ( $e=25\text{mm}$ ) でcは  $1/2 \rightarrow \max$  ( $e=8\text{mm}$ ) である。繰返し载荷における  $S_{min}$  は常に静的強度の10%とした。繰返し速度は 500 cpm で200万回で破壊しないものは試験を打ち切った。

実験結果を2のグループについて要約して示せば表5の通りである。

この表の関係をグラフで示したものが図29で、これによって応力勾配が無筋コンクリートの応力勾配に与える影響を知ることができる。この図において相互の  $S-N$  直線はほぼ平行であり、このことから  $S$  と  $N$  と応力勾配  $\theta$  の間に一定の関係があることが推定される。

このほかに応力勾配をもつ疲労実験結果から明らかになった点は、 $S_{max}$  の小さい変化が疲労強度に大きい影響を与えることである。 $S_{max}$  の僅か 5.0~7.5% の低下のた

めに疲労破壊に至る繰返し回数  $N$  は  $4 \times 10^4$  から  $1 \times 10^6$  に増加した。本実験の結果は曲げを受けるはりにおける圧縮部コンクリートの疲労寿命推定のための貴重な資料となろう。

#### 4. ま と め

この資料は、材料としてのコンクリートの疲労についてこれまで多くの研究者によって得られた研究成果の一部を要約して示したものである。コンクリートの破壊について述べたあと、その疲労強度の扱い方およびこれに影響を及ぼす主要な因子について解説した。

ここで紹介した研究成果はいずれも有益なものであるが、一歩進んで疲労に伴う損傷進行の機構までを明らかにしようとしたものは見当たらない。金属の疲労に関する研究の現状と比較して物足りないものを感じる。

今後は、コンクリートの疲労の機構を少しずつ明らかにした上で、コンクリートと鋼材とが複合されて成り立っている鉄筋コンクリート部材やプレストレストコンクリート部材の疲労についての知見を積み重ねて行きたい。

(原稿受付 昭和56年9月24日)

#### 参考文献

- 1) 小林昭一：コンクリートの破壊機構，コンクリート工学，Vol. 13, No. 2, Feb. '75.
- 2) 横道英雄，角田与史雄，鮎田耕一：コンクリートの変形における特異点について，セメント技術年報，XXIII, '69.
- 3) Murdock J. W. and Kesler C. E.: Effect of Range of Stress on Fatigue Strength of Plain Concrete Beams, Pro. of ACI, Vol. 55, 59.
- 4) Surendra P. Shah and Sushil Chandra: Fracture of Concrete Subjected to Cyclic and Sustained Loading, ACI Journal, Oct., '70.
- 5) N. K. Raju: Comparative Study of the Fatigue Behavior of Concrete, Mortar and Paste in Uni-axial Compression, ACI Journal, June, '70.
- 6) 藤田嘉夫，海保康男：コンクリートの引張り，圧縮および曲げに関する疲労性状，セメント技術年報，XXI, '67.
- 7) 松下博道，徳光善治：生存確率を考慮したコンクリートの圧縮疲労強度に関する研究，土木学会論文報告集，No. 284, April '79.
- 8) Freudenthal A. M.: Planning and interpretation of fatigue tests, ASTM Special Tech. Publ. No. 121, '52.
- 9) 阪田憲次，木山英郎，西林新蔵：統計的处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, '72.

- 10) Bennett E. W. and Muir, S. E.: Some Fatigue Test of High-Strength Concrete in Axial Compression, Magazine of Concrete Research, Cement and Concrete Association, Vol. 19, '67.
- 11) 松下博道, 近田孝夫: 割裂試験方法によるコンクリートの引張疲労強度に関する研究, 第35回セメント技術大会講演要旨 '81.
- 12) 成岡昌夫, 都築和夫訳: Fatigue and Fracture of Concrete, By Clyde E. Kesler, コンクリートジャーナル, Vol. 9, No. 12, '71.
- 13) Hubert K. Hilsdorf and Clyde E. Kesler: Fatigue Strength of Concrete under Varying Flexural Stresses, ACI Journal Oct., '66.
- 14) 奥島正一, 小阪義夫, 西岡思郎: 載荷速度がコンクリートの不完全弾性挙動におよぼす影響について, セメント技術年報, XV, '61.
- 15) 松下博道: 水中におけるコンクリートの圧縮疲労強度に関する研究, 土木学会論文報告集, No. 296, '80.
- 16) F. S. Ople and C. L. Hulsbos: Probable Fatigue Life of Plain Concrete with Stress Gradient, ACI Journal, Jan., '66.