

# 論文 高強度コンクリートの圧縮疲労特性に関する実験的研究

林 宏信\*<sup>1</sup>・児島 孝之\*<sup>2</sup>・高木 宣章\*<sup>2</sup>

**要旨：**普通強度コンクリートの圧縮疲労に関しては数多くの報告があるが、高強度コンクリートの圧縮疲労に関しては十分なデータが得られていない。本論文はコンクリートの圧縮強度および環境条件が圧縮疲労性状に及ぼす影響について既往の研究と比較検討するために、80N/mm<sup>2</sup>程度の高強度コンクリートを作製し、気中および水中で一定振幅の繰返し荷重を受ける高強度コンクリートの圧縮疲労試験を行った結果を報告する。高強度コンクリートの圧縮疲労強度は静的強度比で普通強度コンクリートよりも低下し、その低下傾向は気中の方が著しいことが明らかとなった。

**キーワード：**高強度コンクリート, 疲労, 水中疲労, 疲労強度, K

## 1. はじめに

高強度コンクリートの研究・開発の進展に伴い、高強度コンクリートが実構造物に使用される例が数多く見られるようになった。それに伴い、土木学会「コンクリート標準示方書[平成8年制定]設計編」<sup>1)</sup>では、コンクリートの設計基準強度の上限値として80N/mm<sup>2</sup>が採用された。コンクリートの疲労強度( $f_{rd}$ )に関しては、式(1)で求めてよいこととなっている。

$$f_{rd} = k_f f_d (1 - \sigma_p / f_d) (1 - \frac{\log N}{K}) \quad (1)$$

ここに、 $f_d$ :コンクリートの設計強度、 $\sigma_p$ :永久荷重による応力度、 $N$ :疲労寿命、 $K$ :普通コンクリートで水で飽和される場合あるいは軽量骨材コンクリートの場合10,その他の場合17、 $k_f$ :圧縮の場合 $k_f=0.85$

しかし、設計基準強度が50N/mm<sup>2</sup>を越える場合については十分なデータがないので、式(1)の適用範囲を50N/mm<sup>2</sup>以下としている。ただし、50N/mm<sup>2</sup>を越える場合は50N/mm<sup>2</sup>に対する設計疲労強度を用いてもよいとなっており、高強度コンクリートの圧縮疲労に関する十分なデータが得られていないのが現状である。したがって、本論文では気中および水中で一定振幅の繰

返し荷重を受ける高強度コンクリートの圧縮疲労試験を行い、コンクリートの圧縮強度および環境条件が疲労性状に及ぼす影響について検討するとともに既往の研究と比較検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 示方配合

本研究に用いたコンクリートの示方配合を表-1に、使用材料の一覧を表-2示す。粗骨材には6号砕石(5~13mm)を使用した。

表-1 コンクリートの示方配合

配合	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				混和剤 (kg/m <sup>3</sup> )
			W	C	S	G	
A	40	46	176	440	795	962	(C×1.2%)
B	40	46	176	440	788	954	(C×1.2%)
C	40	46	176	440	789	955	(C×0.8%)

表-2 使用材料一覧

セメント	A: 早強ポルトランドセメント 比重3.14
	B: 早強ポルトランドセメント 比重3.14
	C: 普通ポルトランドセメント 比重3.16
細骨材	A: 野洲川産川砂 比重2.62 F.M.=2.81
	B: 野洲川産川砂 比重2.62 F.M.=2.55
	C: 野洲川産川砂 比重2.62 F.M.=2.55
粗骨材	A: 高槻産砕石 比重2.69 F.M.=6.38
	B: 高槻産砕石 比重2.69 F.M.=6.38
	C: 高槻産砕石 比重2.69 F.M.=6.38
混和剤	$\beta$ -ナフタリンスルホン酸系高性能減水剤

\*1 (株)ピー・エス 工修 (正会員)

\*2 立命館大学教授 理工学部土木工学科 工博 (正会員)

## 2.2 供試体作製および養生方法

供試体はすべてφ7.5×15cmの円柱供試体とした。高強度コンクリートの練り混ぜは強制練りミキサーを使用し、棒状バイブレーターで振動締固めを行った後、木づちで約2分間型枠を叩き締め固めた。供試体は打設翌日に脱型し、1週間水中養生、その後圧縮疲労試験を実施するまで高湿恒温恒湿室(20±1℃, RH=90±5%)に保管した。圧縮疲労試験は、コンクリート強度が十分安定状態に達した材齢91日以降に実施した。水中疲労試験供試体および水中静的強度試験供試体は、試験前約7日間水中養生した後に載荷試験を実施した。

## 2.3 実験方法

圧縮疲労試験に先立ち、各打設ごとの供試体群を1グループとして各グループごとに任意に抽出した供試体により、それぞれの環境条件での静的強度と静弾性係数を求めた。

圧縮疲労試験は気中・水中の2環境で行った。水中における繰返し載荷は底面が鋼板、2側面がアクリル板で作製した水槽に水道水を満たした状態で行った。圧縮疲労試験機には、サーボパルサ(動的載荷容量300kN)を使用した。実験

表-3 実験要因

環境条件	S <sub>max</sub> (%)	S <sub>min</sub> (%)	供試体数			
			配合A	B	C	計
気中	65	10	5	5	7	17
	70		6	6	9	21
	75		8	3	7	18
	80		0	0	8	8
水中	45	10	0	0	6	6
	50		0	0	7	7
	55		0	6	6	12
	60		0	6	7	13
	65		0	6	7	13
	70		0	5	0	5
	75	0	5	0	5	
	68.2	18.6	5	0	0	5
	75.0		6	0	0	6
	81.8		7	0	0	7

S<sub>max</sub>=(上限応力)/(各々の環境条件での静的強度)×100  
S<sub>min</sub>=(下限応力)/(各々の環境条件での静的強度)×100

表-4 静的強度試験結果

配合	材齢28日		疲労試験時			
	圧縮強度 静弾性係数	本数	気中		水中	
			圧縮強度 静弾性係数	本数	圧縮強度 静弾性係数	本数
A	73.5	2	84.8(7.6)*	8	63.7(9.7)	9
	4.13×10 <sup>4</sup>	2	4.54×10 <sup>4</sup>	7	4.89×10 <sup>4</sup>	7
B	66.9	12	74.6(7.5)	12	66.6(10.7)	8
	3.94×10 <sup>4</sup>	9	4.31×10 <sup>4</sup>	9	4.51×10 <sup>4</sup>	3
C	49.6	12	79.9(6.8)	12	75.0(3.8)	15
	4.03×10 <sup>4</sup>	9	4.52×10 <sup>4</sup>	9	4.47×10 <sup>4</sup>	9

\*:( )内の数字は変動係数(%), 単位: N/mm<sup>2</sup>

要因を表-3に示す。圧縮疲労試験の上限応力および下限応力は、それぞれの環境条件における疲労試験直前の静的強度をもとに決定した。圧縮疲労試験は正弦波による部分片振載荷とし、載荷速度は5~10Hzとした。繰返し回数は200万回までとし、200万回の繰返し載荷で破壊しなかった供試体は、静的載荷により破壊させ残存強度を測定した。

## 3. 実験結果および考察

材齢28日と疲労試験実施直前に行ったコンクリートの静的強度試験結果を表-4に示す。

同一繰返し応力を受ける場合でも疲労寿命は一般に大きく変動する。したがって、得られた疲労試験結果を統計的に処理する必要がある。既往の研究<sup>2),3)</sup>では対数正規分布が最も適切であるとされている。本研究においても対数正規分布に従うものとして処理した。

各応力比におけるコンクリートの疲労寿命(N)の分布が

$$t = A \log N + B, \quad t = \phi^{-1}(P(N)) \quad (2)$$

で表される対数正規分布に従うとき、P(N)=0.5つまりt=0に相当するNの値が平均疲労寿命( $\bar{N}$ )を表す。式(2)の生存確率P(N)は、式(3)で表される。

$$P(N) = 1 - \frac{r}{n+1} \quad (3)$$

ここに、P(N):生存確率、r:疲労寿命を小さい方から数えた供試体の順番、n:供試体総数

また、 $t$  は任意の  $P(N)=P$  の値に対して標準正規確率表  $P=\phi(t)$  により求めた標準正規変量である。任意の生存確率  $P(N)=P$  に対応する疲労寿命  $N(P)$  は、 $t=\phi^{-1}(P)$  の値を式(2)に直接代入して  $N$  の値を求めるか、あるいは式(4)から求めることができる。

$$N(P) = 10^{(t-B)/A} \quad (4)$$

表-5 の回帰式は、式(2)の係数  $A, B$  を最小自乗法によって決定したもので、回帰した直線からの実験データの隔たりは幾分あるが対数正規分布に従うといえる。

上限応力比 ( $S$ ) と平均疲労寿命 ( $\bar{N}$ ) の関係を図-1 に示す。これは、表-5 の回帰式の生存確率 50% における平均疲労寿命 ( $\bar{N}$ ) を最小自乗法によって直線で近似したものである。表-6 にそれぞれの  $S-\bar{N}$  線式を示す。圧縮応力下における普通強度コンクリートの気中疲労寿命は

表-5 回帰分析

環境	$S_{max}$ (%)	$S_{min}$ (%)	回帰式
気中	65	10	$t = -0.662 \log N + 3.520$
	70		$t = -0.933 \log N + 4.188$
	75		$t = -0.995 \log N + 4.077$
	80		$t = -2.138 \log N + 6.689$
水中	45	10	$t = -6.680 \log N + 41.27$
	50		$t = -0.988 \log N + 5.160$
	55		$t = -0.789 \log N + 4.040$
	60		$t = -1.216 \log N + 4.842$
	65		$t = -0.890 \log N + 3.594$
	70		$t = -1.160 \log N + 4.511$
	75		$t = -0.899 \log N + 3.271$
	68.2	18.6	$t = -0.613 \log N + 3.369$
	75.0		$t = -0.661 \log N + 2.639$
	81.8		$t = -0.770 \log N + 3.136$

表-6  $S-\bar{N}$  線式

環境	$S_{min}$ (%)	$S-\bar{N}$ 線式
気中	10	$S = -7.018 \log \bar{N} + 102.385$
水中	10	$S = -10.781 \log \bar{N} + 109.397$
	18.6	$S = -6.749 \log \bar{N} + 105.516$

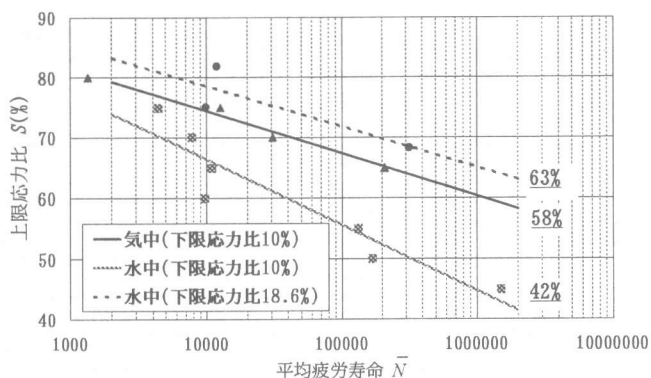


図-1  $S-\bar{N}$  線図

上限応力比が5%低下するに伴って1オーダー長くなるとの報告<sup>2)</sup>があるが、高強度コンクリートを対象とした本研究では上限応力比が10%低下するに伴って1オーダー長くなった。

一般に、コンクリートにおいては明瞭な疲労限の存在が確認されていないので、あらかじめ定めたある繰返し回数における時間強度をもって疲労強度としている。ここでは、繰返し回数  $N=200$  万回と定め、表-6 の  $S-\bar{N}$  線式にこれを代入して200万回圧縮疲労強度を求めた。上限応力比で表した本研究の200万回圧縮疲労強度は、気中では58.2%、水中では下限応力比が10%のとき41.5%、下限応力比が18.6%のとき63.0%となった。

下限応力比が同じ10%の場合、水中における200万回圧縮疲労強度は気中疲労試験に比べて16.7%低下した。普通強度コンクリートでは、水中での200万回圧縮疲労強度は気中に比べ約20%低下すると報告されており<sup>3)</sup>、気中と水中の環境条件の違いによる200万回圧縮疲労強度の低下は高強度コンクリートのほうが幾分か小さかった。水中疲労試験での下限応力比が18.6%のグループは、気乾状態における静的圧縮強度を基準に圧縮疲労試験を行ったものを湿潤状態における静的強度に換算したものである。

### 3.1 気中疲労試験結果

気中における  $S-\bar{N}$  線図を図-2 に、研究者による実験要因・ $S-\bar{N}$  線式および200万回圧縮

表-7 各研究者による  $S-\bar{N}$  線式と 200 万回圧縮疲労強度

	研究者	供試体の形状	静的強度 (N/mm <sup>2</sup> )	载荷速度 (Hz)	$S_{min}$ (%)	$S_{max}$ (%)	$S-\bar{N}$ 線式	200 万回疲労強度
気中	井上 <sup>2)</sup>	円柱	24.5~42.2	5	10	72~80	$S = -4.395 \log \bar{N} + 97.506$	69.8%
	松下 <sup>3)</sup>	円柱	16.1~31.2	5	8	75~85	$S = -5.2631 \log \bar{N} + 100.00$	66.8%
	阪田ら <sup>4)</sup>	円柱	22.8	5	8.6	65~80	$S = -5.236 \log \bar{N} + 101.571$	68.3%
	Bennett <sup>5)</sup>	角柱	39.3~63.4	4~8	14~22	53~100	$S = -4.292 \log \bar{N} + 92.704$	65.7%
	Ople <sup>6)</sup>	角柱	41.4	8.3	10	65~80	$S = -5.4951 \log \bar{N} + 100.00$	65.4%
	Raju <sup>7)</sup>	角柱	41.3	3.2	5	65~85	$S = -6.369 \log \bar{N} + 102.548$	62.4%
	本研究	円柱	74.6~84.8	5~10	10	60~80	$S = -7.018 \log \bar{N} + 102.385$	58.2%
水中	松下 <sup>3)</sup>	円柱	20.7~36.1	5	10	55~75	$S = -7.246 \log \bar{N} + 95.942$	50.6%
			23.1	5	30	70~85	$S = -4.673 \log \bar{N} + 95.701$	66.3%
	尾崎ら <sup>1)</sup>	円柱	32.2	10	3.9	45~65	$S = -10.500 \log \bar{N} + 95.80$	29.6%
	本研究	円柱	66.2~75.0	5~10	10	45~65	$S = -10.781 \log \bar{N} + 109.39$	41.5%
63.7			5~10	18.6	68.2~81.8	$S = -6.749 \log \bar{N} + 105.516$	63.0%	

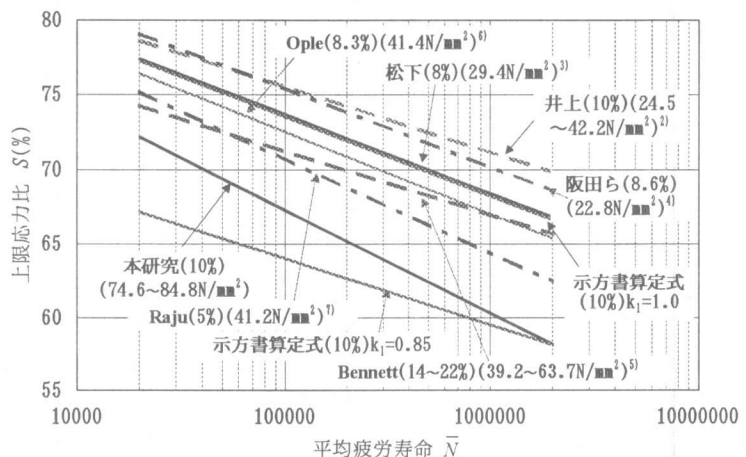
疲労強度を表-7 に示す。研究者によって試験条件は若干異なるが、下限応力比が 10% 程度での 200 万回圧縮疲労強度は圧縮強度約 30N/mm<sup>2</sup> を対象とした試験結果<sup>2)~4)</sup>では約 65~70%、圧縮強度約 40N/mm<sup>2</sup> を対象とした試験結果<sup>5)~7)</sup>では約 60~65% の範囲にある。そして、圧縮強度約 80N/mm<sup>2</sup> を対象とした本研究では 58% となった。コンクリートの静的強度の増加にしたがって、200 万回圧縮疲労強度は徐々に低下している。  $S-\bar{N}$  線図の勾配も普通強度コンクリートより幾分急になっている。また、土木学会「コンクリート標準示方書」

1) のコンクリート疲労強度式(式(1))中の永久荷重による強度低下その他を考慮する係数である  $k_1$  を 0.85 にすると、高強度コンクリートの  $S-\bar{N}$  線式は土木学会式と異なるものの、200 万回圧縮疲労強度はほぼ一致する。

$S-\bar{N}$  線式の勾配より  $K$  を求めると、

普通強度コンクリートの場合は  $K=17$  程度になり、この値が土木学会「コンクリート標準示方書」<sup>1)</sup>に採用されている。しかし、高強度コンクリートを対象とした本研究では  $K=12.8$  となり、コンクリート標準示方書算定式よりかなり危険側に位置している。

図-3 に気中における  $S_r / (f_k / f_m - S_{min})$  と  $\log \bar{N}$  の関係を普通強度コンクリートの既報告疲労試験結果<sup>8)</sup>とともに示す。ここに、 $S_r$  : 応力振幅、 $f_k$  : コンクリート強度の特性値(試験値  $f_m$  が特性値を下回る確率が 5% とした値)、 $f_m$  : コン



( )内の%は下限応力比, N/mm<sup>2</sup>は静的強度

図-2  $S-\bar{N}$  線図(気中疲労試験)

クリートの試験強度であり、 $f_k/f_m$ は式(5)で求められる。

$$f_k/f_m = (1 - 1.64\delta) \quad (5)$$

$\delta$ は、コンクリートの試験強度の変動係数であり既報告疲労試験結果<sup>9)</sup>は $\delta=5.0\%$ 、本研究結果は3配合における平均値を採用し、 $\delta=7.5\%$ を用いた。土木学会「コンクリート標準示方書」<sup>1)</sup>のコンクリート疲労強度式では、コンクリートの種類・供試体の乾湿状態によって定まる定数として $K$ の値を普通コンクリートで気乾状態にある場合17としている(生存確率95%、静的強度の変動係数5%時)。しかし、高強度コンクリートの疲労寿命は、 $K$ の値を17にすると、危険側となるデータがかなり増加する。 $K$ の値として15を採用すると普通強度から高強度までの全てのデータに対して、 $K$ の値として12を採用すると高強度のみのデータに対して95%以上の生存確率を確保することができる。

### 3.2 水中疲労試験結果

水中における $S-\bar{N}$ 線図を図-4に、各研究者による実験要因・ $S-\bar{N}$ 線式および200万回圧縮疲労強度を表-7に示す。研究者によって試験条件は若干異なるが、下限応力比が10%時の200万回圧縮疲労強度は、静的圧縮強度約25 $\text{N/mm}^2$ を対象とした場合<sup>3)</sup>には約50%となる。約70 $\text{N/mm}^2$ を対象とした本研究では、普通強度コンクリート

より約10%低下している。コンクリート標準示方書算定式( $k_f=1.0$ の時)と比較した場合、200万回圧縮疲労強度および $S-\bar{N}$ 線式の勾配は本研究結果とほぼ同程度であった。 $S-\bar{N}$ 線式の勾配より求まる $K$ は、既報告疲労試験結果<sup>9)</sup>および示方書算定式においては $K=10$ 、本研究では $K=8.3$ となり、気中疲労試験結果同様、普通強度コンクリートよりも幾分小さな値となった。また、普通強度コンクリート同様、下限応力比が大きくなると200万回圧縮疲労強度は増加する傾向にあり、下限応力比の影響があることがわかる。

図-5に、水中における $S_r/(f_k/f_m - S_{min})$ と $\log N$ の関係を普通強度コンクリートの既報告

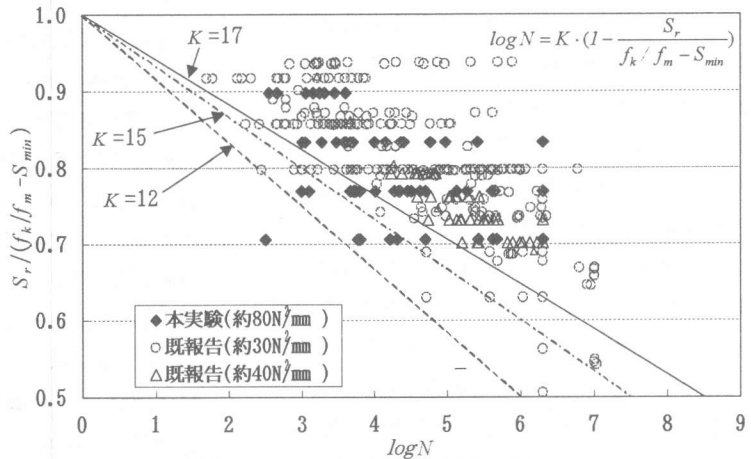


図-3  $S-N$ 関係(気中疲労試験)

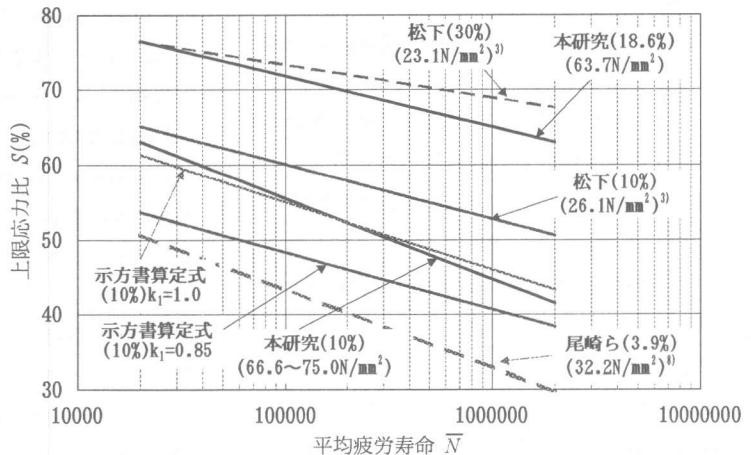


図-4  $S-\bar{N}$ 線図(水中疲労試験)

疲労試験結果<sup>9)</sup>とともに示す。コンクリートの試験強度の変動係数 $\delta$ は既報告疲労試験結果<sup>9)</sup>では $\delta=5.0\%$ 、本研究結果では3配合における変動係数の平均値を採用し、 $\delta=8.0\%$ を用いた。土木学会「コンクリート標準示方書」<sup>1)</sup>におけるコンクリート疲労強度式ではコンクリートの種類・供

試体の乾湿状態によって定まる定数として $K$ の値を普通コンクリートで湿潤状態にある場合10とすることにより、95%以上の生存確率が確保されている(静的強度の変動係数を5%時)。気中疲労試験同様、水中においても高強度コンクリートの疲労寿命は普通強度コンクリートより低下する。 $K$ の値を10に設定すると危険側となるデータが増加するが、全データに対して生存確率95%を確保することができる。しかし、全データに占める高強度コンクリートのデータ数が少ないので、高強度コンクリートの水中疲労強度を求める時の $K$ の値は10より小さく(8程度)することが推奨される。

#### 4. 結論

- (1) 高強度コンクリートの疲労強度は、静的強度比で普通強度コンクリートよりも低下する。この低下は、湿潤状態にある供試体より気乾状態にある供試体の方が著しい。
- (2) 高強度コンクリートの圧縮疲労強度式中の $K$ の値として、気中では12、水中では8程度の値を使用することが推奨される。

#### 参考文献

1) 土木学会：コンクリート標準示方書[平成8年制定]設計編，pp.22～23，1996.3

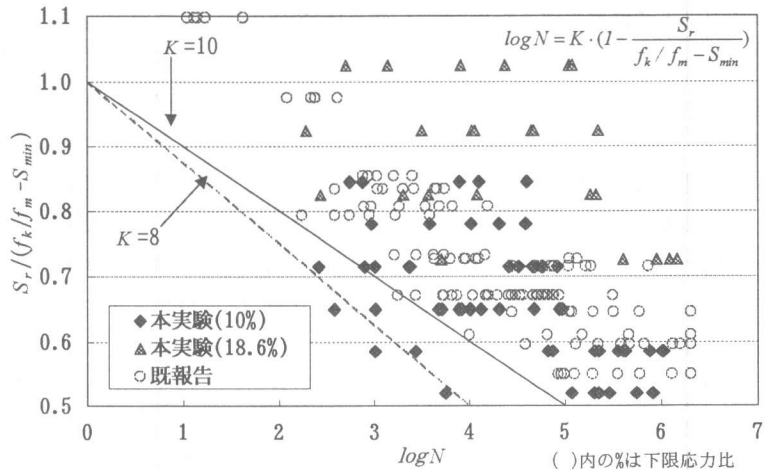


図-5 S-N 関係(水中疲労試験)

- 2) 井上正一：コンクリートの圧縮疲労特性と部材設計への適用に関する基礎的研究，京都大学博士論文，pp.31～53，1985.4
- 3) 松下博通：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，pp.87～95，1980.4
- 4) 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，No.198，pp.107～114，1972.2
- 5) Bennett, E.W. and Muir, S.E. : Some Fatigue tests of high-strength concrete in axial compression, Magazine of Concrete Research, Vol.19, No.59, pp.113～117, Jun. 1967
- 6) Opel, F.S. and Hulsbos, C.L. : Probable Fatigue Life of Plain Concrete with Stress Gradient, Journal of ACI, No.63-2, pp.59～82, Jan. 1966
- 7) Raju, N.K. : Comparative Study of the Fatigue Behavior of Concrete, Mortar, and Paste in Uniaxial Compression, Journal of ACI, No.67-28, pp.461～463, Jun. 1970
- 8) 尾崎 初・志村政雄：水中におけるコンクリートの圧縮疲労強度，土木学会第35回年次学術講演会講演概要集，第5部，pp.293～294，1977.9
- 9) 土木学会：コンクリート構造の限界状態設計法指針(案)，コンクリートライブラリー，Vol.52，pp.292～295，1983.11