

高強度コンクリートの圧縮疲労特性

林宏信¹・高木宣章²・児島孝之²

¹正会員 工修 株式会社ピー・エス(〒100-0005 東京都千代田区丸の内三丁目4番1号新国際ビル)

²正会員 工博 立命館大学教授 理工学部土木工学科(〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

平成8年度土木学会「コンクリート標準示方書」に規定されているコンクリートの疲労強度式は、コンクリートの設計基準強度が 50N/mm^2 を越える場合については十分なデータがないために、疲労強度式の適用範囲は 50N/mm^2 以下と制限されている。本論文は $60\sim 80\text{N/mm}^2$ の高強度コンクリートの圧縮疲労試験を約200本実施し、コンクリートの圧縮強度、環境条件および骨材の種類が疲労性状におよぼす影響について報告する。高強度普通骨材コンクリートの疲労強度は、普通強度を有する普通骨材コンクリートよりも低下する。また、高品質な人工軽量骨材を使用した高強度軽量骨材コンクリートは、従来の軽量骨材コンクリートよりも大きな疲労強度が得られることが明らかとなった。

Key Words : high-strength concrete , fatigue , fatigue strength , lightweight concrete , K

1. はじめに

限界状態設計法は、破壊安全性、使用性、耐疲労性などの構造物に要求されている諸条件を終局限界状態、使用限界状態、疲労限界状態とそれぞれ独立した限界状態として、各限界状態に応じた荷重に対する安全性を確保しようとするものである。土木学会「コンクリート標準示方書」には、この限界状態設計法が昭和61年から採用され、コンクリートの圧縮疲労強度式として式(1)が規定されている。

$$f_{sd} = k_1 f_d (1 - \sigma_p / f_d) (1 - \frac{\log N}{K}) \quad (1)$$

ここに、 f_d : コンクリートの設計強度、 σ_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継続してあるいはしばしば水で飽和される場合および軽量骨材コンクリートの場合は $K=10$ 、その他の場合は $K=17$ 、 k_1 : 永久荷重による強度低下などを考慮する係数で圧縮の場合 $k_1=0.85$

また、高性能 AE 減水剤、シリカフュームあるいは高粉末度の高炉スラグ微粉末などの混和材料を使用したコンクリートの高強度化に関する研究の進展に伴い、通常の締固めと養生により圧縮強度 80N/mm^2 以上の高強度コンクリートが比較的容易に製造できるようになった。平成7年には設計基準強度 $60\sim 100\text{N/mm}^2$ のコンクリートを対象とした「シリカフュームを用いたコンクリートの設計・施工指針(案)」¹⁾が土木学会で作成された。こ

れを受けて平成8年に改訂された土木学会「コンクリート標準示方書・設計編」²⁾では、コンクリートの設計基準強度の上限値として 80N/mm^2 が採用され、高強度コンクリートを用いた部材の設計ができるようになった。

しかし、 50N/mm^2 を越える高強度コンクリートの疲労に関する試験データが非常に少ないので、土木学会「コンクリート標準示方書」の圧縮疲労強度式(式(1))の適用範囲は 50N/mm^2 以下と規定されている。また、設計基準強度が 60N/mm^2 以上の高強度コンクリートでは、構造物強度と供試体強度の差が高強度になるにしたがい大きくなるので、設計基準強度が 60N/mm^2 を越える場合には終局限界状態および疲労限界状態におけるコンクリートの材料係数(γ_c)を土木学会「コンクリート標準示方書」では1.5を採用している。

圧縮強度が約 70N/mm^2 の高強度コンクリートに連続繊維棒材を緊張材として用いたPCはりの気中疲労試験では、すべて棒材破断により破壊したが、水中では圧縮部コンクリートの圧縮疲労強度が大きく低下し、PCはりの疲労寿命の低下が著しいことも報告されている³⁾。

また、構造物の高層化、長大化に伴い、コンクリートの高強度化、軽量化が進んでいる中で高品質な人工軽量骨材が開発されるようになった⁴⁾。しかし、普通骨材を用いた高強度コンクリートあるいは人工軽量骨材を用いた高強度コンクリートの疲労に関する実験データはほとんどないのが現状である。

このように、高強度コンクリートを用いた疲労性状は

表-1 コンクリートの示方配合

シリーズ	W/(C+SF) (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					混和剤(kg/m ³)	AE 助剤 (A)**
			W	C	SF*	S	G		
I	40	46	176	440	—	788~789	954~955	C×(0.8~1.2)%	—
II	30	48	160	479.7	53.3	780	392	(C+SF)×1.2%	2

注) * シリカフュームは結合材(C+SF)質量に対して内割で10%とした。

** AE 助剤の2%希釈液を結合材 1kg あたり 2cc 使用する時を 1A とする。

表-2 使用材料

	シリーズ I	シリーズ II
セメント	普通ポルトランドセメント 比重 3.16 早強ポルトランドセメント 比重 3.14	早強ポルトランドセメント 比重 3.14
シリカフューム	—	ノルウェー産粉体 比重 2.20 SiO ₂ =92.3%
細骨材	野洲川産川砂 比重 2.62 F.M.2.55~2.81	
粗骨材	高槻産硬質砂岩砕石 6号砕石 比重 2.69 吸水率 0.78% F.M.6.38 MS=13mm 40t 破砕値 10.8% 原石(φ10×20cm)の動弾性係数 92.9kN/mm ²	原料:真珠岩 製造方法:回転造粒型 絶乾比重 1.08 表乾比重 1.11 F.M.6.58 24 時間吸水率 1.88% MS=15mm 骨材の圧壊荷重 1kN 以上 ⁹⁾
混和剤	高性能減水剤: β-ナフタリンスルホン酸系	高性能 AE 減水剤: カルボキシル基含有ポリエーテル系 AE 助剤:アニオン系界面活性剤

不明な点が多い。したがって、本研究では気中および水中で一定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、環境条件および骨材の種類が疲労性状におよ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

(1) 実験計画

本研究は、圧縮強度 60~80N/mm² の高強度コンクリートを作製し、圧縮疲労試験を約 200 本実施した。実験要因としては粗骨材の種類(砕石、軽量骨材)および試験環境条件(気中、水中)の 2 要因とし、既報告疲労試験結果⁵⁾と比較検討した。

(2) 試験供試体

本研究に用いたコンクリートの示方配合を表-1に、使用材料を表-2に示す。シリーズ I は、細骨材として川砂、粗骨材として砕石を使用し、気乾状態における単位容積質量は 2.51t/m³ の普通骨材コンクリートである。シリーズ II は、細骨材には川砂、粗骨材に回転造粒型の人工軽量骨材を使用した第 1 種軽量骨材コンクリートである。気乾状態における単位容積質量は 1.82t/m³、湿潤状態における単位容積質量は 1.86t/m³ であった。シリーズ II で使用した人工軽量粗骨材は、焼成過程で一度焼結して発泡させているために、骨材内部は微細な独立気孔で均質に形成されている。そのため、比重が同じ他の軽

量骨材に比較して 24 時間吸水率が約 2% と小さく、強度が大きい(骨材の圧壊荷重 1kN 以上)高品質な人工軽量骨材である⁶⁾。

供試体はすべて φ7.5×15cm の円柱供試体とした。普通骨材コンクリートの練り混ぜは強制練りミキサーを使用し、打込みは 2 層とし、各層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 分間型枠を叩き締固めた。また、軽量骨材コンクリートの練り混ぜは、強制練りミキサーを使用し、2 層詰めで各々 15 秒間テーブルバイブレーターで振動を与え締固めた。なお、人工軽量骨材は 24 時間吸水させた後、布で表面水をふき取って表面乾燥飽水状態にしたものを使用した。

これらの供試体は、打設翌日に脱型し、1 週間標準水中養生、その後圧縮疲労試験を実施するまで高温恒温恒湿室(20±1°C, RH=90±5%)で保管した。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。なお、水中静的圧縮強度試験供試体および水中疲労試験供試体は、試験前約 7 日間標準水中養生した後に載荷試験を実施した。

(3) 実験方法

圧縮疲労試験は、実験室内の気中・水中の 2 環境で行った。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。疲労試験条件を表-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。静的強度は、各打設ことから任意に 4 本以上抽出した供試体の試験結果の平均値である。材齢 28 日および疲労試

表-3 疲労試験条件

シリーズI (普通骨材コンクリート)					シリーズII (軽量骨材コンクリート)				
環境	S_{max}	S_{min}	本数	残存強度比	環境	S_{max}	S_{min}	本数	残存強度比
気中	65	10	17	9 [†] : 0.76-1.12	気中	65	10	5	4 [†] : 0.91-1.09
	70		21	2 [†] : 1.08-1.21		70		7	1 [†] : 0.77
	75		18	1 [†] : 0.58		75		7	1 [†] : 0.92
	80		8			55		5	2 [†] : 0.92-1.04
水中	45	10	6	1 [†] : 1.00	水中	60	10	8	
	50		7			65		8	
	55		12			70		8	
	60		13						
	65	13							
	70	5							
	75	5							
	68.2	18.6	5						
	75.0		6						
	81.8		7						

$S_{max}(\%) = [(上限応力) / (各々の環境条件での静的強度)] \times 100$
 $S_{min}(\%) = [(下限応力) / (各々の環境条件での静的強度)] \times 100$
 残存強度比 = (200万回繰返し回数後の静的強度) / (各々の環境条件での静的強度)
[†] 200万回で破壊しなかった供試体数を示す

表-4 静的強度試験結果

	材齢28日		疲労試験時		φ7.5×15cm 単位: N/mm ² CV: 変動係数(%)
	圧縮強度	静弾性係数	気乾状態における静的	湿潤状態における静的	
			圧縮強度(CV)	圧縮強度(CV)	
シリーズI	49.6~73.5 3.94~4.13×10 ⁴		79.8(7.3%) 4.46×10 ⁴	68.4(8.1%) 4.62×10 ⁴	
シリーズII	62.4 2.66×10 ⁴		62.8(10.1%) 2.73×10 ⁴	65.6(5.7%) 2.73×10 ⁴	

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。

圧縮疲労試験は正弦波による部分片振載荷とし、疲労試験機が追隨できる範囲内(5~10Hz)で、できるだけ大きい載荷速度を採用した。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。

ここに、
$$\phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t \exp(-\frac{1}{2}\xi^2) d\xi$$

$$\xi = \frac{X - \bar{X}}{\sigma}, \quad X = \log N,$$

$$\bar{X} : X \text{ の平均値}, \quad \sigma : X \text{ の標準偏差}$$

ここで、式(2)の生存確率 $P(N)$ は式(3)で表される。

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

3. 疲労試験結果および考察

(1) 疲労試験結果

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^{7,8)}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。

各上限応力比におけるコンクリートの疲労寿命(N)の分布が式(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。

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

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 $N(P)=N$ 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。

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

表-5、表-6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ある。ここで、200万回の繰返し載荷で破壊しなかった供試体の疲労寿命は $N=200$ 万回として処理した。この方法で平均疲労寿命を求めると安全側の小さな値となる。

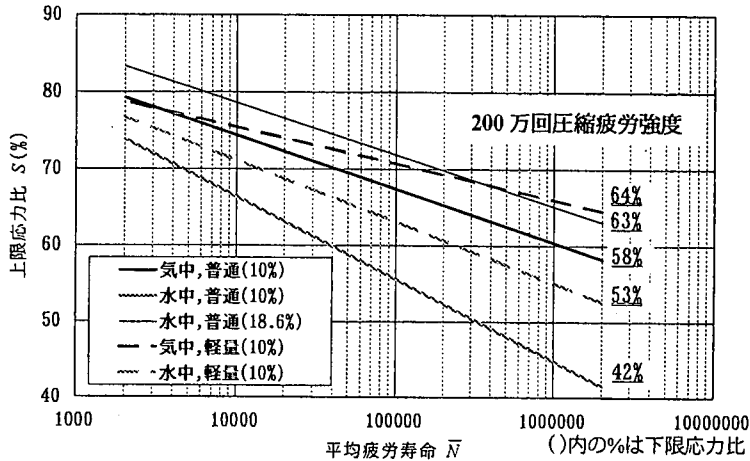


図-1 $S-\bar{N}$ 曲線

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、表-6の回帰式の生存確率50%($t=0$)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-7に $S-\bar{N}$ 曲線式を示す。

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-7の $S-\bar{N}$ 曲線式にこれを代入して200万回圧縮疲労強度を求めた。本研究の200万回圧縮疲労強度は、シリーズIの普通骨材コンクリートの気中では58%、水中では下限応力比が10%のとき42%、下限応力比が18.6%のとき63%となった。また、シリーズIIの軽量骨材コンクリートの気中では64%、水中では53%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、普通骨材コンクリートで16%の低下、軽量骨材コンクリートで11%低下した。

(2) 気乾状態における高強度普通骨材コンクリートの疲労寿命

普通骨材を用いた普通強度から高強度にわたるコンクリートを対象とした気中疲労試験における $S-\bar{N}$ 曲線を図-2に、各研究者による $S-\bar{N}$ 曲線式と200万回圧縮疲労強度を表-8に示す。図-2と表-8には、高強度軽量骨材コンクリートのデータも示している。

各研究者によって試験条件は若干異なるが、普通強度を有する普通骨材コンクリートで下限応力比が10%程度での200万回圧縮疲労強度は、圧縮強度が約 30N/mm^2 を対象とした試験結果では約65~70%、圧縮強度が約 40N/mm^2 を対象とした試験結果では約60~65%の範囲にある。そして、約 80N/mm^2 を対象とした本研究のシリーズIでは58%となった。コンクリートの静的強度の増

表-5 シリーズI(普通骨材コンクリート)の回帰分析

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		$t = -6.680 \log N + 41.27$
	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	$t = -0.613 \log N + 3.369$	
	75.0	18.6	$t = -0.661 \log N + 2.639$
	81.8		$t = -0.770 \log N + 3.136$

表-6 シリーズII(軽量骨材コンクリート)の回帰分析

環境	$S_{max}(\%)$	$S_{min}(\%)$	回帰式
気中	65	10	$t = -3.016 \log N + 18.76$
	70		$t = -0.603 \log N + 2.812$
	75		$t = -0.535 \log N + 2.428$
水中	55		$t = -0.834 \log N + 4.612$
	60		$t = -2.641 \log N + 15.30$
	65		$t = -1.197 \log N + 5.561$
	70	$t = -2.133 \log N + 9.203$	

表-7 $S-\bar{N}$ 曲線式

	環境	$S_{min}(\%)$	$S-\bar{N}$ 曲線式
シリーズI	気中	10	$S = -7.018 \log \bar{N} + 102.385$
			$S = -10.781 \log \bar{N} + 109.397$
	水中		$S = -6.749 \log \bar{N} + 105.516$
シリーズII	気中	10	$S = -4.777 \log \bar{N} + 94.594$
	水中		$S = -8.061 \log \bar{N} + 103.366$

表-8 普通骨材コンクリートの $S-\bar{N}$ 曲線と 200 万回圧縮疲労強度

環境	研究者	供試体の形状	静的強度 (N/mm ²)	載荷速度 (Hz)	供試体本数	S_{min} (%)	S_{max} (%)	$S-\bar{N}$ 曲線式	200 万回疲労強度
気中	井上 ⁷⁾	円柱	24.5~42.2	5	135	10	72~80	$S = -4.395 \log \bar{N} + 97.506$	69.8%
	松下 ⁸⁾	円柱	16.1~31.2	5	100	8	75~85	$S = -5.2631 \log \bar{N} + 100.00$	66.8%
	阪田 ¹⁰⁾	円柱	22.8	5	33	8.6	65~80	$S = -5.236 \log \bar{N} + 101.571$	68.3%
	Bennett ¹¹⁾	角柱	39.3~63.4	4~8	45	14~22	53~100	$S = -4.292 \log \bar{N} + 92.704$	65.7%
	Ople ¹²⁾	角柱	41.4	8.3	52	10	65~80	$S = -5.4951 \log \bar{N} + 100.00$	65.4%
	Raju ¹³⁾	角柱	41.3	3.2	31	5	65~85	$S = -6.369 \log \bar{N} + 102.548$	62.4%
	本研究	円柱	74.6~84.8	5~10	64	10	60~80	$S = -7.018 \log \bar{N} + 102.385$	58.2%
	本研究*	円柱	62.8	8~10	19	10	65~75	$S = -4.777 \log \bar{N} + 94.594$	64.5%
水中	松下 ⁹⁾	円柱	20.7~36.1	5	43	10	55~75	$S = -7.246 \log \bar{N} + 95.942$	50.6%
	23.1		5	23	30	70~85	$S = -4.673 \log \bar{N} + 95.701$	66.3%	
	尾崎 ¹⁴⁾	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	61	10	45~65	$S = -10.781 \log \bar{N} + 109.39$	41.5%
			63.7	5~10	18	18.6	68.2~81.8	$S = -6.749 \log \bar{N} + 105.516$	63.0%
	本研究*	円柱	65.6	8~10	29	10	55~70	$S = -8.061 \log \bar{N} + 103.366$	52.6%

* : 高強度軽量骨材コンクリート

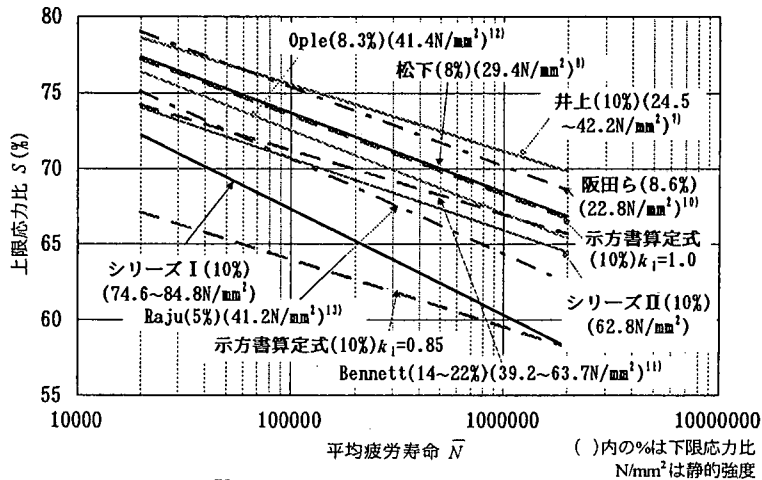


図-2 $S-\bar{N}$ 曲線 (普通骨材コンクリート, 気中疲労試験)

加にともなって, 200 万回圧縮疲労強度は徐々に低下する傾向にある。200 万回圧縮疲労強度が大きく低下した高強度コンクリートでは, $S-\bar{N}$ 曲線式の勾配は普通強度コンクリートよりも幾分急になった。

図-3に, 普通骨材コンクリートの気中疲労試験における $S_k / (f_k / f_m - S_{min})$ と $\log \bar{N}$ の関係を示す。ここに, S_k : 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 : コンクリートの試験強度。 f_k / f_m は式(5)で求められる。

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

ここに, δ : コンクリートの試験強度の変動係数

表-9 コンクリートの圧縮強度の変動係数

	シリーズ I	シリーズ II	既報告試験結果 ⁹⁾
気中	7.5%	10.0%	5.0%
水中	8.0%	5.5%	5.0%

注) 疲労破壊に対するコンクリートの生存確率算定時に使用

圧縮疲労試験時におけるコンクリートの圧縮強度の変動係数(δ)を表-9に示す。既報告試験結果⁹⁾では $\delta = 5.0\%$, 本研究のシリーズ I では各打設ごとの変動係数の平均値を採用し $\delta = 7.5\%$ を用いた。

コンクリートの疲労寿命は同一条件下であっても大

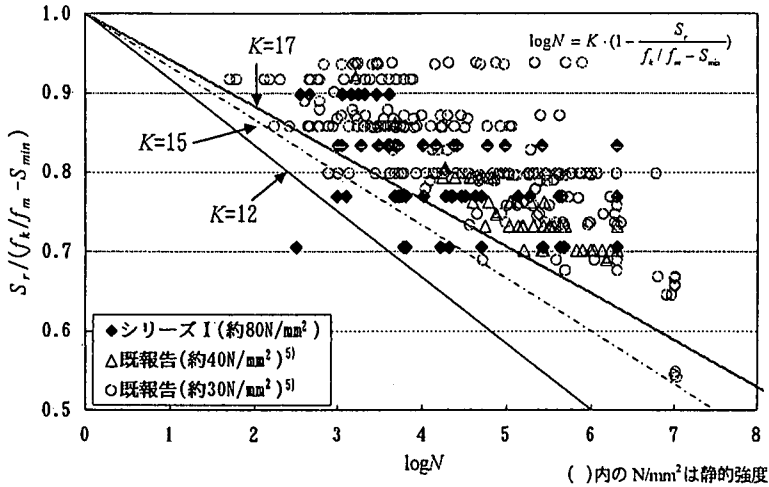


図-3 $S_r/(f_k/f_m-S_{min})$ と $\log N$ の関係(普通骨材コンクリート, 気中疲労試験)

大きく変動する。これは、疲労破壊特有の性質あるいは静的強度のばらつきに起因するものと考えられている。したがって、現状では疲労強度の特性値を過去の実験データの大部分を安全側(生存確率95%以上)に包括する値にすることが望ましい⁵⁾。一般に、コンクリートの種類・供試体の乾湿状態によって定まる疲労強度式中の定数 K は、次のようにして求められている。 $S-\bar{N}$ 曲線式から得られた K を使用したとき生存確率(起過確率)が95%以上であればその値を採用し、95%以下であれば、生存確率が95%以上になるように低減した K の値が採用されている¹⁵⁾。過去の気乾状態における普通強度コンクリートデータの $S-\bar{N}$ 曲線式の勾配より K を求めると $K=17$ となる。この値を用いると生存確率が95%以上になるので土木学会「コンクリート標準示方書」の圧縮疲労強度式に $K=17$ が採用されている^{9), 15)}。本研究では、 $S-\bar{N}$ 曲線式の勾配から K を求めるとシリーズIの場合は $K=12.8$ となり、土木学会の圧縮疲労強度式よりかなり小さな値となった。高強度コンクリートでは $K=17$ にすると、図-3に示すように疲労強度式を下回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生存確率95%を保証することができる。高強度コンクリートのみを対象とした場合、 K の値として $S-\bar{N}$ 曲線式の勾配から求めた12を採用することにより生存確率95%を保証することができる。

(3) 湿潤状態における高強度普通骨材コンクリートの疲労寿命

普通骨材コンクリートの水中疲労試験における $S-\bar{N}$ 曲線を図-4に、各研究者による $S-\bar{N}$ 曲線式と200万回圧縮疲労強度を表-8に示す。図-4には、高強度軽量骨材コンクリート(シリーズII)のデータも示している。各研究者によって試験条件は若干異なるが、普

通強度を有する普通骨材コンクリートで下限応力比が10%程度の200万回圧縮疲労強度は、静的強度が約25N/mm²を対象とした場合には約50%、約70N/mm²を対象とした高強度コンクリートでは約40%となり、普通強度コンクリートより10%低下している。過去の研究報告データから疲労破壊に対して生存確率が95%以上になるように、 $S-\bar{N}$ 曲線の勾配から求めた $K=11.5$ を低減した $K=10$ の値が土木学会「コンクリート標準示方書」の圧縮疲労強度式に採用されている^{9), 15)}。本研究では、 $S-\bar{N}$ 曲線の勾配から K を求めるとシリーズIで下限応力比が10%の場合は $K=8.3$ となり、土木学会の圧縮疲労強度式の値より幾分か小さな値となった。

図-5に、普通骨材コンクリートの水中疲労試験における $S_r/(f_k/f_m-S_{min})$ と $\log N$ の関係を示す。ここで、 f_k/f_m は式(5)より求めたものである。圧縮疲労試験時のコンクリート圧縮強度の変動係数を表-9に示す。既報告試験結果⁵⁾では $\delta=5.0\%$ 、本研究では各打設ごとの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」の圧縮疲労強度式では、 K の値を普通強度コンクリートで湿潤状態にある場合には $K=10$ としている(生存確率95%、静的強度の変動係数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も低下する。 K の値を10にすると高強度コンクリートでは疲労強度式を下回るデータが増加するが、普通強度から高強度までの全データに対して生存確率95%を保証することができる。しかし、高強度コンクリートのみのデータについて生存確率95%を確保するためには、 $S-\bar{N}$ 曲線式の勾配から求めた $K=8$ まで小さくすることが必要である。

(4) 軽量骨材コンクリートの疲労寿命

各研究者による軽量骨材コンクリートの $S-\bar{N}$ 曲線式と200万回圧縮疲労強度を表-10、 $S-\bar{N}$ 曲線を図-6

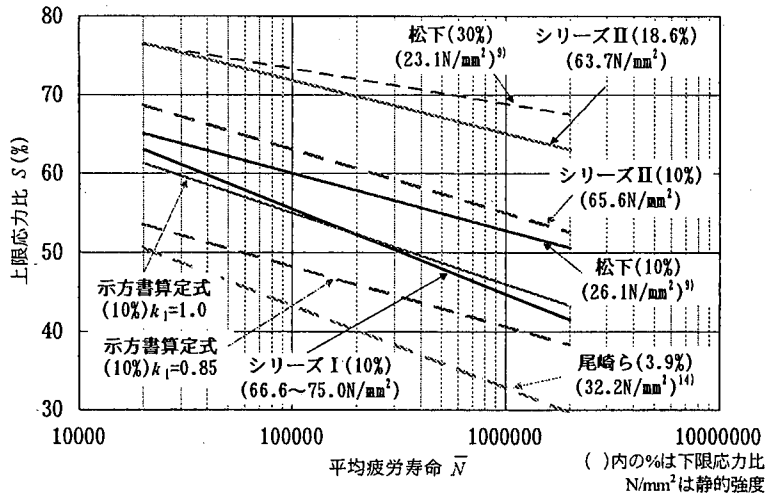


図-4 S-N 曲線 (普通骨材コンクリート, 水中疲労試験)

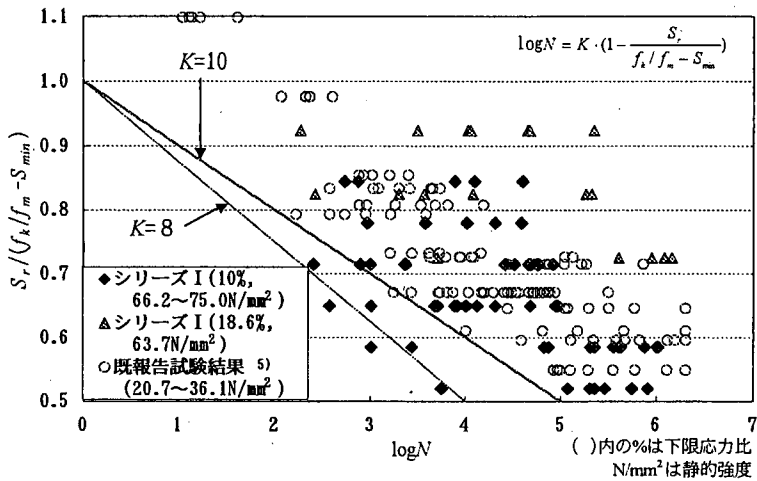


図-5 $S_r/(f_k/f_m - S_{min})$ と $\log N$ の関係 (普通骨材コンクリート, 水中疲労試験)

に示す。各研究者によって試験条件は若干異なるが、気中における軽量骨材コンクリートの200万回圧縮疲労強度は、普通強度を対象とした既報告疲労試験結果^{10),16)~18)}の平均で約56%、高強度を対象とした本研究では、普通強度のものよりも約8%大きく、64%となった。また、水中での200万回圧縮疲労強度は53%となり、気中における軽量骨材コンクリートの既報告疲労試験結果とほぼ同程度となった。本研究の気中および水中疲労試験結果は、土木学会「コンクリート標準示方書」の圧縮疲労強度式($k_1=1.0$ 時)よりも大きな値となった。既報告疲労試験結果を基にしたS-N曲線式の勾配より定まる定数Kは $K=12^{15)}$ 、本研究の気中疲労試験結果では $K=18.8$ 、水中疲労試験結果では $K=11.2$ となった。

軽量骨材コンクリートの $S_r/(f_k/f_m - S_{min})$ と $\log N$ の関係を既報告疲労試験結果⁵⁾とともに図-7に示す。ここで、 f_k/f_m は式(5)より求めたものである。コンクリートの変動係数(δ)は、既報告疲労試験結果⁵⁾で $\delta=5.0\%$ を、本研究

結果は気中疲労試験で $\delta=10.0\%$ 、水中疲労試験で $\delta=5.5\%$ を用いた。土木学会「コンクリート標準示方書」の圧縮疲労強度式では、Kの値を軽量骨材コンクリートの場合 $K=10$ としている(生存確率95%、静的強度の変動係数5%時)。

高強度を対象とした本研究の気中疲労試験結果の変動は大きいものの、Kの値として10を採用した場合、気中疲労試験のすべての供試体は疲労強度式をかなり上回る値となる。個々の疲労寿命を既報告試験結果と比較した場合、疲労寿命が短い供試体においても $S_r/(f_k/f_m - S_{min})$ が同程度ならば、本研究の疲労試験結果は約1オーダー疲労寿命が延びている。また、水中疲労試験結果においても同様な結果となっており、1つの供試体を除いて $K=10$ のときの疲労強度式を上回る。普通強度から高強度にわたる軽量骨材コンクリート全データに対して生存確率95%を確保するためには、高強度軽量骨材コンクリートのデータ数が少ないので従来通り $K=10$ となる。しかし、

表-10 軽量骨材コンクリートの $S-\bar{N}$ 曲線式と200万回圧縮疲労強度

環境	研究者	供試体の形状	静的強度 (N/mm ²)	载荷速度 (Hz)	供試体本数	S_{min} (%)	S_{max} (%)	$S-\bar{N}$ 曲線式	200万回疲労強度
気中	阪田ら ¹⁰⁾	円柱	24.5	5	49	8	50~80	$S = -7.407 \log \bar{N} + 97.037$	50.4%
	Gray ¹⁶⁾	円柱	25.9	16.7	25	1.9~4.3	40~80	$S = -8.475 \log \bar{N} + 110.822$	57.4%
			43.5~43.9	16.7	22	2~2.7	40~80	$S = -9.434 \log \bar{N} + 116.783$	57.3%
	都築ら ¹⁷⁾	角柱	51.4	8.3	18	6~6.5	60~65	$S = -4.049 \log \bar{N} + 82.996$	57.5%
	浜田ら ¹⁸⁾	角柱	40.4	8.3	26	10	60~65	$S = -4.167 \log \bar{N} + 84.583$	58.3%
本研究	円柱	62.8	8~10	19	10	65~75	$S = -4.777 \log \bar{N} + 94.594$	64.5%	
水中	本研究	円柱	65.6	8~10	29	10	55~70	$S = -8.061 \log \bar{N} + 103.366$	52.6%

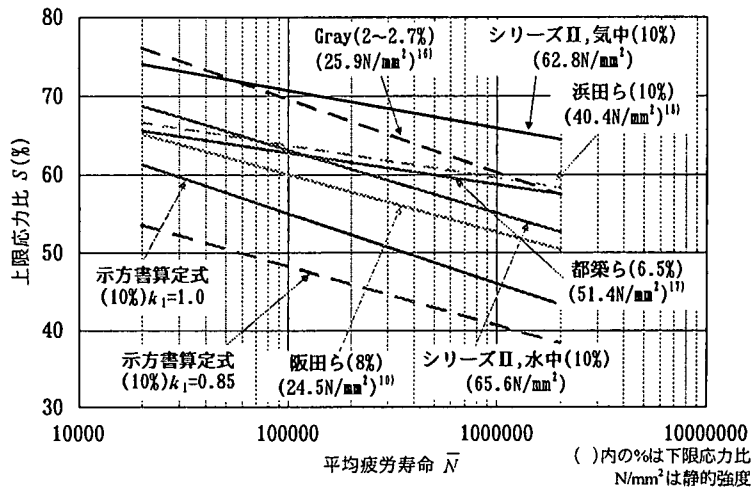


図-6 $S-\bar{N}$ 曲線 (軽量骨材コンクリート)

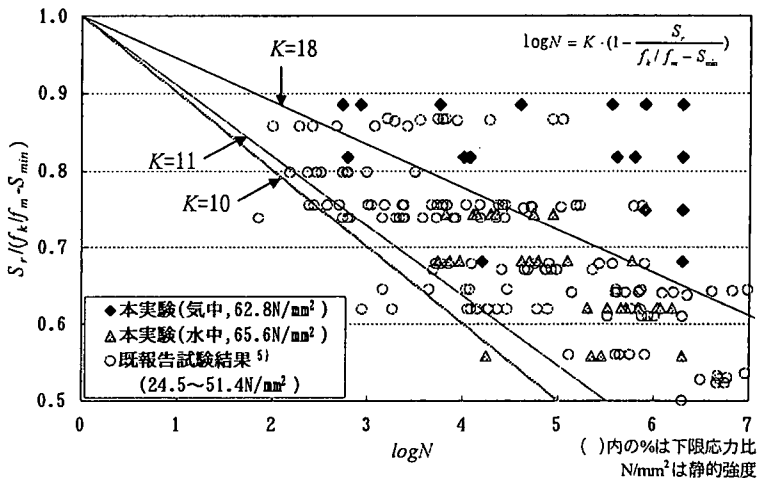


図-7 $S_r / (f_k / f_m - S_{min})$ と $\log N$ の関係 (軽量骨材コンクリート)

高強度軽量骨材コンクリートのみのデータに対しては、気中の場合 $K=18$ 、水中の場合 $K=11$ で95%の生存確率を保証することができる。したがって、吸水率が小さく、骨材強度の大きい高品質な人工軽量骨材を粗骨材として使用した場合、疲労強度は大きくなり、普通骨材コンク

リートと同等な疲労強度が得られるものと考えられる。高強度コンクリートの気中および水中疲労試験における $S_r / (f_k / f_m - S_{min})$ と $\log N$ の関係を各々図-8と図-9に示す。比較のために普通強度を有する普通骨材コンクリートの既報告疲労試験結果³⁾もプロットしている。こ

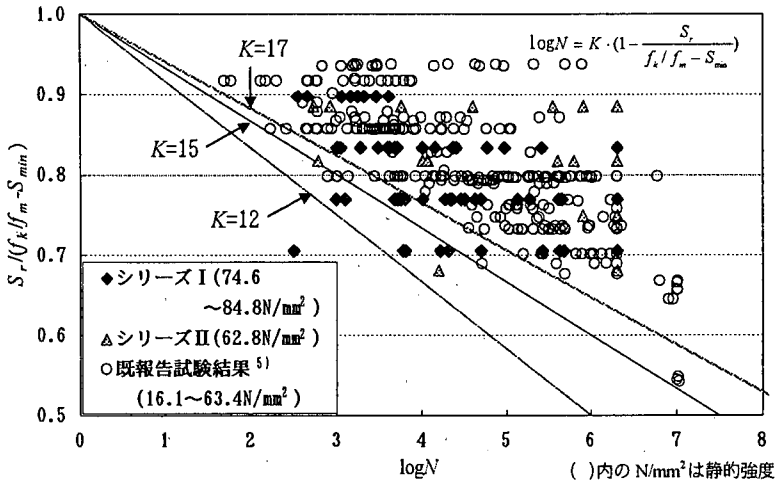


図-8 $S_r/(f_k/f_m - S_{min})$ と $\log N$ の関係 (高強度コンクリート, 気中疲労試験)

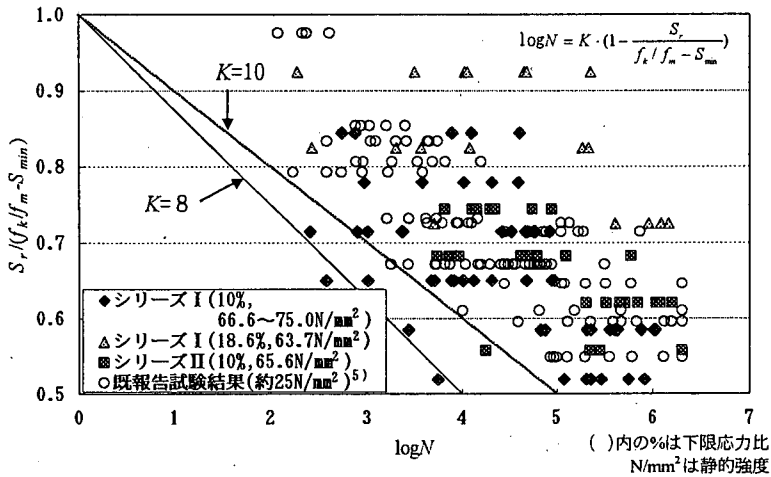


図-9 $S_r/(f_k/f_m - S_{min})$ と $\log N$ の関係 (高強度コンクリート, 水中疲労試験)

で、 f_k/f_m は式(5)より求めたものである。コンクリートの圧縮強度の変動係数は、表-9の値を採用している。

高強度コンクリートの圧縮疲労強度は、使用する粗骨材の種類と品質および試験環境の大きな影響を受ける。粗骨材として碎石を使用した普通骨材コンクリートでは、圧縮強度が $65 \sim 85 \text{ N/mm}^2$ と高強度になると気中および水中における圧縮疲労強度は普通強度コンクリートより低下する。しかし、吸水率が小さく、骨材強度の大きい高品質の軽量粗骨材を使用する場合には、圧縮強度が約 60 N/mm^2 と高強度になっても普通強度を有する普通骨材コンクリートと同等な気中および水中における圧縮疲労性能が得られる。

現行の土木学会「コンクリート標準示方書」では、設計基準強度が 50 N/mm^2 を越える場合については十分なデータがないのでコンクリートの圧縮疲労強度式の適用範囲が 50 N/mm^2 と制限されている。本研究の高強度普通

骨材コンクリートでは、疲労強度式中の K の値として、気中で12、水中で8を採用することにより95%以上の生存確率を確保することができることを明らかにした。そこで、これらの K の値を使用することにより、高強度普通骨材コンクリートの疲労設計を行うことができるものと考えられる。

普通強度を対象としている現行の軽量骨材コンクリートの疲労強度式には環境条件の影響が考慮されていない。しかし、高強度軽量骨材コンクリートにおいても、水中疲労強度は気中疲労強度より低下する。高品質の軽量骨材を用いた高強度軽量骨材コンクリートは、気中および水中においても普通強度を有する普通骨材コンクリートと同等の圧縮疲労強度を有するので、疲労強度式中の K の値としては、気中で17、水中で10を使用しても十分な安全性を確保することができるものと考えられる。

4. 結論

本研究は、一定繰返し応力を受ける高強度コンクリートの圧縮疲労性状へ及ぼす骨材の種類、試験環境条件の影響について論じたものである。本研究より明らかになった点を以下に示す。

- (1) 高強度普通骨材コンクリートの圧縮疲労強度は、普通強度コンクリートより低下する。普通骨材を用いた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。
- (2) 吸水率が小さく、骨材強度の大きい高品質の軽量粗骨材を用いた高強度軽量骨材コンクリートの圧縮疲労強度は、気中および水中においても普通強度を有する普通骨材コンクリートとほぼ同等な性能が得られた。つまり、約 60N/mm^2 の圧縮強度を有する高強度軽量骨材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 17、水中では 10 を使用しても差し支えない。
- (3) 軽量骨材コンクリートの圧縮疲労強度は、環境条件およびコンクリート強度はもちろんのこと、使用する軽量骨材の品質（吸水率、強度）により大きな影響を受ける。そこで、圧縮疲労強度式中の K の値の決定に際しては、特に、軽量骨材の品質の影響を考慮することが必要である。

参考文献

- 1) 土木学会：シリカフェームを用いたコンクリートの設計・施工指針(案)，コンクリートライブラリー，Vol.80，1995。
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書[平成 8 年制定]設計編，1996。
- 3) 水田崇志，児島孝之，高木宣章，松尾真紀：連続繊維棒材を緊張材とした PC はりの水中疲労性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17，No.2，pp.983-988，1995。
- 4) 岡本享久，早野博幸，柴田辰正：超軽量コンクリート，コンクリート工学，Vol.36，No.1，pp.48-52，1998。
- 5) 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。

- 6) 岡本享久，石川雄康，笹嶋晶男，棚木隆，早野博幸：超軽量コンクリート，日本材料学会関西支部，最新コンクリート技術—高性能・資源の有効利用をめざして—，pp.142-159，1998。
- 7) 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。
- 8) 松下博通，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，pp.127-138，1979。
- 9) 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。
- 10) 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。
- 11) 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, 1967.
- 12) 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, 1966.
- 13) 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, 1970.
- 14) 尾崎昶，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。
- 15) 松下博通，高倉克彦：限界状態設計法におけるコンクリートの疲労強度の特性値とせん断疲労耐力の設計用値，コンクリート工学，Vol.22，No.8，pp.14-28，1984。
- 16) Gray, W.H., McLaughlin, J.F. and Antrim, J.D.: *Fatigue properties of lightweight aggregate concrete*, *Journal of ACI*, Vol.58, pp.149-162, 1961.
- 17) 都築和夫，成岡昌夫：コンクリートの圧縮疲労に関する研究，セメント技術年報 25，pp.291-295，1971。
- 18) 浜田純夫，成岡昌夫：軽量コンクリートの圧縮疲労強度に関する一実験，土木学会論文報告集，第 176 号，pp.83-88，1970。

(1999.3.24 受付)

FATIGUE CHARACTERISTICS OF HIGH-STRENGTH CONCRETE IN COMPRESSION

Hironobu HAYASHI, Nobuaki TAKAGI and Takayuki KOJIMA

In this study, compressive fatigue tests of totally about 200 high-strength concrete specimens with about $60\text{-}80\text{N/mm}^2$ of compressive strength were carried out, in order to investigate the effects of compressive strength of concrete, test environment and type of coarse aggregate on the fatigue characteristics in compression. The fatigue strength of high-strength concrete decreased when compared with that of normal strength concrete with normal aggregate. On the other hand it was almost same as that of normal strength concrete with normal aggregate, when high-quality artificial lightweight aggregate was used as the course aggregate.