

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

A STUDY ON COMPRESSIVE FATIGUE STRENGTH OF
CONCRETE IN THE WATER

松 下 博 通*

By Hiromichi MATSUSHITA

1. ま え が き

コンクリートの圧縮強度は、たとえ同一条件で打設養生されたものであっても、試験時に気乾状態にしたものの強度が、湿潤状態のまま試験したものの強度より大きい。これは、コンクリートの内部に含まれる水分が、その破壊過程に影響し、力学的性質を変化させるためと考えられる。

近年、海洋コンクリート構造物や河川コンクリート構造物の発達はめざましいものがあるが、これらのコンクリートは、常に、あるいは非常にしばしば湿潤状態にさらされており、その安全性の検討にはこのことを考慮しなければならない。また、これらの構造物は、波力あるいは流水圧などの繰り返し荷重を受けるため、疲労強度についても検討する必要がある。

筆者は先に、気乾状態のコンクリートの疲労試験を行い、その寿命分布、疲労強度について報告したが¹⁾、湿潤状態、特に水で飽和されている状態のコンクリートの疲労強度は、静的強度と同様に、空気中における場合とは異なってくるのが考えられる。

しかしながら水で飽和された状態、すなわち水中で繰り返し荷重を受けるコンクリートの性状に関する報告は数少なく、岡田ら²⁾のコンクリートの含水量が繰り返し耐力に影響を及ぼすという報告や、田ら³⁾のモルタルの水中での疲労強度が気乾状態のそれより低いという報告しかみあたらない。しかもこれらの 2 例の報告は、いずれも変形特性を重視した低サイクル繰り返しによる試験結果であり、水中における高サイクル疲労試験に関する報告は皆無といってよい。

よって、水中におけるコンクリートの高サイクル疲労試験を行い、その寿命分布、疲労強度を求め、空気中における気乾状態のコンクリートの試験結果と比較検討し

てみた。ここにその結果を報告する。なお本論文では、常に水で飽和された状態および気乾状態のコンクリートを比較する意味で、それぞれの状態を略して水中および空中と表現している。

2. 疲労試験方法

(1) 試験供試体

供試体は $\phi 7.5 \times 15$ cm 円柱供試体で、普通コンクリートで作製した。

使用したセメントは、A社製普通ポルトランドセメントで、その比重は 3.16 である。細骨材には福岡県遠賀郡で採取される海砂(表乾比重 2.59, 吸水率 1.1%, 粗粒率 2.73)を、粗骨材には福岡県粕屋郡久山町産出の角閃岩碎石 2005(表乾比重 2.95, 吸水率 1.0%, 20~10 mm : 10~5 mm = 6 : 4)を使用した。コンクリートの配合は、表-1 に示す 3 種である。

表-1 コンクリートの配合

配合 番号	スランブ の 範囲 (cm)	粗骨材 最大寸法 (mm)	W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m ³)			
					W	C	S	G
I	6±1	20	70	44	180	259	832	1162
II	6±1	20	63	45	189	300	824	1218
III	6±1	20	50	42	180	360	743	1166

コンクリートは、可傾式ミキサーにより、全材料投入後 3 分間練り混ぜ、 $\phi 7.5 \times 15$ cm 型枠に 2 層に分けて打込み、各層 6 回ずつ突き棒で突き、パイプレーターで締固めた。供試体は打設 24 時間後にセメントペーストキャッピングを行い、48 時間後に脱型、以後標準養生室(室温 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、湿度 95% 以上)内で湿空養生を行った。

コンクリートは数回に分けて打設し、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、静的圧縮強度を求め、残りの供試体を疲労試験に供した。

* 正会員 工修 九州大学講師 工学部土木工学科

試験時のコンクリート材令は3か月以上の長期材令を原則とした。これは、疲労試験が長期間を必要とするため、試験期間中のコンクリート強度増進の影響を避けるためである。また、各供試体は、試験に供する10日前には水浸させ、試験時においてコンクリート内部が完全に飽水状態にあるようにした。

(2) 荷重応力および荷重方法

疲労試験に先立って、水中に保存されていた供試体の各グループより任意に抽出した5本の供試体で水中圧縮試験を行い、コンクリートの水中静的圧縮強度を求めた。この水中静的圧縮強度をもとにして、繰り返し応力の最小応力をその10%, 30%, 50%の3種選び、最大応力を、その55~85%で定め、水中圧縮疲労試験を実施した。試験条件をまとめて表-2に示す。

繰り返し応力荷重は、写真-1に示すように底面が鋼板、側面がアクリル板で作製された容器に水を満たした中でを行い、試験機には鳥津製作所製サーボパルサー

表-2 疲労試験条件

グループ	配合番号	材令(月)	供試体本数		静的圧縮強度		繰返し応力比(%)	繰返し応力(kg/cm ²)
			静的	疲労	平均値(kg/cm ²)	変動係数(%)		
A	I	9	5	10	211	2.7	10~65	21~137
B	II	3	5	2	275	5.2	10~65	28~179
C	III	3	5	10	368	5.6	10~65	37~239
D	I	10	5	6 7	233	6.0	10~75 30~80	24~179 71~190
E	I	14	5	8	200	5.0	30~75	60~150
F	I	1	5	8	175	5.3	50~85	88~150
G	II	10	5	8	272	4.1	30~70	82~190
				9			50~75	136~204
				8			50~80	136~218
H	I	13	5	10	245	6.2	10~55	25~135

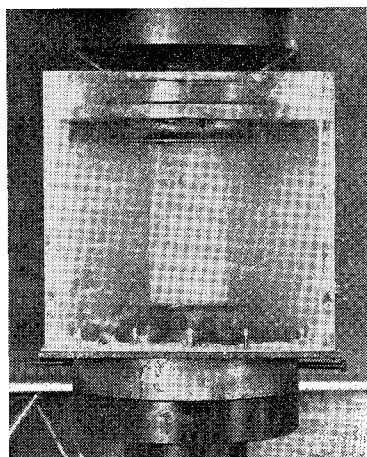


写真-1 水中載荷状況

EHF-20形(容量は動的に20t)を用い、繰り返し波形は300回/分の正弦変化波形とした。繰り返し荷重の大きさを所定の荷重に設定する手順は、まず最大荷重と最小荷重の平均荷重を載荷し、次に荷重振幅を与えて最大、最小荷重を設定する方法である。

繰り返し荷重は、供試体が破壊するまで連続して行ったが、応力繰り返し回数が200万回に達しても供試体が破壊しない場合はそこで試験を打切った。

(3) 試験時の供試体の状態

本試験では、静的強度試験および疲労試験のいずれの場合も、コンクリート湿潤供試体を前述の水槽内に水浸させた状態で試験に供した。この理由を以下に述べる。

コンクリートの静的圧縮強度が、その養生条件や強度試験時の供試体の乾湿条件によって大きく異なるのは周知の事実である。その一例としてGilkey⁴⁾の求めた関係を図-1に示すが、同一条件で養生した場合でも試験時に乾燥状態の供試体の強度は湿潤状態のそれより大きくなっており、特に湿潤養生供試体においてはかなりの強度差がみられる。この強度差は乾燥によるコンクリートの含水量の変化により生じたと考えられる。堀⁵⁾はさらに、水の表面張力が荷重によるコンクリートの内部ひびわれ形成に影響を及ぼすとして、種々の大きさの表面張力をもつ各種媒質中でモルタルの静的曲げ試験を行い、図-2に示すような破壊強度と媒質の表面張力が反比例する関係を得ている。すなわち、荷重により与えられたひずみエネルギーが、内部ひびわれの形成によりその表面エネルギーとして消費されるとき、コンクリート

○ = Experimentally determined points.
out = removed from moist to dry storage at the age indicated on horizontal scale.
in = placed in moist storage at age indicated.

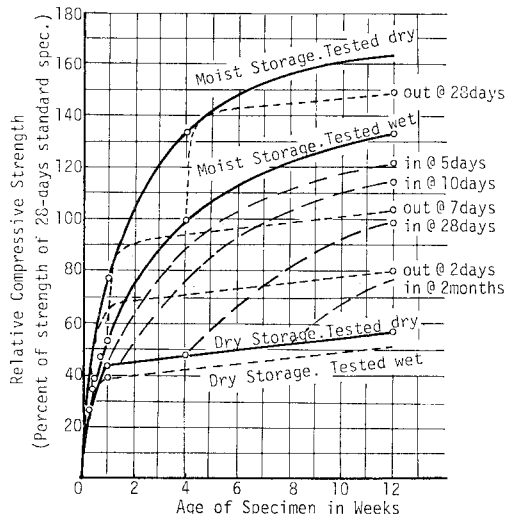


図-1 供試体の乾湿条件による強度の変化 (H.J. Gilkey⁴⁾)

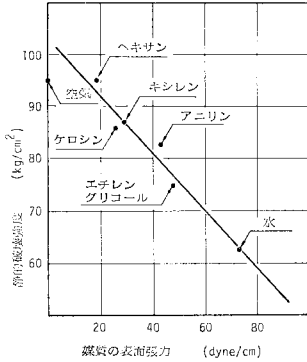


図-2 媒質の表面張力とセメントモルタルの静的曲げ破壊強度との関係 (堀¹⁾)

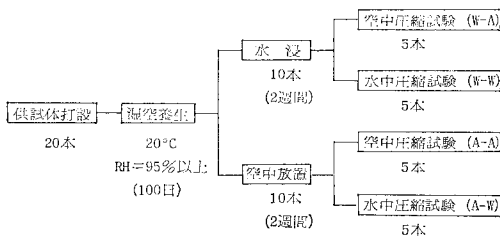


図-3 静的強度試験条件

が試験される媒質の表面張力が増すに従ってコンクリートの内部ひびわれ界面の界面張力が減り、ひびわれ形成により変換される表面エネルギーが低下するため、強度が低下するといえる。この関係はモルタルの曲げ破壊により得られたものであるため、コンクリートの圧縮破壊における媒質としての水の影響をとらえてみた。

図-3 に示す試験条件で配合Ⅱの材令 100 日の供試体を用いて試験を行い、供試体の状態を、内部が水で飽和されていて、すなわち湿潤状態で試験時に水浸した場合 (W-W) としない場合 (W-A)、乾燥状態で試験時に水浸した場合 (A-W) としない場合 (A-A) の 4 通りに分けた。その試験結果を表-3 に示すが、明らかに乾燥状態と湿潤状態では強度差があり、また乾燥状態の供試体では水浸の有無による強度差がみられる。

これらのことから、圧縮破壊および曲げ破壊のいずれも内部ひびわれの発生伝播過程を経ることを考えれば、

表-3 静的強度試験結果

種 別	W-A	W-W	A-A	A-W
圧 縮 強 度	314	322	337	385
	290	301	396	328
	319	319	410	360
	327	327	407	351
	308	318	410	340
平 均 値	312	317	392	353
標 準 偏 差	12.5	8.8	28.0	19.3

(単位: kg/cm²)

コンクリート内部空隙内の水の存在は静的強度に大きな影響を及ぼすといえるであろう。さらに、繰り返し荷重下のコンクリートにおいても、内部が水で飽和された場合その疲労強度が低下すれば、疲労破壊も静的破壊と似たような経過を経て生じることが推察できよう。そこで本試験では、コンクリート内部が水で飽和された状態での疲労性状を検討したわけだが、疲労試験は長期間を要するので空中で一定の湿潤状態を保つことが難しいため、常に水の補給がされる水中で試験を行った。

3. 疲労試験結果および考察

各グループごとに、疲労寿命の測定結果を表-4 に示す。ここで、 $p(N_r)$ は繰り返し回数 N_r における生存確率の期待値であり、同一条件下で試験された供試体総数を n 、 N_r が疲労寿命の小さい方から数えて r 番目の測定値とすると、 $p(N_r)$ は次式で算定される^{6),7)}。

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

(1) コンクリートの配合と疲労強度

筆者は先に空中圧縮疲労試験において、コンクリートの疲労強度が、その配合、試験時材令などにかかわらず静的圧縮強度に対する比で表現できることを示している¹⁾。そこで、水中圧縮疲労試験においても、空中と同様に疲労強度が、たとえコンクリートの配合が異なって静的強度が異なっているとしても、静的強度に対する比で表現すれば同一とみなせるか否かを検討してみた。

表-4 に示したグループ A~C は、コンクリートの水セメント比がそれぞれ 70、63 および 50% で、静的圧縮強度が 211、275 および 368 kg/cm² の供試体を、一定の繰り返し応力比 10~65% で疲労試験したものである。疲労寿命の測定結果はばらついているが、各グループの寿命分布に有意差がなければ、コンクリートの疲労強度

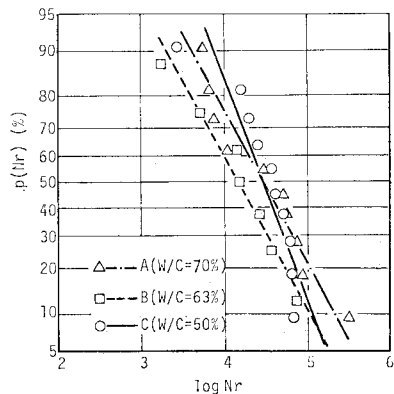


図-4 グループ A, B, C の p-N 線図

表-4 疲労試験結果

	S (%)	r	N _r	log N _r	p (N _r) (%)		S (%)	r	N _r	log N _r	p (N _r) (%)
A	10-65	1	5 300	3.73	90.9	F	50-85	1	380	2.58	88.9
		2	6 500	3.81	81.8			2	1 080	3.03	77.8
		3	7 350	3.87	72.7			3	1 220	3.09	66.7
		4	10 660	4.03	63.6			4	2 000	3.30	55.6
		5	30 280	4.48	54.5			5	2 580	3.41	44.4
		6	51 500	4.71	45.5			6	4 320	3.64	33.3
		7	56 400	4.75	36.4			7	4 490	3.65	22.2
		8	76 260	4.88	27.3			8	5 430	3.73	11.1
		9	86 410	4.94	18.2						
		10	313 100	5.50	9.1						
B	10-65	1	1 760	3.25	87.5		30-70	1	27 600	4.43	90.0
		2	5 180	3.71	75.0			2	110 540	5.04	80.0
		3	14 670	4.17	62.5			3	117 630	5.07	70.0
		4	15 400	4.19	50.0			4	196 000	5.29	60.0
		5	27 590	4.44	37.5			5	317 770	5.50	50.0
		6	33 580	4.53	25.0			6	585 670	5.77	40.0
		7	73 810	4.87	12.5			7	2 000 000→	6.30	30.0
					8	2 000 000→	6.30				
C	10-65	1	2 700	3.43	90.9	G	50-75	1	38 600	4.59	90.9
		2	15 630	4.19	81.8			2	128 200	5.11	81.8
		3	19 410	4.29	72.7			3	221 500	5.35	72.7
		4	25 510	4.41	63.6			4	382 570	5.58	63.6
		5	36 040	4.56	54.5			5	467 760	5.67	54.5
		6	46 020	4.66	45.5			6	667 500	5.82	45.5
		7	50 750	4.71	36.4			7	1 302 760	6.11	36.4
		8	60 660	4.78	27.3			8	1 548 360	6.19	27.3
		9	64 220	4.81	18.2			9	2 000 000→	6.30	18.2
		10	66 890	4.83	9.1						
D	10-75	1	170	2.23	85.7		50-80	1	27 900	4.45	88.9
		2	380	2.58	71.4			2	50 500	4.70	77.8
		3	540	2.73	57.1			3	70 300	4.85	66.7
		4	890	2.95	42.9			4	75 710	4.88	55.6
		5	1 650	3.22	28.6			5	108 740	5.04	44.4
		6	3 800	3.58	14.3			6	165 830	5.22	33.3
	30-80	1	770	2.89	87.5	7	185 550	5.27	22.2		
		2	920	2.96	75.0	8	726 950	5.86	11.1		
		3	1 830	3.26	62.5						
		4	3 400	3.53	50.0						
		5	4 830	3.68	37.5						
		6	6 580	3.82	25.0						
		7	15 520	4.19	12.5						
E	30-75	1	4 220	3.63	88.9	H	10-55	1	83 950	4.92	91.7
		2	6 240	3.80	77.8			2	91 690	4.96	83.3
		3	8 650	3.94	66.7			3	97 800	4.99	75.0
		4	8 980	3.95	55.6			4	126 200	5.10	66.7
		5	11 580	4.06	44.4			5	193 080	5.29	58.3
		6	12 400	4.09	33.3			6	350 850	5.55	50.0
		7	109 540	5.04	22.2			7	596 950	5.78	41.7
		8	132 650	5.12	11.1			8	1 285 630	6.11	33.3
				9	2 000 000→	6.30	25.0				
				10	2 000 000→	6.30					

は静的強度に対する比で表現できるといえる。

いま、水中の疲労寿命分布も空中¹⁾と同様に対数正規分布すると仮定し、各グループごとに疲労寿命の対数 log N_r と生存確率 p(N_r) の関係を 図-4 に示す。図にみられるように、疲労寿命分布はよく近似している。そこで、グループ相互間で疲労寿命分布に有意差があるかどうかを、グループ内変動が等しいとして、分散分析により検定した。その結果を表-5 に示すが、危険率 5% で同一の寿命分布であることが示されており、したがっ

表-5 グループ A, B, C の分散分析結果

	平方和	自由度	不偏分散	分散比
群 間	0.479	2	0.239	F ₀ = $\frac{0.239}{0.271} = 0.884$
群 内	6.503	24	0.271	
合 計	6.982	26		F _{0.05(2,24)} = 3.40 > F ₀

て、空中疲労試験同様、水中圧縮疲労強度が水中静的強度に対する応力比で表現できるといえる。

(2) 疲労寿命分布

疲労寿命の測定結果にみられるように、同一繰り返し応力を受ける場合でも疲労寿命は大きくばらついており、疲労試験結果を統計的に処理する必要があることがうかがえる。空中疲労試験同様、疲労寿命が対数正規分布

布するとして、確率紙上に疲労寿命の対数と生存確率の関係をプロットしたものが図-5であり、両者には確率紙上で直線関係が認められ、水中疲労寿命もまた実用上対数正規分布するとみなすことができる。

疲労寿命が対数正規分布するとき、その回帰直線式は次式で示される。

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

ここに、 t は正規分布曲線の対称軸からの距離で、 $p(N)$ の値より、正規積分表の値から求まる値で、 A, B は、実験結果から求まる定数である。

いま、 $p(N)=50\%$ のときの値の $\log N$ の値を平均疲労寿命 $\overline{\log N}$ として、疲労寿命の代表値とし、 $\log N$ の標準偏差 $D(\log N)$ を疲労寿命のばらつきを大きさを示す指標とするならば、 $\log N$ および $D(\log N)$ は式(2)の A, B を用いて次式で求められる。

$$\overline{\log N} = -\frac{B}{A}, \quad D(\log N) = \frac{1}{A} \dots\dots\dots (3)$$

繰り返し応力別に最小二乗法で求めた回帰直線式、 $\overline{\log N}$ および $D(\log N)$ をまとめて表-6に示す。

(3) S_1 - \overline{N} 曲線と耐久線図

繰り返し応力の最小応力比別に、平均疲労寿命 $\overline{\log N}$

表-6 各グループの対数正規分布による回帰直線式 $\overline{\log N}$ および $D(\log N)$

S_2	S_1	回帰直線式	$\overline{\log N}$	$D(\log N)$
10	55	$t = -1.38 \log N_f + 7.78$	5.63	0.72
10	65	$t = -1.73 \log N_f + 7.61$	4.39	0.56
10	75	$t = -1.62 \log N_f + 4.66$	2.88	0.62
30	70	$t = -1.08 \log N_f + 6.10$	5.62	0.92
30	75	$t = -1.60 \log N_f + 6.74$	4.20	0.62
30	80	$t = -1.70 \log N_f + 5.91$	3.48	0.59
50	75	$t = -1.33 \log N_f + 7.62$	5.75	0.75
50	80	$t = -1.95 \log N_f + 9.83$	5.03	0.51
50	85	$t = -2.14 \log N_f + 7.08$	3.30	0.47

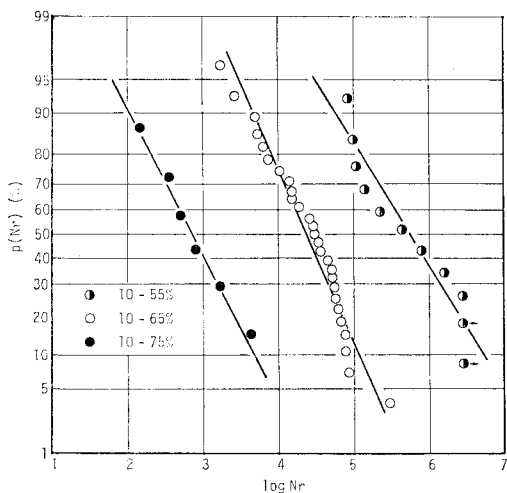


図-5 (a) 最小応力比 10% における p - N 線図

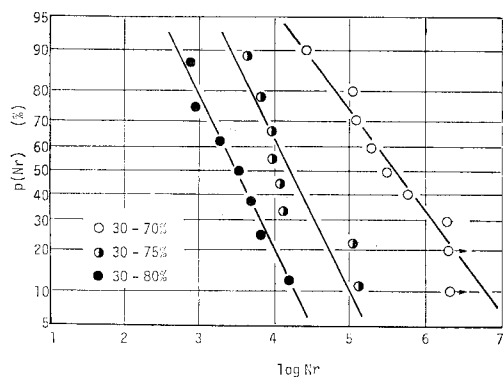


図-5 (b) 最小応力比 30% における p - N 線図

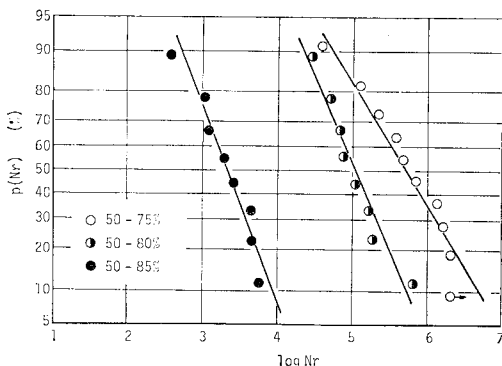


図-5 (c) 最小応力比 50% における p - N 線図

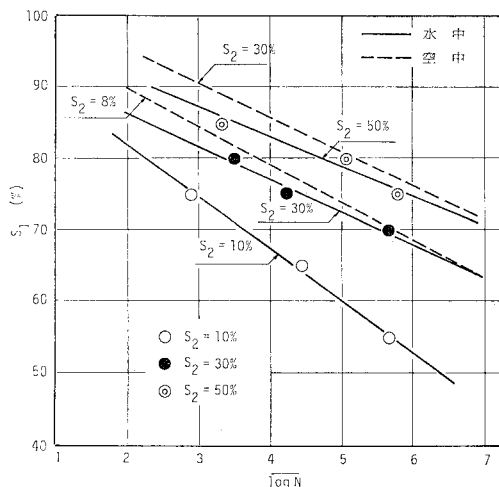


図-6 S_2 一定のときの S_1 - N 曲線

表-7 $S_2=10, 30, 50\%$ のときの $S_1-\bar{N}$ 曲線式と N 回疲労強度

S_2	$S_1-\bar{N}$ 曲線式	N 回疲労強度 $S_{1N}(\%)$				
		10^4	10^5	10^6	2×10^6	10^7
10	$\log \bar{N} = -0.138 S_1 + 13.24$	67.0	59.7	52.5	50.3	45.2
30	$\log \bar{N} = -0.214 S_1 + 20.48$	77.0	72.3	67.7	66.3	63.0
50	$\log \bar{N} = -0.245 S_1 + 24.29$	82.8	78.7	74.7	73.4	70.6

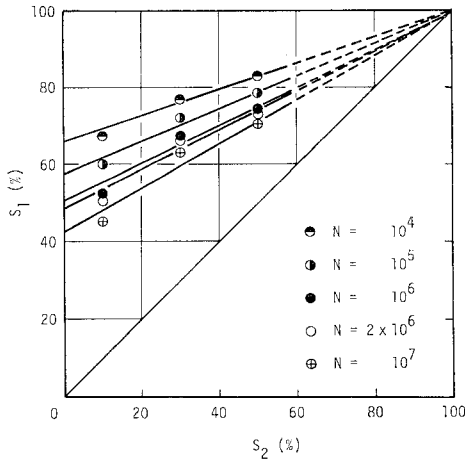


図-7 任意繰り返し回数に対する時間耐久線図

と最大応力比 S_1 との関係プロットして、 $S_1-\bar{N}$ 曲線を描くと図-6 のようになる。図にみられるように S_1 と $\log \bar{N}$ とには直線関係が認められ、その回帰直線式を求めると表-7 に示すとおりである。図-6 中の破線は、空中疲労試験において得られた最小応力比 $S_2=8\%$ および 30% の $S_1-\bar{N}$ 曲線であり、 S_2 が似た値でも空中と水中の $S_1-\bar{N}$ 曲線にはかなりの違いがみられ、水中での疲労強度が空中でのそれよりかなり小さいことが示されている。ちなみに $S_2=30\%$ の $S_1-\bar{N}$ 曲線式から求めた疲労強度は、 $N=10^6, 2 \times 10^6$ および 10^7 回においてそれぞれ $67.2, 74.8$ および 71.4% となっている。

しかしながら、この疲労強度は、図-6 および表-7 に示されるように、繰り返し応力の最小応力比により変化しており、空中疲労試験と同様、応力振幅が疲労寿命に大きく影響することがうかがえる。図-7 は最小応力比による疲労強度の変化を示す時間耐久線図であるが、いずれの繰り返し回数においてもやや上に凸の曲線となる傾向が認められるものの、最小応力比が 60% 以下の実用的範囲内では、点 $(100\%, 100\%)$ を通る直線で近似してもよいと考えられ、修正 Goodman の関係⁹⁾ が成立するといえる。

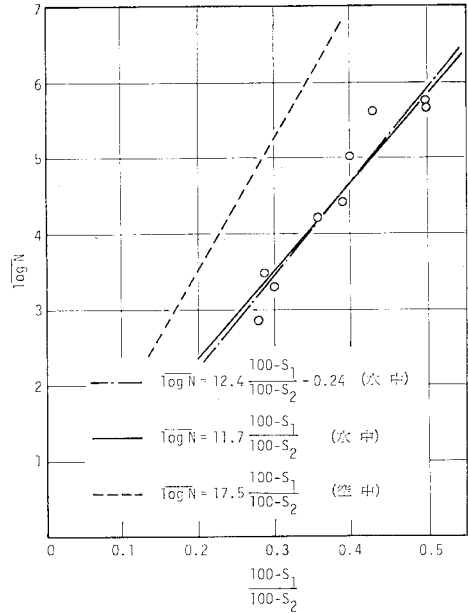


図-8 最小応力比 S_2 を考慮した $S-N$ 曲線

(4) 繰り返し応力比と平均疲労寿命

空中疲労試験と同様に、① $S_1-\bar{N}$ 曲線で、 S_2 一定のもとで、 S_1 と $\log \bar{N}$ が直線関係にあり、② 耐久線図で $\log \bar{N}$ 一定のもとで S_1 と S_2 が直線関係にあることより、繰り返し応力比と平均疲労寿命の関係は次式で示される。

$$\log \bar{N} = K_1 \frac{100-S_1}{100-S_2} + K_2 \dots \dots \dots (4)$$

ここで、

S_1, S_2 : 繰り返し応力の最大、最小応力比 (%)

K_1, K_2 : 繰り返し応力や疲労寿命に無関係な、実験結果から求まる定数

図-8 に $(100-S_1)/(100-S_2)$ と $\log \bar{N}$ の関係をプロットして示すが、この回帰直線式を最小二乗法で求めると次式のようになる。

$$\log \bar{N} = 12.4 \frac{100-S_1}{100-S_2} - 0.22 \dots \dots \dots (5)$$

また、簡便式として、定数項を零として求めると、

$$\log \bar{N} = 11.7 \frac{100-S_1}{100-S_2} \dots \dots \dots (6)$$

となり、両式に大差なく、式 (6) で水中における平均疲労寿命を推定することができる。図-8 中の破線は、空中疲労試験における平均疲労寿命の推定曲線であるが、水中疲労寿命がかなり小さいことがわかる。

(5) $D(\log N)$ の応力依存性と大きさ

水中疲労試験における疲労寿命のばらつきの大きさ $D(\log N)$ は、表-6 に示すように $0.5 \sim 1.0$ の範囲にあ

り、空中疲労試験における $D(\log N)$ の範囲 0.8~1.5 より小さくなっている。この水中疲労寿命のばらつきに、空中疲労寿命と同様に、次式で示される応力依存性があるかどうかを分散分析にて検討する。

$$D(\log N) = (AS_1 + BS_2) \left(1 - \frac{V}{100}\right) + C \dots (7)$$

ここで、

S_1, S_2 : 繰り返し応力の最大、最小応力比 (%)
 V : 静的強度の変動係数 (%)

A, B, C : 実験から求まる定数

分析にあたり、同一繰り返し応力比を受ける供試体本数が少ないため、 $D(\log N)$ の算定にはかなりの誤差が含まれ、特に途中打ち切りデータを含むグループでの誤差は大きいと考えられるので、このデータは除いて考えた。結果を表-8 に示すが、式 (7) により $D(\log N)$ の大きさを表現することは有意であり、重寄与率は $R^2=0.71$ である。回帰式を求めると次式のとおりである。

$$D(\log N) = (-0.0115 S_1 + 0.0026 S_2) \left(1 - \frac{V}{100}\right) + 1.35 \dots (8)$$

次に、空中および水中における $D(\log N)$ の大きさを比較するため、静的圧縮強度の変動係数 V を 15% にした場合について、最大応力比 S_1 と $D(\log N)$ の関係を図-9 に示す。図にみられるように水中疲労寿命のばらつきは、空中疲労寿命のばらつきよりかなり小さいことがわかる。これは、水中疲労試験では、コンクリー

表-8 分散分析結果

要因	平方和	自由度	不偏分散	分散比
回帰による	0.04014	2	0.02007	$F_0 = \frac{0.02007}{0.00400} = 5.0175$
回帰からの	0.01600	4	0.00400	
合計	0.05614	6		$F_{90}(2, 4) = 4.324$

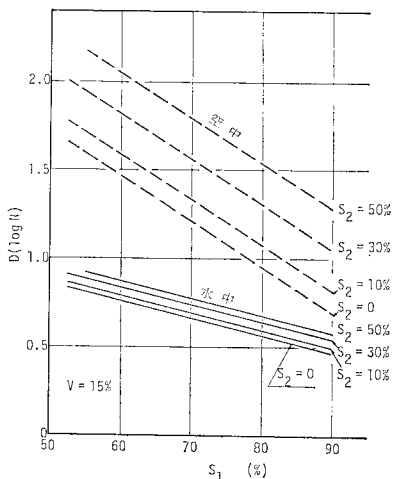


図-9 空中および水中における $D(\log N)$ の比較

トの内部空隙がすべて水によって飽和され、供試体間での差があまり認められないのに対して、空中疲労試験では、気乾状態の供試体であるため、供試体間で含水比が少しずつ異なること、さらには、外気の湿度が異なることにより、供試体の内部空隙を埋める空气に差があることなどが原因していると考えられる。

(6) $S-N-p(N)$ 曲線

水中におけるコンクリートの平均疲労寿命 $\overline{\log N}$ および疲労寿命のばらつき $D(\log N)$ がそれぞれ繰り返し応力比によって定められたので、生存確率 $p(N)$ を考慮した $S-N$ 曲線および時間耐久線図を求めることができる。すなわち、任意の生存確率 $p(N)$ に対応する t の値を正規積分表から求めて $t_{p(N)}$ とすれば、 $S-N-p(N)$ 曲線は次式で示される。

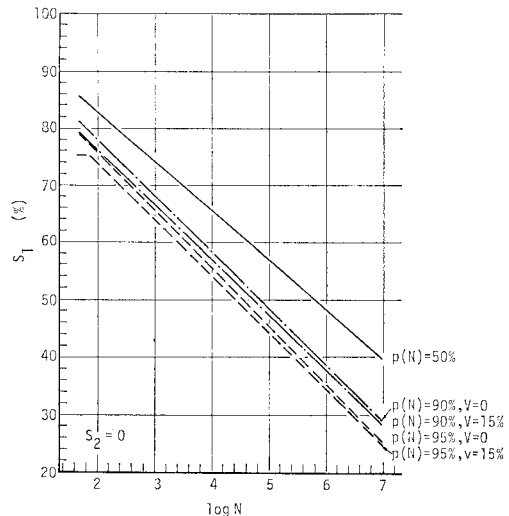
$$\log N = \overline{\log N} - t_{p(N)} \cdot D(\log N) \dots (9)$$

また、繰り返し応力の最大応力は個々の供試体の静的強度を超えることができないから、

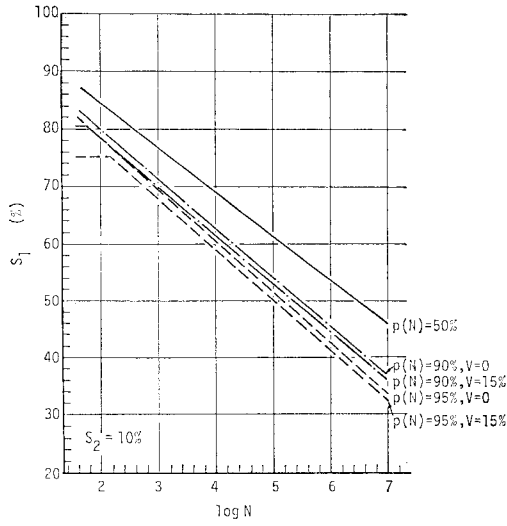
$$S_1 \leq 100 - t_{p(N)} \cdot V \dots (10)$$

これらの式に式 (6)、式 (8) を代入し、 $S_2=0, 10\%, 30\%$ について $S-N-p(N)$ 曲線を描いて図-10 (a)~(c) に示す。また、 $N=10^2, 10^3, 10^7$ に対する時間耐久線図を描いて図-11 (a), (b) に示す。これより、コンクリートの水中疲労強度は、片振り繰り返し応力下 ($S_2=0$) で、 $N=10^7$ において、 $p(N)=50\%$ では 40%、 $p(N)=90\%$ では $V=0$ で 29%、 $V=15\%$ で 28%、 $p(N)=95\%$ では $V=0$ で 26%、 $V=15\%$ で 24% となる。これらはいずれも空中疲労強度より 20% 前後小さくなっている。

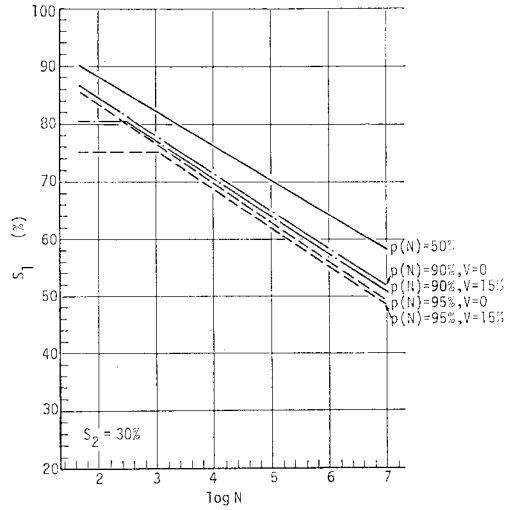
水中においてコンクリートは、すでに静的強度が空中よりも 10~20% 低下することが明らかであり、繰り返



(a) 最小応力比 $S_2=0\%$
 図-10 $S-N-p(N)$ 曲線

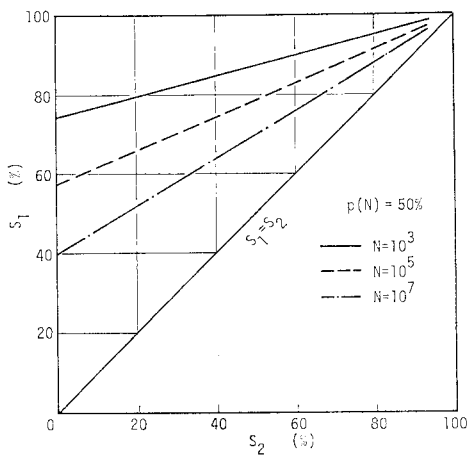


(b) 最小応力比 $S_2=10\%$

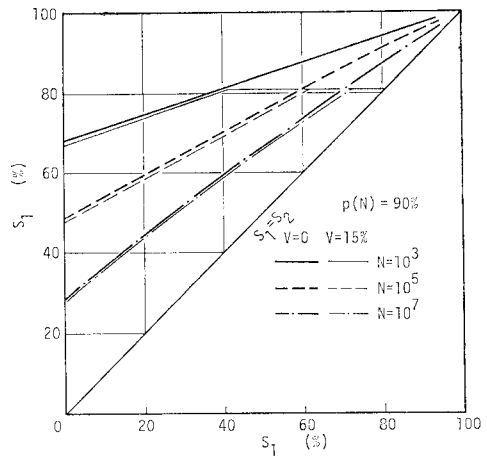


(c) 最小応力比 $S_2=30\%$

図一10 $S-N-p(N)$ 曲線



(a) $p(N)=50\%$



(b) $p(N)=90\%$

図一11 生存確率 $p(N)$ を考慮した時間耐久線図

し荷重を受けると、その水中静的強度に対して、空中疲労強度よりもさらに 20% 近くも低い疲労強度をもつことが示された。このことは、絶えず湿潤状態にあるコンクリートが繰り返し荷重を受けるときに、疲労破壊に対する安全性について十分に注意しなければならないことを示すものである。

4. 結 び

水中疲労試験結果より、水中において繰り返し応力を受けるコンクリートの疲労強度は、空中よりもさらに 20% 近く低下することが明らかとなった。この原因としてコンクリート内部空隙に飽和している水の影響により、

繰り返し荷重で微小ひびわれが増加しても、ひずみエネルギーが表面エネルギーに変換せず、内部に蓄積していくこと、あるいは高速の繰り返し応力によってコンクリート内部の空隙水圧が上昇し、ひびわれ進展を早めることなどが考えられるが、まだ推定の段階であり、さらに研究を進めることによって解明する必要がある。

本研究は、水中における一定繰返し荷重下のコンクリートの圧縮疲労性状を論じたものであるが、これにより明らかになった点を列挙すると次のとおりである。

(1) 水中において、一定繰返し応力を受けるコンクリートの圧縮疲労寿命分布は、大きくばらつくが、その分布は実用的には対数正規分布と考えてよい。

(2) コンクリートの水中疲労強度はその水中静的圧

縮強度に対する比で表現することができる。すなわち、静的強度が異なるコンクリートであっても、繰り返し応力比が一定であれば、疲労寿命に有意差は認められない。

(3) コンクリートの水中疲労寿命は、繰り返し応力の最大応力比 S_1 と最小応力比 S_2 の影響を受けるが、その時間疲労強度に対する耐久線図には修正 Goodman の関係が成立する。また、水中におけるコンクリートの平均圧縮疲労寿命 $\log \bar{N}$ は次式により推定できる。

$$\overline{\log N} = 11.7 \frac{100 - S_1}{100 - S_2}$$

(4) 水中疲労寿命のばらつきの大きさを示す $D(\log N)$ を、式 (11) のように繰り返し応力比の一次式で表現すれば、この大きさは、空中疲労の場合のそれに比較してかなり小さいものとなる。

(5) コンクリートの水中静的圧縮強度は、空中静的圧縮強度より 10~20% 低下するが、この水中静的強度を基準として求めた水中疲労による $S-N-p(N)$ 曲線から、 10^7 回片振り疲労強度を求めると、 $p(N)=50\%$ で 40%, $p(N)=90\%$ で 29%, $V=0\%$ で 28% となり、いずれの値も空中疲労強度に比べると 20% ほど小さくなっている。

最後に、本研究の遂行にあたり、九州大学土木工学科徳光善治教授には終始ご指導を賜った。また、実験に際

しては、九州大学卒業生、藤原秀三君（現・福岡県）、大隅洋志君（現・東亜建設工業）に労をわずらわした。これらの皆様に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 松下博通・徳光善治：生存確率を考慮した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. 284, pp. 127~138, 1979.
- 2) 岡田 清・小柳 治・六郷恵哲：含水量の異なるコンクリートの圧縮破壊過程に関するエネルギー的考察，土木学会論文報告集 No. 298, pp. 129~136, 1976.
- 3) 田 政範・島田静雄：水で飽和されたモルタルの圧縮破壊および疲労特性に関する基礎的研究，土木学会論文報告集 No.245, pp. 65~76, 1976.
- 4) Gilkey, H.J.: The Effect of Varied Curing Conditions Upon The Compressive Strength of Mortar and Concrete, Proc. ACI, Vol. 22, pp. 395~436, 1926.
- 5) 堀 素夫：セメントおよびコンクリートの破壊現象に関する確率論的研究，小野田セメント（株）中央研究所，pp. 176~178, 1961.
- 6) Gumbel, E.J. (河田竜夫ら訳)：極値統計学，pp. 45~51, 廣川書店, 1963.
- 7) 浜田純夫・中川建治・成岡昌夫：疲労試験における途中打切りデータの処理に関する研究，土木学会論文報告集，No. 189, pp. 99~105, 1971.
- 8) Graf, O. and E. Brenner: Versuche zur ermittlung der widerstandsfähigkeit von beton gegen oftmals wiederholte druckbelastung, Deutscher Ausschuß für Eisenbeton, Heft 76, pp. 1~13, 1933.

(1979.1.26・受付)