

マイクロコンクリートの疲労強度

FATIGUE CHARACTERISTICS OF MICROCONCRETE

川口昌宏*・柳沼善明**・薦田敏郎***

By Masahiro KAWAGUCHI, Yoshiaki YAGINUMA and Toshiro KOMODA

The authors made statical and fatigue experiments for microconcrete under compression or tension to compare these results with those of normal concrete. It was concluded that microconcrete had an intermediate fatigue characteristics between normal and light-weight concrete. It was considered whether microconcrete could be used for fatigue model specimen. Further the authors tried to apply the equation for fatigue amplitude proposed in the critical state design to microconcrete.

Keywords : microconcrete, fatigue, model testing

1. はじめに

近年交通量の増加と大型車混入率の増大に伴い、鉄筋コンクリート（以下RCという）床版の損傷問題が深刻化している。この原因には、走行荷重の大きさや衝撃、また版の構造や材料、さらには施工時の欠陥などさまざまな条件が関係しており一概に結論は出せない。しかし破壊を引き起こすのは、繰返して加わる車両荷重による疲労である。

一般に疲労による破壊は、長期間にわたる載荷除荷の繰返しによる構造物内部の応力伝達機構の損傷が累積されて発生する。疲労問題を研究しようとするとき、実物大かそれに近い大きさの供試体で実験を行うと、時間的かつ経済的にかなりの制約を受けざるを得なくなる。ここでこのような制約をできる限り避ける目的で、小型の縮尺模型による静的ならびに疲労実験を試みている¹⁾。

模型に使用される材料は、マイクロコンクリート²⁾とよばれている粗骨材寸法を縮尺に合わせて小さくしたコ

ンクリートである。マイクロコンクリートは静的耐荷力を求める模型材料の実験としては実績があるけれども^{3), 4)}、疲労実験に対しては実例がない。そこで本研究ではこのマイクロコンクリートの圧縮、引張ならびにせん断による静的および疲労強度に対して基礎的な実験を行い、実際に用いられているコンクリートの特性と比較検討する。さらに両者の関係から、模型実験によって得られる結果をどのように評価できるかを考察する。

2. 実験概要

(1) 使用骨材

実験供試体に使用した骨材の諸性質を表-1に示す。

表-1 骨材の性質

砂の产地	鹿島	
最大寸法 (mm)	5.0	
比重	乾燥状態	2.56
	表乾状態	2.59
容積 (kN/m ³)	16.5	
実験率 (%)	65.6	
吸水率 (%)	1.15	
洗い試験 (%)	1.43	
有機不純物	合格	
粘土塊 (%)	1.17	

* 正会員 工博 日本大学教授 理工学部交通土木工学科
(〒274 船橋市習志野台7-24-1)

** 正会員 工修 日本大学専任講師 理工学部交通土木工学科(同上)

*** 正会員 工修 日本大学理工学研究科(現鹿島建設)
(同上)

ここで実験しているマイクロコンクリートは、ある特定のコンクリートの模型材料のモデルとして設定しているわけではない。著者らが別に行っている模型実験に使用している材料と基本的には同じ材質である¹²⁾。一般に、マイクロコンクリートに使用される粗骨材の最大寸法は3~8 mm程度であるが、使用した骨材は表-1の骨材を2.5 mmのふるいにかけ、100%通過したものである。その粒度曲線を図-1に示す。

(2) 配合

載荷装置の島津サーボペッット Lab-5 の動的最大荷重±5.0 t、静的最大荷重±7.0 tの性能より、予備実験の結果、表-2に示した2種類の配合を用いることにした。

(3) 供試体と養生

供試体はφ5×10 cmの円柱供試体と、4×4×16 cmの角柱供試体である。円柱供試体は総計500本余りが製作され、うち186本が圧縮実験ならびに引張実験に用いられた。角柱供試体は総計300本余りが製作され、うち107本がせん断実験に用いられた。特に圧縮実験用供試体は表-2の2つの配合で製作され、他の供試体はCase Aの配合で製作された。

供試体は打設後24時間経過して脱型し、円柱供試体は28日間、角柱供試体は2か月間の水中養生の後いずれも7日間の空中乾燥を施して実験に供した。

(4) 載荷方法

a) 圧縮実験ならびに引張実験

圧縮実験は一軸圧縮状態のもとで行われた。また、引張実験には割裂実験を適用した。

b) せん断実験

われわれは、走行荷重によるせん断の影響を図-2に示すモデルのように考えた。この図には、走行荷重の通

過前後で圧縮力と引張力が逆転する両振り（以下交番といいう）載荷の状態を描いている。この交番載荷状態を容易に得るために、図-3に示した二面せん断治具を製作し使用した。中央部のロッドの上端をパルセーターに取り付け上下させて、交番荷重が加えられる。特にこの二面せん断治具では、二面せん断の問題点である斜め圧縮領域の形成を防止する目的で、載荷部ロッドと供試体の間に幅10 mmの鋼片を挿入し、支点とこの鋼片との間隔を17 mmとした。曲げ引張亀裂の発生を防止する目的で、供試体は上下からの圧縮力により固定した。これが疲労試験にどのように影響するか、定量的につかめてはいない。曲げ引張亀裂の発生は破断後の形状から判断したが、その発生はみられなかった。

(5) 静的実験

静的実験の目的は、マイクロコンクリートの静的強度特性、ならびに疲労強度実験の繰返し応力の上限、および下限値を決定することである。無作為に抽出された供試体の強度の平均値を静的強度の代表値とし、繰返し応力の大きさを決定する基準値とする。

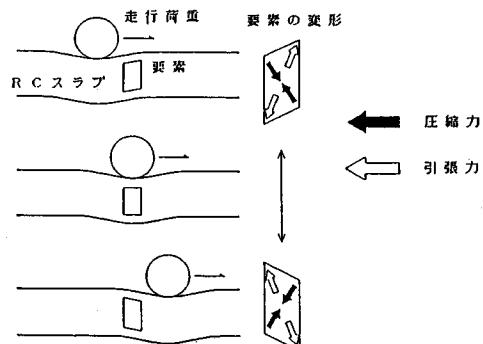


図-2 RC床版のせん断モデル

表-2 配合設計

供試体	S/C (%)	W/C (%)	W (%)	C (%)	S (%)	砂の粒度
Case A	250	65	15.7	24.1	60.2	未調整
Case B	250	75	17.7	23.5	58.8	

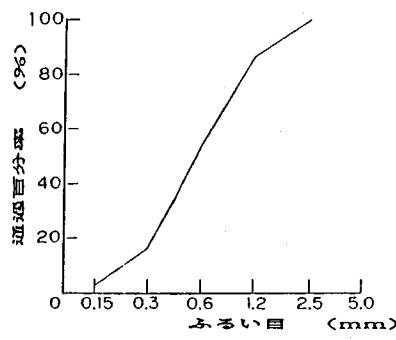


図-1 骨材の粒度曲線

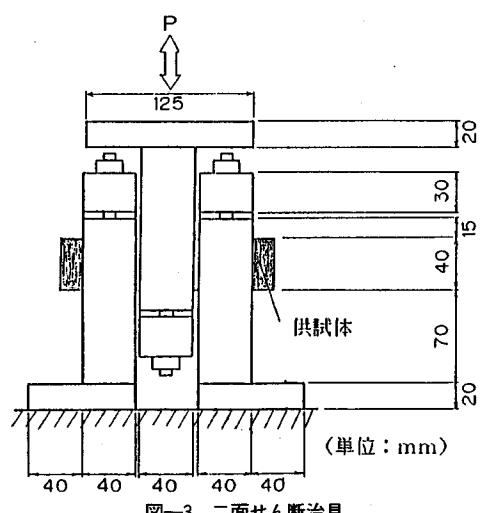


図-3 二面せん断治具

圧縮実験用供試体にはひずみゲージを貼付し、応力とひずみの関係をみた。

(6) 疲労実験

疲労実験では、静的実験で決定された上限、ならびに下限応力を繰り返し載荷する。載荷は正弦波形であり、周波数は5, 8, 10 Hzとする。ただし、この程度の周波数の違いは、疲労強度になんら影響を与えないことが報告されている⁵⁾。

静的実験と同じく、圧縮実験用供試体にはひずみゲージを貼付し、載荷回数に対する応力とひずみの関係をみた。また、せん断実験では非接触変位計を用い、載荷回数に対する供試体中央部の鉛直変位をみた。特にせん断実験では、交番載荷の疲労寿命に対する影響をみると、片振り載荷と比較した。

3. 実験結果および考察

(1) 静的実験

表-3では各実験別に静的実験結果を示している。図-4には圧縮実験における応力とひずみの関係を、強度がほぼ等しい普通コンクリートのそれと比較して示している。図-5では圧縮強度とヤング係数との関係も示した。

引張強度については割裂実験を適用したが、一般に割

表-3 静的実験結果

静的実験	平均破壊荷重(配合) (kN)	平均強度 f_u (MPa)	母材進偏率 s (MPa)
圧縮	59.21 (Case A)	30.16	3.569
	55.16 (Case B)	28.10	2.560
引張	18.43 (Case A)	2.346	0.184
	15.20 (Case A)	1.935	0.234
せん断	16.44 (Case A)	5.066	0.567
	18.35 (Case A)	5.802	0.843
	17.90 (Case A)	5.495	0.357

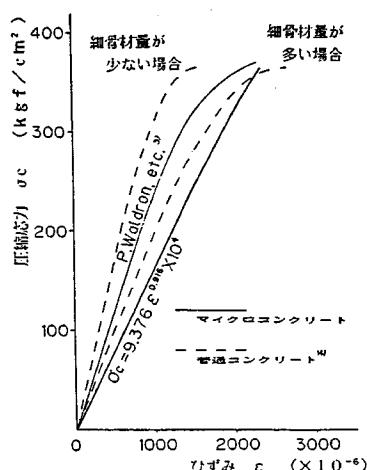


図-4 応力とひずみの関係

裂強度が引張強度として適用可能な範囲は、静的には圧縮強度に対する割裂強度の比が最大で1/6~1/8まで、また疲労実験に適用するためには静的強度における両者の比率が1/9~1/10までとされている⁶⁾。表-3の結果をみれば、今回静的実験に割裂実験を適用したことは妥当であったと思われる。さらに、割裂実験を疲労実験にも適用し得ることがわかる。

供試体は、可視ひびわれが生じるとともに破壊した。この性質は軽量コンクリートのそれと類似しており、マイクロコンクリートはせい的に破壊するものと思われる。

(2) 疲労実験

表-4には、静的強度実験から決定された疲労実験で

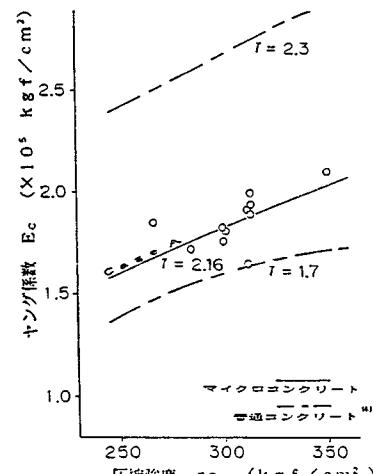


図-5 圧縮強度とヤング係数の関係

表-4 疲労実験計画

疲労実験	配合	載荷応力比 (%)		供試体数 (本)
		S1	S2	
圧縮	Case A	88	2	7
		80	2	8
	Case B	70	2	5
		80	8.0	12
引張	Case A	75	7.5	11
		70	7.0	9
		65	6.5	2
		90	2	5
	Case A	80	2	7
		70	2	5
せん断	Case A	60	2	4
		80	8.0	14
		75	7.5	12
		70	7.0	14
		90	10	6
	Case A	90	30	5
		85	10	4
		85	30	3
		90	-10	5
		90	-20	5

の上限、および下限応力比（以下 S_1 、および S_2 という）と供試体本数を示した。

図-6 は圧縮疲労下の供試体の応力とひずみの関係を載荷回数ごとに示したものである。コンクリートの場合と異なり、マイクロコンクリートは破壊回数近傍でも S 字の軌跡を描かず、ほとんどが直線関係を維持したまま破壊に至った。このことから静的載荷時と同様に、疲労載荷時にもマイクロコンクリートはせい的な破壊形態を示すものと思われる。図-7 は、せん断疲労実験（交番載荷）での供試体の変位振幅と載荷回数の関係を示したものである。一般にコンクリートの疲労実験において、

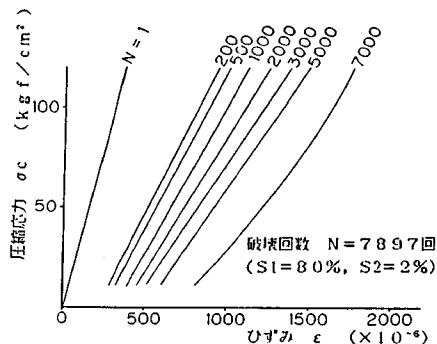


図-6 載荷回数に対する応力とひずみの関係

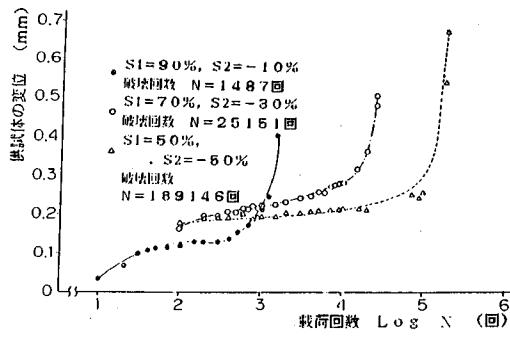


図-7 載荷回数と変位振幅の関係（交番載荷）

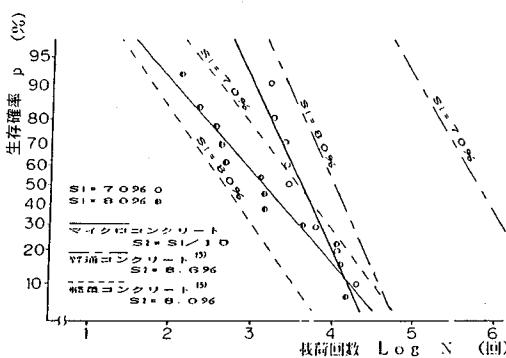


図-8 $p \sim N$ 線図（圧縮疲労）
(普通コンクリート、軽量コンクリートとの比較)

供試体の最大ひずみの変化は、遷移領域、定常領域、加速領域の 3 段階に分けられるという報告がある⁷⁾。本図よりマイクロコンクリートの場合も上述した 3 段階に分けることができるようと思われる。さらに疲労寿命ならびに破壊時変位は、載荷応力比の絶対値の大きい方に影響され、しかもそれに反比例することがわかる。

コンクリートの疲労寿命は対数正規分布することが過去の多くの実験で報告されている。今回の実験結果も同様な性質を示したので対数正規確率紙上に回帰直線を示し $p \sim N$ 線図を描いた。図-8 には圧縮疲労実験における $p \sim N$ 線図、図-9 には引張疲労実験における $p \sim N$ 線図をそれぞれ S_2 が S_1 の 10 分の 1 の場合について示す。せん断疲労実験における $p \sim N$ 線図は、特に S_1 が 90 % の場合について交番載荷と片振り載荷を比較して図-10 に示した。表-5 にはこれらの回帰直線式をまとめた。ここで、表中の回帰式の t は正規分布の対称軸からの距離である。圧縮疲労実験については普通コンクリートと軽量コンクリートの実験値と比較し、引張疲労実験については普通コンクリートの実験値と比較した。圧縮疲労についてはマイクロコンクリートが普通コンクリートと軽量コンクリートの中間的特性をもつものと思われる。また各実験結果から、 S_2 が一定の場合には S_1 が小さくなるほど、 S_1 が一定の場合には S_2 が大きくな

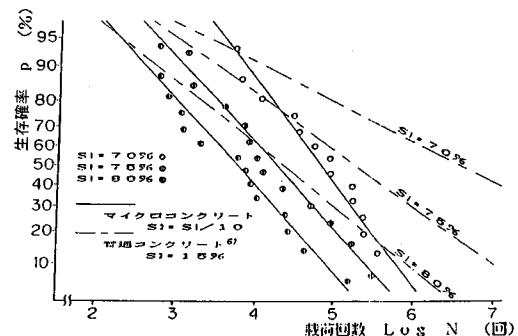


図-9 $p \sim N$ 線図（引張疲労）
(普通コンクリートとの比較)

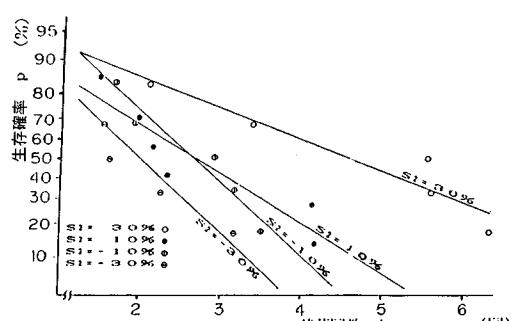
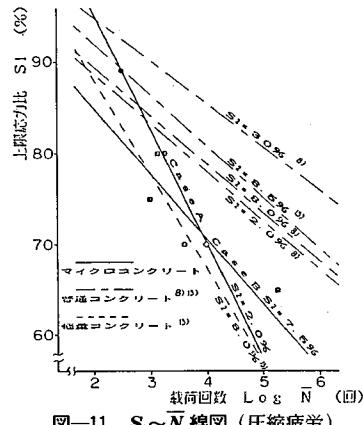
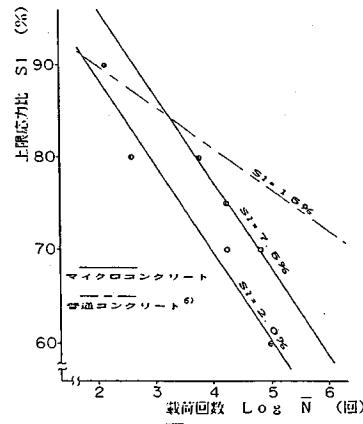


図-10 $p \sim N$ 線図（せん断疲労、 $S_1 = 90\%$ ）

るほど、疲労寿命は長くなる。そこで、 $p \sim N$ 線図において生存確率が 50 % のときの疲労寿命をその載荷レベルでの代表値 \bar{N} とし、 S_1 と \bar{N} の関係を示した。図—

表—5 疲労実験の回帰式と平均疲労寿命

コンクリートの種類		載荷応力比	$t = A \log N + B$		平均 疲労寿命 \bar{N} (回)	
			S_1 (%)	S_2 (%)		
圧縮疲労	マイクロコンクリート	80	8	- 1.168	3.648	1328
		75	7.5	- 1.779	5.305	959
		70	7	- 2.136	7.694	4000
		65	6.5	- 1.137	5.974	179547
	普通(13)コンクリート	80	8	- 1.456	3.846	438
		75	8	- 2.198	5.827	438
		70	8	- 1.333	4.718	3500
		65	8	- 0.9381	4.381	46300
	普通(13)コンクリート	80	8.5	- 2.185	8.732	9910
		75	8.5	- 2.151	11.40	190700
		70	8.5	- 1.746	10.00	603400
引張疲労	マイクロコンクリート	80	8	- 1.111	4.158	5528
		75	7.5	- 1.110	4.678	16381
		70	7	- 1.316	6.329	64457
	普通(6)コンクリート	80	15	- 0.8069	3.484	20760
せん断疲労	片振り載荷	90	10	- 0.6200	1.679	467
		90	30	- 0.4060	1.869	40128
	交番載荷	- 10	- 0.9329	2.481	460	
		- 30	- 0.9563	1.898	97	

図—11 $S_1 \sim \bar{N}$ 線図 (圧縮疲労)図—12 $S_1 \sim \bar{N}$ 線図 (引張疲労)

11 には圧縮疲労における $S_1 \sim \bar{N}$ 線図を、図—12 には引張疲労における $S_1 \sim \bar{N}$ 線図を示している。圧縮疲労では、 $S_1 \sim \bar{N}$ の回帰直線式が交わっている。この原因として、Case A と Case B での配合の違いなどが考えられる。一方、引張疲労結果からは疲労寿命が S_1 と S_2 の関数として表現できることがわかる。

(3) 疲労寿命と載荷応力比の関係式

疲労寿命は、 S_1 のみならず S_2 にも影響されることがわかった。さらに設計時には、 S_2 は死荷重に相当するため、死荷重の大きい土木または建築構造物においては S_2 も考慮して疲労寿命を関数化する必要がある。普通コンクリートでは、 S_1 と S_2 と \bar{N} の関係式として次式が妥当とされている⁸⁾。

$$\log \bar{N} = K \frac{100 - S_1}{100 - S_2} \quad (1)$$

本実験結果も、全体の傾向としては式(1)を適用できると考えられ、また普通コンクリートと比較することを考えて、式(1)を適用する。

一般に式(1)は圧縮、および引張に関する片振り疲労実験に適用される。交番疲労では S_2 が負の方向に大きくなるに従って疲労寿命が短くなることを考えると、符号を考慮すれば、式(1)は交番疲労でも適用できる。表—6には、式(1)をマイクロコンクリートにあてはめたときの係数 K を、普通コンクリート、ならびに軽量コンクリートのそれと比較して示した。同表には、与えられた S_2 のもとで 10^5 , 10^6 , および 10^7 回の載荷に対する疲労強度 (上限応力比) S_1 も示した。この関係を特に圧縮疲労について示したものが図—13である。

表—6 $S_1 \sim S_2 \sim \bar{N}$ 関係

コンクリートの種類	K	S_2 (%)	回復力強度 S_1 (%)		
			$\bar{N} = 10^5$	$\bar{N} = 10^6$	$\bar{N} = 10^7$
マイクロコンクリート	圧縮	16.37	10	72.51	67.01
			20	75.56	70.67
			30	78.52	74.35
	引張	15.36	10	70.71	61.85
			20	73.96	68.75
			30	77.21	72.05
	せん断 片振り	25.14	30	86.08	83.29
			20	84.09	80.91
			10	82.10	78.52
	せん断 交番	- 10	80.11	76.13	72.61
		- 20	71.70	66.04	60.38
		- 30	69.14	62.96	56.79
		- 40	66.56	59.87	53.18
普通コンクリート	圧縮	18.43	10	75.59	70.70
			20	78.30	73.96
			30	81.01	77.21
	引張	18.25	10	75.28	70.34
			20	78.08	73.70
			30	80.82	76.99
軽量コンクリート	圧縮	11.26	10	60.03	52.04
			20	64.49	57.39
			30	68.92	62.71

これは、 S_2 が 30 % の場合の普通コンクリートならびに軽量コンクリートと比較したものである。これより、マイクロコンクリートは普通コンクリートと軽量コンクリートとの中間的な、あるいは普通コンクリートに近い疲労特性をもつことがわかる。また、図-14 はせん断疲労について片振り載荷と交番載荷を比較したものである。これより、せん断疲労寿命は S_2 が小さくなるほど短くなることがわかる。また $S_2=0\%$ から $S_2=-10\%$ に移るときに、回帰直線の傾きが急になることより、交番載荷が疲労寿命に何らかの影響を及ぼすものと思われる。

(4) 耐久線図

耐久線図は一定の疲労寿命に対して、その上限ならびに下限応力比を与えるもので、材料の疲労特性を表現するに際して非常に有効となる。図-15は、3.(3)で述べた回帰式とともに描いたせん断疲労についての耐久線図である。本図より、交番載荷領域と片振り載荷領域の間では疲労寿命が不連続となっている。これが実験精度によるか、交番応力そのものによるかは判定できないが、

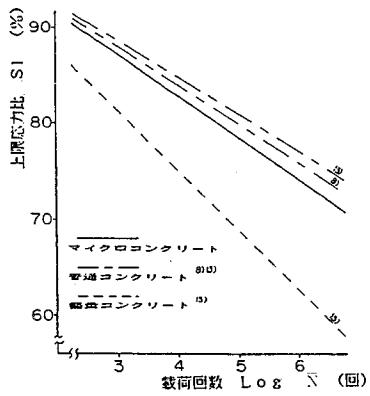


図-13 $S_1 \sim S_2 \sim \bar{N}$ 関係からの $S_1 \sim \bar{N}$ 線図
(圧縮疲労, $S_2 = 30\%$)

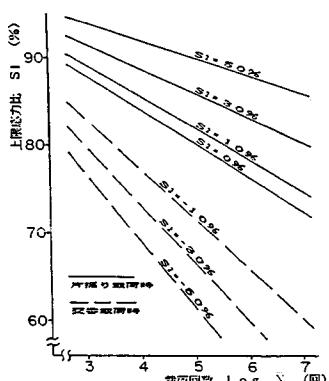


図-14 $S_1 \sim S_2 \sim \bar{N}$ 関係からの $S_1 \sim \bar{N}$ 線図
(せん断疲労)

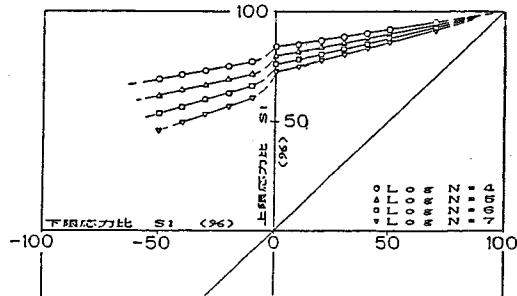


図-15 せん断疲労時の耐久線図

ほかにも同様の傾向を示す実験が報告されている¹⁶⁾.

(5) 疲労振幅強度の特性値

ここでは土木学会編「コンクリート構造の限界状態設計法指針（案）」⁹⁾に基づき、マイクロコンクリートの疲労振幅強度の特性値に關して述べる。

一般にコンクリート疲労寿命は非常に広範囲に分布する。これは静的な強度のばらつき、そして疲労自体のもつ性質が重なり合った結果生じるものと思われる。この分布を考慮し、設計時には材料強度の保証値を用いなければならない。これが静的、ならびに疲労強度の特性値である。静的強度の特性値は、次式で与えられる。

ここに、 f_k ：静的強度の特性値

f_m : 静的強度の平均値

k : 係数

c_v : 静的強度の変動係数

式(1)を变形して

$$\log \bar{N} = K \left(1 - \frac{f_r}{f_m - f_z} \right) \dots \dots \dots \quad (3)$$

ここに、 f_r :応力振幅 ($=f_1-f_2$)

f_2 ：下限載荷應力

さらば

$$f_r = (f_m - f_2) \left(1 - \frac{\log \bar{N}}{K} \right) \dots \dots \dots \quad (4)$$

となる。

疲労破壊は構造内部に繰返し作用する応力によって発生する。また設計時には活荷重に相当する応力振幅を考えるのが妥当であるから、疲労強度の特性値は応力振幅によって定められるべきである。この場合、 f_m を静的強度の特性値に置き換えて、静的強度のばらつきに対する安全性を保証しなければならない。また疲労自体の特性による寿命のばらつきに対する安全性は、係数 K を適宜に選ぶことで保証できる。以上より、疲労振幅強度の特性値 f_{re} は次式で与えられる。

$$f_{rk} = (f_k - f_2) \left(1 - \frac{\log N}{K} \right) \dots \dots \dots \quad (5)$$

表-7 疲労振幅強度の特性値

コンクリートの種類		実験 係数 c v (%)	$\log \bar{N}$	
			A	K
マイクロ コンクリート	圧縮	10	1.00	19.1
	引張		1.00	16.0
普通 コンクリート	圧縮	5	0.85	17.0
	引張		1.00	17.0
軽量 コンクリート	圧縮	5	0.85	10.0
	引張		1.00	10.0

静的ならびに疲労強度の安全性を 95 % 以上保証する場合、式(2)の係数は $k=1.64$ となる。また式(5)の係数 K は疲労実験の結果の 95 % 以上が生存するよう定められる。この結果を普通コンクリートならびに軽量コンクリートと比較して表-7 にまとめた。ただし、マイクロコンクリートの静的実験結果は供試体が小さかったことよりばらつきが大きかった。そのため、式(2)の c_v は 10 % とした。

(6) 相似則に関する一考察

本研究の目的の 1 つは、マイクロコンクリートを使用した縮尺模型によって実構造物（特に橋梁 RC 床版）の疲労特性を調べることにある。静的実験の相似則によって模型床版に実物に相似な応力分布を作り出すことは可能である^{10),11)}。しかし、疲労破壊に関して実物と模型とを関係づけることはこれまで検討されていない。RC 床版の疲労破壊を支配しているのはコンクリートの疲労特性であると考えられる¹²⁾。したがって、実物と模型との疲労強度特性の関係は、両者のコンクリート材料の関係によって決まる。ただし両者の疲労破壊モードが、共通でなければならない。破壊モードが共通であれば、実物と模型の疲労強度の関係は、両材料の対応する $S_1 \sim \bar{N}$ 式に支配されるであろう。式(1)によれば、

$$\frac{\log \bar{N}_a}{\log \bar{N}_m} = \frac{K_a (100 - S_{1a})(100 - S_{2a})}{K_m (100 - S_{2a})(100 - S_{1m})} \dots \dots \dots (6)$$

ここに添字 a は実構造物の値を表わし、添字 m は模型、あるいはマイクロコンクリートの値を表わしている。

RC 床版では S_{2a} は版の死荷重による応力比、 S_{1a} は活荷重+死荷重による応力比に相当する。 S_{2m} はダミーウェイトによって S_{2a} と一致させることができる。しかし静的試験では振動などの動的試験と違って、死荷重を一致させることは重要ではない。ただ、疲労破壊を調べるために死荷重による応力振幅の変化に注意しなければならない。縮小模型では S_{2m} はほとんどゼロである。すると、実験で与えた S_{1m} に対して得られる模型の疲労破壊回数 N_m から実物の疲労破壊回数は、式(6)を

変形して次式により推定できる。

$$\log \bar{N}_a = \log \bar{N}_m \frac{K_a}{K_m} \frac{(100 - S_{1a})100}{(100 - S_{2a})(100 - S_{1m})} \dots \dots \dots (7)$$

ここに K_a/K_m は、実構造物および模型の破壊モードを支配していると考えられる材料の疲労特性の関係である。すなわち、模型実験において上限応力比 S_{1m} を加えたとき \bar{N}_m 回で破壊が生じたとすれば、上限応力比 S_{1a} 、下限応力比 S_{2a} を受ける実物は式(7)で求められる \bar{N}_a で破壊すると予測できる。

4. 結論

今回の実験から以下の結論に至った。

(1) マイクロコンクリートは、静的載荷時ならびに疲労載荷時ともにぜい性的に破壊する。

(2) マイクロコンクリートの疲労寿命も対数正規分布に近い分布形態を示す。

(3) 普通コンクリートで定義されている $S_1 \sim S_2 \sim \bar{N}$ 関係式はマイクロコンクリートにも適用できる。また片振り載荷のみならず交番載荷にも適用できる。

(4) $S_1 \sim S_2 \sim \bar{N}$ 関係図、ならびにこの回帰式をもとに得られた 100 万回圧縮疲労強度（上限応力比） S_1 は、 S_2 が 30 % のもとで

1) 普通コンクリート：約 77 %

2) 軽量コンクリート：約 63 %

3) マイクロコンクリート：約 74 %

となり、マイクロコンクリートの圧縮疲労特性は普通コンクリートと軽量コンクリートとの中間的あるいは、普通コンクリートに近いものと思われる。

(5) せん断疲労実験から、交番載荷は片振り載荷と比較して疲労寿命にかなり影響を及ぼす。

(6) 限界状態設計で提案されている疲労振幅強度の特性値は、マイクロコンクリートに対しても定義できる。

(7) マイクロコンクリートによる模型疲労実験において、疲労破壊モードが実構造物と等しいならば、模型と実物の疲労寿命にはある一定の関係があると考えられる。

謝辞：本研究は日本大学理工学部交通土木工学科の卒業研究として、昭和 58 年度、西村 誠（現在(株)石井組）、堀口恵二（現在岩井土建(株)）、また昭和 59 年度、菊地浩一（現在黒須建設(株)）、鳩津外志彦（現在飛島建設(株)）、原田浩二（現在(株)セコム）、昭和 61 年度、伊藤善啓（現在須賀工業(株)）、菰田宏明（現在日本大学理工学部副手）、戸原正人（現在(株)関電工）が行った研究をまとめたものである。また、元副手の鈴木英実氏（現在神奈川県庁）、同じく椎名啓雄氏（現在国際航業(株)）の助言ならびに協力に対し深く感謝いた

します。

参考文献

- 1) Kawaguchi, M., Komoda, T. and Yaginuma, Y. : Fatigue Characteristics of Microconcrete, Structural Engineering & Construction, Proc. of 1st EACSEC, Vol. 1, pp. 497~508, Pergamon Press, 1986.
- 2) 日本コンクリート工学協会：コンクリート便覧, pp. 1019~1024, 技報堂出版, 1978.
- 3) Garas, F. K. and Armer, G. S. T. : Reinforced and Prestressed Microconcrete Models, The Construction Press, 1980.
- 4) ACI : Models for Concrete Structures, ACI Publication SP-24, 1970.
- 5) Kesler, C. E. : Effect of Speed of Testing of Flexual Strength of Plain Concrete, Proc. of Highway Research Board, Vol. 32, 1953.
- 6) 松下博通・近田孝夫：割裂試験法によるコンクリートの引張強度に関する研究, セメント技術年報, XXXV, pp. 393~396, 1981.
- 7) Kesler, C. E. (成岡昌夫・都築和夫共訳) : Fatigue and Fracture of Concrete, コンクリートジャーナル, Vol. 19, No. 12, pp. 53~60, 1971.
- 8) 松下博通・近田孝夫：コンクリートの疲労寿命分布と $S \sim N$ 曲線, セメント技術年報, XXX, pp. 373~376, 1976.
- 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ー第 52 号, pp. 292~300, 1983.
- 10) 江守一郎, D. J. シューリング共著：模型実験の理論と応用, pp. 142~144, 技報堂, 1973.
- 11) Hossdorf, H. (translated by Amerongen, C. V.) : Model Analysis of Structures, VNR Company, 1976.
- 12) 川口昌宏・原田浩二・嶋津外志彦・高橋三雅：模型橋梁床版の疲労実験と余寿命診断, 土木学会論文報告集投稿中, 1986.
- 13) 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, 第 198 号, pp. 107~114, 1972.
- 14) 岡田 清・六車 熙編集：コンクリート工学ハンドブック, 朝倉書店, pp. 446~447, 1975.
- 15) 同上, pp. 465~466.
- 16) Cornelissen, H. A. W. and Reinhardt, H. W. : Fatigue of Plain Concrete in Uniaxial Tension and in Alternating Tension-Compression Loading, Proc. IABSE, pp. 273~282, 1984.

(1986. 4. 24・受付)