

# 各種コンクリートの疲労強度および 疲労破壊性状に関する研究

菅田紀之<sup>1</sup>・尾崎 詔<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 室蘭工業大学講師 工学部建設システム工学科 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

<sup>2</sup>フェロー会員 工博 室蘭工業大学名誉教授 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

コンクリートの疲労特性の把握および疲労強度改善のために行った各種コンクリートの試験結果を取りまとめると共にひずみ変化等の検討を行った。また、繰返し荷重を受けたコンクリートの細孔構造の変化について検討を行った。その結果、湿潤状態のコンクリートの疲労強度は既に知られている程度に乾燥状態よりも小さくなること、骨材界面の遷移帯を強化することにより湿潤状態における疲労強度の改善が期待できることを示した。また、乾燥状態におけるコンクリートの疲労損傷は繰返し載荷初期より遷移帯において起こり、その損傷が徐々に進行し破壊に至る。湿潤状態では、疲労破壊直前まで遷移帯の損傷は少なく、遷移帯に損傷が発生するとその損傷が急速に進み破壊に至ることを明らかにした。

*Key Words: fatigue, fatigue strength, fatigue failure, microstructure, transition zone*

## 1. はじめに

水中あるいは湿潤状態におけるコンクリートの疲労強度が、気中で乾燥状態にあるコンクリートと比較すると低下することが田等<sup>1)</sup>、松下<sup>2)</sup>により報告された。それ以来、著者等はコンクリートの水中における疲労特性の解明および疲労強度の改善、水中における疲労強度低下原因の究明を目的として、各種混和材を用いたコンクリートおよび真空処理を行ったコンクリート、高強度コンクリート等の圧縮疲労に関する研究を行ってきた<sup>3)~9)</sup>。検討は疲労強度について行うと共に、疲労試験中のひずみの変化および供試体から溶出するイオン等によって変化する試験水槽内の水の pH 等についても行った。その結果、湿潤状態と乾燥状態では、疲労損傷の進行および破壊性状が大きく異なることを明らかにした。しかしながら、未だ疲労強度の低下原因が解明されていないのが現状であり、その改善に関しても、良好な結果が得られていない。

本論文では、著者等による既発表の疲労試験結果、および新たに行った試験の結果を用いて、各種コンクリートの疲労強度を示し比較検討を行った。新た

に行った試験は、シリカフェームを用いたコンクリートの水中圧縮疲労試験、SEC 工法<sup>5)</sup>を適用した普通コンクリートの水中圧縮疲労試験、高炉スラグ微粉末を用いたモルタルの水中圧縮疲労試験、普通コンクリートの水中曲げ疲労試験、普通コンクリートおよびモルタルの割裂引張疲労試験である。また、疲労試験中に測定したひずみ変化およびエネルギー損失等について検討を加えた。さらに、コンクリートにひび割れが発生するとコンクリートの細孔構造が変化することに注目し、モルタルに対して疲労試験を行い、湿潤状態および乾燥状態における疲労破壊性状について細孔構造の面から検討を行った。

## 2. 各種コンクリートの疲労強度および疲労性状

### (1) 疲労試験の概要

疲労試験は、最大荷重が 300 kN の電気油圧サーボ式の疲労試験機を用いて行った。コンクリートの乾燥状態の疲労性状を得る場合には気中において、湿潤状態の性状を得る場合には水中において試験を

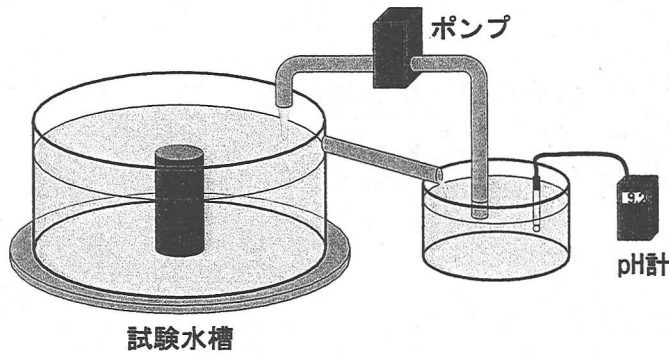


図-1 試験水槽

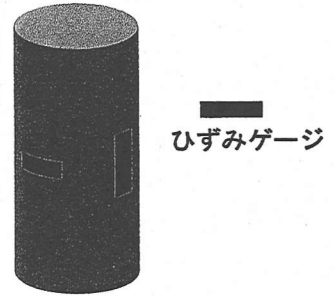


図-2 ひずみゲージ位置

表-1 既往の研究におけるコンクリートの配合、性質および実験条件

(a) 普通コンクリート<sup>7),8)</sup>

配合	記号	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					スランプ (cm)	空気量 (%)
				W	C	S	G	Ad		
OC		52.0	43.0	165	318	796	1068	0.095	14.5	8.0
	C: 普通ポルトランドセメント S: 陸砂 G: 砕石 2005 Ad: AE 剤									

実験条件								
試験環境	供試体寸法 (cm)	載荷荷重	載荷速度 (Hz)	静的強度 (N/mm <sup>2</sup> )	S <sub>max</sub> (%)	S <sub>min</sub> (%)	試験本数	養生方法
乾燥	φ10×20	圧縮	5	33.1	75.0	5.0	6	2ヶ月間 20℃水中 ↓ 8ヶ月間 気中
					70.0	5.0	7	
					65.0	5.0	6	
湿潤	φ10×20	圧縮	5	33.8	65.0	5.0	6	7ヶ月間 20℃水中
					60.0	5.0	7	
					55.0	5.0	6	
					50.0	5.0	7	
					45.0	5.0	7	

(b) シリカフューム 20%使用コンクリート<sup>3),6)</sup>

配合	記号	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						スランプ (cm)	空気量 (%)	
				W	C	SI	S	G	Ad1			Ad2
SI20		50.0	42.0	170	272	68	752	1034	0.135	1.7	10.5	5.5
				165	264	66	761	1048	0.099	1.65	11.4	3.4
				C: 普通ポルトランドセメント SI: シリカフューム S: 海砂 G: 砕石 2005 Ad1: AE 剤 Ad2: 減水剤								

実験条件								
試験環境	供試体寸法 (cm)	載荷荷重	載荷速度 (Hz)	静的強度 (N/mm <sup>2</sup> )	S <sub>max</sub> (%)	S <sub>min</sub> (%)	試験本数	養生方法
湿潤	φ10×20	圧縮	10	52.3 52.4	60.0	3.5	10	4ヶ月間 20℃水中
					55.0	3.5	8	
					50.0	3.5	9	
					45.0	3.5	10	

した。水中における疲労試験は、図-1に示すようなアクリル水槽内に供試体を水没させて行った。供試体に載荷した荷重は、載荷速度 4 Hz から 10 Hz の正弦波とした。図に示す実験システムでは、疲労試験中に供試体内から溶出するカルシウムおよびシ

リコンの定量を行うために、図のように別水槽を設けポンプにより水を循環させた。水の採取は別水槽において行った。また、圧縮疲労試験を行った供試体には試験中のひずみ変化を測定するために、図-2に示すようにひずみゲージを供試体軸方向に 2 枚、

表-1 既往の研究におけるコンクリートの配合, 性質および実験条件 (つづき)

(c) シリカフェーム20%使用SECコンクリート<sup>3)</sup>

配合	記号	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )							スランプ (cm)	空気量 (%)
				W	C	SI	S	G	Ad1	Ad2		
配合	SISEC	50.0	42.0	145	232	58	799	1100	0.15	1.5	10.5	3.0
				C: 普通ポルトランドセメント SI: シリカフェーム S: 海砂 G: 砕石 2005 Ad1: AE 剤 Ad2: 減水剤 SEC 工法を適用し 2 バッチ 製作								

実験条件

試験環境	供試体寸法 (cm)	載荷荷重	載荷速度 (Hz)	静的強度 (N/mm <sup>2</sup> )	S <sub>max</sub> (%)	S <sub>min</sub> (%)	試験本数	養生方法	
湿潤	φ10×20	圧縮	10	48.1	65.0	3.0	9	4ヶ月間 20°C水中	
					49.8	56.4	3.0		10
						47.7	3.0		14

(d) 真空処理コンクリート<sup>4)</sup>

配合	記号	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					スランプ (cm)	空気量 (%)
				W	C	S	G	Ad		
配合	VP	48.5	41.5	149	307	783	1104	0.768	8.0	5.0
				C: 普通ポルトランドセメント S: 陸砂 G: 砕石 2005 Ad: AE 減水剤 屋外においてコンクリート床版に真空処理工法を適用						

実験条件

試験環境	供試体寸法 (cm)	載荷荷重	載荷速度 (Hz)	静的強度 (N/mm <sup>2</sup> )	S <sub>max</sub> (%)	S <sub>min</sub> (%)	試験本数	養生方法
湿潤	φ10×20 抜取コア	圧縮	5~8	40.8	70.0	5.0	9	2~3ヶ月間屋外 ↓ 1ヶ月 15°C水中
					60.0	5.0	8	
					50.0	5.0	8	

(e) 低発熱型高炉セメント使用コンクリート<sup>9)</sup>

配合	記号	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					スランプ (cm)	空気量 (%)
				W	C	S	G	Ad		
配合	LBFS	50.0	44.0	150	300	823	1039	0.06	8.0	4.3
				C: 低発熱型高炉セメント S: 海砂 G: 砕石 2005 Ad: AE 剤						

実験条件

試験環境	供試体寸法 (cm)	載荷荷重	載荷速度 (Hz)	静的強度 (N/mm <sup>2</sup> )	S <sub>max</sub> (%)	S <sub>min</sub> (%)	試験本数	養生方法
湿潤	φ7.5×15	圧縮	4~9	44.2	65.0	7.0	16	8ヶ月 20°C水中
					55.0	7.0	16	
					45.0	7.0	17	

周方向に 2 枚貼り付けた。ひずみの計測は、荷重の繰返し載荷を止めることなく動ひずみ計を用いコンピュータ制御により自動的に行った。

(2) コンクリートの概要

コンクリートの疲労寿命は同一の条件下において試験を行っても大きくばらつくため、疲労強度は統計的な処理を行い求めている。統計的処理により疲労強度を算定する場合においても、徳光等<sup>10)</sup>は最大

応力を 3 段階以上に設定し試験するのがよいとしている。よって、ここでは最大応力を 3 段階以上に設定した試験による疲労強度を示すこととする。著者等が既往の研究で最大応力を 3 段階以上に設定し疲労試験を行ったコンクリートの配合、性質および実験条件を表-1 に示す。表中の静的強度は疲労試験開始時における値、S<sub>max</sub> および S<sub>min</sub> は載荷した最大応力比および最小応力比である。使用したシリカフェームは平均粒径が約 0.2 μm、比表面積が約 18 m<sup>2</sup>/g、

表一 既往の研究におけるコンクリートの配合, 性質および実験条件 (つづき)

(f) 低発熱型高炉セメント, シリカフューム, フライアッシュ使用コンクリート<sup>9)</sup>

配合	記号	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )								スランプ (cm)	空気量 (%)
				W	C	SI	FA	S	G	Ad1	Ad2		
配合	LSIFA	50.0	44.0	150	240	30	30	815	1028	0.24	3.3	14.0	5.5
		C: 低発熱型高炉セメント SI: シリカフューム FA: フライアッシュ S: 海砂 G: 砕石 2005 Ad1: AE 剤 Ad2: 高性能減水剤											

実験条件								
試験環境	供試体寸法 (cm)	載荷荷重	載荷速度 (Hz)	静的強度 (N/mm <sup>2</sup> )	S <sub>max</sub> (%)	S <sub>min</sub> (%)	試験本数	養生方法
湿潤	φ7.5×15	圧縮	4~9	41.2	64.0	4.5	16	3ヶ月 20°C水中
					55.0	4.5	16	
					46.0	4.5	17	

(g) 早強ポルトランドセメント, 高炉スラグ微粉末, 高炉スラグ細骨材使用高強度コンクリート<sup>5), 6)</sup>

配合	記号	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )							スランプ (cm)	空気量 (%)
				W	C	BF	S	SS	G	Ad		
配合	NEM	41.0	44.0	171	209	209	541	278	996	1.7	8.0	1.9
		C: 早強ポルトランドセメント BF: 高炉スラグ微粉末 S: 海砂 SS: 高炉スラグ細骨材 G: 砕石 1505 Ad: 高性能減水剤										

実験条件								
試験環境	供試体寸法 (cm)	載荷荷重	載荷速度 (Hz)	静的強度 (N/mm <sup>2</sup> )	S <sub>max</sub> (%)	S <sub>min</sub> (%)	試験本数	養生方法
湿潤	φ7.5×15	圧縮	5~8	75.5	70.0	3.0	7	3ヶ月 20°C水中
					60.0	3.0	9	
					50.0	3.0	8	

表二 コンクリートおよびモルタルの配合, 性質および実験条件

(a) シリカフューム 10%使用コンクリート

配合	記号	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						スランプ (cm)	空気量 (%)
				W	C	SI	S	G	Ad		
配合	SI10	55.0	42.0	172	281	31	785	1044	0.055	14.5	3.7
		C: 普通ポルトランドセメント SI: シリカフューム S: 海砂 G: 砕石 2005 Ad: AE 剤									

実験条件								
試験環境	供試体寸法 (cm)	載荷荷重	載荷速度 (Hz)	静的強度 (N/mm <sup>2</sup> )	S <sub>max</sub> (%)	S <sub>min</sub> (%)	試験本数	養生方法
湿潤	φ10×20	圧縮	6~8	49.9	60.0	3.0	6	3ヶ月間 20°C水中
					55.0	3.0	6	
					50.0	3.0	7	
					45.0	3.0	9	

SiO<sub>2</sub>含有率が約90%のもの, 高炉スラグ微粉末は比表面積が約8,000 cm<sup>2</sup>/gのもの, フライアッシュは比表面積が約4,000 cm<sup>2</sup>/gのものである。また, 真空処理工法および練混ぜ方法として SEC 工法を採用したコンクリートについても試験を行っている。これらの混和材の使用および SEC 工法等の採用はコンクリート組織の緻密化あるいは骨材界面における遷移帯の強化を目的としたものであり, 疲労強度

の改善を期待したものである。以後の説明では, それぞれのコンクリートを表に示している記号で表すこととする。なお, 各コンクリートの疲労試験開始時における静的圧縮強度は, 33.1 N/mm<sup>2</sup>から75.5 N/mm<sup>2</sup>であり, 広範囲なものとなっている。

本研究において新たに行った疲労試験は, シリカフュームを用いたコンクリートの水中圧縮疲労試験および SEC 工法を適用したコンクリートの水中圧

表-2 コンクリートおよびモルタルの配合、性質および実験条件（つづき）

(b) SECコンクリート

配合	記号	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					スランプ (cm)	空気量 (%)
				W	C	S	G	Ad		
SEC		53.1	45.0	154	290	857	1040	0.055	8.5	4.6
	C: 普通ポルトランドセメント S: 陸砂 G: 砕石 2005 Ad: AE 剤 SEC工法の適用									

実験条件								
試験環境	供試体寸法 (cm)	載荷荷重	載荷速度 (Hz)	静的強度 (N/mm <sup>2</sup> )	S <sub>max</sub> (%)	S <sub>min</sub> (%)	試験本数	養生方法
湿潤	φ10×20	圧縮	5~7	46.2	60.0	3.0	5	2ヶ月間 20°C水中
					55.0	3.0	6	
					50.0	3.0	7	
					45.0	3.0	6	

(c) 早強ポルトランドセメント、高炉スラグ微粉末、高炉スラグ細骨材使用高強度モルタル

配合	記号	W/B (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					フロー値	空気量 (%)
			W	C	BF	S	Ad		
NEMM		44.6	296	332	332	1307	2.7	174	2.0
	C: 早強ポルトランドセメント BF: 高炉スラグ微粉末 S: 高炉スラグ細骨材 Ad: 高性能減水剤								

実験条件								
試験環境	供試体寸法 (cm)	載荷荷重	載荷速度 (Hz)	静的強度 (N/mm <sup>2</sup> )	S <sub>max</sub> (%)	S <sub>min</sub> (%)	試験本数	養生方法
湿潤	φ7.5×15	圧縮	4~7	78.3	70.0	3.0	8	3ヶ月間 20°C水中
					60.0	3.0	8	
					50.0	3.0	9	

(d) 普通コンクリート

配合	記号	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					スランプ (cm)	空気量 (%)
				W	C	S	G	Ad		
OCB		48.3	41.2	156	323	770	1105	0.065	11.0	3.8
	C: 普通ポルトランドセメント S: 陸砂 G: 砕石 2005 Ad: AE 剤									

実験条件								
試験環境	供試体寸法 (cm)	載荷荷重	載荷速度 (Hz)	静的強度 (N/mm <sup>2</sup> )	S <sub>max</sub> (%)	S <sub>min</sub> (%)	試験本数	養生方法
湿潤	10×10×50	曲げ	5	6.22	80.0	10.0	6	3ヶ月間 20°C水中
					70.0	10.0	5	
					60.0	10.0	6	

縮疲労試験、高炉スラグ微粉末を用いた高強度モルタルの水中圧縮疲労試験、普通コンクリートの水中曲げ疲労試験、普通コンクリートの気中・水中割裂引張疲労試験、モルタルの気中・水中割裂引張疲労試験である。表-2にそれらの配合、性質および実験条件を示す。製作に使用した混和材は既往の研究において使用したものと同様であり、シリカフェームは平均粒径が約 0.2 μm、比表面積が約 18 m<sup>2</sup>/g、SiO<sub>2</sub>含有率が約 90%のもの、高炉スラグ微粉末は比表面積が約 8,000 cm<sup>2</sup>/g のものである。また、高炉

スラグ細骨材は最大粒径が 1.2 mm のものである。シリカフェームを用いたコンクリートおよび高炉スラグ微粉末を用いたモルタルの静的強度は、それぞれ 49.9 N/mm<sup>2</sup>および 78.3 N/mm<sup>2</sup>であり、いずれも高強度の性質をもっている。表-1に示した著者等の既往の研究では、全て一軸圧縮荷重を作用させて試験を行い圧縮疲労特性のみを検討していたが、本研究では、曲げ疲労試験および割裂引張疲労試験も行い、その結果についても示している。曲げ疲労試験は、寸法が 10×10×50 cm の角柱供試体を用い、

表-2 コンクリートおよびモルタルの配合、性質および実験条件（つづき）

(e) 普通コンクリート

配合	記号	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					スランブ (cm)	空気量 (%)
				W	C	S	G	Ad		
配合	OCT	50.0	42.0	156	313	811	1080	0.055	8.5	4.9
		C: 普通ポルトランドセメント S: 海砂 G: 砕石 2005 Ad: AE 剤								

実験条件								
試験環境	供試体寸法 (cm)	載荷荷重	載荷速度 (Hz)	静的強度 (N/mm <sup>2</sup> )	S <sub>max</sub> (%)	S <sub>min</sub> (%)	試験本数	養生方法
乾燥	φ10×20	割裂引張	6~10	3.92	85.0	6.0	12	3ヶ月間 20℃水中 ↓ 1ヶ月間 気中
					80.0	6.0	12	
					75.0	6.0	12	
					70.0	6.0	12	
湿潤	φ10×20	割裂引張	6~10	3.53	75.0	6.0	12	3ヶ月間 20℃水中
					65.0	6.0	11	
					55.0	6.0	12	
					50.0	6.0	12	

(f) モルタル

配合	記号	W/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				フロー値	空気量 (%)
			W	C	S	Ad		
配合	MT	50.0	263	526	1366	0.093	240	5.7
		C: 普通ポルトランドセメント S: 海砂 Ad: AE 剤						

実験条件								
試験環境	供試体寸法 (cm)	載荷荷重	載荷速度 (Hz)	静的強度 (N/mm <sup>2</sup> )	S <sub>max</sub> (%)	S <sub>min</sub> (%)	試験本数	養生方法
乾燥	φ10×20	割裂引張	6~10	4.61	85.0	6.0	10	2ヶ月間 20℃水中 ↓ 1ヶ月間 気中
					80.0	6.0	10	
					75.0	6.0	11	
					70.0	6.0	11	
湿潤	φ7.5×15	割裂引張	6~10	3.83	80.0	6.0	9	2ヶ月間 20℃水中
					70.0	6.0	11	
					60.0	6.0	9	
					55.0	6.0	9	

スパンを 30 cm として三等分二点載荷で行った。その結果、全ての供試体は曲げスパンにおいて曲げ破壊を生じた。

(3) コンクリートの疲労強度

コンクリートの疲労試験において疲労強度に影響する要因として載荷速度や最小応力の大きさ等がある。載荷速度の影響に関しては、Kesler<sup>11)</sup>および井上等<sup>12)</sup>の結果より、本研究において採用した 4 Hz から 10 Hz の範囲では極めて小さいものと考えられる。また、最小応力の影響については、Nordby<sup>13)</sup>および松下・近田<sup>14)</sup>の結果より、本研究における 10 % 以下の最小応力比では、修正グッドマン関係が成立つものと考えられる。そこで本論文では、最小応力の影響を考慮して疲労強度の比較検討を行うこととする。

疲労強度を求めるための S-N 関係を表す方法には、縦軸を最大応力比で表す方法、応力振幅比で表す方法、さらに最小応力の影響を考慮する方法等がある。また、S-N 回帰式を求める場合に、疲労寿命が 1 回に対して応力比が 1 になるように特定点を設ける方法、および特定点を設けない方法があり、著者らの既往の研究においても統一した表現方法を用いてはいなかった。また、疲労強度に影響する最小応力についても統一した値を採用してはいなかった。しかしながら、疲労強度を比較するためには、最小応力の影響を考慮し統一された表現方法により S-N 関係を求める必要がある。そこで本論文では、土木学会コンクリート標準示方書<sup>15)</sup>において採用されているグッドマン型により表すこととする。各応力比に対する疲労寿命の算定には生存確立の概念を導入

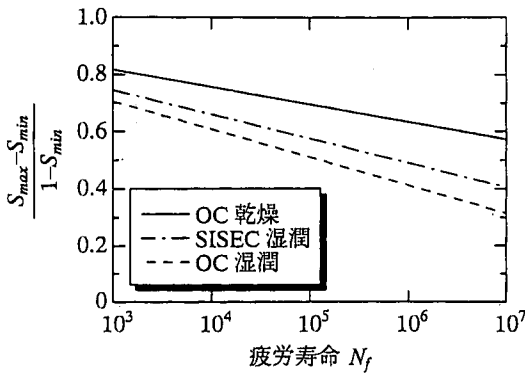


図-3 圧縮疲労の S-N 線図

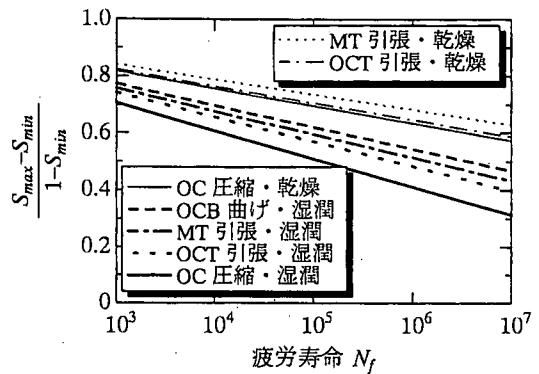


図-4 圧縮および曲げ、引張疲労の S-N 線図

した。疲労寿命分布が対数正規分布に従うものと仮定し、供試体の疲労寿命と生存確率の関係から、各応力比に対する生存確率が 50 %である疲労寿命を算定している。生存確率は次式により求めた。

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

ここで、 $p$ ：生存確率

$n$ ：供試体総本数

$r$ ：疲労寿命を小さい順に並べたときの  
序数

このようにして算定した疲労寿命を用いて S-N 回帰直線を求めると図-3 および 4 のようになる。図中の  $S_{max}$  および  $S_{min}$  は最大応力比および最小応力比であり、次式により求められる。

$$\begin{aligned} S_{max} &= \sigma_{max} / f_c' \\ S_{min} &= \sigma_{min} / f_c' \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 $\sigma_{max}$ ：作用最大応力

$\sigma_{min}$ ：作用最小応力

$f_c'$ ：静的基準強度

図-3 は圧縮疲労試験の結果であり、普通コンクリート(OC)の結果および湿潤環境下で疲労強度が最大であったシリカフェーム使用 SEC コンクリート(SISEC)の結果を示している。図-4 は、普通コンクリートの圧縮疲労試験結果、曲げ疲労試験結果、割裂引張疲労試験結果、および普通モルタルの割裂引張疲労試験結果である。また、表-3 に全試験結果の回帰直線式および 200 万回疲労強度、コンクリート標準示方書設計編<sup>15)</sup>に従い求めた  $K$  の値を示す。表に示している疲労強度は、完全片振り载荷に対する 200 万回疲労強度である。一般に、疲労強度は静的強度に対する比として表現されることが多い。しかしながら、強度の絶対値と混同される場合があるため、以後、静的強度に対する比を疲労強度比、

表-3 S-N 回帰式、200 万回疲労強度および  $K$  値

(a) 圧縮疲労

種類	試験環境	回帰式	疲労強度 (%)	$K$
OC	乾燥	$S = 1.0 - 0.061 \log N_f$	61	16.3
	湿潤	$S = 1.0 - 0.098 \log N_f$	38	10.2
SI20	湿潤	$S = 1.0 - 0.087 \log N_f$	45	11.4
SISEC	湿潤	$S = 1.0 - 0.085 \log N_f$	47	11.7
VP	湿潤	$S = 1.0 - 0.088 \log N_f$	44	11.3
LBFS	湿潤	$S = 1.0 - 0.099 \log N_f$	38	10.1
LSIFA	湿潤	$S = 1.0 - 0.097 \log N_f$	39	10.3
NEM	湿潤	$S = 1.0 - 0.091 \log N_f$	43	11.0
SI10	湿潤	$S = 1.0 - 0.098 \log N_f$	38	10.2
SEC	湿潤	$S = 1.0 - 0.090 \log N_f$	43	11.2
NEMM	湿潤	$S = 1.0 - 0.088 \log N_f$	44	11.3

(b) 曲げ疲労

種類	試験環境	回帰式	疲労強度 (%)	$K$
OCB	湿潤	$S = 1.0 - 0.076 \log N_f$	52	13.2

(c) 割裂引張疲労

種類	試験環境	回帰式	疲労強度 (%)	$K$
OCT	乾燥	$S = 1.0 - 0.059 \log N_f$	63	16.9
	湿潤	$S = 1.0 - 0.086 \log N_f$	46	11.6
MT	乾燥	$S = 1.0 - 0.053 \log N_f$	67	18.9
	湿潤	$S = 1.0 - 0.081 \log N_f$	49	12.4

$$S = (S_{max} - S_{min}) / (1 - S_{min})$$

絶対値を疲労強度と表現することとする。

気中圧縮疲労強度と水中圧縮疲労強度の結果を比較すると、気中では静的圧縮強度の 61 %であるのに対して水中では 38 %から 47 %となっており、水中疲労強度比の方が気中疲労強度比より 14 %から 23 %小さくなっている。水の存在が強度に及ぼす影

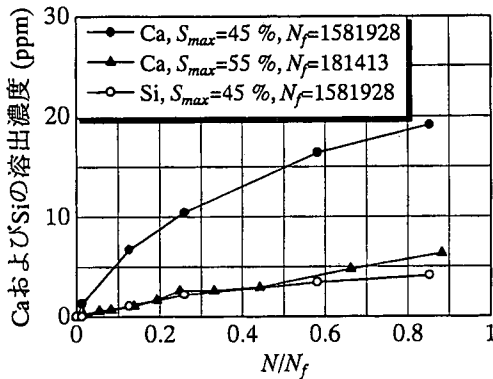


図-5 カルシウムおよびシリコンの溶出濃度

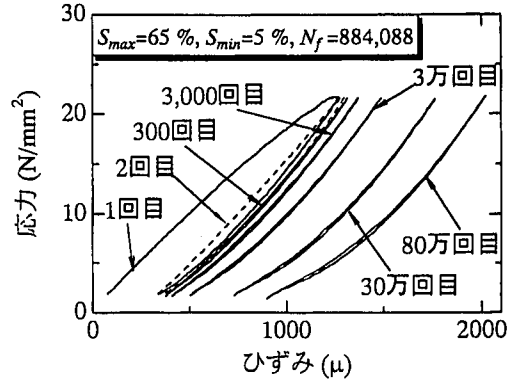


図-6 応力-ひずみ曲線

響として、乾燥状態のコンクリートに吸水させ湿潤状態にすると静的圧縮強度が小さくなることが知られている<sup>16)</sup>。この水の影響が圧縮疲労強度に静的圧縮強度と同じように作用した場合、圧縮疲労強度比は湿潤状態であっても乾燥状態であっても同様な結果を示すはずである。しかしながら、本研究の結果では水中湿潤状態において圧縮疲労強度比が小さくなっている。このことは、水が疲労強度低下に及ぼす影響は、静的強度の低下に及ぼす影響よりも大きいことを示している。また、シリカフェーム等の混和材を用いたコンクリートおよび SEC 工法等を適用したコンクリートの水中における圧縮疲労強度比は、普通コンクリートと同程度な場合もあるが、最大で 9 %大きくなっており、セメントペーストの緻密化あるいは骨材界面の遷移帯の改質により、疲労強度改善の可能性があることがわかる。一方、高強度コンクリートの圧縮疲労強度比は小さくなるという報告<sup>17)</sup>があるが、本研究における高炉スラグ微粉末を用いた高強度コンクリート(NEM, 静的強度:75.5 N/mm<sup>2</sup>)およびモルタル(NEMM, 静的強度:78.3 N/mm<sup>2</sup>)の湿潤状態における圧縮疲労強度比は 43 %および 44 %であり、普通コンクリートの結果よりも若干大きくなっている。

水中における曲げ疲労強度は静的曲げ強度の 52 %であり、普通コンクリートの水中圧縮疲労強度比よりも 14 %大きくなっていることがわかる。また、湿潤状態のコンクリートおよびモルタルの引張疲労強度比は 46 %および 49 %であり、圧縮疲労強度比よりも 8 %および 11 %大きくなっている。このように水中における曲げ疲労強度比および引張疲労強度比が、圧縮疲労強度比よりも 10 %程度大きくなるという結果から、水中における疲労強度の低下に圧縮応力が大きな影響を及ぼしているということが推察できる。乾燥状態のコンクリートおよびモルタルの引張疲労強度比は 63 %および 67 %であり、圧縮疲

労強度比よりも 2 %および 6 %大きくなっている。

コンクリート標準示方書設計編<sup>15)</sup>では、連続してあるいはしばしば水で飽和される場合には  $K$  を 10、その他一般の場合には 17 としている。本研究の結果では水中圧縮疲労の  $K$  は 10.1 から 11.7、気中圧縮疲労の  $K$  は 16.3 であり、湿潤状態に対する示方書の  $K$  は本試験結果の下限、乾燥状態に対しては本試験結果より若干大きな値であることがわかる。

#### (4) 水中疲労でのカルシウムおよびシリコンの溶出

水中における圧縮疲労試験において、コンクリート内部からカルシウムおよびシリコンが溶出するのが検出された。これらの溶出量の定量は、水槽内の水を採取し原子吸光光度分析装置によって行った。図-5に、普通コンクリート(OC)において  $S_{max}$  を 45 %および 55 %として水中疲労試験した場合のカルシウムおよびシリコンの溶出濃度を示す。シリコンについては溶出量が少なく、荷重載荷回数が少ない場合に定量が困難であったため、 $S_{max}$  が 45 %の場合について示している。また、横軸は荷重載荷回数 ( $N$ ) を疲労寿命 ( $N_f$ ) で除した形で示している。図より、繰返し載荷初期からカルシウムおよびシリコンが溶出していることがわかる。 $S_{max}$  が 45 %の場合の溶出速度は、荷重の繰返しに連れ減少していることがわかる。また、 $S_{max}$  が 55 %の場合にはほぼ一定の溶出速度になっている。ここで検出されたカルシウムおよびシリコンは、毛細管水に溶解するカルシウムおよびシリコンイオンが荷重の載荷除荷による毛細管水の移動により溶出したもの、および毛細管水の移動により浸食された C-S-H および水酸化カルシウムが溶出したものではないかと考えられる。

#### (5) ひずみおよび弾性係数の変化

繰返し圧縮載荷に伴うひずみの変化は、コンクリートの種類によらずほぼ同様な傾向を示したことよ



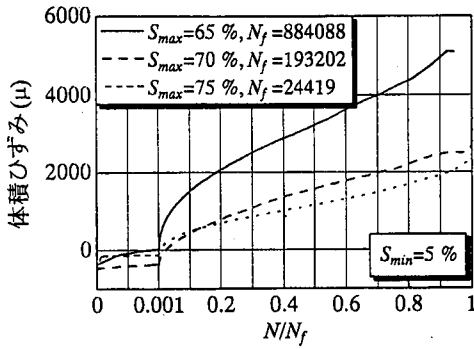


図-7 気中疲労時の体積ひずみの変化

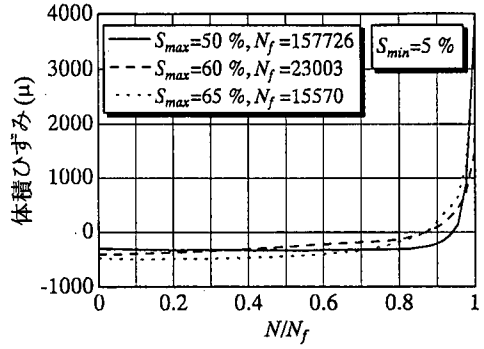


図-8 水中疲労時の体積ひずみの変化

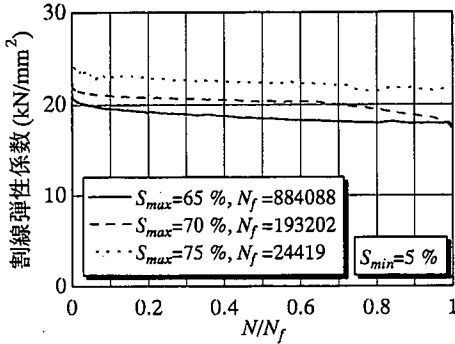


図-9 気中疲労時の除荷時割線弾性係数の変化

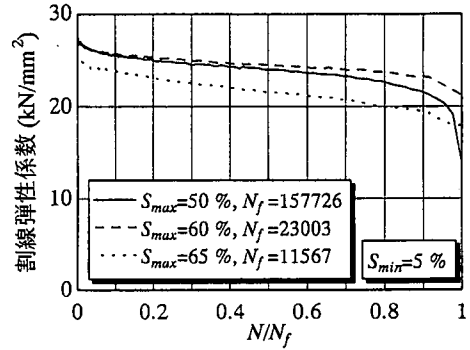


図-10 水中疲労時の除荷時割線弾性係数の変化

り、普通コンクリート(OC)について検討を行う。図-6は、乾燥環境下において圧縮疲労試験した場合の応力-載荷軸方向ひずみ関係の例を示している。初載荷時において載荷経路と除荷経路が大きく異なり、大きな残留ひずみを生じていることがわかる。この残留ひずみは荷重の繰返しと共に増加している。また、2回載荷以降の応力-ひずみ関係は下に凸の曲線になっており、荷重の繰返しと共に傾きが減少し、さらに非線形性も強くなっていることがわかる。

図-7および8は、繰返し載荷に伴う体積ひずみの変化であり、各応力比において平均的な挙動を示した供試体の結果である。図に示した体積ひずみは最大応力作用時における値である。横軸は荷重載荷回数(N)を疲労寿命( $N_f$ )で除した形で示している。また、図-7の気中疲労時の結果については、載荷初期の変化が分かりやすいように $N/N_f$ が0.001までの範囲を横軸方向に拡大して示している。初載荷時ひずみに対する繰返し載荷によるひずみの変化割合は軸方向ひずみよりも横ひずみの方が大きく、体積ひずみの変化には横ひずみの変化が反映されていた。気中疲労試験の結果では、体積ひずみが載荷初期に負の値(収縮)から正の値(膨張)へ移行し、 $N/N_f$ が0.1から0.2以降はほぼ一定の増加率を示し、 $N/N_f$ が0.8から0.9において若干傾きが大きくなり破壊

に至っている。これは、Holmenによる軸方向ひずみの結果<sup>18)</sup>と同様である。それに対して水中疲労試験の結果では、疲労寿命の短い場合に荷重の繰返しに伴う収縮量の減少が示されている。しかしながら、疲労寿命が比較的長い場合には、横ひずみの増加が軸方向ひずみの増加のほぼ1/2であったことより、 $N/N_f$ が0.85程度まで一定の収縮ひずみを示している。この収縮ひずみの減少速度は $N/N_f$ が0.6から0.8において若干大きくなり、 $N/N_f$ が0.85から0.95において膨張ひずみへ移行すると共に急増し破壊に至っている。体積ひずみの収縮から膨張側への変化を、コンクリートの微細ひび割れの増加に伴う体積膨張と考えると、気中疲労では、載荷初期に比較的多くの微細ひび割れが発生するものの破壊には至らず、その後徐々にひび割れが進行し破壊に達するといえる。一方、水中疲労では、破壊直前まで微細ひび割れの進行はほとんど無く、ひび割れが発生し始めると、急速にひび割れが進行し破壊に至るといえる。

図-9および10は、除荷時の載荷軸方向ひずみ振幅と作用応力振幅から求めた除荷時における割線弾性係数の変化であり、各応力比において平均的な挙動を示した供試体の結果である。図より、弾性係数は荷重の繰返しに伴い減少していることがわかる。その減少率は、 $N/N_f$ が0.05程度までは比較的大きく、

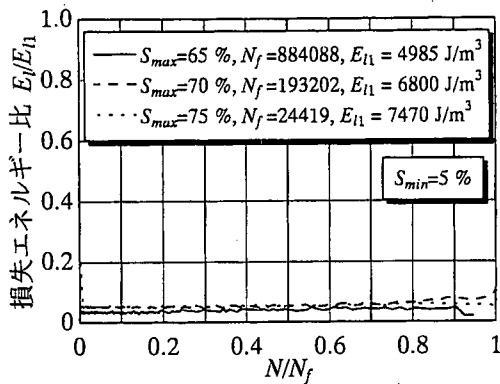


図-11 気中疲労時の損失エネルギーの変化

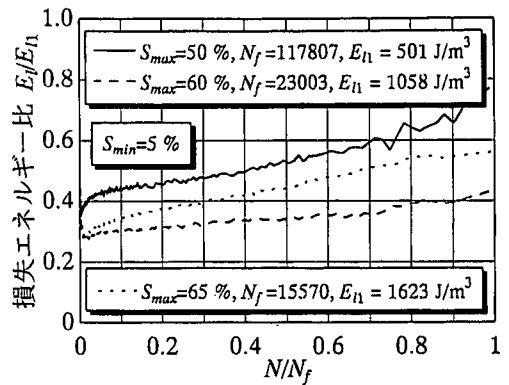


図-12 水中疲労時の損失エネルギーの変化

その後ほぼ直線的に減少している。水中疲労時では、 $N/N_f$ が0.8から0.9以上で弾性係数の減少割合が大きくなっていることがわかる。この減少率の増加時期は、体積ひずみの膨張側への移行時期とほぼ合致している。弾性係数の変化は、コンクリートの劣化の指標として用いられることもある。そこで、弾性係数の変化から疲労によるコンクリートの劣化を考察すると、気中疲労における劣化の進行速度は繰返し初期に若干大きいものの、破壊までほぼ一定の速度で劣化が進行するといえる。また、水中疲労における劣化は気中疲労と同様に繰返し初期より起こり、 $N/N_f$ が0.8から0.9以降では劣化速度が増加するといえる。コンクリートの劣化要因が、微細ひび割れの発生によるものと考えた場合、気中疲労での弾性係数による劣化の考察は、微細ひび割れ進行の考察とほぼ対応する。しかしながら、水中疲労の劣化に関する考察は、体積ひずみによるひび割れ進行の考察と矛盾する。この矛盾の原因をコンクリート中に存在する水によるものと考え、水中疲労での  $N/N_f$  が0.6から0.8以前における劣化は、主に毛細管空隙内に存在する水が荷重の載荷除荷により移動し、その移動によりC-S-Hおよび水酸化カルシウム等が侵食あるいは溶出されたために生じたのではないかと推察される。

#### (6) 損失エネルギー

図-6に示したように、コンクリートの応力-ひずみ曲線は荷重載荷時と除荷時において異なる経路をたどりヒステリシスループを描く。このヒステリシスループの面積は、単位体積当たりの非回復性損失エネルギー( $E_l$ )と考えることができる。図-11および12は、普通コンクリート(OC)の繰返し載荷に伴う損失エネルギー( $E_l$ )の変化を初載荷時の値( $E_{l1}$ )に対する比で示している。横軸は荷重載荷回数( $N$ )を疲労寿命( $N_f$ )で除した形で示している。図の損失エネルギー

の変化は、各応力比において平均的な挙動を示した供試体の結果である。いずれの場合においても、2回目載荷以降、損失エネルギーが減少し、気中疲労では0.05程度のエネルギー比で破壊時までほぼ一定値を保っている。水中疲労では2回目載荷以降0.3から0.4程度のエネルギー比に減少し、その後徐々に増加していることがわかる。気中疲労試験と水中疲労試験において作用最大応力がほぼ等しい  $S_{max}$  が65%である場合の損失エネルギーを比較すると、気中疲労の初載荷時では約5000 J/m<sup>3</sup>であるのに対して水中疲労では約1600 J/m<sup>3</sup>であり約1/3になっている。しかしながら、2回目載荷以後の損失エネルギーは、気中疲労では約200 J/m<sup>3</sup>であるのに対して水中疲労では500 J/m<sup>3</sup>から900 J/m<sup>3</sup>であり2倍以上になっている。したがって、水中疲労の方が1回の荷重載荷による損失エネルギーが大きいことになる。この損失エネルギーがコンクリートの劣化のために消費されたものと仮定すると、気中疲労の損失エネルギーは主に微細ひび割れの形成のために消費されたものと考えられる。また、水中疲労では、 $N/N_f$ が0.6から0.8までは主に毛細管空隙内における水の移動、水の移動によるC-S-Hおよび水酸化カルシウム等の浸食のために消費され、その後は微細ひび割れの形成のためにも消費されたものと考えられる。

図-13に普通コンクリート(OC)の疲労寿命と累積損失エネルギーの関係を示す。累積損失エネルギーとは、図-11および12において示した損失エネルギーの破壊時までの総和であり、載荷回数と損失エネルギーの関係を数値積分して求めた。気中および水中疲労試験結果共にほぼ直線状に分布しており、疲労寿命が長いほど破壊時までの累積損失エネルギーが多くなっていることがわかる。また、気中疲労試験結果と水中疲労試験結果を比較すると、全範囲にわたってデータ点が重なっており、疲労寿命と累積損失エネルギーの関係は試験環境によらずほぼ等

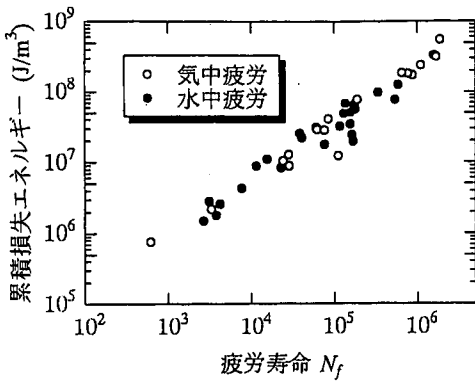


図-13 疲労寿命と累積損失エネルギーの関係

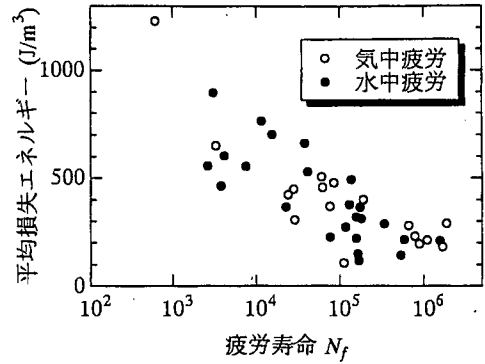


図-14 疲労寿命と平均損失エネルギーの関係

しくなっていることがわかる。次に、図-14に疲労寿命と荷重載荷1サイクル当たりの損失エネルギー（平均損失エネルギー）の関係を示す。平均損失エネルギーは、累積損失エネルギーを疲労寿命で除すことにより求めた。気中疲労試験結果と水中疲労試験結果を比較すると、累積損失エネルギーがほぼ等しいことより、平均損失エネルギーについてもほぼ同様な分布を示す結果となった。また、疲労寿命の対数値と1サイクル当たりの損失エネルギーは、ほぼ直線関係を示しており、平均損失エネルギーが小さくなると疲労寿命が長くなることがわかる。

### 3. 細孔構造による疲労破壊性状の検討

これまでに行ってきた研究では、コンクリートの疲労破壊性状を、主にひずみの変化から検討してきた。これは、コンクリートが繰返し載荷により損傷を受けると、内部に微細なひび割れが発生し体積および長さが変化すること、ひび割れ発生等のためにエネルギーが消費されることに注目したものである。本論文では新たに、コンクリートにひび割れが発生すると、コンクリート内部の細孔の構造が変化することに注目し、疲労破壊性状を細孔構造の変化から検討した。

#### (1) 試験の概要

疲労試験は、第2章で示した方法により行い、載荷荷重は一軸圧縮とし載荷速度は5 Hzとした。この試験はモルタルを用いて行い、その配合およびフレッシュモルタルの性質、疲労試験開始時における静的圧縮強度を表-4に示す。練混ぜに使用した材料は、セメントとして普通ポルトランドセメント、細骨材として陸砂、混和剤としてAE剤である。試験に用いた供試体は直径10 cmで高さ20 cmの円柱供

表-4 モルタルの配合および性質

W/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
	W	C	S	Ad
52.0	270	521	1306	0.105

Ad:天然樹脂酸塩系 AE 剤 供試体: φ10×20 cm

フロー値	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )
245	5.0	36.9 (乾燥) 35.5 (湿潤)

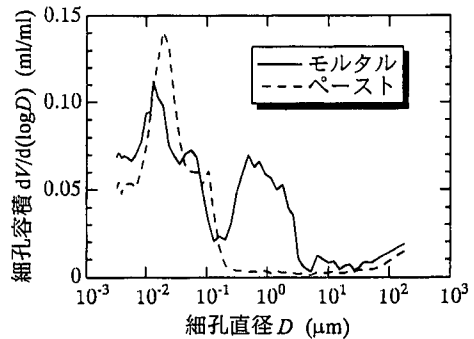
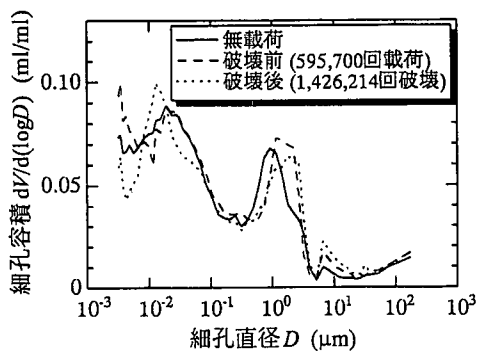


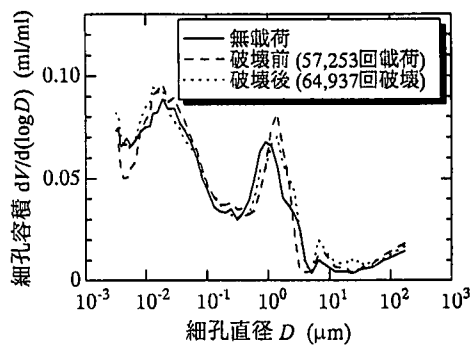
図-15 モルタルとセメントペーストの細孔分布

試体であり、材令1日において型枠から脱型し、その後水中で標準養生を行った。気中で乾燥状態において行う試験に用いた供試体は、2ヶ月間標準養生を行い、その後1ヶ月以上気中において乾燥させたものである。また、水中で湿潤状態において行う試験に用いた供試体は、3ヶ月以上標準養生を行ったものである。

細孔の計測は、無載荷および疲労試験中、疲労破壊後の供試体の中心部から試料を採取し、水銀圧入式のポロシメータ（測定細孔直径：3 nm～340 μm）を用いて行った。疲労試験中の供試体は、体積ひずみの変化から疲労寿命の80%程度の繰返し回数に



(a)  $S_{max}=70\%$ ,  $S_{min}=10\%$



(b)  $S_{max}=75\%$ ,  $S_{min}=10\%$

図-16 気中疲労試験による細孔分布の変化

達したと判断された時点において疲労試験を中断し、細孔測定用の試料とした。また、モルタルの構造的弱点である骨材界面における遷移帯の空隙を特定するために、セメントペーストの細孔の計測を行いモルタルの計測結果と比較検討した。

## (2) 遷移帯における細孔

モルタルにおいて、細骨材とセメントペーストとの界面に形成される遷移帯内の細孔は、直径が 20 nm から 800 nm の毛細管空隙であると報告されている<sup>19)</sup>。しかしながら、その細孔の範囲は配合あるいは養生方法、材齢などによって変わるものと考えられる。そこで、本試験で用いたモルタルの遷移帯内の細孔を特定するために、モルタルとセメントペーストの細孔を測定し比較を行った。セメントペーストは、表-4に示すモルタル配合において細骨材を除いた材料で作製したものである。細孔の分布を図-15に示す。細孔容積は、細孔の累積容積を細孔直径の対数値で微分した形で示している。セメントペーストの細孔容積は、細骨材容積を考慮しモルタルの容積に換算している。図よりセメントペーストとモルタルの細孔分布を比較すると、細孔直径が約 200 nm 以下の分布は、値の大小の差はあるもののほぼ同様であることがわかる。また、セメントペーストでは直径が約 200 nm 以上の細孔がほとんど存在していないのに対して、モルタルでは直径 500 nm 前後をピークとして約 6 μm までの範囲で多くの細孔が存在していることがわかる。また、直径が 6 μm から 20 μm の範囲においても細孔の分布がみられる。この結果から、本実験に用いたモルタルでは、直径が 200 nm から 20 μm の範囲に含まれる細孔が遷移帯中の毛細管空隙であると判断した。

## (3) 気中疲労試験結果および考察

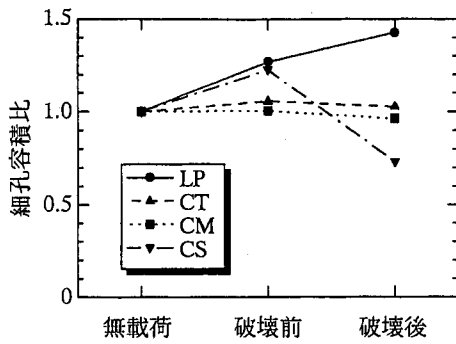
気中において乾燥状態で疲労試験を行ったモルタル

の細孔分布を図-16に示す。最大応力比を 70% および 75%、最小応力比を 10% とした場合の結果である。図中の無載荷とは荷重を載荷していない試料の結果、破壊前とは体積ひずみの変化から疲労寿命の 80% 程度の繰返し回数に達したと判断された試料の結果を意味している。図-16(a)において破壊前(疲労寿命の 80% 程度の荷重載荷回数)と判断された供試体の載荷回数が破壊供試体の 40% 程度となっている。これは疲労寿命のばらつきのためである。なお、荷重載荷条件が同一であれば、細孔分布はほぼ同様であった。それぞれの分布を比較すると、無載荷と破壊前後の分布は異なっており、特に 10 nm から 20 nm および 1 μm から 2 μm、7 μm をピークとする細孔分布が変化していることがわかる。

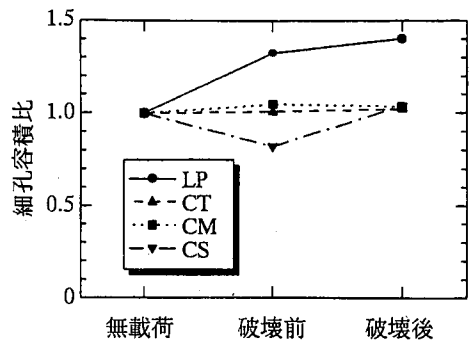
次に、細孔の分布状況および遷移帯の細孔範囲を参考にして以下のように細孔径範囲を分類し、その範囲毎の細孔容積および平均細孔直径の変化について検討を行う。

- ①: 5 nm 以下の範囲 (CS)
- ②: 5 nm から 200 nm の範囲、セメントペースト内の毛細管空隙 (CM)
- ③: 200 nm から 6 μm の範囲、遷移帯の毛細管空隙 (CT)
- ④: 6 μm 以上の範囲、遷移帯の大きな空隙および気泡 (LP)

図-17 および 18 に図-16 の分布から求めた細孔容積および平均細孔直径の変化を示す。縦軸の細孔容積および平均細孔直径は、荷重を載荷していない試料の結果に対する比で示している。繰返し荷重が載荷することにより LP の範囲の細孔容積が増加していることがわかる。この細孔容積は、破壊前には無載荷の約 1.3 倍、破壊後は約 1.4 倍になっている。この範囲における変化は、図-16 においてもわかるように、直径 7 μm をピークとする細孔が増加したことによるものであり、遷移帯におけるひび割れの

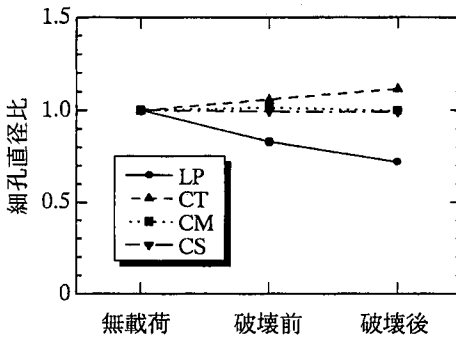


(a)  $S_{max}=70\%$ ,  $S_{min}=10\%$

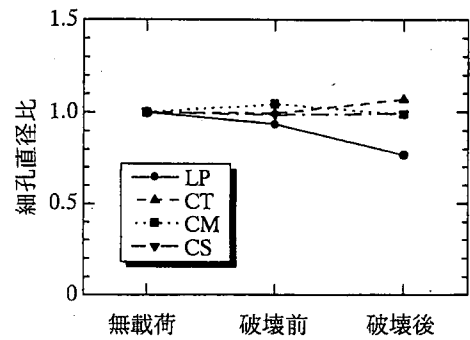


(b)  $S_{max}=75\%$ ,  $S_{min}=10\%$

図-17 気中疲労試験による各範囲の細孔容積の変化



(a)  $S_{max}=70\%$ ,  $S_{min}=10\%$



(b)  $S_{max}=75\%$ ,  $S_{min}=10\%$

図-18 気中疲労試験による各範囲の細孔直径の変化

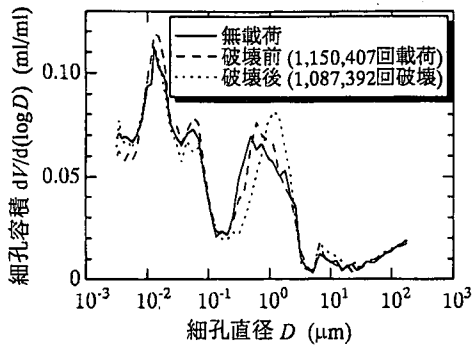
増加を示すものと考えられる。CTの範囲では、細孔容積の変化はあまり見られないが、平均直径の増加が見られる。これは、遷移帯内における小さな空隙が荷重の繰返しにより結合し、より大きな空隙になったためと考えられる。CMの範囲における細孔容積および細孔直径の変化は小さいが、図-16から、ピーク値前後の細孔容積の増加が確認できる。この範囲の空隙はセメントペースト内の毛細管空隙であることより、セメントペースト内においてもひび割れあるいは欠陥が発生していることがわかる。CSの範囲では一定の傾向は見られず、細孔容積および細孔直径の変化は、試料のばらつきによるものと考えられる。

#### (4) 水中疲労試験結果および考察

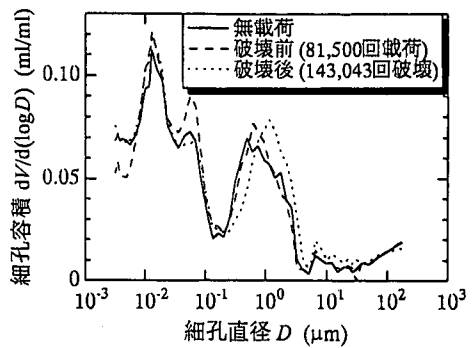
水中湿潤状態において疲労試験を行ったモルタルの細孔分布を図-19に示す。最大応力比を50%および60%、最小応力比を10%とした場合の結果である。図-19(a)において破壊前と判断された供試体の載荷回数が破壊供試体より多くなっている。これは気中疲労と同様に疲労寿命のばらつきのためである。なお、荷重載荷条件が同一であれば、細孔分布はほ

ぼ同様であった。無載荷状態の細孔分布と破壊前の分布を比較すると、破壊前においてピーク値が大きくなる傾向があるが、分布形状はほぼ等しくなっていることがわかる。また、破壊後において遷移帯部分の細孔に大きな変化が生じていることがわかる。

次に、図-17および18と同様にして、細孔範囲毎の細孔容積および平均細孔直径の変化を求めると図-20および21のようになる。CSを除外すると破壊前の結果では細孔容積および細孔直径に大きな変化は見られないことがわかる。このことは、破壊直前と判断された試料においても繰返し載荷により大きな損傷を受けていないことを意味するものと思われる。しかしながら、CMの範囲における細孔容積が若干増加していることが確認でき、ペースト内における若干の損傷が予想される。破壊後においては、LPの範囲における細孔容積の増加が見られる。これは気中試験結果と同様に遷移帯内におけるひび割れが増加した結果と考えられる。また、CTの範囲では細孔直径が無載荷の約1.2倍になっている。これも気中試験と同様に、遷移帯内における小さな空隙が荷重の繰返し載荷により結合し、より大きな空隙になったためと考えられる。

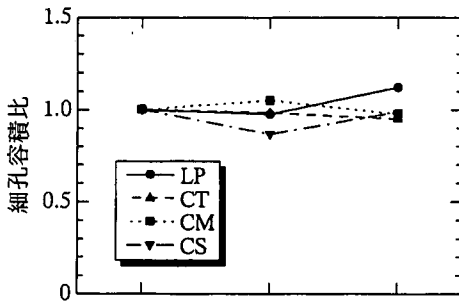


(a)  $S_{max}=50\%$ ,  $S_{min}=10\%$



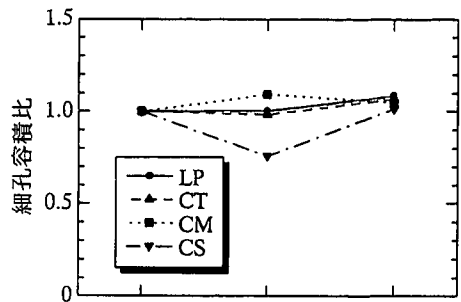
(b)  $S_{max}=60\%$ ,  $S_{min}=10\%$

図-19 水中疲労試験による細孔分布の変化



無載荷 破壊前 破壊後

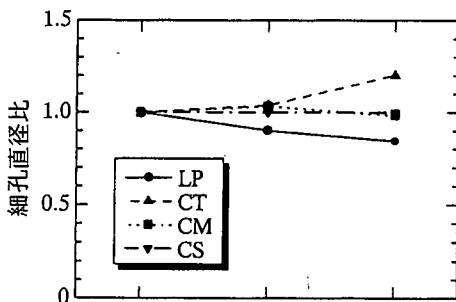
(a)  $S_{max}=50\%$ ,  $S_{min}=10\%$



無載荷 破壊前 破壊後

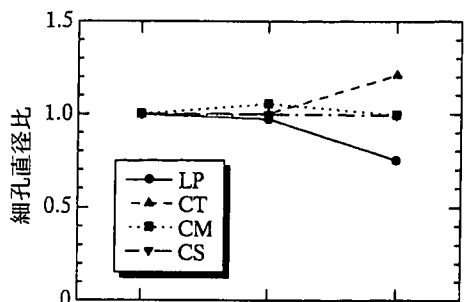
(b)  $S_{max}=60\%$ ,  $S_{min}=10\%$

図-20 水中疲労試験による各範囲の細孔容積の変化



無載荷 破壊前 破壊後

(a)  $S_{max}=50\%$ ,  $S_{min}=10\%$



無載荷 破壊前 破壊後

(b)  $S_{max}=60\%$ ,  $S_{min}=10\%$

図-21 水中疲労試験による各範囲の細孔直径の変化

#### 4. 疲労損傷および疲労破壊性状

繰返し荷重による累積損傷度は、体積ひずみ、弾性係数の変化および Holmen による結果<sup>18)</sup>を参考にすると図-22 および 23 のように表すことが出来るものと考えられる。累積損傷度が 1 に達すると疲労破壊するものと仮定している。この図は、気中疲労におけるコンクリートの損傷は、微細ひび割れの発生によって起こり、水中疲労における損傷は、疲

劣寿命の 60% 程度の荷重繰返し回数までは水の移動により、その後は水の移動および微細ひび割れの発生により起こることを示したものである。

図-22, 23 およびこれまでに示した結果から繰返し荷重を受けるコンクリートの疲労損傷および疲労破壊性状について考察する。気中で乾燥状態にあるコンクリートに繰返し荷重が作用すると、荷重載荷初期より遷移帯においてひび割れが発生し損傷が進む。この損傷速度は繰返し載荷初期において大きく、

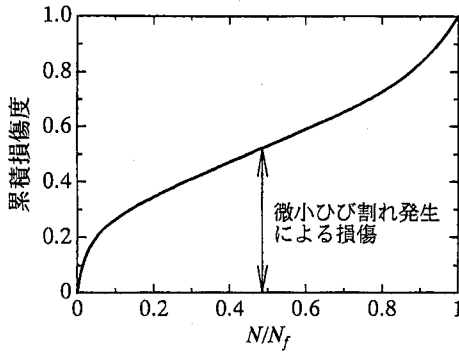


図-22 気中疲労による累積損傷度

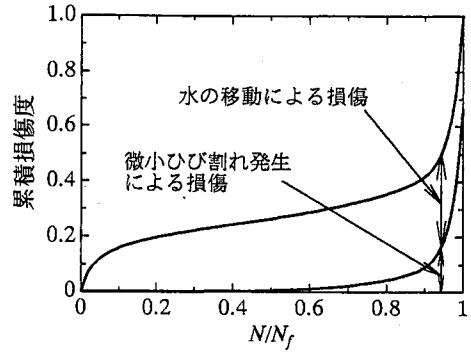


図-23 水中疲労による累積損傷度

徐々に小さくなり疲労寿命の10%から20%程度の繰返し回数以降、一定の進行状態になる。この進行速度は疲労寿命の約80%から若干早くなり、最終的に破壊に至る。

水中で湿潤状態にあるコンクリートについては、疲労寿命の60%程度の荷重繰返し回数までの損傷は、主にセメントペースト部における水の移動によるC-S-Hおよび水酸化カルシウム等の侵食あるいは溶出によるものであり、気中疲労におけるような微細ひび割れの発生は少ない。荷重繰返し回数が疲労寿命の60%程度を越えた場合の損傷は、水の移動によるC-S-H等の侵食および溶出とともに遷移帯における微細ひび割れの発生によるものである。遷移帯における微細ひび割れ発生による損傷は、疲労寿命の80%程度の荷重繰返し回数を超えると急速に進展し最終的な破壊に至る。この損傷の急速な進行は、ひび割れ先端部における水の楔作用および水による表面エネルギーの減少によりひび割れが進展しやすくなったためと考えられる。

このようにコンクリートの疲労破壊は、骨材界面の遷移帯における損傷の累積が主要因であり、疲労強度の改善は骨材界面の遷移帯の強化あるいは遷移帯をなくすことにより可能になるものと考えられる。骨材界面の遷移帯を強化するための各種混和材の使用およびSEC工法等の適用により、疲労強度が増加する例が第2章において示されている。

## 5. ま と め

過去に発表した疲労試験結果および新たに行った疲労試験の結果を取りまとめ、疲労強度を示すと共にひずみの変化等について検討を行った。また、繰返し荷重を受けることによるコンクリートの細孔構造の変化について検討を行った。その結果をまとめると以下のようなになる。

- 1) 乾燥状態の普通コンクリートの200万回圧縮疲労強度は静的圧縮強度の61%である。
- 2) 湿潤状態の普通コンクリートの圧縮疲労強度は静的強度の38%であり、混和材の使用等により若干大きくなる場合がある。
- 3) コンクリート標準示方書設計編<sup>15)</sup>で示されているKは、湿潤環境に関しては本研究の下限、乾燥環境に関しては若干大きな値である。
- 4) 湿潤状態での曲げ疲労強度は静的曲げ強度の52%、引張疲労強度は湿潤状態では48%程度、乾燥状態では65%程度であり、いずれも圧縮疲労強度より大きい。
- 5) 圧縮疲労において、疲労寿命と累積損失エネルギーおよび1サイクル当りの損失エネルギーの関係は、乾湿条件によらずほぼ等しい。
- 6) 乾燥状態において繰返し圧縮荷重が作用した場合、荷重載荷初期より骨材界面の遷移帯に損傷が生じ、その損傷が徐々に進行し破壊に至る。
- 7) 湿潤状態において繰返し圧縮荷重が作用した場合、荷重載荷初期から中期まで遷移帯における損傷は少なく、セメントペースト部において水の移動による損傷が発生する。中期以降において遷移帯における損傷が発生するようになり、破壊直前にその損傷が急速に進展し破壊に至る。

**謝辞：**本研究における水の分析およびモルタルの細孔容積の測定は、日鐵セメント(株)所有の原子吸光光度分析装置およびポロシメータを使用して行いました。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 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, 第245号, pp.65-76, 1976.
- 2) 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, 第 296 号, pp.87-95, 1980.
- 3) 尾崎 詔, 菅田紀之, 渡辺洋一: シリカフェームを用いたコンクリートの水中疲労について, コンクリート工学年次論文報告集, 第 9 巻, 第 1 号, pp.75-80, 1987.
  - 4) 菅田紀之, 尾崎 詔, 細川 潮, D. M. Rosales : 真空処理コンクリートの水中疲労強度, コンクリート工学年次論文報告集, 第 11 巻, 第 1 号, pp.293-298, 1989.
  - 5) 尾崎 詔, 菅田紀之, 下林清一: 高炉スラグを用いたコンクリートの水中疲労, セメント・コンクリート論文集, No.43, pp.328-333, 1989.
  - 6) Ozaki, S. and Sugata, N.: Fatigue of Concrete Composed of Blast Furnace Slag or Silica Fume under Submerged Condition, *Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, ACI SP-132*, pp.1509-1524, 1992.
  - 7) 菅田紀之, 尾崎 詔, 水吐則行: 高炉スラグ微粉末を用いた高強度コンクリートの疲労特性, コンクリート工学年次論文報告集, 第 17 巻, 第 1 号, pp.1067-1072, 1995.
  - 8) Ozaki, S., Sugata, N. and Mukaida, K.: Investigation of The Reduction of Fatigue Strength of Submerged Concrete, *Concrete under Severe Conditions, Environment and Loading*, Vol.2, E & FN SPON, pp. 1694-1703, 1995.
  - 9) 菅田紀之, 尾崎 詔: 低発熱型高炉セメントを用いたコンクリートの水中疲労特性, コンクリート工学年次論文報告集, 第 18 巻, 第 1 号, pp.561-566, 1996.
  - 10) 徳光善治, 松下博通, 牧角龍憲: 繰返し応力によるコンクリートの圧縮疲労試験方法(案), コンクリート工学, 第 23 巻, 第 3 号, pp.33-39, 1985.
  - 11) Kesler, C.E.: Effect of Speed of Testing of Flexural Strength of Plain Concrete, *Proceedings of Highway Research Board*, Vol.32, 1953.
  - 12) 井上正一, 西林新蔵, 吉野公: コンクリートの圧縮疲労特性と疲労強度の特性値に関する研究, 土木学会論文集, No.451/V-17, pp.59-67, 1992.
  - 13) Nordby, G.M.: Fatigue of Concrete -A Review of Research, *Journal of ACI*, Vol.55, pp.191-219, 1958.
  - 14) 松下博通, 近田孝夫: コンクリートの疲労寿命と S-N 曲線, セメント技術年報, Vol.30, pp.373-376, 1976.
  - 15) 土木学会: コンクリート標準示方書[平成 8 年版]設計編, 土木学会, pp.22-23, 1996.
  - 16) 岡島達雄: コンクリートの強度・ヤング係数と水分の関係, コンクリート工学, 第 32 巻, 第 9 号, pp.20-24, 1994.
  - 17) 林宏信, 児島孝之, 高木宣章: 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, コンクリート工学年次論文報告集, 第 21 巻, 第 3 号, pp.265-270, 1999.
  - 18) Holmen, J.O.: Fatigue of Concrete by Constant and Variable Amplitude Loading, *Fatigue of Concrete Structures, ACI SP-75*, pp.71-110, 1982.
  - 19) 内川浩, 羽原俊祐, 沢木大介: 硬化モルタル及びコンクリート中の遷移帯厚さの評価並びに遷移帯厚さと強度との関係の検討, コンクリート工学論文集, 第 4 巻, 第 2 号, pp.1-8, 1993.

(1999.9.3 受付)

## FATIGUE OF CONCRETE AND ITS FAILURE MECHANISM

Noriyuki SUGATA and Shinobu OZAKI

In this paper, the results of the experiments that were performed to clear the fatigue properties of concrete and to improve the fatigue strength were considered. Also, the microstructure of concrete subjected to cyclic loading was investigated. The following conclusions were obtained: 1) The fatigue strength of submerged concrete is less than that of dried concrete. 2) The fatigue strength is slightly improved by the strengthening of the transition zone. 3) The damage of dried concrete occurs in the transition zone from the early cycle and gradually increases to the failure. 4) Under the submerged condition, the damage of the transition zone is small until before the failure, and the damage rapidly increases just before the failure and then the concrete fails.