

V-15

繰返し荷重を受けるモルタルの微視的構造について

室蘭工業大学 学生会員 白鳥 智久
 室蘭工業大学 正会員 菅田 紀之
 室蘭工業大学 フェロー 尾崎 詔

1. はじめに

著者らはコンクリートの疲労に関する研究を行い¹⁾、水中では大気中と比較して疲労強度が著しく低下すること、そして大気中ではひび割れが徐々に進行して破壊しているのに対して、水中ではひび割れが破壊直前に急激に進行すること等を明らかにしてきた。しかしながらその原因を解明するには至っていないのが現状である。

そこで、本研究では水中と大気中における疲労特性の相異に及ぼす大きな要因としてコンクリート内部のひび割れの発生、伝播に注目し、水中および大気中でモルタルの繰返し載荷試験を行い、アコースティックエミッション(AE)の測定、および内部空隙の測定により検討を行った。

2. 実験概要

2-1 供試体および配合

実験に用いたモルタルの配合を表-1に示す。モルタルは、直径7.5cm高さ15cmの円柱供試体を19本ずつ3バッチに分けて作成した。各バッチごとの、フレッシュ性状および28日強度を表-2に示す。

表-1 モルタルの配合

水セメント比 W/C (%)	単位量 (kg/m ³)			
	水 W	セメント C	細骨材 S	混和剤 SP
52	270	521	1306	0.105

表-2 モルタルのフレッシュ性状及び28日強度

バッチ	空気量 (%)	モルタルフロー (cm)	28日強度 (MPa)
静的載荷試験	5.5	23.3	29.5
水中疲労試験	5.4	24.0	35.5
大気中疲労試験	4.5	25.3	36.9

2-2 試験方法

(1) 繰返し載荷試験

繰返し載荷試験は電気油圧サーボ式、容量30tfの疲労試験機を用いて行った。繰返し荷重の載荷波形は正弦波とし、載荷速度は6Hzとした。荷重の上限度力比は、水中では静的強度の50%および60%、大気中では70%および75%、下限度力比は両者共に10%とした。荷重の載荷は、1~3回までは静的に行い、その後は6Hzの連続載荷とした。試験中のひずみの測定は、静的載荷時および連続載荷の安定する300~1000回載荷以降で行った。水中疲労試験には3ヶ月間水中養生したもの、大気中疲労試験には2ヶ月間水中養生その後1.5ヶ月間大気中乾燥したものをを用いた。

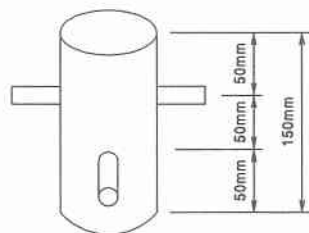


図-1 AEセンサー位置

(2) AE測定方法

AEの測定は、共振周波数150kHzのAEセンサーを4個用いて行った。センサーにより検出したAE波形の増幅は、増幅率40dBのプリアンプおよびダイナミックレンジ80dBのログアンプを用いて行った。検出波形のディスクリレベルは70dBに設定し、ディスクリレベルを越えかつ波形持続時間が16μsec以上の波形をAEの1イベントとして記録した。センサーの取り付け位置を図-1に示す。

(3) 細孔構造の測定

細孔構造は、水銀圧入式ポロシメーター（測定細孔直径：360μm~3nm）を使用し測定を行った。繰返

Micro Structure of Mortar Subjected to Cyclic Load

by Tbmohisa Shiratori, Noriyuki Sugata and Shinobu Ozaki

し、載荷試験、静的載荷試験を行った供試体の中心部および周辺部から約 5mm 角の試料を成形、採取して 105℃で炉乾燥し絶乾状態としたものを、測定に用いた。

3. 試験結果と考察

3-1 ひずみの変化

図-2 および 3 に、繰返し載荷に伴う体積ひずみの変化を示す。なお Fa は大気中疲労試験、Fw は水中疲労試験を行った供試体を表わし、次の数字は上限応力比を表わす。また、—の後の数字は供試体番号を表わしている。試料名の前に × が付いているものは、破壊したことを表わしている。

水中疲労試験では、まず一定の収縮ひずみを示し、破壊直前に急激に膨張側へ増加していることが分かる。Fw50-7 および Fw60-16 については、ひずみが増加したところで疲労破壊が進行していると判断し細孔構造測定用の試料とした。

大気中疲労試験では、体積ひずみが収縮側から膨張側へ緩やかに増加する傾向を示した。Fa70-7 および Fa75-15 については、ひずみの変化から破壊直前と判断し載荷を中止し、細孔構造測定用の試料とした。

3-2 AE の変化

図-4 および 5 に連続載荷以降の 1 サイクルあたりの AE 発生頻度を示す。水中疲労試験では、Fw50-10 および Fw60-15 が、載荷開始後まず一定の発生頻度

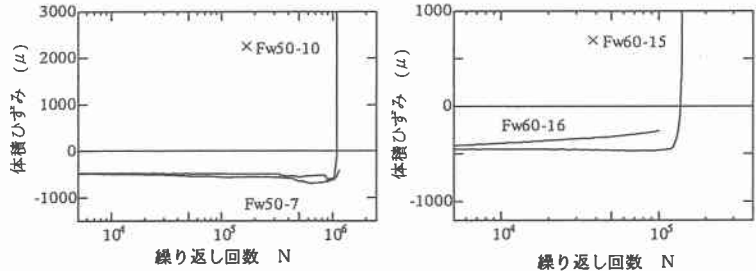


図-2 水中疲労、上限応力比 50、60%の体積ひずみ

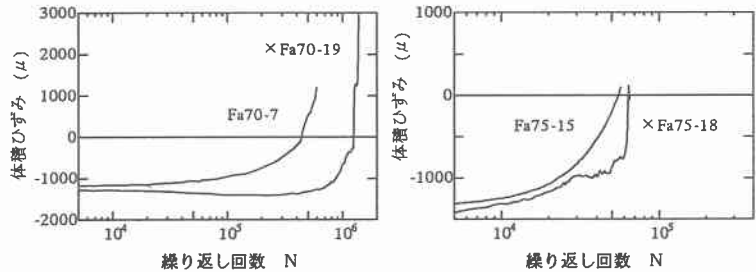


図-3 大気中疲労、上限応力比 70、75%の体積ひずみ

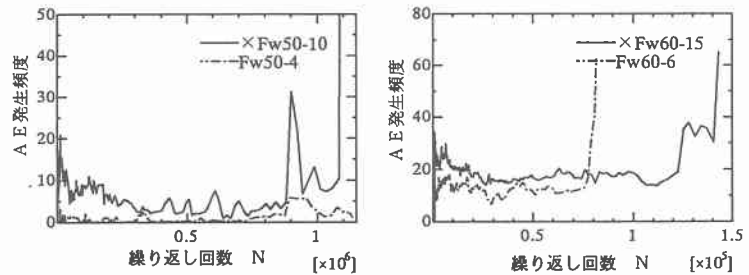


図-4 水中疲労、上限応力比 50%、60%の AE 発生頻度

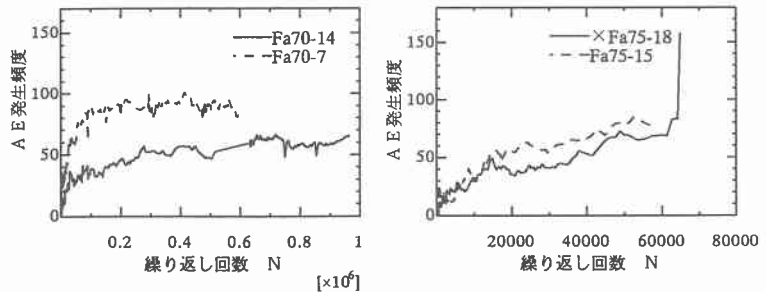


図-5 大気中疲労、上限応力比 70、75%の AE 発生頻度

を示しその後破壊前に増加し、破壊直前にA E発生頻度は再び急激に増加して破壊していることが分かる。Fw60-6 は一定の発生頻度の後、急激に増加した所で疲労損傷が進行したと判断し、載荷を中止し細孔構造測定用の試料とした。このように水中疲労では破壊直前に急激な変化が生じていることが分かる。大気中疲労では、載荷開始後から破壊直前まで緩やかに発生頻度が増加していることが分かる。破壊まで載荷したFa75-18については、破壊時に時にA E発生頻度が急増している。他の供試体については、破壊前に載荷を中止し、細孔構造測定用の試料とした。

3-3 細孔容積および細孔径分布

(1) セメントペーストとモルタルの細孔構造

セメントペーストとモルタルの細孔径分布を図-6に示す。セメントペーストはモルタルと同じ水セメント比52%で作成した。モルタルの細孔径分布は細骨材の容積を引いてセメントペーストの容積に換算したものを比較に用いた。グラフより約200nmから小径側の細孔径分布はセメントペーストとモルタルはほぼ一致し、200nm以上ではモルタルの細孔容積が大きくなっていることが分かる。またモルタルやコンクリートの骨材とセメントペーストとの界面に形成される遷移帯と呼ばれる細孔は主に20~800nm以上の空隙と言われているが²⁾、この結果からは約200nm以上の範囲に存在する細孔が、主に遷移帯中のものと判断した。

(2) 静的載荷試験による細孔構造の変化

静的載荷試験による細孔分布を図-7に示す。縦軸は容積を細孔直径Dで準化したものを表している。

各線は圧縮強度の0%,50%,65%,85%,100%の応力を作用させ、中心部より採取した試料の細孔径分布を表している。図から、変化は主に1 μ m前後で生じていることが分かる。そこで、このグラフより細孔径の範囲を、表-3に示す4つの範囲に分けて、各々の細孔容積、平均細孔直径を求めて検討を行った。①は主にゲル空隙、②は小径の毛細管空隙、③は中径の毛細管空隙で(1)より遷移帯と思われる空隙、④の大径の毛細管空隙、として分類を行った。平均細孔直径は、細孔を円筒形と仮定したときの容積V、表面積A、直径Dの関係式($D=4V/A$)より求めた。図-8に平均直径および細孔容積を無載荷時の値に対する比として示す。図より、200nm~4

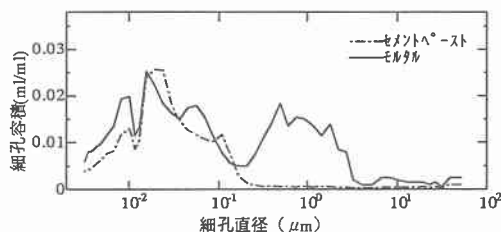


図-6 セメントペーストとモルタルの細孔径分布

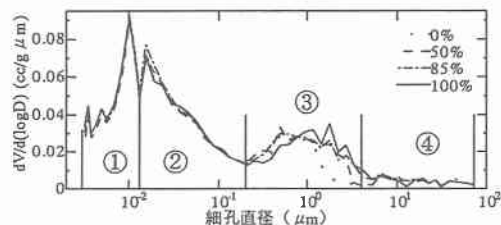


図-7 静的載荷による細孔径分布

表-3 細孔径の範囲

①	3nm~13nm (主にゲル空隙)
②	13nm~200nm (小径の毛細管空隙)
③	200nm~4 μ m (中径の毛細管空隙)
④	4 μ m~73 μ m (大径の毛細管空隙)

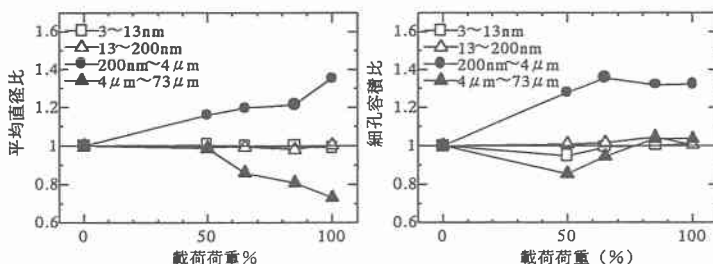


図-8 静的載荷試験による平均細孔直径および細孔容積比

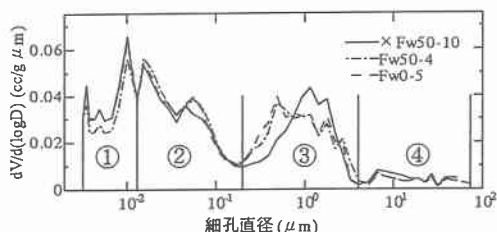


図-9 水中疲労、上限応力比50%の細孔径分布（中心部）

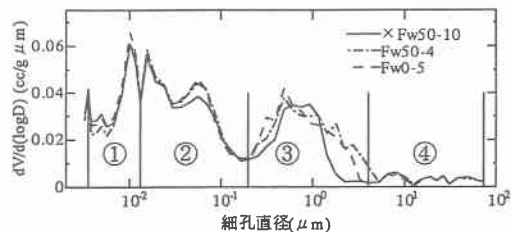


図-10 水中疲労、上限応力比50%の細孔径分布（周辺部）

μmの範囲で平均細孔直径、細孔容積ともに増加していることが分かる。これは、この範囲の空隙の巨大化により平均直径、細孔容積が増加したものと考えられる。また、4 μm~73 μmの範囲では細孔直径が減少しているのに対して、細孔容積は载荷50%以降増加している。これは、この範囲の細孔よりも小さい200nm~4 μmの細孔が荷重により巨大化したためではないかと考えられる。

(3) 疲労試験による細孔構造の変化

水中疲労試験による細孔径分布を図-9 および 10 に示す。Fw0-5は無载荷、Fw50-4は破壊前、×Fw50-10は破壊後の結果である。この分布図から、静的に载荷した場合と同様に主に遷移帯と思われる範囲に変化が生じていることがわかる。そこで、静的試験結果と同様に4つの範囲に分けてその各々の細孔容積、平均細孔直径を求め、図-11~14に示す。中心部より採取した試料からは、破壊直前と判断された供試体はどの範囲でも平均細孔直径、細孔容積と

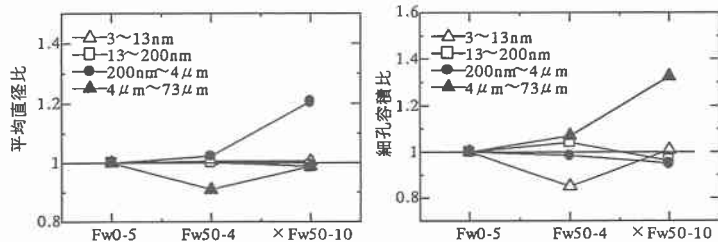


図-11 水中疲労、上限応力比50%（中心部）

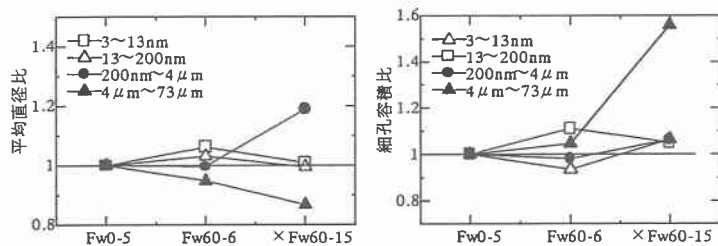


図-12 水中疲労、上限応力比60%（中心部）

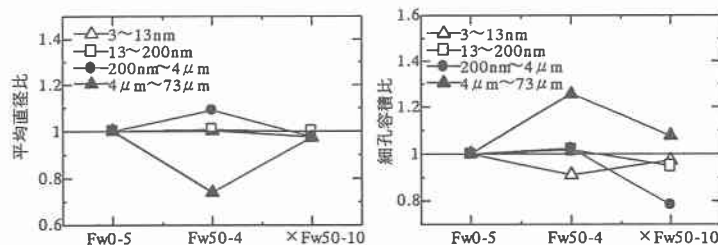


図-13 水中疲労、上限応力比50%（周辺部）

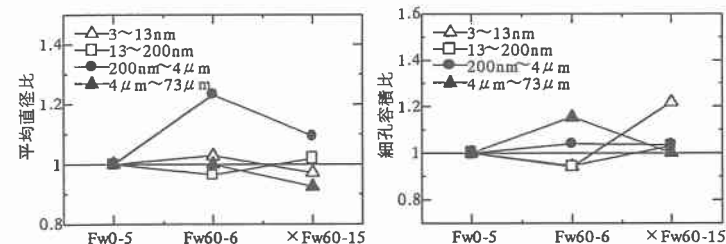


図-14 水中疲労、上限応力比65%（周辺部）

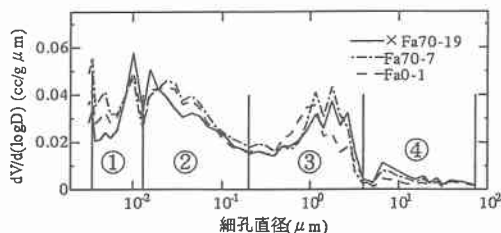


図-15 大気中疲労、上限応力比70%の細孔径分布（中心部）

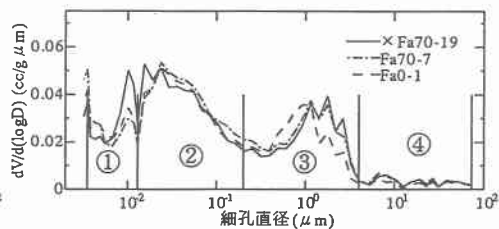


図-16 大気中疲労、上限応力比70%の細孔径分布（周辺部）

もにあまり変化は見られないことが分かる。破壊後の試料では、200nm~4μmの範囲で細孔直径が増加しているが、容積に変化は見られない。これは、この範囲内の空隙もしくはひび割れの結合によると思われる。また、4~73μmの範囲における平均細孔直径が変わらないか減少するのに対して、細孔容積は増加していることが分かる。これは、ひび割れの数が増加したことによると思われる。周辺部より採取した試料からは、中心部で生じているような変化は小さく、疲労損傷は、主に供試体の中心部で生じているものと思われる。

大気中疲労試験による細孔径分布を図-15および16に示す。この図から、水中での細孔径分布とほぼ同じになっていることが分かる。図-17~20に細孔容積、平均細孔直径の比を示す。中心部より採取した試料によると、4μm以上の細孔容積が顕著に増加していることが分かる。しかしながら、細孔直径に大きな変化は見られない。これはひび割れによる細孔の数が増加

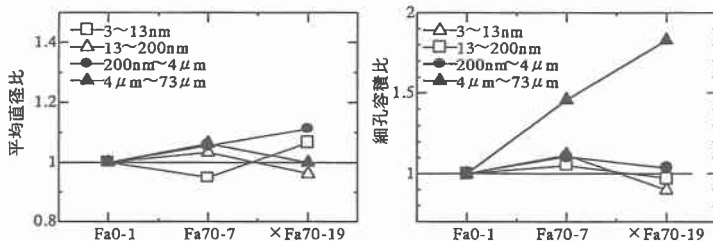


図-17 大気中疲労、上限応力比70%（中心部）

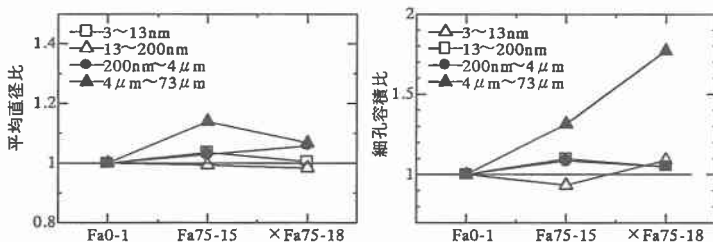


図-18 大気中疲労、上限応力比75%（中心部）

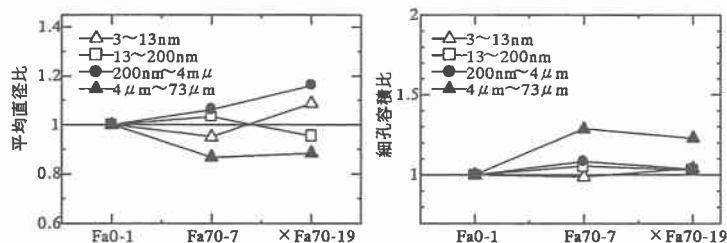


図-19 大気中疲労、上限応力比70%（周辺部）

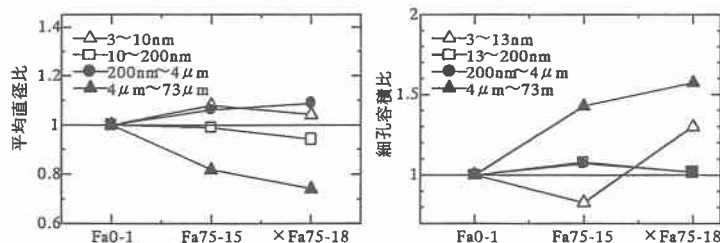


図-20 大気中疲労、上限応力比75%（周辺部）

したためと思われる。周辺部より採取した試料からは、 $4\sim 73\mu\text{m}$ の範囲で程度は小さいものの細孔容積は、中心部と同様の変化が見られる。しかしながら、平均直径は減少していることが分かる。これは、この範囲の細孔よりも小さい $200\text{nm}\sim 4\mu\text{m}$ の細孔が巨大化し、 $4\sim 73\mu\text{m}$ の細孔となったためではないかと考えられる。中心部と周辺部の両部分において、 $4\sim 73\mu\text{m}$ の範囲の容積が増加する傾向が見られる。これは、疲労損傷が、供試体の広範囲に渡っていることを意味している

大気中疲労と水中疲労を比較すると、水中では疲労による損傷を受けていると思われた試料に、 $200\text{nm}\sim 4\mu\text{m}$ の細孔での大きな変化が見られなかったのに対して、大気中ではこの範囲で細孔容積の増加が見られる。これは水中疲労の場合、大気中疲労と比較して体積ひずみが破壊直前まで変化しないが、大気中疲労では載荷後から徐々に体積ひずみが増加して行くことと一致しているものと思われる。以上より大気中疲労の場合、体積ひずみの増加となって現れる原因は約 $4\sim 73\mu\text{m}$ の空隙の変化によるものと考えられる。また、 $4\sim 73\mu\text{m}$ の大径の細孔が増加する傾向は大気中疲労と水中疲労共に見られる。しかし $200\text{nm}\sim 4\mu\text{m}$ の細孔の変化が水中疲労の中心部で生じている。このことは、水中では大気中と比較して繰返し載荷により、遷移体に多く含まれている $200\text{nm}\sim 4\mu\text{m}$ の空隙にまで変化を与えている。

4: まとめ

本実験で得られた結果をまとめると次のようである。

- (1) 繰返し載荷により影響を受ける細孔は 200nm 以上の細孔で、その中には骨材との界面に存在する遷移帯も含まれる。
- (2) 繰返し載荷による $4\mu\text{m}\sim 73\mu\text{m}$ の細孔の数が増加するような変化は、水中疲労と大気中疲労ともに生じているが、 $200\text{nm}\sim 4\mu\text{m}$ の空隙は大気中と水中疲労では、空隙もしくはひび割れの結合によると思われる変化が生じている。
- (3) 水中では、破壊前に細孔の変化がほとんど見られず、大気中では破壊前に $4\sim 73\mu\text{m}$ の細孔容積の増加が見られる。
- (4) 大気中では繰返し載荷によって影響を受けている細孔は、中心部と周辺部に認められるのに対して、水中ではその影響は、主に中心部に表われている。

〔参考文献〕

- 1) 菅田紀之・尾崎詔・水吐則之：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、Vol.17, No1, pp.1067~1072, 1995
- 2) 内川 浩：セメントペーストと骨材の界面の構造・組織がコンクリートの品質に及ぼす影響、コンクリート工学、pp5~17, Vol.33, No9, 1995.9