

V-17

コンクリートの水中における圧縮疲労強度の低下に関する一考察

室蘭工業大学 学生員 水吐 則行
 室蘭工業大学 正 員 尾崎 詔
 室蘭工業大学 正 員 菅田 紀之

1. はじめに

湿潤状態のコンクリートの水中における疲労強度は、大気中で乾燥した状態にあるものと比べ著しく低下する。よって土木学会標準示方書でも、 $\log N = K \cdot (S_1 - S_2) / (1 - S_2)$ なるコンクリートの疲労強度式におけるK値を、一般の場合は17であるのに対し、水で飽和されている場合は10と区別している。一般的に、この疲労強度の低下の原因は、コンクリート内部に存在する水の圧力によるものとされ、『水のポンプ作用』あるいは『水のくさび作用』などと、呼ばれている。しかし、このような水の圧力が作用する疲労破壊の様子は微視的性格を持つため、実験などによって明確に示された例はなく、その意味では水中における疲労強度の低下のメカニズムは、いまだ解明されていないと言えよう。

当研究室ではここ数年間にわたり、水中における疲労破壊は骨材界面が弱点になっており、ここから起こったひび割れが水の影響により広がるものと仮定し、その骨材界面には多量の水酸化カルシウムが存在していることから、この水酸化カルシウムに注目することにより、コンクリート内部及び外部の水がどのように動くのか、また水は疲労破壊にどのような影響を与えているのかを、種々の実験を通して微視的見地から明らかにしようとしている。

2. 材料、配合および供試体

本実験に用いた普通ポルトランドセメントコンクリートの配合を表-1に示す。普通ポルトランドセメントの比重は3.15、粉末度は3200cm²/g。細骨材は比重2.77、粗粒率2.56の幌別産海砂、粗骨材は最大寸法20mm、比重2.69の敷生川産碎石を用いた。混和剤は、天然樹脂酸塩のAE剤を用いた。

表-1 配合

水セメント比 w/c (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
		水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 AE剤
52	43	165	318	796	1068	0.095

コンクリートの練り混ぜは50ℓずつ強制練り混ぜミキサーで3バッチ練り、φ10×20cmの円柱供試体を27本ずつ計81本製作した。スランブはそれぞれ、14.0、14.5、15.5cm、空気量は8.0、8.0、9.0%であった。

供試体は脱型後、1バッチ、2バッチ目は水中疲労試験を行うまで約7カ月間20°Cの恒温水槽内で養生し、3バッチ目は2カ月間20°Cで水中養生後、大気中疲労試験を行うまでの約8カ月間、室内で自然乾燥した。材令28日における各バッチの静的強度は28.2、27.4、26.1MPa、疲労試験時の静的基準強度は水中は34.6、33.7MPa、大気中では33.1MPaであった。これらのひずみ特性については、コンクリート供試体の内部ひび割れの増加を示すポアソン比増加の特異点Lは水中で静的強度の69%、大気中では45%であり、体積ひずみが増加する特異点Uは水中で87%、大気中で50%と大気中では低い値を示した。

3. 疲労試験及びそれに伴う実験方法

本学共同利用施設の一つである、電気油圧サーボ方式の30t構造物疲労試験機に供試体をセットして、2～9Hzの正弦波繰返し荷重を、下限応力は静的基準強度の5%、上限応力は水中では65、60、55、

The Weakness of Fatigue Strength of Concrete in Wet Condition

by Noriyuki Mizuhaki, Shinobu Ozaki and Noriyuki Sugata

50、45%の5段階、大気中では75、70、65%の3段階として、供試体破壊まで荷重し、それまでの繰返し回数を測定した。なお、水中疲労試験は、内径31cm×29cmの透明な水槽内で行った。ひずみ測定は、三芯ゲージを供試体に縦、横方向にそれぞれ2枚ずつ接着し、DCアンプ（シグナルコンディショナー）、A/D変換器およびパソコンによる計測システムで行った。

繰返し荷重進行に伴う供試体からの溶出成分を分析するために、疲労試験中数度にわたり水槽内の水采取し、原子吸光分析を行った。その際、水酸化カルシウムの溶出により上昇したpH値をpHメーターにより測定した。

また、モルタル部のクラックの進行具合を調べるため、疲労破壊後の供試体の表層部と中心部の健全なモルタルの一部分と、同様に採取したまだ荷重を受けたことがない供試体のモルタルの一部分の細孔径分布を水銀ポロシメーターにより測定し、両者を比べた。

さらに、供試体外部の水が繰返し荷重に伴い、どのくらい内部に浸透しているのか調べるため、海水中で疲労試験を行い、破壊直前で荷重をやめたものと、海水中に荷重をかけず浸漬しておいたものをそれぞれ表層部から厚さ1cmずつ3層を採取し、C1⁻の浸透を調べた。

4. 各実験の結果と考察

(1) 疲労強度

各上限応力比毎に供試体の疲労寿命に対する生存確率Pの期待値を $P=1-r/(n+1)$ によって求め、それが対数正規分布に従うと仮定して直線回帰をして、図-1、図-2を得た。これらの回帰直線におけるP=50%に相当する繰返し回数を求め、これらの点から、土木学会コンクリート標準示方書の通り回帰したS-N線図を図-3に(OA:大気中 OW:水中)そして回帰式、200万回疲労強度およびK値を表-2に示す。200万回強度は、水中では大気中に比べ23%も低下しており、K値は標準示方書の大気中1.7、水中1.0と同程度となり、ともに、一般的に言われている普通ポルトランドセメントコンクリートの疲労強度とほぼ同様の結果となった。

(2) ひずみの考察

・体積ひずみ

体積ひずみは、(圧縮ひずみ)+(引張ひずみ)×2で近似できる。このことから体積ひずみの増加はひび割れの増大による膨張と考えられる。

まず、大気中疲労の体積ひずみ(図-4)を見ると、荷重された応力が大きいのがと特異点が小さいせいで、ひび割れが起こる時期が早いのが、かなり

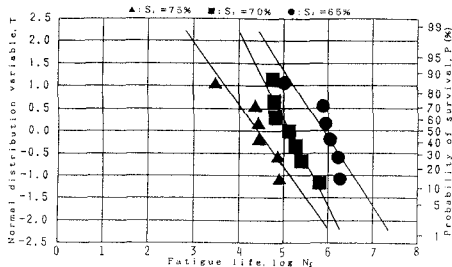


図-1 P(T)-N 線図 (大気中)

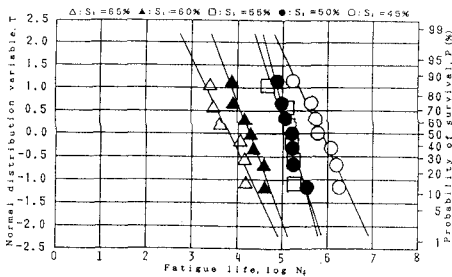


図-2 P(T)-N 線図 (水中)

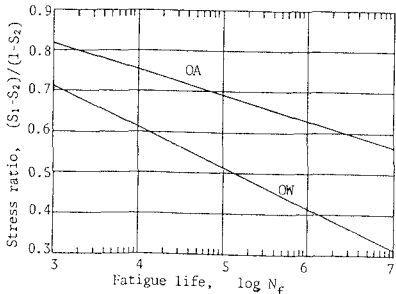


図-3 S-N 線図

表-2 疲労強度

疲労環境	回帰式	200万疲労	K 値
水中	$(S_1-S_2)/(1-S_2)=1-0.098\cdot\log N_f$	38%	10.2
大気中	$(S_1-S_2)/(1-S_2)=1-0.061\cdot\log N_f$	61%	16.4

多くひび割れが進展するまで破壊にいたらない。これは、ひび割れ面の摩擦が大きく剪断破壊に対する抵抗力が大きい、かなりのひび割れにも持ちこたえるからであろう。

一方、水中疲労における体積ひずみ（図-5）では、体積ひずみが膨張側に移行すると、数千回以内に破壊してしまう。つまり、大気中の場合と比較して、少しのひび割れが致命的になるのである。これは、ひび割れが生じると、そこにコンクリート内部の水による圧力が作用し急速に拡大すると同時に、水のせいでひび割れ面の摩擦力が低下し、剪断破壊に対する抵抗力が減少したためと思われる。

・ヒステリシスループ

コンクリートの応力-ひずみ曲線は載荷時と除荷時では違った経路をたどり、ヒステリシスループを描く。初回のヒステリシスループの面積に対する各繰返し回数におけるヒステリシスループの面積の比と、繰返し回数との関係を図-6、図-7に示す。

このヒステリシスループは、非回復性の損失エネルギーと考えることができる。この非回復性の損失エネルギーは、構成粒子を引き離し、ひび割れを形成する仕事に使われるエネルギーと、構成粒子をすべらせる仕事に使われるエネルギーの2つに分けることができる。

まず、大気中疲労試験におけるヒステリシスループ（図-6）を見てみる。水中に比べ、繰返し荷重がある程度進行した後の損失エネルギーが小さい印象を与えるが、これは初回の損失エネルギーが大きいためであり、絶対値はほぼ変わりがないと考えてよい。体積ひずみの結果から、ひび割れが徐々に進展していることがわかっているが、そのひび割れに使われるエネルギーは初期の段階では大きく、それが数百回目からほぼ一定値を示すことがわかる。

一方、水中疲労試験におけるヒステリシスループ（図-7）では、一定値を保っていたあるいは下がる傾向にあった非回復性の損失エネルギーは、数百回から千回までの間のある時点からわずかに上昇の傾向を示している。しかし、体積ひずみ（図-5）を見てみると、まだこの段階ではひび割れが起こっていない。よってこの損失エネルギーは、構成粒子のずれに使われているものと考えられる。水中では水の存在により摩擦力が低下しているせいで、大気中の場合よりこのエネルギーがコンクリートに損傷を与える度合いが大きく、徐々に構成粒子間に緩みのような疲労損傷を与え続けているのであろう。（このことは、後述するCa濃度の変化により伺われる。）そして、体積ひずみが膨張に

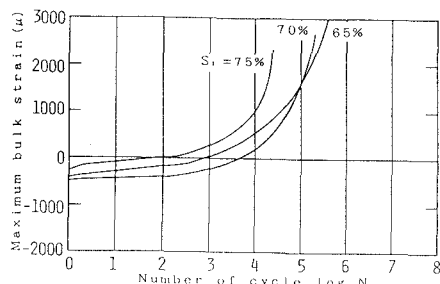


図-4 体積ひずみ（大気中）

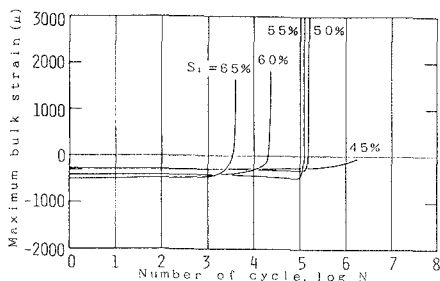


図-5 体積ひずみ（水中）

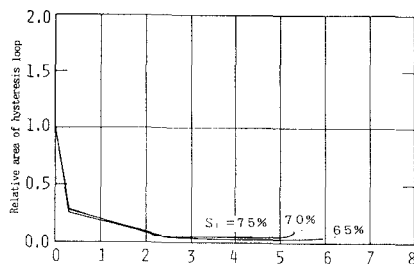


図-6 ヒステリシスループ（大気中）

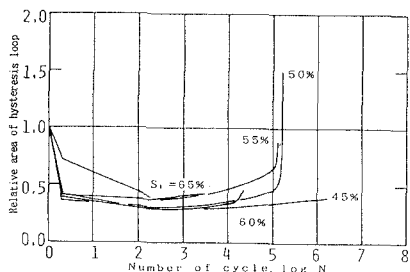


図-7 ヒステリシスループ（水中）

向かっているところ、損失エネルギーの上昇も顕著になっており、この時点から、ひび割れ進展に必要なエネルギーが増加しているものと思われる。そしてひび割れ後、さきにも述べたように微小ひび割れに水圧が作用すると、水の存在により摩擦力が低下し剪断破壊に対する抵抗力が減少するため、急激に破壊にいたるのである。

(3) 水中疲労試験時の水のpH値と溶出成分

繰り返し荷重に伴う、水酸化カルシウムの溶出による疲労水槽内のpH値の上昇のようすと、原子吸光分析によるCa濃度とSi濃度の分析結果を、表-3に示し、pHとCa濃度の上昇の具合を、それぞれ図-8、図-9に示す。

図-8より、pH値が破壊に近づくにつれて上昇していることから、水酸化カルシウムが溶出していることがわかる。しかし、これらのpH値からCa濃度を計算してみると、原子吸光分析での値より、はるかに低い値を示す。これは、試験水槽内は曝気状態であったので、酸性物質である二酸化炭素のせいと、二酸化炭素と水酸化カルシウムが反応して炭酸カルシウムになってしまい試験水の中に存在する水酸化物イオンが減少するせいで、pHが下がってしまったためと考えられる。一方、イオンを検出する原子吸光分析は、高温で熱してから行ったため、この際にコロイド状態の水酸化カルシウムはイオン化してしまい、Ca濃度は大きくなったのである。以上のことから、供試体から溶出したカルシウムイオンをより正確に表しているのは、原子吸光分析の方であるので、以下は図-9を見ながら論述して行きたい。

表-3の、上限応力比： $S_1=65$ 、 55% の場合を見ると、Siの濃度がほとんどゼロと言っていい程微量である。このことは、C-S-Hゲル（カルシウム・シリケート・ハイドレートゲル）の溶出がないことを示しており、試験水中のCa濃度の増加はすべて水酸化カルシウムの溶出によるものだと言える。しかし、 $S_1=45\%$ の場合はSiが検出されている。これは、一般的に不可逆のゲルとされているC-S-Hゲルが、微粉砕されたため、C-S-Hイオンとして溶出したためである。しかし、この場合もSiの濃度は微量であるため、水酸化カルシウムの溶出が勝っていると言える。

もちろん水酸化カルシウムは骨材界面だけにあるわけではなく、それ以外のところではC-S-Hゲルと共存しているのであるが、もしマトリクス部に何らかの損傷があればC-S-Hゲルが溶出することがこの実験により示されたのであるから、 $S_1=65$ 、 55% のときはマトリクス部は

表-3 分析結果

S_1 (%)	繰り返し回数	pH値	Ca (ppm)	Si (ppm)
65	0	7.12	0.78	
	3,000	7.29	1.36	
	5,000	7.29	1.66	
	10,000	7.36	1.81	
	14,000	7.38	2.26	
	15,000	7.59	3.02	tr
$N_f=15,570$				
55	0	7.22	1.43	
	3,000	7.29	1.68	
	10,000	7.30	1.99	
	15,000	7.38	2.11	
	25,000	7.45	2.48	
	35,000	7.48	3.10	
	45,000	7.55	4.03	
	60,000	7.63	4.03	
	80,000	7.79	4.34	
	120,000	8.30	6.21	
	160,000	8.57	7.76	tr
$N_f=181,413$				
45	0	6.96	1.22	0
	22,000	7.46	2.51	0
	200,000	7.82	7.97	1.1
	410,000	8.09	11.69	2.2
	920,000	8.15	17.63	3.4
	1,350,000	8.30	19.34	4.1
$N_f=1,581,928$				

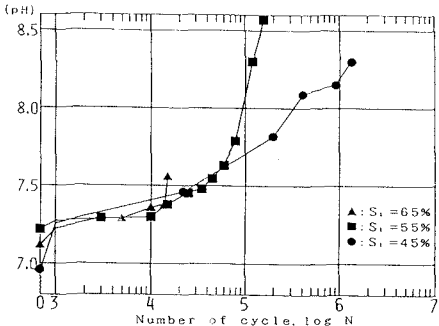


図-8 pH値の変化

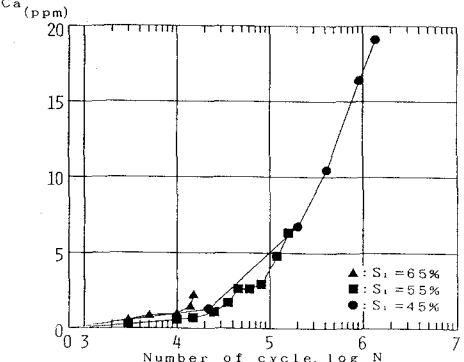


図-9 Ca濃度の変化

損傷を受けいないことになる。そして、 $S_i=45\%$ のときも、 S_i の濃度が Ca の濃度より圧倒的に少ないことから、水中における疲労破壊は、骨材界面の損傷が支配的であると思われる。

また、表-3および図-9で Ca の濃度が上昇し始める時点に注目すると、どれも体積ひずみが膨張する以前、つまりひび割れが起こる以前である。よってこの時点から、ひび割れ以外の何らかの損傷が起こっていると考えられる。そしてこのことは、さきに述べた、ひび割れが起こる以前に構成粒子のずれによる緩みのような損傷を受けていることを裏付けるものであろう。

(4) 細孔径分布の変化

水銀ポロシメーターによる分析の結果、細孔径は $0.003\sim0.006\mu\text{m}$ 、 $0.006\sim0.1\mu\text{m}$ 、 $0.1\sim20\mu\text{m}$ の3つのピークを有することがわかった。

まず、水中における細孔径分布の変化(図-10)に注目すると、表層部でピーク1の消失が見られる。これは、水酸化カルシウムあるいは $C-S-H$ ゲルが溶出したため、最も小さなピーク1の細孔が広がり、ピーク2に移行したためであろう。しかし、この水酸化カルシウムと $C-S-H$ ゲルの溶出の疲労強度の低下に対する影響を考えた場合、それほど大きくはないと思われる。それは、細孔の絶対量が変わっていなかったことと、飽和状態のコンクリートによる大気中疲労強度が、水中と同程度の値を示すことから、明らかである。

一方、中心部では表層部のような変化が見られないため、表層部のように水酸化カルシウムや $C-S-H$ ゲルの溶出が起こっていない。これは、試験水に接し

ている表層部の供試体内部の溶液の濃度が低いのに比べ、中心部では濃度が高いため溶出しにくいからであろう。よって、コンクリートの中心近くから外部に出たり、外部から内部の奥深くまで浸透するというようなダイナミックな動きを、水はしていないと言えよう。

また、表層部も中心部もともに、さきに述べたピーク1の消失以外、疲労試験前後で目立った変化はなく、クラックなどは起こっていないと言えよう。

大気中における疲労試験(図-11)の表層部のピーク1とピーク2、そして中心部のピーク1の割合が2倍程度まで増えているが、これはマイクロクラックが発生したためと考えられる。ここで、もしマイクロクラックが発生したならば、細孔の絶対量が増えるはずのように思えるが、本実験では変化がなかった。この理由は、マイクロクラック発生時に発生した微粉末が、供試体の外に出ることなく、ピーク3の大きな穴を埋めたからであろう。

水中、大気中ともに、破壊した供試体の健全だと思われる部分の細孔径分布を測定しているのに、水中はマイクロクラックの発生はなく、大気中は発生しているということは、大気中では水中に比べすみずみで

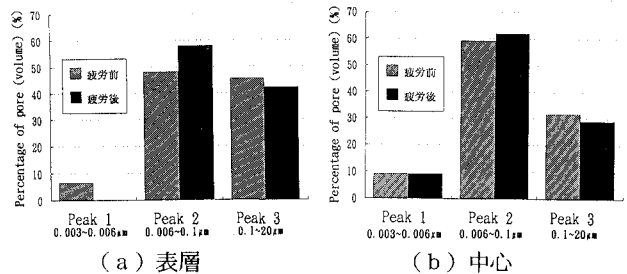


図-10 水中疲労細孔径分布 $N_f=157,726$

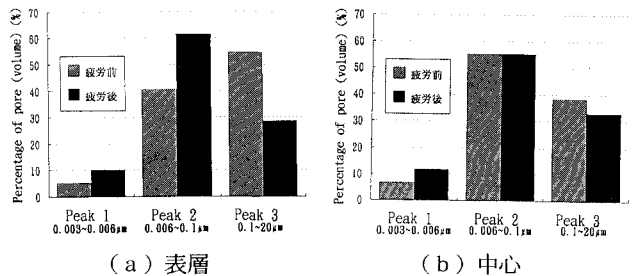


図-11 大気中疲労細孔径分布 $N_f=1,889,970$

ひび割れが起きているということになる。このことは、これまで述べてきた、大気中ではひび割れがかなり多く進展してから破壊にいたり、水中では少しのひび割れが起これとそれが致命的になって間もなく破壊してしまう、という考察を裏付けるものである。

(5) 海水の浸透についての考察

実験の結果、供試体の表層から1 cm 以上には塩化物イオンは浸透していないことがわかった。図-12には、表層から1 cmのところまでの、疲労回数と塩化物イオンの浸透の関係を示す。なお、イオンの拡散の影響のみでなく、繰り返し荷重により海水が浸透していることを示すため、浸漬試験の結果もあわせて記してある。図-12によると、約30万回以上になると浸透が始まっている。浸漬試験の浸透もその時期に起きていることから、イオンの拡散による影響が大きい事は確かであるが、疲労試験を受けた供試体のほうが浸透が大きいため、繰り返し荷重によって海水が浸透することも確かである。

しかし、1 cm 以上は浸透しないことから、供試体内部に水が入るのは表層部分に限られることがわかる。そしてこのことは、細孔径分布での考察で述べた、水はダイナミックな動きはしない、という事を裏付けるものとなる。

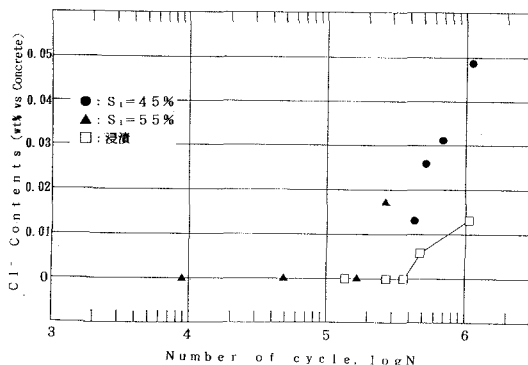


図-12 C1 の浸透

5. おわりに

以上の種々の実験の結果から、湿潤状態のコンクリートの水中における疲労強度低下のメカニズムをまとめると次のようになる。

湿潤状態のコンクリートは、ポアソン比や体積ひずみの特異点が高いのと、水中疲労試験は低応力で行うせいで、初期の段階ではひび割れは発生しない。よって、非回復性の損失エネルギーはひび割れを起こす仕事ではなく、構成粒子を滑らせる仕事に使われる。乾燥状態のコンクリートは構成粒子間の摩擦抵抗が大きく、これらを滑らせるような仕事が働いても、熱に変換され外部に放出されるエネルギーが多い。しかし、水中の場合は構成粒子間の摩擦抵抗が小さいため、ずれによる緩みのような損傷が徐々に起きる。このことは、その間にカルシウム成分が溶出していることから裏付けられ、そして水酸化カルシウムが溶出成分の中で大半を占めていることから、この損傷は骨材界面で起これと考える。その後、ひび割れが起き、そのひび割れに供試体内部の水による水圧がかかると同時に、水の存在のせいでひび割れ面の摩擦抵抗が小さくなり、数千回の間に破壊にいたるのである。そして、このときのひび割れも、さきと同様の理由で、骨材界面で主に起これと考える。このような水中疲労破壊のメカニズムは、初期に起これたひび割れが、徐々に進展して行く大気中の疲労破壊のメカニズムと大きく違っており、この点に水中における疲労強度の低下の原因があるであろう。

しかし、この論文全体を通して見てみると、実験で起これた現象を一応説明できてはいるが、断定しきれない箇所が所々あることも否めない。これをこのままで終わらないためにも、例えば骨材界面から疲労破壊が起これることを実証するために、また新たな実験を行う必要があり、それが今後の課題である。