

論文 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

菅田 紀之^{*1}・尾崎 諤^{*2}

要旨：低発熱型の高炉セメントを用いた低発熱コンクリートおよび混和材としてシリカフュームとフライアッシュを用いた低発熱コンクリートの圧縮疲労試験を水中湿潤状態で行い、その疲労強度およびひずみの変化等の疲労特性を普通コンクリートと比較しながら検討を行った。その結果、低発熱型高炉セメントを用いた低発熱コンクリートの200万回水中疲労強度は普通コンクリートと同程度であり、破壊直前に微細ひび割れが急激に増加し破壊に至ることが明らかになった。

キーワード：低発熱コンクリート、疲労強度、高炉セメント、シリカフューム、フライアッシュ

1. はじめに

コンクリートの水中あるいは湿潤状態における疲労強度は、大気中で気乾状態にあるコンクリートと比較すると著しく低下することが知られている[1]。そこで著者等は水中における疲労強度の改善および水中における疲労強度低下の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に関する疲労試験を実行し検討を行ってきた[2], [3], [4], [5]。しかしながら、未だその低下の原因が解明されていないのが現状であり、水中における疲労強度改善のための有効策は見いだされていない。

一方、長大橋の下部構造のような大型構造物の建設では、セメントの水和熱によるコンクリートの温度上昇やそれによる温度ひび割れの発生が大きな問題である。この問題に対処するために、セメントの一部を高炉スラグやフライアッシュなどにより置換した混合セメントを用いた低発熱コンクリートが適用されることが多い。今後建設される構造物によっては、水中あるいは海洋環境下において常に飽水状態にあり、波力等による疲労が問題になることがあるものと考えられる。したがって、このような構造物を低発熱コンクリートを用いて建設するためには、その水中における疲労特性を明らかにしておく必要があるものと考えられる。しかしながら、そのような研究は過去に行われていないのが現状である。

そこで本研究では、コンクリートに低発熱性をもたせるために結合材として低発熱型高炉セメントのみを用いたコンクリートおよびシリカフューム、フライアッシュを併用したコンクリートの疲労試験を水中湿潤状態において行い、それらの疲労強度およびひずみの変化等の疲労特性を普通コンクリートと比較しながら検討を行った。

2. 実験の概要

2.1 コンクリートおよび使用材料

実験に用いたコンクリートの配合をフレッシュコンクリートの性質とともに表-1に示す。LHCは、結合材として低発熱型高炉セメントのみを用いたコンクリート、LHSCは結合材として低発熱型高炉セメントおよびシリカフューム、フライアッシュを用いたコンクリートを表してい

*1 室蘭工業大学講師 工学部建設システム工学科、工博（正会員）

*2 室蘭工業大学教授 工学部建設システム工学科、工博（正会員）

表-1 コンクリートの配合

配合	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)								スランプ (cm)	空気量 (%)
			水 W	セメント C	シリカフ ューム Si	フライア ッシュ F	細骨材 S	粗骨材 G	AE 剤*	高性能 減水剤†		
LHC	50	44	150	300	-	-	823	1039	0.06	-	8	4.3
LHSC	50	44	150	240	30	30	815	1028	0.24	3.3	14	5.5

* 天然樹脂酸塩系 † アニオン型特殊高分子活性剤系

る。表-2 にセメントおよびシリカフェーム、フライアッシュの各種性質について示す。コンクリートの水結合材比 W/B は 50 % である。練混ぜに使用した材料は、セメント、シリカフェーム、フライアッシュの他に、細骨材として海砂（粗粒率：2.65）、粗骨材として砕石（最大寸法：20 mm）、混和剤として LHC では AE 剤、LHSC では AE 剤および高性能減水剤である。なお、実験に用いたコンクリート供試体は、直径 7.5 cm で高さ 15 cm の円柱供試体であり、各配合で 2 バッチ打設し材令 1 日において型枠から脱型し標準水中養生を行った。

2.2 疲労試験方法

疲労試験の荷重載荷装置は、電気油圧サーボ式、容量 30 tf の疲労試験機であり、底盤が鋼製で、内径 31 cm、高さ 29 cm のアクリル水槽の中央に供試体を設置して圧縮疲労試験を行った。載荷荷重形式は載荷波形を正弦波とし、載荷速度を 4~9 Hz とした。LHC における静的基準強度（疲労試験開始時における静的強度）に対する上限応力比 S_1 は 45, 55, 65 % の三段階に設定し、下限応力比 S_2 は 7 % に設定した。また、LHSC における上限応力比 S_1 は 46, 55, 64 % の三段階に設定し、下限応力比 S_2 は 4.5 % に設定した。なお、試験期間中におけるひずみの変化を計測するために、供試体側面にひずみゲージを供試体軸方向に 2 枚、直角方向に 2 枚貼り付けている。試験開始時における各バッチの供試体の材令は、LHC では 225 日および 241 日、LHSC では 82 日および 93 日である。

3. 試験結果

3.1 静的強度

静的強度試験は、大気中において湿潤状態の供試体を用いて行った。表-3 に各配合のコンクリートの 28 日強度および疲労試験開始時における静的強度を示す。表中の配合記号の-以下の数字はバッチを表している。LHC の 28 日強度は 274 kgf/cm² お

表-2 結合材の各種性質

低発熱型高炉セメント	
高炉スラグ混入率	60 % 以上
比表面積	3,400 cm ² /g
比 重	2.97
シリカフェーム	
SiO ₂	93.4 %
比表面積	180,000 cm ² /g
平均粒径	0.2 μm
比 重	2.21
フライアッシュ	
SiO ₂	59.3 %
比表面積	4,120 cm ² /g
比 重	2.20

表-3 静的強度

配合	28 日強度 (kgf/cm ²)	疲労試験開始時 (kgf/cm ²)
LHC-1	274	475
LHC-2	250	426
LHSC-1	317	432
LHSC-2	278	407

よび 250 kgf/cm² であるのに対して、疲労試験開始時では 475 kgf/cm² および 426 kgf/cm² になっており、材令 28 日以降の強度増加が 201 kgf/cm² および 176 kgf/cm² と大きいことがわかる。LHSC では、28 日強度は 317 kgf/cm² および 278 kgf/cm²、疲労試験開始時においては 432 kgf/cm² および 407 kgf/cm² であり、LHSC においても材令 28 日以降の強度増加が大きいことがわかる。なお、疲労試験開始時における静的強度を応力比決定のための静的基準強度とした。

3.2 疲労強度

各上限応力比ごとの疲労寿命分布が対数正規分布に従うものと仮定すると、供試体の疲労寿命と生存確率の関係は図-1 のようになる。生存確率は次式により求めた。

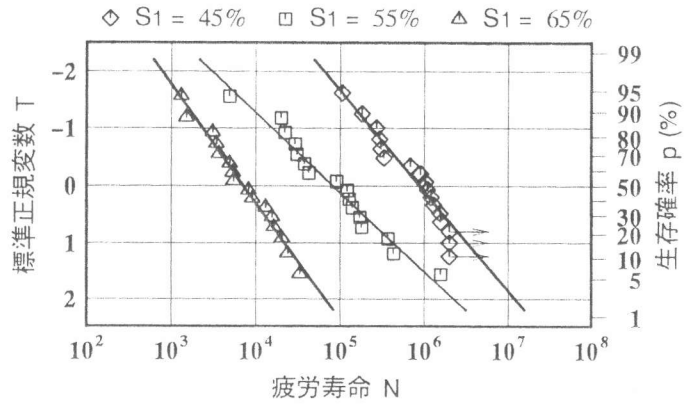
$$p = 1 - \frac{r}{n+1} \quad (1)$$

ここで、

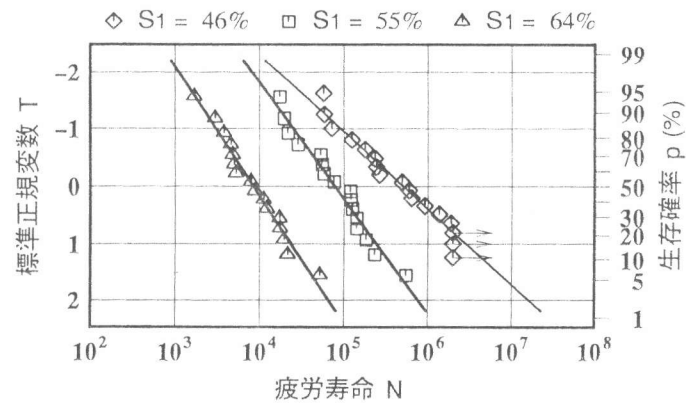
p : 生存確率、 n : 供試体総本数、

r : 疲労寿命の小さい方からの供試体の順位

図-1 より、生存確率 50% の各上限応力比に対する疲労寿命を求め、コンクリート標準示方書設計編[6]に従い $S-N$ 回帰直線を求めると図-2 のようになる。図には比較のため普通コンクリートの $S-N$ 回帰直線[5]も示している。普通コンクリートは記号 OC を用いて示すこととする。また、表-4 に $S-N$ 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に従い求めた K 値を示す。大気中疲労と水中疲労を比較すると、OC の 200 万回



(a) LHC



(b) LHSC

図-1 P-N線図

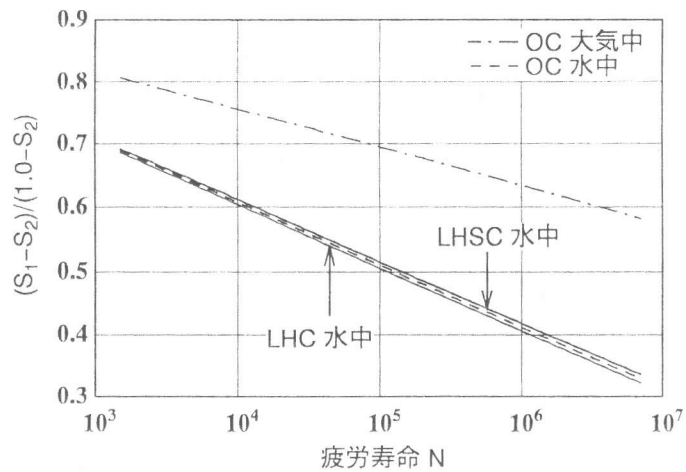


図-2 S-N線図

表-4 S-N回帰直線式、200万回疲労強度、 K 値

	$S-N$ 回帰直線式	200万回疲労強度 (%)	K 値
OC 大気中	$(S_1 - S_2)/(1 - S_2) = 1 - 0.061 \log N$	61	16.3
OC 水中	$(S_1 - S_2)/(1 - S_2) = 1 - 0.098 \log N$	38	10.2
LHC 水中	$(S_1 - S_2)/(1 - S_2) = 1 - 0.099 \log N$	38	10.1
LHSC 水中	$(S_1 - S_2)/(1 - S_2) = 1 - 0.097 \log N$	39	10.3

疲労強度は大気中では 61 %であるのに対して、水中では 38 %であり、水中疲労強度が大気中疲労強度より 23 %小さくなっていることがわかる。また、低発熱コンクリートの水中疲労強度は、38 %および 39 %であり、普通コンクリートとはほぼ等しいことがわかる。

コンクリート標準示方書[6]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 としており、低発熱コンクリートにおいても同様の結果が得られた。

3.3 体積ひずみの変化

図-3~5 は、水中疲労試験における繰返し载荷に伴う供試体の体積ひずみの変化を示している。比較のため普通コンクリートの水中疲労試験結果[5]も示している。体積ひずみが正の場合には膨張を、負の場合には収縮を表す。普通コンクリートでは収縮から膨張に急激に変化するとともに膨張ひずみが急増し破壊に至っている。低発熱コンクリートにおける体積ひずみの変化も、普通コンクリートと同様に破壊直前に膨張ひずみが急激に増加する傾向が示されている。コンクリートの体積膨張を微細ひび割れの増加によるものと考えると、低発熱コンクリートも普通コンクリートと同様に、水中疲労においては破壊につながるひび割れが発生すると、ひび割れが急激に進行し破壊に至っているものと考えられる。

3.4 ヒステリシスループの面積変化

一般に、コンクリートの応力-ひずみ曲線は荷重増荷時と荷重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。このときの増荷応力-ひずみ曲線と除荷応力-ひずみ曲線で囲まれる領域の面積について検討を行う。このヒステリシスループの面積は非回復性の損失エネルギーと考えることができる。図-6~8 は、疲労試験における繰返し载荷に伴うヒステリシスループの面積変化を、初増荷時の面積に対する比で示している。比較のため普通コンクリートの水中

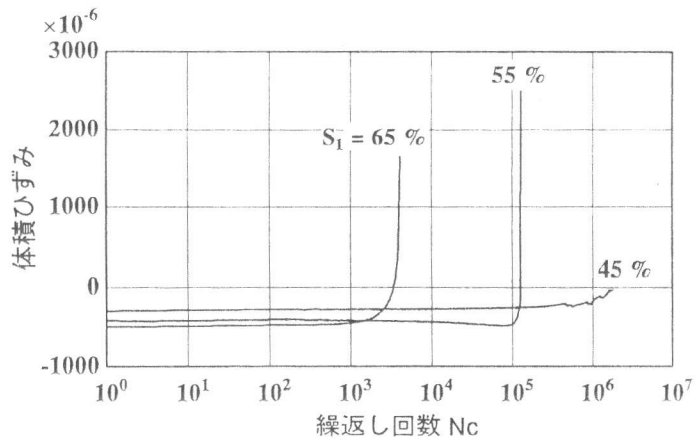


図-3 OCの体積ひずみの変化

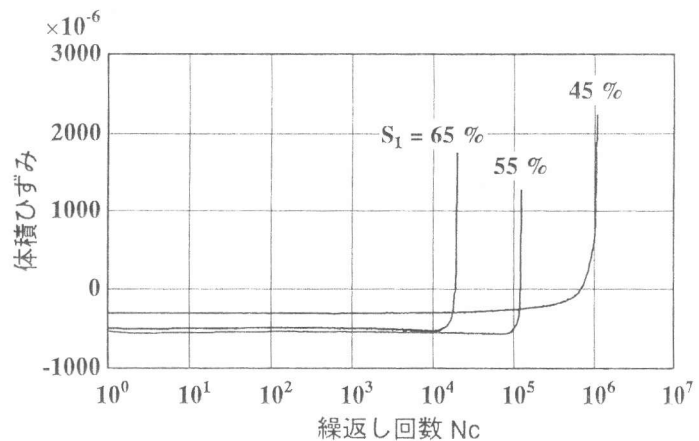


図-4 LHCの体積ひずみの変化

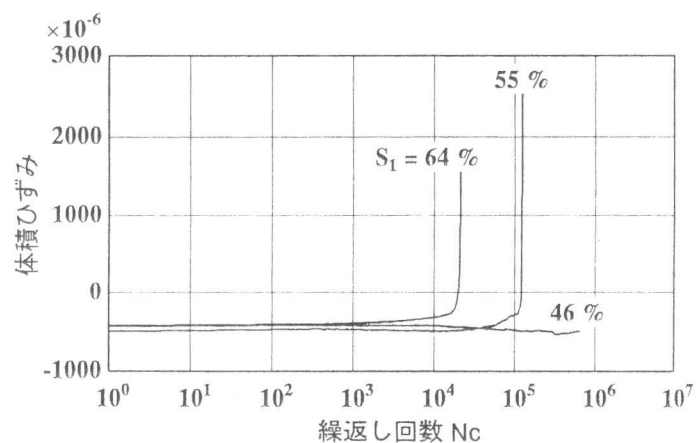


図-5 LHSCの体積ひずみの変化

疲労試験結果[5]も示している。いずれの場合においても、二回目の载荷以後、面積が減少していることがわかる。普通コンクリートでは二回目载荷以後0.3~0.4程度に減少し、その後徐々に増加している。上限応力比が50%の場合には、破壊直前に面積が急増している。低発熱コンクリートにおける二回目载荷以後の面積比に関しては、LHCでは0.12~0.15まで減少し、 $S_1 = 65\%$ および55%ではその後徐々に増加している。特に65%の場合にはその傾向が顕著である。LHSCでは0.14~0.22まで減少し、 $S_1 = 64\%$ の場合にその後の増加傾向がみられる。また、 $S_1 = 55\%$ の場合には、破壊直前に面積比が急激に大きくなっていることがわかる。低発熱コンクリートと普通コンクリートの結果を比較すると、低発熱コンクリートの二回目载荷以後の面積比が、普通コンクリートの1/3~1/2と小さくなっていることがわかる。

表-5は、各コンクリートにおける初回のループの面積および静的基準強度を用いて正規化した値を示している。各応力状態において、低発熱コンクリートのループ面積は、普通コンクリートよりも大きくなっている。しかしながら、静的基準強度を用いて正規化したループの面積は、低発熱コンクリート、普通コンクリートともに同様な値となっている。したがって、静的基準強度で正規化して考えた場合、各コンクリートの初载荷時のエネルギー損失は同程度であり、二回目载荷以後のエネルギー損失は、低発熱コンクリートが普通コンクリートの1/3~1/2になっていることがわかる。

4. ま と め

低発熱型高炉セメントおよびシリカフェームとフライアッシュを併用した低発熱コンクリートの圧縮疲労試験を水中湿潤状態で行い、200万回疲労強度、疲労の進行に伴う体積ひずみの変化、ヒステリシスループの面積変化について、普通コンクリートの結果と比較しながら検討した。本

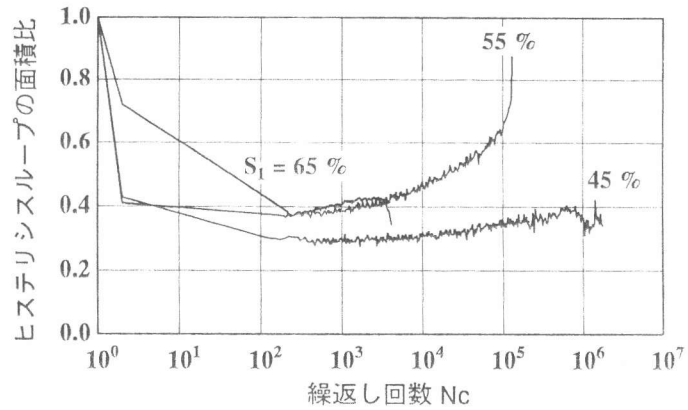


図-6 OCのヒステリシスループの面積変化

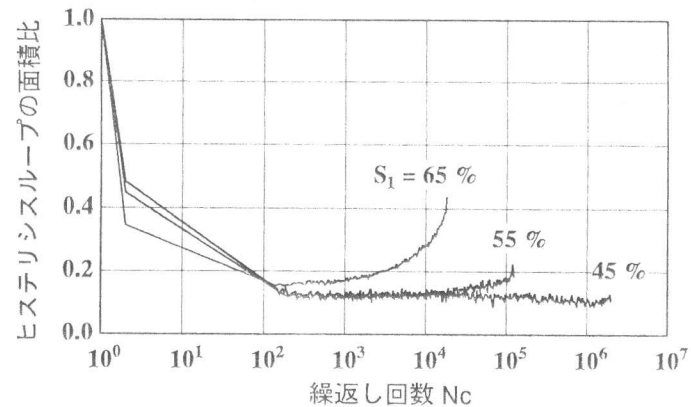


図-7 LHCのヒステリシスループの面積変化

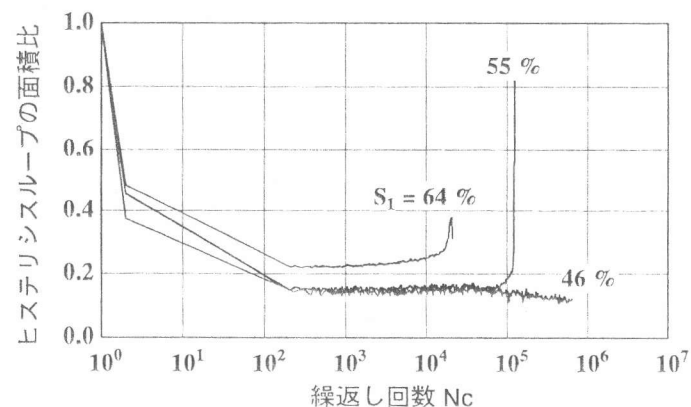


図-8 LHSCのヒステリシスループの面積変化

研究に用いた低発熱型高炉セメントは、高炉スラグが60%以上混入されたものである。検討結果をまとめると以下ようになる。

- 1) 低発熱コンクリートの水中湿潤状態における200万回疲労強度は、普通コンクリートと同程度で38%および39%である。
- 2) 低発熱コンクリートの水中湿潤状態における K 値は、コンクリート標準示方書とほぼ同様の約10である。
- 3) 低発熱コンクリートの水中疲労においても、コンクリート内部のひび割れが破壊直前に急激に進行し破壊に至る。
- 4) 低発熱コンクリートの水中疲労におけるヒステリシスループの初载荷の面積に対する二回目载荷以後の面積比は、結合材として低発熱型高炉セメントのみを用いた場合には0.12~0.15、リカフュームとフライアッシュを併用した場合には0.14~0.22であり、普通コンクリートの1/3~1/2になっている。
- 5) エネルギー損失(ヒステリシスループの面積)を静的基準強度を用いて正規化した場合、低発熱コンクリートの初载荷時のエネルギー損失は普通コンクリートと同程度であり、二回目载荷以後は1/3~1/2である。

表-5 ヒステリシスループの初回の面積 (kgf/cm²)
(カッコ内は正規化した値)

	S_1		
	45% (46%)	55%	65% (64%)
OC*	17.6×10 ⁻³ (5.10×10 ⁻⁵)	9.13×10 ⁻³ (2.65×10 ⁻⁵)	4.73×10 ⁻³ (1.37×10 ⁻⁵)
LHC	21.8×10 ⁻³ (4.83×10 ⁻⁵)	13.0×10 ⁻³ (2.88×10 ⁻⁵)	7.40×10 ⁻³ (1.64×10 ⁻⁵)
LHSC	21.1×10 ⁻³ (5.02×10 ⁻⁵)	11.5×10 ⁻³ (2.74×10 ⁻⁵)	6.63×10 ⁻³ (1.58×10 ⁻⁵)

* 静的基準強度は345 kgf/cm²

参考文献

- 1) 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。
- 2) 尾崎 諤・菅田紀之・渡辺洋一：シリカフュ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。
- 3) 菅田紀之・尾崎 諤・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。
- 4) 尾崎 諤・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。
- 5) 菅田紀之・尾崎 諤・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。
- 6) 土木学会：コンクリート標準示方書[平成3年版]設計編、土木学会、pp.20~21、1991。