

[1014] 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

正会員 ○尾崎 詔 (室蘭工業大学工学部)
菅田紀之 (室蘭工業大学工学部)
渡辺洋一 (室蘭工業大学大学院)

1. まえがき

大気中と比較して水中でのコンクリートの疲労強度が著しく低下することは、近年幾つかの研究報告によって明らかにされているが、それを改善するための有効な手段は未だ解決されておらず、疲労強度低下の原因も明らかにされていないのが現状である。このため水中または湿潤環境下で繰返し荷重を受ける海洋構造物あるいは橋梁の鉄筋コンクリート床版などを考えるとき、疲労強度低下の原因を究明しつつ改善を図ることは急務と考えられる。

著者らはこれまでに水中圧縮疲労強度改善の試みとして、鋼繊維コンクリート、SECコンクリート、シリカフェーム10%置換コンクリートなどを用いた疲労試験を行ってきたが¹⁾、それらの完全片振り 200万回疲労強度はそれぞれ静的強度の42%、43%、39%であり、大気中での疲労強度が静的強度の55%前後であることと比較して、まだ低い値であると言わざるを得ない。そこで、本研究では、シリカフェーム置換コンクリートに着目し、先に行ったシリカフェームの置換率10%を20%に増加して疲労試験を行い、シリカフェームで置換することによる水中圧縮疲労強度の改善効果を調べるとともに、置換率の違いによる 200万回疲労強度の差を明らかにした。さらに以前SEC工法での改善効果が比較的大きかったことから、シリカフェームを20%置換したコンクリートに対し、SEC工法を併用した場合の効果も併せて検討した。また疲労試験と並行して疲労試験水槽内のpHの変化と供試体の歪を測定することによって水中でのコンクリートの疲労性状についての検討も行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

実験に用いたシリカフェームはフェロシリングラストであり、その性質は、平均粒径 0.2 μ m、比表面積180,000cm²/g、比重 2.2、SiO₂含有率約90%である。

セメントは普通ポルトランドセメント、粗骨材は碎石、細骨材は海砂を使用し、



図-1 SEC工法の練り混ぜ順序

表-1 コンクリートの配合

ハッチ	粗骨材 の最大 寸法(mm)	水結合材 比W/(C+Sf) (%)	細骨材 率s/a (%)	単位量 (kg/m ³)								測定値		練混ぜ 方法
				水 W	セメント C	シリカフェーム Sf	細骨材 S	粗骨材 G	AE剤 (cc)	減水剤 (g)	スランプ (cm)	空気量 (%)		
1	20	50	42	170	272	68	752	1034	135	1700	10.5	5.5	普通	
2	20	50	42	165	264	66	761	1048	99	1650	11.4	3.4	普通	
3	20	50	42	145	232	58	799	1100	150	1500	10.5	3.0	SEC	
4	20	50	42	145	232	58	799	1100	150	1500	7.1	4.7	SEC	

シリカフュームで置換することによるスランプの減少を考慮し、AE剤と減水剤を併用した。コンクリートの練り混ぜは計4回行い、すべてをシリカフュームでセメント量の20%内割りに置換した。以下表-1に各バッチの配合を示す。このうちバッチ3および4にはSEC工法を併用し、1次水結合材比 $W_1/(C+Sf)$ が20%になるように1次水 W_1 、2次水 W_2 をそれぞれ58、87kg/m³ として図-1に示す手順で練り混ぜを行った。但し、バッチ4では W_1 にもAE剤と減水剤を加えた。

2.2 試験供試体、静的基準強度

供試体にはすべてφ10×20cmの円柱供試体を使用し、各バッチ毎に30本ずつ計120本打設した。打設後4~5時間後にペーストキャッピングを行い、24時間後に脱型した後20℃の恒温養生水槽内で4~5ヶ月間水中養生を行った。

表-2 静的基準強度(材令4ヶ月)

バッチ	各種コンクリート	静的基準強度(kg/cm ²)
1	シリカフューム20%置換コンクリート	534
2	シリカフューム20%置換コンクリート	535
3	シリカフューム20%置換SECコンクリート	491
4	シリカフューム20%置換SECコンクリート	508

静的基準強度は材令4ヶ月で供試体を乾燥させる事なく湿潤な状態で試験した。それらの結果を表-2に示す。また供試体の歪を測定するため歪ゲージを供試体の側面に接着する際、供試体を一時水槽から取り出し数時間大気中に放置したが、歪ゲージに防水加工を施した後水槽内に戻して最低24時間水を吸収させてから疲労試験を開始した。

2.3 疲労試験概要

疲労試験は構造物疲労試験機(サーボバルブ方式、容量30トン)を使用し、繰返し荷重の形式を正弦波、載荷速度は10Hzに固定して水中圧縮疲労試験を行った。繰返し荷重の静的基準強度に対する上限応力比 S_1 は、シリカフューム20%置換コンクリートで60、55、50、45%の4段階、シリカフューム20%置換SECコンクリートでは65、56.4、47.7%の3段階を採用し、下限応力比 S_2 はそれぞれ3.5、3%とした。繰返し荷重は供試体が破壊するまで連続して載荷し、破壊までの繰返し回数 N_f を測定した。また水中のpHを測定するため、疲労水槽内にpHメータを常時設置しておき適当な繰返し回数時にpHの値を記録した。歪の測定には一定間隔で作動するデータレコーダを用いて応力-歪曲線を随時記録し、X-Yレコーダに出力して解析を行った。

3. 試験結果および考察

3.1 P-N、S-N線図

各上限応力比 S_1 ごとの供試体の疲労寿命 N_f に対する生存確率 P ($P=1-r/(n+1)$) を求め、それらが対数正規分布に従うと仮定してP-N

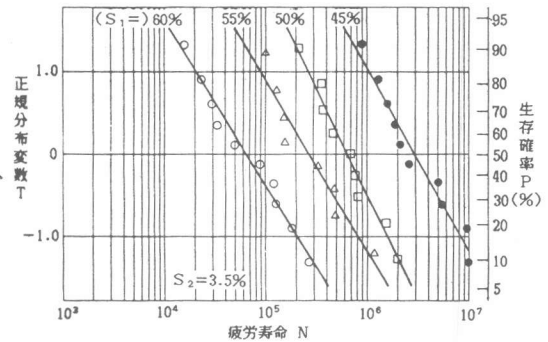


図-2 シリカフューム20%置換コンクリートのP-N線図

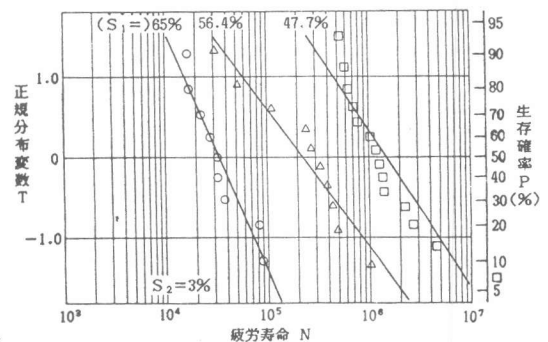


図-3 シリカフューム20%置換SECコンクリートのP-N線図

線図上で直線回帰を行った(図-2、図-3)。これらの P-N線図より、各上限応力比 S_1 に対して生存確率50%に相当する繰返し回数を求め、それらを直線回帰したものが図-4に示す S-N線図である。以上の結果をさらに修正グッドマン線図を用いて完全片振り($S_2=0$)に換算したものを、普通コンクリートの大気中疲労²⁾、シリカフェーム10%置換コンクリート(高炉セメント使用)の水中疲労¹⁾、SECコンクリート(混和材なし)の水中疲労¹⁾、普通コンクリートの水中疲労²⁾と比較したものが図-5および表-3に示す S-N線図とその回帰式である。今、普通コンクリートの大気中における 200万回疲労強度56%を基準に考えると、水中における 200万回疲労強度との差が普通コンクリートでは26%あるのに対し、シリカフェーム20%置換コンクリートおよびシリカフェーム20%置換SECコンクリートではその差がそれぞれ12%、11%となっており、普通コンクリートと比較して水中における疲労強度の低下が半分以下になっている。またシリカフェーム10%置換コンクリートと比較しても疲労強度が増大していることからシリカフェームの置換率は10%よりも20%の方が水中疲労にとって有効であり、シリカフェーム混入とSEC工法の併用も効果的であることが示された。しかし 200万回疲労強度で比較する限りシリカフェーム20%置換コンクリートとシリカフェーム20%置換SECコンクリート、またSECコンクリートの間には有意な差がみられなかった。

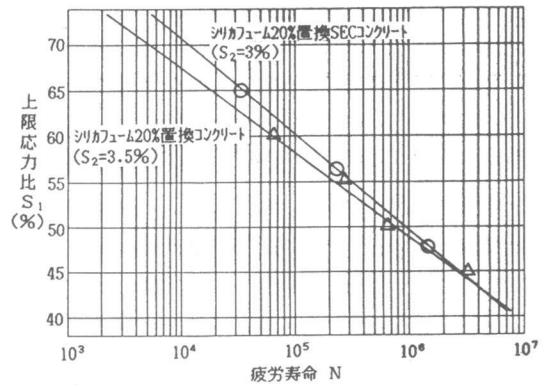


図-4 シリカフェーム20%置換コンクリートおよびシリカフェーム20%置換SECコンクリートのS-N線図

以上のことから結論として、シリカフェーム20%置換コンクリートとSECコンクリートの水中疲労強度の改善効果はほぼ同程度と考えられる。また、シリカフェーム20%置換SECコンクリートに相乗効果が見られない理由としては、シリカフェームを置換したコンクリートの最適一次水結合材比が別に存在する可能性、コンクリートの損傷が進むにつれて水のクサビ作用の影響が顕著になることなどによる疲労強度の頭打ち、などが考えられる。またシ

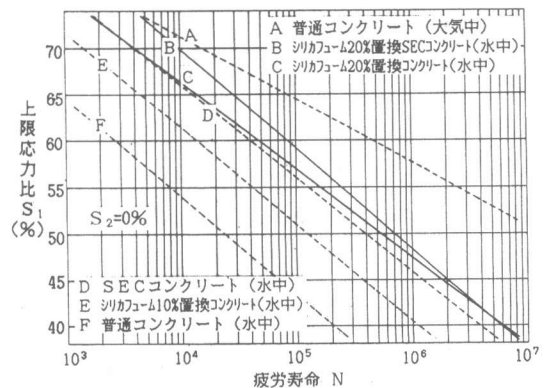


図-5 各種コンクリートのS-N線図

表-3 各種コンクリートのS-N線図の回帰式 ($S_2=0\%$)

	回帰式 (S-N LINE)	200万回疲労強度(%)
A 普通コンクリート(大気中) ²⁾	$S_1=0.984-0.068 \log N$	56
B シリカフェーム20%置換SECコンクリート(水中)	$S_1=1.130-0.108 \log N$	45
C シリカフェーム20%置換コンクリート(水中)	$S_1=1.037-0.094 \log N$	44
D SECコンクリート(水中) ¹⁾	$S_1=1.064-0.101 \log N$	43
E シリカフェーム10%置換コンクリート(水中) ¹⁾	$S_1=1.009-0.099 \log N$	39
F 普通コンクリート(水中) ²⁾	$S_1=0.958-0.105 \log N$	30

リカフェーム20%置換SECコンクリートでは特に高応力での疲労強度に改善がみられた。

3.2 pH値

図-6～8にそれぞれ普通コンクリート、シリカフューム20%置換コンクリート、シリカフューム20%置換SECコンクリートの繰返し回数Nに対する疲労水槽内のpHの変化を示す。グラフの端部は破壊時に相当する。シリカフュームで置換したコンクリートでは破壊時におけるpHの値が普通コンクリートと比較して低くなっており、pH値より推定した溶出水酸化カルシウム量は普通コンクリートの1/5以下に減少していることがわかった。シリカフュームでセメント量の20%を置換した場合、コンクリート内の水酸化カルシウム量は、ポゾラン反応によって約1/3に減少していることから、この半分くらいしか溶出していないことになり空隙充填効果によってコンクリートの密実度が増し、溶出の水みちになるひび割れが増大せず疲労強度が改善されたものと思われる。一方、シリカフュームで20%置換したコンクリートと、シリカフュームで20%置換したSECコンクリートではpH値に大差はなくほぼ同様の傾向を示していることから、SEC工法を併用することによる相乗効果はなかったようである。またコンクリートの損傷度とpHの上昇とは密接な関係があると思われるがすべてのグラフから破壊直前にpHが急激に上昇する傾向が見られるのは、コンクリートの疲労損傷が急速に進んだ結果と思われる。この特性は微小ひび割れ内に吸収された水の間隙水圧によるクサビ作用によってひび割れの拡大が促進されたことによるものと思われる。

3.3 体積歪

普通コンクリートの大気中と水中での体積歪の挙動には明確な相違がみられ、大気中では体積歪がマイナス（収縮）から緩やかにプラス膨張に移行するのに対し、水中では破壊直前にグラフが急激に立ち上がり、特に体積歪0を過ぎた付近からは瞬時に破壊が起こっている。同様な傾向は本研究におけるシリカフューム20%置換コンクリート、シリカフューム20%置換SECコンクリートにおいてもみられ、疲労寿命が伸びたにもかかわらず破壊直前には普通コンクリートの水中疲労とほぼ同じ挙動を示している。体積歪の増大は横歪の増加を示し、横歪は縦に走るひび割れの拡大または増加を反映することから

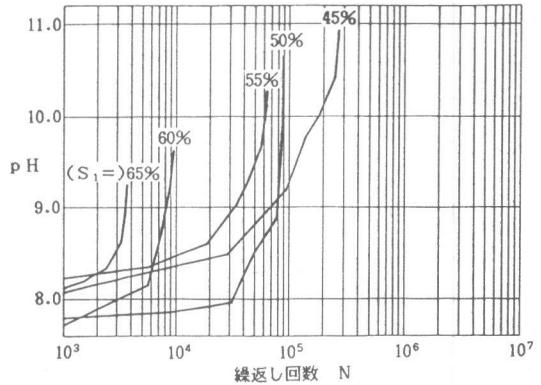


図-6 普通コンクリートのpHの変化

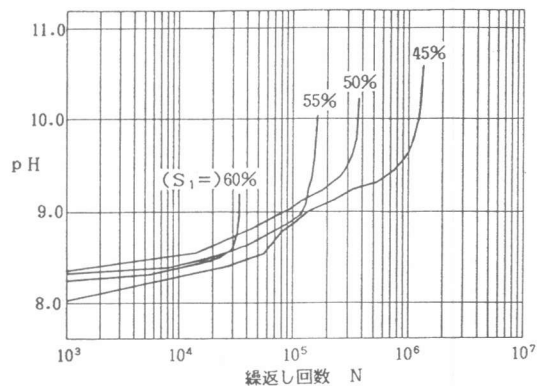


図-7 シリカフューム20%置換のコンクリートのpHの変化

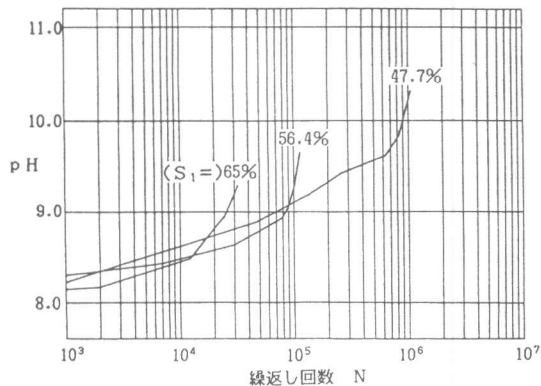


図-8 シリカフューム20%置換SECコンクリートのpHの変化

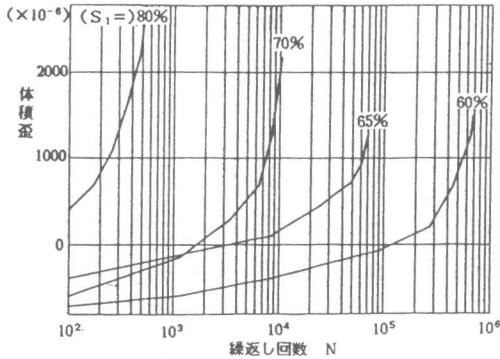


図-9 普通コンクリート大気中の体積歪

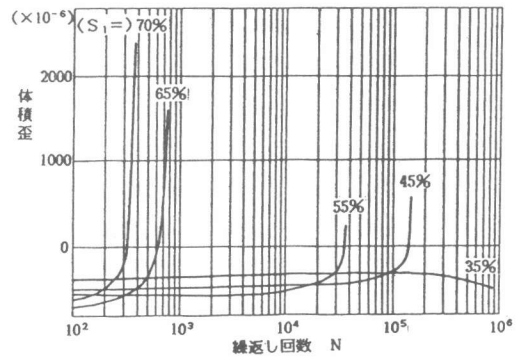


図-10 普通コンクリート水中の体積歪

ひび割れの進展に付随する水のクサビ作用によってひび割れの拡大が進み急速な破壊に至ったものと思われる。しかしシリカフュームで置換したコンクリートや、SEC工法を応用したコンクリートでは骨材界面での付着の改善や、水密性の向上によってひび割れの発生が抑制されたため疲労寿命が伸びたと考えられる。

3.4 ヒステリシスループ

コンクリートの応力-歪曲線は荷重の載荷時と除荷時では違う経路をたどり、曲線はヒステリシスループを描く。繰返し荷重を受けるコンクリートのヒステリシスループは初回のループの面積 A_1 から漸減して最小になるがやがて漸増して破壊時の最終面積は極めて大きくなる。これらのコンクリートの見かけの塑性挙動は微視的には脆性性状であって、残留歪の増加や、ヒステリシスループの描く面積とコンクリートの内部破損とは密接な関係があると思われる³⁾。普通コンクリートの場合、図-13に示す大気中の初回のヒステリシスループ A_1 に対する各ヒステリシスループ A_n の面積比 (A_n/A_1)は40%程度まで減少し、その後は漸増して破壊に至るが大きな面積の増加はみられない。これに対し図

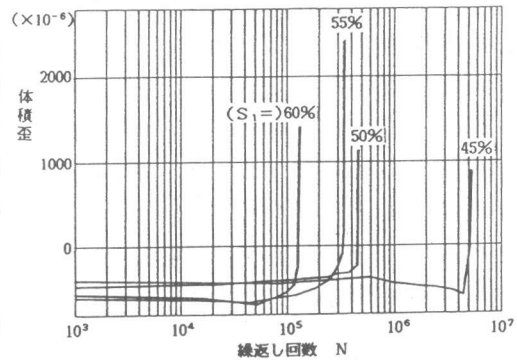


図-11 シリカフューム20%置換コンクリート水中の体積歪

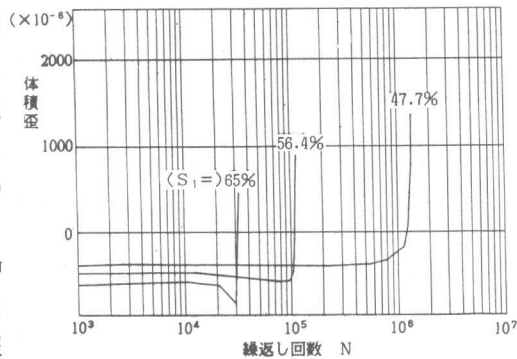


図-12 シリカフューム20%置換SECコンクリート水中の体積歪

図-14に示す普通コンクリートの水中では大きな面積の減少は見られず、また破壊時のグラフの立上りが急で面積も初回のループ以上に増加している。図-15で示したシリカフュームで20%置換したSECコンクリートは、普通コンクリートの大気中と類似して面積比が小さくなっており、より弾力的な挙動に近づいている。しかし破壊時付近の急な上昇は普通コンクリートの水中疲労の場合に近く、水のクサビ作用の影響と思われる急速な破壊が推定される。このようにシリカ

フューム20%置換SECコンクリートでは疲労寿命の前半と後半で二面性が見られ、前半ではシリカフュームの混入やSEC工法の効果によってひび割れの抑制がなされ疲労寿命が伸びたが、破壊時付近ではコンクリートの損傷とともに水のクサビ作用の影響が支配的になり、水中におけるコンクリートの疲労の本質的な性状とも言える急速な破壊が起こっている。

4. 結論

(1) 修正グッドマン線図を利用して完全片振りに換算した普通コンクリートの200万回疲労度は、大気中の場合には静的強度の56%であったのに対し、水中では30%に低下したが²⁾、水中でもシリカフュームで10%置換することによって39%、20%置換することによって44%に改善された。

(2) シリカフューム20%置換SECコンクリートでは200万回疲労強度が45%にとどまり、SECコンクリートの43%と比較して相乗効果は殆ど見られなかった。

(3) シリカフュームで置換したコンクリート、あるいはこれにSEC工法を併用したコンクリートでは、ボゾラン反応や骨材界面の強化による水密性の向上によって、破壊時期近くに至るまでのひび割れが抑制され、疲労寿命は伸びたが、破壊時には水中疲労に共通する急速な破壊性状を示すことが、pHや歪の測定から知ることができた。

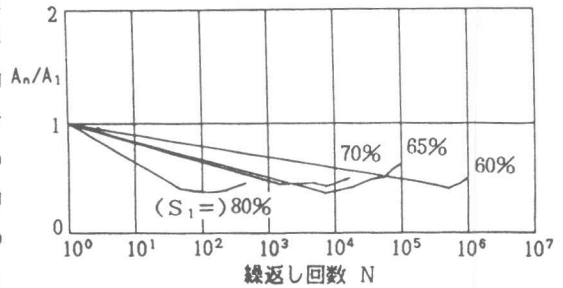


図-13 普通コンクリートの大気中のヒステリシスループ面積比

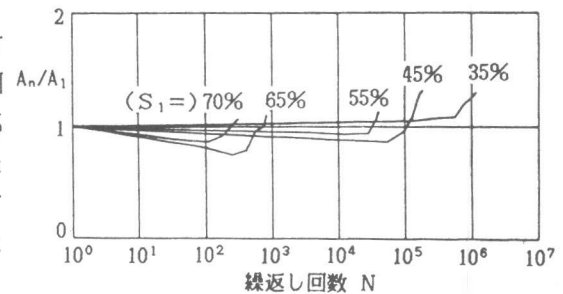


図-14 普通コンクリートの水中のヒステリシスループ面積比

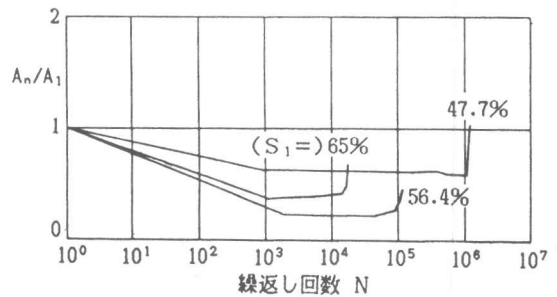


図-15 シリカフューム20%置換SECコンクリートのヒステリシスループ面積比

参考文献

- 1) 鈴木、尾崎：水中におけるコンクリートの圧縮疲労強度の改善について、土木学会第40回年次学術講演会、昭和60年9月
- 2) 尾崎、志村：水中におけるコンクリートの圧縮疲労強度、土木学会第35回年次学術講演会、昭和55年9月
- 3) 松下、牧角、郡山：コンクリートの水中疲労試験におけるエネルギー的考察、土木学会第39回年次学術講演会、昭和59年10月