

論文 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

菅田 紀之^{*1}・尾崎 詔^{*2}・水吐 則行^{*3}

要旨：高炉スラグ微粉末を混和材として用いた高強度コンクリートの圧縮疲労試験を大気中乾燥状態および水中湿潤状態で行い、その疲労強度および歪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、高強度コンクリートの200万回疲労強度は普通コンクリートと同程度であり、大気中においては静的強度の65%、水中においては39%であった。また、大気中疲労では微細ひび割れが徐々に増加し破壊に至るのに対して、水中疲労では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：高強度コンクリート、疲労強度、疲労、高炉スラグ微粉末

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、大気中で気乾状態にあるコンクリートと比較して著しく低下する[1]ことが報告されて以来、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あるいは真空処理を行ったコンクリートに関する研究を行っている[2], [3], [4]。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る。

一方、近年の構造物の大型化により、高強度で流動性の高いコンクリートが適用されるようになってきている。疲労強度が問題となるような海洋構造物等へのこの種のコンクリートの適用を考えた場合、水中における疲労強度低下の原因が解明されていない現状では、疲労特性を把握することは重要な課題である。

そこで本論文では、混和材として高炉スラグ微粉末を用いた比較的流動性の高い高強度コンクリートおよび普通コンクリートの圧縮疲労試験を大気中乾燥状態および水中湿潤状態で行い、それらの疲労強度および歪等の疲労特性を比較しながら検討を行った。検討は200万回疲労強度、体積歪の疲労の進行に伴う変化、ヒステリシスループの面積変化について行っている。

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。NSCは普通コンクリート、HSCは高強度コンクリートを表している。高強度コンクリートの配合は水結合材比 $W/(C+B)$ が35%および30%の二種類である。NSCの練り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、細骨材として海砂(粗粒率:2.56)、粗骨材として碎石(最大寸法:20mm)、混和剤としてAE剤である。また、HSCの練り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、混和材料として高炉スラグ微粉末(ブレン値:

*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)

*3 大成建設(株)、工修

8000 cm²/g)、細骨材として陸砂(粗粒率:2.73)、粗骨材として碎石(最大寸法:15 mm)、混和剤として高性能減水剤である。

試験に用いたNSCの供試体は直径10 cmで高さ20 cm、HSCでは直径7.5 cmで高さ15 cmの円柱供試体であり、材令1日において型枠から脱型し標準養生を行った。

表-1 コンクリートの配合

| 配合 | 水結合材比 W/(C+B) (%) | 細骨材率 s/a (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | | | スランブ (cm) | スランブ フロー (cm) | 空気量 (%) |
|-------|-------------------------|--------------------|--------------------------|-----------|------------|----------|----------|----------------|--------------|---------------------|------------|
| | | | 水 W | セメント C | 高炉スラグ B | 細骨材 S | 粗骨材 G | 混和剤 SP | | | |
| NSC | 52 | 43 | 165 | 318 | - | 796 | 1068 | 0.095* | 14.5 | - | 8.0 |
| HSC-1 | 35 | 39 | 160 | 230 | 230 | 737 | 1104 | 9 [†] | 19.5 | 41 | 0.7 |
| HSC-2 | 30 | 46 | 165 | 274 | 274 | 822 | 896 | 4 [‡] | 26.0 | 59 | 1.9 |

*天然樹脂酸塩系 AE 剤

†ナフタリン系高性能減水剤

‡ポリカルボン酸系高性能減水剤

2.2 疲労試験方法

圧縮疲労試験は、電気油圧サーボ式、容量30 tfの疲労試験機を用いて行った。水中疲労試験の場合には、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5 Hzとした。NSCにおける静的基準強度に対する上限応力比 S_1 は、水中疲労試験では45、50、55、60、65%の五段階、大気中疲労試験では65、70、75%の三段階に設定し、下限応力比 S_2 は5%に設定した。また、HSCにおける上限応力比は、水中疲労試験では50、60%の二段階、大気中疲労試験では70%の一段階に設定し、下限応力比はHSC-1では3.5%、HSC-2では6.0%に設定した。HSCの大気中疲労試験はHSC-1でのみ行った。なお、試験期間中における歪の変化を計測するために、供試体側面に歪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。

水中疲労試験に用いたコンクリート供試体は、NSCでは7ヶ月間標準養生、HSC-1およびHSC-2では3ヶ月間標準養生したものである。また、大気中疲労試験に用いた供試体は、NSCでは2ヶ月間標準養生した後、8ヶ月間大気中において乾燥させたもの、HSC-1では3ヶ月間標準養生した後、1ヶ月間大気中において乾燥させたものである。材令を比較的長期にすることにより、疲労試験期間内における供試体の強度変化が少なくなるようにした。

表-2 静的強度

3. 試験結果

3.1 静的強度

表-2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。静的強度は3本の供試体の平均値である。なお、湿潤

| | 28日強度 (kgf/cm ²) | 疲労試験開始時 | |
|-------|---------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| | | 湿潤状態(kgf/cm ²) | 乾燥状態(kgf/cm ²) |
| NSC | 278 | 345 | 338 |
| HSC-1 | 671 | 761 | 890 |
| HSC-2 | 747 | 799 | - |

状態の静的強度試験は大気中において行った。NSCの28日強度は280 kgf/cm²程度、HSCでは700 kgf/cm²前後である。また、疲労試験開始時における静的強度は、NSCの湿潤状態、乾燥状態ともに340 kgf/cm²程度、HSCでは湿潤状態において750~800 kgf/cm²、乾燥状態において900

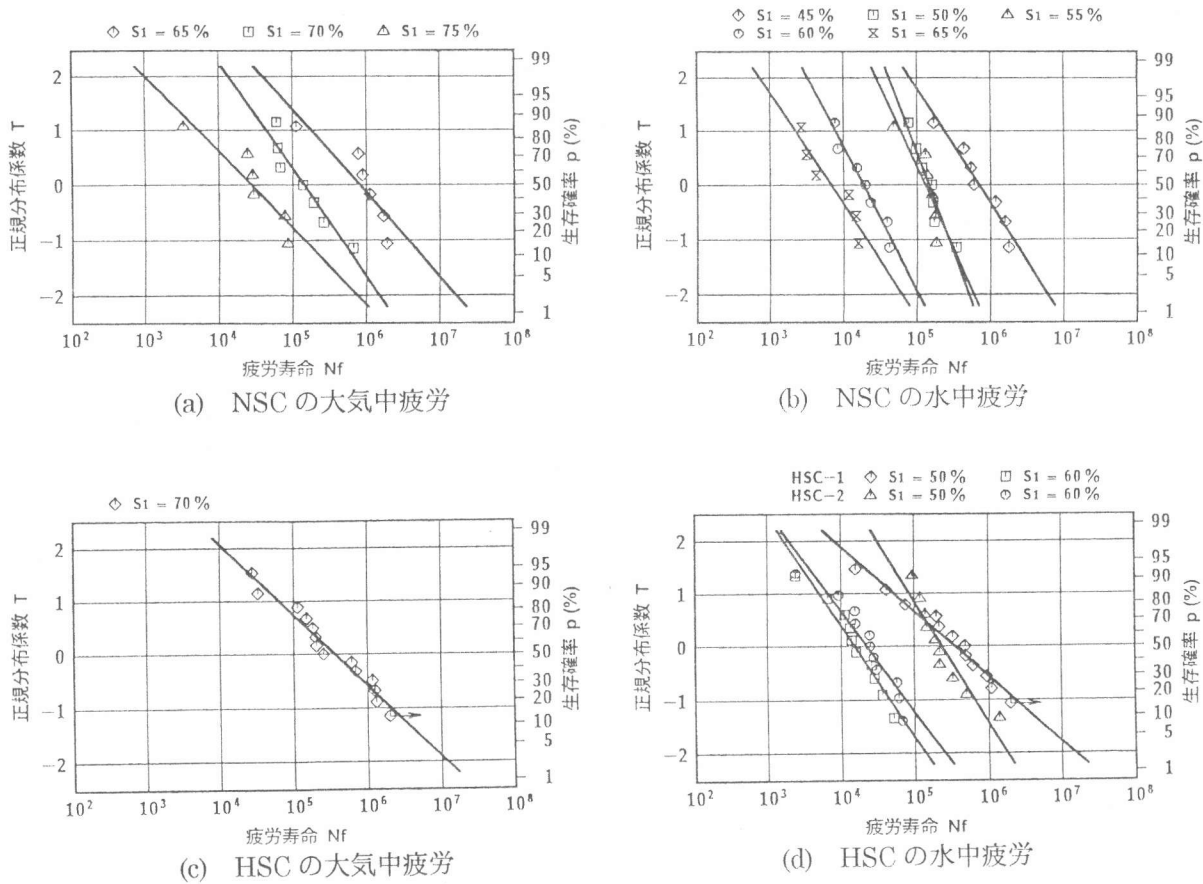


図-1 P-N線図

kgf/cm²程度になっている。

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[5]に従い $S-N$ 回帰直線を求めると図-2 ようになる。また、表-3 に回帰直線式、200万回疲労強度およびコンクリート標準示方書

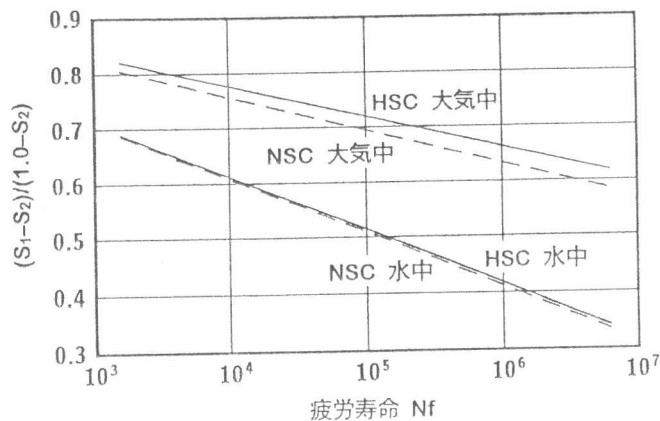


図-2 S-N線図

表-3 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 |
|---------|--|---------------|------|
| NSC 大気中 | $(S_1 - S_2)/(1 - S_2) = 1 - 0.061 \log N_f$ | 61 | 16.3 |
| NSC 水中 | $(S_1 - S_2)/(1 - S_2) = 1 - 0.098 \log N_f$ | 38 | 10.2 |
| HSC 大気中 | $(S_1 - S_2)/(1 - S_2) = 1 - 0.056 \log N_f$ | 65 | 17.9 |
| HSC 水中 | $(S_1 - S_2)/(1 - S_2) = 1 - 0.097 \log N_f$ | 39 | 10.3 |

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、NSC の 200 万回疲労強度は大気中では 61 % であるのに対して水中では 38 %、HSC においては大気中では 65 % であるのに対して水中では 39 % となっており、水中疲労強度が大気中疲労強度より 23~26 % 小さくなっている。このことより、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がわかる。

大気中疲労における 200 万回疲労強度を強度の違いによって比較すると、NSC では 61 % であるのに対して HSC では 65 % と 4 % 大きくなっているが、同程度の疲労強度と考えてもよいものと思われる。また、水中疲労における 200 万回疲労強度は、NSC では 38 %、HSC では 39 % と同程度の疲労強度になっていることがわかる。コンクリートの高強度化によっても、水の影響を緩和することができず、普通強度のコンクリートに対する場合と同程度に影響した結果と考えられる。

コンクリート標準示方書設計編[5]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 としており、本試験からも同様の結果が得られている。

3.3 体積歪の変化

図-3~6 は、繰返し载荷に伴う供試体の体積歪の変化を示している。NSC の大気中疲労では、体積歪が負の値（圧縮）から正の値（膨張）へ緩やかに移行し歪が増大し破壊に至っている。それに対して水中疲労では負の値から正の値に急激に変化するとともに急増し破壊に至っている。HSC は、NSC の場合と同様に大気中疲労では緩やかな歪の変化、水中疲労では急激な歪の変化の後、破壊に至っている。体積歪の負から正への変化は、コンクリートのひび割れの増加に伴う体積膨張と考えることができる。したがって、大気中疲労では、破壊につながるひび割れ発生後、徐々にひび割れが進行し最終的に破壊に至っているものと考えられる。また、水中疲労では、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。

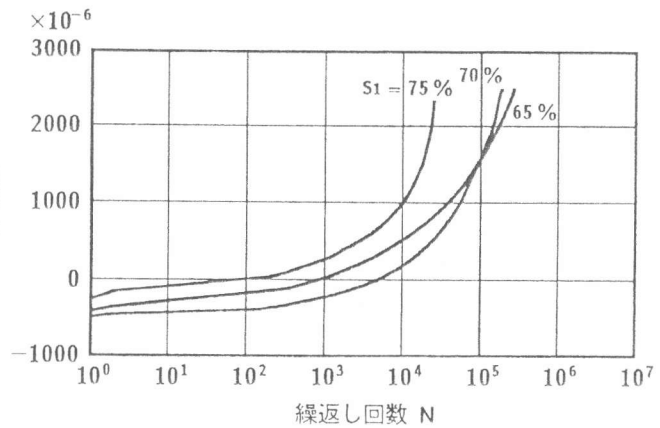


図-3 NSC の大気中疲労による体積歪の変化

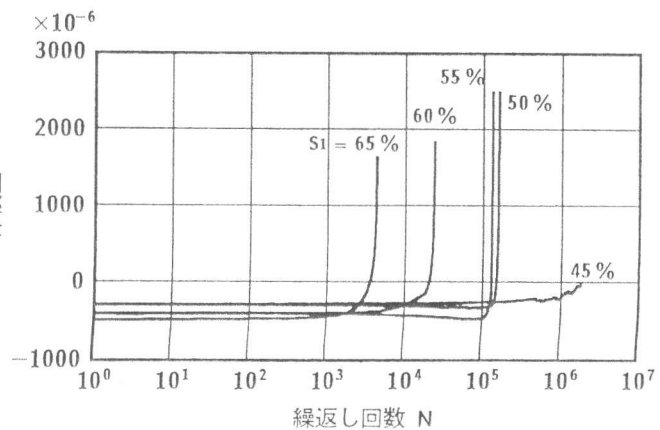


図-4 NSC の水中疲労による体積歪の変化

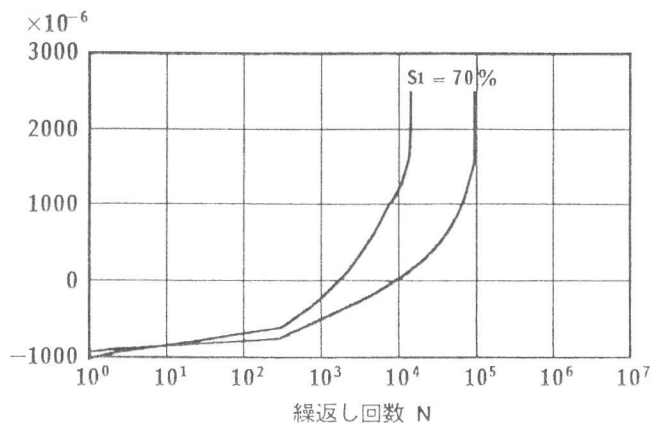


図-5 HSC の大気中疲労による体積歪の変化

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-歪曲線は荷重載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-7~10は、繰返し載荷に伴うヒステリシスループの面積変化を初載荷時の面積に対する比で示している。いずれの場合においても、2回目の載荷以後、面積が減少していることがわかる。NSCの大気中疲労では、2回目載荷以後0.05程度に減少し破壊時までほぼ一定値を保っている。なお、上限応力比が70%の場合、破壊直前に面積が若干増加している。NSCの水中疲労では2回目載荷以後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、破壊直前に面積が急増している。また、HSCの大気中疲労では2回目載荷以後0.07程度まで、水中疲労では0.2程度まで減少している。HSCの水中疲労において面積比がNSCよりも小さくなっていることがわかる。

静的強度および上限応力がほぼ等しいNSCの上限応力比が65%の場合における初回の面積は、大気中疲労では約 5×10^{-2} kgf/cm²であるのに対して水中疲労では約 2×10^{-2} kgf/cm²であり1/2以下になっている。しかしながら、2回目載荷以後のループの面積は、大気中疲労では約 2×10^{-3} kgf/cm²であるのに対して水中疲労では約 6×10^{-3} kgf/cm²であり約3倍の面積になっている。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。上限応力は異なっているがHSCの大気中疲労における上限応力比70%の場合と水中疲労における上限応力比60%の場合の比較を行うと、大気中疲労の初回のループの面積は約 2×10^{-1} kgf/cm²、水中疲労では約 5×10^{-2} kgf/cm²であり大気中の約1/4になっている。2回目載荷以後の面積は、大気中疲労では 1.5×10^{-2} kgf/cm²、水中疲労では 8×10^{-3} kgf/cm²であり大気中の約1/2になっており、損失エネルギーが小さくなっている。しかしながら疲労寿命は水中疲労において短くなっている。

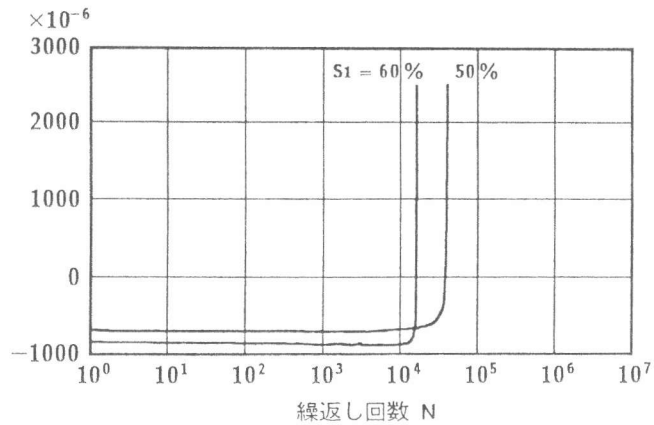


図-6 HSCの水中疲労による体積歪の変化

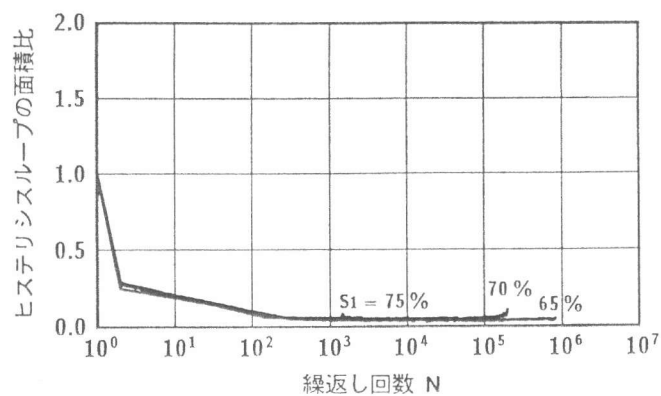


図-7 NSCの大気中疲労によるヒステリシスループの面積変化

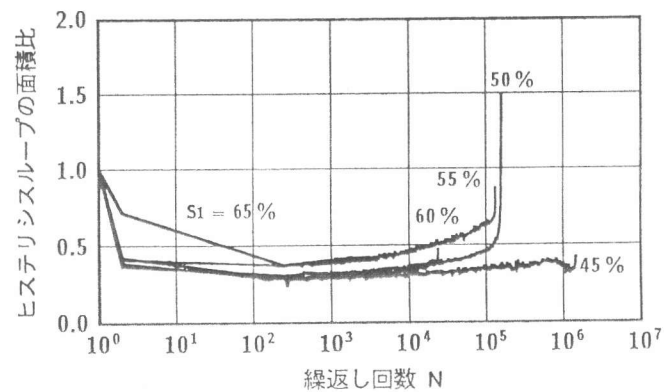


図-8 NSCの水中疲労によるヒステリシスループの面積変化

4. ま と め

近年の構造物の大型化により、適用されるようになってきた高強度コンクリート、および普通コンクリートの圧縮疲労試験を大気中乾燥状態および水中湿潤状態で行い、200万回疲労強度、体積歪の疲労の進行に伴う変化、ヒステリシスループの面積変化について検討を行った。本研究に用いた高強度コンクリートは混和材として高炉スラグ微粉末を用いたものである。検討結果をまとめると以下のようになる。

- 1) 高強度コンクリートの200万回疲労強度は普通コンクリートと同程度であり、大気中疲労では65%、水中疲労では39%である。
- 2) 本研究で求められた K 値は、コンクリート標準示方書とほぼ同様の値である。
- 3) 水が疲労強度の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。
- 4) 大気中疲労においてはコンクリート内部に発生したひび割れが徐々に進行し破壊に至る。
- 5) 水中疲労においては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。
- 6) 水中疲労における急激な破壊現象は、コンクリートの高強度化によるマトリックスの強化によっても発生する。
- 7) ヒステリシスループの初载荷の面積に対する2回目载荷以後の面積比は、大気中疲労では水中疲労よりも小さい。
- 8) 静的強度および上限応力が同程度の場合、1回の荷重载荷によるエネルギー損失は、初载荷では大気中疲労において大きく、2回目载荷以後は水中疲労において大きい。

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 諷・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.
- 3) 菅田紀之・尾崎 諷・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 諷・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) 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.

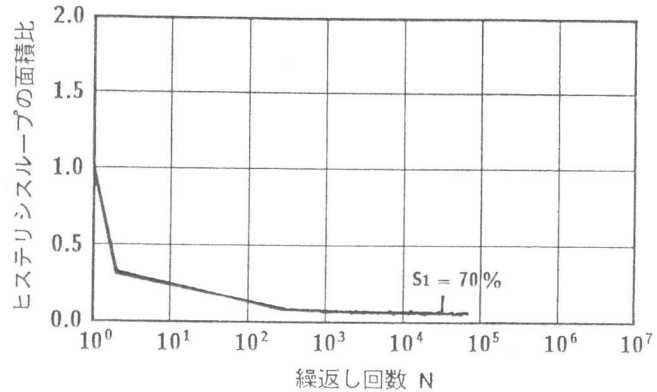


図-9 HSCの大気中疲労によるヒステリシスループの面積変化

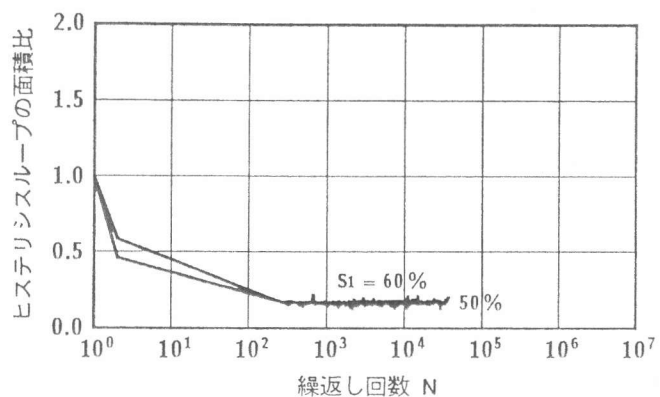


図-10 HSCの水中疲労によるヒステリシスループの面積変化