

論文 硫黄固化体の疲労特性に関する実験的研究

市川 武志^{*1}・大島 義信^{*2}・中野 裕一^{*3}

要旨：硫黄結合剤，高炉スラグ，フライアッシュを骨材とする硫黄高炉スラグ固化体(通称 SSC)は，打設後数時間で高強度コンクリート並みの強度を発現し，また水中でも強度が変化しないといった特徴を持ち，水中構造物への適用が期待されている。そこで本研究では SSC の実用化に向けて，SSC 円柱供試体に対する圧縮疲労試験を行った。その結果，気中及び水中において圧縮強度がほぼ変わらないという結果が得られた。また，繰り返し载荷による供試体内部の温度上昇が確認され，温度上昇を加味した評価手法の提案を行った。

キーワード：硫黄，高炉スラグ，フライアッシュ，疲労

1. はじめに

近年，日本では年間 200 万トンの硫黄が生産されており，その余剰分の有効利用について検討が行われている。硫黄高炉スラグ固化体(通称 SSC)は硫黄を有効利用できる建設材料として研究が進められている¹⁾。

SSC は高炉スラグ，フライアッシュを骨材とし，硫黄を結合材として用いた建設材料である。水和反応で固化するセメントと異なり，SSC は硫黄の冷却固化により生成されるため，養生期間が通常数時間程度と非常に短い。しかも常温で高強度コンクリートと同等の圧縮強度を持ち，遮水性が高いという優れた特徴を持つ²⁾。こうした特性を踏まえ，SSC は特に護岸や消波ブロックなどの水中構造物への適用が期待されている。しかしながら，これまで SSC は気中での正確な疲労性状や水中における疲労特性の評価が行われていなかった。よって本研究では SSC の実用化に向けて，気中および水中において SSC の疲労試験を行い，その特性の検討を行った。

フライアッシュを骨材としてそれぞれ使用している。SSC の配合を表-1 に示す。配合は，圧縮強度が最大となるよう決定した¹⁾。

図-1 に SSC の製作過程を示す。まず硫黄を 150℃まで加熱し融解させる。融解した硫黄に添加剤を加え改質させ，同じく加熱した高炉スラグ，フライアッシュを加え混練する。混練後，締固めを行いながら打設し，自然冷却させることで硫黄の冷却固化により硬化する。通常，数時間冷却すれば必要な強度が得られる。

表-1 SSCの配合 (重量比 %)

硫黄	高炉スラグ	フライアッシュ	添加剤
19.83	65.46	13.88	0.83

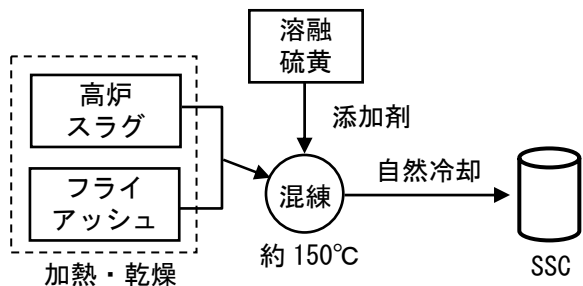


図-1 SSCの製作過程

2. SSC の特徴

2.1 生成方法

SSC は硫黄を結合材として，高炉スラグ及び

*1 京都大学大学院 工学研究科都市環境工学専攻 修士課程 (正会員)

*2 京都大学大学院 工学研究科都市環境工学専攻 助手

*3 新日本石油 (株) 研究開発本部開発部開発 2 グループ

2.2 物理的特性

SSC の単位体積重量、空隙率、吸水率、線膨張係数を表-2 に示す。空隙率と吸水率が非常に低く、遮水性の高い密実な材料であると言える。SSC やコンクリートのようにポーラスな材料では、吸水や遮水が疲労特性に大きく影響を与えると考えられるため、SSC は水中での高い疲労強度が期待される。また、密度は普通コンクリートよりも若干大きい。

常温下における SSC の圧縮強度、静弾性係数、ポアソン比、割裂強度及び曲げ強度を表-3 に示す。圧縮強度及び静弾性係数は高強度コンクリートに近い強度を有していることが分かる。一方で割裂強度は圧縮強度の約 1/15、曲げ強度は約 1/10 と、コンクリート同様引張に弱い材料である。

2.3 温度依存性

SSC は冷却固化によって強度を発現させているため、その圧縮強度と静弾性係数は温度に強く依存する。図-2 は SSC の圧縮強度および弾性係数と温度との関係を表している。図にあるように、SSC の圧縮強度、静弾性係数は温度が上昇すると低下する。ただし、温度が 70℃付近でも 30MPa 以上の強度を持っていることから、通常の使用下ならコンクリートと同等の強度が期待できる。

なお、SSC の温度 $T(^\circ\text{C})$ と圧縮強度 $S(\text{MPa})$ との関係は、以下の式で表す。

$$S = -0.99T + 101.44 \quad (1)$$

3. 試験概要

SSC の疲労特性を調べるために、気中及び水中における一軸圧縮疲労試験を行った。供試体は $\phi 50 \times 100\text{mm}$ 円柱供試体(以降、小供試体)と $\phi 100 \times 200\text{mm}$ 円柱供試体(以降、大供試体)とを用いた。疲労試験は円柱供試体に対して、一定振幅の正弦波応力を載荷し、供試体の破壊時か又は載荷回数が 200 万回に達する時点まで続けた。

気中疲労試験では、乾燥状態の供試体を用いた。一方水中疲労試験では、供試体を 2 日以上

水中に浸漬させ、十分吸水させたものを用い、試験中も供試体全体を浸漬させた状態で実施した。

SSC の気中静的圧縮強度は、事前に実施した圧縮試験の結果から 75MPa とした。また、水中状態の SSC に対しても静的圧縮試験を行ったところ、気中における圧縮強度とほぼ同じであることが確認できたので、水中静的圧縮強度も気中と同じく 75MPa とした。

疲労試験の上限載荷応力比は圧縮強度の 80%、70%、60%および 50%とした。下限応力比はすべての試験において静的圧縮強度の 10%とし、載荷速度は 3Hz または 5Hz とした。また一部の

表-2 SSC の基本物理量

単位体積重量	2.50gf/cm ³
空隙率	<1%
吸水率	<0.1%
線膨張係数	10.5 μ /°C

表-3 SSC の力学特性

静的圧縮強度	75MPa
静弾性係数	28GPa
ポアソン比	0.28
割裂強度	5MPa
曲げ強度	8MPa

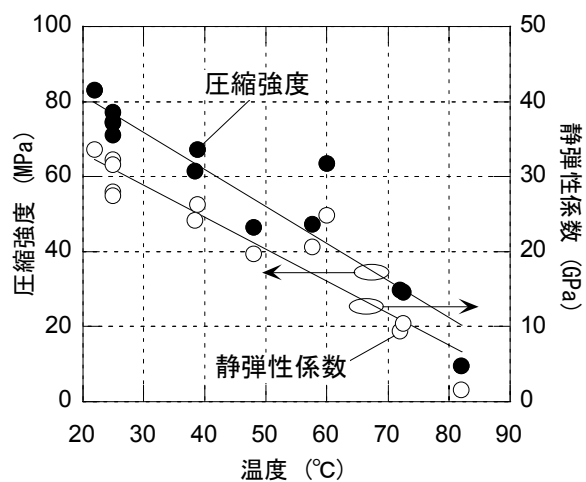


図-2 圧縮強度および弾性係数と温度との関係

試験において、外気の影響を抑えるために断熱材として発泡スチロールを供試体に巻きつけた状態で試験を行った。試験ケースは表-4の通りである。繰り返し载荷による影響を見るために、一部の試験において供試体のひずみ履歴を測定した。また SSC は温度によって圧縮強度が変化するので、正確な強度を得るために供試体表面温度及び室内温度の履歴を熱電対によって測定した。水中試験では室内温度に加えて水温の履歴も測定した。全試験の初期応力比は式(1)に初期供試体温度を代入したもので修正している。

SSC は繰り返し载荷を受けると内部の温度が上昇することが、測定された温度履歴によって判明した。そこで、疲労強度の評価に加えて温度変化に関する考察も行った。

4. 試験結果

4.1 繰り返し载荷による温度上昇

図-3 に、载荷中の供試体温度履歴の一例を示す。ただしこれらのケースは、供試体内部より発生する熱源の影響を明確にするため、供試体外周に断熱材を巻き付け、外部からの熱量の流入を遮断している。また図の縦軸は、試験開始時の表面温度を 0、終了時を 1 として供試体温度の変化率を表している。図より、SSC は繰り返し载荷により温度上昇することが確認できる。また断熱材を使用しない場合でも、2.1℃～25.8℃の温度上昇が確認されている。これは SSC の熱伝導率が 6.08×10^{-4} [J/sec·mm·K](コンクリートの約 1/50)と非常に低いため、圧縮塑性変形により発生した熱が、外部へ発散しにくく蓄積されやすいためであると考えられる。また図より、発熱は疲労寿命の 8 割近くに達すると急激に増加している。この傾向は、残留ひずみの履歴と同じ性質を示している。これらの試験におけるひずみ履歴を図-4 に示す。この試験ケースは、図-3 中に示す S=80%, N=59887 の試験の最大及び最小ひずみの履歴である。温度履歴同様、8 割程度の付近で残留ひずみが急激に増加している。これより、発熱の一因が塑性変形に伴う内部摩

表-4 試験ケース

環境	応力比	供試体	载荷速度	断熱材	供試体数
気中	80%	大/小	3/5Hz	有/無	10
	70%	大/小	3/5Hz	有/無	10
	60%	大/小	3/5Hz	有/無	6
	50%	大	5Hz	無	1
水中	80%	大/小	3/5Hz	無	10
	70%	大/小	3/5Hz	無	10
	60%	大	3/5Hz	無	7
	50%	大/小	5Hz	無	4

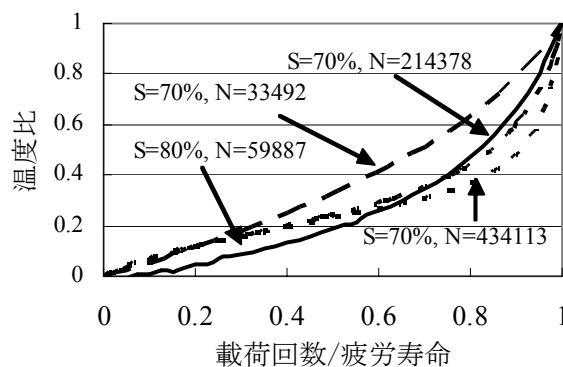


図-3 断熱材を巻いた場合の温度上昇

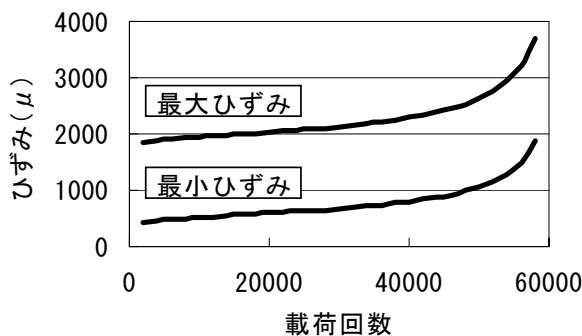


図-4 最大・最小ひずみ履歴

擦によるものであると推察される。

次に、供試体形状と温度上昇率の関係を表-5 に示す。このケースは共に応力比 70%、载荷速度 5Hz の結果である。表より、供試体形状が大きいほど、温度上昇が大きいことがわかる。これは、大型供試体の比表面積が小型供試体よりも小さいため、発生した熱の発散率が小さくな

ったためであると考えられる。

また表-6に、載荷速度と温度上昇の関係を示す。これより、3Hz~5Hz程度の載荷速度の範囲では、載荷速度が温度上昇へ与える影響は小さいといえる。ただし、載荷速度を顕著に小さくすれば、温度上昇が小さくなることが予想される。

一方水中疲労試験では、供試体の温度上昇は1.8℃程度であり、ほぼ無視できる程度であった。これは、供試体内に発生した熱が周囲の水によって素早く発散させられたためと思われる。

4.2 気中疲労強度

(1) 疲労強度の算定方法

コンクリート同様 SSC は、同一の上限応力比における疲労寿命が対数正規分布に従うと仮定した。すなわち、ある応力比の生存確率を $P(N)$ とすれば、疲労寿命は以下の式に従うとする。

$$t = \phi^{-1}(p(N))$$

$$\phi(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz \quad (2)$$

ここで t は標準正規分布曲線の対称軸からの距離を、 $\phi(x)$ は累積標準正規分布関数を表す。なお、生存確率は $p(N)$ 、以下の式で計算した。

$$p(N) = 1 - \frac{r}{l+1} \quad (3)$$

ここで r は疲労寿命 N を小さい順に並べたときの序数を、 l は同じ上限応力比で試験した試験体の個数をそれぞれ表す。本研究では、実験により得られた $P(N)$ を用い、各応力比の t-N 曲線を最小二乗法より算出し、生存確率が 50% となる疲労寿命、すなわち平均疲労寿命を求めた。

また、以上より得られる平均疲労寿命は、片対数軸上で上限応力比と線形関係にあると仮定した。すなわち、得られた平均疲労寿命と上限応力比の関係より、最小二乗法を用いて S-N 曲

表-5 供試体外形と温度上昇の関係

	供試体	初期温度	最終温度	疲労寿命
A	大	14.0℃	52.9℃	214378
B	小	16.5℃	28.4℃	685488

(応力比=70%, 載荷速度=5Hz)

表-6 載荷速度と温度上昇の関係

	供試体	載荷速度	温度上昇度	疲労寿命
A	小	3Hz	0.171	301686
B	小	5Hz	0.172	685488

(応力比=70%)

線の対数近似曲線を導出した³⁾。

(2) 一定振幅下における気中疲労強度

小型供試体の温度変化は小さく、一定応力振幅下での載荷とみなすことができる。よって以下では、小型供試体による結果を一定応力振幅による結果とみなす。図-5は、正規分布紙上に対数疲労寿命と生存確率との関係を応力比ごとにまとめたものである。また図-6は、平均疲労寿命と応力比の関係を示している。図より、以下の近似式が得られる。

$$S = -0.117 \log N + 1.198 \quad (4)$$

よって上式により表される S-N 曲線より、SSC の気中 200 万回強度は 46.2% となる。

(3) 温度上昇による応力変動の影響

SSC は温度が上昇すると圧縮強度が低下するため、温度上昇を伴う一定振幅下での載荷は、変動荷重による載荷とみなすことができる。大型供試体では、温度変化が大きく、応力比変動の影響を無視することができない。よって本研究では、大型供試体の結果を用い、変動応力比での結果とみなすこととする。ここでは、破壊までの載荷回数を 10 分割し、それぞれの区間での平均温度より区間応力比を求め、変動応力とした(図-7)。

以上の方法より、各応力比における載荷回数

を求め、供試体破壊時のマイナー損傷度を以下の式より算出した。

$$M = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \quad (5)$$

ここで M はマイナー損傷度を、 n_i は i 番目の応力による繰り返し载荷回数を、 N_i は S-N 曲線から求められる i 番目の応力における疲労寿命をそれぞれ表す。なお、マイナー則においては、マイナー損傷度が 1 に達すると供試体は破壊するとされている。算出されたマイナー損傷度の対数をとって正規確率紙上にプロットしたのが図-8 である。図より、応力変動のない試験における対数表示されたマイナー損傷度は平均値が 0.76 となり、比較的マイナー則によく適合している。これに対して、応力変動がある試験における損傷度の平均値は 8.64 となり、大きな値となった。鉄鋼材料の場合、繰り返し载荷が徐々に大きくなると破壊時のマイナー損傷度は 1 以上に偏るとされている⁴⁾。これは疲労初期における低応力の繰り返し载荷が、高応力に比べて疲労損傷累積への寄与が小さいためであるとされている。本試験の場合、応力比が徐々に上昇する変動応力比を与えていることになるため、SSC においても同様の傾向が有る事を確認できた。

4.3 水中疲労強度

水中疲労試験では、大型供試体、小型供試体共に温度上昇が平均 1.8℃と小さく、一定応力振幅下での载荷であるとみなすことができる。よって水中疲労試験では、大型・小型供試体両者の結果を用いて結果を整理する。

図-9 に、各応力比における生存確率を示す。気中試験と同様、これより平均寿命を求め、平均寿命と上限応力比との関係を示したものが図-10 である。また最小二乗法より求まる S-N 曲線の近似式は、以下のように表される。

$$S = -0.111 \log N + 1.191 \quad (6)$$

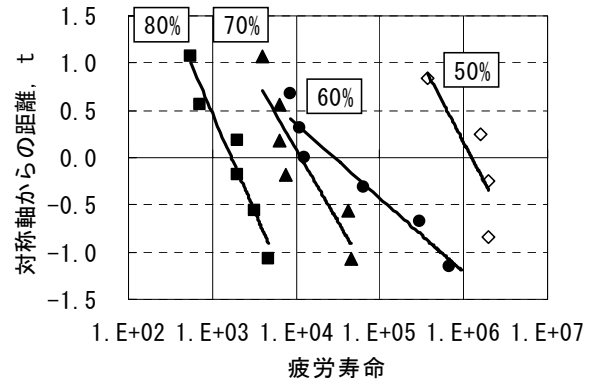


図-5 t-N 曲線（一定応力振幅下：気中）

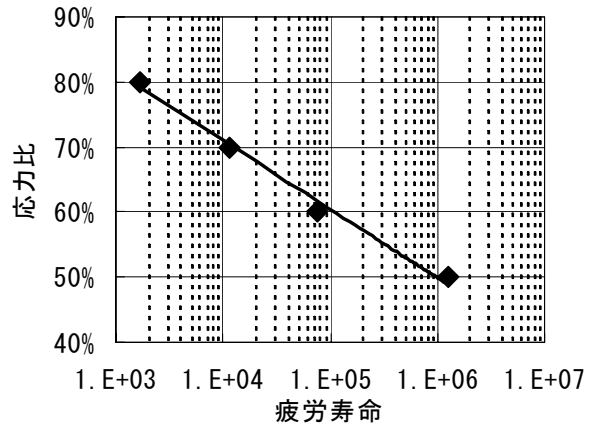


図-6 S-N 曲線（一定応力振幅下：気中）

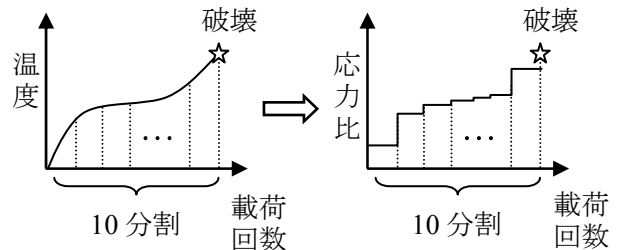


図-7 変動応力の換算

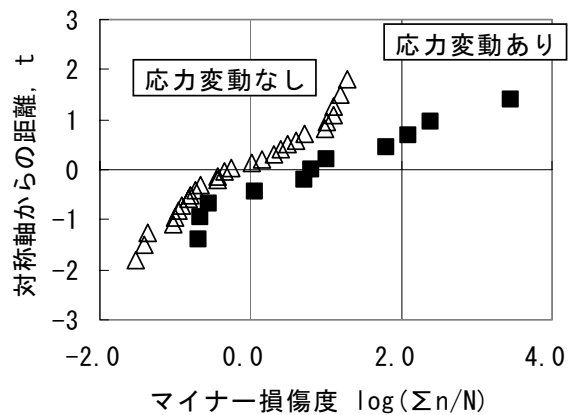


図-8 破壊時のマイナー損傷度

以上より、水中疲労試験における 200 万回強度は 49.2%となる。

算出された水中疲労強度は気中疲労強度の 45.7%と比べて低下していないため、SSC の疲労強度は気中、水中といった環境によって異なると言える。

5. 結論

- 1) 疲労試験の結果、SSC の気中疲労強度 46.2%、水中疲労強度 49.2%であることが明らかとなった。SSC は、水中でも気中とほぼ同等の疲労強度を有することから、水中での繰り返し载荷を受ける部材に適した材料であるといえる。
- 2) SSC は疲労試験の繰り返し载荷により温度上昇することが明らかとなった。しかし、水中下など供試体の環境によっては、内部により発生する熱が急速に発散し、顕著な温度上昇は起こらなかった。
- 3) 繰り返し载荷による温度上昇を応力変動とみなし、気中疲労試験を評価した結果、マイナー則による破壊時の累積疲労損傷度は 1 よりも小さくなった。これは、鋼材に対する応力変動疲労試験における傾向と一致する。

6. 謝辞

本研究で使用した材料は、新日本石油(株)より提供して頂きました。また疲労試験の遂行に際しては、(株)鴻池組の実験施設を借用致しました。さらに鴻池組の水町実氏には様々な点でご助力を頂きました。ご協力頂いた皆様に対して、深く感謝の意を表します。

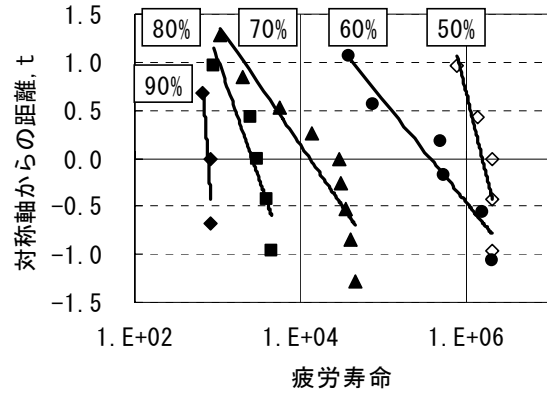


図-10 t-N 曲線(水中)

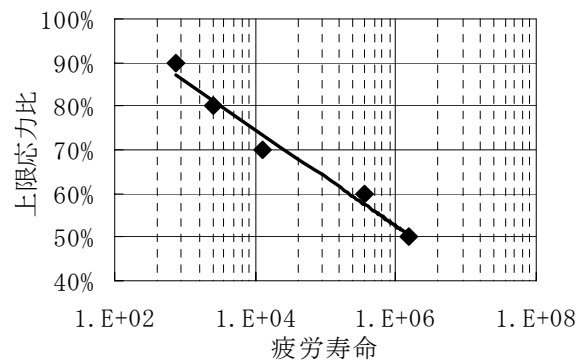


図-11 SSC の S-N 曲線(水中)

参考文献

- 1) 秋山正成：鉄鋼スラグ・石灰灰等を用いた硫黄固化体の開発，環境管理，Vol.39，No.3，pp.31-37，2003
- 2) 福井英人，小野紘一，杉浦邦征，秋山正成：硫黄・高炉スラグ固化体の基礎物性に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.23，No.2，pp.913-918，2001
- 3) 児島孝之：コンクリート構造物の耐久性シリーズ「疲労」，技報堂出版，1987
- 4) 材料強度確率モデル研究会：材料強度の統計的性質，養賢堂，1992