

鉄鋼スラグ水和固化体の水中における圧縮疲労強度の改善に関する研究

宮崎大学大学院 学生会員 ○鯨津 成瑛 宮崎大学工学教育研究部 正会員 尾上 幸造

1. はじめに

鉄鋼スラグ水和固化体¹⁾ (Steel-making Slag Concrete, 以下, SSC) は, 高炉スラグ微粉末, 製鋼スラグ骨材, フライアッシュ等のポズランを主な原料とし, 高炉スラグの潜在水硬性により固化する環境負荷低減型の材料である。製鋼スラグおよび高炉スラグ微粉末が主に臨海製鉄所から発生すること, すり減り抵抗性が高い²⁾ こと等の理由により, SSCは海洋・港湾構造物や空港舗装への利用が想定されている。著者ら³⁾ は, 溶銑予備処理スラグを用いたSSC について, 海洋・港湾構造物への適用を想定した水中圧縮疲労試験を実施し, 実用的な強度範囲におけるSSC の圧縮疲労寿命予測式を提案している。同予測式より, SSC の水中における圧縮疲労強度は普通コンクリートよりも若干低下することが明らかとなり, その原因として溶銑予備処理スラグ骨材の強度が低いことが考えられた。そこで本研究では, ロサンゼルス試験機により磨砕し脆弱部を除去した磨砕溶銑予備処理スラグを骨材に用いたSSC の水中における圧縮疲労試験を実施し, 疲労強度の改善効果について検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合条件

供試体の作製にあたり, 高炉スラグ微粉末4000 (比表面積: 4280cm²/g, 密度: 2.89g/cm³), 磨砕溶銑予備スラグ細骨材 (粒径: 5mm 以下, 表乾密度: 3.26g/cm³, 吸水率: 1.67%), 磨砕溶銑予備スラグ粗骨材 (粒径: 20~5mm, 表乾密度: 2.89g/cm³, 吸水率: 2.72%), フライアッシュ (JIS II 種, 比表面積: 4020cm²/g, 密度: 2.28g/cm³), 消石灰 (密度: 2.20g/cm³) および水道水を使用した。溶銑予備処理スラグは, 遊離CaOや遊離MgOの水和反応による膨張を避けるため, エージング処理を施し膨張性のないことが確認されたものを使用した。磨砕による溶銑予備処理スラグの外観の変化を写真-1に示す。溶銑予備処理スラグの磨砕前後における圧かけ荷重を測定した実験⁴⁾により, 単位容積あたりの圧かけ荷重は細骨材で約2.7倍, 粗骨材で約1.6倍増大することを確認している。表-1に溶銑予備処理スラグの化学成分を示す。また, 表-2にSSC の配合条件および単位量を示す。

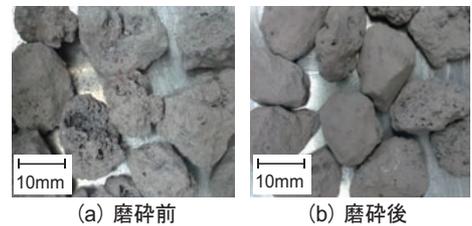


写真-1 磨砕による溶銑予備処理スラグの外観の変化

表-1 溶銑予備処理スラグの化学成分

T. Fe	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	MnO
14.3	34.9	28.5	3.6	9.4	3.8	5.7

(mass%)

表-2 SSC の配合条件および単位量

強度指数*	水 W	高炉スラグ微粉末 BF	消石灰 CH	フライアッシュ FA	溶銑予備スラグ細骨材 SS	溶銑予備スラグ粗骨材 GS
	(kg/m ³)					
2.17	250	463	46.3	93	778	784

*強度指数 = (CH + BF + 0.35FA) / W

2.2 実験手順

図-1に実験手順を示す。供試体はφ75mmの円柱とし, 同一バッチから45本の供試体を作製し, それらを静的強度試験および疲労試験に用いた。180日以上の中養生後, 端面処理を施しひずみゲージを貼付した。ひずみゲージは, 荷重時の偏心を未然に防ぎ, またサイクル-ひずみ曲線を取得する目的で貼付し, 防水テープおよび断熱・防湿テープで2重にコーティングした。疲労試験開始時におけるSSC の静的圧縮強度 (同一バッチより抽出した5本の供試体により得られた平均値) は37.3N/mm²であり, これを疲労試験における繰返し応力比の基準値とした。なお, 同一の強度指数⁵⁾で磨砕なしの溶銑予備処理スラグを用いたSSCの疲労試験開始時の静的圧縮強度の平均値は32.4N/mm²であった³⁾ため, 磨砕により約5N/mm²の改善効果が得られたことになる。



図-1 実験手順



写真-2 疲労試験状況

図-1に実験手順を示す。供試体はφ75mmの円柱とし, 同一バッチから45本の供試体を作製し, それらを静的強度試験および疲労試験に用いた。180日以上の中養生後, 端面処理を施しひずみゲージを貼付した。ひずみゲージは, 荷重時の偏心を未然に防ぎ, またサイクル-ひずみ曲線を取得する目的で貼付し, 防水テープおよび断熱・防湿テープで2重にコーティングした。疲労試験開始時におけるSSC の静的圧縮強度 (同一バッチより抽出した5本の供試体により得られた平均値) は37.3N/mm²であり, これを疲労試験における繰返し応力比の基準値とした。なお, 同一の強度指数⁵⁾で磨砕なしの溶銑予備処理スラグを用いたSSCの疲労試験開始時の静的圧縮強度の平均値は32.4N/mm²であった³⁾ため, 磨砕により約5N/mm²の改善効果が得られたことになる。

2.3 疲労試験方法

電気油圧サーボ式疲労試験機(静的容量: 300kN)を使用し, 写真-2のように水を満たした水槽内に供試体を置い

て試験を実施した。下限応力比 S_{min} を静的強度の 10% に固定し、上限応力比 S_{max} を静的強度の 75%, 70%, 62% の 3 水準に設定した。載荷波形は正弦波、周波数は 1.5Hz とした。同一の上限応力比について 5~6 本の供試体を用いて疲労寿命を測定し、順序統計量の理論⁶⁾を用いて平均疲労寿命を算定した。

表-2 疲労試験結果

S_{max} (%)	r	N_i (回)	$\log N_i$	$P(N_i)$ (%)
75	1	884	2.95	85.7
	2	1080	3.03	71.4
	3	1698	3.23	57.1
	4	16429	4.22	42.9
	5	36109	4.56	28.6
	6	39765	4.60	14.3
70	1	5753	3.76	85.7
	2	14051	4.15	71.4
	3	23345	4.37	57.1
	4	488766	5.69	42.9
	5	661832	5.82	28.6
	6	1510958	6.18	14.3
62	1	21069	4.32	85.7
	2	53680	4.73	71.4
	3	662514	5.82	57.1
	4	$>200 \times 10^4$	6.30	42.9
	5	$>200 \times 10^4$	-	-

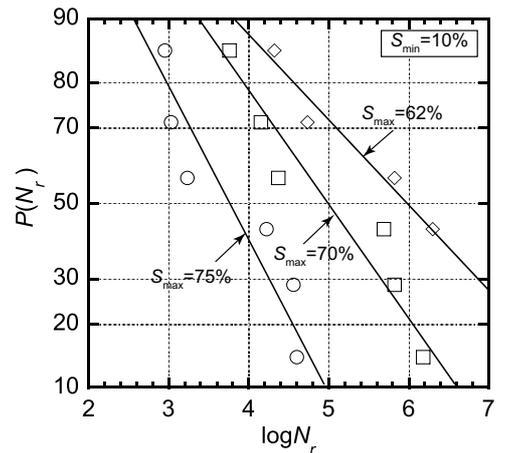


図-2 P-N線図

3. 実験結果

3.1 疲労寿命の測定結果

表-2に疲労試験結果を示す。総計 n 本の供試体について得られた疲労寿命を昇順に並べ、下から r 番目の生存確率の期待値 $P(N_r)$ は、 n 本全てが規定回数（一般に200万回）内に破壊した場合 $1-r/(n+1)$ 、 n のうち m 本が規定回数で破壊しなかった場合 $1-r/(n+2)$ で算定される。なお、後者のケースではちょうど規定回数で破壊したとみなすダミー供試体を仮定し、その生存確率の期待値は $1-(n-m+1)/(n+2)$ で算定される。

疲労寿命の対数 $\log N_r$ を正規確率グラフ上にプロットすることで、図-2に示すP-N線図が得られた。いずれも直線回帰できることから、今回のSSCについても既往の研究で報告されている普通コンクリート⁷⁾やSSC³⁾と同様に対数正規分布するとみなせるものと考えられる。

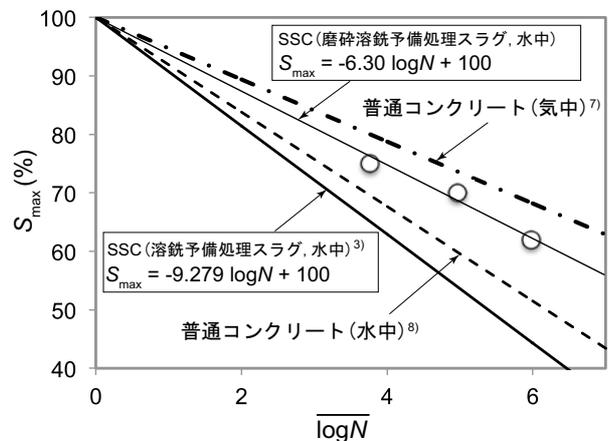


図-2 S-N線図

図-2において $P(N_r)=50\%$ のときの疲労寿命を平均疲労寿命 $\overline{\log N}$ とし、 $\overline{\log N}$ と S_{max} の関係をプロットしたS-N線図を図-3に示す。同図中には溶銑予備スラグを用いたSSC³⁾、普通コンクリートの水中⁸⁾ および気中⁷⁾ のデータをあわせて示す。普通コンクリートの気中は下限応力比8%で、その他はいずれも下限応力比10%である。磨砕溶銑予備処理スラグを骨材に用いたSSCは、磨砕なしの溶銑予備処理スラグを用いたSSCと比較して同一の S_{max} に対する疲労寿命が増進しており、疲労耐久性が向上することが明らかとなった。これは、磨砕により圧かけ荷重が増大し、ペーストとの界面性状が改善されたためと推察される。なお、磨砕溶銑予備処理スラグを骨材に用いたSSCの疲労耐久性は水中では普通コンクリートを上回る結果となっているが、磨砕溶銑予備処理スラグの圧かけ荷重が天然骨材よりも大きいためと考えられる。一方、気中では普通コンクリートを下回っているが、これは界面エネルギーの影響⁹⁾によるものと考えられる。

4. まとめ

ロサンゼルス試験機により溶銑予備処理スラグを磨砕し、骨材に用いることで、鉄鋼スラグ水和固化体の水中における圧縮疲労強度を大幅に改善できることが明らかとなった。磨砕により脆弱部が除去されることで骨材密度の増加・吸水率の減少につながり、圧かけ荷重も増大したことで疲労耐久性が向上したものと考えられる。

【参考文献】

- 1) 松永久宏, 小菊史男, 高木正人, 谷敷多徳: 鉄鋼スラグを利用した環境に優しい固化体の開発, コンクリート工学, Vol.41, No.4, pp.47-54, 2003
- 2) 高橋良輔, 濱田秀則: 曲げ5N/mm²クラスの鉄鋼スラグ水和固化体の力学特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1613-1618, 2006
- 3) 尾上幸造, 鯨津成瑛: 鉄鋼スラグ水和固化体の水中における圧縮疲労寿命予測式の算定および圧縮疲労破壊過程に関する考察, 土木学会第68回年次学術講演会概要集第5部門, 2013 (投稿中)
- 4) 鯨津成瑛, 尾上幸造: 各種粗骨材の圧かけ荷重の評価方法に関する研究, 平成24年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, V-21, pp.731-732, 2013
- 5) 財団法人 沿岸技術研究センター: 鉄鋼スラグ水和固化体技術マニュアル (改訂版) -製鋼スラグの有効利用技術-, p.27, 2008
- 6) Gumbel, E. J. (河田竜夫ら訳): 極値統計学, pp.45-51, 廣川書店, 1963
- 7) 松下博通, 徳光善治: 生存確率を考慮した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, No.284, pp.127-138, 1979
- 8) 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, No.296, pp.87-95, 1980
- 9) 尾上幸造, 松下博通: 液体浸漬によるコンクリートの圧縮疲労強度低下に関するエネルギー的考察, 土木学会論文集E, Vol.66, No.2, pp.166-178, 2010