

製鋼スラグ骨材の違いが鉄鋼スラグ水和固化体の水中圧縮疲労強度に与える影響

○宮崎大学大学院工学研究科 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、ポゾラン(フライアッシュ等)を主原料とし、高炉スラグの潜在水硬性により固化する固化体である。著者らは既往の研究²⁾において、製鋼スラグの一種である溶銑予備処理スラグ(以下、HPS)を骨材として用いた SSC(以下、HPSSSC)の水中における圧縮疲労強度は、HPS に磨砕を施すことで普通コンクリートよりも向上することを報告している。その理由として、磨砕による HPS の圧かけ荷重の向上が考えられた。そこで本研究では、磨砕を施した HPS(以下、磨砕 HPS)よりも高い圧かけ荷重を有する転炉スラグ(以下、CS)を用いた SSC(以下、CSSSC)と磨砕 HPS を用いた SSC(以下、磨砕 HPSSSC)および HPSSSC の水中における圧縮疲労強度の比較を行い、CS を骨材として用いることによる SSC の圧縮疲労強度の改善効果について実験的に検討した。さらに、製鋼スラグ骨材の種類が SSC の圧縮疲労強度に及ぼす影響について、疲労試験時における供試体の変形特性や微細ひび割れの発生・伝播の観点から考察した。

2. 実験概要

2.1 使用材料、配合条件および疲労試験方法

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), 転炉スラグ細骨材 (粒径: 5mm 以下, 表乾密度 2.75g/cm³, 吸水率: 7.14%), 転炉スラグ粗骨材 (粒径: 20~5mm, 表乾密度: 3.35g/cm³, 吸水率: 2.15%), 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。

表-1 に、既存の研究²⁾において測定した各粗骨材の物性値と圧かけ荷重を示す。これより、CS は HPS や磨砕 HPS よりも高い圧かけ荷重を有することがわかる。

表-2 に、CSSSC の配合条件および単位量を示す。ここで、強度指数とはコンクリートにおけるセメント水比に相当し、これが大きいほど高強度となる。なお、HPSSSC に関し、強度指数 2.17~3.50 の範囲において S-N 線図は同一となり、この範囲において強度指数が圧縮疲労強度に影響を及ぼさない²⁾ことが明らかとなっている。本研究では、既存の研究²⁾の実験結果と比較するため、強度指数は 2.17 を選定した。

供試体は φ75×100mm の円柱とし、約 180 日の水中養生を行った。疲労試験については、電気油圧サーボ式疲労試験機(静的容量: 300kN)を周波数 1.5Hz として使用した。また、繰返しの下限応力比 S_{min} は静的強度の 10% で固定し、上限応力比 S_{max} は 75%, 70%, 60% の 3 水準に設定し、水中環境において試験を行った。同一の上限応力比に対し、9 本の供試体を用いて疲労寿命を測定し、既存の研究²⁾と同様の方法により S-N 線図を作製した。

2.2 アコースティック・エミッションの計測

骨材種類による供試体内部の微細ひび割れの発生・伝播状況の違いを調べるため、静的圧縮載荷過程におけるアコースティック・エミッション (以下、AE) の計測をおこなった。疲労試験用とは別に各配合 2 本の供試体を作製し、1 本の供試体は非載荷の状態では AE を計測し、残りの 1 本は静的強度に対し 50% の応力比で 10 万回繰返し載荷をおこなった後に AE を計測した。

2.3 エコーチップ硬さ試験

ペーストと粗骨材との界面は、この 2 材料の弾性係数との差異によって応力集中が発生する場所³⁾であり、その差が大きくなるほど微細ひび割れが発生しやすくなる

ものと考えられる。そこで粗骨材とペーストへのエコーチップ硬さ試験を各種供試体においてそれぞれ実施し、両者の反発硬度 (L 値)を求めた。まず、研磨処理を施した両端面からペーストと粗骨材についての測定位置を 5 箇所ずつ選定し、 L 値を測定した。なお、1 箇所につき 5 回連続して打撃し、1 本の供試体につきペースト、粗骨材の L 値を各 25 回測定した。各配合について供試体 2 本を使用し、それぞれの測定結果を算術平均し代表値とした。

3. 実験結果および考察

3.1 疲労試験結果

図-1 に CSSSC および HPSSSC, 磨砕 HPSSSC の S-N 線図を示す。なお、CSSSC の S-N 曲線式を求める過程において作製した P-N 線図は既存の研究²⁾と同様に、対数正規分布に従うことが確認された。同図より、CSSSC の圧縮疲労強度は、HPSSSC と同程度であり、磨砕 HPSSSC よりも減少することが明らかになった。

3.2 ひずみ速度と疲労寿命の関係

疲労試験時における供試体の変形特性に着目し、疲労破壊過程を比較した。図-2 に本研究および既存の研究²⁾によって得られた、ひずみ速度²⁾と疲労寿命の関係を示す。製鋼スラグ骨材の種類によらず関係式は概ね一致し、ひずみ速度が圧縮疲労寿命に及ぼす影響は同程度であるといえる。図-3 に本研究および既存の研究²⁾で得られた

表-1 製鋼スラグ骨材の物性値と圧かけ荷重

粒径	粗骨材	表乾密度 (g/cm ³)	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	圧かけ荷重 (kN/cm ³)
20~10mm	CS	3.28	3.20	2.56	2.21
	磨砕HPS	2.77	2.70	2.83	1.38
	HPS	2.66	2.48	7.53	0.51
10~5mm	CS	3.53	3.45	2.30	4.23
	磨砕HPS	3.06	2.98	2.56	2.25
	HPS	2.87	2.68	7.14	1.45

表-2 SSC の配合表および単位量

骨材種類	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	細骨材 SS	粗骨材 GS
			(kg/m ³)				
CS	2.17	250	463	46.3	93	662	913
	2.17					756	749
HPS	3.50		748	74.8	150	590	540
	2.17		463	46.3	93	778	784

$$\text{強度指数} = (\text{CH} + \text{BF} + 0.35\text{FA}) / \text{W}$$

$S_{max}=75\%$ についての実験データを同一グラフ上にプロットしたものを示す。データのばらつきや重なりはあるものの、図中左上から右下にかけて HPS, CS, 磨砕 HPS の順に分布しており、これは疲労強度の小さい順に対応している。

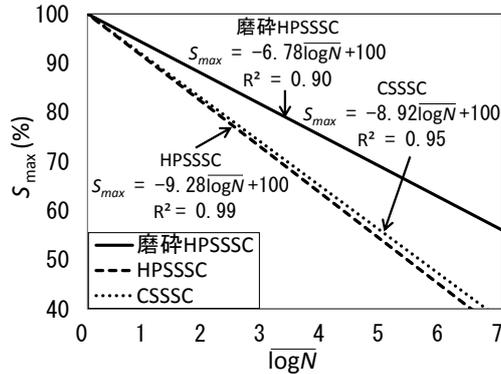


図-1 S-N 線図

すなわち、同じ S_{max} に対し、繰返し回数あたりのひずみ増分(損傷量)がこの順で大きくなり、結果として疲労寿命が小さくなるものと考えられる。

3.3 静的圧縮荷重過程における AE 計測結果

図-4 に 10 万回繰返し荷重後の各供試体の応力比 10 ~ 80% における累計 AE ヒット数を示す。同図より HPSSSC の累計 AE ヒット数が最も多いことがわかる。これにより、HPSSSC は微細ひび割れの発生数が全供試体の中で最も多いことが推察され、その原因として、HPS の脆弱性が他の骨材よりも卓越していることが考えられる。なお、非荷重の供試体においても図-4 と同様の傾向を示しており、荷重前後での累積 AE ヒット数の大きな変化は見られなかった。

3.4 エコーチップ硬さ試験結果

図-5 に粗骨材とペーストの L 値の差と 200 万回疲労強度の関係を示す。ここで、 L 値の差が大きくなるほど、粗骨材とペーストの弾性係数の差が大きくなり、界面に生じる応力集中によって微細ひび割れが生じやすくなるものと考えられる。CSSSC と磨砕 HPSSSC を比較すると、AE 発生状況はほぼ同等であるにもかかわらず、前者の方が L 値の差が大きい。CSSSC では、微細ひび割れの発生回数自体は増加しない一方、粗骨材とペーストの界面に生じる応力集中の程度が大きくなり、磨砕 HPSSSC よりも微細ひび割れの進展量が大きくなるために SSC の疲労強度が低下するものと考えられる。HPSSSC については、 L 値の差が小さいものの、骨材表層の脆弱部が微細ひび割れの起点となるために、微細ひび割れの進展が促進されることで疲労強度が低下するものと考えられる。

4. まとめ

本研究により得られた知見を以下に示す。

- (1) CSSSC の圧縮疲労強度は、HPSSSC と同程度であり、磨砕 HPSSSC よりも減少する。
- (2) 製鋼スラグ骨材の種類によらず、ひずみ速度が圧縮疲労寿命に及ぼす影響は同程度である。
- (3) CSSSC と磨砕 HPSSSC では、微細ひび割れの発生数に大差はないが、界面に生じる応力集中の程度は CSSSC の方が大きくなる。そのため、微細ひび割れの進展量が大きくなり、CSSSC の疲労強度が低下するものと考えられる。
- (4) HPSSSC については、界面に生じる応力集中は小さいが、骨材表層の脆弱部が微細ひび割れの起点となるために、微細ひび割れの進展が促進され、疲労強度が低下するものと考えられる。

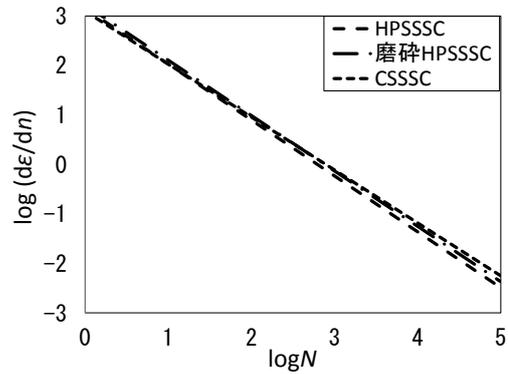


図-2 ひずみ速度と疲労寿命の関係

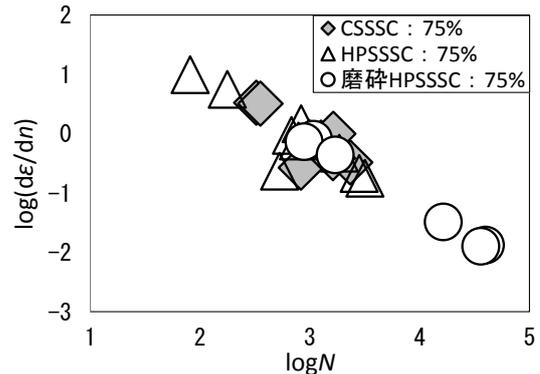


図-3 ひずみ速度と疲労寿命の関係 ($S_{max}=75\%$)

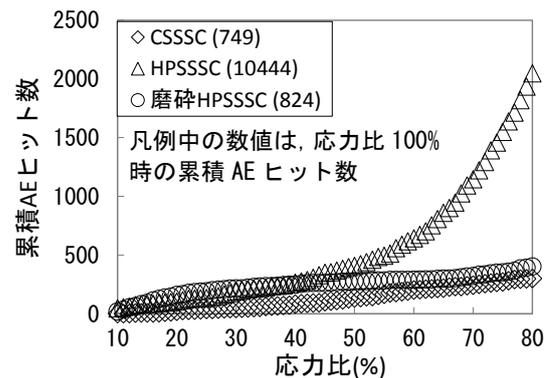


図-4 累積 AE ヒット数の変化 (10 万回繰返し荷重)

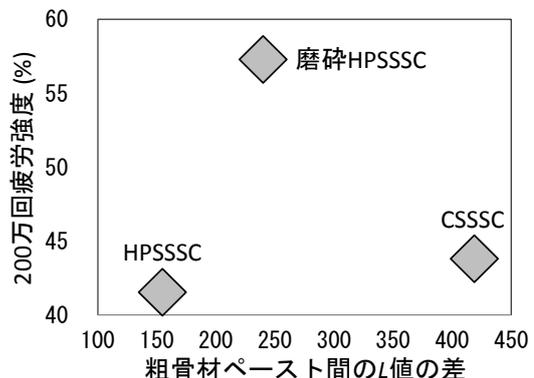


図-5 L 値の差と 200 万回疲労強度の関係

参考文献

- 1) 松永久宏, 小菊史男, 高木正人, 谷敷多穂: 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, 2003.4
- 2) 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強度とその改善に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol.25, No.2, 2014.3 (登載決定)
- 3) Neville, A. M. (三浦尚訳): ネビルのコンクリートバイブル, p.381, 技法堂出版, 2004.6