

製鋼スラグ水和固化体および硫黄固化体の内部微細ひび割れの進展に関するエネルギー的考察

○九州大学大学院 学生会員 濱本真吾 九州大学大学院 フェロー 松下博通
九州大学大学院 学生会員 濱田秀則 九州大学大学院 正会員 佐川康貴

1. はじめに

近年、海砂の採取規制等、天然資源の枯渇化によるコンクリート用骨材の不足に加え、フライアッシュやスラグが毎年大量に発生しており有効利用が課題となっている。本研究では、産業副産物を主原料とする固化体を取り上げ、静的繰返し応力下における各種エネルギーを定量化し、微細ひび割れの進展状況について普通コンクリートと比較した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

本研究では、製鋼スラグ水和固化体（以下スラグ固化体）と硫黄固化体の2種類について実験を行った。使用材料を表-1に、配合を表-2に示す。

スラグ固化体は高炉スラグ微粉末により強度を発現させ、アルカリ刺激剤として普通ポルトランドセメントを使用した。また、高級脂肪酸塩および非イオン系のAE剤とカルボキシル基含有ポリエーテル系の高性能AE減水剤をスランプ $15 \pm 2.5\text{cm}$ 、空気量 $4.0 \pm 1.5\%$ となるよう調節して混入した。硫黄固化体は熔融状態の改質硫黄が冷えて固まる現象を利用して製造し、製造過程では水を一切使用しない。改質硫黄とは、熔融硫黄に添加剤（オレフィン系炭化水素）を添加し、重合反応させたものである。硫黄固化体の燃焼性の低減等のために、改質硫黄に石炭灰を加えた硫黄中間資材を製造する。そして、加熱・乾燥させた骨材と熔融状態の硫黄中間資材を混練する。硫黄固化体はフレッシュな状態で 140°C 程度あり、室温では早期に表面から固化するため、スランプと空気量の測定はできない。硫黄固化体の製造過程では、熔融状態の硫黄を取り扱わなければならないため、加熱・保温する装置を使用する点で、普通コンクリートと大きく異なる¹⁾。

2.2 試験方法

(1) 静的繰返し載荷試験：圧縮強度試験により求められる各固化体の応力-ひずみ曲線を基準として、繰返し載荷時の上限応力を決定する。最大応力時のひずみ ϵ_0 の30、50%に対応する応力および最大応力の90%の応力を上限応力として繰返し載荷を10サイクル行った。試験には $\phi 7.5 \times 15\text{cm}$ の円柱供試体を使用した。

(2) 圧縮破壊過程に発生する各種エネルギーの定量化：静的繰返し載荷試験の応力-ひずみ曲線より各種エネルギーを定量化した。図-1に載荷除荷曲線と各エネルギーの関係を示す。各領域の面積を求め、その値に供試体の体積を乗じたものをそれぞれのエネルギーとした。

キーワード：製鋼スラグ水和固化体、硫黄固化体、損失エネルギー、ひび割れ進展エネルギー

連絡先：〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地 TEL：092-802-3387

表-1 使用材料

スラグ 固化体	高炉スラグ微粉末(BP)	密度:2.88g/cm ³	
	普通ポルトランドセメント(C)	密度:3.16g/cm ³	
	フライアッシュ(FA)	密度:2.34g/cm ³ 比表面積:3800cm ² /g	
	転炉スラグ	細骨材(S) 密度:3.18g/cm ³ 吸水率:6.17% 粗骨材(G) 密度:3.08g/cm ³ 吸水率:4.75%	
硫黄 固化体	硫黄	新日本石油精製(株)室蘭製油所産 純度99.97%以上	
	石炭灰	フライアッシュII種品 密度:2.10g/cm ³	
	製鋼スラグ	細骨材	密度:3.92g/cm ³ 吸水率:3.49%
		粗骨材	密度:3.23g/cm ³ 吸水率:3.15%

表-2 配合

スラグ固化体					
W	BP	C	FA	S	G
175	251	50	120	1341	675
硫黄固化体					
石炭灰	改質硫黄	細骨材	粗骨材		
211	423	1059	1342		

単位:kg/m³

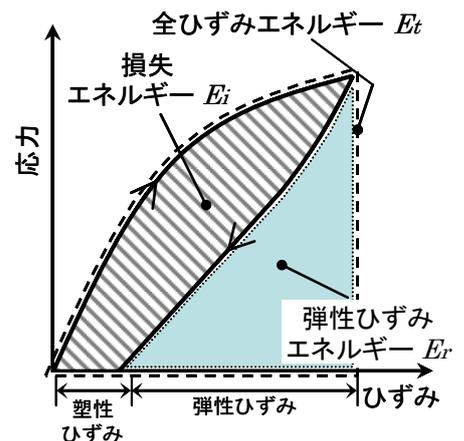


図-1 載荷除荷曲線と各エネルギーの関係

3. 実験結果および考察

図-2 に静的繰返し载荷試験により得られる応力-ひずみ曲線の一例を示す。また、図-3 にその結果より算出される各サイクルでの損失エネルギー E_i の値を示す。スラグ固化体・硫黄固化体とも、損失エネルギー E_i は初回载荷時に最も大きく、2回目以降は初回と比べると大幅に小さくなり、5回目以降はほぼ一定の値に収束するという普通コンクリートと同様の挙動を示した。よってスラグ固化体・硫黄固化体の内部の微細ひび割れ発生伝播においても、普通コンクリートと同様のエネルギー的考察ができると考えられる。

すなわち、収束した損失エネルギーのほとんどは、初回载荷時に発生した微細ひび割れが開閉するときに生じる摩擦損失エネルギー E_{fric} と考えられる。初回载荷時にも同様に摩擦損失が発生しているものと仮定すれば、初回の損失エネルギー E_{i1} から摩擦損失エネルギー E_{fric} を差し引くことによって、ひび割れ進展エネルギー E_{crac} を算定できる。このひび割れ進展エネルギー E_{crac} は、微細ひび割れの進展しやすさの指標となる。

次に、初回の損失エネルギー E_{i1} とひび割れ進展エネルギー E_{crac} の関係を図-4 に示す。両者は比例関係にあり、また、スラグ固化体・硫黄固化体とも普通コンクリートと同様の関係が示された。近似直線の傾きに大きな差はないことから、スラグ固化体・硫黄固化体の損失エネルギーに占めるひび割れ進展エネルギーの割合も普通コンクリートと同程度であると言える。

図-5 にひずみ比とひび割れ進展エネルギー E_{crac} の関係を示す。ひずみ比とは、初回载荷時の最大ひずみ ϵ_1 と静的载荷試験における最大応力時のひずみ ϵ_c の比である。図より、普通コンクリートと同様の傾向が見られる。また、ひび割れ進展エネルギーの対数とひずみ比の対数は直線関係にあるので、ひずみ比の増大に伴ってひび割れ進展エネルギーが累乗的に増加することが分かる。

以上より、スラグ固化体・硫黄固化体の微細ひび割れ進展状況は普通コンクリートと同等であると考えられる。

4. まとめ

本研究では、スラグ固化体と硫黄固化体の圧縮破壊過程をエネルギー変換によって捉え、微細ひび割れの進展状況について普通コンクリートと比較した。得られた知見を以下に示す。

スラグ固化体・硫黄固化体それぞれにおいて、損失エネルギーとひび割れ進展エネルギーの関係およびひずみ比とひび割れ進展エネルギーの関係は、普通コンクリートと同様の傾向であった。

よって、スラグ固化体と硫黄固化体の微細ひび割れの進展状況は、普通コンクリートと同等であると考えられる。

【参考文献】

1) 濱田秀則, 堀井秀之, 審良善和: 数種類の骨材を用いた硫黄固化体の材料物性, 港湾空港技術研究所資料, No.1129, 2006.6

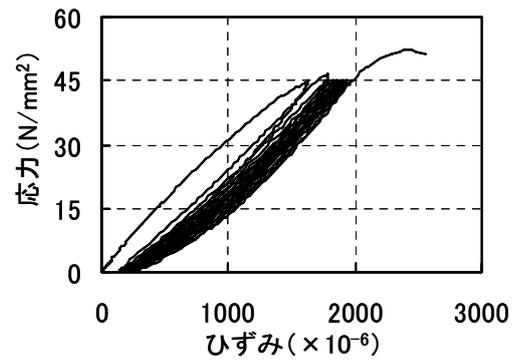


図-2 静的繰返し载荷試験による応力-ひずみ曲線

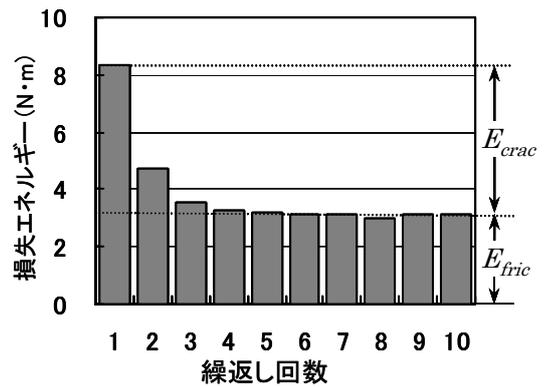


図-3 損失エネルギーの変化

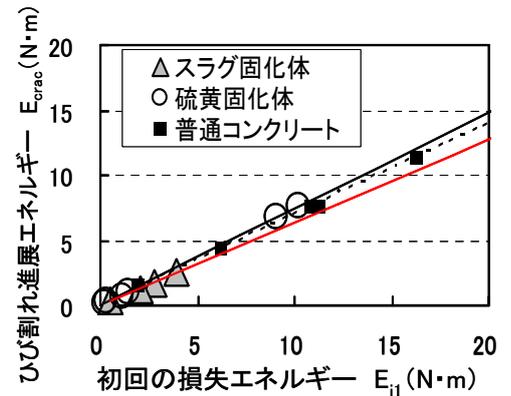


図-4 損失エネルギーとひび割れ進展エネルギーの関係

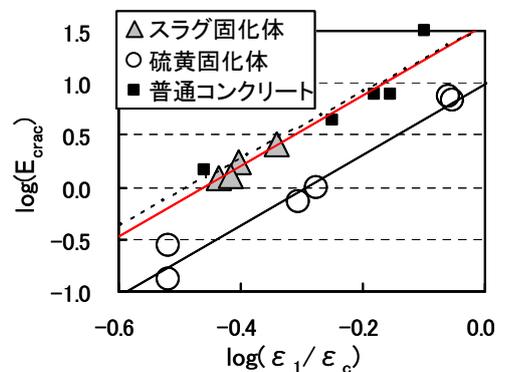


図-5 ひずみ比とひび割れ進展エネルギーの関係