

静的繰返し载荷を受ける鉄鋼スラグ水和固化体の 応力-ひずみ関係によるエネルギー的考察

九州大学 学生会員 田中 義人
九州大学大学院 正会員 濱田 秀則

九州大学大学院 フェロー 松下 博通
九州大学大学院 正会員 佐川 康貴
福岡大学工学部 正会員 尾上 幸造

1. はじめに

近年、石炭火力発電所や製鉄所などから発生する産業副産物の有効利用、資源の枯渇化によるコンクリート用骨材の不足等が問題になっている。これらの問題を解決する手段の1つとして副産物を主原料とした建設材料である鉄鋼スラグ水和固化体（以後、スラグ固化体と略称）が開発され、しかも、その力学特性は普通コンクリートと似ているとの報告がある¹⁾。しかし、新しい建設材料であるためその破壊過程や疲労特性などの特性を十分に把握できていない部分も多い。そこで本研究では、スラグ固化体の破壊過程に対する知見を得ることを目的とし、その前段階としてまず強度および変形特性について基礎的検討を行うと同時に、圧縮破壊過程をエネルギー変換過程としてとらえることで、静的圧縮载荷時の微細ひび割れの進展状況について調べた。

2. 実験概要

2.1 使用材料

スラグ固化体とは、製鋼スラグ及び高炉スラグ微粉末を主原料とし、必要に応じてアルカリ刺激材を添加して製造される建設材料である。基本コンセプトは、高炉スラグ微粉末により強度を発現させることである。表-1 に使用材料を示す。ここで、普通ポルトランドセメントはアルカリ刺激材として使用した。この表より、セメント、水、混和剤以外はすべて副産物であることがわかる。

2.2 配合・養生方法

表-2 に配合を示す。スラグ固化体の配合は、粉体水比を 1.96 で一定とし、スランブを $15 \pm 2.5\text{cm}$ 、空気量 $4.0 \pm 15\%$ となるよう、混和剤量を調節することにより決定した。供試体サイズは $\phi 7.5 \times 15\text{cm}$ とし、脱型後材齢 7 日まで水中養生を行い、その後各载荷試験時まで温度 20°C 、R.H.95%の条件で湿空養生を行った。

2.3 試験方法

2.3.1 静的試験

所定の材齢（28, 91 日）において、圧縮強度、割裂引張強度をそれぞれ JIS A 1108, 1113 に準じて測定した。

2.3.2 圧縮破壊過程におけるエネルギー変換過程

前述したように、スラグ固化体は普通コンクリートと似た性質を多く有しているため、その試験も普通コンクリートと同様に扱っていいものと考え、静的繰返し载荷試験を行い、その結果をエネルギー変換することで評価する²⁾こととした。载荷速度を応力制御で $0.2\text{N/mm}^2/\text{sec}$ とした。供試体軸方向に検長 60mm のゲージを左右に 1 枚ずつ貼り付け、測定した。载荷方法としてはまず、静的载荷を行い応力-ひずみ

表-1 使用材料

水(W)	上水道水
セメント(C)	普通ポルトランドセメント 密度 3.16g/cm^3
高炉スラグ微粉末(BP)	密度 2.88g/cm^3
細骨材(S)	転炉スラグ、密度 3.18g/cm^3 吸水率 6.17% 、粗粒率 3.52
粗骨材(G)	転炉スラグ、密度 3.08g/cm^3 吸水率 4.75% 、最大寸法 25mm
フライアッシュ(FA)	密度 2.34g/cm^3 比表面積 $3800\text{cm}^2/\text{g}$
AE剤(AE)	高級脂肪酸塩および非イオン系 界面活性剤チューポール FA-10
高性能AE減水剤(SP)	カルボキシル基含有ポリエーテル系マイティ 3000H

表-2 配合

単位量(kg/m^3)							
W	BP	C	FA	S	G	SP	AE
175	251	50	120	1341	675	$0.5 \times P$	$0.01 \times P$

$$P = BP + C + FA$$

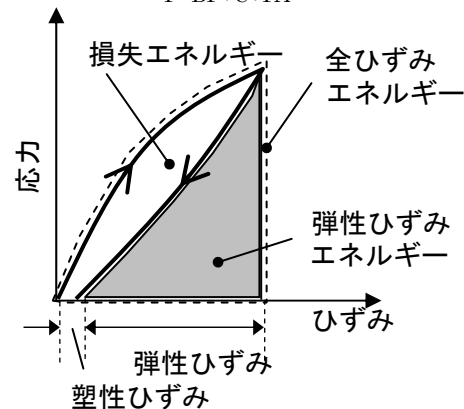


図-1 载荷除荷曲線と各エネルギーの関係

表-3 静的载荷試験結果

材齢	28日	91日
圧縮 (N/mm^2)	23.1	24.8
引張 (N/mm^2)	2.18	2.12
静弾性係数 (kN/mm^2)	24.7	22.9
ポアソン比	-	0.21

曲線を求めた。次に、それを基準として繰返し載荷時の上限応力を、静的試験における最大応力時のひずみ ε_c の約 30, 50% のひずみに対応する応力、および最大応力の約 90% の応力と設定した。これらを上限とする完全片振り載荷を 10 サイクル行った。

この曲線のうち 1 サイクル分の載荷除荷曲線と、そこから得られるひずみエネルギーや損失エネルギーの関係を図-1 に示す。弾性ひずみエネルギーを E_r 、損失エネルギー E_l とする。

3. 試験結果

3.1 圧縮強度および静弾性係数

表-3 に静的載荷試験結果を示す。スラグ固化体の圧縮強度は 25N/mm^2 程度であり、弾性係数は普通コンクリートより若干であるが小さいという特徴を持っている。

3.2 載荷除荷曲線と損失エネルギー

図-2 に載荷除荷曲線の一例を、静的強度測定時の応力-ひずみ曲線とともに示す。繰返し載荷を行うことにより残留ひずみが増えているのがわかるが、これは既往の研究の普通コンクリートと同様な挙動であった。

損失エネルギーの各サイクルでの変化を図-3 に示す。1 サイクル目の損失エネルギー E_{l1} が極めて大きく、その後は一定の値に収束しているのがわかる。既往の研究からこの収束した値は 1 サイクル目で発生した微細ひび割れが開閉する時に生じる摩擦損失エネルギー E_{fric} と考えられる。また、 E_{l1} では微細ひび割れが発生していると考えられることから、 E_{l1} は E_{fric} とそのひび割れが発生する際に消費されたエネルギーから構成されていると考えられ、この差分のエネルギーを微細ひび割れ進展エネルギー E_{crac} であると考ええる。この E_{crac} はひび割れの進展のしやすさを定量化したもので、微細ひび割れの進展しやすさの指標となると考えられる。

図-4 に E_{l1} と E_{crac} の関係を示す。既往の研究²⁾において示されている天然骨材を使用した普通コンクリートの結果も併せて示す。図より、 E_{l1} における E_{crac} の割合は普通コンクリートとほぼ同等の結果となった。以上より、スラグ固化体の微細ひび割れの進展過程は普通コンクリートのそれと大きく異なるものではなかった。

図-5 にひずみ比 (1 サイクル目の最大ひずみ ε_1 の ε_c に対する割合) と E_{crac} の関係 (両対数) を示す。これによると、普通コンクリートと同様にひずみ比が大きくなるにつれて累乗的にひび割れ進展エネルギーが大きくなっていることが分かる。また、図-4, 5 から微細ひび割れの進展状況は普通コンクリートと同じであるといえる。

4. まとめ

本研究では、スラグ固化体の強度および変形特性について検討した。得られた知見を以下に示す。

- 1) スラグ固化体の弾性係数は、同強度レベルの普通コンクリートとほぼ同等であった。
- 2) スラグ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いえる。

参考文献：1)(財)沿岸開発技術センター：鉄鋼スラグ水和固化体技術マニュアル，沿岸開発技術ライブラリー，No.16，2003，

2)尾上幸造ほか：圧縮力を受けるコンクリート内部の微細ひび割れ発生伝播に関するエネルギーの考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，2006

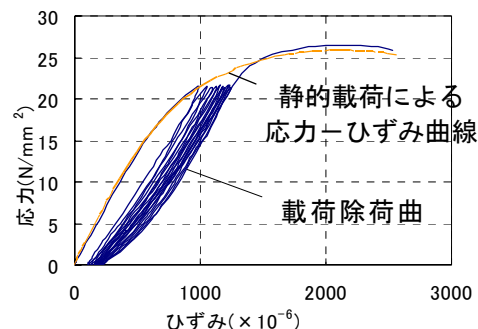


図-2 載荷除荷曲線の一例 (ε 50%)

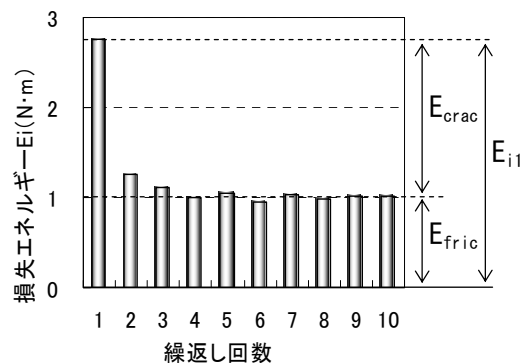


図-3 繰返し回数にともなう損失エネルギーの変化 (ε 50%)

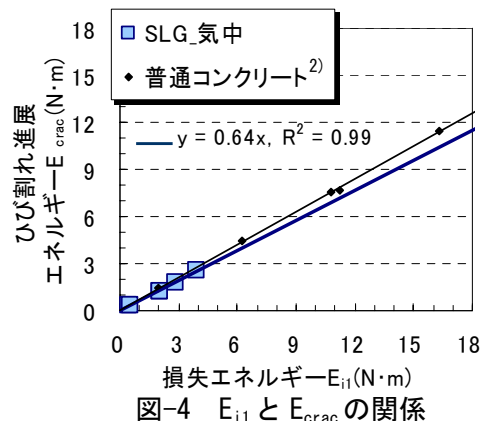


図-4 E_{l1} と E_{crac} の関係

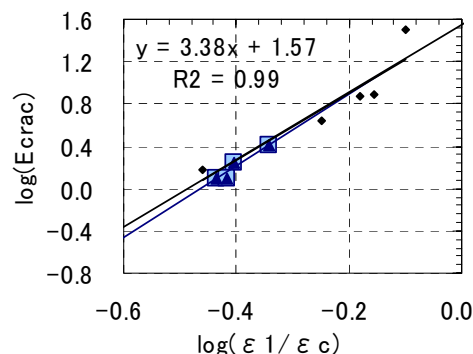


図-5 ひずみ比と E_{crac} の関係 (両対数)