

高炉スラグ細骨材を用いたモルタルの圧縮応力下におけるひび割れ進展に関する研究

熊本大学大学院 学生会員 ○堤 亮祐
 熊本大学大学院 学生会員 岩本 崇臣
 熊本大学大学院 正会員 重石 光弘

熊本大学大学院 正会員 尾上 幸造
 熊本大学大学院 正会員 友田 祐一

1. はじめに

高炉水砕スラグ細骨材（以下、BFS と称する）はアルカリ環境下での潜在水硬性を有しており、コンクリート材料として用いた場合、遷移帯が改質され、長期強度が増進する¹⁾ことが知られている。内閣府 SIP における「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」においても、BFS を細骨材として用いる超耐久コンクリートプレキャスト部材の製品化に向けた研究開発²⁾が進められている。超耐久コンクリートの製品化を図るためには、BFS の使用がコンクリートの耐久性を著しく向上させるメカニズムの解明が必要である。例えば、当該部材を PC プレキャスト製品として床版へ適用する場合、凍結融解作用および荷重繰返しによる疲労への抵抗性が問題となる。双方の現象において、コンクリートのひび割れ進展に対する抵抗性が部材の耐久性と関連することから、これを明らかにすることは有意義であると考えられる。

本研究では、BFS を用いたモルタル供試体（以下、BFS モルタル）を作製し、圧縮応力下におけるひび割れ進展性状を把握することを目的とした実験を実施した。具体的には、繰返し圧縮応力を受ける供試体の応力 - ひずみ曲線から求められるひび割れ進展エネルギーを求め、BFS モルタルおよび天然骨材を用いたモルタル（以下、普通モルタル）との比較をおこなった。

2. 実験概要

(1) 使用材料、配合および供試体

普通ポルトランドセメント（密度：3.15 g/cm³）、BFS（表乾密度：2.78 g/cm³，吸水率：0.21%，粗粒率：2.13）、天然川砂（表乾密度：2.57 g/cm³，吸水率：3.4%，粗粒率：2.49）を用いた。モルタルの配合条件と単位量を表-1 に示す。本研究では、水セメント比を 35% および 50% の 2 水準とした。配合は、試練により細骨材の量を調整し、15 打フロー値が 160 ～ 180 程度となるよう決定した。そのため、BFS と天然川砂の配合で同一水セメント比であっても実際の細骨材量は異なっている。

JIS R 5201³⁾ に準じてモルタルを練り混ぜ、直径 50 mm、高さ 100 mm の円柱供試体を作製した。供試体は 24 時間で脱型し、試験時まで 20℃ の水中で養生した。载荷試験時には検長 30 mm のひずみゲージを軸方向に 2 箇所貼付してひずみを測定した。

(2) エネルギーの定量化方法

図-1 に圧縮载荷除荷時における応力 - ひずみ曲線（OABCD）と各種エネルギーの関係を示す。OABE で囲まれた面積は全ひずみエネルギー E_t であり、そのうち OABCD で囲まれた面積が損失エネルギー E_l 、BCDE で囲まれた面積が除荷時のひずみ回復に寄与する弾性ひずみエネルギー E_r である。図-2 に上限応力を一定、下限応力を 0 とした繰返し载荷時の損失エネルギーの変化に関する模式図を示す。損失エネルギーは初回繰返し時に最も大きく、その後は小さくなり収束する。収束したエネルギーは摩擦損失エネルギー E_{fric} であり、初回の損失エネルギー

表-1 モルタルの配合条件と単位量および圧縮強度の測定結果

細骨材種類	記号	W/C (%)	細骨材量 (m ³ /m ³)	単位量 (kg/m ³)			圧縮強度 (N/mm ²)	
				W	C	S	28d	91d
高炉スラグ (B)	B35	35	0.407	311	889	1131	78.0	81.4
	B50	50	0.503	304	608	1397	52.7	59.5
天然川砂 (N)	N35	35	0.349	341	976	896	73.3	85.2
	N50	50	0.502	304	608	1291	48.4	54.1

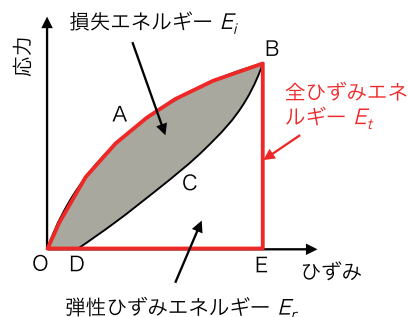


図-1 応力 - ひずみ曲線と各種エネルギーの関係

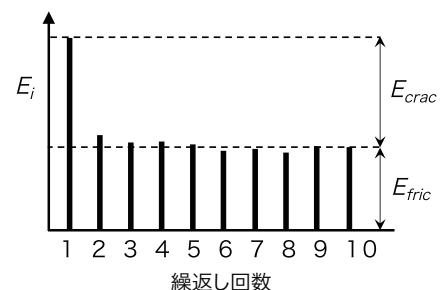


図-2 载荷除荷重の繰返しによる損失エネルギーの変化

キーワード：高炉スラグ細骨材、微細ひび割れ、繰返し载荷、損失エネルギー、ひび割れ進展エネルギー

連絡先：〒 860-8555 熊本市中央区黒髪 2-39-1 Tel 096-342-3542 Fax 096-342-3507

E_{il} から E_{fric} を差し引くことで、ひび割れの進展に寄与するエネルギー E_{crac} が求められる⁴⁾。本研究では、既往の研究⁵⁾を踏まえて5～10サイクルの E_i を平均して E_{fric} とした。また、得られたエネルギー値 (N/m^2) に供試体体積 (m^3) を乗じた仕事量 ($N \cdot m$) で整理した。

3. 実験結果

図-3 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。ここで、ひずみ比とは初回折返し点のひずみ (ϵ_1 、図-1における点B) に対する最大応力時ひずみ (ϵ_c) の割合である。

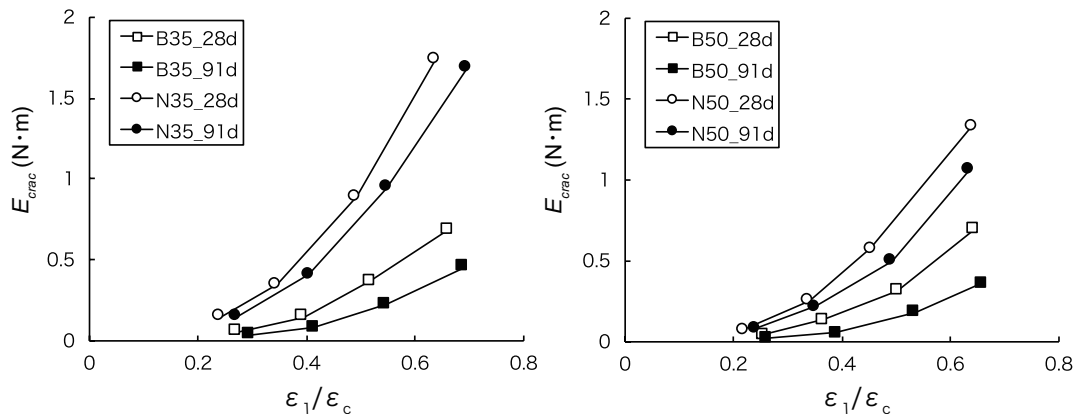


図-3 ひずみ比とひび割れ進展エネルギーの関係 (左: W/C=35%, 右: W/C=50%)

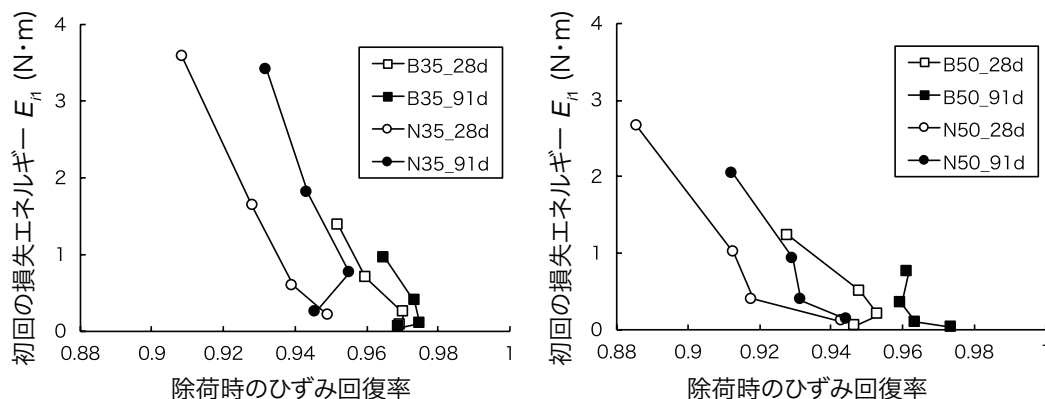


図-4 初回の損失エネルギーと除荷時のひずみ回復率の関係

1つのプロットは1回の繰返し載荷実験によって得られたものである。同レベルのひずみ比に対する E_{crac} は、材齢が経過するほど小さくなる。これは、セメントの水和反応が進むことで組織が緻密なものとなり、ひび割れに変換されるエネルギーが小さくなることを示している。なお、水セメント比の違いで比較すると50%の方が35%よりもやや小さいが、これは強度の違いによるものである。一方、BFSモルタルと普通モルタルで比較すると、同一材齢であれば前者の方が E_{crac} は小さい。これは強度の違い(表-1)によっては説明できず、BFSモルタルにおいては何らかの理由によってひび割れに変換されるエネルギーが小さくなることを示している。

図-4に初回の損失エネルギー E_{il} と除荷時のひずみ回復率の関係を示す。ひずみ回復率は、図-1においてED/OEで定義される。同レベルの損失エネルギーに対し、BFSモルタルの方が普通モルタルよりもひずみ回復率が高い。このことは、BFSモルタルにおいては E_{il} のうち E_{fric} に変換される比率が大きくその分 E_{crac} が小さくなり、同レベルの変形を受けた際の損傷がより小さくなることを示しており、図-3の結果と整合する。

4. まとめ

圧縮応力を受けるモルタルのひび割れ進展に関しエネルギー的に検討した。その結果、BFSモルタルのひび割れ進展に対する抵抗性は普通モルタルよりも大きいことが確認された。

参考文献

- 1) 上野敦, 沢木大介, 下山善秀, 國府勝郎: 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの30年試験結果, セメント・コンクリート, No. 828, pp. 8-13, 2016
- 2) 戦略的イノベーション創造プログラム インフラ維持管理・更新・マネジメント技術「超耐久性コンクリートを用いたプレキャスト部材の製品化のための研究開発」(<http://www.jst.go.jp/sip/dl/k07/kadai/k07-38.pdf>, 2017年4月2日確認)
- 3) JIS R 5201『セメントの物理試験方法』, 2015
- 4) 岡田清, 小柳, 六郷恵哲: 含水量の異なるコンクリートの圧縮破壊過程に関するエネルギー的考察, 土木学会論文報告集, No. 248, pp. 129-136, 1976
- 5) 尾上幸造, 松下博通: 液体浸漬によるコンクリートの静的圧縮強度低下に関するエネルギー的考察, 土木学会論文集 E, No. 4, pp. 515-525, 2008