

高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの破壊エネルギーとRCはりの破壊挙動に関する研究

熊本大学工学部 学生会員 ○尾前 佐知 熊本大学大学院 学生会員 橋本 涼太
熊本大学大学院 学生会員 浅廣 恭輔 熊本大学大学院 正会員 尾上 幸造

1. はじめに

高炉スラグ細骨材（以下、BFS）は潜在水硬性を有し、ペーストと骨材の界面性状が改善されコンクリートの耐久性や破壊力学特性値を向上させることが報告されている。したがって、BFSを細骨材に使用した場合、コンクリートの破壊エネルギーが向上し、ひび割れ進展に対する抵抗性が高まると考えられる。本研究では、BFSの使用がコンクリートの破壊エネルギーに及ぼす影響について実験的に検討した。また、RCはりモデルを用いた BFS コンクリートの破壊挙動と実験により得られた破壊エネルギーとの関連を調べることで、BFS コンクリートのひび割れ進展に対する抵抗性を検討した。

2. 実験概要

(1) 使用材料および配合条件

普通ポルトランドセメント（密度：3.15 g/cm³），BFS-a（JIS A 5011-1 における 1.2 mm 高炉スラグ細骨材，表乾密度：2.78 g/cm³，吸水率：0.21%，粗粒率：2.58），BFS-b（表乾密度：2.59 g/cm³，吸水率：3.35%，粗粒率：2.24），天然山砂（表乾密度：2.56 g/cm³，吸水率：2.29%，粗粒率：2.58）を用いた。

表-1 にコンクリートの配合条件および単位量を示す。細骨材には産地の異なる 2 種類の BFS および山砂を用い、水セメント比は 35% および 50% とした。本実験では、6 配合について材齢 28 日と 91 日の計 12 ケースを検討した。

(2) 試験方法

コンクリートの圧縮強度および静弾性係数はそれぞれ JIS A 1108 および JIS A 1145 に準じ材齢 28 日および 91 日に測定した。破壊エネルギーは JCI-S-001-2003 に準じ、精密万能試験機を用いて材齢 28 日および 91 日に試験を実施した。供試体は 100 mm×100 mm×400 mm の角柱であり事前に幅 3 mm，深さ 30 mm の切欠きを供試体中央部に導入した。なお、試験の際には、切欠き部にクリップゲージを設置し、開口変位速度を 0.1 mm/min に制御して実施した。

表-1 配合条件および単位量

記号	細骨材の種類	W/C (%)	細骨材率	単位量(kg/m ³)				
				W	C	S	G	AE剤
Ba35	BFS-a	35	0.42	170	486	754	1078	4.37
Ba50		50	0.43		340	809	1158	2.38
Bb35	BFS-b	35	0.42		486	700	1079	3.4
Bb50		50	0.43		340	751	1158	2.38
N35	山砂	35	0.42		486	694	1079	4.37
N50		50	0.43		340	745	1158	2.38

3. 実験結果および考察

表-2 に各ケースにおける圧縮強度，破壊エネルギー，および静弾性係数の測定結果を示す。圧縮強度においては，すべてのケースで Ba が最も大きくなった。Bb については，N に比べてわずかに大きくなる傾向を示したものの，ほとんど差はみられなかった。破壊エネルギーでも同様に，ほとんどのケースで Ba が最も大きい結果となり，Bb と N に関しては大きな差はみられなかった。一般的に，圧縮強度が大きいほど破壊

エネルギーは大きくなるとされている。本実験においても同様の傾向を示したが，例外として，材齢 91 日の Ba50 に関しては Bb，N に比べて圧縮強度が大きかったにもかかわらず，破壊エネルギーが著しく小さくなった。静弾性係数は，Ba，Bb とともに N より大きく，すべての配合で W/C=35% の方が大きくなった。

図-1～図-3 は各ケースの引張軟化曲線である。なお，引張軟化曲線は，破壊エネルギーを測定した 4 本の供試体の中で 2 番目に大きかったものを示している。Ba（図-2）について，N（図-1）や Bb（図-3）に比べると最大荷重が大きい一方で，荷重がピークに到達してから急激に減少する脆性的な破壊挙動を示した。ま

表-2 圧縮強度および破壊エネルギーの実験値

配合	圧縮強度 (N/mm ²)		静弾性係数 (kN/mm ²)		破壊エネルギー (N/mm)	
	材齢 28日	材齢 91日	材齢28日	材齢91日	材齢 28日	材齢 91日
N35	60.1	68.8	33.0	32.7	0.123	0.137
N50	41.8	46.2	29.5	29.5	0.129	0.171
Ba35	75.0	85.6	39.3	38.9	0.144	0.157
Ba50	43.8	54.7	33.5	36.0	0.164	0.129
Bb35	65.1	70.8	34.2	38.6	0.122	0.131
Bb50	39.3	49.0	32.0	30.8	0.124	0.137

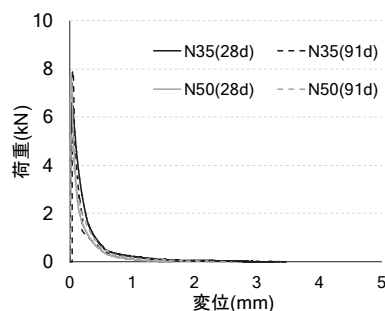


図-1 N の引張軟化曲線

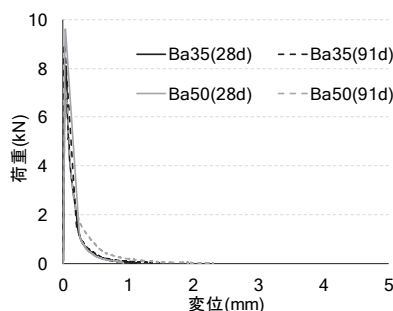


図-2 Ba の引張軟化曲線

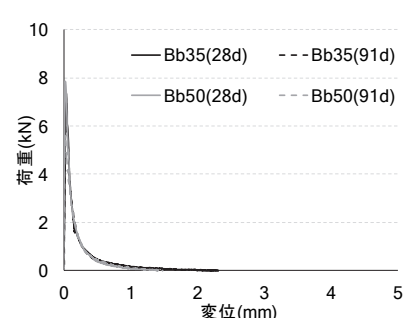


図-3 Bb の引張軟化曲線

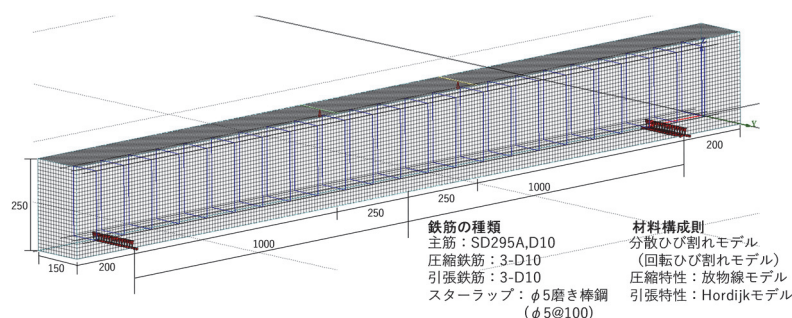


図-4 RC はりモデルと寸法 (長さの単位: mm)

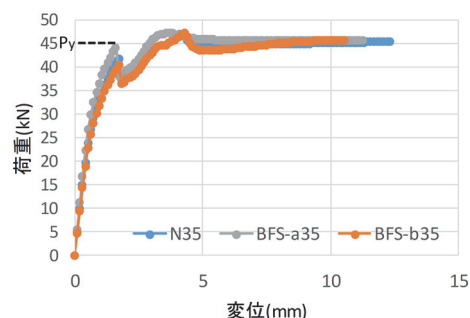


図-5 解析で得られた荷重-変位曲線

た、最終的な開口変位は N や Bb より明らかに小さくなった。コンクリート中においてペーストと骨材の界面における強度が大きいとひび割れが骨材を貫通することがある。このような骨材貫通型の破壊ではひび割れが局所化するため、コンクリートの単位体積当たりには吸収されるエネルギー量が減少し、結果的に破壊エネルギーが小さくなる²⁾。材齢 91 日の Ba50 では、このような脆性的破壊が生じたことで破壊エネルギーが小さくなったことが考えられる。

本実験で使用した BFS-b の吸水率は 3.35% であり、BFS-a (0.21%) や山砂 (2.29%) と比べ、大きかった。吸水率が大きいと圧縮強度が小さくなることが知られており³⁾、Bb の圧縮強度および破壊エネルギーが Ba に比べて伸びなかったのはその影響が考えられる。一方で、N と比べると同程度の値となったことから、吸水率が影響しながらも潜在水硬性の作用によりある程度の値を維持したのではないかと考えられる。

汎用非線形有限要素解析ソフト midasFEA を用い 3 次元の非線形 FEM 解析を行った。図-4 に RC はり解析モデルの概要を示す。解析にあたり材齢 28 日の W/C=35% における圧縮強度、静弾性係数、破壊エネルギーを物性値として入力した。図-5 に、各ケースの解析結果を示す。その結果、BFS-a については、破壊エネルギー、圧縮強度および静弾性係数が増大したことで鉄筋降伏荷重 (P_y) が若干ではあるが増大した。ただし全体的な挙動についてはモデル間で大きな差はみられなかった。

4. まとめ

本研究では、BFS の使用がコンクリートの破壊エネルギーに及ぼす影響について実験的に検討した。また、RC はりモデルにより、それぞれのコンクリートの破壊挙動を分析した。その結果、BFS コンクリートの破壊エネルギーは、普通コンクリートと同等以上となり、BFS の潜在水硬性がコンクリートの破壊エネルギーを向上させる可能性が示された。一方で BFS コンクリートの方が普通コンクリートよりも著しく低いケースも存在した。RC はりモデルによる破壊挙動に関しては、破壊エネルギー、圧縮強度および静弾性係数の大きかった BFS-a のケースで鉄筋降伏荷重が若干増加したが、経時的なひび割れ進展過程については、各コンクリートとも概ね同様の傾向を示した。

参考文献

- 1) 佐藤あゆみ, 山田寛次, 石山智: 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリート打継ぎ界面の力学特性値向上に関する破面解析的考察, *Cement Science and Concrete Technology*, No. 64, pp. 272-279, 2010
- 2) 二羽淳一郎, 松尾豊史, 岡本亨久, 田邊忠顕: セメントの種類とコンクリートの破壊力学特性値に関する研究, *土木学会論文集*, No. 550/V-33, pp. 43-52, 1996
- 3) 高橋祐一, 榎田佳寛: 再生骨材中の付着モルタルが再生コンクリートの性質に及ぼす影響, *日本建築学会構造系論文集*, 第 75 巻, 第 663 号, 1167-1172, 2010