

高炉スラグ細骨材の使用がコンクリートの破壊エネルギーに及ぼす影響

熊本大学 学生会員 ○森 裕昭 熊本大学大学院 正会員 尾上 幸造
熊本大学大学院 学生会員 堤 亮祐 熊本大学 正会員 友田 祐一

1. はじめに

現在、わが国において、建設後数十年を経たコンクリート構造物が増加しており、その劣化が問題となっている。このような中、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」では、高炉水砕スラグ細骨材（以下、BFS）を用いた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¹⁾が進められている。このような部材を PC プレキャスト製品として道路橋床版へ適用する場合、凍結融解作用や疲労への抵抗性が問題となる。これらの劣化現象は、コンクリートのひび割れ進展に対する抵抗性が密接に関わっている。本研究では、ひび割れ進展に対する抵抗性を評価するため、破壊エネルギーに着目した。破壊エネルギーは、単位面積の、完全な、引張応力を全く伝達しないひび割れ面を形成するために要するエネルギーと定義される²⁾。また、破壊エネルギーは、引張軟化曲線とともに、コンクリートの破壊力学における重要なパラメータであり、これが与えられれば、コンクリート構造物のひび割れ進展過程を数値解析的に評価していくことが可能となる²⁾ため、これを明らかにすることは有意義である。

以上より本研究では、BFS の潜在水硬性によってコンクリートの破壊エネルギーが向上するかどうか、実験的に検討した。

2. 実験概要

普通ポルトランドセメント（密度：3.15 g/cm³）、高炉スラグ細骨材（表乾密度：2.78 g/cm³、吸水率 0.21%、粗粒率 2.13）、天然川砂（表乾密度：2.57 g/cm³、吸水率 3.4%、粗粒率 2.49）、および砕石（表乾密度：3.00 g/cm³）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。コンクリートの水セメント比は 35%および 65%とし、それぞれ川砂と高炉スラグを用いたものを作製した。供試体の寸法は 100mm×100mm×400mm で、打設時に厚さ約 3 mm の鉄板を型枠に設置しておくことで、深さ 30 mm の切欠きを導入した。

三点曲げ試験による破壊エネルギー測定は、JCI-S-001-2003²⁾に準じ、精密万能試験機を用いて行った。曲げ試験の概要を図-1 に示す。精密万能試験機にダイナミックアンプを介してクリップゲージ（容量：2 mm）を接続し、開口変位速度が 0.1 mm/min となるよう制御した。破断後にリガメント部の高さ、幅を測定しリガメント面積を求めた。破壊エネルギーは次式(1)(2)より算出した²⁾。

$$G_F = \frac{0.75W_0 + W_1}{A_{lig}} \quad (1)$$

$$W_1 = 0.75 \left(\frac{S}{L} m_1 + 2m_2 \right) g \cdot CMOD_c \quad (2)$$

ここで、 G_F ：破壊エネルギー (N/mm)

W_0 ：荷重-CMOD曲線下の面積 (N・mm) (図-2)

W_1 ：供試体の自重および载荷治具がなす仕事 (N・mm)

A_{lig} ：リガメントの面積 (mm²)、 m_1 ：供試体の質量 (kg)

S ：载荷スパン (mm)、 L ：供試体の全長 (mm)

m_2 ：試験機に取付けられておらず破断するまで供試体に載っている治具の質量 (kg)

g ：重力加速度 (9.807 m/s²)

$CMOD_c$ ：破断時のひび割れ開口変位 (mm)

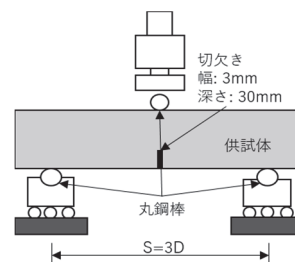


図-1 三点曲げ試験の概要

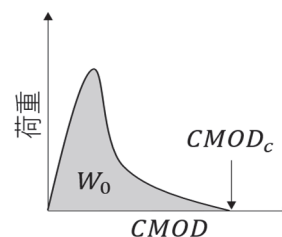


図-2 荷重-CMOD曲線

表-1 コンクリートの配合条件 (N:川砂, B:高炉スラグ)

記号	W/C (%)	W (kg)	C (kg)	S (kg)	G (kg)	AE 剤 (g)	スランプ (cm)	空気量 (%)
N35	35	170	486	681	1098	4371	12	5.3
N65	65	175	269	785	1167	1379	12.5	6.0
B35	35	170	486	737	1098	4371	9	3.4
B65	65	175	269	850	1167	2423	12	6.7

3. 実験結果および考察

図-3 と図-4 に荷重-CMOD 曲線を示す。破壊エネルギーは 1 条件につき 4 つの供試体を用いて測定したが、代表例として破壊エネルギーが 2 番目に大きかったものについて荷重-CMOD 曲線を示した。

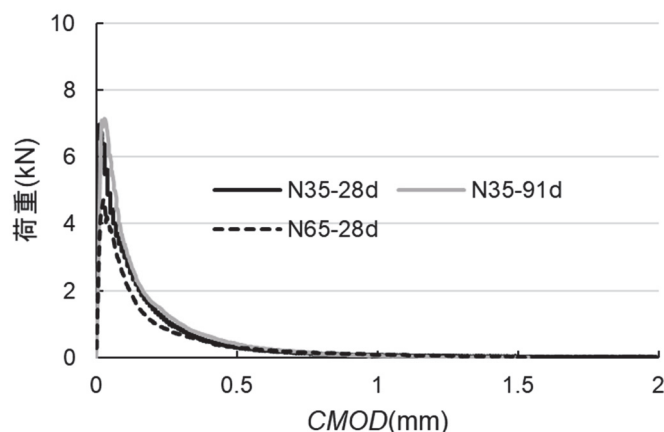


図-3 荷重-CMOD 曲線(N35, N65)

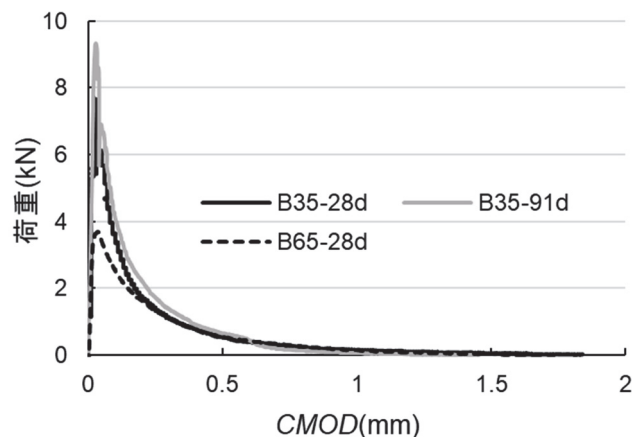


図-4 荷重-CMOD 曲線(B35, B65)

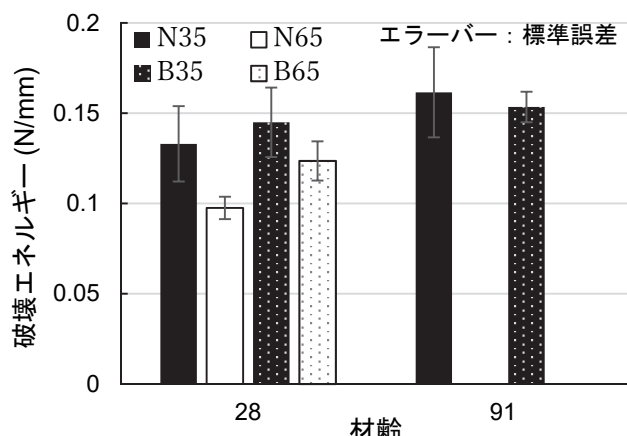


図-5 破壊エネルギーの測定結果

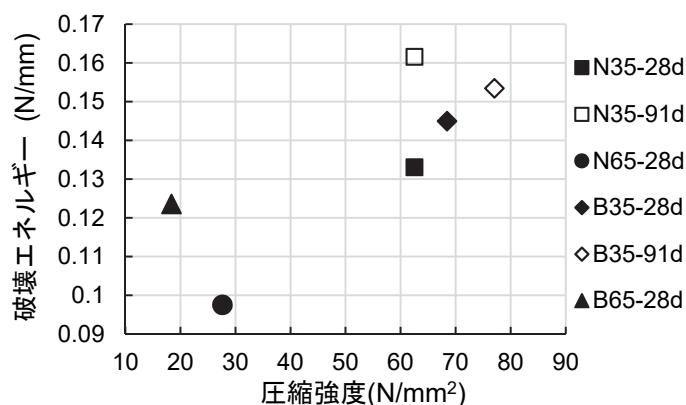


図-6 圧縮強度と破壊エネルギーの関係

図-3 および図-4 より、曲げ載荷時の最大荷重は、同一材齢であれば W/C が低いほど大きく、同一 W/C であれば材齢が経過するほど大きくなることを確認される。図-5 の破壊エネルギーに関する算定結果は、このことを反映したものとなっている。細骨材の種類の違いに着目して材齢 28 日の結果を比較すると、 $W/C=35\%$ の場合には有意な差はないが、 $W/C=65\%$ の場合には BFS を用いた方が破壊エネルギーは大きくなっている。材齢 91 日の N65 と B65 の結果については現在供試体を養生中であり、本稿には掲載していないが、結果が出次第報告する予定である。本検討により、BFS を用いたコンクリートの破壊エネルギーは、天然川砂を用いたコンクリートの破壊エネルギーと同等かそれ以上となることを確認した。

図-6 にコンクリートの圧縮強度と破壊エネルギーの関係を示す。一般に、コンクリートの圧縮強度が大きいほど破壊エネルギーは大きくなる²⁾と考えられる。本研究の結果について、B65 と N65 の材齢 28 日の結果はその関係が逆転しているが、低強度領域においてはモルタル内部に発生したひび割れが骨材を迂回し、強度あたりの破壊エネルギーが大きくなるため²⁾と考えられる。

4. まとめ

三点曲げ試験により、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を測定し、天然川砂を用いた普通コンクリートと比較した。その結果、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は、普通コンクリートと同等かそれ以上となることを確認した。

なお、本研究の結果はある一種類の高炉スラグ細骨材についてのものであり、今後は、他の製鉄所や異なるロットの高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートについてもデータの蓄積が必要である。

謝辞：本研究は、日本コンクリート工学会 2016 年度研究助成を受けて実施した。

参考文献

- 1) 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>, 2019 年 1 月 8 日確認)
- 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, pp43-52, 1996
- 3) JCI-S-001-2003「切欠きはりを用いたコンクリートの破壊エネルギー試験方法」