

高炉スラグ微粉末を高含有したRCはりのせん断耐力

太平洋セメント(株) 正会員 博(工) ○河野 克哉
 太平洋セメント(株) 修(工) 安田 瑛紀
 太平洋セメント(株) 修(工) 森 香奈子
 太平洋セメント(株) 多田 克彦

キーワード：高炉スラグ微粉末，斜めひび割れ，アーチ機構，せん断耐力

1. はじめに

セメントは、1450℃の高温で焼成されること、主原料の石灰石が焼成反応で脱炭酸することなどから、製造時に多量のCO₂を排出する。とくに原料の脱炭酸は、セメント製造にともなって発生する全CO₂の約55%を占めている。このため、最近では、セメントの一部を高炉スラグ微粉末などの他産業の副産物で置換した混合セメントの利用を推進することで、CO₂排出量を削減することが試みられている。さらに、高炉スラグ微粉末の置換率が70%に及ぶようなコンクリートの研究開発も行われている¹⁾。その一方で、セメント製造では廃棄物・副産物を原燃料として有効活用されており、日本の全産業から排出される廃棄物・副産物全体の1割弱がセメント産業で受け入れて処理されているため、その受入処理で日本の産業廃棄物最終処分場の延命効果は9.3年になると試算されている。図-1は、日本版被害算定型影響評価手法(LIME2)によって各種セメントの環境影響評価を行った既往の研究であり²⁾、都市域大気汚染、酸性化、資源消費、地球温暖化、廃棄物の各指標を統合化評価した場合には、高炉セメントB種やフライアッシュセメントB種よりも普通ポルトランドセメントを使用する方が環境に対するリスクを小さくできることも示されている。このような背景の下、本研究では、環境面から利用が推奨される高炉スラグ微粉末で高置換したセメントを用いたRC部材に対して構造面での性能にも着目し、包括的に長所・短所を十分に議論する上で必要となるデータを新しく収集することにした。なお、このようなコンクリートに関する既往の研究では、強度や耐久性などの材料面に関するものがほとんどであり、RC部材の構造性能に関するものはまだ限られているのが現状であった。そのため、本研究においては、高炉スラグ微粉末を比較的多量に含んだRCはりを作製して載荷実験に供することで、構造部材のせん断に対する性能の観点から評価した。

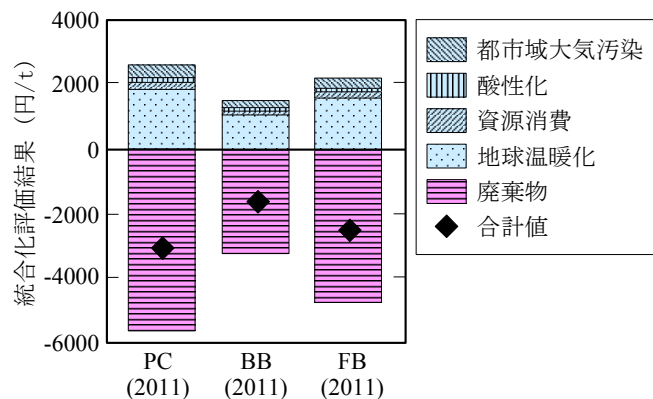


図-1 LIME2による各種セメントの環境影響評価結果

2. 実験概要

2.1 使用材料ならびに配合

表-1に示すように、結合材(以下, B)には普通ポルトランドセメント(以下, C)と高炉スラグ微粉末(以下, BS)を, 骨材には山砂(以下, S)と砕石(以下, G)を, 混和剤には高性能AE減水剤(SP)と消泡剤(以下, DF)を用いた。また, コンクリートの配合は, 水結合材比(以下, W/B)を30%, 細骨材率(以下, s/a)を46%および単位水量を170kg/m³でそれぞれ一定とし, スランプと空気量を混和剤の添加量にて表-2に示すように調整した。なお, 試験の因子はセメント種類とし, その水準はCのみを用いた配合(OPC)ならびに高炉セメントのB種とC種の閾値となる60%でCに内割置換した配合(BSC)の2種類とした。

表-1 使用材料

種類	名称	略号	物性/成分
結合材 (B)	普通ポルトランドセメント	C	比表面積 3340cm ² /g, 密度 3.16g/cm ³
	高炉スラグ微粉末	BS	比表面積 6480cm ² /g, 密度 2.91g/cm ³
細骨材	山砂	S	表乾密度 2.55g/cm ³ , 吸水率 2.50%, 粗粒率 2.82
粗骨材	砕石	G	表乾密度 2.63g/cm ³ , 吸水率 0.80%, 最大寸法 13mm
混和剤	高性能 AE 減水剤	SP	ポリカルボン酸エーテル系
	消泡剤	DF	ポリアルキレングリコール誘導体

表-2 コンクリートの配合

配合名	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)							スランプ (cm)	空気量 (%)
			W	C	BS	S	G	SP	DF		
OPC	30	46	170	567	—	734	894	B×1.00%	B×0.002%	18.0	2.7
BSC				227	340	697	849	B×0/65%	B×0.006%	16.0	2.3

2.2 練混ぜ, 養生および供試体の打込み

パン型強制練りミキサ(容量100L)に, B, SおよびGを投入して20秒間の練混ぜを行い, 水(以下, W), SPおよびDFを投入して, さらに2分間の練混ぜを行った。練り上がったコンクリートは, 所定の型枠に打ち込んで, コンクリートの圧縮強度(以下, f_c)ならびに弾性係数(以下, E_c)のための円柱供試体(寸法 ϕ 100×200mm), コンクリートの収縮ひずみ(以下, ϵ_{cs})のための角柱供試体(寸法100×100×400mm), および載荷試験のためのRCはり供試体は, いずれも材齢7日まで封緘養生(20℃)を行った後に材齢28日まで湿布養生(20℃)を実施して各試験に供した。なお, ϵ_{cs} は凝結の始発に達した時点から供試体中心部に設置した埋込みひずみゲージ(弾性係数39N/mm², 標点距離100mm)にて測長した。

2.4 RCはりの載荷試験方法

(1) RCはりの作製

図-2に示すように, 幅 b =150mm, 有効高さ d =200mmの矩形断面を有する全長 L =1900mmのはりとした。引張縁の軸方向に異形鉄筋D32(SD345)を, 圧縮縁の軸方向に異形鉄筋D10(SD295)をそれぞれ2本ずつ配置し, 両側のせん断スパンにはせん断補強鉄筋を一切使用しない配筋状態とした。

(2) RCはりの載荷

図-2に示すように, 支間1500mm, 等モーメント区間250mm, せん断スパン有効高さ比 a/d =3.125とし, 耐圧機にて2点集中荷重を静的に作用させた。荷重をロードセルで検出しながら, はり中央部のたわみを測定した。なお, 引張縁の軸方向鉄筋の中央部にポリエステル箔ひずみゲージを貼り付け, 凝結の始発から載荷直前までに生じた鉄筋の初期ひずみ(以下, $\epsilon_{s,i}$)を計測した。

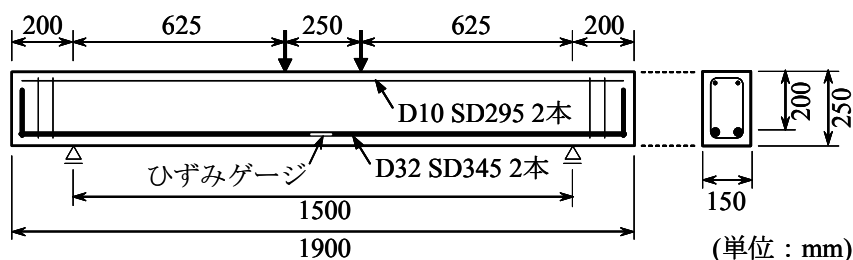


図-2 RCはりの断面諸元と載荷条件

3. 実験結果ならびに考察

表-3は、コンクリートの試験結果ならびにRCはりの載荷試験結果をまとめたものである。BSCを用いたコンクリートの材齢28日における f'_c ならびに E_c は、OPCを用いた場合に比べて、それぞれ14%、7%ほど小さい値となっている。また、BSCを用いたコンクリートの材齢28日における $\epsilon_{c,s}$ は、OPCを用いた場合に比べて、1.72倍ほど大きい値となっている。

図-3は、OPCならびにBSCを用いたRCはりに生じた載荷試験後のひび割れ状況を示したものである。いずれのRCはりの場合においても、等モーメント区間に曲げひび割れ(FC)を生じた後、まず、右側のスパンに第1番目の斜めひび割れ($DC1$)を生じるものの、すぐに破壊には至らずに右側の荷重点と支点を繋ぐようにタイド・アーチを形成した。次に、左側のスパンに第2番目の斜めひび割れ($DC2$)が第1番目のひび割れと同様に生じるものの、右・左の両スパンに形成された斜めひび割れの上部に力の流れが移行するアーチ機構を発現することで破壊には至らなかった(アーチの形成が無ければ、斜めひび割れの発生と同時に破壊に至る)。そして最後に、このアーチよりも内側に第3番目の斜めひび割れ($DC3$)を生じることで破壊に至っている。

図-4は、OPCならびにBSCを用いたRCはりの荷重-たわみ曲線を示したものである。いずれのRCはりの場合においても、第1番目、第2番目および第3番目の斜めひび割れが生じるごとに一旦は荷重の低下を生じながらアーチ形成で新たな耐荷機構を得るために荷重の増加を繰り返している。最終的には、第3番目の斜めひび割れの後で、耐荷力を失う形となった。

表-3に示したRCはりの載荷試験結果から、BSCを用いた場合の曲げひび割れ発生荷重(以下、 P_{FC})ならびに第1番目の斜めひび割れ発生荷重(以下、 P_{DC1})は、いずれもOPCを用いた場合よりも小さくなっている。これは、BSCを用いたコンクリートの $\epsilon_{c,s}$ がOPCを用いた場合よりも大きいことから、内部鉄筋などの変形拘束によってRCはり表面に初期から引張応力を生じていたことに起因するものと考えられる。また、第3番目の斜めひび割れ発生荷重(以下、 P_{DC3})は、OPCならびにBSCのいずれを用いた場合も最大荷重(終局荷重、以下、 P_f)で同じ値を示している。これは、いずれの場合も第3番目の斜めひび割れがアーチの内側に生じて耐荷力を喪失させたことから、ひび割れたRCはりのアーチ耐荷力に相当するためと考える。3つの斜めひび割れが片側スパンに発生することではりの載荷条件が常に変化していること、実質的には最初に斜めひび割れが発生した時点で供用が困難になることなどから、最初の斜めひび割れ(せん断ひび割れ)の形成を斜め引張破壊と考えることにした。このため、第1番目の斜めひび割れの形成に対して適用可能となる二羽らのスレンダービームのせん断耐荷力の算定式³⁾から計算した値(以下、 $P_{DC,CAL}$)に対して試験値 P_{DC1} を比較すると、OPCの場合に0.757、BSC場合に0.678となった。ここで、OPCを用いたRCはりの $P_{DC1}/P_{DC,CAL}$ を1とすると、BSCを用いたRCはりの場合には0.89となることから、同一の圧縮強度におけるBSCを用いたRCはりの斜め引張破壊時のせん断耐荷力はOPCを用いたRCはりの場合に比べて11%ほど低下することが分かった。

表-3 コンクリートの試験結果ならびにRCはりの載荷試験結果

配合名	コンクリートの試験結果				RCはりの載荷試験結果					
	f'_c (N/mm ²)	E_c (kN/mm ²)	$\epsilon_{c,s}$ ($\times 10^{-6}$)	$\epsilon_{s,i}$ ($\times 10^{-6}$)	P_{FC} (kN)	$P_U (=P_{DC3})$ (kN)	P_{DC1} (kN)	$P_{DC,CAL} (=2 \times V_c)$ (kN)	$P_{DC1}/P_{DC,CAL}$ (kN)	
OPC	99.0	35.1	185	91	25	150	131	173	0.757 [1.00]	
BSC	85.4	32.7	318	112	17	151	112	165	0.678 [0.89]	

注1) f'_c : コンクリートの圧縮強度 (28d), E_c : コンクリートのヤング係数 (28d), $\epsilon_{c,s}$: コンクリートの収縮ひずみ (28d), $\epsilon_{s,i}$: 鉄筋の初期ひずみ (28d, 載荷直前), P_{FC} : 曲げひび割れ発生荷重の実験値, P_U : 終局荷重の実験値, P_{DC3} : 第3番目の斜めひび割れ発生荷重の実験値, P_{DC1} : 第1番目の斜めひび割れ発生荷重の実験値, $P_{DC,CAL}$: 斜めひび割れ発生荷重の計算値, V_c : せん断耐力 (斜め引張破壊)。

注2) []内は, OPCの場合の $P_{DC1}/P_{DC,CAL}$ を1としたときの値。

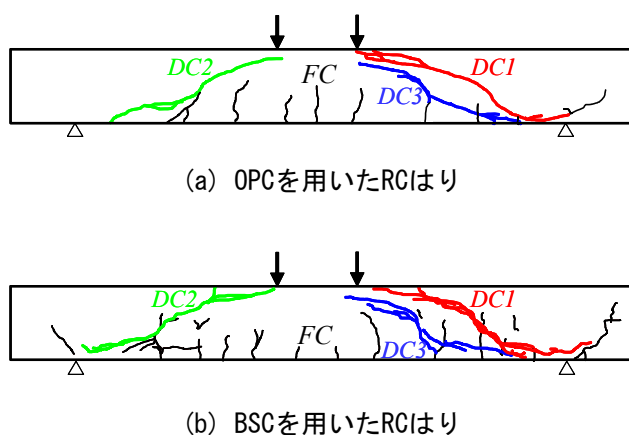


図-3 RCはりのひび割れ発生状況(載荷試験後)

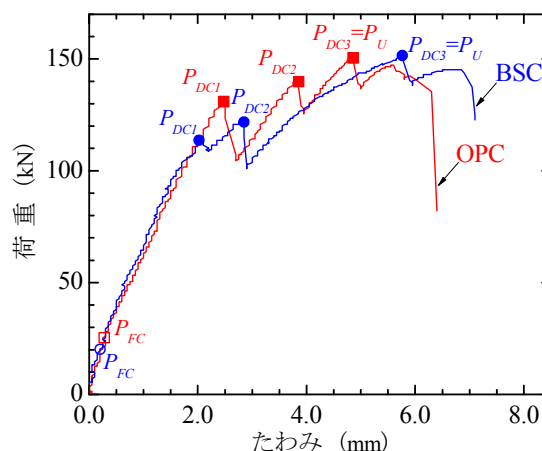


図-4 RCはりの荷重-たわみ曲線

4. まとめ

BSCを用いたコンクリートを同一配合となるOPCを用いたコンクリートと比較したとき, コンクリートの圧縮強度ならびにヤング係数は小さく, コンクリートの収縮ひずみは大きくなった。また, OPCを用いたRCはりならびにBSCを用いたRCはりの載荷試験では, 3つの斜めひび割れを段階的に形成して最終的な破壊に至ったことから, 最初に発生した斜めひび割れの形成に対して適用可能となる既往の算定式を用いて, 同一の圧縮強度におけるRCはりのせん断耐荷力を推定比較すると, BSCを用いた場合にはOPCを用いた場合よりも1割ほど小さくなるのが分かった。

参考文献

- 1) 伊代田岳史: 高炉スラグ微粉末を大量使用したコンクリート, コンクリート工学, Vol. 52, No. 5, pp. 409-414, 2014
- 2) 星野清一, 河合研至, 久保田修, 平尾宙: セメントの廃棄物・副産物の資源化を表す環境指標による各種セメントの評価, セメント・コンクリート論文集, Vol. 69, pp. 679-689, 2015
- 3) 二羽淳一郎, 山田一字, 横沢和夫, 岡村甫: せん断補強鉄筋を用いないRCはりのせん断強度式の再評価, 土木学会論文集, 第372号/V-5, pp. 167-176, 1986. 8.