

◇論文◇

高炉スラグ分量が多い混合セメントを用いた
普通強度RC梁のせん断耐力Shear Capacity of Normal Strength RC Beams with
Blended Cement Containing a Large Amount of
Blast-furnace Slag河野 克哉*, 安田 瑛紀**, 小亀 大佑**,
中村 敦士***, 城出 愛***KONO, Katsuya*; YASUDA, Eiki**; KOGAME, Daisuke**;
NAKAMURA, Atsushi***; SHIRODE, Ai***

要 旨

最近では、CO₂排出量の抑制を推進するために、高炉スラグ微粉末を多く含むようなコンクリートの研究が実施されるようになってきている。しかしながら、高炉スラグ微粉末を多く含んだ鉄筋コンクリート(RC)梁のせん断耐力に関する研究は、まだ限られている。そのため、本研究では、せん断耐荷機構を検討することを目的として、高炉スラグ微粉末を多く含んだRC梁のせん断耐荷試験を実施した。本研究から得られた重要な結果は、以下のとおりである。(1)同等の圧縮強度において、高炉セメント(BSC)を用いた普通強度コンクリートの材齢28日までの収縮は、普通ポルトランドセメント(OPC)やフライアッシュセメント(FAC)を用いた場合にくらべて増大する、(2)同等の圧縮強度において、BSCを用いた普通強度RC梁の材齢28日でのせん断耐力は、OPCやFACを用いた場合にくらべて約10%低下する。

キーワード : 混合セメント, 高炉スラグ微粉末, フライアッシュ, RC梁, せん断耐力,
収縮, 耐荷機構

*中央研究所 第2研究部 高機能コンクリートチーム リーダー

Manager, Multi-Function Concrete Team, R&D Department II, Central Research Laboratory

**中央研究所 第2研究部 高機能コンクリートチーム

Multi-Function Concrete Team, R&D Department II, Central Research Laboratory

***セメント事業本部 営業部 技術グループ

Technical Support Group, Sales Department, Cement Business Division

ABSTRACT

Recently there are an increasing number of studies about concrete with a high content of ground granulated blast-furnace slag (BS) as a part of efforts for reduction of carbon-dioxide emissions. However, little has been studied about the shear capacity of reinforced concrete (RC) beams with a high BS content. In this study, shear loading tests of RC beams with a high BS content were performed to investigate the shear load resisting mechanism. Some of the important findings were as follows: (1) normal strength concrete with blast-furnace slag cement (BSC) exhibited a larger shrinkage compared to concrete with ordinary Portland cement (OPC) or fly ash cement (FAC) of equivalent compressive strength until the age of 28 days; and (2) shear capacity of the normal strength RC beam with BSC was lower by about 10% compared to that of RC beams with OPC or FAC of equivalent compressive strength at the age of 28 days.

Keywords : *Blended cement, Ground granulated blast-furnace slag, Fly ash, RC beam, Shear capacity, Shrinkage, Load resisting mechanism*

1. はじめに

最近ではCO₂排出量の抑制の観点から、ポルトランドセメントの一部を高炉スラグ微粉末などの他産業副産物で置換した混合セメントの利用が推奨されるようになってきている。例えば、日本建築学会では2017年に「高炉セメントまたは高炉スラグ微粉末を用いるRC造の設計・施工指針(案)・同解説」が新しく制定されている¹⁾。また、土木学会では2018年に「高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの設計・施工指針」が改訂され²⁾、さらに「混和材を大量に使用したコンクリート構造物の設計・施工指針(案)」も発行されている³⁾。しかし、このような高炉スラグ分量が多い混合セメントを用いた鉄筋コンクリート(以下、RC)部材の構造性能については、まだ十分に明らかになっていないのが実情である。

このような背景の下、本研究では、混和材分量を混合セメントB種の上限まで増加させた高炉セメントを用いて普通強度RC梁を作製し、載荷試験を行った。この高炉セメントを用いた場合のせん断耐力を普通ポルトランドセメントやフライアッシュセメントを用いた場合と比較する形で評価するとともに、せん断耐荷機構の変化について考察した。

2. 実験概要

2.1 使用材料ならびに配合

Table 1に示すように、結合材(B)には普通ポルトランドセメント(以下、C)、混和材には高炉スラグ微粉末6000(以下、BS)およびフライアッシュⅡ種(以下、FA)を、骨材には山砂(以下、S)と碎石(以下、G)を、混和剤(以下、AD)には高性能AE減水剤(以下、SP)と消泡剤(以下、DF)を用いた。試験因子は、結合材の種類として、Cのみを用いた場合(以下、OPC)、Cに対してFAをフライアッシュセメントB種の上限值20%で内割置換した場合(以下、FAC)、Cに対してBSを高炉セメントB種の上限值60%で内割置換した場合(以下、BSC)の3水準とした。

コンクリートの配合は、**Table 2**に示すように、材齢28dにおける強度発現が同一となるように水結合材比(以下、W/B)をBの種類で変化させ、単位水量170kg/m³ならびに粗骨材絶対容積340L/m³でそれぞれ一定とし、スランプならびに空気量はADの添加量で調整した。

2.2 練混ぜならびに養生

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秒間練り混ぜ、さらに水(以下、W)、SPおよびDFを投入して2分間練り混ぜた。梁用と

Table 1 Materials
(使用材料)

Material	Type	Symbol	Characteristics
Binder (B)	Ordinary Portland cement	C	Specific surface area: 3340cm ² /g, Density: 3.16g/cm ³
	Ground granulated blast furnace slag	BS	Specific surface area: 6480cm ² /g, Density: 2.91g/cm ³
	Fry ash	FA	Specific surface area: 3560cm ² /g, Density: 2.30g/cm ³
Fine aggregate	Land sand	S	SSD particle density: 2.55g/cm ³ , Absorption: 2.50%, Fineness modulus: 2.82
Coarse aggregate	Crushed stone	G	SSD particle density: 2.63g/cm ³ , Absorption: 0.80%, Maximum particle size: 13mm
Chemical admixture (Ad)	Superplasticizer	SP	Polycarboxylic type
	Deforming agent	DF	Polyalkylene glycol type

Table 2 Mix proportion of concrete
(コンクリートの配合)

No.	Name	W/B (%)	s/a (%)	Unit contents (kg/m ³)								Slump (cm)	Air content (%)
				W	B			S	G	SP	DF		
					C	BS	FA						
1	OPC	48	51.2	170	354	—	—	911	890	B×0.60%	B×0.006%	17.0	2.9
2	BSC	35	47.4	170	194	81	—	784	890	B×0.45%	B×0.001%	17.0	2.4
3	FAC	42	49.3	170	324	—	291	845	890	B×0.45%	B×0.001%	19.0	3.2

s/a : Sand percentage

供試体用の各型枠にコンクリートを打ち込んで材齢 1 dで脱型し、材齢 7 dまで湿潤養生(20℃, 湿布)を行った後、材齢 28 dまで気中養生(20℃, 相対湿度 60%)を行った。

2.3 コンクリートの試験方法

(1) 圧縮強度ならびにヤング係数

寸法 $\phi 100 \times 200$ mmの供試体を用いて静弾性試験を行い、圧縮強度(以下, f_c')ならびにヤング係数(以下, E_c)を測定した。

(2) 収縮ひずみ

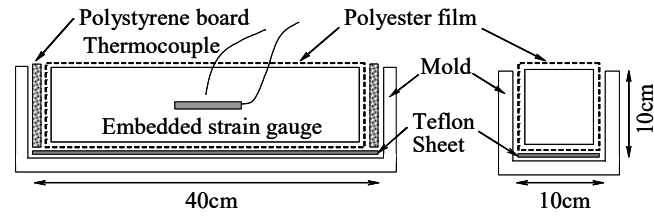
コンクリートの収縮ひずみ(以下, $\epsilon_{c,s}$)は、以下のように測定した。封緘養生の材齢 1 日までは、Fig. 1に示すように供試体の自由な変形の拘束(底面にテフロンシートならびに両端面にポリスチレンボードの設置)、および水分の逸散を防止(全面にポリエステルフィルムの設置)した型枠(寸法10×10×40 cm)内で凝結の始発に達した時点から供試体中心部に設置した埋込みひずみゲージ(弾性係数 39N/mm²,

標点距離100mm)にて測長した。その後、供試体を脱型(全面に施したポリエステルフィルムを除去)し、全面に湿布を施したうえでビニール袋中に材齢 7 日まで保管して同様に埋込みひずみゲージにて測長した。材齢 7 日以降は、湿布ならびにビニール袋を除去し、恒温恒湿室(20℃, 相対湿度 60%)で保管して測長した。なお、収縮ひずみの算出では、熱電対にて水和熱を実測し、線膨張係数を $13.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ と仮定して、長さの補正を行った。

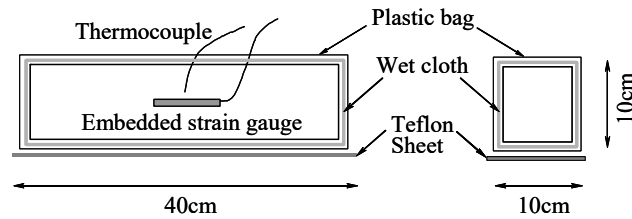
2.4 RC梁の試験方法

(1) RC梁の形状と配筋

Fig. 2に示すように、RC梁は、すべて全長 $L=2000$ mmで幅 $b=150$ mm, 有効高さ $d=200$ mmの矩形断面とした。主鉄筋は、引張縁の軸方向に異形棒鋼 D25 (SD490) を、圧縮縁の軸方向に丸鋼 $\phi 10$ (SR295) をそれぞれ 2 本ずつ配置した。せん断補強鉄筋は、片側のスパンのみに異形棒鋼 D10 (SD295A) を 80 mm ピッチで配置し、もう一方のスパンには一切使用しなかった。



(a) Up until 1 day after casting
(打込み後 1 日まで)



(b) Up until the age of 7 days after removal of mold
(脱型後材齢 7 日まで)

Fig. 1 Measurement method for shrinkage of concrete
(コンクリートの収縮に関する測定方法)

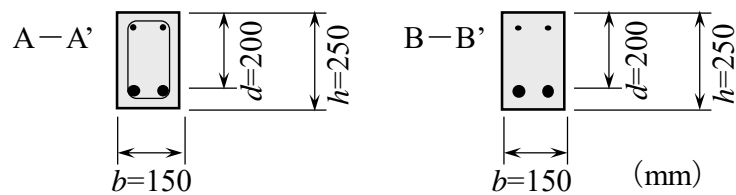
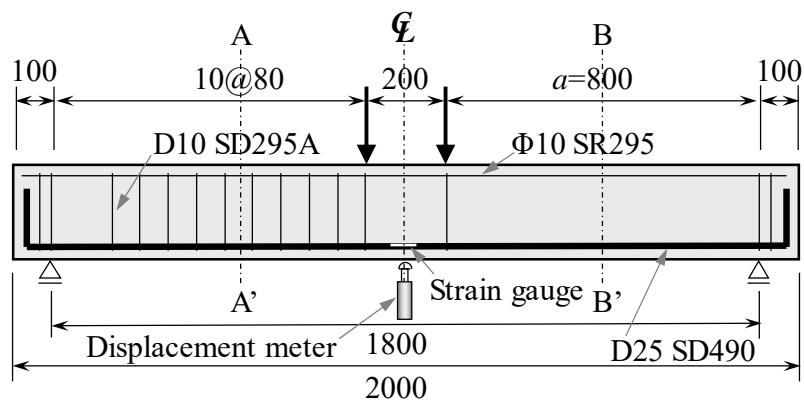


Fig. 2 Detail and loading test method of RC beams
(RCはりの詳細ならびに載荷試験方法)

(2) RCはりの載荷

OPC, FACおよびBSCを用いたRC梁は, 所定の養生を材齢28dまで行った. その後, Fig. 2に示すように支間1800mm, 等モーメント区間100mm, せん断スパン有効高さ比 $a/d=4.0$ として耐圧機で2点集中荷重を作用させた. 荷重をロードセルで検出しながら, 梁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.

3. 実験結果

3.1 コンクリートの特性

(1) 圧縮強度

OPC, FACおよびBSCを用いたコンクリートは, Table 3に示すように, 所定の養生に供した材齢28日の圧縮強度(f'_c)が, それぞれ44.8, 46.8, 43.2N/mm²となり, ほぼ同等となった.

(2) 収縮

Fig. 3は, OPC, FACおよびBSCを用いたコンクリートの養生中におけるひずみの経時変化を示したものである. OPCを用いた場合にくらべて, FACを用いた場合は, 材齢7dまで膨張ひずみを生じ, 材齢7d以降はほぼ同じ収縮挙動を示した. 一方, BSCを用いた場合は, すべての材齢を通じて, もっとも大きな収縮ひずみを生じた.

3.2 RC梁のせん断特性

(1) 鉄筋ひずみ

Fig. 4は, OPC, FACおよびBSCを用いたRC梁の養生中における引張縁軸方向鉄筋のひずみの経時変化を示したものである. 鉄筋ひずみは, OPCを用いたRC梁にくらべて, FACを用いたRC梁はやや大きい程度であったものの, BSCを用いたRC梁では大幅に増大した.

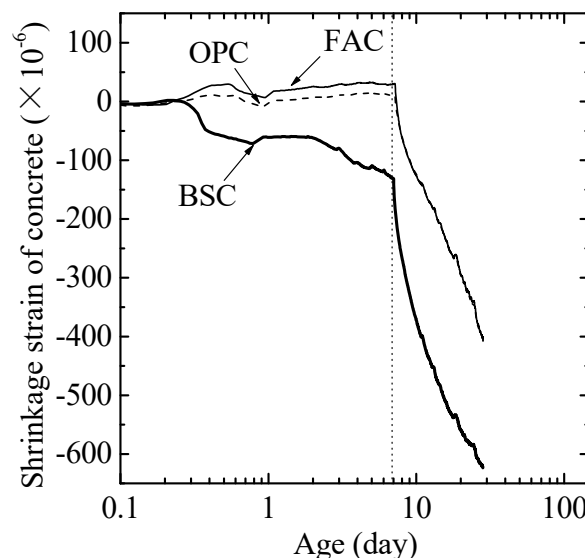


Fig. 3 Change in shrinkage strain of concrete (コンクリートの収縮ひずみの経時変化)

Table 3 Test results of concrete and RC beams (コンクリートならびにRC梁の試験結果)

Name	Material test of concrete		Loading test of RC beam			
	f'_c (N/mm ²)	$\epsilon_{c,s}$ ($\times 10^{-6}$)	$\epsilon_{s,i}$ ($\times 10^{-6}$)	P_u (kN)	$P_{dc,cal}$ ($=2 \times V_c$) (kN)	$P_u/P_{dc,cal}$
OPC	44.8	401	81	114 [1.00]	105	1.08 [1.00]
BSC	43.2	620	165	104 [0.91]	104	1.00 [0.92]
FAC	46.8	400	97	117 [1.03]	107	1.10 [1.01]

* f'_c : Compressive strength of concrete at the age of 28d, $\epsilon_{c,s}$: shrinkage strain of concrete at the age of 28d,

$\epsilon_{s,i}$: Initial strain of steel bar just before the loading test, P_u : Ultimate failure load,

$P_{dc,cal}$: Calculated value of diagonal crack initiation load

** Comparison values of P_u of RC beam are shown in parentheses [], where P_u of RC beam with OPC equals one.

** Comparison values of $P_u/P_{dc,cal}$ of RC beam are shown in parentheses [], where $P_u/P_{dc,cal}$ of RC beam with OPC equals one.

(2) 荷重－たわみ関係

Fig. 5は、OPC、FACおよびBSCを用いたRC梁の載荷試験における荷重－たわみ関係を示したものである。OPCを用いたRC梁にくらべて、FACを用いたRC梁は終局荷重(以下、 P_u)が増大し、BSCを用いた梁では P_u がやや低下した。コンクリートは同一の f'_c であるにもかかわらず、RC梁の P_u はコンクリートに用いた結合材の種類で変化した。BSCのようにコンクリートの収縮を増大させる結合材の種類は、養生中のRC梁に引張応力が作用して P_u は低下し、逆にFACのようにコンクリートの収縮を増大させない結合材の種類では、養生中のRC梁に引張応力が作用せずに P_u を低下させなかったものとする。

(3) せん断耐力

Table 3は、OPC、FACおよびBSCを用いたコンクリートの材料試験結果ならびにそれらを用いたRC梁の載荷試験結果をまとめたものである。RC梁の終局荷重は、FACを用いた場合がもっとも高く、それにつづいてOPCを用いた場合が高くなり、BSCを用いた場合にはもっとも小さくなった。これは、BSCを用いたコンクリートの $\epsilon_{c,s}$ がOPCやFACを用いたコンクリートの $\epsilon_{c,s}$ 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梁の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する。BSCを用いたRC梁の $\epsilon_{s,i}$ はOPCやFACを用いた場合よりも増加している。なお、3.2(4)で後述するようにBSCを用いたRC梁では載荷前に初期ひび割れがあったことから、BSCを用いたコンクリートの収縮に起因して、コンクリートと主鉄筋との一体化を阻害するような内部欠陥(鉄筋周囲の微細な付着ひび割れ)を生じていた可能性がある。

ここで、二羽らのスレンダービームのせん断耐荷力の算定式⁴⁾から計算した値(以下、 $P_{dc,cal}$)に対して試験値 P_u を比較すると、OPCを用いたRC梁の $P_u/P_{dc,cal}$ を1とすると、BSCを用いたRC梁の場合には0.92となり、FACを用いたRC梁の場合には1.01となった。このことから、コンクリートの圧縮強度がまったく同一であったと仮定計算すると、OPCを用いたRC梁の場合にくらべて、斜めせん断耐力はBSCを用いたRC梁では1割ほど低下し(8%低下)、FACを用いたRC梁ではほぼ同等となった(1%増加)。

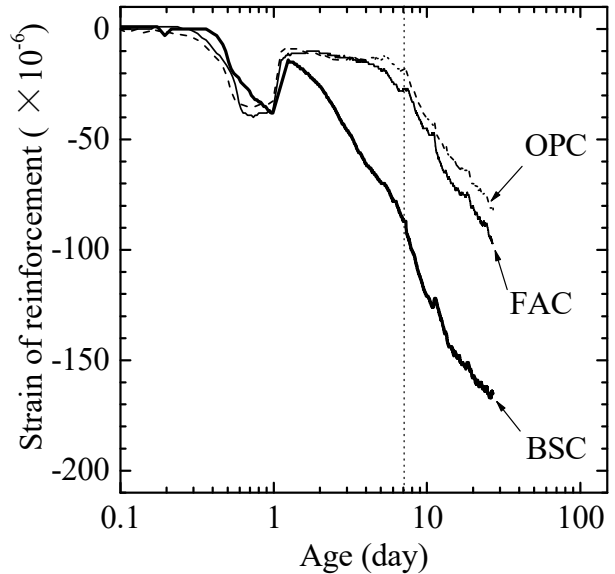


Fig. 4 Change in strain of reinforcement in RC beams
(RC梁の鉄筋ひずみの経時変化)

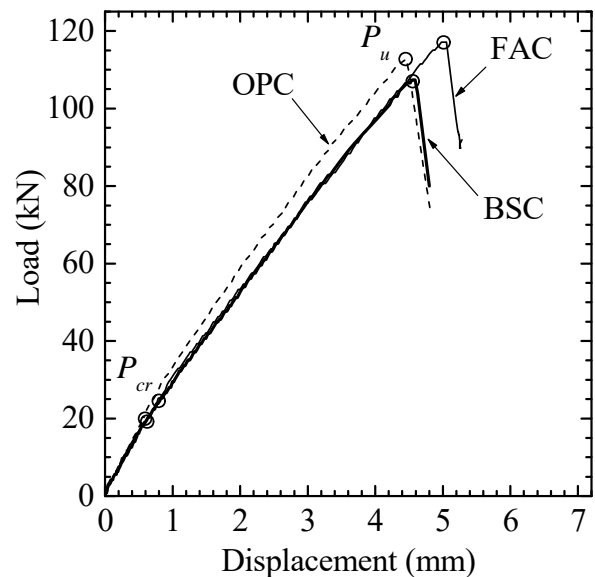


Fig. 5 Load-displacement relationship of RC beams
(RC梁の荷重－たわみ関係)

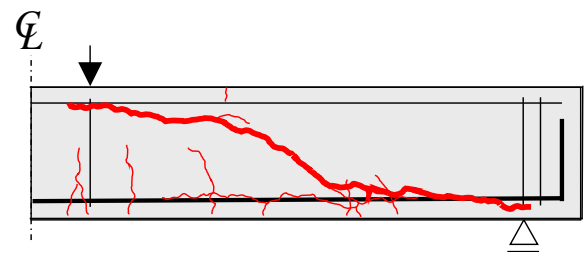
(4) ひび割れ発生状況

Fig. 6(a), (b)および(c)は, OPC, BSCおよびFACを用いたRC梁の載荷後のひび割れ図をそれぞれ示したものである. いずれの結合材を用いた場合にも, 赤色の太線で示すように斜めひび割れを形成した直後に破壊に至った(斜め引張破壊). なお, 載荷で生じたRC梁のひび割れを赤色の実線で, 養生中に生じたひび割れを青色の実線で示しており, BSCを用いたRC梁ではコンクリートの収縮の拘束に起因して梁下縁に生じる初期ひび割れが載荷前に確認された. 一方, FACを用いたRC梁の場合では, OPCを用いたRC梁の場合と同様に, コンクリートの収縮の拘束に起因するような梁下縁のひび割れは確認されなかった.

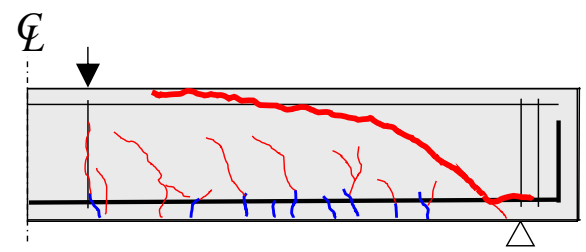
4. 考 察

混合セメントB種の上限值まで混合材分量を増加させた場合, RC梁のせん断耐力に与える影響は混合材の種類によって異なることがわかった. 具体的には, 同一の圧縮強度となるコンクリートをせん断補強筋がないRC梁に用いたときのせん断耐力は, 普通ポルトランドセメントの場合とくらべて, 高炉スラグ分量を60%とした高炉セメントの場合に1割ほど低下し, フライアッシュ分量を20%としたフライアッシュセメントの場合にはほぼ同等であった. これは高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは収縮が増加しやすく, フライアッシュを用いたコンクリートは収縮が変化しにくいことが主因と考える.

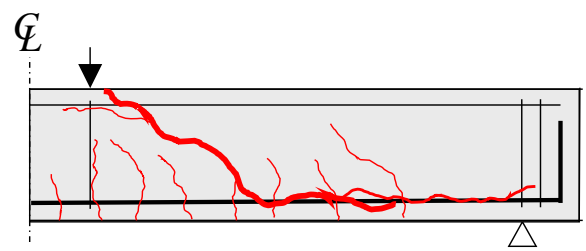
Fig. 7は, せん断補強筋がないRC梁のせん断耐力と a/d の関係を説明したものである. 図中には, スレンダービームのせん断耐力式(以下, SB式)⁴⁾で求めた曲線($V_{c,SB}$)ならびにディープビームのせん断耐力式(以下, DB式)⁵⁾で求めた曲線($V_{c,DB}$)をそれぞれ模式的に併記しており, せん断耐力はそれぞれの曲線のうちで大きい方の値で評価される. 高炉セメントを用いることで, $V_{c,SB}$ を示す曲線は鉛直下方向へ移動し, 2曲線の交点となる a/d は増加する. そのため, 高炉セメントを用いた場合には, 普通セメントやフライアッシュセメントを用いた場合にくらべて大きな a/d でアーチ機構から梁機構に移行することになる. すなわち, 高炉スラグ分量が多い高炉セメントをRC梁に用いる場合には, アーチ機構にもとづくDB式と梁機構にもとづくSB式がそれぞれ適用できる a/d の範囲はその他のセメントを用いる場合とは異なっているため, その設計に当たっては各式の選択に留意が必要となる.



(a) RC beam using OPC
(OPC を用いた RC 梁)



(b) RC beam using BSC
(BSC を用いた RC 梁)



(c) RC beam using FAC
(FAC を用いた RC 梁)

Fig. 6 Crack pattern of RC beams after loading test
(載荷試験後のRC梁のひび割れ図)

5. まとめ

本研究では, 混合材分量をB種の上限值まで増加させた高炉セメント(BSC)ならびにフライアッシュセメント(FAC)を用いたRC梁のせん断耐力について, 普通セメント(OPC)を用いたRC梁の場合と比較評価した. その結果をまとめると以下のとおりである.

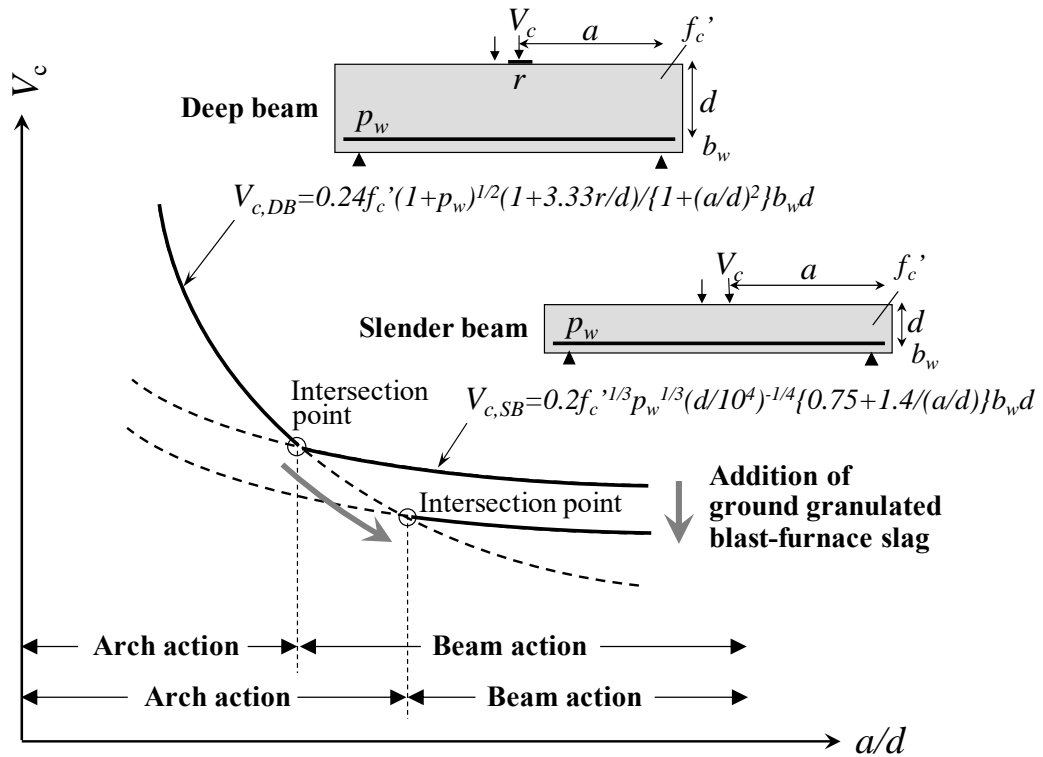


Fig. 7 Shear capacity mechanism - a/d relationship of RC beams
(RC梁のせん断耐荷機構と a/d の関係)

参考文献

- (1) W/B=48%でOPCを用いたコンクリートに対し、W/BをBSCの場合に35%、FACの場合に42%と小さくすることで、材齢28dの気中における圧縮強度はセメント種類によらず45N/mm²程度でほぼ同一となった。
- (2) BSCを用いたRC梁では、養生中にコンクリートの収縮が増大し、せん断耐力が低下した。
- (3) FACを用いたRC梁では、養生中にコンクリートの収縮が増大せず、せん断耐力は低下しなかった。
- (4) BSCを用いたRC梁では、OPCやFACを用いたRC梁にくらべて、アーチ機構から梁機構に移行するときの a/d が大きくなる。
- 1) 日本建築学会. 高炉セメントまたは高炉スラグ微粉末を用いた鉄筋コンクリート造建築物の設計・施工指針(案)・同解説. 2017.
- 2) 土木学会. 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの設計・施工指針(コンクリートライブラリー151). 2018.
- 3) 土木学会. 混和材を大量に使用したコンクリート構造物の設計・施工指針(案)(コンクリートライブラリー152). 2018.
- 4) 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. 1986, 372(V-5), p. 167-176.
- 5) 二羽淳一郎. FEM解析に基づくディープビームのせん断耐荷力算定式. 第2回RC構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集. 1983, p. 119-128.