

## 高炉スラグ微粉末を多量に使用したRCはりのせん断特性

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

Abstract : Recently, many studies have been conducted on the utilization of concrete containing high volume of mineral admixtures such as blast furnace slag (BFS), from the view of carbon-dioxide reduction. In this study we investigated the effect of high volume of BFS to the shear resistance of RC structures, based on the results of loading tests carried out on twelve RC beams. The important findings in this study were follows; (1) compressive strength of concrete containing BFS was smaller than that of normal concrete, while shrinkage strain was higher, (2) shear failure of RC beams was classified into three modes, and crack patterns and load-displacement relationships varied depending on the failure modes, (3) diagonal crack capacity of RC beams decreased by the use of BFS, and previous equation might overestimate the diagonal crack capacity of RC beams containing high volume of BFS.

Key words : Blast furnace slag, Shear capacity, RC beam, Shrinkage strain

## 1. はじめに

セメントは製造過程で多くの CO<sub>2</sub> を排出し、その大部分は焼成工程における熱エネルギー生成と石灰石の熱分解 (CaCO<sub>3</sub>→CaO+CO<sub>2</sub>↑) に由来する。このため最近では温室効果ガス削減の観点から、高炉スラグ微粉末などの混和材を多量に (具体的には JIS の高炉セメント C 種相当以上) 使用したコンクリートの研究が活発化している。一方で、セメントは製造時に多量の廃棄物を原料や燃料の代替品として受け入れており、コンクリートの使用材料が環境に与える影響の判断には留意が必要である。また、これらのコンクリートに関する既往研究の多くはコンクリート単体の強度や収縮といった材料レベルでの検討に留まっており、製品や部材に適用した際の構造特性に関する知見は少ないのが現状である。そこで本研究では、高炉スラグ微粉末を 60%以上使用したコンクリートを用いて鉄筋コンクリート (以下、RC) はり供試体を作製し、載荷実験によってせん断性状を検討した。

## 2. 実験概要

### 2. 1 実験ケース

本検討では、RCはりのせん断性状を載荷実験によって検討した。実験パラメータは、1) 高炉スラグ微粉末の置換率、2) 水結合材比、3) 養生条件、4) 実験材齢とし、全12水準の実験を行った。表-1に実験ケースを示す。

いずれの水準もコンクリートの打込み後は材齢1日で脱型を行ったのち、材齢7日まで湿布を用いて湿潤養生を行った。材齢7日から載荷実験日までの養生条件を変動させ、No.1,3,5,7,9の供試体は材齢7日からも継続して湿潤養生を行った。一方、No.2,4,6,8,10,11,12の供試体は材齢7日から気中養生を行った。養生は、室温20℃、R.H.60%の実験室にて行った。

### 2. 2 コンクリートの材料および配合

使用材料を表-2に、コンクリートの配合を表-3に示す。コンクリートの配合は、高強度コンクリ

表-1 実験ケース

No.	水準名	W/B (%)	BS/B (%)	材齢7日からの養生条件	実験材齢 (日)	
1	OPCH-Wet-28	30%	0%	湿潤養生	28	
2	OPCH-Dry-28			気中養生	28	
3	OPCH-Wet-91			湿潤養生	91	
4	OPCH-Dry-91			気中養生	91	
5	BFSH-Wet-28		60%	湿潤養生	28	
6	BFSH-Dry-28			気中養生	28	
7	BFSH-Wet-91			湿潤養生	91	
8	BFSH-Dry-91			気中養生	91	
9	BFS'H-Wet-28		70%	湿潤養生	28	
10	BFS'H-Dry-28			気中養生	28	
11	OPCN-Dry-28		55%	0%	気中養生	28
12	BFSN-Dry-28			60%	気中養生	28

B : 粉体量 (C+BS), W/B : 水結合材比,

BS/B : 高炉スラグ微粉末置換率,

表-2 使用材料

名称	記号	物性など
水	W	上水道水
普通ポルトランドセメント	C	密度 : 3.16g/cm <sup>3</sup> , 比表面積 : 3150cm <sup>2</sup>
高炉スラグ微粉末	BS	密度 : 2.91g/cm <sup>3</sup> , 比表面積 : 6450cm <sup>2</sup> /g
山砂	S	表乾密度 : 2.55g/cm <sup>3</sup> , 粗粒率 : 2.59
碎石	G	表乾密度 : 2.63g/cm <sup>3</sup> , 最大粒径 : 20mm
高性能 AE 減水剤	SP	ポリカルボン酸系
AE 減水剤	AE	リグニンスルホン酸系
消泡剤	DF	ポリアルキレングリコール誘導体

表-3 コンクリート配合

配合	W/B (%)	BS/B (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					混和剤量 (B×%)		
			W	C	BS	S	G	SP	AE	DF
OPCH	30	0	170	567	-	734	894	1.10	-	0.002
BFSH		60	170	227	340	711	894	0.75	-	0.006
BFS'H		70	170	170	397	707	894	0.65	-	0.006
OPCN	55	0	170	309	-	872	967	-	0.32	0.014
BFSN		60	170	124	185	860	967	-	0.26	0.020

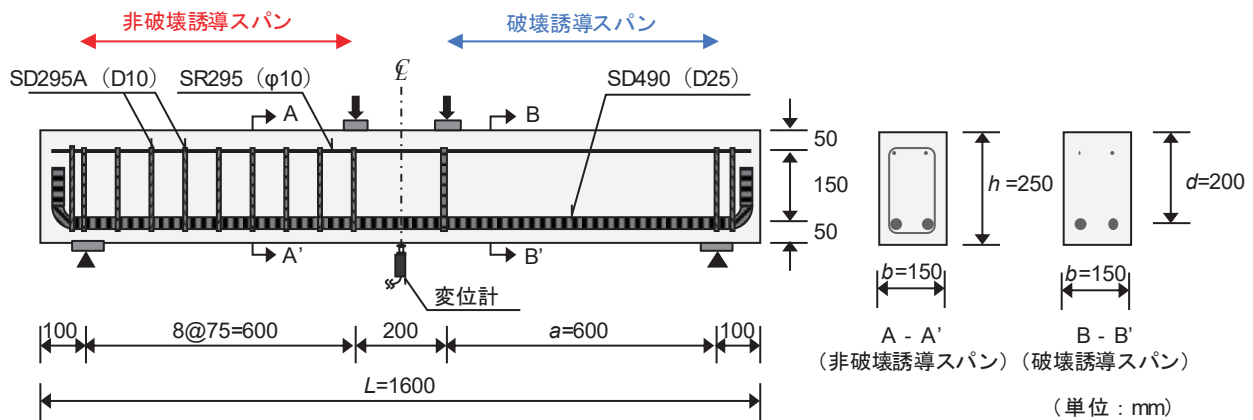


図-1 RCはり供試体

一と普通強度コンクリートにおける影響を検討するために水結合材比は30%と55%の2水準を設定し、高炉スラグ微粉末の置換率は0%,60%,70%の3水準をそれぞれ設定した。混和剤の使用によってスランプを16±2.5cm, 空気量を2.5±1.5%の範囲内に調整した。

### 2. 3 コンクリートの材料実験

コンクリートの材料実験項目は、圧縮強度 (JIS A 1108準拠), 割裂引張強度 (JIS A 1113準拠) および収縮ひずみとした。収縮ひずみの測定には100×100×400mm供試体の中心部に設置した埋込みひずみゲージ (弾性係数40N/mm<sup>2</sup>, 標点距離100mm) を用いて測定した。測定は凝結の始発に達した時点から開始した。

### 2. 4 RCはりの載荷実験

図-1にRCはり供試体の概要を示す。載荷実験に使用した供試体は、せん断スパン有効高さ比 $a/d=3.0$ , 全長1600mm, 断面幅150mm, 高さ250mmのRCはりとした。主鉄筋には異形鉄筋SD490 (D25)

を、組み立て鉄筋にはSR295 ( $\phi 10$ ) を、せん断補強鉄筋にはSD295A (D10) をそれぞれ使用した。また、片側のスパン (非破壊誘導スパン) のみにせん断補強鉄筋を配置することで、反対側スパン (破壊誘導スパン) でのせん断破壊を誘導した。載荷実験は、油圧式2000kN耐圧機を用いて静的4点曲げ載荷とした。

### 3. 実験結果

#### 3. 1 コンクリートの材料特性

##### (1) 力学特性

載荷実験時のコンクリート圧縮強度 ( $f'_c$ )、割裂引張強度 ( $f_t$ ) を表-4に示す。また、圧縮強度発現履歴の一例を図-2に示す。コンクリートの圧縮強度は、いずれの条件においても高炉スラグ微粉末の置換率に伴い低下した。水結合材比が30%の場合、材齢28日の強度は高炉スラグ微粉末の置換率を60%としたBFSHではOPCHと比較して16~19%ほど、置換率を70%としたBFS'Hでは36~40%ほど小さい結果となった。BFSHでは湿潤養生を行うことによってOPCHとの差は材齢に伴い縮小するものの、材齢91日においてもなおOPCHより6%ほど圧縮強度は下回った。また、気中養生を行う場合は材齢28日から材齢91日にかけての強度増進は湿潤養生の場合と比較して低下した。高炉スラグ微粉末の潜在水硬性により、湿潤養生条件では長期強度が顕著に増進するものの、水結合材比が同一の場合には普通ポルトランドセメントを使用した場合の方が圧縮強度は上回る傾向を確認した。また、水結合材比55%の場合においても、BFSNはOPCNと比較して17%ほど強度は小さくなった。

割裂引張強度は、圧縮強度に比較して養生条件による影響が顕著になった。たとえば、BFSH-Wet-28とBFSH-Dry-28を比較すると、圧縮強度の差は6%ほどだったのに対して、割裂引張強度は気中養生によって16%ほど低下した。以上より、コンクリートの配合や圧縮強度が同程度であっても、割裂引張強度は湿度の影響を受けて気中養生条件では低下することが明らかになった。

##### (2) 収縮特性

載荷実験時におけるコンクリートの収縮ひずみ $\epsilon_c$ を表-4に示す。コンクリート配合が同一であれば

表-4 実験結果

供試体	W/B (%)	BS/B (%)	コンクリート物性			裁荷実験結果					
			$f'_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\epsilon_c$ ( $\times 10^{-6}$ )	$V_c$ (kN)	$V_{cal}$ (kN)	$V_c/V_{cal}$	$V_{max}$ (kN)	破壊形態	
OPCH-Wet-28	30	0	94.7	6.40	-137	65.6	74.7	0.88	110.9	せん断圧縮	
OPCH-Dry-28			92.1	5.54	-564	75.8	74.0	1.02	76.8	遷移型	
OPCH-Wet-91			101	6.46	-145	65.5	76.3	0.86	88.2	遷移型	
OPCH-Dry-91			93.7	5.50	-742	62.0	74.4	0.83	62.0	斜め引張	
BFSH-Wet-28		60	79.6	5.90	-379	59.3	70.4	0.84	65.3	遷移型	
BFSH-Dry-28			74.8	4.96	-656	55.8	69.0	0.81	70.2	遷移型	
BFSH-Wet-91			95.4	6.20	-325	63.7	74.9	0.85	94.2	せん断圧縮	
BFSH-Dry-91			84.4	5.80	-736	55.0	71.9	0.76	55.0	斜め引張	
BFS'H-Wet-28		70	60.5	4.24	-188	49.5	64.3	0.77	53.0	遷移型	
BFS'H-Dry-28			55.4	4.13	-547	55.0	62.5	0.88	74.7	せん断圧縮	
OPCN-Dry-28		55	0	38.5	3.51	-389	58.3	55.3	1.05	92.6	遷移型
BFSN-Dry-28			60	32.0	3.13	-421	46.7	52.0	0.90	75.1	遷移型

BS/B: 高炉スラグ微粉末置換率 (質量比),  $f'_c$ : 圧縮強度,  $f_t$ : 割裂引張強度,  $\epsilon_c$ : 載荷実験直前の収縮ひずみ,

$V_c$ : 斜めひび割れ耐力の実験値,  $V_{cal}$ : 斜めひび割れ耐力の計算値<sup>1)</sup>,  $V_{max}$ : せん断耐力の実験値

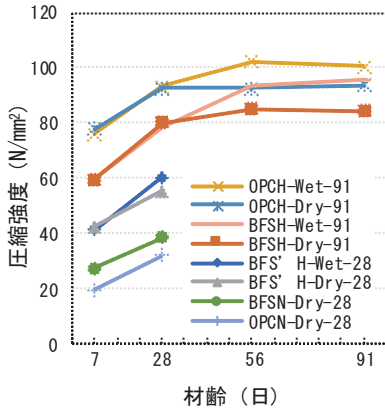


図-2 強度発現履歴 (抜粋)

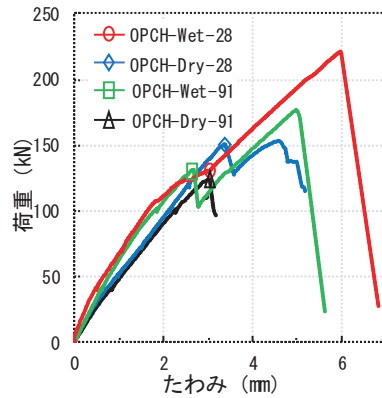


図-3 荷重-たわみ関係 (OPCH)

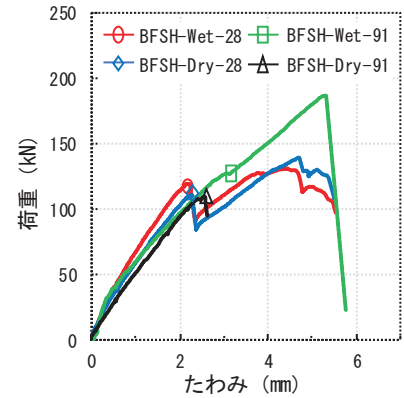
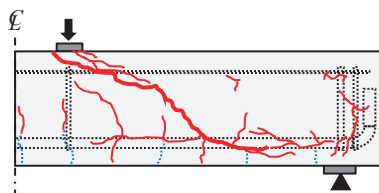
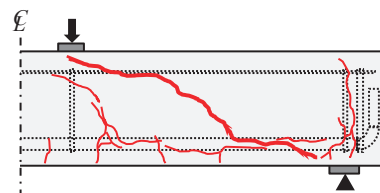


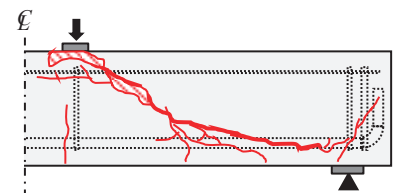
図-4 荷重-たわみ関係 (BFSH)



(a) BFSH-Dry-91 (斜め引張破壊)



(b) BFSH-Wet-28 (遷移型破壊)



(c) BFSH-Wet-91 (せん断圧縮破壊)

図-5 ひび割れ性状の比較

(青点線：載荷前に生じていたひび割れ，赤実線：載荷によるひび割れ，赤斜線部：圧壊部)

気中養生条件の方が収縮ひずみは大きくなり、これは乾燥収縮による影響が顕著になったためである。湿潤養生、気中養生いずれの条件においてもコンクリートのひずみは高炉スラグ微粉末の添加により増加する傾向を示し、コンクリート配合ではBFSHが最大のひずみを示した。高炉スラグ微粉末の置換率を70%としたBFS'HではBFSHよりもひずみが小さくなり、収縮ひずみが最大となる置換率が存在することが示唆された。

### 3.2 RCはりのせん断性状

#### (1) 載荷実験結果概要

載荷実験結果の概要を表-4に示す。いずれの供試体も破壊誘導スパンにおいて斜めひび割れが発生し、主鉄筋の降伏前に最大荷重を迎えてせん断破壊した。本検討において、最大荷重に至るまでの破壊形態は以下の3つに分類された。1) 斜め引張破壊：斜めひび割れの発生と同時に破壊に至る、2) 遷移型破壊：斜めひび割れの発生後も即座に破壊には至らず更なる荷重に抵抗するものの、最終的には斜めひび割れの開口により破壊に至る、3) せん断圧縮破壊：斜めひび割れの発生後も即座に破壊には至らず、最大荷重において載荷点近傍のコンクリート圧壊とともに破壊に至る。

ここで、水結合材比が30%のOPCHとBFSHにおけるRCはりの荷重-たわみ関係をそれぞれ図-3と図-4に、破壊形態別の荷重-ひび割れ関係の一例を図-5に示す。図-5(a)中の青点線で示すように、BFSH-Dry-91、BFSH-Dry-28およびOPCH-Dry-91の3体では載荷実験前にひび割れが発生しており、これは気中養生により乾燥収縮が長期材齢にわたって進行し、なおかつ気中養生条件においては割裂引張強度が低下したためと考えられる。いずれの破壊形態でも曲げひび割れから発展する形で斜めひび割れが発生し、斜め引張破壊ではこのひび割れが即座に上縁まで貫通して耐荷力を喪失する脆性的な破壊形態を示した。遷移型破壊およびせん断圧縮破壊では斜めひび割れ発生後も荷重が一旦低下する場合はあるものの、即座に耐荷力を完全に失うことはなく、載荷を続行すると荷重は再び増加した。このとき、斜めひび割れは組み立て鉄筋の近傍で停滞しており、斜めひび割れ先端より上方の圧縮域



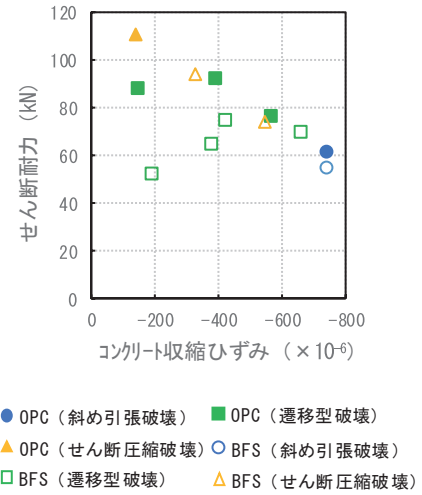
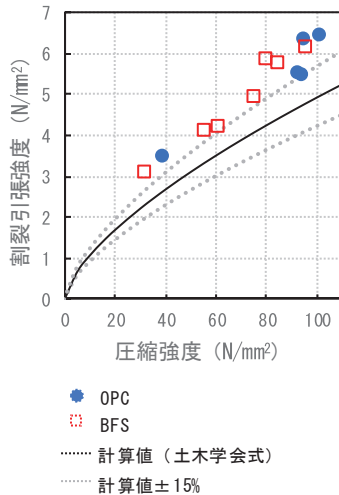
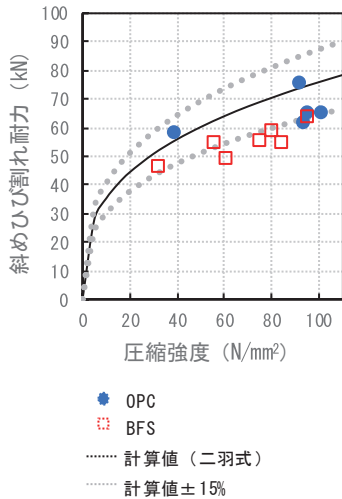


図-6 圧縮強度と斜めひび割れ耐力の関係

図-7 圧縮強度と割裂引張強度の関係

図-8 コンクリートの収縮ひずみとせん断耐力の関係

コンクリートの抵抗が保持されたものと考えられる。最終的には、遷移型破壊では斜めひび割れの開口により、せん断圧縮破壊ではコンクリートの圧壊により破壊に至った。RCはりのせん断耐力は破壊形態によって大きく変化し、これは後述するように養生条件や高炉スラグ微粉末の使用によりコンクリートの収縮ひずみが影響したものと考えられる。

(2) 斜めひび割れ耐力への影響

表-4より斜めひび割れ耐力 $V_c$ をコンクリート種類で比較すると、養生条件および材齢が同一であれば、斜めひび割れ耐力は高炉スラグ微粉末の添加により低下し、その低下率は3~37%の範囲であった。これには第一にコンクリート強度の差による影響が考えられるので、斜めひび割れ耐力の実験値と計算値の比 $V_c/V_{cal}$ を表-4に示す。計算には二羽ら<sup>1)</sup>の提案している式(1)を使用し、せん断補強鉄筋を配置しない破壊誘導スパンを対象に、式(1)によって計算した。

$$V_{cal} = 0.2f_c^{1/3}p_w^{1/3}\left(\frac{d}{1000}\right)^{-1/4}\left(0.75 + \frac{1.4}{a/d}\right)b_wd \quad (1)$$

ここに、 $f_c$ : コンクリートの圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>) ,  $p_w$ : 主鉄筋比 (%) ,  $d$ : 有効高さ (mm) ,  $a$ : せん断スパン (mm) ,  $b_w$ : ウェブ幅 (mm)

式(1)は普通強度のコンクリートを対象としているが、本検討においては骨材のかみ合わせ抵抗の減少など<sup>2)</sup>によるコンクリートの高強度化によるせん断強度への影響は一律であると仮定し、式(1)による計算を行い、実験値との比の大小関係を比較した。実験値と計算値の比 $V_c/V_{cal}$ は高炉スラグ微粉末の添加により減少する傾向を示し、圧縮強度による差を補正してもなお、斜めひび割れ耐力が低下する可能性が示唆された。ここで、コンクリートの圧縮強度と斜めひび割れ耐力の関係を図-6に示す。図中では高炉スラグ微粉末を使用しない配合は「OPC」と表記して○印のプロットで、高炉スラグ微粉末を使用した配合は置換率に関わらず「BFS」と表記して□印のプロットで示している。また、参考のため式(1)による計算値を併記している。図から明らかなように、実験値は概ね計算値を下回る傾向があり、とくに圧縮強度が60N/mm<sup>2</sup>以上の領域において顕著である。これは式(1)が普通強度のコンクリートを対象にしていることが一因であり、OPCよりも圧縮強度の低いBFSでは計算値との差も小さくなるものと考えられる。しかしながら載荷実験の結果、斜めひび割れ耐力との計算値との差はOPCよりもBFSで顕著であり、とくに圧縮強度が60N/mm<sup>2</sup>以上の領域においてBFSでは計算値を15%以上低下する傾向を示した。このことから、高強度コンクリートにおいてBFSはOPCよりも斜め

ひび割れ耐力が低下し、OPCと同様に設計を行うことはRC部材の斜めひび割れ耐力を危険側に評価し得ると考えられる。

斜めひび割れは、RCはりに発生する主引張応力がコンクリートの引張強度に達した際に発生するものと考えられる。ここで、コンクリートの圧縮強度と割裂引張強度の関係を図-7に示す。配合の表記は図-6と同様であり、図には土木学会が提案している予測式<sup>3)</sup>の計算結果を併記している。計算には以下の式(2)を使用した。

$$f_{tcal} = 0.23f'_c{}^{2/3} \quad (2)$$

ここに、 $f_{tcal}$ :コンクリートの割裂引張強度の計算値(N/mm<sup>2</sup>)、 $f'_c$ :コンクリートの圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)

実験値は計算値を概ね15%ほど上回る結果となり、配合による顕著な差は確認されなかった。これより、高炉スラグ微粉末の添加による斜めひび割れ耐力の低下はコンクリートの圧縮強度や割裂引張強度以外の要因も影響していると考えられる。これはコンクリートの収縮ひずみやクリープなどの特性が複合的に影響しているものと考えられ、そのメカニズムについては今後の課題としたい。

### (3) 破壊形態への影響

コンクリートの収縮ひずみとせん断耐力の関係を、図-8に示す。なお、せん断耐力は載荷実験における最大荷重の50%に相当する。コンクリートの収縮ひずみが増加するに従いせん断耐力が減少する傾向を示し、同時に破壊形態がせん断圧縮破壊から斜め引張破壊に変化している。コンクリートに収縮が生じると、内部鉄筋等の拘束力としてコンクリートに引張応力が発生し、ひび割れ幅が増大する<sup>2)</sup>と考えられる。その結果、斜めひび割れが上縁近くまで進展し圧縮部コンクリートの抵抗が減少することで破壊形態がせん断圧縮破壊から斜め引張破壊に変化したものと考えられる。これにより、RCはりの破壊形態にはコンクリートの収縮ひずみが影響し、収縮ひずみが過大となり斜め引張破壊を引き起こす場合にせん断耐力はもっとも低下するものと考えられる。また、破壊形態が同一の場合にもせん断耐力は高炉スラグ微粉末を添加した場合に低下する傾向を示し、これは高炉スラグ微粉末の使用により斜めひび割れ耐力やコンクリート強度が低下した影響によるものと考えられる。

## 4. まとめ

本検討で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 水結合材比30%の高強度コンクリート、水結合材比55%の普通強度コンクリートにおいて、養生条件や材齢が同一であればコンクリートの圧縮強度は高炉スラグ微粉末を使用した場合に低下する。同時に、コンクリートの収縮ひずみは増加し、置換率60%で最大のひずみを示した。
- (2) せん断スパン有効高さ比3.0のRCはりにおいても、破壊形態は斜め引張破壊とせん断圧縮破壊および両者の遷移型の破壊に分類され、これには配合や養生条件によるコンクリートの収縮ひずみが影響しているものと考えられる。
- (3) 斜めひび割れ耐力は高炉スラグ微粉末を使用した際に低下し、とくに圧縮強度60N/mm<sup>2</sup>以上の高強度コンクリートにおいて顕著であった。既往の算定式を用いると計算値を15%以上下回る傾向を示し、これはコンクリートの強度低下や収縮ひずみの増加などの物性変化が複合的に影響していると考えられる。

## 参考文献

- 1) 二羽淳一郎, 山田一宇, 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, V-5, 第 372, pp.167~176, 1986
- 2) 河金甲, 佐藤良一: 高強度 RC はりの斜めひび割れ発生強度に及ぼす収縮の影響評価, 土木学会論文集 E, Vol.65, No.2, pp.178-197, 2009
- 3) 土木学会: コンクリート標準示方書【設計編】, pp.34-36, 2012