

# 論文 高炉スラグ細骨材を用いたはり部材の曲げおよび版部材の押抜きせん断載荷実験

俵 道和\*1・杉田 篤彦\*2・二井谷 教治\*3

**要旨：**細骨材として高炉スラグ細骨材を 100%使用したコンクリートを用いてはり部材および版部材を製作し、曲げ試験および押抜きせん断試験を行った。その結果、細骨材として高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートは、砕砂を用いたコンクリートと同様に示方書に示される計算式を用いてはり部材の曲げ耐力および版部材の押抜きせん断耐力を評価できることが確認された。また、引抜き試験による鉄筋とコンクリートとの付着強度を確認したところ、高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートは砕砂を用いたコンクリートと同等以上の性能が確認された。

**キーワード：**高炉スラグ細骨材, 付着強度, 曲げ試験, 押抜きせん断試験

## 1. はじめに

近年、コンクリート用天然骨材の枯渇化に伴い、良質な細骨材の入手が困難な状況であり、天然資源の保全や省エネルギーの観点からも高炉スラグ細骨材(以下、BFS)をコンクリート用細骨材としての活用が注目されている。BFSのコンクリート用細骨材としての利用については以前から検討が行われており、圧縮強度は同一水セメント比で比較すると初期材齢では若干低い、長期材齢では同等以上になることや、乾燥収縮はやや小さくなることや、中性化速度は同等以下、塩化物イオン浸透抵抗性や凍結融解抵抗性は向上<sup>2)</sup>することなどが報告されている。

しかしながら、これまで水セメント比が40~50%で高炉スラグ細骨材を細骨材の30~70%程度混合したコンクリートの耐久性などについて多く検討されているが、高炉スラグ細骨材をコンクリート用細骨材として100%使用し、プレストレストコンクリートへの適用を想定したコンクリートに関して、鉄筋コンクリート部材として曲げ耐力や押抜きせん断耐力について検討を行った知見は得られていないのが現状である。

そこで、本試験では細骨材としてBFSまたは砕砂を100%使用した配合を用いて、鉄筋とコンクリートとの付着強度試験を行い、BFSまたは砕砂を用いた場合の鉄筋とコンクリートとの付着強度について評価を行った。さらに、はり部材および版部材を製作し静的な曲げ試験および押抜きせん断試験を行い、曲げ耐力および押抜きせん断耐力について、BFSを用いた場合について砕砂を用いた場合と同程度の曲げ耐力や押抜きせん断耐力が得られるか、また、示方書などに示される計算式で曲げ耐力や押抜きせん断耐力を評価できるかについて検討を行った。

## 2. 使用材料

本試験で使用した使用材料を表-1に示す。プレストレストコンクリートへの適用を想定してセメント種類は早強ポルトランドセメントを選定した。細骨材は、茨城県桜川市大泉産で岩種が硬質砂岩の砕砂を選定した。高炉スラグ細骨材は、JIS A 5011-1コンクリート用スラグ骨材 第1部：高炉スラグ細骨材に適合し、倉敷の製鉄所で製造されたBFS1.2を使用した。表-2に砕砂およびBFSの品質を示す。混和剤は、砕砂の配合には、ポリカルボン酸系の高性能AE減水剤を用い、空気量調整剤としてAE剤を用いた。BFSの配合には、ポリカルボン酸エーテル系化合物と増粘性高分子化合物を複合した増粘剤一液タイプの高性能減水剤を用い、空気量調整剤としてAE剤と消泡剤を使用した。

表-1 使用材料

材料名	記号	種類・産地および物性値
セメント	C	早強ポルトランドセメント 密度:3.13g/cm <sup>3</sup>
細骨材	砕砂	茨城県桜川市大泉産 表乾密度:2.66 g/cm <sup>3</sup>
	高炉スラグ	BFS 倉敷製鉄所産 表乾密度:2.73 g/cm <sup>3</sup>
粗骨材	G	茨城県桜川市大泉産 表乾密度:2.65 g/cm <sup>3</sup>
化学混和剤	SP	高性能 AE 減水剤, 高性能減水剤
空気量調整剤	-	AE 剤, 消泡剤

\*1 オリエンタル白石株式会社 技術研究所主任研究員 工修(工学) (正会員)

\*2 オリエンタル白石株式会社 本社技術部情報システムチーム 博士(環境学) (正会員)

\*3 オリエンタル白石株式会社 技術研究所所長 博士(環境学) (正会員)

表-2 砕砂および BFS の品質

試験項目	細骨材種類		試験方法
	砕砂	BFS	
絶乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	2.63	2.72	JIS A 1109
表乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	2.66	2.73	JIS A 1109
吸水率 (%)	1.06	0.23	JIS A 1109
単位容積質量 (kg/L)	1.44	1.57	JIS A 1104
微粒分量 (%)	3.0	4.1	JIS A 1103
粗粒率	2.75	2.12	JIS A 1102
貯蔵の安定性	—	A	JIS A 5011-1 附属書 B

表-3 コンクリートの配合

配合名	W/C (%)	空気量 (%)	s/a (%)	単用量 (kg/m <sup>3</sup> )							
				W	G	S	BFS	G	SP	AE 剤	消泡剤
砕砂	45.0	4.5	45.5	155	344	835	—	996	2.93	0.014	—
BFS	41.6	4.5	44.0	160	385	—	807	997	3.08	0.077	0.077

### 3. コンクリートの配合

コンクリートの配合を表-3 に示す。コンクリートの目標スランプは 8cm、目標空気量は 4.5%とした。水セメント比については、材齢約 14 日で 55N/mm<sup>2</sup> が得られるように細骨材の種類ごとに水セメント比を設定した。砕砂を用いた配合については AE 剤のみを用いた空気量の調整を行った。BFS を用いた配合については、コンクリートの練混ぜ時の巻込みによる空気量の増加が確認されたために、消泡剤と AE 剤を用いて空気量の調整を行った。

### 4. 試験方法

#### 4.1 鉄筋とコンクリートとの付着強度試験

引抜き試験による鉄筋とコンクリートとの付着強度試験体の形状寸法を図-1 に示す。試験方法は、土木学会規準「引抜き試験による鉄筋とコンクリートとの付着強度試験方法 (案)」(JSCE-G 503-2013)<sup>3)</sup> に準拠して行った。鉄筋の呼び名は D25 とし、試験体形状は 150×150×150mm とした。また、試験時の目標強度は、曲げ試験および押抜きせん断試験と同様に 55N/mm<sup>2</sup> とした。

#### 4.2 はり部材の曲げ試験

曲げ試験体の形状寸法と鋼材配置を図-2 に示す。試験体寸法は、桁長 3m、軸方向断面 250×350mm の矩形断面とした。鋼材配置は、引張鉄筋として SD345 の D19 を 4 本配置し、スターラップとして SD295 の D10 を 100mm 間隔で配置した。載荷方法は等曲げモーメント区間 500mm、スパン 2400mm、せん断スパン 950mm の 2 点集中載荷とした。載荷方法は、試験体のなじみをとるために 20kN まで載荷し、ひび割れ発生荷重として 70kN、

さらに 100kN、150kN で漸増繰り返し載荷を行った後に破壊荷重まで載荷を行った。測定項目は、載荷荷重、中央の変位、引張鉄筋およびスターラップの鉄筋ひずみ、試験体上縁のコンクリートひずみ、ひび割れ幅およびひび割れ本数の測定とした。

#### 4.3 版部材の押抜きせん断試験

押抜きせん断試験体の形状寸法と鋼材配置を図-3 に示す。試験体寸法は、1500mm×1500mm×厚さ 170mm の平板とした。鋼材配置は、150mm の間隔で SD345 の D19 を上下に配置し、直角方向の上段に 85mm の間隔で SD345 の D19 を配置し、下段に 85mm の間隔で SD345 の D22 を配置した。載荷支持条件は 4 辺ともに単純支持とした。載荷方法は、版の中央部に 200×200mm の載荷板を設置し、試験体のなじみをとるために 20kN および最大荷重の 1/2 を想定した 300kN で漸増繰り返し載荷を行った後に破壊荷重まで載荷を行った。測定項目は、載荷荷重、版中央の変位、下縁鉄筋のひずみ、下縁コンクリートのひずみおよび破壊時のひび割れ性状とした。

### 5. 試験結果

#### 5.1 コンクリートの硬化特性

各載荷試験時のコンクリートの硬化特性値を表-4 に示す。曲げモーメントと軸方向力を受ける部材の破壊に対する照査等で耐力を算定する場合においてコンクリートの応力-ひずみ曲線は、コンクリート標準示方書 [設計編]<sup>4)</sup> に示される式(1)が用いられている。BFS を用いたコンクリートについてもコンクリート標準示方書に示される応力-ひずみ曲線式が適用できるか検討を行った。

表-4 荷重試験時のコンクリートの硬化特性値

試験項目	配合種類	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	割裂引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
付着強度試験	砕砂	55.4	33.6	—
	BFS	63.8	37.7	—
はりの曲げ試験	砕砂	48.2	30.6	3.29
	BFS	56.1	37.3	3.72
版の押抜きせん断試験	砕砂	51.0	32.9	3.74
	BFS	64.1	37.1	3.80

表-5 鉄筋とコンクリートとの付着強度の試験結果

コンクリート種類		砕砂	BFS
すべり量 0.002Dmm時	P <sub>0.002D</sub> (kN)	96.7	165.3
	τ <sub>0.002D</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	6.5	9.6
最大荷重時	P <sub>max</sub> (kN)	142.5	198.1
	τ <sub>max</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	9.5	11.5

$$\sigma'_c = k_1 f'_{ck} \times \frac{\epsilon'_c}{0.002} \times \left( 2 - \frac{\epsilon'_c}{0.002} \right) \quad (1)$$

ここに、 $k_1 = 1 - 0.003f'_{ck} < 0.85$

$f'_{ck}$  : コンクリートの圧縮強度

$\epsilon'_c$  : コンクリートの圧縮ひずみ

実強度で評価した際の応力-ひずみ曲線の実験値と計算値との比較を図-4に示す。実験値については、供試体3体の値を示す。その結果、砕砂およびBFSともに最大応力の約85%までのひずみと応力の関係はコンクリート標準示方書に示される計算値とほぼ一致することが確認された。また、最大応力時におけるひずみの実験値は、BFSのヤング係数が大きいため砕砂よりBFSの方が小さな値を示したと考えられる。

図-5に圧縮強度と引張強度およびヤング係数の関係を示す。同図に土木学会の圧縮強度と割裂引張強度およびヤング係数の関係式を示す。砕砂については、引張強度およびヤング係数ともに土木学会式と同等の傾向を示した。BFSの圧縮強度に対する引張強度の実験値は、土木学会の計算式より実験値が若干小さくなる傾向を示したが、ヤング係数は土木学会の計算式より実験値が若干大きくなる傾向が確認された。

### 5.2 鉄筋とコンクリートとの付着強度試験

コンクリート種類について、砕砂とBFSを用いた配合について鉄筋とコンクリートとの付着強度の比較を行った。測定項目として、すべり量0.002D(0.05mm)および最大荷重時の付着応力度について比較を行った。表-5に3体の平均値の結果を示す。BFSのすべり量0.002D(0.05mm)および最大荷重時の付着応力度は砕砂と同等

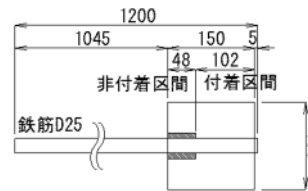


図-1 付着試験体形状図

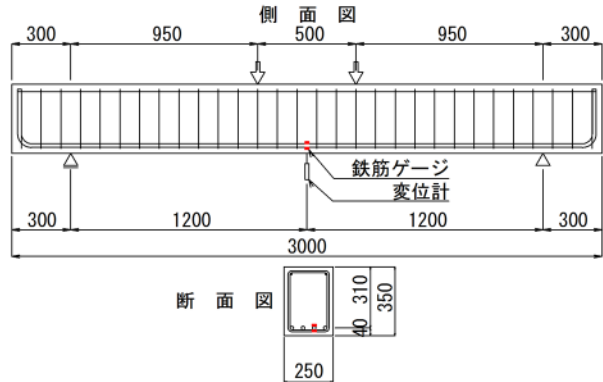


図-2 曲げ試験体形状図

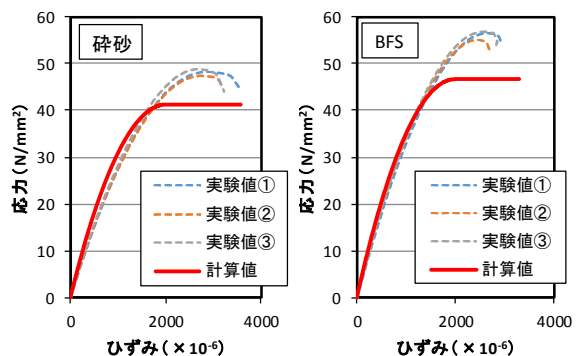
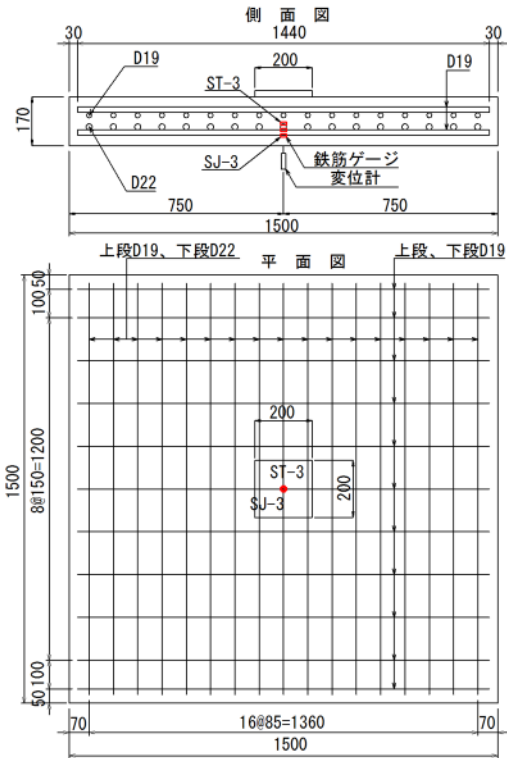


図-4 コンクリートの応力-ひずみ曲線の実験値と計算値の比較

以上であることが確認された。この原因は、BFSを用いたコンクリートは、水セメント比が大きいコンクリートについてブリーディング量が多くなることが報告されているが<sup>5)</sup>、本試験で使用した BFS コンクリートは、水セメント比が比較的小さく、増粘剤一液タイプの高性能減水剤を用いたためにブリーディングが抑えられ BFS を用いた場合も砕砂と同等以上の付着性能が得られたと考えられる。

### 5.3 はり部材の曲げ試験

図-6 にはり部材の支間中央変位と載荷荷重の関係を示す。砕砂および BFS ともに、荷重が約 270kN で引張鉄筋が降伏し変位が増加し、中央支間変位が約 15~17mm で上縁コンクリートが圧壊し曲げ破壊に至った。また、載荷荷重 70, 100 および 150kN で漸増繰り返し載荷を行ったが、砕砂および BFS ともに耐力が急激に低下するような現象は確認されなかった。BFS は、砕砂と比較しても十分な曲げ耐力を有していることが確認できた。

図-7 に支間中央部の引張鉄筋ひずみと載荷荷重の関係を示す。支間中央部の引張鉄筋ひずみは載荷直後から BFS の方が砕砂より若干小さくなる傾向を示した。この原因は、BFS が砕砂より鉄筋とコンクリートとの付着強度が高いために鉄筋のひずみが均一に分散されたためだと考えられる。また、中央支間変位と同様に漸増繰り返し載荷に対して鉄筋ひずみが急激に変化するなどの傾向は砕砂および BFS ともに確認されなかった。

図-8 にはり部材のひび割れ発生状況を示す。砕砂および BFS ともに曲げひび割れが均等に分散しておりひび割れ本数も同程度であり、はり部材として荷重を均等に受け持っていることが確認された。破壊性状は、砕砂および BFS ともに載荷荷重が増加するにつれて曲げひび割れ幅が増加し、最終的には引張鉄筋が降伏した後に上面のコンクリートが圧壊し曲げ破壊に至った。

左せん断区間、等曲げ区間、右せん断区間についてそれぞれ代表的なひび割れ 2 本についてクラックスケールを用いてひび割れ幅を測定した。ひび割れ幅は、引張鉄筋位置で測定した結果を示す。目視で確認した砕砂および BFS のひび割れ発生荷重は 70kN であり、ひび割れ発生荷重は同程度であることが確認された。表-4 に示す割裂引張強度は砕砂より BFS の方が大きな値を示したが、曲げひび割れ発生荷重は目視で確認したため誤差が生じたものと考えられる。また、荷重が 240kN 時点での 6 本のひび割れ幅の合計値は、砕砂が 0.32mm であり、BFS が 0.34mm でありほぼ同程度であることが確認された。

ひび割れ間隔算定式を用いて算出した計算値と実測値との比較を行った。ひび割れ間隔の算定式を式(2)に示す。

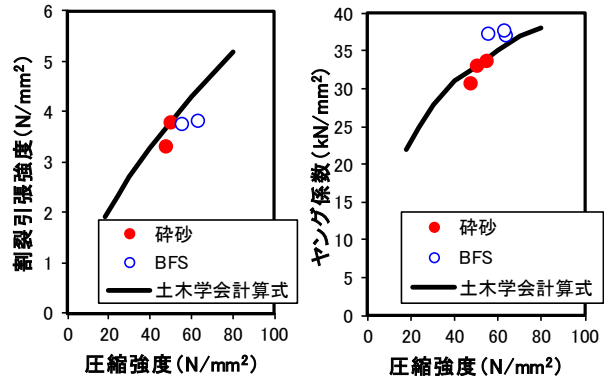


図-5 圧縮強度と引張強度およびヤング係数の関係

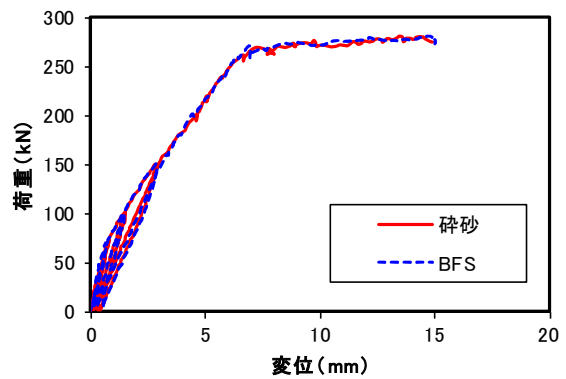


図-6 支間中央変位と載荷荷重の関係

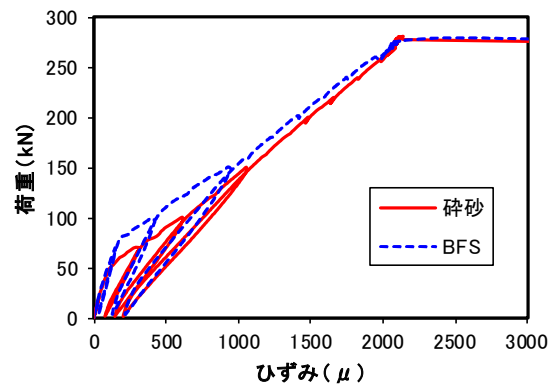


図-7 引張鉄筋ひずみと載荷荷重の関係

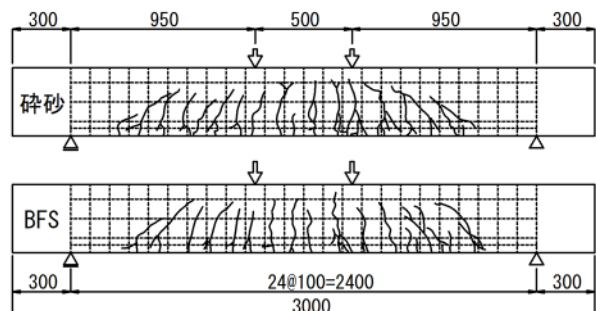


図-8 はり部材のひび割れ発生状況

$$l = 1.1 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot \{4c + 0.7(C_s - \varphi)\} \quad (2)$$

ここに、

$k_1$  : 異形鉄筋は 1.0, 丸鋼および PC 鋼材は 1.3

$k_2$  : コンクリートの品質がひび割れに及ぼす影響を表わす係数

$k_3$  : 引張鋼材の段数の影響を表わす係数

$c$  : かぶり (mm)

$C_s$  : 鋼材の中心間隔(mm)

$\varphi$  : 鋼材径 (mm)

ひび割れ間隔の計算値と実験値の比較を表-6 に示す。平均ひび割れ間隔の実測値は砕砂と BFS は同程度の値であり、砕砂および BFS とともに計算値より 20%程度小さくなる傾向が確認された。

曲げ耐力の計算値と実験値の比較を表-7 に示す。ひび割れ発生荷重の実験値は、試験体の下面に貼り付けたコンクリートひずみゲージの変化値から判定した値を示す。砕砂の終局荷重の実験値を計算値で除した値は 1.04 であり、BFS は 1.03 であった。応力-ひずみの関係については、式(1)で求められた計算値を用いており、応力の最大値について実験値より計算値が低い強度で算出しているために安全側に評価されたと考えられる。また、砕砂と同様に BFS を用いた場合も十分な曲げ耐力を有していることが確認された。

#### 5.4 押抜きせん断試験

図-9 に床版中央部のたわみと載荷荷重の関係を示す。砕砂および BFS とともに、荷重の増加とともに変位が増加し、砕砂は最大荷重 640kN で中央変位 5.1mm, BFS は最大荷重 697kN で中央変位 4.7mm を示した。最大荷重に達した後は荷重が急激に減少し押抜きせん断破壊に至った。最大荷重は砕砂が 640kN であり、BFS が 697kN であり、砕砂と同様に BFS を用いた場合も十分な押し抜きせん断耐力を有していることが確認された。

図-10 に下段 D19 の鉄筋ひずみと載荷荷重の関係を示し、図-11 に下段 D22 の鉄筋ひずみと載荷荷重の関係を示す。最下段の D19 鉄筋は降伏しており、D19 の上段の直角方向に配置した D22 鉄筋は降伏していないことが確認された。

図-12 に破壊時のひび割れ発生状況を示す。図中に示す破線はコンクリート中の鉄筋位置を示している。ひび割れ性状に関して砕砂と BFS で大きな違いは確認されなかった。砕砂および BFS とともに放射状に曲げひび割れが発生し、最終的に押し抜きせん断破壊に至った。砕砂および BFS とともに版の上面にひび割れの発生は確認されなかった。

押し抜きせん断耐力の計算値と実験値の比較を表-8 に

表-6 ひび割れ間隔の計算値と実験値の比較

	最小ひび割れ間隔 (mm)	最大ひび割れ間隔 (mm)	平均ひび割れ間隔 (mm)	ひび割れ間隔の算定値 (mm)
砕砂	57	152	116	147.6
BFS	62	165	116	144.0

表-7 曲げ耐力の計算値と実験値の比較

		計算値 (kN)	実験値 (kN)	実験値/計算値
砕砂	ひび割れ発生荷重	35.4	38.2	1.08
	終局荷重	271.1	281.0	1.04
BFS	ひび割れ発生荷重	40.0	43.3	1.08
	終局荷重	273.5	281.0	1.03

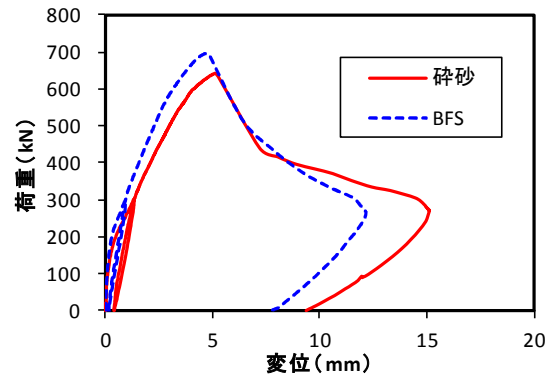


図-9 版部材の中央変位と載荷荷重の関係

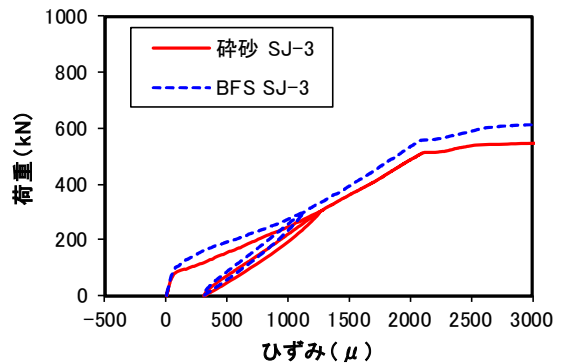


図-10 下段 D19 の鉄筋ひずみと載荷荷重の関係

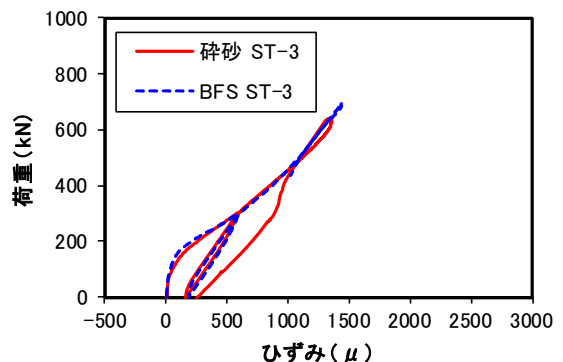


図-11 下段 D22 の鉄筋ひずみと載荷荷重の関係

示す。計算値は土木学会式<sup>6)</sup>および角田式<sup>7)</sup>について比較検討を行った。土木学会式を式(3)に示し、角田式を式(4)に示す。砕砂および BFS について、実験値を計算値で除した値に大きな違いは確認されず、同程度の値であることが確認された。土木学会式は安全率が考慮された計算式であり、角田式は実験式であり安全率が考慮されていないために角田式より土木学会式の方が安全側に評価されたと考えられる。

$$V_{pcd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_r \cdot f_{pcd} \cdot u_p \cdot d / \gamma_b \quad (3)$$

ここに、

$$f_{pcd} = 0.20 \sqrt{f'_c} \quad (\text{N/mm}^2)$$

$$\beta_d = 4 \sqrt{1000/d} \quad (d : \text{mm})$$

$$\beta_p = 3 \sqrt{100p_v}$$

$$\beta_\gamma = 1 + 1/(1 + 0.25u/d)$$

$f'_c$  : コンクリートの設計圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$u$  : 載荷面の周長

$u_p$  : 照査断面の周長で、載荷面から  $d/2$  離れた位置で算定するものとする

$d$  : 有効高さで、二方向の鉄筋に対する平均値とする

$p$  : 鉄筋比で、二方向の鉄筋に対する平均値とする

$\gamma_b$  : 部材係数

$$P = 0.674(b_0 + 3\pi d)d\sqrt{f'_c} \left\{ 1 + 0.5 \left( \frac{p f_y}{\sqrt{f'_c}} \right) \right\} / \left( 1 + \frac{d}{20} \right) \quad (4)$$

ここに、

$b_0$  : 載荷板周長 (cm)

$d$  : 有効高さ (cm)

$f'_c$  : コンクリートの圧縮強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$p$  : 鉄筋比 (=  $A_s/bd$ )

$f_y$  : 鉄筋の降伏応力度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

## 6. まとめ

本実験の範囲で以下の結論が得られた。

- (1) 鉄筋とコンクリートとの付着強度について、BFS は砕砂を用いたコンクリートと同等以上の性能が確認された。
- (2) はりの曲げ試験について、BFS は砕砂を用いたコンクリートと同程度の曲げ耐力が確認され、ひび割れ性状に関しても大きな違いは確認されなかった。また、BFS を用いたコンクリートについても示方書に示される計算式を用いて評価できることが確認された。
- (3) 版の押抜きせん断試験について、BFS は砕砂を用いたコンクリートと同程度の押抜きせん断耐力が確認され、ひび割れ性状に関しても大きな違いは確認され

表-8 押抜きせん断耐力の計算値と実験値の比較

		計算値 (kN)	実験値 (kN)	実験値/ 計算値
砕砂	土木学会式	532	640	1.20
	角田式	605		1.06
BFS	土木学会式	532	697	1.31
	角田式	679		1.03

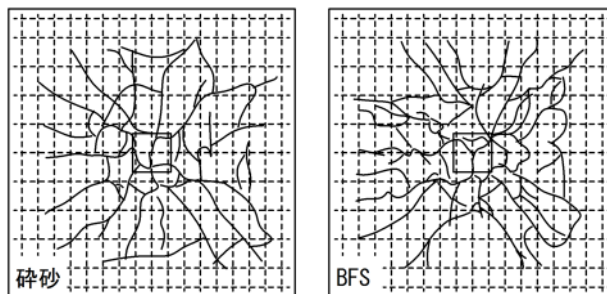


図-12 版部材のひび割れ発生状況

れなかった。また、BFS を用いたコンクリートについても土木学会式や角田式などの押し抜きせん断耐力の計算式を用いて評価できることが確認された。

謝辞 本研究は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の「SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」(管理法人: NEDO) の一部として実施した。ここに謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 岸谷孝一, 友沢史紀, 沼田晋一: コンクリート用スラグ細骨材の使用規準作成に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.1, pp.213-216, 1979
- 2) 藤井隆史, 細谷多慶, 杉田篤彦, 綾野克紀: 高炉スラグを用いたコンクリートの中酸化, 塩化物イオン浸透性および時間依存性変形に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.637-642, 2015
- 3) 土木学会: コンクリート標準示方書[規準編], pp.331-334, 2013
- 4) 土木学会: コンクリート標準示方書[設計編], pp.172-177, 2012
- 5) 上本洋, 阿部道彦, 鹿毛忠継, 浅野研一: 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの凍結融解に関する実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.119-124, 2011
- 6) 土木学会: コンクリート標準示方書[設計編], pp.187-191, 2012
- 7) 角田与史雄, 井藤昭夫, 藤田嘉夫: 鉄筋コンクリートスラブの押し抜きせん断耐力に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第 229 号, pp.105-115, 1974