

# 論文 産業廃棄物溶融スラグを用いたせん断補強筋のない鉄筋コンクリート梁の曲げ・せん断挙動

松家 武樹<sup>\*1</sup>・堺 孝司<sup>\*2</sup>・中村 俊之<sup>\*3</sup>・草薙 悟志<sup>\*4</sup>

**要旨**：本研究は、香川県豊島の土砂を含む産業廃棄物を溶融処理した際に発生するスラグを用いたせん断補強筋のない鉄筋コンクリート梁のひび割れ耐荷挙動について検討した。影響因子としてはスラグ置換率、圧縮強度、せん断スパン比および鉄筋比を考慮し、18体の梁を製作し載荷試験を行った。その結果、スラグの有無による耐荷力、たわみ、等曲げ区間の総ひび割れ幅及びせん断ひび割れ幅への影響はほとんどないことが明らかとなった。また、圧縮強度、鉄筋比及びせん断スパン比の影響のスラグの有無による違いも見られなかった。

**キーワード**：ひび割れ, RC 梁, 溶融スラグ, 産業廃棄物, 耐荷力

## 1. はじめに

近年、様々な環境問題に取り組むことが社会的に求められている。その中の1つが、我々の身近に存在する都市ごみや産業廃棄物などの処理である。

香川県豊島に大量の廃棄物が不法投棄された。これらの大半は自動車のシュレッダーダストであるが、廃棄物投棄の際用いられた土壌も汚染されたために、土壌を含む廃棄物を処理しなければならない。それらの総量は約67万トンに上る。これらは既に高温溶融による処理が開始され、残渣としてスラグが排出されている。このようにして生産されたスラグは既に無筋コンクリートの細骨材として利用されている。

都市ごみ溶融スラグについては北辻ら<sup>1)</sup>の検討があるが、著者らも都市ごみ溶融スラグを用いたコンクリートの材料学的検討<sup>2)</sup>を行っている。また、著者らは都市ごみ溶融スラグおよび産業廃棄物溶融スラグを用いた曲げ卓越型 RC 梁のひび割れ挙動を含む力学的検討<sup>3),4)</sup>を行ってきた。しかしながら、せん断卓越型 RC 梁の力学的特性については検討していなかった。

そこで本研究では、香川県豊島の土砂を含む産業廃棄物溶融スラグを用いたせん断補強筋のない鉄筋コンクリート（以下、RC と略記）梁のひび割れ挙動を含む力学的特性について検討することにした。なお、影響因子としては、スラグ置換率、圧縮強度、鉄筋比およびせん断スパン比（以下、 $a/d$  と略記）を考慮した。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

セメントは、普通ポルトランドセメント（密度  $3.16\text{g/cm}^3$ 、比表面積  $3290\text{cm}^2/\text{g}$ ）を使用した。

粗骨材は、徳島県池田産の砕石（岩種：砂岩、最大寸法  $20\text{mm}$ 、密度  $2.57\text{g/cm}^3$ 、吸水率  $1.16\%$ 、F.M. 7.22）と、砕石（岩種：砂岩、最大寸法  $15\text{mm}$ 、密度  $2.56\text{g/cm}^3$ 、吸水率  $2.50\%$ 、F.M. 6.17）を混合したものをを使用した。

細骨材は、徳島県池田産の砕砂（岩種：砂岩、密度  $2.55\text{g/cm}^3$ 、吸水率  $2.24\%$ 、F.M. 2.72、実績率  $63.5\%$ ）を使用した。

スラグは、香川県豊島の土砂を含む産業廃棄物を約  $1340^\circ\text{C}$  で溶融し、水砕処理されたもの

\*1 香川大学大学院 工学研究科安全システム建設工学専攻（正会員）

\*2 香川大学 工学部安全システム建設工学科 工博（正会員）

\*3 香川県 環境森林部廃棄物対策課

\*4 (株) 四電技術コンサルタント 土木技術部（正会員）

表-1 コンクリートの配合

記号	W/C (%)	スラグ (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )									
				水	セメント	細骨材		粗骨材		高性能AE減水剤		AE剤 (100倍希釈)	
						砕砂	スラグ	砕石 2015	砕石 1505	C×%	(kg/m <sup>3</sup> )	C×%	(kg/m <sup>3</sup> )
				1.00									
40-00	40	0	40	155	388	691	0	418	624	3.88	0.22	0.85	
40-40		40		155	388	430	287	418	624	3.88	0.12	0.47	
50-00	50	0	42	162	324	739	0	412	615	3.24	0.23	0.75	
50-40		40		162	324	460	307	412	615	3.24	0.01	0.03	
60-00	60	0	44	166	277	787	0	404	603	2.77	0.27	0.75	
60-40		40		166	277	490	326	404	603	2.77	0.05	0.14	

(密度 2.80g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 0.28%, F.M. 2.64, 実績率 60.8%) を使用した。

混和剤は、ポリカルボン酸エーテル系化合物と配向ポリマーの複合体である高性能 AE 減水剤および変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤の AE 剤を使用した。

## 2.2 コンクリートの製造および配合

コンクリートの製造は、温度 20℃, 相対湿度 60%の試験室で行い、容量 100 リットルの強制二軸ミキサを用いて、80 リットルを 2 回連続で製造し、それらを混合したものをを用いた。練混ぜは、最初にセメント、細骨材および粗骨材を 10 秒間空練りし、次に水と混和剤を加えて 90 秒間行った。

コンクリートの配合は、水セメント比 W/C を

40, 50 および 60%の 3 種類とし、細骨材として溶融スラグを混入しないものと、細骨材の質量の 40%を溶融スラグで置換したものの 2 種類である。配合の決定は、単位水量および AE 剤の添加量によって調整した。なお、本研究ではスラグの有無による単位水量の相違はないものとなった。配合の一覧を表-1 に示す。なお、目標スランプおよび目標空気量は、8+2.5cm および 4.5±1.0%とした。

## 2.3 試験体

### (1) 製作方法

コンクリートの締固めは全て内部振動機で行なった。養生は、温度 20℃および相対湿度 60%の試験室で行ったが、コンクリート打設後に濡らした布を覆い、その外側を更にビニールで被

表-2 試験体の形状寸法、諸元および材料特性

試験体名 (W/C-スラグ置換率)	全長 L (mm)	幅 b (mm)	有効高さ d (mm)	かぶり c (mm)	鉄筋径 D (mm)	鉄筋比 p <sub>1</sub> (%)	せん断スパン a (mm)	せん断スパン比 a/d	鉄筋の弾性係数 Es × 10 <sup>3</sup> (N/mm <sup>2</sup> )	鉄筋の降伏強度 Es (N/mm <sup>2</sup> )	コンクリートの圧縮強度 f' <sub>c</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	コンクリートの引張強度 f <sub>t</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	f' <sub>c</sub> / f <sub>t</sub> (脆度係数)	コンクリートの弾性係数 E <sub>c</sub> (kN/mm <sup>2</sup> )					
CASE1 (40-00)	2000	150	250	40.5	19	1.53	650	2.6	1.91	405.0	73.0	4.70	15.5	28.2					
CASE2 (40-40)															68.5	4.11	16.7	29.5	
CASE3 (50-00)				40.5	19	1.53			1.91	405.0	59.9	3.99	15.0	26.7					
CASE4 (50-40)															59.9	3.99	15.0	26.7	
CASE5 (50-00)				42.0	16	1.06			1.83	370.8	59.0	4.21	14.0	26.6					
CASE6 (50-40)															55.2	3.68	15.0	27.2	
CASE7 (50-00)				39.0	22	2.06			2.25	398.0	55.1	4.08	13.5	26.5					
CASE8 (50-40)															53.2	3.63	14.7	27.5	
CASE9 (60-00)				40.5	19	1.53			1.91	400.5	38.2	3.24	11.8	22.9					
CASE10 (60-40)															37.7	2.59	14.5	24.7	
CASE11 (40-00)	2250	150	250	40.5	19	1.53	775	3.1	1.91	405.0	67.6	4.14	16.3	27.9					
CASE12 (40-40)															69.7	4.36	16.0	29.3	
CASE13 (50-00)				40.5	19	1.53			1.91	405.0	58.0	4.08	14.2	26.6					
CASE14 (50-40)															55.0	3.69	14.9	27.1	
CASE15 (60-00)				40.5	19	1.53			1.91	394.8	44.5	3.93	11.3	24.7					
CASE16 (60-40)															41.9	3.06	13.7	25.0	
CASE17 (50-00)				2500	150	250			40.5	19	1.53	900	3.6	1.91	405.0	62.6	4.35	14.4	28.5
CASE18 (50-40)																			

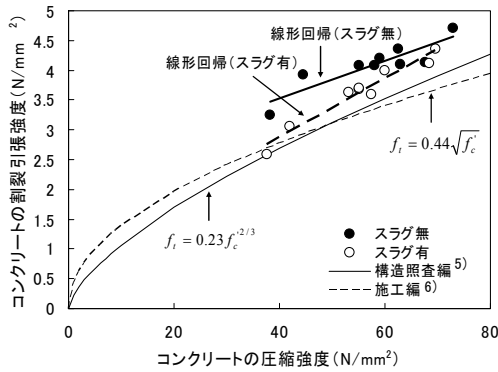


図-1 コンクリートの圧縮強度と割裂引張強度の関係

覆した。

(2) 形状寸法と緒元

表-2 に、試験体の形状寸法と諸元を示す。試験体の全長は、2000, 2250 および 2500mm の 3 種類である。断面は全ての試験体で幅を 150mm, 高さ 300mm の矩形断面とした。なお、本研究では同表に示す通り、影響因子としてコンクリートの圧縮強度、鉄筋比、および a/d についても検討しており、それぞれ 42~73N/mm<sup>2</sup>, 1.06~2.06%, および 2.6~3.6 の範囲にある。図-1 に、コンクリートの圧縮強度と割裂引張強度の関係を示す。コンクリートの強度が小さくなるにつれ、スラッグの有無による割裂引張強度の差は大きくなる。しかしながら、このことが後述するせん断耐力およびひび割れ挙動に影響を及ぼすものとはならなかった。

(3) 荷重方法および測定項目

荷重は、単純梁の対称 2 点集中荷重で行い、最

表-3 梁の耐力、ひび割れおよび破壊形式

試験体名 (W/C-スラッグ置換率)	梁の耐力 (kN)			実験値/理論値	終局時における 等曲げ区間の ひび割れ本数 (本)	等曲げ区間の ひび割れ間隔 (mm)	破壊形式
	曲げ降伏耐力 (計算値)	せん断耐力 (計算値)	実験値				
CASE1 (40-00)	161	113	103	0.91	6	104	斜め引張破壊
CASE2 (40-40)	160	113	115	1.02	6	96	斜め引張破壊
CASE3 (50-00)	160	113	115	1.02	5	108	斜め引張破壊
CASE4 (50-40)	159	113	130	1.15	4	132	斜め引張破壊
CASE5 (50-00)	103	100	99	0.99	5	123	鉄筋降伏後の斜め引張破壊
CASE6 (50-40)	103	100	87	0.87	4	162	斜め引張破壊
CASE7 (50-00)	206	125	120	0.96	5	136	斜め引張破壊
CASE8 (50-40)	206	125	121	0.97	5	125	斜め引張破壊
CASE9 (60-00)	153	106	118	1.11	6	116	斜め引張破壊
CASE10 (60-40)	153	106	104	0.98	5	134	斜め引張破壊
CASE11 (40-00)	134	106	118	1.11	5	125	斜め引張破壊
CASE12 (40-40)	135	106	124	1.17	5	131	斜め引張破壊
CASE13 (50-00)	133	106	105	0.99	6	100	斜め引張破壊
CASE14 (50-40)	133	106	112	1.06	7	102	斜め引張破壊
CASE15 (60-00)	128	104	105	1.01	6	114	斜め引張破壊
CASE16 (60-40)	128	102	98	0.96	6	115	鉄筋降伏後の斜め引張破壊
CASE17 (50-00)	115	100	109	1.09	5	140	斜め引張破壊
CASE18 (50-40)	115	100	116	1.16	7	91	鉄筋降伏後の斜め引張破壊

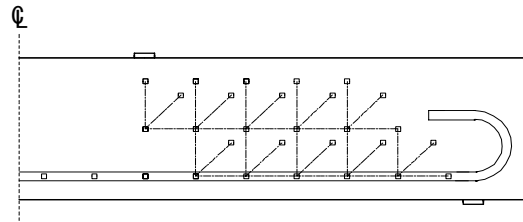


図-2 コンタクトチップの貼付状況

大荷重 300kN の荷重装置を用い、変位制御で行なった。なお、荷重点距離は、全ての試験体において 500mm である。

長さ変化の測定は、せん断区間と等曲げ区間における試験体側面の引張鉄筋位置（以下、側面鉄筋位置と略記）にコンタクトチップを 100mm の間隔で設置し、コンタクトマイクロストレーンゲージで行った。図-2 に、コンタクトチップの貼付状況を示す。変位の測定は、梁スパン中央の最上部をレーザー変位計で行った。また、ひび割れ状況も併せて記録した。

3. 実験結果および考察

表-3 に、各梁の耐力、ひび割れおよび破壊形式の結果を示す。降伏曲げ耐力の計算値は、力の釣り合い条件および変形の適合条件に基づき、2 次放物線及び直線からなる応力-ひずみ関係から算出した。せん断耐力は、土木学会コンクリート標準示方書<sup>5)</sup>（以下、示方書と略記）の基礎となった下記に示す二羽ら<sup>7)</sup>の式を用いて算出した。

$$V_c = f_{vcd} \cdot \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_a \cdot b \cdot d / \gamma_b \quad (1)$$

$$f_{vcd} = 0.2 \cdot \sqrt[3]{f'_c} \leq 0.72 \quad (2)$$

$$\beta_d = \sqrt[4]{1000/d} \leq 1.5 \quad (3)$$

$$\beta_p = \sqrt[3]{100 p_t} \leq 1.5 \quad (4)$$

$$\beta_a = 0.75 + 1.4/(a/d) \quad (5)$$

ここに、 $b$  : 梁の幅、 $d$  : 有効高さ、 $a$  : せん断スパン、 $f'_c$  : コンクリートの圧縮強度、 $p_t$  : 引張鉄筋比、 $\gamma_b$  : 部材係数である。

3.1 せん断耐力に及ぼす各種要因の検討

(1) 圧縮強度の影響

図-3 に、コンクリートの圧縮強度とせん断耐力の実験値（以下、

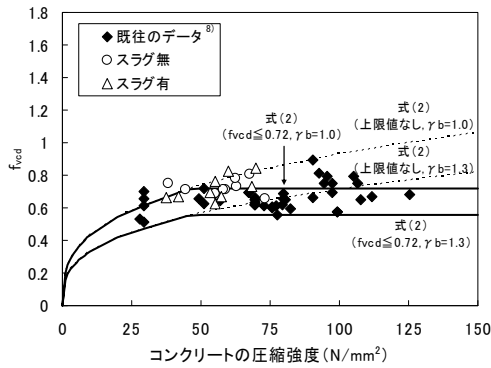


図-3 コンクリートの圧縮強度と  $f_{vcd}$  の関係

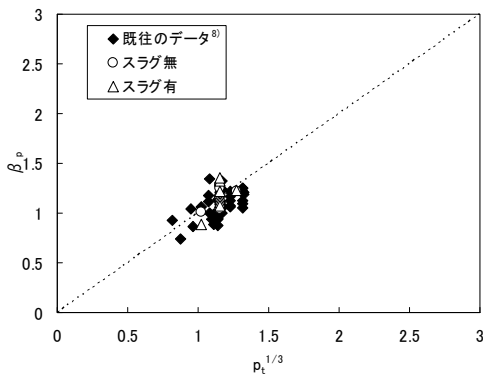


図-4 鉄筋比と  $\beta_p$  の関係

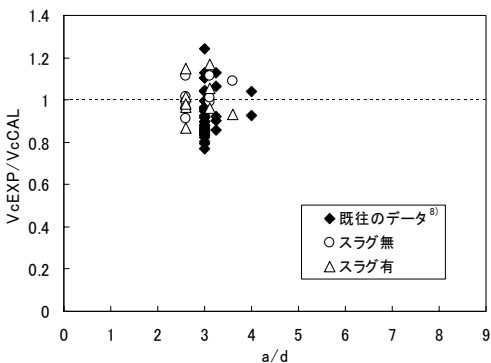


図-5  $a/d$  とせん断耐力の計算値に対する  
実験値の比の関係

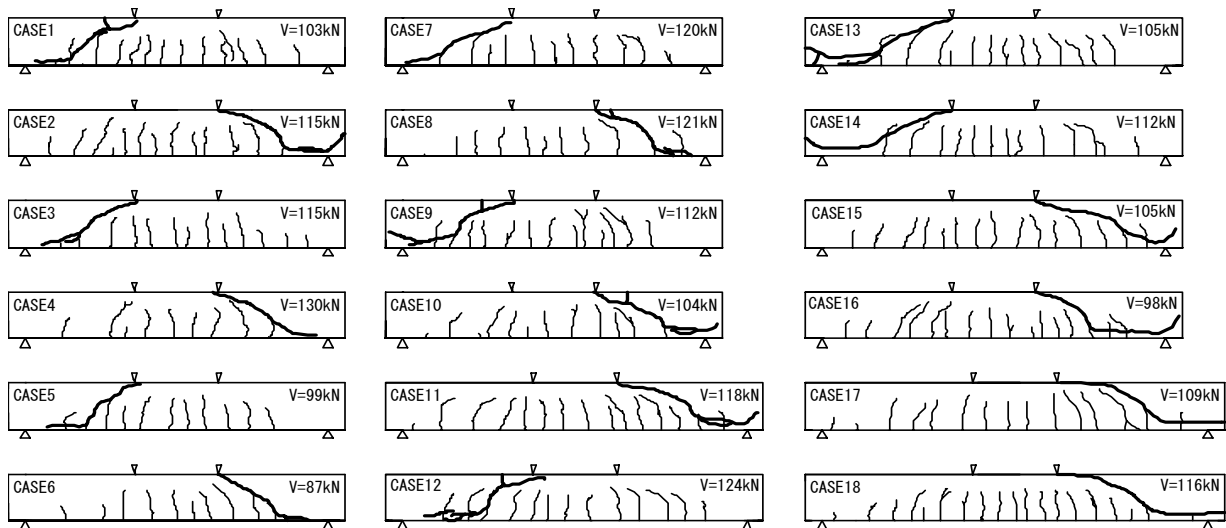


図-6 ひび割れ状況

VcEXP と略記) から式 (1) によって逆算した  $f_{vcd}$  の関係を示す。同図には既往の研究結果<sup>8)</sup>も示す。さらに、同図には式 (2) によって算出した計算値と、その値に部材係数を考慮したものも示す。示方書では、コンクリートの圧縮強度が  $46.7\text{N/mm}^2$  以上になるとせん断耐力は増加しないとして  $f_{vcd}$  の値に上限値を設けている。

本結果は、スラグの有無による差異は見受けられない。また、本研究のデータは示方書の上限值  $0.72$  および  $\gamma_b=1.0$  とした場合、危険側の評価を与えるものとなっているが、部材係数を  $1.3$  とすることにより全てのデータにおいて安全側に評価される結果となった。

### (2)鉄筋比の影響

図-4 に、 $p_t^{1/3}$  と VcEXP から式 (1) によって逆算した  $\beta_p$  の関係を示す。同図に示すように、スラグの有無による差異は見受けられない。また、本実験データにおいても  $\beta_p$  が鉄筋比の  $1/3$  乗に比例する関係は、スラグの有無に係わらず概ね成り立っている。

### (3)せん断スパン比の影響

$a/d$  がせん断耐力に及ぼす影響を表わす式 (5) は、土木学会の限界状態設計指針 (案)<sup>9)</sup> (以下、指針 (案) と略記) に示される  $288$  のデータに基づいて導かれたものであるが、本研究の範囲の  $a/d$  における指針 (案) のせん断耐力の実験値と計算値の比は  $0.70\sim 1.25$  の範囲にあるのに対し

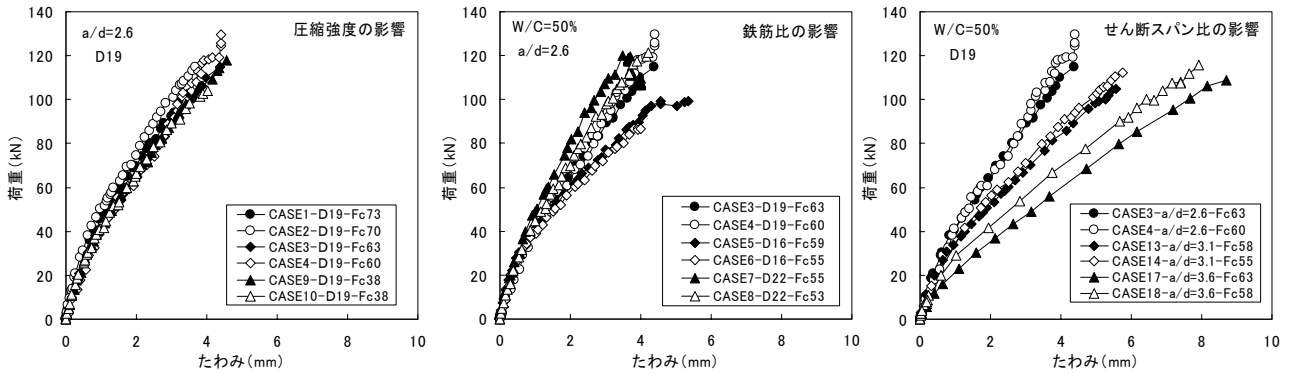


図-7 荷重-たわみ曲線

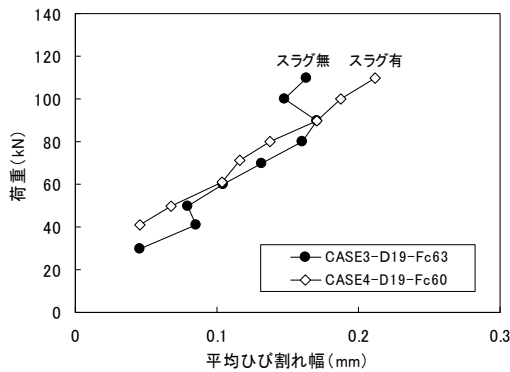


図-8 平均ひび割れ幅

て、本研究のその比は約 0.87~1.17 の範囲である。図-5 には、文献 8) に示されるデータを載せた。そのデータのせん断耐力の実験値と計算値の比は、0.77~1.24 の範囲にあった。

このように、これらの結果から、せん断耐力に及ぼす  $a/d$  の影響は式 (5) で評価することができると判断される。

### 3.2 ひび割れおよびたわみ挙動

#### (1) ひびわれ状況

図-6 に、せん断破壊時の各試験体のひび割れ状況を示す。ひび割れは、まず部材軸に対してほぼ直角方向に発生、進展し、その後せん断ひび割れが発生して、せん断破壊に至る挙動となった。

なお、スラグの有無によるひび割れの外観上の挙動に差異は見受けられないものとなった。

#### (2) 荷重-たわみ曲線

圧縮強度、鉄筋比および  $a/d$  が荷重-たわみ曲線に及ぼす影響を図-7 に示すが、紙幅の関係上、代表的な結果のみを示す。同図から、圧縮強度がたわみに及ぼす影響は小さいと判断できる。鉄筋比がたわみに及ぼす影響については、表-2 に示すように、鉄筋の弾性係数が鉄筋径の増加と共に大きくなる結果となっていることから、鉄筋比に加えて鉄筋の弾性係数もたわみに影響していると考えられる。つまり、鉄筋比の影響以上にたわみの差が大きくなる結果を示している。せん断スパン比がたわみに及ぼす影響については、せん断スパン比が大きくなると共にたわみも大きくなるが、この結果には支間長の影響も加わっている。なお、 $a/d$  が 3.6 の場合におけるスラグの有無によるたわみ挙動に違いが見られるが、この原因については不明である。

なお、これらの結果は後述する等曲げ区間の総曲げひび割れ幅と符合する。

#### (3) 平均曲げひび割れ幅

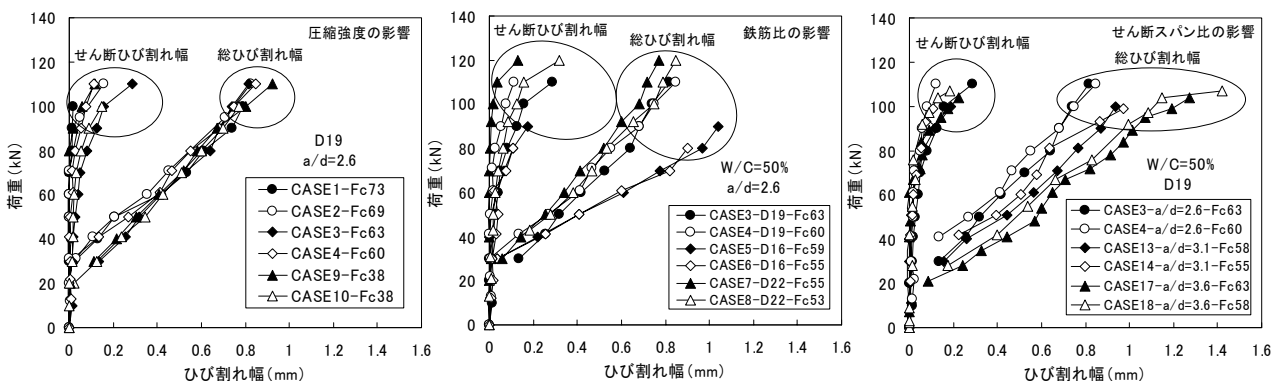


図-9 総曲げひび割れ幅とせん断ひび割れ幅

図-8に、スラグの有無における平均ひび割れ幅の挙動の一例を示す。スラグ無混入の場合において高い応力レベルで平均ひび割れ幅が極端に小さくなっているが、これは新規にひび割れが発生したことが平均ひび割れ幅を著しく小さくしたことを示す。著者らは、ひび割れ挙動を平均ひび割れ幅で一般化することは難しいことを既往の研究<sup>4)</sup>で報告したが、ここでも以下に示す総ひび割れ幅で各種要因の検討を行うこととした。

#### (4) 総曲げひび割れ幅及びせん断ひび割れ幅

図-9に、圧縮強度、鉄筋比およびせん断スパン比が等曲げ区間の総ひび割れ幅に及ぼす影響を示す。前述したわみ挙動と同様にスラグの有無による顕著な差異は見受けられない。同図には各試験体に発生したせん断ひび割れ幅も示す。せん断ひび割れ幅は、せん断ひび割れ幅を計測できた範囲で、ひび割れ幅が最も大きな値を示した部分の値を、荷重レベルごとに示している。荷重レベルが大きくなると、せん断ひび割れ幅が増大し、それにより曲げひび割れ幅が抑制される傾向は若干見られるものの、その影響は非常に小さいと判断される。

#### 4. まとめ

本研究で得られた結果をまとめると以下の通りである。

- (1) スラグを用いたせん断補強筋のないRC梁のせん断耐力は、従来の式を用いて評価できる。
- (2) せん断補強筋のないRC梁のたわみ、総曲げひび割れ幅およびせん断ひび割れ幅に及ぼすスラグの有無の影響はほとんどない。
- (3) せん断補強筋のないRC梁の挙動に及ぼす圧縮強度、鉄筋比およびせん断スパン比の影響のスラグの有無による違いはほとんどない。

以上の結果から、コンクリート用細骨材として本研究で用いた香川県豊島の土砂を含む産業廃棄物溶融スラグを用いた場合のRC梁のせん断挙動については従来の方法で評価可能であると思われる。

#### 参考文献

- 1) 北辻政文, 田中礼治, 遠藤孝夫, 鳴海繁実: 都市ごみ溶融ガス化溶融スラグのコンクリート用細骨材としての利用, コンクリート工学論文集, Vol.13, No.2, pp.89-98, 2002.
- 2) 松山哲也, 堺孝司, 吉田秀典, 高木茂: 都市ごみ溶融スラグを用いたコンクリートの諸特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.73-78, 2001.
- 3) 松家武樹, 堺孝司, 山地功二, 渡辺健也: 都市ごみ溶融スラグを用いた鉄筋コンクリート梁の曲げひび割れ挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.2, pp.379-384, 2003.
- 4) 松家武樹, 堺孝司, 渡辺健也: 産業廃棄物溶融スラグを用いた鉄筋コンクリートの曲げひび割れ挙動, 土木学会第59回年次学術講演会概要集V, pp.1167-1168, 2004.
- 5) 土木学会: コンクリート標準示方書[構造照査編], 2002.
- 6) 土木学会: コンクリート標準示方書[施工編], 2002.
- 7) 二羽淳一郎, 山田一字, 横沢和夫, 岡村甫: せん断補強筋を用いないRCはりのせん断強度式の再評価, 土木学会論文集, 第372号, pp.167-176, 1986.
- 8) 土木学会: 2002年版コンクリート標準示方書改訂資料, コンクリートライブラリー第108号, pp.21, 2001.
- 9) 土木学会: コンクリート構造の限界状態設計法指針(案), コンクリート・ライブラリー第52号, pp.242, 1983.

#### 謝辞

本研究の一部は、文部科学省研究費補助金(基盤研究)(B)(2), 課題番号15360231; 研究代表者: 堺孝司)の助成により行った。なお、本実験は香川大学学部生の三宅洋平氏, 谷口修平氏および小野寺誠司氏の協力を得て行った。ここに、深甚の謝意を表す。