

論文 都市ごみ溶融スラグを用いた鉄筋コンクリート部材の力学的特性

松家 武樹*1・堺 孝司*2・山地 功二*3・渡辺 健也*4

要旨：環境保全の観点から、平成 18 年には瀬戸内海全域に亘って海砂の採取ができなくなり、様々な代替骨材の可能性を検討する必要がある。都市ごみ溶融スラグの細骨材としての有効利用もその一つである。本研究では、細骨材の一部を溶融スラグに置き換えたコンクリートを RC 部材に用いた場合のひび割れ挙動を含む力学的特性について検討した。その結果、溶融スラグを用いると、RC 部材の耐荷力には有意な影響はないが、平均ひび割れ幅および最大ひび割れ幅は増大すること等が明らかになった。

キーワード：RC 部材、溶融スラグ、曲げひび割れ幅、耐荷力、都市ごみ

1. はじめに

近年、良質な骨材の供給が減少の一途をたどっており、平成 11 年度における骨材の総供給量の約 6 割弱が砕石・砕砂となっている。四国地域では海砂がコンクリート用細骨材の 50% 弱を占めているが、環境保全の観点から平成 18 年度には瀬戸内海全域において海砂採取ができなくなることから、香川県等で海砂の代替骨材の検討が行われている。

一方、都市ごみや産業廃棄物の増大による最終処分地の逼迫や土壌汚染等が大きな問題となっている。このことから、廃棄物の減容化とダイオキシン処理のために高温溶融処理を行う傾向がある。高温溶融を行っても、最終的には残渣としてスラグが発生する。上述した代替骨材の一つとしてこの溶融スラグを有効活用することが考えられ、堺ら¹⁾を含めてこれまでいくつかの研究^{2)~4)}が行われてきた。しかしながら、これらの研究はそのほとんどがコンクリートのフレッシュ及び硬化特性に関するものである。唯一田中ら⁵⁾は、鉄筋コンクリート（以下、RC と略記）構造における都市ごみ溶融スラグ（以下、溶融スラグと略記）の使用について検討を

行っている。この研究は、耐震性能の観点から、交番荷重による曲げ破壊、せん断破壊、及び付着破壊挙動について調べ、溶融スラグは基本的に鉄筋コンクリート構造に使用可能であると結論している。しかしながら、この研究では、溶融スラグを用いたことによる RC 部材のひび割れ挙動への影響等、基本的な特性について必ずしも明らかにされていない。

以上のことを背景に、本研究では、細骨材の一部を溶融スラグに置き換えたコンクリートを RC 部材に用いた場合のひび割れ挙動を含む基本的な力学的特性について検討することにした。その際、海砂が利用できなくなることを考慮して、骨材としては全量砕石砕砂を用いた。

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 3.16g/cm³、比表面積 3270cm²/g）を使用した。

粗骨材は、徳島県市場町産の砕石 G（岩種：砂岩、最大寸法 20mm、密度 2.60 g/cm³、吸水率 1.39%、F.M. 6.81）を使用した。

*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 香川大学教授 工学部安全システム建設工学科 工博（正会員）

*3 日本興業（株） 開発部 工修（正会員）

*4 香川県環境部

表－1 溶融スラグの化学組成

項目	組成(%)
SiO ₂	37.45
CaO	36.94
Al ₂ O ₃	16.16
M－Fe	0.25
FeO	1.33
Fe ₂ O ₃	0.29
MgO	1.82
MnO	0.38
Na ₂ O	2.02
K ₂ O	0.50

細骨材は、香川県塩江産の砕砂 S（岩種：花崗岩および風化花崗岩，密度 2.58 g/cm³，吸水率 1.38%，F.M. 2.94）を使用した。

溶融スラグは、一般都市ごみを高温により溶融し，水砕・磁選処理されたもの（密度 2.73g/cm³，吸水率 0.81%，F.M. 3.46）を使用した。表-1 に，溶融スラグの化学組成を示す。

混和剤は，ポリカルボン酸エーテル系の高性能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

コンクリートは，温度 20℃，相対湿度 60% の試験室で容量 100 リットルの強制二軸ミキサを用いて，練混ぜ量の 75 リットルを 2 回連続で製造し，それらを混合させ 150 リットルとして打設を行った。練混ぜは，最初にセメント，細骨材および粗骨材を 30 秒間空練りし，次に水と混和剤を加えて 90 秒間練り混ぜた。

コンクリートの配合については，目標スランプを 8+2.5cm，目標空気量を 4.5±1.0%とし，W/C を 50%とした。コンクリートは，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 種類を使用した。

配合においては，単位水量および単位粗骨材量を一定とし，スランプおよび空気量は混和剤の添加量によって調整した。配合の一覧を表-2 に示す。

2.3 試験体

(1) 作成方法

コンクリートの締固めは全て内部振動機で行った。養生は，温度 20℃および相対湿度 60% の試験室で，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くるんだ。

(2) 断面の形状寸法と諸元

表-3 に，試験体の種類を示す。試験体の全長は，2700mm および 2100mm の 2 種類とした。断面はすべての試験体で幅を 150mm，高さ 300mm の矩形断面である。なお，これらの試験体はせん断スパン比（以下，a/d と略記）を 4.2，2.9 および 1.9 とした。試験体 No.2 および No.5 については，せん断補強筋を配した。試験体 No.1～No.5 について，スラグを用いない場合および用いた場合のそれぞれ 5 体ずつ，計 10 体を作成した。

表-4 に，鉄筋の力学的性状を示す。各試験体には，主鉄筋に SD295-D16 を 2 本ずつ用いた。スターラップは，SD295-D10 を 100mm あるいは 130mm の間隔で配置した。各試験体の主鉄筋のかぶりおよびあきはそれぞれ 32mm および 34 mm とした。なお，スラグ無混入の配合 A およびスラグ混入の配合 B のコンクリートの圧縮強度は，それぞれ 41.4 N/mm² および 44.2 N/mm² である。

(3) 載荷方法および測定項目

図-1 に，試験体の形状寸法および載荷位置を

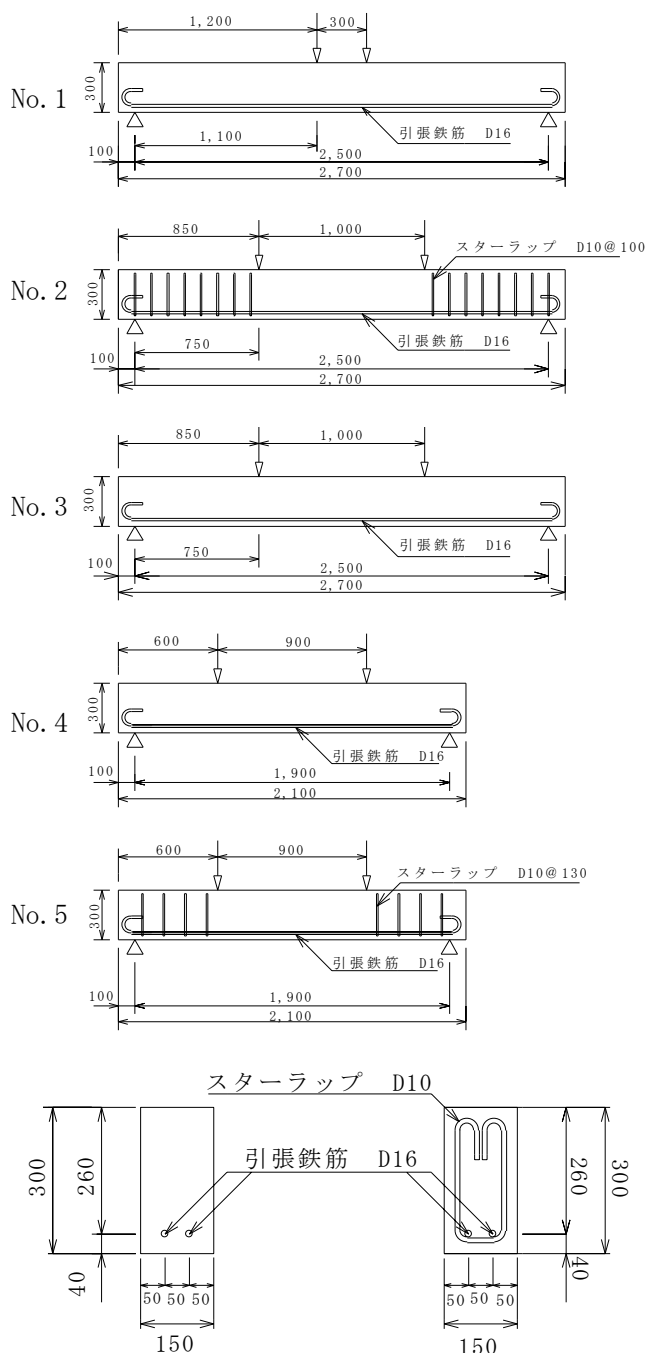
表－2 試験体のコンクリート配合

試験体 配合	W/C (%)	スラグ 置換率 (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					高性能 減水剤	AE剤
				水 W	セメント C	細骨材		粗骨材		
						砕砂 S	溶融スラグ	砕石 G		
									(kg/m ³)	(g/m ³)
A	50	0	45.1	170	340	788	—	967	2.04	17.0
B		40		170	340	483	322	967	1.70	10.2

A：スラグ無混入 B：スラグ混入

表－3 試験体の種類

試験体 No.	せん断スパン比 a/d	せん断補強筋 有無	支間長 (mm) l	荷重位置 (mm) a	荷重間隔 (mm) a'
No. 1	4. 2	無	2500	1100	300
No. 2	2. 9	有	2500	750	1000
No. 3	2. 9	無	2500	750	1000
No. 4	1. 9	無	1900	500	900
No. 5	1. 9	有	1900	500	900



図－1 試験体の形状寸法および荷重方法

示す。

荷重試験は単純ばりの対称２点集中荷重で行

表－4 鉄筋の力学的性状

	呼び名	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)
主鉄筋	D16	378	511	1.97×10^5
スターラップ	D10	392	501	1.80×10^5

い、最大荷重 20tf のアクチュエーターを用いた。荷重方法は静的荷重とし、計測は荷重ステップ毎に行った。

測定に関しては、試験体側面の引張鉄筋位置（以下、側面と略記）、一部の試験体については比較のために試験体側面の最下縁（以下、最下縁と略記）および試験体底面の引張鉄筋位置（以下、底面と略記）にコンタクトチップを 100mm の間隔で設置し、ミクロンストレインゲージにより長さ変化を計測した。さらに、試験体 No.1 については、ひずみゲージにより主鉄筋のひずみも測定した。また、はりスパン中央の最上部および支点の最上部における変位を変位計で測定した。曲げひび割れ状況も併せて記録した。

3. 実験結果と考察

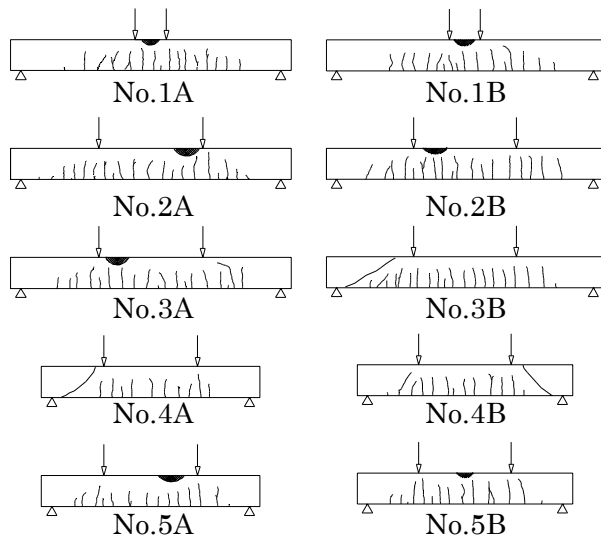
表-5 に実験結果の一覧を示す。

ひび割れ本数は、等曲げモーメント区間および全区間の試験体側面鉄筋位置で観察されたひび割れの本数を示す。

平均ひび割れ間隔については、試験体側面最下縁において、等曲げモーメント区間および全区間に生じたひび割れの間隔をそれぞれ平均したものである。ただし、上述の等曲げモーメント区間の平均ひび割れ間隔の算定では、等曲げモーメント区間を若干はずれたひび割れであれば、それらも考慮した。

表-5 に示す耐力の実験値は、コンクリートはりの最大耐力に対応するものである。曲げ耐力の算定では、鉄筋強度が大きく影響する。ここでは、鉄筋の降伏強度を用いたものを降伏曲げ耐力とし、また、鉄筋の最大引張強度を用いたものを終局曲げ耐力とした。

破壊形式の予測は、降伏曲げ耐力とせん断耐力の比較に基づいたものである。実験の結果は、



図－２ ひび割れ状況

目視観察によるものである。

なお、各曲げ耐力の算定には、等価応力ブロックを用いた。せん断耐力は、コンクリートの分担分を二羽式^⑥、せん断補強筋の分担分をトラス理論を用いて算定した。No.4 および No.5 については、コンクリート標準示方書のディープビームに対するせん断耐力式^⑦を用いた。

(1) ひび割れ状況

図-2 に、各試験体のひび割れ発生状況を示す。

スラグを用いたコンクリートのひび割れ本数は、スラグを用いない場合とほぼ同じとなった。

(2) 荷重－たわみ曲線

図-3 に、荷重－たわみ曲線（以下、P-δ 曲線と略記）の結果を示す。

スラグ無混入とスラグ混入を比較すると、両者の P-δ 曲線はほぼ同じであり、たわみに及ぼすスラグ混入の影響は小さいと言える。

(3) 耐力および破壊形式

曲げ耐力に関しては、表-5 からわかるように本実験で得られた耐力は、降伏曲げ耐力と終局曲げ耐力の間に存在することから、破壊形式としては鉄筋降伏後のコンクリート圧縮破壊と言える。

曲げ卓越の試験体 No.1, No.2, および No.5 の、スラグを用いない場合の曲げ耐力に対するスラグを用いた場合の比は、それぞれ 1.07, 0.97

表－５ 実験結果

試験体 No.	ひび割れ本数 (本)		平均ひび割れ間 隔(mm)		耐力 (kN)				破壊形式	
	等曲げ モーメ ント区 間	全区間	等曲げ モーメ ント区 間	全区間	実験値	理論値			実験	理論
						降伏曲 げ耐力	終局曲 げ耐力	せん断 耐力		
No. 1A	2	17	101	106	70	67	89	82	曲げ	曲げ
No. 2A	9	23	112	94	114	98	130	347	曲げ	曲げ
No. 3A	8	19	104	99	105	98	130	94	曲げ	せん断
No. 4A	7	10	124	121	146	148	195	143	せん断	せん断
No. 5A	8	14	121	115	180	148	195	397	曲げ	曲げ
No. 1B	4	16	89	110	75	67	89	84	曲げ	曲げ
No. 2B	9	18	107	114	110	99	131	349	曲げ	曲げ
No. 3B	9	20	94	99	103	99	131	96	せん断	せん断
No. 4B	8	13	110	113	163	148	196	148	せん断	せん断
No. 5B	9	15	107	106	180	148	196	402	曲げ	曲げ

A : スラグ無混入 B : スラグ混入

および 1.00 となった。この結果から、スラグの有無による曲げ耐力への有意な影響はないと判断される。

試験体 No.3A は理論的にはせん断卓越と予想したが、実験結果から曲げ破壊と判断された。No.3A の降伏曲げ耐力とせん断耐力はほぼ同じ値を示しており、破壊のばらつきを考慮すれば、どちらの破壊形式もあり得ると考えられる。すなわち、この場合のせん断耐力の計算値は実際の耐力を過小評価したことになる。なお、試験体 No.3B は予測したせん断破壊となった。この場合も、せん断耐力の算定値は過小評価となったものの、せん断破壊前に曲げ破壊が生じなかったことを意味する。

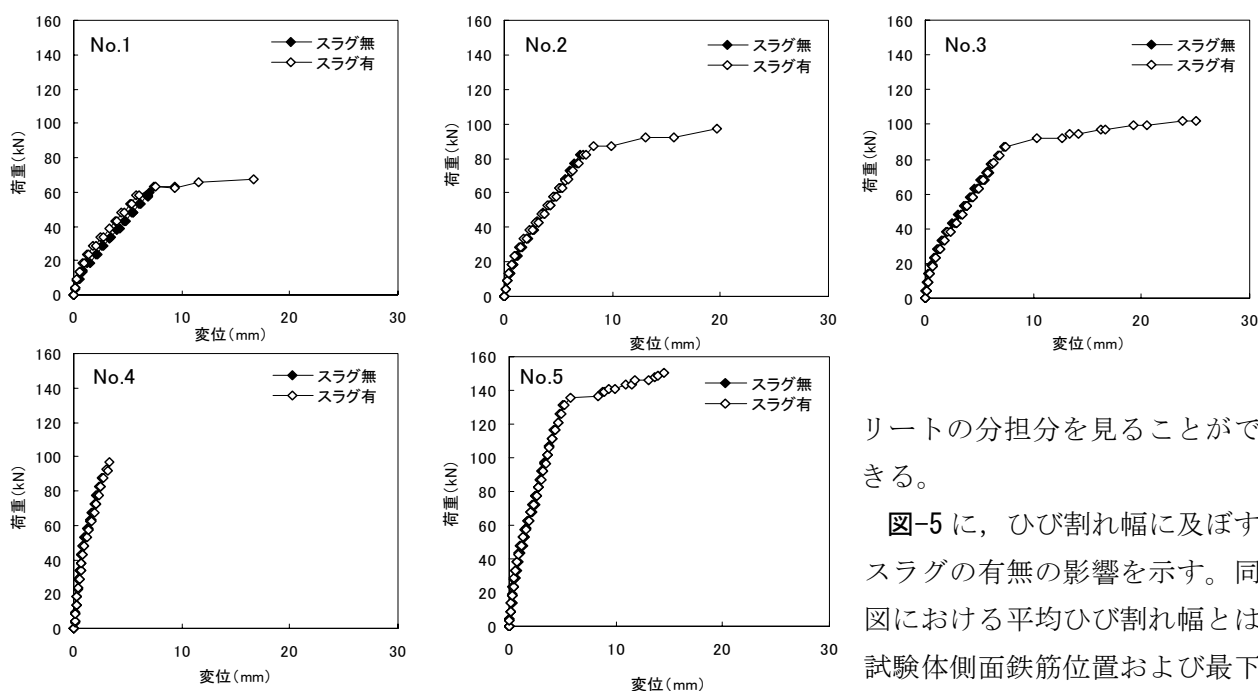
試験体 No.4 および No.5 は前述したように、a/d が 1.9 であるためにディープビームとして扱うのが妥当である。No.4 は予測したせん断破壊となった。No.5 は、せん断補強鉄筋の配置により曲げ破壊となり、引張鉄筋はひずみ硬化領域に至った状況と考えられる。

(4) 鉄筋の平均ひずみおよびひび割れ幅

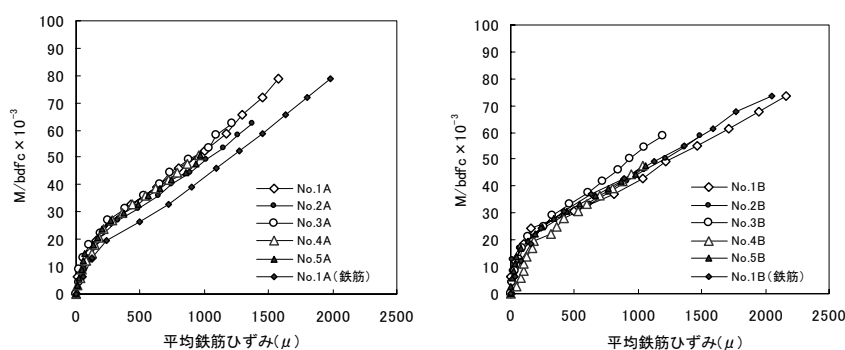
土木学会コンクリート標準示方書^⑦のひび割れ幅算定式は、一段配筋の場合以下のようになる。

$$w = k_1 k_2 \{4c + 0.7(c_s - \phi)\} (\sigma_{se} / E_s + \epsilon'_{cs})$$

ここに、 k_1 : 鋼材の表面形状がひび割れ幅に及ぼす影響、 k_2 : コンクリートの品質がひび割れ幅に及ぼす影響、 c : かぶり (mm)、 c_s : 鋼材の中心間隔 (mm)、 ϕ : 鋼材径 (mm)、 σ_{se} :



図－3 荷重-たわみ曲線



図－4 鉄筋の平均ひずみ

ひび割れ断面での引張鉄筋の引張応力度増加量、 E_s ：鉄筋のヤング係数、 ε'_{cs} ：コンクリートの収縮およびクリープ等によるひび割れ幅の増加を考慮するための数値である。本研究では、 k_1 は1.0となる。また、載荷試験を行うまで試験体は湿潤状態としたため ε'_{cs} は0とする。

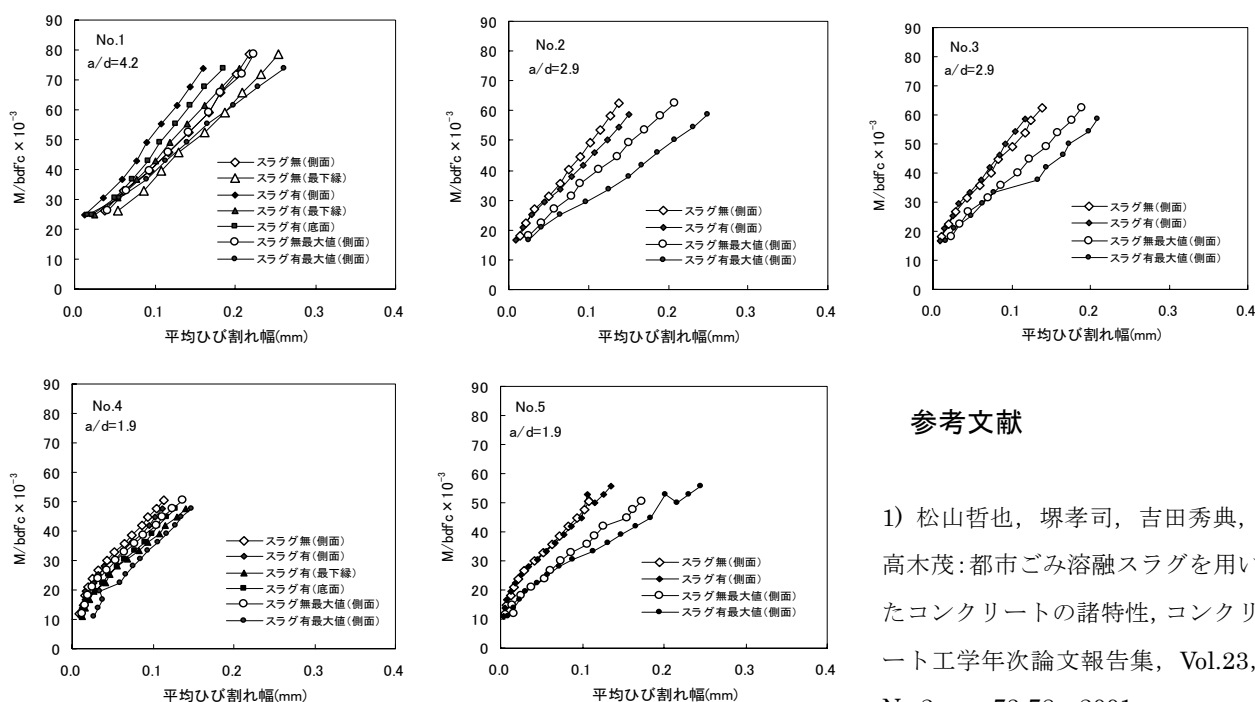
図-4に、各試験体の平均鉄筋ひずみの試験結果を示す。なお、ここではミクロンストレインゲージにより等曲げ区間内の側面鉄筋位置で測定したひずみを平均鉄筋ひずみとして扱う。

また、試験体 No.1 では、試験体中央で鉄筋に直接貼り付けしたひずみゲージによりひずみの測定を行った。測定した鉄筋ひずみが必ずしも等曲げ区間の平均的なひずみを表すと考えすることはできないが、試験体 No.1A ではコンク

リートの分担分を見ることができる。

図-5に、ひび割れ幅に及ぼすスラグの有無の影響を示す。同図における平均ひび割れ幅とは、試験体側面鉄筋位置および最下縁ならびに底面鉄筋位置における等曲げモーメント区間内のひび割れ幅を平均したものである。最大値は、等曲げモーメント区間内の試験体側面鉄筋位置におけるひび割れ幅の最大の値を示したものである。全体として、スラグを用いた場合の方がひび割れ幅が大きくなる傾向がある。しかし、試験体 No.1 の平均ひび割れ幅は、等曲げ区間が小さいことによるひび割れ発生のばらつきにより、その傾向は逆になっている。

試験体 No.2 については、モーメントがあるレベルを超えるとスラグを用いた場合の平均ひび割れ幅がスラグを用いない場合より大きくなる傾向にある。これは、スラグがガラス質であることに起因して脆性度が大きい特性を示すことが原因と推測される。すなわち、曲げモーメントの増大により局部的な付着破壊がスラグ無混入に比して大きくなったことが考えられるが、更に詳細な検討が必要である。スラグを用いない平均ひび割れ幅に対するスラグを用いた場合の平均ひび割れ幅は、測定した範囲で最大約1.1倍であった。せん断卓越の試験体 No.3 については、スラグ無混入の場合の側面鉄筋位置での



図ー 5 平均ひび割れ幅

平均ひび割れ幅の方が大きな値となっているが、これは、両者の破壊形式の違いによる影響に起因すると考えられる。

栖原ら⁸⁾は、平均ひび割れ幅に及ぼす測定位置の影響について検討している。本実験でも、試験体 No.1 および No.4 について同様の測定を行った。この結果、側面鉄筋位置における平均ひび割れ幅に対する最下縁および底面におけるその比は、それぞれ 1.12~2.10 および 1.10~1.88 となった。

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) 溶融スラグが RC 部材の曲げ及びせん断耐力に及ぼす有意な影響はない。
- (2) 溶融スラグを用いると、RC 部材の平均ひび割れ幅および最大ひび割れ幅は大きくなる。
- (3) 今後、更にデータを蓄積し、溶融スラグが混入した場合のひび割れ幅算定式の再評価が必要である。

参考文献

- 1) 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報告集, Vol.23, No.2, pp.73-78, 2001.
- 2) 北辻政文, 藤居宏一: ごみ焼却灰溶融スラグのコンクリート用細骨材への適用に関する基礎的研究, 農業土木学会論文集, No.192, pp.725-732, 1997.
- 3) 北辻政文, 藤居宏一: ごみ溶融スラグを細骨材として用いたコンクリートの性質, 農業土木学会論文集 No.200, pp.223-231, 1999.
- 4) 奈良禧徳, 斎藤丈士: ごみ焼却灰溶融スラグを細骨材として用いたコンクリートの物理的性状, 第 11 回廃棄物学会研究発表会講演論文集, pp.544-546, 2000.
- 5) 田中礼治, 北辻政文, 東海隼人, 大芳賀義善: 鉄筋コンクリート構造における都市ごみ溶融スラグの使用の可能性に関する実験研究, コンクリート工学論文集, 第 13 巻第 2 号, pp.109-116, 2002.
- 6) 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.
- 7) 土木学会: コンクリート標準示方書, 2002.
- 8) 栖原健太郎, 辻幸和, 橋本親典, 金井昌義: 鉄筋コンクリートはりの曲げひび割れ幅の算定式に関する一考察, 土木学会論文集, No.627, pp.273-281.1999.