

論文 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

松家 武樹^{*1}・堺 孝司^{*2}・山地 功二^{*3}・渡辺 健也^{*4}

要旨：都市ごみ等の廃棄物処理は、埋立処分場の逼迫や、有害物質の無害化の観点から、これらを高温溶融することが一般的になりつつある。高温溶融によって発生するスラグは、コンクリート用細骨材として有効利用することが社会的に求められている。本研究では、都市ごみ溶融スラグを細骨材の一部に用いた鉄筋コンクリート梁のひび割れ挙動について検討した。その結果、土木学会コンクリート標準示方書のひび割れ幅算定式は、溶融スラグを用いた RC 梁のひび割れ幅を安全側に評価することや、等曲げ区間の総ひび割れ幅は、溶融スラグの有無及びコンクリートの圧縮強度に影響されることなどが明らかになった。

キーワード：都市ごみ，溶融スラグ，RC 梁，曲げひび割れ幅，耐荷力

1. はじめに

近年，大量生産・大量消費・大量廃棄型の社会システムから資源循環型の社会システムへの転換が大きな流れとなりつつあるが，未だに大量の廃棄物が排出している。しかし，埋立地の逼迫や，有害物質の無害化の観点から，これらを高温溶融することが一般的になりつつある。

都市ごみや産業廃棄物を高温溶融すると，最終的に残滓としてスラグが発生する。溶融スラグの鉱物組成は処理物の内容によって異なるが，一般的に天然岩石の組成に近いものとなる。従って，溶融スラグを細骨材として有効利用することが考えられる。これまで，都市ごみ溶融スラグを用いたコンクリートの基本的な特性に関する研究^{1),2),3)}や，鉄筋コンクリートに関する力学的な研究^{4),5)}が行われてきたが，溶融スラグの物理的特性はその処理方法により異なることやそれらを用いた部材の力学的特性に関する基本的情報が極めて少ないことなどから，今後多くのデータの蓄積が望まれる。

本研究は，都市ごみ溶融スラグを細骨材の一

部に用いた鉄筋コンクリート（以下，RC と略記）梁のひび割れ挙動について検討することにした。

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 C1（密度 3.16g/cm^3 ，比表面積 $3270\text{cm}^2/\text{g}$ ）と C2（密度 3.16g/cm^3 ，比表面積 $3280\text{cm}^2/\text{g}$ ）を使用した。

粗骨材は，徳島県市場町産の砕石 G1（岩種：砂岩，最大寸法 20mm，密度 2.60g/cm^3 ，吸水率 1.39%，F.M. 6.81）と，砕石 G2（岩種：砂岩，最大寸法 20mm，密度 2.59g/cm^3 ，吸水率 1.50%，F.M. 7.03）および砕石 G3（岩種：砂岩，最大寸法 15mm，密度 2.58g/cm^3 ，吸水率 1.67%，F.M. 6.47）を G1 の F.M. と同じになるように混合したものを使用した。

細骨材は，香川県塩江産の砕砂 S1（岩種：花崗岩および風化花崗岩，密度 2.58g/cm^3 ，吸水率 1.38%，F.M. 2.94）と砕砂 S2（岩種：花崗岩および風化花崗岩，密度 2.57g/cm^3 ，吸水率 2.22%，F.M. 2.66）を使用した。

*1 香川大学大学院 安全システム建設工学専攻（正会員）

*2 香川大学 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

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、練混ぜ量の 75 リットルを 2 回連続で製造し、それらを混合したものを用いた。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、W/C を 30, 35, 40, 50 および 60%の 5 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 20 および 40%を溶融スラグで置換したものの 3 種類である。配合の決定は、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。なお、目標スランプおよび目標空気量は、8-1.0~8+2.5cm および 4.5±1.0%とした。

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覆した。

(2) 形状寸法と諸元

図-1 に、試験体の形状寸法と諸元を示す。試験体の全長は、2700mm とした。断面は全ての試験体で幅を 150mm, 高さ 300mm の矩形断面である。各試験体には、主鉄筋に SD295-D16 を 2 本ずつ用いた。せん断スパン比 (以下、a/d と略記) は 2.9 とし、SD295-D10 のせん断補強筋を 100mm の間隔で配置した。

各試験体の主鉄筋の下かぶり、横かぶりおよびあきはそれぞれ 32mm, 42 mm および 34mm とした。

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
その他	2.86

表-2 コンクリートの配合

記号	W/C (%)	スラグ置換率 (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)									高性能減水剤	AE剤 (100倍希釈)
				水 W	セメント C1	セメント C2	細骨材			粗骨材				
							砕砂 S1	砕砂 S2	溶融スラグ	砕石 G1	砕石 G2	砕石 G3		
60-00	60	0	46.5	170	283	-	-	831	0	967	-	-	1.40%	0.33%
60-00 [#]		0					834	-	0				0.45%	0.35%
60-20 [#]		20					675	-	169				0.60%	0.40%
60-40 [#]		40					512	-	341				0.45%	0.35%
50-00	50	0	45.1	340	-	-	785	0	967	-	-	1.00%	0.43%	
50-20 [#]		20				637	-	159				0.40%	0.40%	
50-40 [#]		40				483	-	322				0.50%	0.30%	
40-00		0				-	716	0				0.95%	0.30%	
40-00 [#]	40	0	42.8	425	-	719	-	0	967	-	-	0.55%	0.60%	
40-20 [#]		20				581	-	145				0.75%	0.40%	
40-40 [#]		40				441	-	294				0.40%	0.35%	
35-00		0				-	666	0				967	-	-
35-40	35	40	41.1	-	486	-	409	273	967	-	578	384	0.40%	0.60%
30-00		0				-	601	0					967	-
30-40	30	40	38.6	-	567	-	369	246	967	-	578	384	0.45%	1.20%
60-00 [※]		0				-	831	0					967	-
60-40 [※]	60	40	46.5	-	283	-	511	340	967	-	-	-	0.45%	0.35%

(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、最大荷重 200tN の荷重装置を用い、主に変位制御で行った。

長さ変化の測定は、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）、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、マイクロストレインゲージで行った。また、梁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。

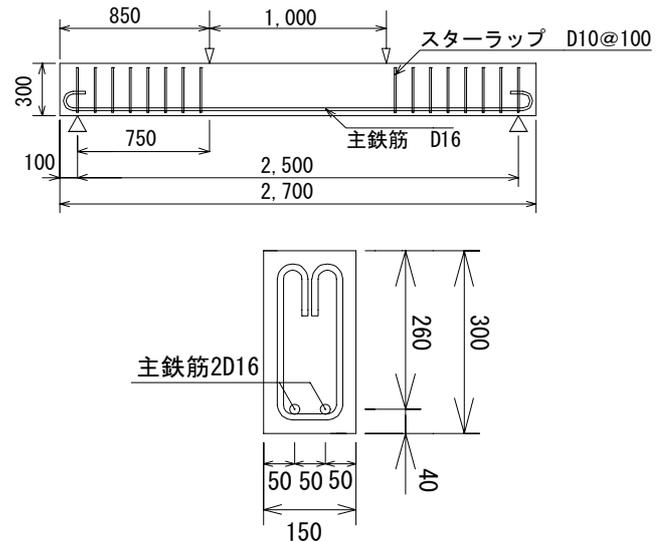


図-1 試験体の形状寸法および荷重位置

表-3 梁の耐力および材料強度に関する実験結果

3. 実験結果および考察

表-3 に、梁の耐力および材料強度に関する実験結果の一覧を示す。各梁におけるコンクリートの圧縮強度は、19.9~83.7N/mm² の範囲である。なお、低強度の RC 梁は試験材齢を 4 日とした。耐力の実験値は、梁の降伏曲げ耐力を意味する。なお、曲げ耐力の算定には、等価矩形応力ブロックを用いた。本実験の RC 梁の曲げ耐力の理論値は、実験値をほぼ妥当に評価している。

記号	D16 (主鉄筋)		梁の耐力 (kN)		実験値/理論値	コンクリートの圧縮強度 (N/mm ²)	試験材齢 (日)
	弾性係数 (N/mm ²) × 10 ⁵	鉄筋の降伏強度 (N/mm ²)	実験値 (降伏曲げ耐力)	理論値 (降伏曲げ耐力)			
60-00	1.87	356.3	90	93	0.97	41.4	28
60-00 [#]	1.86	359.8	92	93	0.99	35.8	28
60-20 [#]	2.10	378.9	94	98	0.96	35.9	28
60-40 [#]	1.86	359.8	92	93	0.99	32.2	28
50-00	1.87	356.3	92	93	0.99	48.5	28
50-20 [#]	1.86	359.8	93	94	0.99	41.0	28
50-40 [#]	1.97	377.6	97	99	0.98	44.2	28
40-00	1.87	356.3	94	95	0.99	62.7	28
40-00 [#]	1.91	376.2	94	100	0.94	60.5	28
40-20 [#]	2.10	378.9	94	100	0.94	56.1	28
40-40 [#]	1.86	359.8	93	95	0.98	54.9	28
35-00	1.87	362.1	96	97	0.99	69.0	28
35-40	1.87	362.1	96	96	1.00	65.6	28
30-00	1.87	362.1	96	97	0.99	83.7	28
30-40	1.87	362.1	96	97	0.99	76.8	28
60-00 ^{**}	1.88	369.6	90	92	0.98	22.3	4
60-40 ^{**}	1.88	369.6	88	91	0.97	19.9	4

表-4 ひび割れに関する実験結果

記号	鉄筋降伏荷重の45%に相当する実験結果				鉄筋降伏荷重の65%に相当する実験結果				鉄筋降伏荷重の85%に相当する実験結果			
	ひび割れ本数 (本)		平均ひび割れ幅 (mm)		ひび割れ本数 (本)		平均ひび割れ幅 (mm)		ひび割れ本数 (本)		平均ひび割れ幅 (mm)	
	等曲げモーメント区間	全区間	等曲げモーメント区間 側面鉄筋位置	等曲げモーメント区間 側面鉄筋位置	等曲げモーメント区間	全区間	等曲げモーメント区間 側面鉄筋位置	等曲げモーメント区間 側面鉄筋位置	等曲げモーメント区間	全区間	等曲げモーメント区間 側面鉄筋位置	等曲げモーメント区間 側面鉄筋位置
60-00	6	7	0.088	0.531	6	9	0.158	0.949	7	12	0.196	1.373
60-00 [#]	6	11	0.114	0.632	7	15	0.153	1.072	8	16	0.187	1.496
60-20 [#]	8	11	0.083	0.657	8	15	0.126	1.010	8	17	0.177	1.419
60-40 [#]	7	9	0.079	0.556	9	14	0.117	1.049	12	17	0.124	1.489
50-00	5	9	0.055	0.274	7	12	0.101	0.708	9	15	0.114	1.025
50-20 [#]	7	12	0.068	0.474	8	16	0.111	0.885	9	18	0.146	1.315
50-40 [#]	6	10	0.085	0.513	7	12	0.143	0.908	7	14	—	—
40-00	7	10	0.052	0.361	8	14	0.109	0.871	8	14	0.151	1.206
40-00 [#]	6	12	0.075	0.448	8	13	0.100	0.800	9	18	0.126	1.181
40-20 [#]	7	11	0.089	0.632	7	13	0.133	0.930	8	15	0.170	1.353
40-40 [#]	7	11	0.076	0.531	7	13	0.138	0.967	7	16	0.192	1.345
35-00	7	10	0.091	0.637	9	14	0.123	1.108	9	15	0.170	1.535
35-40	7	9	0.079	0.554	8	12	0.139	1.109	10	15	0.157	1.568
30-00	7	8	0.067	0.469	11	17	0.100	1.099	11	19	0.132	1.460
30-40	5	7	0.069	0.344	8	14	0.124	0.991	9	16	0.160	1.440
60-00 ^{**}	7	9	0.081	0.562	8	13	0.128	1.023	9	16	0.154	1.390
60-40 ^{**}	9	12	0.061	0.550	9	15	0.107	0.963	9	17	0.151	1.357

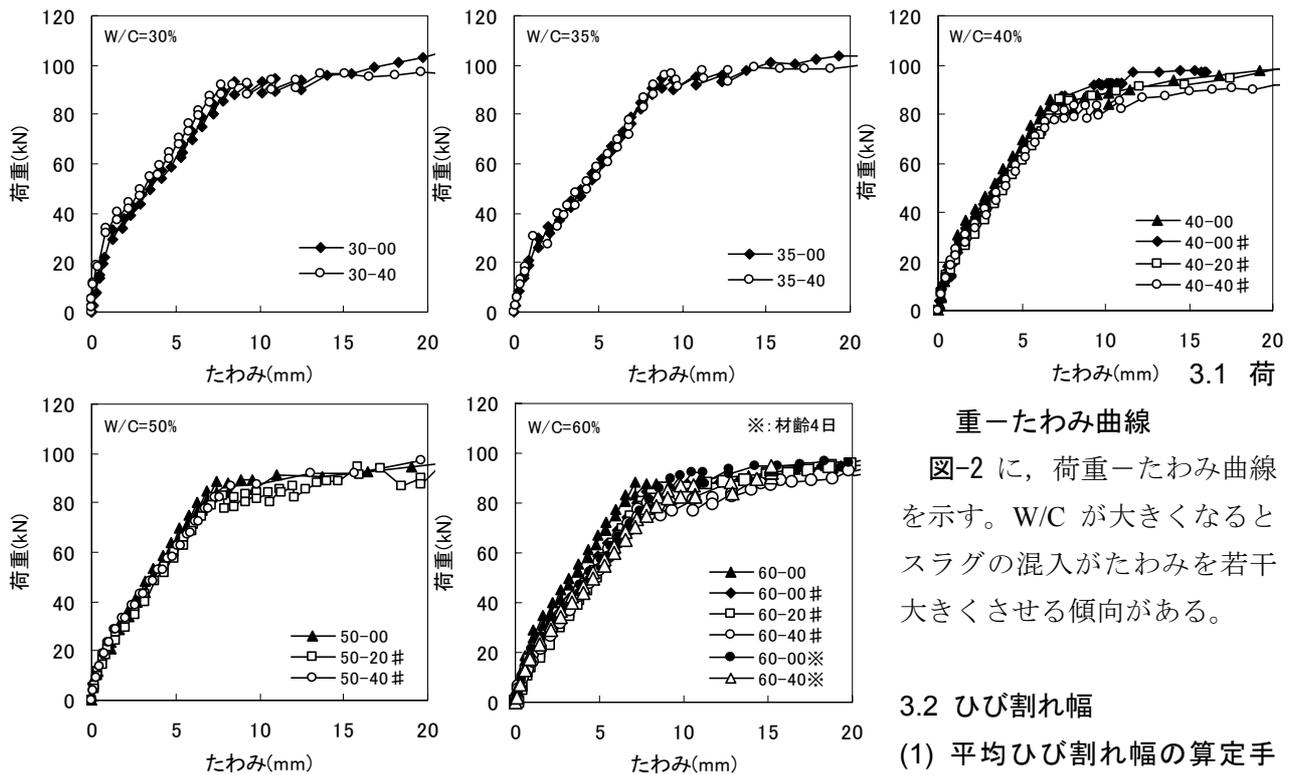


図-2 荷重-たわみ曲線

表-4 に、ひび割れに関する実験結果の一覧を示す。ひび割れ本数は、等曲げ区間および全区間の側面鉄筋位置で観察されたひび割れの本数である。平均ひび割れ幅は、等曲げ区間の側面鉄筋位置におけるひび割れ幅の平均値を表す。総ひび割れ幅は、等曲げ区間内の側面鉄筋位置における各ひび割れ幅の和である。

なお、表-4 には、鉄筋降伏荷重の 45%、65% および 85% に相当する値を示したが、これについては後述する。

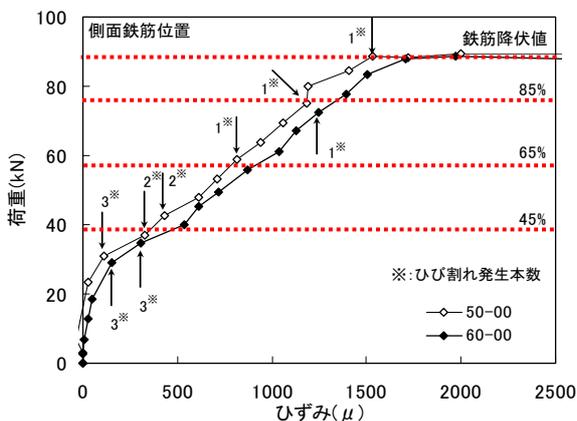


図-3 荷重-ひずみ曲線

3.1 荷重-たわみ曲線

図-2 に、荷重-たわみ曲線を示す。W/C が大きくなるとスラグの混入がたわみを若干大きくさせる傾向がある。

3.2 ひび割れ幅

(1) 平均ひび割れ幅の算定手法

図-3 に、荷重-ひずみ曲線の一例を示す。同図に示すように、載荷初期の段階において、多数のひび割れが発生するが、荷重の増加に伴い、付加的に新たなひび割れも発生している。つまり、荷重レベルが相当高い段階でも完全な定常状態には至らない挙動となっている。そこで本研究では、降伏荷重の 45%、65% および 85% における平均ひび割れ幅を算定することとした。

(2) 平均ひび割れ幅

図-4 に、圧縮強度と平均ひび割れ幅の関係を示す。図からわかるように、平均ひび割れ幅でスラグ置換率およびコンクリートの圧縮強度の影響について一般化することが困難な結果となった。

土木学会⁶⁾では、五角らの研究⁷⁾を基にコンクリート標準示方書のひび割れ幅算定式の係数であるコンクリートの品質の影響を定式化している。この式は、圧縮強度が低い場合、平均ひび割れ幅を著しく増大させるが、本実験では必ずしもそのような特性とはなっていない。この式は、RC 供試体の両引き試験の結果に基づくものであり、梁試験におけるひび割れ幅と直結する

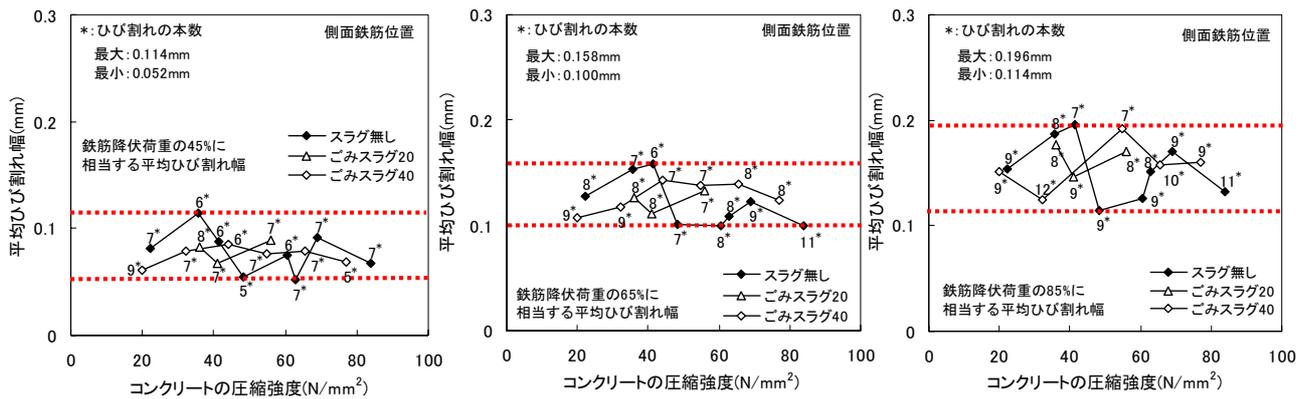


図-4 圧縮強度と平均ひび割れ幅の関係

ものではないことを暗示している。

図-5 に、側面鉄筋位置における平均ひび割れ幅の実験値と、ひび割れ幅算定式⁸⁾による鉄筋の平均ひずみを用いた計算値の比を示す。全体的に載荷初期の平均ひび割れ幅は、危険側にあるが、定常状態に近づくと理論値に対する実験値の比は、0.55~0.90 の値でほぼ一定となる。

(3) 総ひび割れ幅

図-6 に、圧縮強度と等曲げ区間の総ひび割れ幅の関係を示す。コンクリートが低強度および高強度における総ひび割れ幅は、強度の中間領

域におけるものよりも大きくなる傾向がある。

低強度ではコンクリートの引張強度が小さいこと、高強度ではコンクリートと鉄筋の付着が良く応力再分配されやすいことがひび割れ分散性を高め、ひび割れ本数を増加させたものと考えられる。ひび割れ本数の増加は、結果的に総ひび割れ幅を増加させる傾向があることが分かった。

(4) 測定位置の影響

側面鉄筋位置における鉄筋降伏荷重の 65%に相当する平均ひび割れ幅に対する最下縁および

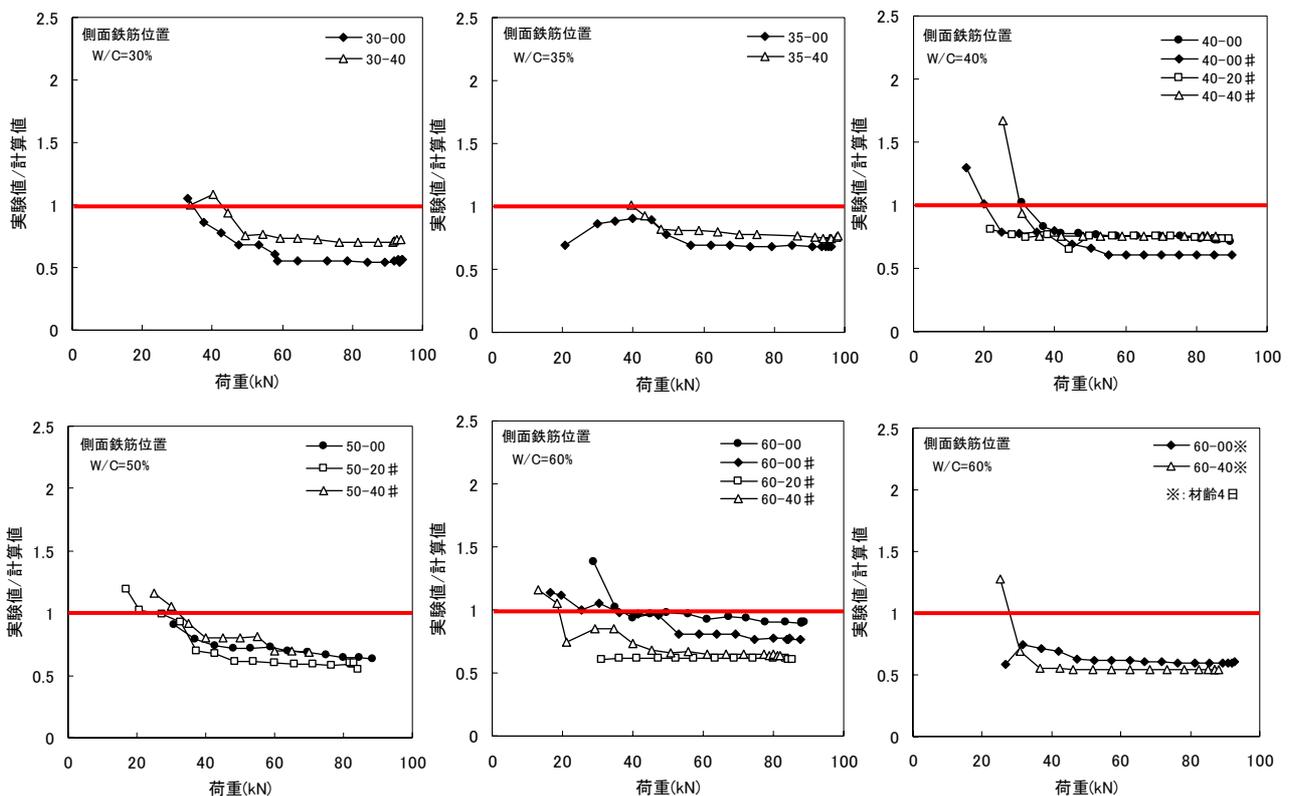
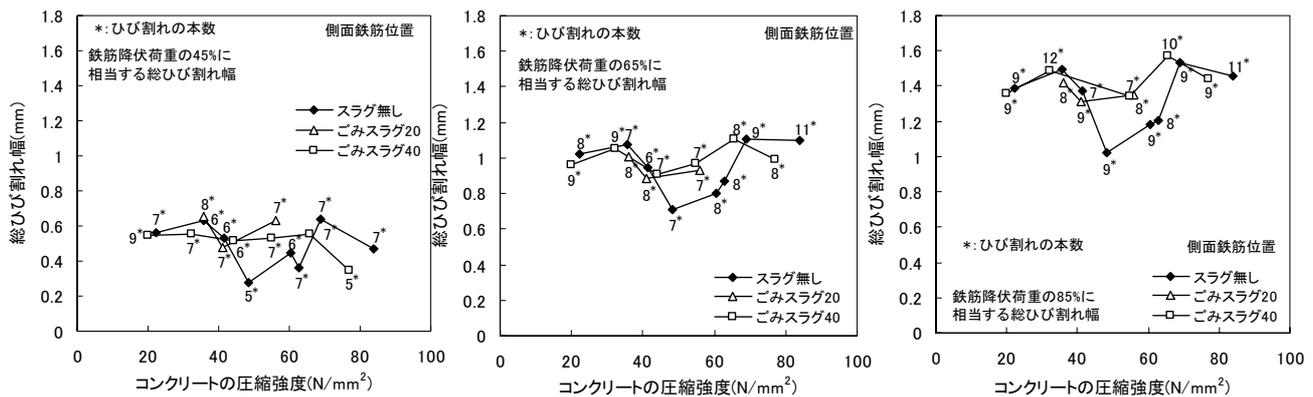


図-5 平均ひび割れ幅の計算値に対する実験値



図一6 圧縮強度と総ひび割れ幅の関係

底面鉄筋位置におけるその比は、それぞれ 1.14 ~1.28 および 0.95~1.26 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) 溶融スラグを用いた RC 梁の降伏曲げ耐力は、等価矩形応力ブロックを用いる一般的な方法で評価できる。
- (2) 溶融スラグを用いた RC 梁のたわみは、水セメント比の増加とともにたわみを増加させる傾向がある。
- (3) 溶融スラグ混入の有無及びコンクリート強度のひび割れ挙動に及ぼす影響を平均ひび割れ幅で評価することはそのばらつきから困難であるが、全体として見ると土木学会コンクリート標準示方書のひび割れ幅算定式は、溶融スラグを用いた RC 梁のひび割れ幅を安全側に評価する。
- (4) 等曲げ区間の総ひび割れ幅は、溶融スラグの有無及びコンクリートの圧縮強度に影響される結果となったが、その複雑なメカニズムについては今後の課題である
- (5) RC 梁の平均ひび割れ幅は、側面鉄筋位置、側面最下縁および底面鉄筋位置により異なる。

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。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 北辻政文、田中礼治、遠藤孝夫、鳴海繁実：都市ごみ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.89-97, 2002.
- 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部材の力学的特性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol25, pp.379-384，2002.
- 4) 田中礼治、北辻政文、東海隼人、大芳賀義喜：鉄筋コンクリート構造における都市ごみ溶融スラグの利用の可能性に関する実験的研究、コンクリート工学論文集，Vol.13, No.2, pp.109-116, 2002.
- 5) 崔正龍，大芳賀美喜，北辻政文，田中礼治：都市ごみ溶融スラグを骨材として用いた鉄筋コンクリート柱の曲げせん断実験研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.25, No.2, pp.271-276，2003.
- 6) 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，2001.
- 7) 五角亘，下村匠，丸山久一：コンクリートの品質が RC 部材のひび割れ幅に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.23, No.3, pp.1333-1338，2001.
- 8) 土木学会：コンクリート標準示方書，2002.