

論文 産業廃棄物溶融スラグを用いた RC 梁における鉄筋の付着挙動のモデル化としての偏心両引き試験の適用性

松家 武樹^{*1}・堺 孝司^{*2}・中村 俊之^{*3}・村上 祐治^{*4}

要旨：本研究は、RC 梁のひび割れ区間をモデル化した要素供試体を用いた偏心両引き試験を行い、RC 梁における鉄筋の付着挙動と比較し、本要素供試体の、産業廃棄物溶融スラグを用いた RC 梁への適用性について検討した。その結果、本要素供試体と RC 梁における鉄筋の付着挙動は概ね一致しており、本要素供試体による RC 梁における鉄筋の付着挙動を把握できることが明らかとなった。

キーワード：偏心両引き試験, RC 梁, 付着応力, 産業廃棄物溶融スラグ, ブリーディング

1. はじめに

鉄筋コンクリート部材における鉄筋の付着特性は、RC 部材のひび割れ挙動に大きな影響を及ぼす。発生したひび割れは、部材全体の変形挙動に影響をもたらすことから、鉄筋とコンクリートの付着挙動を適切に把握する必要がある。

これまで、コンクリートと鉄筋の付着特性に関する研究は、マッシュパンのコンクリートを対象にした鉄筋の付着応力-すべり関係の定式化が、島らにより行われている¹⁾。一方、鉄筋コンクリート梁（以下、RC 梁と略記）を対象にした鉄筋の付着特性に関する研究では、RC 梁のひび割れ区間をモデル化した要素供試体における鉄筋の付着特性に関する検討^{2),3),4)}が行われている。しかしながら、これらは実際の RC 梁における鉄筋の付着挙動との比較がほとんど行われていない。そのため、要素供試体による鉄筋の付着挙動が RC 梁における鉄筋の付着挙動を適切に現していない可能性がある。

そこで本研究では、RC 梁のひび割れ区間をモデル化した要素供試体を用いた偏心両引き試験を行い、著者らの既報⁵⁾で論じた産業廃棄物溶融スラグを用いた RC 梁における鉄筋の付着挙動

と比較し、本要素供試体の、RC 梁への適用性について検討した。なお、これまで著者らは、産業廃棄物溶融スラグをコンクリートおよび RC 梁へ適用するための基本的な研究^{6),7),8)}を行ってきた。そのため本研究においても、豊島産業廃棄物溶融スラグ（以下、スラグと略記）を用いたコンクリートと鉄筋の付着特性に及ぼす影響についても検討した。

2. 実験概要

本研究における実験は、2 つのシリーズに区分した。series I は、スラグ置換率および圧縮強度の影響を検討したものである。なお、コンクリートの圧縮強度は、水セメント比および試験材齢で調整し、 $24.7 \sim 61.7 \text{ N/mm}^2$ の範囲で変化させた。series II では、水セメント比 30%における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検討したものである。なお、コンクリートの圧縮強度は、試験材齢で調整し、 $29.5 \sim 75.0 \text{ N/mm}^2$ の範囲で変化させた。

2.1 使用材料

表-1 に、本研究で使用したコンクリートの

*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）間組 技術・環境本部技術研究所 工博（正会員）

表－1 使用材料

材料	種類	記号	品質
セメント	普通 ポルトランドセメント	－	密度：3.15g/cm ³ ，比表面積：3470cm ² /g
細骨材	砂岩砕砂	－	表乾密度：2.55g/cm ³ ，吸水率：1.23%， 粗粒率：2.68，微粒分量：2.31%， 実積率：62.9%，粒形判定実積率：53.6%
	産業廃棄物 熔融スラグ	－	表乾密度：2.78g/cm ³ ，吸水率：0.97%， 粗粒率：2.72，微粒分量：0.79%， 実積率：61.1%，粒形判定実積率：55.5%
粗骨材	砂岩碎石	A	最大寸法：20mm，表乾密度：2.57g/cm ³ ， 吸水率：1.16%，粗粒率：7.22， 実積率：59.6%
		B	最大寸法：15mm，表乾密度：2.55g/cm ³ ， 吸水率：2.50%，粗粒率：6.33， 実積率：59.1%
混和剤	高性能減水剤	－	ポリカルボン酸エーテル系
	減水剤		ポリオール複合体
	AE助剤		変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤

材料の種類および品質を示す。スラグは、香川県豊島の土砂を含む産業廃棄物を約 1340℃で熔融し、水砕処理および破碎加工により粒度調整がなされているものを使用した。

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%の試験室で行った。また、容量 100 リットルの強制二軸ミキサを用いて、80 リットルで製造したものを用いた。

series I におけるコンクリートの配合は、水セメント比を 40，50 および 60%の 3 種類とし、細骨材としてスラグを混入しないものと、細骨材の質量の 40%および 100%をスラグで置換したもの 3 種類である。series II におけるコンクリートの配合は、水セメント比を 30%とし、細骨材としてスラグを混入しないものと、細骨材の質量の 100%をスラグで置換したもの 2 種類であ

る。配合の決定は、混和剤の添加量によって調整した。表－2 に、コンクリートの配合，材料特性および試験材齢を示す。

2.3 供試体

(1) 製作方法

コンクリートの打設は、鉄筋を水平に設け、鉄筋の縦リブを供試体側面方向に配置して行った。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で覆い、その外側を更にビニールで被覆した。

(2) 形状寸法および緒言

本要素供試体である偏心両引き供試体(以下、供試体と略記)は、RC 梁のひび割れ区間をモデル化したものである。なお、本要素供試体における引張鉄筋のかぶり、鉄筋径、および打ち込み深さは、著者らがこれまで検討してきた RC 梁⁵⁾と同じ条件である。図－1 に、供試体の形状寸法を示す。供試体のコンクリートの断面は、100×100mm であり、供試体長さは 300mm である。供試体底面から 50mm の位置には D16 の異形鉄筋を、供試体の両端より張り出すように埋設した。なお、本研究で使用した鉄筋の弾性係数および降伏強度は 1.81×10⁵N/mm² および 385.1 N/mm² である。

(3) 載荷方法および測定項目

図－2 に、両引き試験の外観図を示す。載荷

表－2 コンクリートの配合，材料特性および試験材齢

SERIES No.	W/C Ⅰ スラグ置換率	W/C (%)	スラグ 置換率 (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)											スランブ	空気量	圧縮強度	弾性係数	試験材齢			
					水	セメント	細骨材		粗骨材		高性能減水剤		減水剤 (4倍希釈)		AE助剤 (100倍希釈)								
							砕砂	スラグ	砕石 A	砕石 B	C×% (kg/m ³)	C×% (kg/m ³)	C×% (kg/m ³)	C×% (kg/m ³)									
series Ⅰ	60-00	60	0	43.5	170	283	770	0	303	710	—	—	1.70	4.81	0.50	1.42	7.1	4.7	28.0	21.2	9		
	60-40		40				478	319			—	—	1.60	4.53	0.20	0.57	7.2	3.9	26.2	21.7			
	60-100		100				0	840			—	—	1.40	3.96	0.00	0.00	7.0	4.5	24.7	23.3			
	50-00	50	0	42.0		340	724	0			—	—	1.60	5.44	0.50	1.70	7.3	4.5	42.0	25.8	28		
	50-40		40				449	330			—	—	1.60	5.44	0.30	1.02	8.1	4.9	40.6	25.7			
	50-100		100				0	790			—	—	1.50	5.10	0.00	0.00	7.2	4.1	41.1	27.4			
	40-00	40	0	39.6		425	656	0			0.75	3.19	—	—	0.50	2.13	10.5	5.5	60.4	28.0	28		
	40-40		40				425	407			0.30	1.28	—	—	0.25	1.06	7.1	3.6	61.7	28.5			
	40-100		100				0	715			0.25	1.06	—	—	0.05	0.21	8.1	5.0	53.2	29.0			
series Ⅱ	30-00	30	0	35.1		567	541	—			0.80	4.54	—	—	0.85	4.82	10.5	5.2	30.8	19.3	2		
							7.2	5.2			52.0	—	4										
	30-100	30	100	35.1			567	—			590	0.50	2.84	—	—	0.65	3.69	9.7	3.6	75.0	29.2	28	
																		10.5	5.5	29.5	21.6	2	
																		9.7	5.2	44.8	—	4	

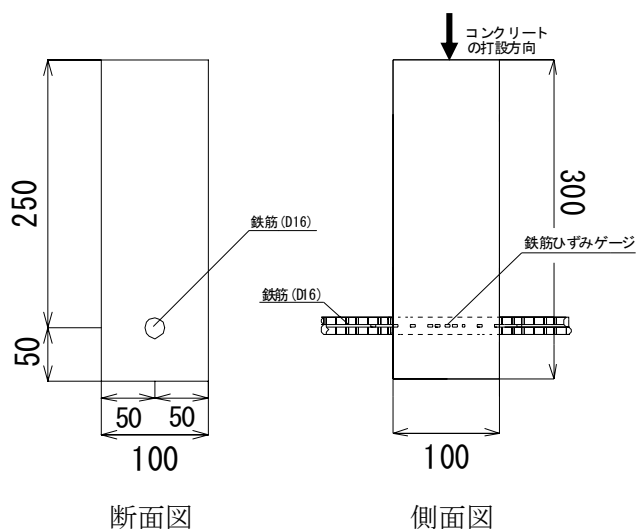


図-1 供試体の形状寸法

は、供試体に埋設した鉄筋を垂直にした状態で、最大荷重 500kN の万能試験機のつかみ具で鉄筋を固定し、軸引張力を加え、単調載荷の荷重制御で行なった。載荷速度は、約 167N/sec である。なお、図-2 に示すように、本研究では、圧縮パネを設置している。これは、コンクリートの自重モーメントをパネの反力で支え、鉄筋に偏心荷重を作用させないためである。また、本実験では同図に示すように、載荷端の上下に変位計を設置し、鉄筋の変位を計測した。

鉄筋のひずみの測定は、ゲージ長 1mm、ベース長 4.2mm、ベース幅 1.5mm のひずみゲージを、鉄筋径の 0.5 倍および 1.0 倍の間隔で鉄筋リブの表裏に貼付して行った。図-3 に、ひずみゲージの貼付位置を示す。なお、本実験では、ひずみゲージなどにより覆われた鉄筋の面積は、ひずみゲージを貼付した区間の鉄筋表面積に対して、10% に満たないことから、これらがコンクリートと鉄筋の付着に及ぼす影響は小さいと判断した。

3. 実験結果および考察

3.1 コンクリートの材料学的特性

図-4 に、スラグ置換率とブリーディング率の関係を示す。スラグ置換率の増加と共に、ブリーディング率は増加する傾向にある。これは、スラグを用いると、スラグを用いない場合に比べて、細骨材の密度が相対的に大きくなったこと、およ

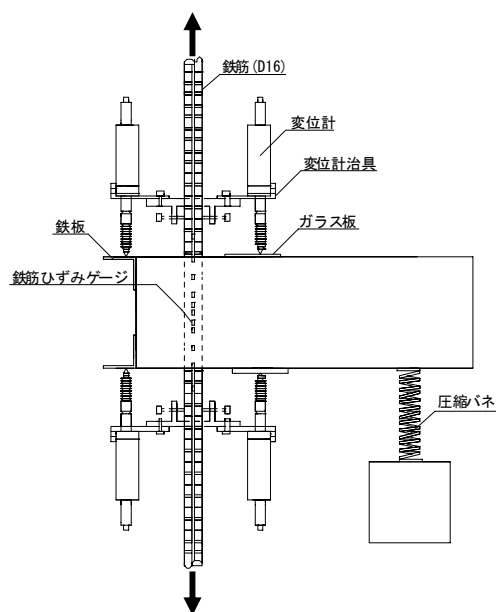


図-2 両引き試験の外観図

び保水性が低下したことに起因する。なお、スラグ置換率の増加に伴うブリーディング率の増加は、水セメント比の大きい場合に顕著である。

図-5 に、水セメント比および試験材齢を共通項とした場合における、スラグ無混入とスラグ混入したコンクリートの圧縮強度の関係を示す。スラグ置換率 40% のコンクリートの圧縮強度は、何れの強度領域においても、スラグの影響はほとんどない。一方、series I および series II におけるスラグ置換率 100% のコンクリートの圧縮強度は、高強度領域においてスラグの影響が明確になっている。コンクリートの圧縮強度が高い場合、スラグとセメント硬化体の付着に加え、スラグの脆性的な特性による影響が、このような結果をもたらしたものと考えられる。

図-6 に、水セメント比および試験材齢を共通項とした場合における、コンクリートの圧縮強度と割裂引張強度の関係と、コンクリート標準示方書の「構造性能照査編」⁹⁾ および「施工

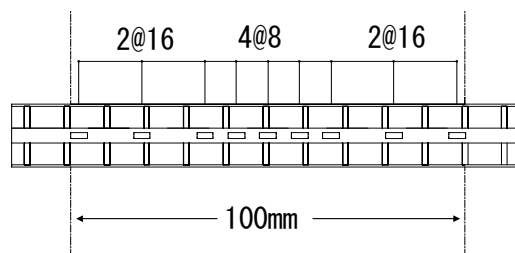


図-3 ひずみゲージの貼付位置

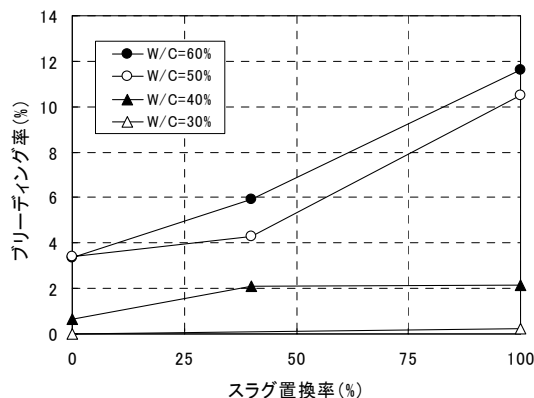


図-4 ブリーディング率

編」¹⁰⁾に示されている式による計算結果も示す。全体として、本実験結果は、各示方書式よりも大きな値となっている。しかし、series I のスラグ置換率 100%におけるコンクリートの圧縮強度は、各式の結果よりも若干小さくなっている。

3.2 鉄筋ひずみの分布

図-7 に、鉄筋降伏荷重の 25%, 45%, 65%, 85%および 95%における平均鉄筋ひずみの分布の一例を示す。ここでは、著者らが既報⁵⁾で論じた RC 梁のひび割れ区間における平均鉄筋ひずみの分布も示す。なお、ここに示す平均鉄筋ひずみとは、鉄筋リブの表裏に貼付したひずみゲージで得られた値を平均したものである。同図には、平均鉄筋ひずみのデータを二次放物線で回帰した線も示す。実線は偏心両引き供試体、点線は RC 梁の結果を示している。

荷重レベルが高い場合における偏心両引き供試体および RC 梁の平均鉄筋ひずみの値からなる二次放物線は、下に凸の関係が得られている。また、何れの平均鉄筋ひずみも、供試体中央部もしくはその近傍で最も小さな値となっている。一方、荷重レベルが低い場合における偏心両引き供試体の平均鉄筋ひずみの値からなる二次放物線は、必ずしも下に凸の関係が得られていない。なお、荷重レベルが低い場合においては、RC 梁と偏心両引き供試体の平均鉄筋ひずみの値は異なるが、荷重レベルが大きくなるとその値は、ほぼ同等となる。

3.3 平均付着応力

RC 梁における供試体中央部（以下、基準点と

略記)から任意の位置までの間における平均付着応力は、式 (1) で求められる。

$$\bar{\tau} = A_s E_s (\varepsilon_{s1} - \varepsilon_{s2}) / ul \quad (1)$$

ここに、 A_s : 鉄筋の公称断面積 (mm^2)、 E_s : 鉄筋の弾性係数 (N/mm^2)、 ε_{s1} : 基準点から任意の位置の鉄筋ひずみ、 ε_{s2} : 基準点の鉄筋ひずみ、 u : 鉄筋の公称周長 (mm)、 l : 片側付着長さ (mm) である。

(1) 圧縮強度の影響

図-8 に、偏心両引き供試体および RC 梁で得られた平均付着応力と圧縮強度の関係を示す。全体として、何れの供試体においても、スラグの有無に拘らず、圧縮強度の増加と共に、平均付着応力は増大する傾向にある。また、series I の同一強度における偏心両引き供試体と RC 梁の平均付着応力を比較すると、ほぼ同等の値となっている。なお、低強度領域におけるスラグ置換率 100%における平均付着応力は、他のものと比して小さ

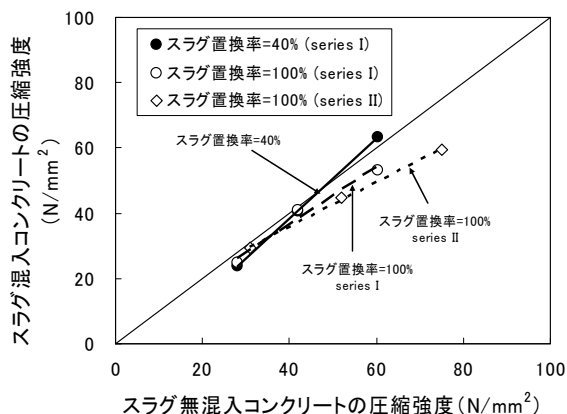


図-5 スラグ無混入とスラグ混入したコンクリート圧縮強度の関係

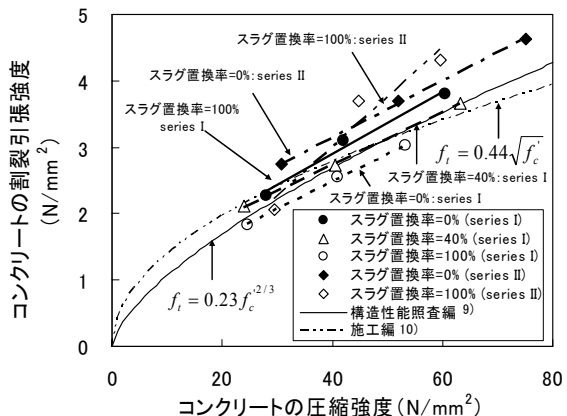


図-6 コンクリートの圧縮強度と割裂引張強度の関係

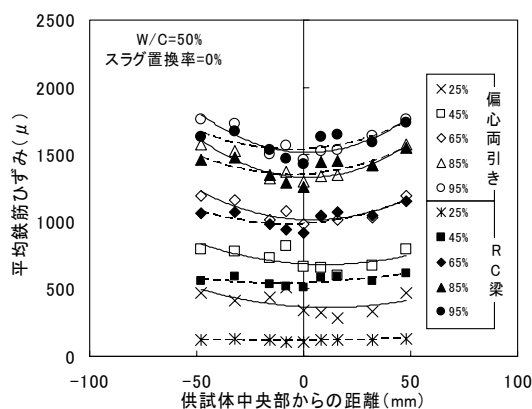


図-7 平均鉄筋ひずみの分布

な値となっているが、この原因は、後述するブリーディングの影響によるものである。なお、series II における偏心両引き供試体の平均付着応力は、他のものと比して大きな値となっているが、この原因はブリーディングが少ないことに起因する。

(2)ブリーディングの影響

図-9 に、偏心両引き供試体および RC 梁で得られた平均付着応力とブリーディング率の関係を示す。同図には、RC 梁および偏心両引き供試体の series I におけるデータを対数回帰した線を示している。なお、水セメント比 30% におけるデータは、ブリーディングがほとんど発生しないことから、対数回帰のデータから除外した。偏心両引き供試体の水セメント比 30% におけるデータは、付加的な情報としてプロットする。何れの供試体においても、スラグの有無に関係なく、平均付着応力は、ブリーディング率と相関関係がある。このことは、コンクリートと鉄筋の界面に存在する遷移帯の特性が付着特性に大きく影響することを意味する。なお、本要素供試体である偏

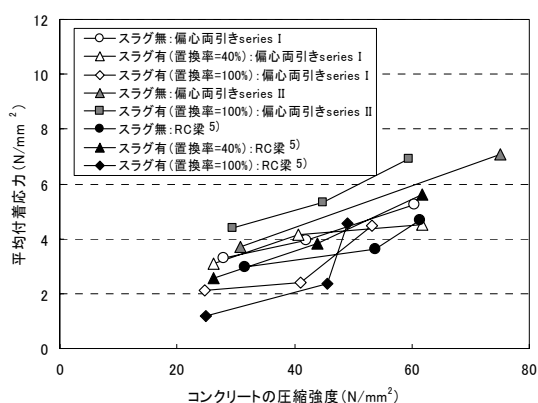


図-8 平均付着応力と圧縮強度の関係

心両引き供試体と RC 梁における鉄筋の付着挙動は概ね一致していることから、本研究で示す供試体は、RC 梁における鉄筋の付着挙動の把握に有用であると言える。

3.4 付着応力-すべり関係

本研究では、図-7 に示すように、鉄筋ひずみのデータを 2 次放物線で回帰し、その回帰した放物線の傾きから、付着応力を算定した。すべり量は、供試体中央部から任意の点までの鉄筋ひずみを積分したものである。

図-10 に、鉄筋降伏荷重の 5%、25%、45%、65%、85% および 95% における供試体中央部から 3D 離れた位置の付着応力-すべり関係（以下、 τ -S 関係と略記）の一例を示す。同じすべり量に対する付着応力を比較した場合、スラグ置換率 100% の付着応力は、スラグ無混入に比して、小さな値となっている。これは、前述したブリーディングの影響と考えられる。同図には、 τ -S 関係に鉄筋ひずみの影響を組み込んだ島ら¹⁾の提案した式による計算結果も示す。スラグ置換率 100% の結果が島らの提案式の計算結果と異なっているが、これは島らの提案した式中において、ブリーディングの影響が適切に評価されていないことに起因する。

3.5 鉄筋のすべりとコンクリートの伸びの関係

図-11 に、変位計により計測した供試体端面におけるコンクリートの伸び量と鉄筋のひずみゲージから算定される鉄筋のすべり量の関係を示す。コンクリートの伸び量はひずみゲージから算定されるすべり量と同程度の値となった。これ

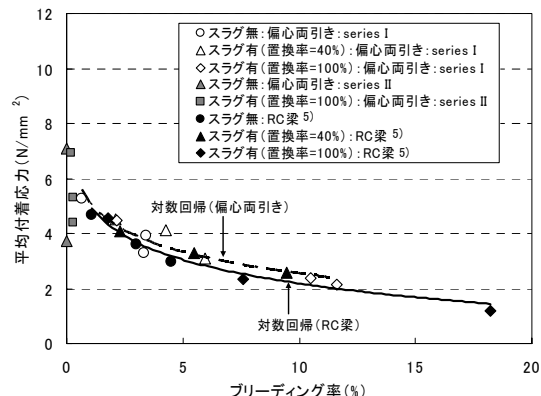


図-9 平均付着応力とブリーディング率の関係

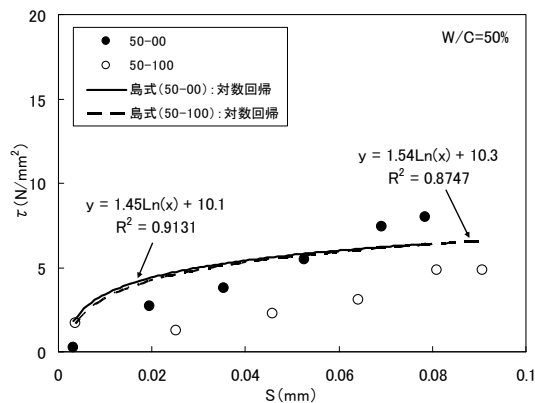


図-10 付着応力-すべり関係

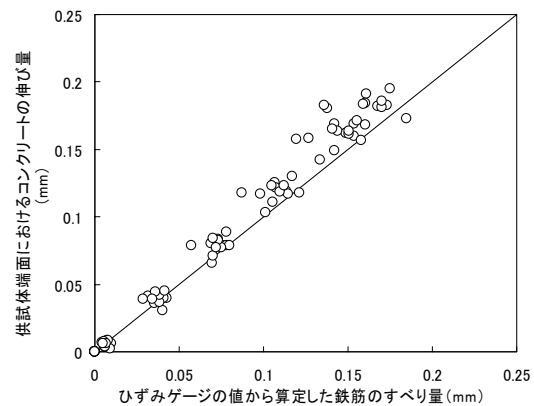


図-11 鉄筋のすべりとコンクリートの伸びの関係

は、鉄筋の抜け出し作用が供試体端面のコンクリートの伸び量に影響を及ぼすことを意味する。

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) 水セメント比の大きい場合におけるスラグの利用は、ブリーディング量を著しく増加させる。
- (2) コンクリートの圧縮強度および割裂引張強度に及ぼすスラグの影響は、高強度領域において顕著である。
- (3) 鉄筋の平均付着応力は、コンクリートの圧縮強度およびブリーディングの影響を受ける。
- (4) 偏心両引き供試体は、RC 梁における鉄筋の付着挙動の把握に適用できる。
- (5) 溶融スラグの利用に伴うブリーディングの増大は、偏心両引き供試体における鉄筋の付着応力-すべり関係に影響を及ぼす。

参考文献

- 1) 島弘, 周礼良, 岡村甫: マッシブなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係, 土木学会論文集, No.378/V-6, pp.165-174, 1987.
- 2) 壹岐直之, 清宮理: コンクリートの軸方向応力を考慮した異形鉄筋の局所付着特性, 土木学会論文集, No.676/V-51, pp.65-76, 2001.5.
- 3) 松本隆明, 檜貝勇, 斉藤成彦: かぶり厚が異形鉄筋の付着性状に及ぼす影響に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集,

Vol.26, No.2, 2004.

- 4) 奇特隆宏, 檜貝勇, 斉藤成彦: 異形鉄筋の付着応力-すべり関係に及ぼすかぶり厚と鉄筋直径の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.2, 2005.
- 5) 松家武樹, 堺孝司: 産業廃棄物溶融スラグを用いた鉄筋コンクリート梁における鉄筋の付着特性, 土木学会第 61 回年次学術講演会概要集 V, pp.1149-1150, 2006.
- 6) 松家武樹, 堺孝司, 錦織和紀郎, 横山卓哉, 西本祐三, 小野寺誠司: 各種溶融スラグのコンクリートへの適用における磨砕の効果に関する基礎的研究, 土木学会論文集 E, Vol.62, No.1, pp.174-185, 2006.2
- 7) 松家武樹, 堺孝司, 渡辺健也, 草薙悟志: 産業廃棄物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, コンクリート工学論文集, Vol.16, No.3, pp.39-48, 2005.9
- 8) 松家武樹, 堺孝司, 中村俊之, 草薙悟志: 産業廃棄物溶融スラグを用いた鉄筋コンクリート梁の曲げおよびせん断耐荷挙動, 土木学会論文集 E, Vol.62, No.1, pp.159-173, 2006.2
- 9) 土木学会: コンクリート標準示方書[構造的な性能照査編], 2002.3
- 10) 土木学会: コンクリート標準示方書[施工編], 2002.3

謝辞

本実験は、香川大学大学院生の佐藤淳一氏の協力を得て行った。ここに、深甚の謝意を表する。