

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両引き試験の適用性

佐藤 淳一*1・堺 孝司*2・松家 武樹*3・中村 俊之*4

要旨：本研究は、RC 梁のひび割れ区間をモデル化した、コンクリート断面の中央に鉄筋を埋め込んだ要素供試体を用いた両引き試験を行い、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ブリーディングが比較的小さな場合において一致するが、それが多くなると本要素供試体は RC 梁における鉄筋の付着挙動の把握に適用できないことが示された。

キーワード：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発生する曲げひび割れの性状は、コンクリートの強度や鉄筋の種類などに依存する^{1),2)}。換言すれば、ひび割れの分散性やひび割れ幅などは、コンクリートと鉄筋の付着特性が支配的となる。そのため、コンクリートと鉄筋の付着は、RC 部材のひび割れ挙動の本質的な問題として認識されている。

コンクリートと鉄筋の付着特性に関する研究は、主として、対象とする実際の建造物の挙動を出来る限り、実際に近い状態で予測することを目的にした、要素供試体による検討^{3),4),5),6),7)}が行われている。

これまで RC 梁のひび割れ区間をモデル化した要素供試体としては、一般に、コンクリート断面の中央に鉄筋を埋め込んだ両引き試験が行われている。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両引き試験を行い、松家らの既報⁸⁾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、コンクリート断面中央に鉄筋を配置した要素供試体の、RC 梁への適用性について検討した。

なお、香川県豊島では、汚染土壌を含む産業廃棄物の高温溶融処理を行っており、その処理に伴い残滓としてスラグが発生している。このようにして生産された溶融スラグは無筋コンクリートや二次製品用の細骨材として利用されるようになってきたが、鉄筋コンクリート部材への利用も期待されている。そのため、本研究では、コンクリート用細骨材として用いた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検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

表-1 に、本研究で使用したコンクリートの材料の種類および品質を示す。

*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)

*4 香川県 環境森林部廃棄物対策課

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	A	密度：3.16g/cm ³ ，比表面積：3290cm ² /g
		B	密度：3.16g/cm ³ ，比表面積：3290cm ² /g
細骨材	砂岩砕砂	A	表乾密度：2.55g/cm ³ ，吸水率：2.24%，粗粒率：2.72，微粒分量：3.59%，実積率：63.5%，粒形判定実積率：55.3%
		B	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%
	スラグ	A	表乾密度：2.78g/cm ³ ，吸水率：0.75%，粗粒率：2.68，微粒分量：0.18%，実積率：61.5%，粒形判定実積率：56.1%
		B	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	砂岩砕砂	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
	AE減水剤		変性リグニンスルホン酸化合物
	AE助剤		変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤

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、水砕処理されたものを使用した。なお、スラグは、破碎加工により粒度調整がなされている。スラグ A および B は、全体としてほぼ同じ品質と判断できる。

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。

コンクリートの配合は、水セメント比 W/C を 30，40，50 および 60%の 4 種類とし、細骨材として熔融スラグを混入しないものと、細骨材の全質量をスラグで置換したものの 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。コンクリートの配合、材料特性および試験材齢を

表-2 に示す。なお、目標スランプおよび目標空気量は、8-1.0cm~8+2.5cm および 4.5±1.0%とした。

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) 形状寸法および緒元

本要素供試体（以下、両引き供試体と略記）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および鉄筋径は、著者らがこれまで検討してきた RC 梁⁸⁾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 100mm である。供試体の中央部には 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 2.0×10⁵N/mm² および 344.8N/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

表-2 コンクリートの配合、材料特性および試験材齢

W/C I スラグ 置換率	s/a (%)	単位量(kg/m ³)														スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	試験材齢 (日)
		水		細骨材				粗骨材		高性能減水剤		AE減水剤		AE助剤 (100倍希釈)						
		セメント A	セメント B	砕砂 A	砕砂 B	スラグ A	スラグ B	砕石 A	砕石 B	C×%	(kg/m ³)	C×%	(kg/m ³)	C×%	(kg/m ³)					
60-00	43.5	283	-	771	-	0	-	303	702	-	-	0.80	2.26	0.20	0.57	7.5	3.5	36.1	21.1	7
60-100				0	-	840	-			-	-	-	0.80	2.26	0.03	0.08	10.5	4.7	35.1	
50-00	42.0	340	-	725	-	-	0	303	702	-	-	1.20	4.08	0.30	1.02	9.7	5.5	49.9	26.6	18
50-100				0	-	-	791			-	-	1.40	4.76	0.03	0.10	9.4	5.2	50.1	28.1	
40-00	39.6	425	-	657	-	-	0	303	702	0.60	2.55	-	-	0.45	1.91	8.0	3.5	64.2	27.2	28
40-100				0	-	-	716			0.35	1.49	-	-	0.20	0.85	10.5	5.5	51.5	27.9	
30-00	35.1	-	567	-	542	-	0	303	702	0.60	3.40	-	-	0.80	4.54	8.8	3.5	76.7	-	28
30-100				-	0	-	591			0.35	1.98	-	-	0.70	3.97	8.5	4.0	68.1	-	

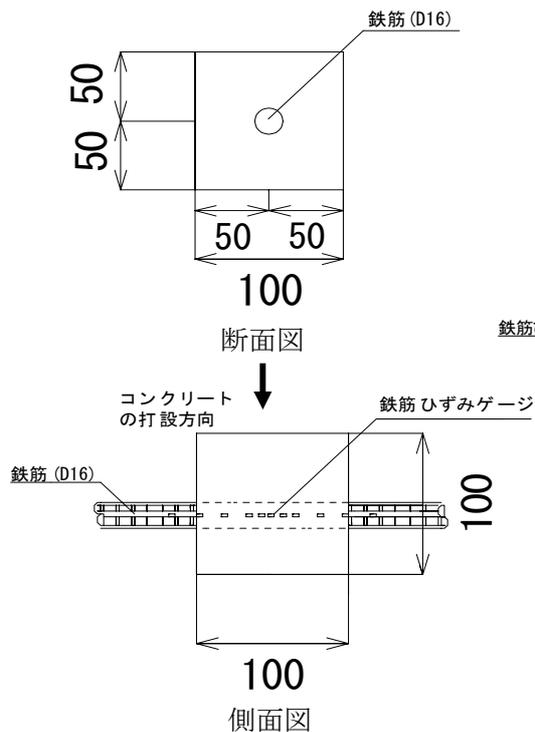


図-1 供試体の形状寸法

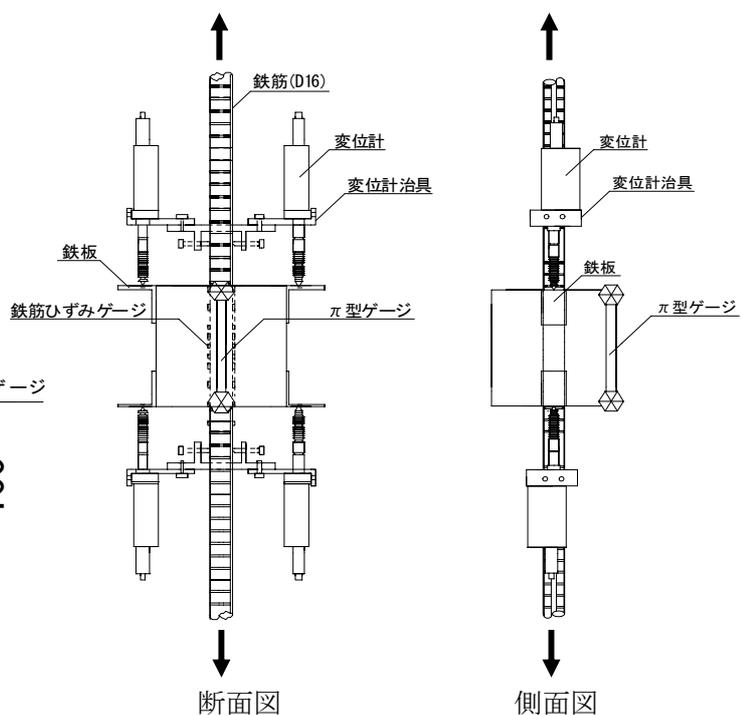


図-2 両引き試験の外観図

御で行なった。載荷速度は、約 167N/sec である。また、本実験では載荷端の上下に変位計を設置し、コンクリートの伸び量を計測した。

なお、供試体のひび割れの有無を確認するために、供試体側面の最下縁、および供試体底面の鉄筋位置にπ型ゲージを設置し、コンクリートのひずみを測定したが、鉄筋降伏までひずみの発生は測定されなかった。

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

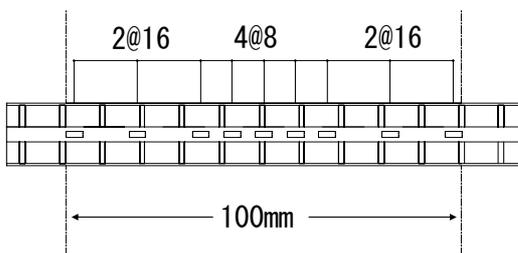


図-3 ひずみゲージの貼付位置

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。スラグの置換率が 100% の場合、無添加のものに比べて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、および保水性が低下したことに起因する。なお、本実験では、水セメント比 60% におけるブリーディングを計測していない。そのため、後述する平均付着応力とブリーディング率の関係では、既往の研究

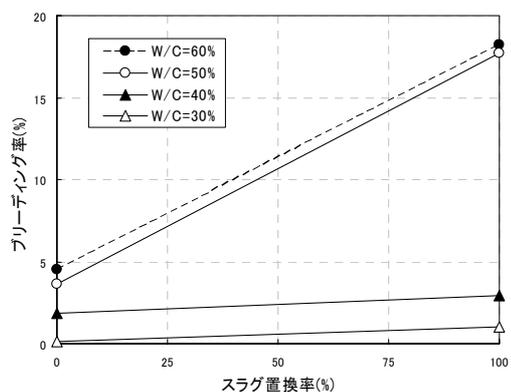


図-4 ブリーディング率

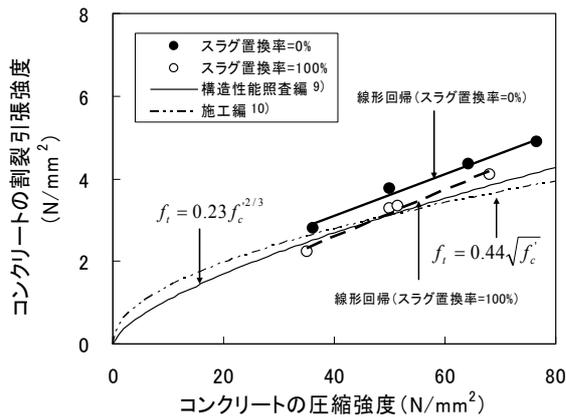


図-5 コンクリートの圧縮強度と割裂引張強度の関係

8)で得られたブリーディング率の値を用いた。

図-5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。何れの場合においても、スラグを用いたコンクリートの強度は、スラグを用いないものより小さい。一般に、コンクリートの強度は、セメント硬化体、骨材、および遷移帯の強度特性などに依存する。そのため、スラグの利用に伴う強度低下は、骨材とセメント硬化体の付着の低下、およびスラグの脆性的な特性による影響がもたらしたものと類推される。

図-5には、土木学会コンクリート標準示方書の「構造性能照査編」⁹⁾と「施工編」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、各示方書式よりも同等以上の値となっている。

3.2 鉄筋ひずみの分布

図-6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、松家らが既報⁸⁾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。なお、何れの試験体においても、鉄筋降伏荷重95%時における鉄筋表裏のひずみの差は、ほぼ10%以内に収まっていた。また、同図には得られたひずみ値に対して、2次放物線で回帰した結果も示す。実線は両引き供試体、点線はRC梁の結果を示して

いる。

本研究における両引き供試体の平均鉄筋ひずみの値からなる2次放物線は、何れの荷重レベルにおいても下に凸の関係が得られている。一方、RC梁の平均鉄筋ひずみの値からなる2次放物線は、荷重レベルが高い場合において、下に凸の関係が得られているが、荷重レベルが低い場合においては、必ずしも下に凸の関係が得られていない。なお、荷重レベルが高い場合においては、何れの平均鉄筋ひずみも、試験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。

3.3 平均付着応力

RC梁におけるひび割れ間の基準点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} ：任意の鉄筋ひずみ、 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。なお、ここに示す鉄筋ひずみには、鉄筋降伏荷重の95%における値を用いた。また、今回の検討では、 ε_{s1} は、基準点から48mm離れた位置の鉄筋ひずみの値を用いた。

(1) 圧縮強度の影響

図-7に、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、RC梁および両引き供試体で得られた平均付着応力の値は、スラグの有無に拘らず、圧縮強

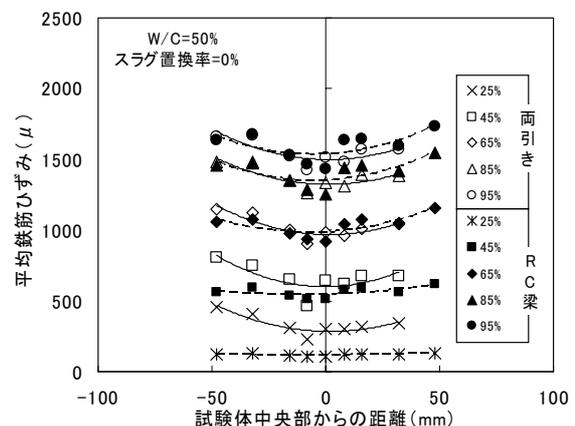


図-6 平均鉄筋ひずみの分布

度の増加と共に、増大する傾向にある。なお、コンクリートの圧縮強度が低い場合のスラグ置換率 100%における RC 梁の平均付着応力の値は、他のものに比して小さくなっている。この原因は、後述するブリーディングの影響である。

(2) ブリーディングの影響

図-8 に、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、両引き供試体の平均付着応力の値を対数回帰および線形回帰した線、および RC 梁の結果を対数回帰した線を示している。なお、RC 梁の平均付着応力は、水セメント比が 40%、50%および 60%の値について対数回帰を行ったことから、本研究における水セメント比 30%のデータは、対数回帰の対象から除外した。

両引き供試体から得られた平均付着応力は、ブリーディング率が約 4.5%程度までの範囲では、ブリーディング率の増加と共に小さくなり、その挙動は、RC 梁の結果と符合する。一方、ブリーディング率が約 4.5%程度以上になると、平均付着応力はほぼ一定となる。しかしながら、RC 梁で得られた平均付着応力を対数回帰した値は、ブリーディング率の増加と共に小さくなる。このような挙動の違いは、ブリーディングやそれに伴うコンクリートの沈下の程度の違いが鉄筋の付着特性に影響したものと類推される。

本要素供試体の両引き供試体と RC 梁における鉄筋の平均付着応力の比較から、ブリーディングが大きい場合においては、本要素供試体は RC 梁における鉄筋の付着挙動の把握には適用でき

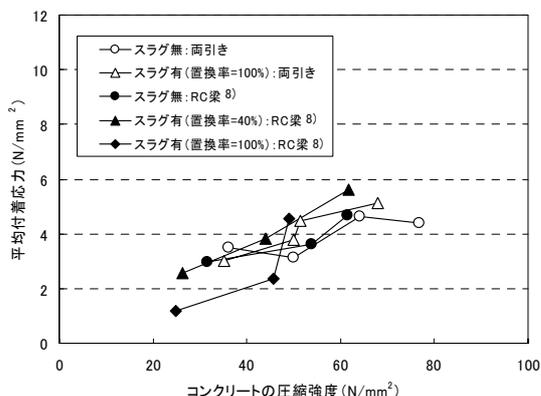


図-7 平均付着応力と圧縮強度の関係

ないことが明らかになった。

3.4 付着応力-すべり関係

鉄筋に沿った任意の点における鉄筋の付着応力（以下、 τ と略記）は、鉄筋ひずみのデータを二次放物線で回帰し、その回帰した放物線の傾きから算定した。また、すべり量（以下、 S と略記）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-9 に、水セメント比 60%の場合の、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 τ - S 関係を示す。全体として、 τ - S 関係に及ぼすスラグの影響は小さい結果となった。これは、水セメント比が 60%の場合における τ - S 関係は、スラグの利用に伴ったブリーディングの増加の影響を受けないことを示している。

同図には、島ら³⁾の提案した τ - S 関係を評価する式の計算結果も示す。全体として、島らの式による τ - S 関係は、実験結果をほぼ妥当に評価する結果となった。

3.5 鉄筋のすべりとコンクリートの伸びの関係

本研究では、図-2 に示す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すべり量とを比較した。

図-10 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ひずみゲージの値から算定した鉄筋のすべり量の関係を示す。各データは、鉄筋降伏荷重の 5%、25%、45%、65%、85%、および 95%での値である。供試体端

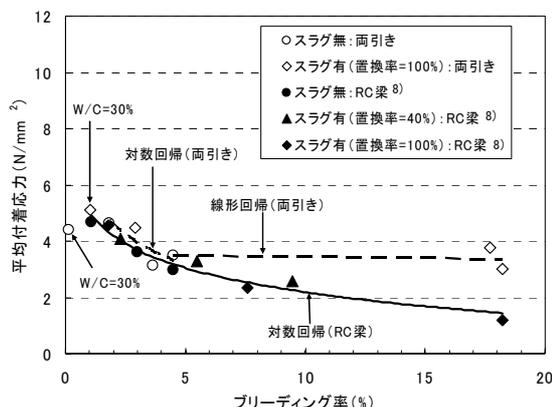


図-8 平均付着応力とブリーディング率の関係

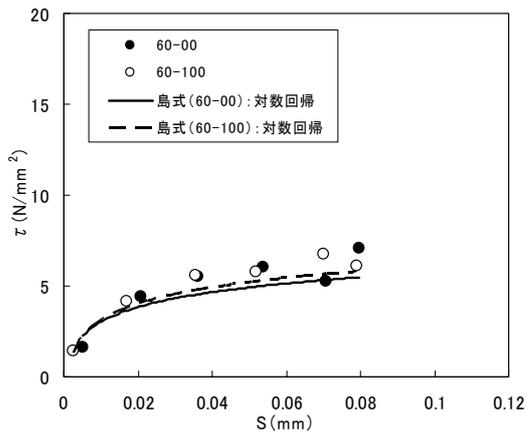


図-9 付着応力-すべり関係

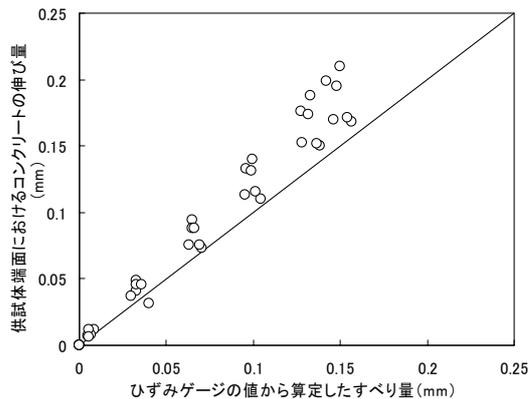


図-10 鉄筋のすべりとコンクリートの伸びの関係

面のコンクリートの伸び量は、ひずみゲージから算出されるすべり量の増加に伴い大きくなる。これは、鉄筋の抜け出し作用が供試体端面におけるコンクリートの伸びに影響を及ぼすことを示す。

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) スラッグの利用は、ブリーディング量を著しく増加させる。
- (2) スラッグの利用は、コンクリートの圧縮および割裂強度を低減させる。
- (3) 両引き供試体における鉄筋の平均付着応力は、コンクリートの圧縮強度の増加と共に大きくなる。
- (4) 両引き供試体と RC 梁における鉄筋の付着挙動は、ブリーディング率が約 4.5%程度までは一致するが、それ以上のブリーディング率での付着挙動は異なる。

- (5) ブリーディングが大きい場合においては、コンクリート断面中央に鉄筋を配置する両引き供試体は RC 梁における鉄筋の付着挙動の把握には適用できない。

参考文献

- 1) A. W. Beeby : The influence of the parameter ϕ / ρ on crack widths, Thomas Telford and fib, 2004.
- 2) 劉鍵, 大野義照, 李振宝, 鈴木計夫 : 鉄筋コンクリート梁の曲げひび割れ幅に及ぼす各種要因の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.2, pp.1019-1024, 1995.
- 3) 島弘, 周礼良, 岡村甫 : マッシュ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.
- 4) 山尾芳秀, 周礼良, 二羽淳一郎 : 付着応力-すべり関係に関する実験的研究, 土木学会論文集 No.343, pp.219-228, 1984.
- 5) 壹岐直之, 清宮理, 山田昌郎 : 付着応力-すべり関係に影響を及ぼす要因の実験的研究, 土木学会論文集, No.550/V-33, pp.73-83, 1996.11.
- 6) 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.
- 7) 寄特隆宏, 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.
- 8) 松家武樹, 堺孝司 : 産業廃棄物溶融スラッ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.
- 9) 土木学会 : コンクリート標準示方書[構造性能照査編], 2002.3
- 10) 土木学会 : コンクリート標準示方書[施工編], 2002.3