

論文 鉄筋の付着挙動に及ぼす供試体寸法および非付着部の影響

佐藤 淳一^{*1}・堺 孝司^{*2}・松家 武樹^{*3}

要旨：本研究は、供試体寸法および供試体端部における非付着部の有無が鉄筋の付着挙動に及ぼす影響について、両引きおよび偏心両引き供試体を用いて検討を行った。また、両引き試験から得られた鉄筋ひずみの処理方法が付着応力 - すべり関係に及ぼす影響についても考察した。その結果、非付着部を設けた場合、鉄筋ひずみは、設けていない場合に比べて減少する傾向にあることが示された。また、付着応力 - すべり関係は、供試体寸法が 300mm 程度では一意的に表現できると考えられるが、鉄筋ひずみの処理方法に大きく影響されることが明らかとなった。

キーワード：付着応力 - すべり関係, 供試体寸法, 非付着部, 両引き試験, 偏心両引き試験

1. はじめに

コンクリート中の鉄筋の付着特性は、鉄筋コンクリート部材のひび割れ挙動に大きく影響する。そのため、鉄筋とコンクリートの付着挙動を適切に把握することは、RC 梁等における実際のひび割れ挙動を推測する上で非常に重要である。

これまで行われてきた鉄筋の付着挙動に関する研究として、我々は、RC 梁のひび割れ区間を対象とした要素モデル供試体を用いた両引き¹⁾および偏心両引き試験²⁾を行い、鉄筋の付着挙動について検討を行ってきた。その結果、ブリーディング率が 4.5% 程度以上になると、両引き供試体では実際の RC 梁と付着挙動が異なるが、偏心両引き供試体はほぼ一致することが示された。また、島ら³⁾は、マッシュなコンクリート部材を対象とした検討を行い、付着応力 - すべり関係の評価式を提案している。鉄筋の付着挙動に関する既往の研究は、それぞれ対象が異なっているため、当然実験方法も異なったものとなっている。しかしながら、実験方法が鉄筋の付着挙動に及ぼす影響について検討した研究はほとんどない。

一般的に、コンクリートと鉄筋の付着特性は、付着応力とすべりの関係によって表される。しかしながら、付着応力やすべりの算定方法についても、文献によって異なっている。

そこで、本研究は、実験条件が付着挙動に及ぼす影響として、まず、供試体寸法および供試体端部における非付着部の有無が付着応力 - すべり関係に及ぼす影響について検討を行った。また、付着応力 - すべり関係に及ぼす算定方法の影響についても考察した。本研究は、両引き供試体および偏心両引き供試体を用いて検討を行ったが、後者についてはブリーディングの影響を見るためである。

2. 実験概要

本研究における実験は、2 つのシリーズで構成される。シリーズ は、両引き供試体を用いて鉄筋の供試体寸法の影響について検討したものである。水セメント比を 50% とし、供試体寸法として 100mm, 200mm, 300mm および 400mm の 4 種類を考慮した。シリーズ では、両引きおよび偏心両引き供試体を用いて非付着長の影響について検討した。供試体端部において 50mm および 100mm の非付着長を設けた。なお、本研究で用いたコンクリートのブリーディング率の範囲は、2.8 ~ 3.3% であった。

2.1 使用材料

表 - 1 に、本研究で使用したコンクリートの材料の種類および品質を示す。粗骨材は、砕石 A および砕石 B の 2 種類を 1 : 1 の割合で混合したものをを用いた。

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、練混ぜ量を 70 リットルとして製造した。

コンクリートの配合に関しては、単位水量を一定とし、水セメント比は 50% とした。また、目標スランプおよび

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：3400cm 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%
粗骨材	砂岩砕石	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：2.60g/cm ³ , 吸水率：1.50%, 粗粒率：6.35, 実積率：58.6%
混和剤	減水剤	-	ポリオール複合体
	AE剤		

*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 (株) 間組 技術・環境本部技術研究所 工博 (正会員)

表 - 2 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					減水剤 (4倍希釈)		AE剤 (100倍希釈)	
		水	セメント	細骨材	粗骨材		C×%	(kg/m ³)	C×%	(kg/m ³)
				砕砂	2015	1505				
50	40.5	173	346	694	512	520	1.80	6.23	0.50	1.73

表 - 3 供試体条件

	W/C (%)	試験方法	断面寸法 100×h(mm)	供試体長さ L(mm)	非付着長 u(mm)	付着長 L-2u(mm)	圧縮強度 (N/mm ²)	コンクリートの弾性係数 (kN/mm ²)
	50	両引き試験	100×100	100	0	100	52.83	27.5
				200		200		
				300		300		
				400		400		
	50	両引き試験	100×100	300	50	200	52.34	27.2
				400	50	300	50.64	27.8
				400	100	200	52.12	27.7
		偏心両引き試験	100×300	300	50	200		

目標空気量は、8-1.0cm~8+2.5cm および 4.5±1.0%とし、混和剤の添加量によって調整した。コンクリートの配合を表-2に示す。なお、試験材齢は、全てのケースにおいて28日である。

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、その外側をビニールで被覆した。

(2) 形状寸法および緒元

各供試体の条件を表-3に、形状を図-1に示す。両引き供試体のコンクリート断面は、100×100mmであり、偏心両引き供試体については、100×300mmである。シリーズIでは、供試体寸法を100~400mmに変化させた。また、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。シリーズIIでは、供試体端部において鉄筋をステンレスパイプで覆うことにより、50~100mmの非付着部を設けた。なお、本研究で使用した異形鉄筋の弾性係数、降伏強度、および降伏ひずみは 1.9×10⁵N/mm²、385.1N/mm²、および 2089μある。

(3) 荷重方法および測定項目

図-2に、荷重状況の外観図を示す。荷重は、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、単調荷重の荷重制御で行なった。荷重速度は、167N/secである。なお、偏心両引き試験の際には、圧縮バネを設置した。これは、コンクリートの自重モーメントをバネの反力で支え、鉄筋に偏心荷重を作用させないためである。

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のひずみゲージを用い、30mm間隔で鉄筋リブの両側に貼付して行った。なお、供試体寸法が100mm

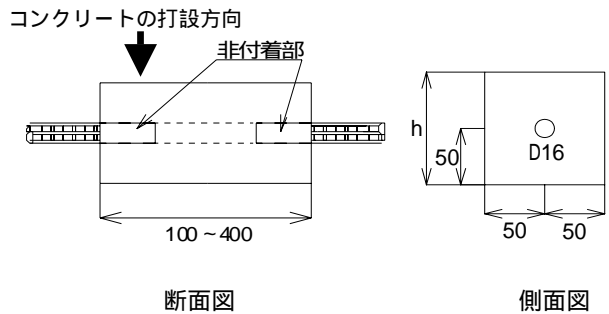


図 - 1 供試体形状

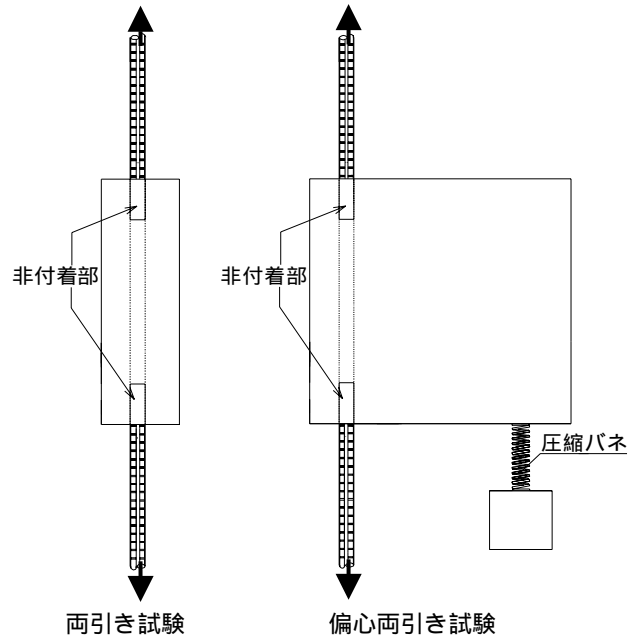


図 - 2 荷重状況

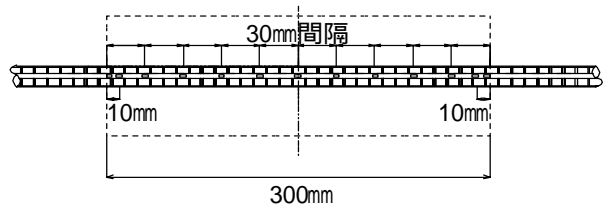


図 - 3 ひずみゲージの貼付位置

の場合においては 20mm 間隔で貼付した。また、供試体端部における鉄筋ひずみを詳細に調べる目的で、供試体端部から 10mm の位置についてもひずみゲージを貼付した。図 - 3 に、供試体寸法が 300mm の供試体におけるひずみゲージの貼付位置を示す。

3. 実験結果および考察

3.1 鉄筋ひずみの分布

図 - 4 に、鉄筋降伏荷重の 25%、45%、65%、85% および 95% におけるシリーズ I での平均鉄筋ひずみの分布を示す。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、供試体寸法が 400mm の供試体においては、鉄筋降伏荷重の 74% 付近でひび割れが発生したため、その際のデータを用いることとした。

供試体寸法が 100mm の場合、平均鉄筋ひずみの変化は小さい。しかし、供試体寸法が大きくなると、供試体中央部での平均鉄筋ひずみの値は、供試体端部に比べて小さくなっている。この傾向は、供試体寸法が長いほど、また、荷重レベルが大きいほど顕著である。

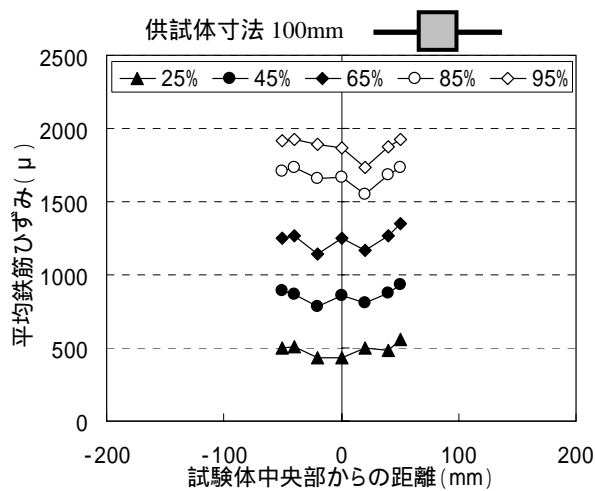


図 - 5 に、シリーズ I の付着長が 200mm の場合における平均鉄筋ひずみ分布を示す。このデータは、鉄筋降伏荷重の 95% における値である。

非付着部を設けた両引き供試体における平均鉄筋ひずみは、設けていない場合に比べ、いずれの位置においても減少する傾向が見られた。また、偏心両引き供試体における平均鉄筋ひずみは、供試体中央部では非付着部を設けた両引き供試体と同程度の値となっているが、供試体端部では設けていない場合と同程度である。なお、偏心両引き供試体におけるブリーディングの影響は判然としない。

全体として、非付着部を設けた場合の鉄筋降伏荷重の 95% における鉄筋ひずみは、設けていない場合に比べて、平均で 15% 程度減少する結果となった。これは、非付着部を設けることにより、コンクリートに伝達される応力が増加し、コンクリートの応力分担領域が供試体の表面方向に拡大したことを意味する。

鉄筋とコンクリートの付着は、鉄筋からコンクリートに応力が伝達される場合に成立する。換言すると、非付着部を持たない供試体端部のように、コンクリートが応

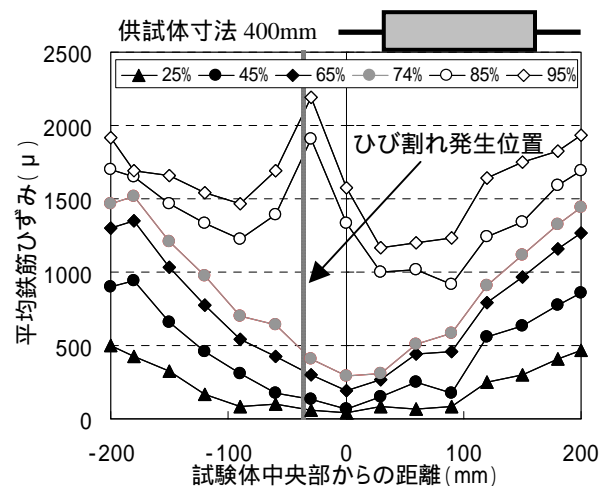
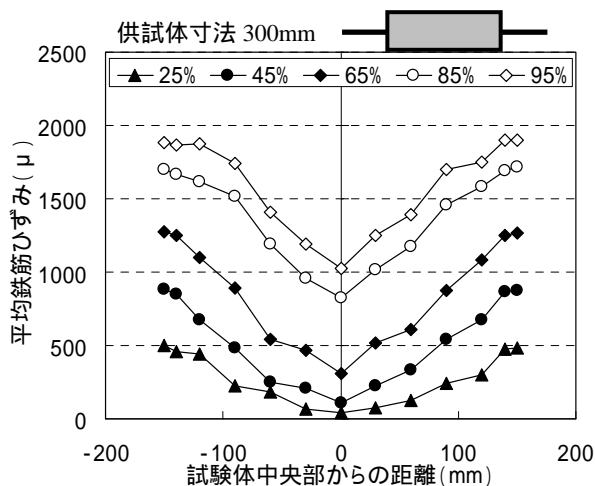
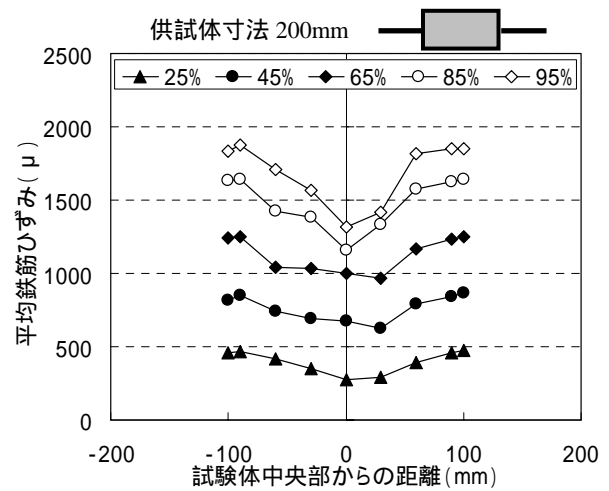


図 - 4 平均鉄筋ひずみの分布 (供試体寸法の影響)

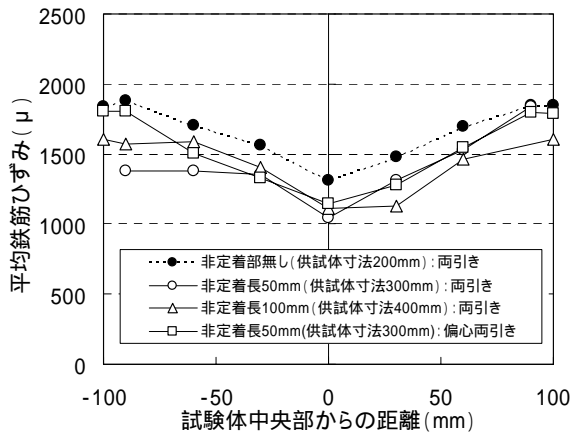


図 - 5 平均鉄筋ひずみ分布 (非定着部の影響)

力をほとんど受け持たない領域では、付着応力は発生しない。そのため、付着挙動の評価が困難である。しかし、非付着部を設けることで、鉄筋からコンクリートへの応力伝達が向上するため、鉄筋の付着部全域において付着挙動を評価できるようになると考えられる。

3.2 付着応力 - すべり関係

(1) 算定方法の影響

鉄筋に沿った任意の点における付着応力 (以下、 τ と略記) およびすべり量 (以下、 S と略記) は、式 (1) および式 (2) を用いて求められる。

$$\tau = \frac{E_s D}{4} \cdot \frac{d\varepsilon_s}{dx} \quad (1)$$

$$S = \int_0^x \varepsilon_s dx \quad (2)$$

ここに、 E_s : 鉄筋の弾性係数 (N/mm^2)、 D : 鉄筋の公称直径、 $d\varepsilon_s/dx$: 鉄筋ひずみ分布曲線の傾きである。

を算定する際には、鉄筋ひずみの傾きが必要となるが、鉄筋ひずみの傾きの算定方法は、種々の方法で行われてきた。

山尾ら⁴⁾や他の研究^{3),5),6)}では、鉄筋ひずみを、隣接した3点を通る2次放物線であつないだ分布曲線で仮定し、その傾きから τ を求めている。

一方、松家ら^{1),2),7),8)}は、鉄筋ひずみ分布全体を2次放物線と仮定している。

また、大野ら⁹⁾や他の研究^{10),11)}では、隣接する2点の鉄筋ひずみを直線でつなぎ、平均付着応力を求め、その値を測定点間の中央位置での τ として扱っている。

本研究では、まず、上記の3種類の算定方法に基づいて τ および S を求め、 $\tau - S$ 関係に及ぼす算定方法の影響について検討した。

図 - 6 にシリーズIの供試体寸法が300mmの場合における鉄筋ひずみの処理方法ごとの回帰曲線を示す。図 - 7

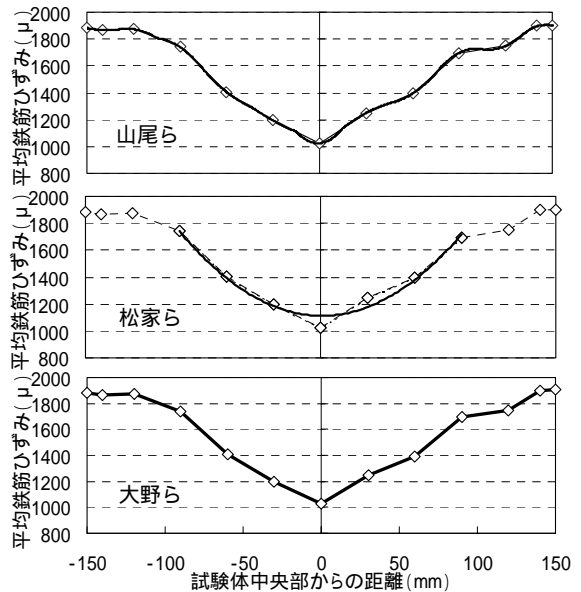


図 - 6 鉄筋ひずみの回帰曲線

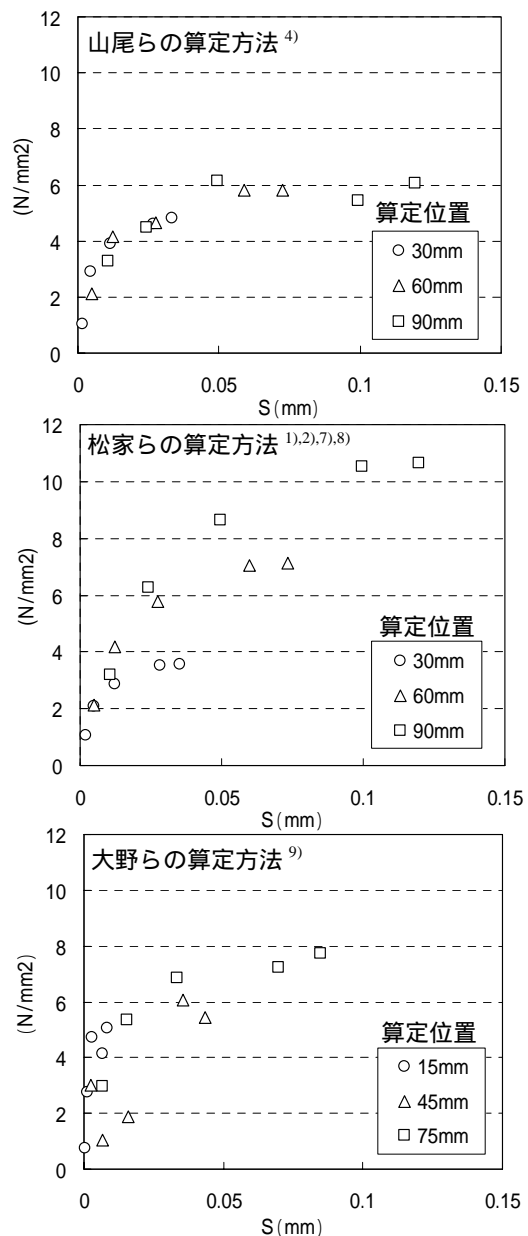


図 - 7 $\tau - S$ 関係 (算定方法の影響)

に、各算定方法における供試体寸法が 300mm の場合の σ - S 関係を示す。算定位置は、供試体中央部より 30mm、60mm および 90mm 離れた点で、供試体端部において鉄筋ひずみが一樣となる領域は考慮していない。なお、 σ - S 関係は、供試体中央部から左側と右側においてそれぞれ異なる関係が得られるが、ここに示すデータは、2つを平均したものである。

山尾らの方法を用いて得られた σ - S 関係は、算定位置にかかわらず、一意的な関係が得られている。

大野らの方法による σ - S 関係は、一意的に示されているが、山尾らの方法に比べてばらつきが見受けられる。また、供試体中央部から左右の値についても大きな差が見られた。これは、 σ および S を隣接する 2 点間の鉄筋ひずみから求めたことに起因する。

一方、松家らの算定方法を用いた場合、算定位置によって σ - S 関係が異なる結果となった。これは、回帰曲線としてみた場合、図 - 6 に示すように、鉄筋ひずみの実測値とほぼ一致しているが、鉄筋ひずみの傾きを考慮する場合、回帰曲線の特性に大きく支配されることによるものである。示すように、鉄筋ひずみ全体を回帰した 2 次放物線は、実測データとほぼ一致しており、回帰曲線の適合性については問題ないといえる。しかし、鉄筋ひずみの傾きを考慮する場合、特に荷重レベルが高い領

域においては、回帰曲線の特性に大きく支配されてしまうことによるものである。

以上の結果から、本研究では、山尾らの方法を用いておおよそ S を算定した。

(2) 供試体寸法の影響

図 - 8 に、鉄筋降伏荷重の 25%、45%、65%、85% および 95% におけるシリーズ I での σ - S 関係を示す。なお、供試体寸法が 400mm のデータについては、ひび割れ発生直前までの荷重レベルにおいて検討を行った。また、供試体寸法が 200mm、300mm および 400mm の場合については、供試体端部の鉄筋ひずみが一樣となる領域のデータは除外した。

供試体寸法が 200mm 程度以下の場合、算定位置によって σ - S 関係は異なったものとなっている。一方、供試体寸法が 300mm 程度では、 σ - S 関係は、一意的に表現できると考えられる。なお、供試体寸法が 400mm のデータについては、ひび割れの発生の影響を受けて、全体的にすべりが大きくなった。

(3) 非付着部の影響

図 - 9 に、シリーズ I の供試体寸法が 300mm の両引き供試体の全ての算定位置における σ - S 関係を、図 - 10 にはシリーズ II の非付着部を 50mm 設けた両引き供試体（供試体寸法 400mm）の結果を示す。

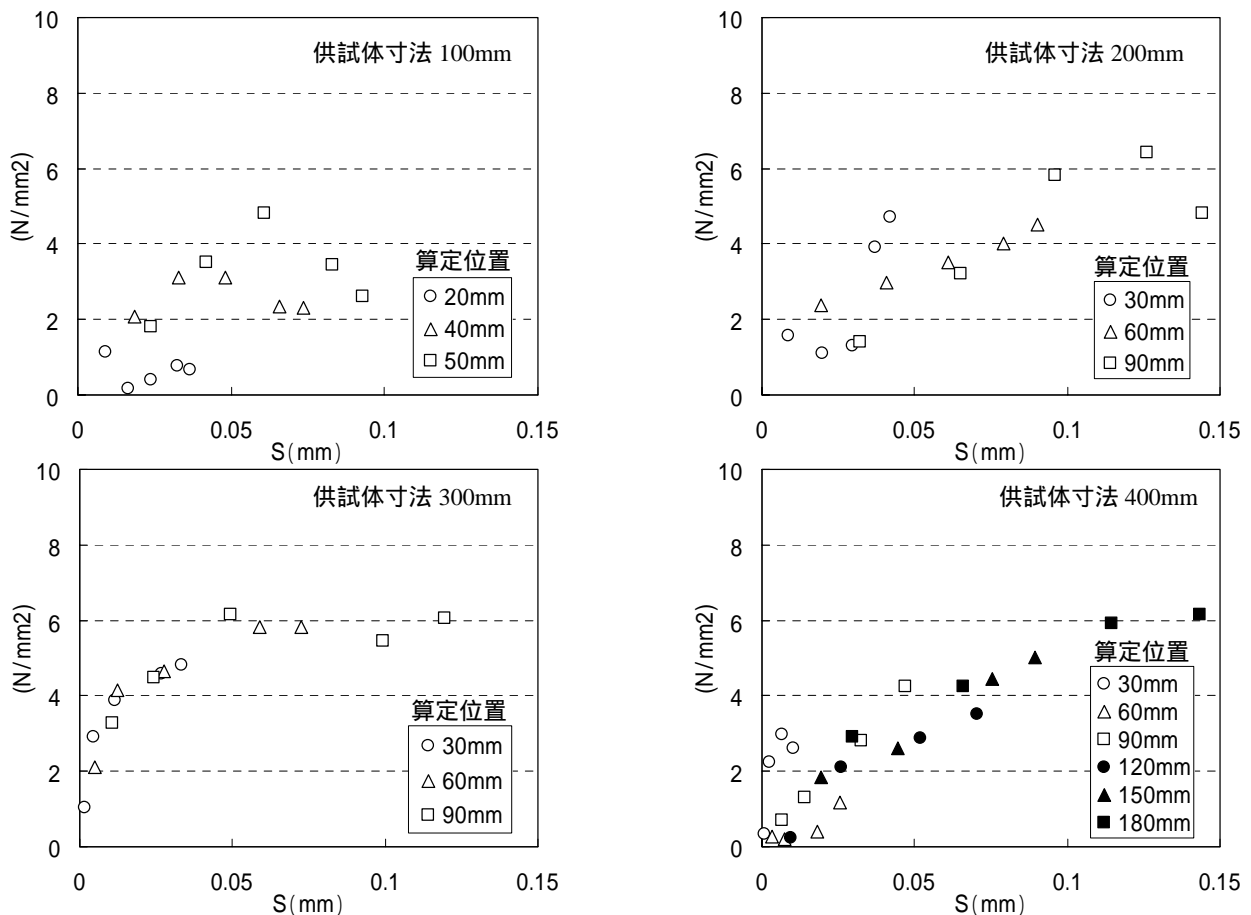


図 - 8 σ - S 関係（供試体寸法の影響）

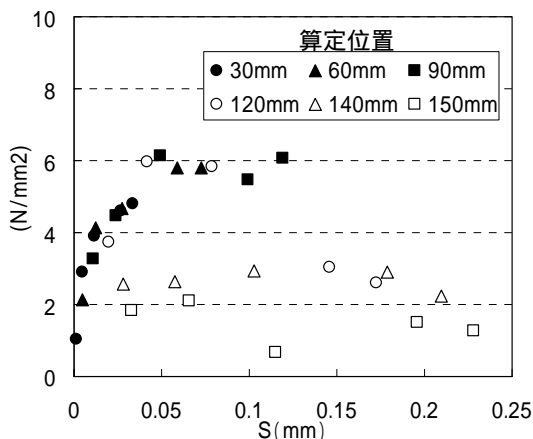


図 - 9 非定着部を設けていない場合の σ - S 関係

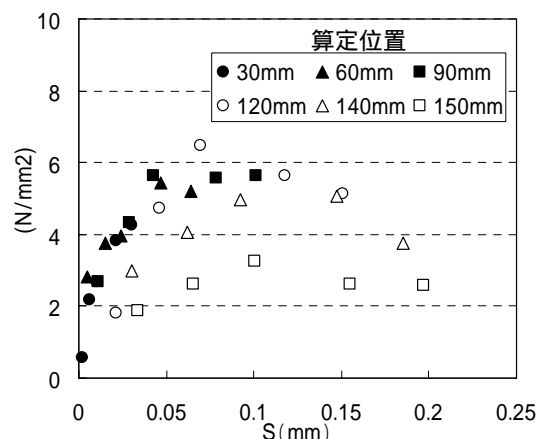


図 - 10 非定着部を設けた場合の σ - S 関係

非付着部を設けていない場合、算定位置が 140mm から 150mm の範囲においては、付着応力が非常に小さく、一意的に示される領域のデータから大きく値が外れている。一方、非付着部を設けた場合には、150mm の位置における付着応力は小さくなっているものの、30mm から 140mm の範囲においては、ほぼ一意的に示されている。つまり、非付着部を設けたことで、付着挙動を評価できる領域が拡大したといえる。

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) 供試体寸法が長くなるにつれて、供試体端部に比べて中央部での鉄筋ひずみの値は小さくなる。
- (2) 非付着部を設けると、設けていない場合に比べ、鉄筋ひずみは減少する傾向がある。
- (3) 両引き試験により得られる鉄筋ひずみの処理方法は、鉄筋の付着応力 - すべり関係に大きく影響する。
- (4) 供試体寸法が 300mm 程度では、鉄筋の付着応力 - すべり関係を一意的に表すことができる。
- (5) 非付着長を設けると、付着挙動を評価できる領域が拡大する。

参考文献

- 1) 佐藤淳一，堺孝司，松家武樹：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.3，pp.583-588，2007.
- 2) 松家武樹，堺孝司，中村俊之，村上祐治：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.3，pp.589-594，2007.

- 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) 三村陽一，浜梶方希，森本公典，吉武勇：鉄筋周辺における若材齢コンクリートの付着損傷に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.3，2007.
- 7) 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 回年次学術講演会講演概要集 V，pp.1149-1150，2006.9.
- 8) 松家武樹，堺孝司，中村俊之，梅沢健一，草薙悟志，佐藤淳一：鉄筋コンクリート梁に対する産業廃棄物溶融スラグの適用性に関する基礎的研究，土木学会論文集，Vol.63，No.2，pp.235-249，2007.
- 9) 大野義照，李振宝，鈴木計夫：持続荷重下における異形鉄筋とコンクリート間の付着応力 - すべり関係，日本建築学会構造系論文集，No.459，pp.111-120，1994.5.
- 10) 金久保利之，中場和正，吉田智基，吉澤弘之：連続繊維シートとコンクリートの局所付着応力 - すべり量関係の提案，コンクリート工学論文集，No.12，Vol.1，pp.33-43，2001.1.
- 11) 吉村満，岩田樹美，大野義照，乾智洋：鉄筋とコンクリート間の付着応力 - すべり関係に及ぼす各種要因の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.3，2007.