

報告 引抜き試験による鉄筋とコンクリートとの付着強さ試験方法における供試体小形化に関する検討

若林 和義*1・中村 則清*2・志村 明春*3・牛田 真一郎*4

要旨 : JSTM C 2101 (引抜き試験による鉄筋とコンクリートとの付着強さ試験方法) は、立方体の無補強コンクリートから鉄筋を引き抜く単純な試験方法であるが、鉄筋径 D が太くなるにつれて供試体寸法及び重量が大きくなるため、取り扱いの困難さや破壊時の危険性が課題となっている。本報では $D16\sim D41$ の4種類の径の鉄筋について、現行の一边 $6D$ から $4D$ へと小形化した供試体で、付着性能確認が可能か比較を行った。初期付着強度 (0.002D 時付着応力度) は現行供試体に比べ $1\sim 7$ 割高く、最大付着強度は $2\sim 4$ 割程度低くなり、小形化供試体から得られる値と現行供試体から得られる値の比率は、鉄筋径により異なる傾向を示した。

キーワード : 付着強度, 引抜き, 供試体小形化, 安全性, らせん筋, 非付着区間

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物内における鉄筋とコンクリートの付着性状は複雑であるが、付着に関する材料特性の相対比較がある程度可能な標準的試験方法として、引抜き試験がある。我が国では約40年前に行われた通商産業省工業技術院委託「構造材料の安全性に関する標準化のための調査研究」¹⁾ (建材試験センター) を基に作成された建材試験センター規格 JSTM C 2101 (引抜き試験による鉄筋とコンクリートとの付着強さ試験方法) (以下、JSTM とする。) がある。

この試験は、防錆剤を塗付した鉄筋、表面形状が特殊な鉄筋 (特に高強度鉄筋)、既存構造物から採取した鉄筋等に対しての、コンクリートとの付着性能評価 (初期付着強度及び最大付着強度) を目的として行われている。

JSTM は、立方体の無補強コンクリート供試体から鉄筋を引き抜く比較的単純な試験方法である。しかし供試体の一边が鉄筋径 D の6倍とされているため、太径になる程大きな重量になり、吊上設備等がないと養生や試験機上への設置が困難に、また供試体割裂破壊時の破断片も大きくなり破壊時及び除去時に測定機器や試験者への危険性が高くなる、等の課題がある。

そのため $D25$ 以外の鉄筋の試験実績は殆どなかったが、近年太径含む多種の鉄筋の付着性能確認の需要が増えているため、供試体を小形化してより効率よく安全に鉄筋の付着性能確認が可能か検証を始めた²⁾。

本報では付着強度試験供試体を現行の一边約 $6D$ から $4D$ へ小形化したコンクリート供試体を計画し、各径の鉄筋の付着性能の確認が可能か試験にて検証した。

2. 現行の JSTM C 2101 の概要

供試体は一边約 $6D$ の立方体の無補強コンクリート (スランブ $10\pm 2\text{cm}$, 材齢28日圧縮強度 $30\pm 3\text{N/mm}^2$ のもの) で、付着区間 (付着長) は $4D$ とし、載荷板からの応力を均等化し試験誤差を少なくするため載荷側に約 $2D$ の非付着区間を設けている (図-1 参照)。載荷時には鉄筋の自由端のすべり量を JSTM に示されている間隔で測定し、付着応力度との関係を求める。すべり量 $0.002D$ 時の付着応力度 $\tau_{0.002D}$ (初期付着強度) 及び最大付着強度 τ_{max} (割裂き付着強度) を式(1)で求め評価する。試験状況例を写真-1 に示す。

$$\tau = \alpha P / (4 \pi D^2) \tag{1}$$

τ : 付着応力度 N/mm^2

P : 引張荷重 N

D : 鉄筋の直径 (公称直径) mm

α : コンクリートの圧縮強度に対する補正係数 $30/\sigma_c$

σ_c : 同時に作製した円柱供試体の圧縮強度 N/mm^2

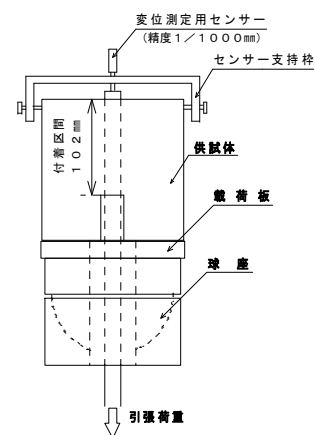


図-1 JSTM の概要 (D25 の場合)

*1 (一財) 建材試験センター 中央試験所 材料グループ 主任 (正会員)

*2 (一財) 建材試験センター 中央試験所 材料グループ 統括リーダー代理 (正会員)

*3 (一財) 建材試験センター 中央試験所 材料グループ 主幹

*4 (一財) 建材試験センター 中央試験所 材料グループ



写真-1 JSTM C 2101 試験状況 (D41 の場合)

3. 既報の試験概要と本報の試験概要

既報²⁾では現行 JSTM や、過去行われていた日本コンクリート工学協会の鉄筋の表面形状による付着性能比較試験(案)や海外規格等を参考に、供試体寸法を鉄筋径毎ではなく3サイズに限定し、コンクリート内部に早期割裂防止用のらせん筋補強を施し、付着長は供試体一辺の1/2とした供試体で試験を行った。

同結果では、鉄筋の同一径内での相对比较試験としては活用できる可能性は見出せたものの、太径のものは小形化及びらせん筋補強による拘束効果の影響ですべり出し後のすべり量曲線の勾配や $\tau_{0.002D}$ が高くなること、付着長が鉄筋径によっては2D程度となっているためばらつきが大きく出る可能性があること、そして現行のように供試体寸法を鉄筋径に比例させて割裂き付着強度 τ_{max} を求める方法ではないため鉄筋径の影響を考慮していない、等の課題があった。

本報では上記の課題を踏まえ、小形化供試体を再度変更した。供試体寸法は鉄筋径毎に比例する方法をとり、現行の一辺約6Dから約4Dとし、付着長は3D(非付着長は約1D)設け、無補強とした。付着応力度は式(2)で算出し、評価方法は現行と同一とした。

$$\tau = \alpha P / (3 \pi D^2) \quad (2)$$

一辺約4Dとしたのは、D41の鉄筋の場合でも試験者一人の力で扱える質量(6D:43.4kg→4D:18.5kg)となること、かぶり厚さ1.5Dは確保できること、D16の鉄筋の場合でも一辺65mmと骨材の最大寸法に対して打設がぎりぎり可能な範囲であること、からである。

現行 JSTM の元になる試験でも³⁾RILEMの一辺10Dの供試体を参考に、一辺10D、8D及び6Dの供試体で試験検討した上で、最小の6Dとした経緯がある。

なお、その他載荷方法等条件は現行と同一とした。

4. 試験計画

計画した供試体の一覧を表-1に示す。D16、D25、D32及びD41の4種類の径の鉄筋について、2.及び3.で示した JSTM 準拠の供試体(記号JS)及び小形化に供試体(記号S)を各3体計画した。また、供試体小形化によって付着応力度一すべり量曲線が殆ど測定できないで割裂してしまう懸念があったため、らせん筋($\phi 6\text{mm}@50\text{mm}$, SR235)で補強した供試体を、D16及びD41について計画した(記号S-R)。

供試体コンクリートの配(調)合及び使用材料を表-2に示す。コンクリートの配(調)合は現行 JSTM のスランプ10cmではなく8cmとした。供試体小形化にあたり、やや硬めのフレッシュコンクリートでも供試体作製時の打設時に支障がないか、ジャンカ等が発生しないか確認するためである。その他の諸条件は現行 JSTM と同一とした。なお、供試体のコンクリート打設は4バッチに分けて行った。

鉄筋は JIS G 3112 (鉄筋コンクリート用棒鋼)に規定される竹節形状の異形棒鋼 SD345 とし、D16~D41の何れの径も同種類の形状のものをを用いた。

表-1 供試体の一覧

種類	記号	項目	鉄筋の呼び名			
			D16	D25	D32	D41
現行 JSTM	JS	一辺(約6D)	100 mm 角	150 mm 角	200 mm 角	250 mm 角
		付着長(4D)	64 mm	102 mm	127mm	165 mm
		非付着長	36mm	48 mm	73 mm	85 mm
		らせん筋	無	無	無	無
小形化案	S	一辺(約4D)	65mm 角	100 mm 角	130 mm 角	165mm 角
		付着長(3D)	48mm	76 mm	95mm	124 mm
		非付着長	17mm	24mm	35 mm	41mm
		らせん筋	無	無	無	無
小形化案 + らせん筋	S-R	一辺(約4D)	65mm 角	-	-	165mm 角
		付着長(3D)	48mm			124 mm
		非付着長	17mm			41mm
		らせん筋	有			有
条件	打設方向:横打ち(鉄筋を水平), 養生:材齢28日まで標準養生, 数量:各3体, 鉄筋表面形状:竹節					

表-2 供試体コンクリートの配(調)合及び使用材料

目標 圧縮強度 (N/mm ²)	スラ ンプ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
					水	セメント	細骨材	粗骨材	AE 減水剤
30±3	8±2	4.5±1.5	65	49	159	245	908	970	0.61~0.64

水：イオン交換水，セメント：普通ポルトランド3社混合（密度 3.15 g/m³），細骨材：掛川産陸砂（表乾密度 2.58 g/m³，吸水率 2.16%），粗骨材：青梅産砕石 2005A（表乾密度 2.65 g/m³，吸水率 0.53%），AE 減水剤（標準形 I 種）

表-3 付着強度試験結果の一覧

記号	供試体 番号 又は項目	鉄筋の呼び名							
		D16		D25		D32		D41	
		$\tau_{0.002D}$ (N/mm ²)	τ_{max} (N/mm ²)	$\tau_{0.002D}$ (N/mm ²)	τ_{max} (N/mm ²)	$\tau_{0.002D}$ (N/mm ²)	τ_{max} (N/mm ²)	$\tau_{0.002D}$ (N/mm ²)	τ_{max} (N/mm ²)
JS	No.1	3.32	14.9	2.33	9.42	2.81	12.5	2.76	10.8
	No.2	3.50	13.7	3.08	10.3	1.79	12.4	3.49	10.5
	No.3	3.46	14.1	2.61	10.9	2.11	11.5	2.91	11.3
	平均	3.43	14.2	2.67	10.2	2.24	12.1	3.05	10.9
	標準偏差	0.09	0.61	0.38	0.74	0.52	0.55	0.39	0.40
	変動係数%	2.6	4.3	14.2	7.3	23.2	4.5	12.8	3.7
	$\alpha [\sigma_c (N/mm^2)]$	0.893 (33.6)		0.962 (31.2)		0.893 (33.6)		0.977 (30.7)	
S	No.1	5.22	8.59	3.67	6.15	3.77	9.74	3.54	6.63
	No.2	5.55	7.50	2.88	5.95	3.77	9.21	3.14	8.55
	No.3	5.72	7.57	2.77	6.09	3.58	9.00	3.18	7.04
	平均 (S/JS 比)	5.50 (1.60)	7.89 (0.56)	3.11 (1.16)	6.06 (0.59)	3.71 (1.66)	9.32 (0.77)	3.29 (1.08)	7.41 (0.68)
	標準偏差	0.25	0.61	0.49	0.10	0.11	0.38	0.22	1.01
	変動係数%	4.5	7.7	15.8	1.7	3.0	4.1	6.7	13.6
	$\alpha [\sigma_c (N/mm^2)]$	0.935 (32.1)		0.962 (31.2)		0.893 (33.6)		0.935 (32.1)	
S -R	No.1	4.80	11.6	-	-	-	-	4.04	11.4
	No.2	5.70	12.4					2.97	10.9
	No.3	6.51	12.4					4.35	11.5
	平均 (S-R/JS 比)	5.67 (1.65)	12.1 (0.85)					3.79 (1.24)	11.3 (1.04)
	標準偏差	0.86	0.46					0.72	0.32
	変動係数%	15.2	3.8					19.1	2.8
	$\alpha [\sigma_c (N/mm^2)]$	0.977 (30.7)						0.977 (30.7)	

5. 試験結果

付着強度試験結果の一覧を表-3に示す。なお、小形化したS及びS-Rの供試体において、脱型後の外観上の不具合は各径特にみられなかった。

5.1 JSの試験結果

図-2~図-5にD16~D41のJSの各供試体の付着応力度-すべり量曲線を示す。

D16はJSTMに示されている判定($\tau_{0.002D} \geq 2.9 \text{ N/mm}^2$, $\tau_{max} \geq 7.8 \text{ N/mm}^2$); JSTM作成時の実験時の下限値の80%から定めた判定目安)に比べると高い値を示したが、D25、D32及びD41はすべり始めが早く $\tau_{0.002D}$ がやや低めの値であった。また、D16以外の $\tau_{0.002D}$ はややばらついているようにもみえるが、D25における過

去の試験実績でもこの程度のばらつきがみられることが多いため、通常の範囲と考えられる。一方、 τ_{max} は各径大きなばらつきはみられなかった。

5.2 Sの試験結果

図-6~図-9にD16~D41のSの各供試体の付着応力度-すべり量曲線を示す。

Sは供試体小形化に伴い付着長を短くしたことによって、 $\tau_{0.002D}$ のばらつきがより大きくなる懸念があったが、本結果では大きなばらつきはみられなかった。すべり量曲線も各径内では3供試体とも概ね同様の曲線を示し、0.005D程度の範囲まではすべり量を測定することができた。何れの径も $\tau_{0.002D}$ は現行JSTMの判定に対して高く、特に細径のD16は高い傾向を示した。

τ_{max} はかぶり厚が 1.5D と小さくなったことによって割裂が早期で起こりやすくなり、5.95~9.74 N/mm² と小さくなったが、各径内でのばらつきは現行 JSTM と比べても大きくなかった。ただし D41 は No.2 のみ τ_{max} が高くなったことによりばらついているが、この範囲のばらつきは現行の実績でもあり、鉄筋周りに粗骨材がやや偏ってしてしまったこと等が要因と考えられる。

5.3 S-R の試験結果

図-10 及び図-11 に D16 及び D41 の S-R 各供試体の付着応力度-すべり量曲線を示す。

D16 の S-R を S と比較すると、 $\tau_{0.002D}$ で 1.03 倍とほぼ同等、 τ_{max} で 1.53 倍、同様に D41 の S-R も $\tau_{0.002D}$ で 1.15 倍と若干高い程度、 τ_{max} で 1.52 倍となった。すべり量曲線でも、D16 と D41 の S-R は S の τ_{max} 時の 5 倍程度のすべり量で τ_{max} を示すなど近い傾向を示した。

S-R はらせん筋による補強状態での終局付着強度を求めることになるため、割裂き付着強度を求める JS や S とは試験としては少し異なるものとなる。また、らせん筋を設置する手間が増えてしまうが、広範囲のすべり量曲線が得られ、供試体が割裂破断しないため安全に試験ができることが確認できた。目的に応じては試験方法として活用できると考えられるので、他の径についても検討したい。

5.4 各径及び種類毎の試験結果の比較

図-12~図-15 に D16~D41 の各径毎の付着応力度-すべり量曲線（各 3 体平均）を示す。

図-13 の D25 と図-15 の D41 は、すべり出し後から破壊前までは JS と S のすべり量曲線が近いことが確認できる。一方、図-12 の D16 と図-14 の D32 は、すべり出し後から破壊前までの勾配は近いものの、S のすべり出し時が高いため曲線自体はややずれている。

図-16 及び図-17 には JS、S 及び S-R の種類毎の付着応力度-すべり量比曲線（各 3 体平均）を示す。すべり量比はすべり量を鉄筋径で除したものである。

図-16 の JS は D16 がややばらいているものの一曲線に収斂する傾向があった。一方、図-17 の S はすべり出し後の勾配は近いものの、D16 はよりすべり出し時が高いため一曲線に収斂する傾向はみられない。

図-18 に $\tau_{0.002D}$ 及び τ_{max} の S/JS 比を示すが、本報の範囲では、 $\tau_{0.002D}$ は JS に比べ高い D16 及び D32 と、同等程度の D25 及び D41 とに傾向が分かれてしまった。

D16 の S は一辺 65mm と打設がぎりぎり可能な最小の大きさのため 20mm 程度の大きな粗骨材の影響を受けやすい、載荷板からの圧縮力の影響を受けやすい、等が考えらえるので、同寸法では評価が難しい可能性もある。今後、異なる種類の節形状の鉄筋でも同様の傾向があるか検討の余地がある。

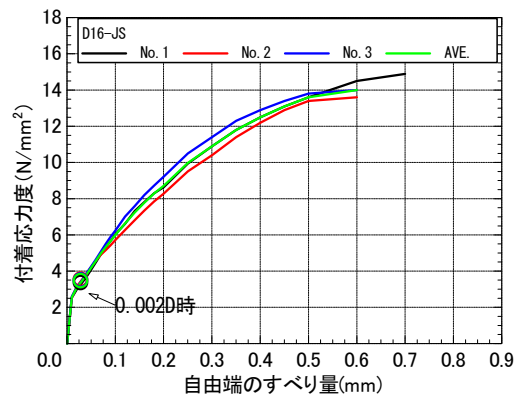


図-2 付着応力度-すべり量曲線 (D16-JS)

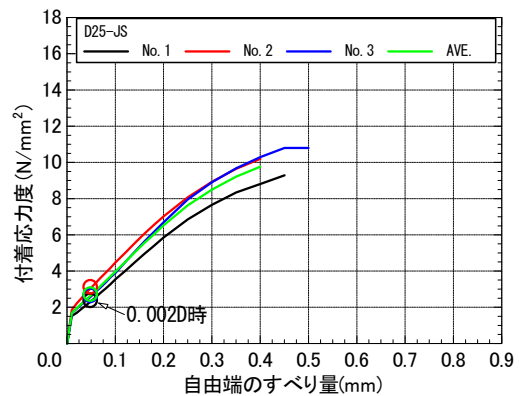


図-3 付着応力度-すべり量曲線 (D25-JS)

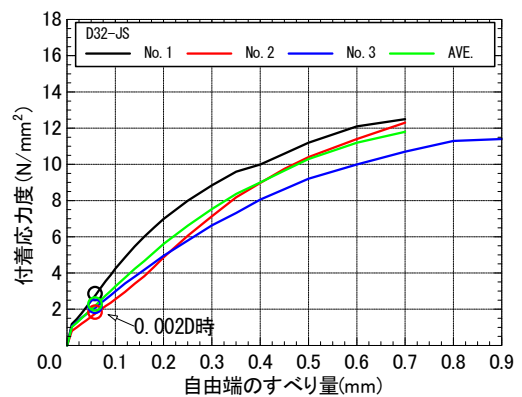


図-4 付着応力度-すべり量曲線 (D32-JS)

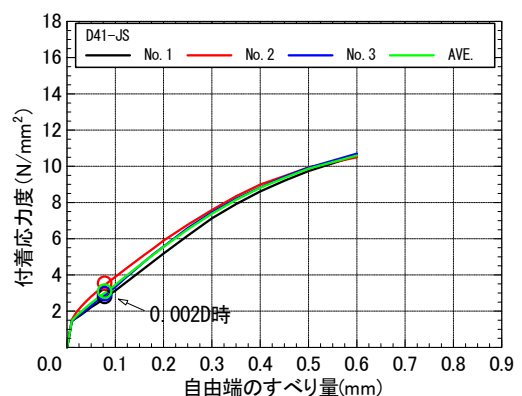


図-5 付着応力度-すべり量曲線 (D41-JS)

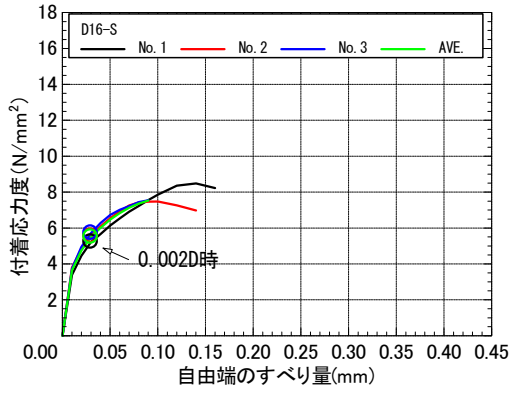


図-6 付着応力度-すべり量曲線 (D16-S)

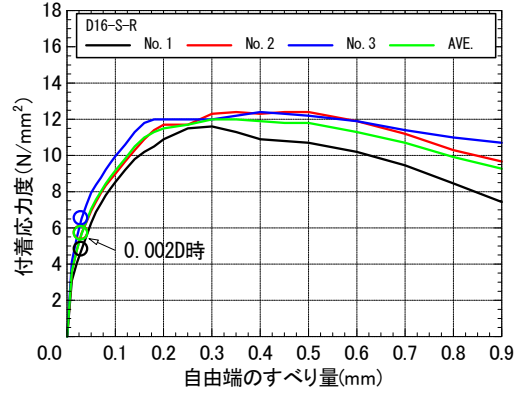


図-10 付着応力度-すべり量曲線 (D16-S-R)

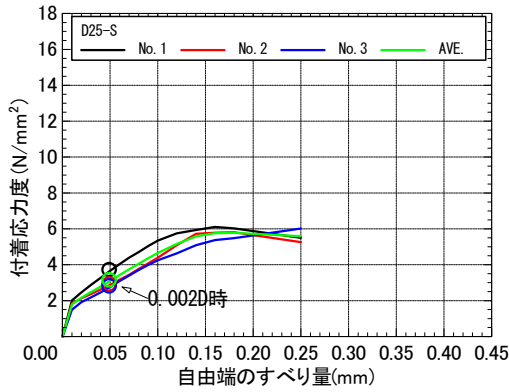


図-7 付着応力度-すべり量曲線 (D25-S)

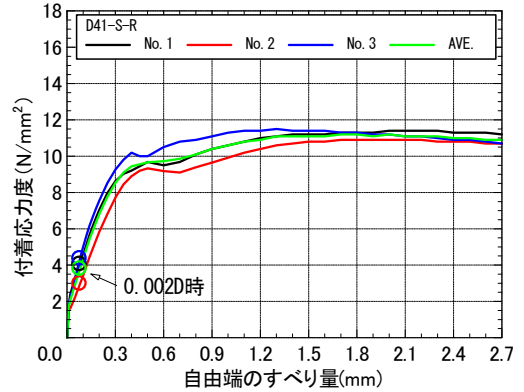


図-11 付着応力度-すべり量曲線 (D41-S-R)

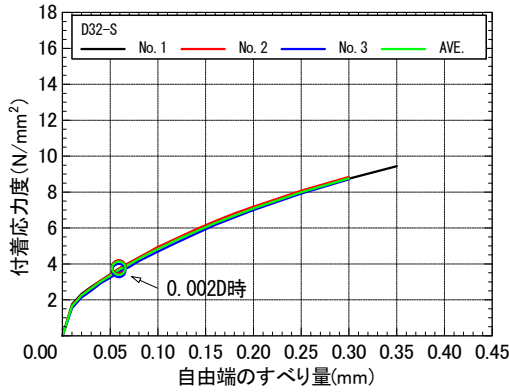


図-8 付着応力度-すべり量曲線 (D32-S)

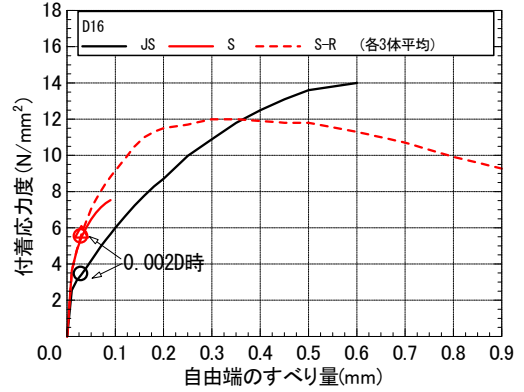


図-12 付着応力度-すべり量曲線 (D16 各種平均)

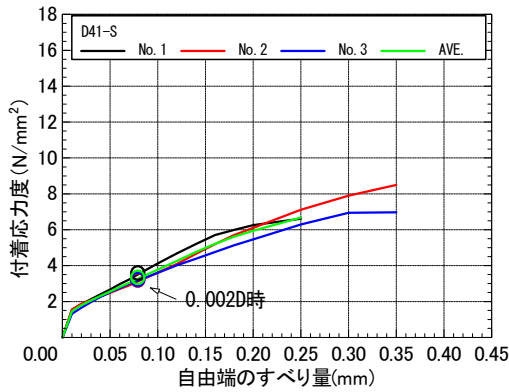


図-9 付着応力度-すべり量曲線 (D41-S)

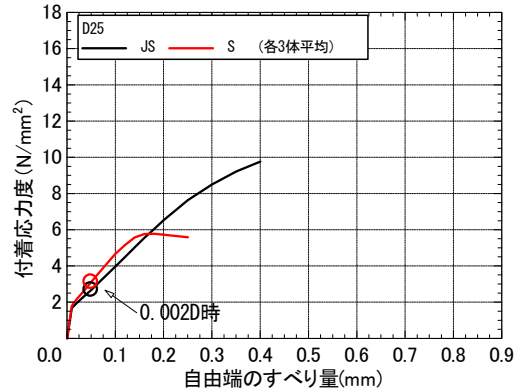
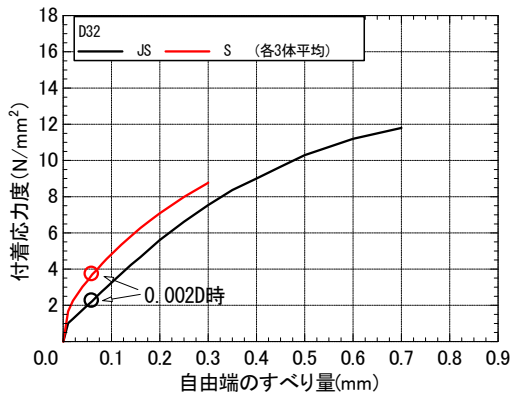
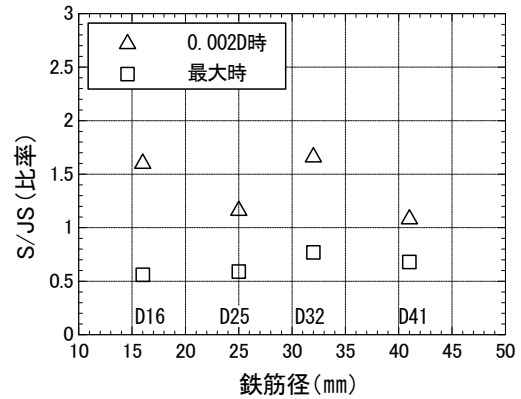


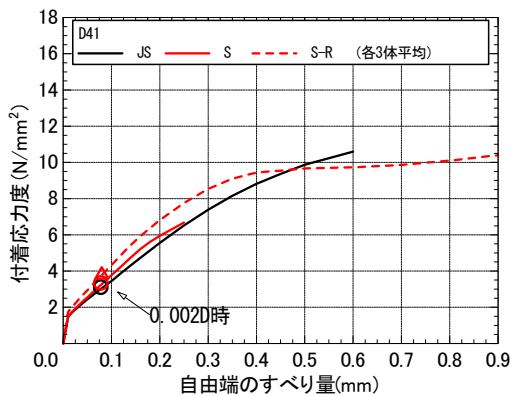
図-13 付着応力度-すべり量曲線 (D25 各種平均)



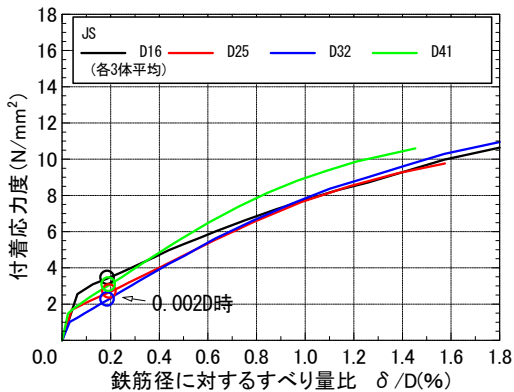
図一14 付着応力度－すべり量曲線 (D32 各種平均)



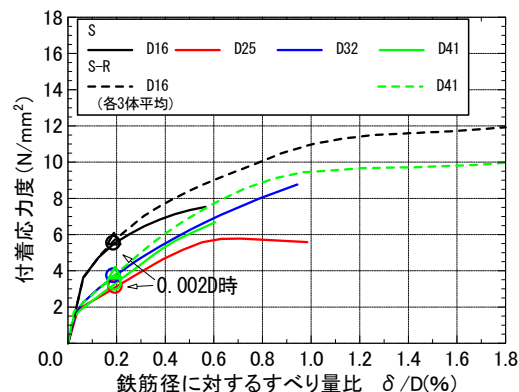
図一18 付着強度と鉄筋径の関係 (各平均)



図一15 付着応力度－すべり量曲線 (D41 各種平均)



図一16 付着応力度－すべり量比曲線 (JS 各径平均)



図一17 付着応力度－すべり量比曲線 (S 各径平均)

6. まとめ

D16, D25, D32 及び D41 の鉄筋について、現行の JSTM の一辺 6D から 4D に小形化した供試体を用いて、コンクリートとの付着強度試験を行い、以下の事項を確認した。

(1) 0.002D 時付着応力度 (初期付着強度) $\tau_{0.002D}$ は各鉄筋径内では大きくばらつかず、D25 及び D41 においては、現行 JSTM の試験値より 1~2 割高い程度と近い値を示した。しかし、D16 及び D32 においては、現行 JSTM の試験値より 6~7 割高い値を示し、鉄筋径によってその比率は異なる傾向を示した。

最大付着強度 τ_{max} は小形化に伴い割裂が早期で起こり、現行 JSTM の試験値より 2~4 割程度低くなったが、各鉄筋径内では大きくばらつかなかった。また、何れも破壊時までには鉄筋径の 0.5% 程度の範囲のすべり量曲線を測定することができた。

(2) D16 及び D41 において行った小形化した上でせん筋補強した供試体は、小形化無補強の供試体と $\tau_{0.002D}$ は同程度で、広範囲のすべり量曲線が得られるため、目的に応じては活用できる可能性を見出した。

今後は異なる種類の節形状の鉄筋を用いて同様の実験を行い、現行 JSTM と得られる結果の違いを明らかにした上で、試験用途に活用できるか検証したい。

参考文献

- 1) 建材試験センター:昭和 48~50 年通産省工業技術院委託「構造材料の安全性に関する調査研究報告」
- 2) 若林和義, 鈴木敏夫, 志村明春, 鈴木澄江:引抜きによる鉄筋とコンクリートとの付着強度試験の供試体小形化に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.387-392, 2016.7
- 3) 東京都立大学土木工学科:村田二郎博士論文選集, pp.59-68, 1988