報告　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

若林　和義[*1]・鈴木　敏夫[*2]・志村　明春[*3]・鈴木　澄江[*4]

要旨：引抜きによる鉄筋とコンクリートとの付着強度試験方法（案）として建材試験センター規格がある。同試験方法は比較的シンプルな試験方法ではあるものの，鉄筋径ごとに供試体寸法が大きくなっていくため，供試体が試験者一人の力では持てない質量になっていくこと，型枠及びジグを多数必要とすること，供試体割裂時に試験者及び測定器が危険である等の問題点がある。本報告では付着強度試験供試体の小形化を提案し，鉄筋のすべり性状を把握できる範囲で，よりコンパクトに試験実施が可能か検証した。現行の試験方法及びその他の試験方法と比較し，それぞれの傾向を把握した。

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

鉄筋とコンクリートとの付着強度試験方法は海外ではASTM，RILEM，BS規準等があり，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 2101T（引抜きによる鉄筋とコンクリートとの付着強度試験方法）がある。

この試験は主に，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，に対してコンクリートとの付着性能評価（所定すべり量時の付着応力度及び最大荷重時の付着応力度）を目的として行われている。

JSTM C 2101Tは，立方形状の型枠内の中心に鉄筋を水平配置してコンクリートを打設した供試体を，万能試験機上に設置し，鉄筋端部をチャックで掴んでコンクリートから引き抜くという材料試験である。比較的シンプルな試験ではあるものの，鉄筋径毎に供試体寸法が大きくなっていくため，太径のものになるとクレーン設備等がないと試験者一人の力では持てない質量になり，作製時や試験時の取り扱いが難しくなってくる。また，補強無し（試験鉄筋以外無筋）のためコンクリートの割裂破壊時及び除去時に供試体の一部が試験者や測定器に落下してくる危険性がある。その他，型枠及びジグを鉄筋径毎に各々必要とし，それを保管するある程度の場所を必要とする等の問題点がある。

そのためD25以外の鉄筋の付着強度試験の実績は少なかったが，近年太径を含む多種の鉄筋での付着性能を確認したいという需要も増えている。

そこで本報告では，鉄筋のすべり性状を把握できる範囲で，付着強度試験の供試体小形化を計画し，現行の試験方法よりコンパクトに安全に太径を含む鉄筋の付着性能確認が可能かどうか，検証した。

２．JSTM C 2101Tの概要

JSTM C 2101Tに示される供試体の概要を**表－1**に示す。

供試体に用いるコンクリートはスランプ10±2㎝で材齢28日時圧縮強度が30±3N/㎜^{2}のもの，鉄筋はコンクリートの割裂破壊以前に降伏しない強度のものとする。供試体の一辺は約6D（D：鉄筋の公称直径）で，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る（付着区間は4D）のが特徴である。**写真-1**及び**図-1**のように載荷し，載荷時には，鉄筋の自由端のすべり量を所定の間隔で測定していく。

鉄筋のすべり量0.002D時の付着応力度$\tau_{0.002D}$及び最大荷重時の付着応力度（付着強度）τ_{max}を求め，付着性能を評価する。付着応力度の計算は式（1）となる。

$$\tau=\alpha P/(4\pi D^2) \qquad (1)$$

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 $30/\sigma$

σ_c ： 同時に作製した円柱供試体の材齢28日における圧縮強度　N/mm^2

なお，JSTMの供試体はRILEMを参考にされているが，RIELMは供試体寸法10Dと大きいので，[1)]で供試体寸法6D及び8Dでの実験検証がなされ，試験結果に大きな差異がなかったことから6Dとした経緯がある。

*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
*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 経営企画部 副部長 博士（工学） （正会員）

表－1　JSTM C 2101T に示される供試体の概要

鉄筋の呼び名	供試体寸法（6D）	付着長（4D）	供試体質量
D16	100 ㎜角	64 ㎜	約 4 kg
D25	150 ㎜角	102 ㎜	約 12 kg
D32	200 ㎜角	127 ㎜	約 25 kg
D41	250 ㎜角	165 ㎜	約 46 kg
D51	300 ㎜角	203 ㎜	約 78 kg

写真－1　試験状況（左：D16，右：D51）

また，同試験は鉄筋コンクリート構造物内の応力状態に類似するよう配慮されてはいるものの，試験結果を直接構造計算の資料にするというものではない。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との付着性状は多用であって，単一で簡単な材料試験によって評価することは困難なためである。また $\tau_{0.002D}$ 及び τ_{max} に判定（$\tau_{0.002D} \geqq 2.9$ N/mm^2，$\tau_{max} \geqq 7.8$ N/ mm^2）が設けられているものの，過去に行われた実験値に対して下限の 80%という目安程度のものとなっている。

３．試験方法に関する提案の概要

鉄筋の付着強度試験は前述の目的のために，試験用鉄筋と比較用標準鉄筋の相対比較で行うことが殆どである。試験用鉄筋と比較用標準鉄筋とのすべり性状の違いを把握することを主目的とし，無筋コンクリートの割裂破壊荷重を求める試験とはしないことも考えうる。本報告では，1.で述べた現行の JSTM C 2101T の問題点を解消するため，**表－2** 及び**図－2** に示すように供試体の小形化を計画した。

供試体寸法を鉄筋径ごとではなく 100 ㎜角，150 ㎜角，200 ㎜角の 3 サイズと限定した。試験者一人の力でも扱える質量に小形化したもので，かぶり厚さは鉄筋のあき間隔規定から 1.5D 以上確保し（D51 は 1D 以上），現行の型枠を利用できる寸法とした。またポリマーセメントモルタルの試験方法 [2] 等でも採用されているらせん筋（φ6 ㎜，@40 ㎜，各々のサイズでかぶり厚が 5 ㎜になる外径とした。）を用い，過度な拘束をしない程度に，破壊時の安全性を確保するとともに，一定の変位まで付着応力度－すべり量曲線が測定できるようにした。

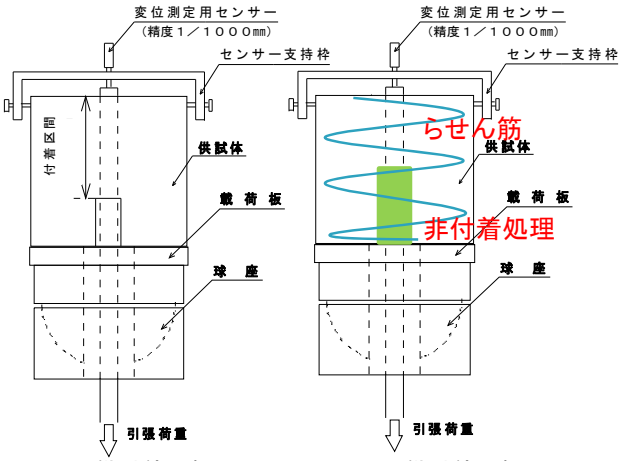
また現行の JSTM C 2101T と同様に，載荷側に非付着区間を設け，付着区間は供試体一辺の 1/2 とし，すべり性状が確認できるよう 2D 以上確保できるようにした（D51 は 1.5D 以上）。その他のコンクリート品質，養生，載荷方法，計算方法等条件は現行同様とした。

付着応力度は式(2)で算出した。（記号は L：付着長さ mm 以外は式(1)と同じである）

$$\tau = \alpha \cdot P / \pi DL \qquad (2)$$

表－2　本報告で提案する試験の供試体概要

鉄筋の呼び名	供試体寸法（L）	付着長（L/2）
D16	100 ㎜角	50 ㎜
D25，D32	150 ㎜角	75 ㎜
D41，D51	200 ㎜角	100 ㎜



図－1　供試体の概要（JSTM C 2101T）　　図－2　供試体の概要（本報告案）

４．試験計画

2.及び 3.で示した JSTM C 2101T に準拠した供試体（記号 JS）及び本報告の提案方法による供試体（記号 N）を中心に D16，D25，D32，D41，D51 の 5 種類の径の鉄筋について試験を計画した。供試体の一覧を**表－3** に，コンクリートの配（調）合表及び使用材料を**表－4** に示す。

D25 に関しては，その他の試験方法に準じた供試体も併せて，らせん筋有で非付着処理のない供試体（JCI の供試体を参考，記号 JC），無筋で非付着処理の供試体（ASTM の供試体を参考，記号 A），非付着処理はあるが供試体寸法が大きい供試体（RILEM の供試体を参考，記号 R）を計画した。それぞれの規格方法は諸条件が一部異なるが，コンクリートの品質，養生，載荷方法，測定方法，計算方法，数量等諸条件は JSTM C 2101T に準じた。また鉄筋は 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 とした。

なお，供試体の作製は 4 回に分けて行い，D51 を除いて同一ロットの材料を用いた。D51 に関しては他径同様に竹節形状であるが，鉄筋メーカーが異なり，試験機の都合上テンションバー（PC 鋼棒）を接続して載荷した。

表－3　供試体の一覧

鉄筋の呼び名	準拠又は参考規格	本研究提案	JSTM 案	JCI 規準案参考	ASTM 規格参考	RILEM 規格参考
	記号	N	JS	JC	A	R
D16	寸法	100 ㎜角	100 ㎜角	100 ㎜角	－	－
	付着長	50 ㎜	64 ㎜	100 ㎜		
	らせん筋	有	無	有		
D25	寸法	150 ㎜角	150 ㎜角	150 ㎜角	150 ㎜角	250 ㎜角
	付着区間	75 ㎜	102 ㎜	150 ㎜	150 ㎜	125 ㎜
	らせん筋	有	無	有	無	無
	備考	－	－	実際の規格はスランプ 8 ㎝	実際の規格は D19 を使用	実際の規格は 5 体，気中養生
D32	寸法	150 ㎜角	200 ㎜角	－	－	－
	付着区間	75 ㎜	127 ㎜			
	らせん筋	有	無			
D41	寸法	200 ㎜角	250 ㎜角	－	－	－
	付着区間	100 ㎜	165 ㎜			
	らせん筋	有	無			
D51	寸法	200 ㎜角	300 ㎜角	－	－	－
	付着区間	100 ㎜	203 ㎜			
	らせん筋	有	無			
条件	打設方向：横打ち（水平），　養生：材齢 28 日標準養生，数量：各 3 体，鉄筋表面形状：竹節					

表－4　コンクリートの配（調）合

鉄筋の呼び名	スランプ (cm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m^3)			
					水	セメント	細骨材	粗骨材
D16，D25，D32，D41	10	69	1.5	48	178	258	901	1003
D51	10	70	1.5	48	180	257	899	1000

水：イオン交換水，セメント：普通ポルトランド（3 社混合），細骨材：掛川産陸砂，粗骨材：青梅産砕石（2005）

５．試験結果

付着強度試験結果を**表－5** に，破壊状況の一例を**写真－2～写真－5** に示す。

5.1 現行と同じ寸法にした供試体のすべり量曲線

図－3 に示す D16 においては，3 種類ともすべり出し後途中までは類似したすべり曲線を示した。最大荷重時に，らせん筋無の JS は割裂するのに対し，らせん筋有の N と JC は最大時でひび割れ後も緩やかにすべる傾向を示した。N と JC の付着強度は同程度で，JS に対して 0.002D 時で 3 割程度高く，最大時では 1 割程度高くなった。また，JS と JC は付着長が異なるため最大荷重自体は異なるが，付着強度は同程度であった。

図－4 に示す D25 においては，D16 同様にすべり出し後割裂までは何れの種類も類似したすべり量曲線を示した。N の付着応力度は JS に対して 0.002D 時で同程度，最大荷重時では 2 割程度高くなり，最大荷重でひび割れが発生後も緩やかに荷重が低下する傾向を示した。また，らせん筋無かつ非付着処理を施していない A は付着強度が JS に比べ 3 割程度低くなった。これは付着長が長くらせん筋補強無しであることにより，割裂破壊が早期に生じたことによる。らせん筋は無いものの供試体が 250 ㎜角と大きくかぶり厚が大きい R は，JS や A のような割裂破壊を生じなかったため，らせん筋有の N や JC 同様に緩やかに荷重が低下する傾向を示した。

5.2 現行より寸法を小さくした供試体のすべり量曲線

続いて D32 から上の太径は供試体寸法を小さくした上でらせん筋補強を施している供試体になる。

図－5 に示す D32 において，N は JS に比べすべり出し後の勾配が大きく，最大荷重でひび割れ発生後も他の径と同様に緩やかにすべっていった。付着応力度は 0.002D 時，最大荷重時共に JS に比べ 2 割程度高くなった。

図－6 に示す D41 において，N は D32 と同様にすべり出し後の勾配が大きくなる傾向を示し，JS に比べ 0.002D 時で 2 割程度高く，最大荷重時で 1 割程度高く

なった。かぶり厚で考えると，現行の規格は鉄筋径によらずかぶり厚 2.5 倍程確保しているが，本研究案の D32～D41 はかぶり厚 1.8～1.9 倍程となる。

図－7 に示す D51 において，N は 0.002D 時で JS に比べ 2 倍もの高い値を示したが，最大荷重時では 2 割程度の上昇にとどまった。ただし，D51 の JS の 0.002D 時の値自体が規格制定時の値に比べて低めであった。ブリーディングの影響なのか原因が明らかではない。何れにしても D51 に関しては供試体寸法を鉄筋径に対して大幅に小さくし，らせん筋の補強効果が大きくでていると考えられる。かぶり厚で考えると現行の 2.5 倍から 1.5 倍と大幅に小さくなる。本研究案の主な目的であるボリュームダウンを優先したためであるが，他の鉄筋径の結果との関連性の考慮が必要となる。

5.3 試験方法毎のすべり量曲線の比較

5.1 及び 5.2 では鉄筋径毎に方法による比較をしたが，試験方法毎の鉄筋径の傾向を比較した。

図－8 に示す JS ではすべり量で比較すると，太径になるほどすべり出し後の勾配は低い傾向がわかる。これは径が太くなるにつれて節の間隔が大きくなっていくからと思われるが，すべり量を鉄筋径で割って無次元化した**図－9** では 0.002D 時の応力度は異なるものの，その後の勾配が同程度ですべり量曲線は類似していることがわかる。

それに対して，**図－10** に示すらせん筋を配した N では，すべり量で比較した場合でも，すべり量曲線が途中までは類似していた。特に供試体寸法が同じものは最大荷重前までは類似しており，その後により小形化を計ったものが，先に破壊に至るという流れである。これはらせん筋によって拘束したコンクリートのボリュームが影響していると考えられる。すべり出し量を無次元化した**図－11** のすべり量曲線でも，すべり出し後の勾配に影響があることがわかる。

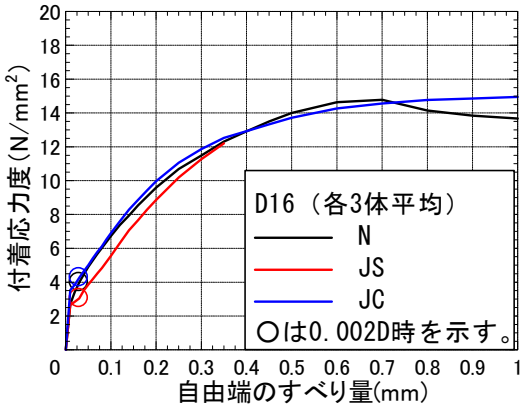
5.4 試験方法及び鉄筋径と付着応力度の関係

鉄筋の表面形状や表面状態を評価するには応力度－すべり量曲線を確認するのが重要である。現行では 0.002D 時及び最大時の付着応力度を判定の指標としているので，値についてのみも比較をした。鉄筋径と付着応力度の関係を**図－12** に，鉄筋径と付着応力度比（JS に対する N の比率）を**図－13** に示す。

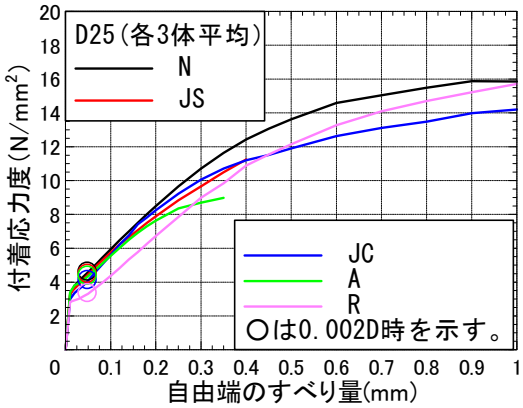
5.1 及び 5.2 に前述したように，D16～D41 においては，N の付着応力度は，JS より 0.002D 時で同程度～3 割程度，最大時で 1～2 割程度高くなる傾向を示した。最大については鉄筋径に対するらせん筋拘束領域が影響していると考えられる。

表－5　付着強度試験結果

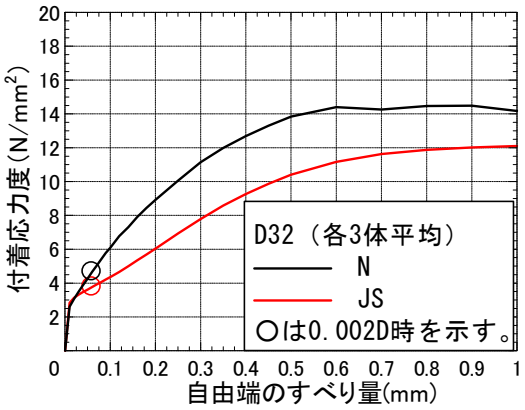
鉄筋の呼び名	記号	α	$\tau_{0.002D}$ N/mm^2		τ_{max} N/mm^2	
			平均	変動係数	平均	変動係数
D16	N	1.00	3.98	0.137	15.2	0.134
	JS	1.05	3.04	0.323	13.5	0.004
	JC	1.00	4.26	0.150	15.1	0.067
D25	N	1.05	4.59	0.230	16.1	0.022
	JS	1.05	4.46	0.164	12.9	0.027
	JC	1.05	4.10	0.071	15.3	0.037
	A	1.05	4.35	0.190	9.13	0.071
	R	1.05	3.32	0.199	16.6	0.094
D32	N	1.00	4.67	0.054	14.9	0.051
	JS	1.05	3.77	0.237	12.2	0.017
D41	N	1.00	4.84	0.105	13.8	0.023
	JS	1.05	3.87	0.106	12.3	0.009
D51	N	1.04	5.06	0.127	12.4	0.058
	JS	1.04	2.53	0.080	10.2	0.042



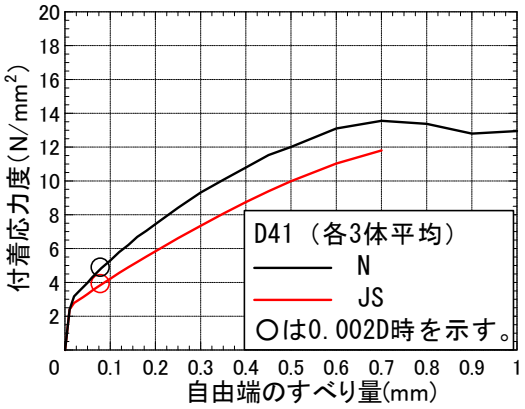
図－3　付着応力度－すべり量曲線（　D16　）



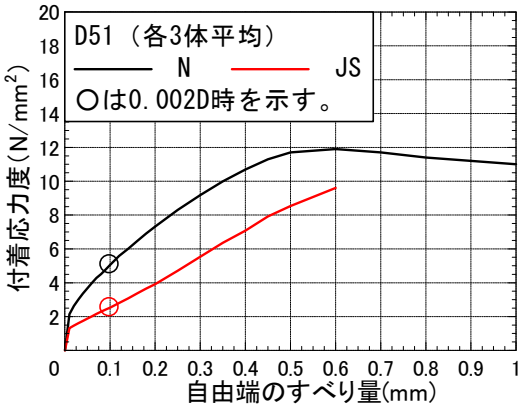
図－4　付着応力度－すべり量曲線（　D25　）



図－5　付着応力度－すべり量曲線（　D32　）



図－6　付着応力度－すべり量曲線（　D41　）



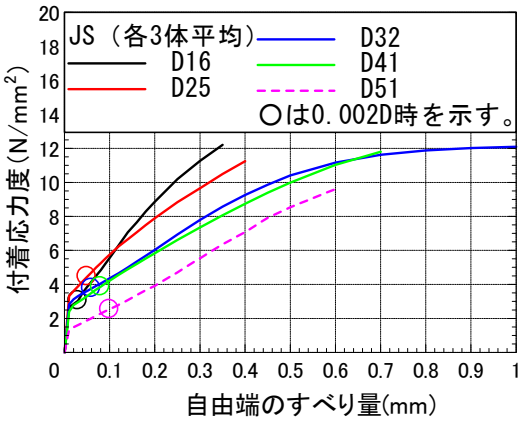
図－7　付着応力度－すべり量曲線（　D51　）

写真－2　破壊状況（左：D25-JS，右：D25-N）

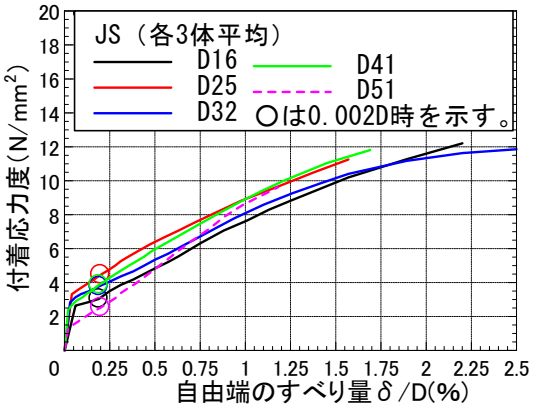
写真－3　破壊状況（左：D32-JS，右：D32-N）

写真－4　破壊状況（左：D41-JS，右：D41-N）

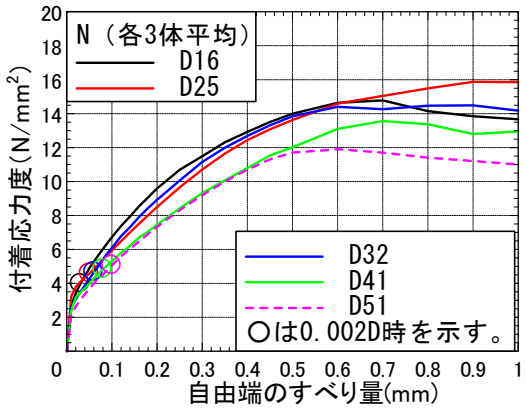
写真－5　破壊状況（左：D51-JS，右：D51-N）



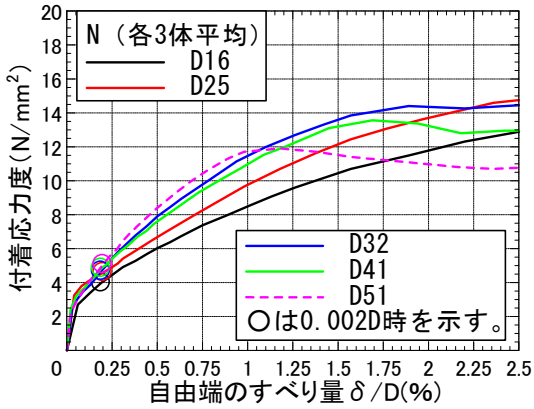
図－8　付着応力度－すべり量曲線（　JS　）



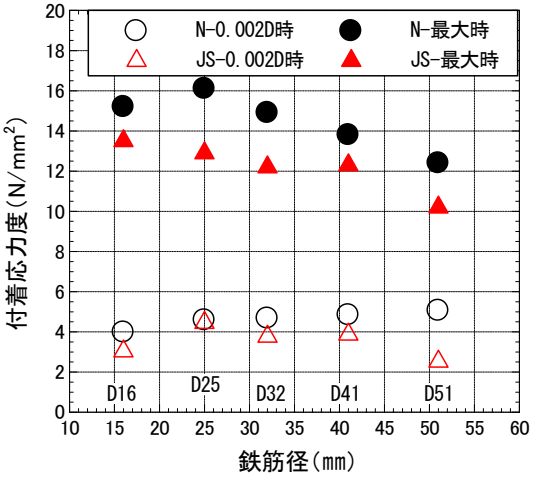
図－9　付着応力度－すべり量曲線（　JS　）



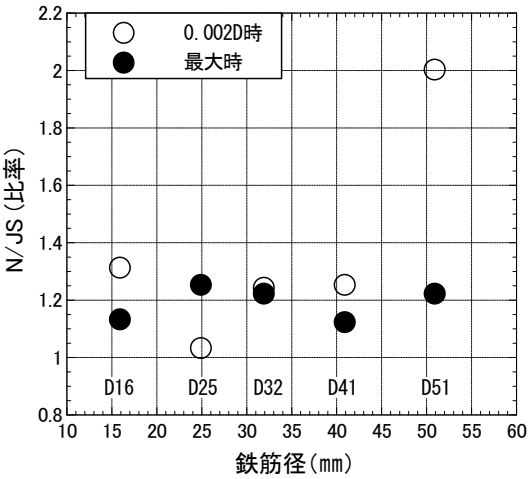
図－10　付着応力度－すべり量曲線（　N　）



図－11　付着応力度－すべり量曲線（　N　）



図－12　鉄筋径と付着応力度の関係



図－13　鉄筋径と付着応力度比の関係

６．まとめ

鉄筋とコンクリートの付着強度試験をよりコンパクトに行うために，らせん筋及び非付着処理を用いて現行の JSTM C 2101T に比べ小形化した供試体を計画して試験を行った。

本研究提案の方法及び現行の JSTM C 2101T による付着強度試験を実施し，得られるすべり量曲線及び付着強度の違いが把握できた。

D16～D41 においては，本研究提案による付着応力度は，現行より 0.002D 時で同程度～3 割程度，最大時で 1～2 割程度高くなる傾向を示した。供試体寸法を現行と同じとした D16 及び D25 においては付着応力度－すべり量曲線は最大時までは類似していた。D32～D51 の太径のものは供試体寸法を小さくし，らせん筋を施したことで拘束効果によりすべり出し後の勾配が大きくなる傾向があった。特に D51 はその影響が顕著であった。

また，本報告提案の供試体で鉄筋径の影響をみたところ，すべり出し前でのすべり量曲線は何れも類似していた。ただし，その後の勾配には供試体寸法の影響が出ているため，今後，付着性能の評価に関する検討が必要である。

本報告では試験用鉄筋と基準鉄筋の相対比較が可能で，かつ供試体を小形化することに重きをおいたので，付着強度自体の絶対値が現行の方法による値に比べ大きくなる傾向を示した。鉄筋径同士の関連性を出すためには，付着長さやらせん筋寸法に関しては再検討する必要がある。

今後，付着長さやらせん筋寸法等の供試体諸条件が，付着性能に及ぼす影響を更に検証した上で，付着性能を相対比較する試験方法の提案を目標にしていきたい。

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書」
2）日本コンクリート工学協会：JCI 規準集（1977～2002 年度）,pp.254-255,2004.4