

論文 エポキシ樹脂塗装が後施工プレート定着型せん断補強鉄筋の先端定着性能に与える影響

府川 徹^{*1}・福浦 尚之^{*2}・岡本 晋^{*3}・新藤 竹文^{*4}

要旨: 今回実施した後施工プレート定着型のエポキシ樹脂塗装鉄筋の引抜き試験結果と、過去に実施した無塗装鉄筋を用いた同様の試験結果とを比較して、先端定着性能について検討した。本稿の範囲では、引抜き試験後の先端定着部の観察、必要定着長の比較の結果から、後施工プレート定着型鉄筋の先端定着では、鉄筋のふしに対する支圧抵抗力よりも充てん材-コンクリート界面の付着力の影響が大きいと言える。細径鉄筋の試験では、必要定着長の算定方法やエポキシ塗膜厚などがその評価結果に影響を与えている可能性があるため、付着強度の低減率、製造方法および塗膜厚の管理などは安全側に運用することが望ましい。

キーワード: 後施工プレート定着型せん断補強鉄筋, エポキシ樹脂塗装, 先端定着, 必要定着長

1. はじめに

著者らは、異形棒鋼の端部に鋼製プレートを摩擦圧接したプレート定着型せん断補強鉄筋を、後施工にて既設構造物に埋設し、構造物のせん断耐力を向上させる耐震補強技術¹⁾ (以下、後施工プレート定着型せん断補強鉄筋と略記)を開発し、多くの適用実績を重ねている。

近年、激しい塩害に晒される構造物においても、耐震補強による耐荷力の改善が強く求められるようになってきている。このような過酷環境においてエポキシ樹脂塗装鉄筋の適用は極めて有効であるが、その適用が殆んど新設構造物に限られている現状において、後施工プレート定着型せん断補強鉄筋とエポキシ樹脂塗装との併用には大いに意義があると言える。

本研究は、後施工プレート定着型せん断補強鉄筋を用いた厳しい塩害環境下の既設構造物の耐震補強を想定し、エポキシ樹脂塗装が先端定着性能に与える影響の把握を目的とした実験的検討についてまとめたものである。

なお、後施工せん断補強鉄筋の付着性能に関しては、主に鋼材が分担するせん断耐力に影響する①端部定着と、主にコンクリートが分担するせん断耐力に影響する②鉄筋中間部の付着に大別できるが、本稿では、以下の事項を考慮し、前者の①端部定着を対象とした。

- 1) エポキシ樹脂塗装による②の付着低下が与える影響は、あらかじめ配置される鉄筋と後施工で配置される鉄筋とに共通の課題であること
- 2) 同じく②の付着低下によるひび割れ幅の増加^{2),3)}が、界面でのせん断伝達の低下やコンクリートの分担せん断耐力の低下に与える影響⁴⁾などは研究途上であること

2. 異形鉄筋の付着性能に関する既往の知見

2.1 素地鉄筋

異形鉄筋とコンクリートの付着は、①鉄筋表面とコンクリートとの粘着力(癒着作用)、②粘着力が破壊された後に働く滑動に対する摩擦抵抗力(摩擦作用)、③ふしに対する支圧抵抗力(機械的噛合い作用)から成り立っている。通常、①は付着応力度が小さい段階で破壊されそれ以降は期待できず、②はそれ程大きな強度ではなく、③が最も大きな役割を占めている。したがって、異形鉄筋の節の高さや形状が非常に重要となる。JIS G3112「鉄筋コンクリート用棒鋼」に、節の間隔、高さ、軸方向となす角度などが定められているのもこのためである。

2.2 エポキシ樹脂塗装鉄筋

エポキシ樹脂塗装鉄筋の付着性能については、1980年代前半に盛んに研究された^{5),6)}。その後、土木学会から1986年にエポキシ樹脂塗装鉄筋を用いる鉄筋コンクリートの設計施工指針[第1版]が、2003年には同[改訂版](以下、エポ筋指針[改訂版]と略記)が発刊された。

エポキシ樹脂塗装鉄筋では、塗膜によって節の形状が滑らかになるため、抜出し変位量が0.002D(D:鉄筋径)程度となる初期の付着応力度が無塗装鉄筋のそれより低下する。また、最大付着応力となる付着強度においても、エポキシ樹脂塗装鉄筋のそれは無塗装の鉄筋と比較して小さくなる。

同指針では普通コンクリートとの付着強度は、無塗装鉄筋のその85%としている。これは、1986年版では付着強度が80%であったこと、最近の実績調査結果では同じく90%程度であったこと、ASTM A775/775SM-01の規格では同じく85%以上確保することと規定しているこ

*1 大成建設(株) 技術センター 土木技術研究所 土木構工法研究室 課長 (正会員)

*2 大成建設(株) 技術センター 土木技術研究所 土木構工法研究室 次長 博(工) (正会員)

*3 成和リニューアルワークス(株) 工事統轄部 リニューアル部 耐震補強室 担当部長 (正会員)

*4 大成建設(株) 技術センター 土木技術研究所 部長 工博 (正会員)

などを考慮して設定されたものである。

また、同指針ではエポキシ樹脂塗装鉄筋を、静電紛体塗装法を用いてエポキシ樹脂塗装を施した鉄筋と定義し、その被膜厚の管理値を $220 \pm 40 \mu\text{m}$ と規定している。

3. 実験概要

3.1 本実験の目的

本実験の主な目的は以下の2点である。

- 1) エポキシ樹脂塗装を施したプレート定着型せん断補強鉄筋（以下、エポ筋と略記）と、無塗装鉄筋を用いたプレート定着型せん断補強鉄筋（以下、素地筋と略記）との先端定着性能の差異の確認
- 2) エポ筋と素地筋との実験結果の比較および試験後に引抜いた先端定着部の状態に基づく、プレート定着型鉄筋の先端定着機構に関する考察

3.2 引抜試験の概要

(1) 試験ケース

試験ケースを表-1に示す。鋼種はSD345とし、実降

表-1 試験ケース

供試体 No.	鉄筋径 (A) (mm)	定着プレート 直径(mm)× 厚さ(mm)	削孔径 (mm)	設定定着長 (B) (mm)	B/A
D13-45-1	D13	28×9	30	30	2.3D
D13-45-2				65	5.0D
D22-45-1	D22	32×16	36	70	3.2D
D22-45-2				150	6.8D
D32-45-1	D32	48×19	55	130	4.1D
D32-45-2				260	8.1D

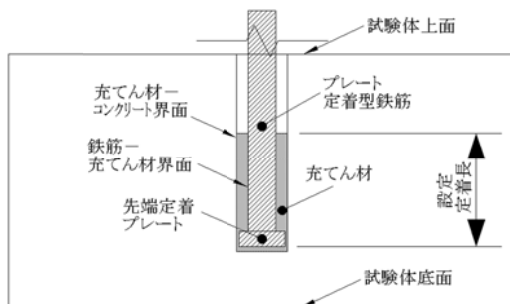


図-1 試験体の概要



写真-1 試験体

伏荷重に到達する前に荷重が低下する定着長と少なくとも規格引張強度まで荷重を保持する定着長を設定した。なお、表-1中の設定定着長は先端定着プレート下面から充てん材表面までの長さを表す。

(2) 試験体の概要

コンクリート打設前の試験体を写真-1に示す。幅・奥行 800mm、高さ 400mm の外寸を持ち、補強筋 D19 SD345 を 120mm 間隔の格子に配置した RC 試験体を製作した。試験体の主な製作手順は、①鉄筋・型枠工、②コンクリート打設工、③削孔工、④定着工である。

削孔工は、写真-1の中心部赤丸の位置に、表-1に示す各鉄筋径に応じた削孔径で深さ 300mm の削孔をレグドリルを用いて行った。定着工は、削孔内に表-1中の設定定着長となるように充てん材を先充てんした後に、プレート定着型せん断補強鉄筋を挿入した。試験体の概要を図-1に示す。

(3) 試験装置および計測項目

試験装置の概要を図-2に示す。本実験では、下部変位計により引抜き変位を、ロードセルにより引張荷重を計測した。また、実降伏荷重に到達する前に荷重が低下する試験ケースの引抜実験終了後に、試験体を抜き出し、先端定着部の状態を目視で確認した。

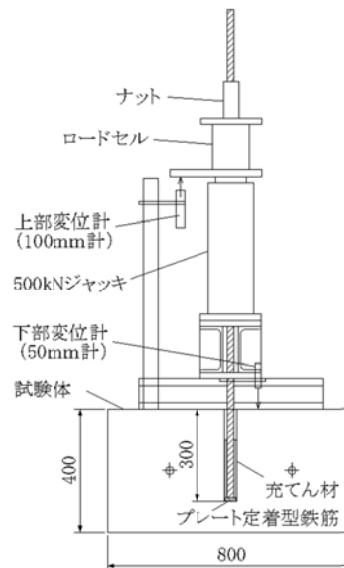


図-2 試験装置の概要



写真-2 エポ筋

3.3 使用材料

本実験では、ねじ節鉄筋に静電紛体塗装を施し、エポ筋を製造した。引抜き試験の確実な加力には、ロックナットの使用が適切と考えたので、ねじ節鉄筋を使用した。試験に供したエポ筋を写真-2に、エポキシ樹脂塗装膜の厚さを表-2に、材料強度を表-3に各々示す。

3.4 先端定着性能の評価方法

本稿では実降伏荷重に耐える必要定着長（以下、必要定着長と略記）による先端定着性能の評価を試みる。エポ筋の必要定着長が素地筋のそれよりも長ければ、先端定着性能が低下したと考える。

先端定着性能の評価方法を図-3に示す。エポ筋の引抜き試験結果から必要定着長を算出し、素地筋については本試験と同じ理由によりねじ節鉄筋を用いて過去に実施した同径の実験結果¹⁾を参照する。

4. 実験結果

4.1 荷重変位曲線

エポ筋を使用した場合の荷重変位曲線を図-4 a)~c)に示す。図-4 a)中の D13-45-1-(S1), D13-45-2-(S2)は、表-1に示した実験ケースよりもさらに定着長を短くしたケースである。定着破壊で終局を迎えたケースと規格引張荷重を超えて終局としたケースとで各々想定通りの結果が得られた。なお、図-4中の実降伏荷重、実引張荷重および規格引張荷重は、各々鉄筋の引張試験から得た実降伏強度、実引張強度および引張強度の規格値に鉄筋の断面積を乗じた値を表す。

4.2 引抜き試験後の先端定着部の観察

実降伏荷重に達する前に荷重が低下したケースにおいて、試験後に引抜いた先端定着部の状態を写真-3 a)~c)に示す。各径ともに、充てん材と鉄筋が一体となって充てん材-コンクリート界面に沿って抜け出した。充てん材-鉄筋界面にはひび割れや剥離などは見られなかった。また、これらのケースでは、コンクリート試験体に放射状のひび割れやコーン破壊は見られなかった。

4.3 必要定着長の算出方法

(1) 最大引張荷重の内挿から求めた必要定着長

実降伏荷重に到達する前に耐荷力が低下したケースと規格引張荷重以上実引張荷重以下で除荷したケースから内挿により実降伏荷重に対応する必要定着長（以下、必要定着長 l_{yi} と略記）を求めた。

この方法による過去の実験結果と本実験の結果との比較を図-5 a)~c)に示す。本稿では、4.2の観察結果から後施工プレート定着型鉄筋の先端定着は充てん材-コンクリート界面での付着の影響が大きいので、横軸を付着面積とした。図中の最大引張荷重は、実験時の安全確保のために規格引張荷重以上実引張荷重以下で除荷した

時点での値である。図中の↑は、引張耐力がこの値を上回る可能性があることを示唆している。仮に引張耐力が図中の最大荷重を上回る場合には、その引張耐力を用いて求めた必要定着長は、図中の最大荷重を用いて求めたそれよりも短くなる。

表-2 エポキシ塗装膜の厚さ

鉄筋径	測定角	測定位置			鉄筋部		
		定着プレート先端からの距離			<180 μm	>260 μm	範囲外 頻度 (%)
		30mm	60mm	90mm			
D13-1	0°	194	204	210	0	8	66.7%
	90°	265	271	260			
	180°	266	273	268			
	270°	279	272	278			
D13-2	0°	164	174	165	3	5	66.7%
	90°	280	240	254			
	180°	232	266	264			
	270°	240	271	275			

鉄筋径	測定角	測定位置			鉄筋部		
		定着プレート先端からの距離			<180 μm	>260 μm	範囲外 頻度 (%)
		50mm	100mm	150mm			
D22-1	0°	197	203	205	0	0	0.0%
	90°	196	203	205			
	180°	231	235	228			
	270°	208	223	228			
D22-2	0°	210	220	227	0	0	0.0%
	90°	195	218	222			
	180°	180	200	205			
	270°	205	211	220			

鉄筋径	測定角	測定位置			鉄筋部		
		定着プレート先端からの距離			<180 μm	>260 μm	範囲外 頻度 (%)
		50mm	150mm	250mm			
D32-1	0°	243	268	255	0	1	8.3%
	90°	198	224	224			
	180°	190	222	201			
	270°	210	247	240			
D32-2	0°	226	248	223	0	0	0.0%
	90°	218	225	224			
	180°	205	201	197			
	270°	279	186	194			

* 塗膜厚：JSCE-E 513で求めた塗膜厚が220±40μmで、かつ、その範囲を超える頻度が10%以下でなければならない。

表-3 材料強度

種別	養生方法	圧縮強度 (N/mm ²)	材齢 (日)	備考
コンクリート	現場封緘	35.0	52	引抜き試験実施時
		35.5	77	D13-45-1実験時
充填モルタル	現場封緘	56.4	22	引抜き試験実施時
		53.7	21	D13-45-1実験時

種別	種類	鉄筋径	降伏荷重 (kN)	降伏点 (N/mm ²)	実引張荷重 (kN)	引張強度 (N/mm ²)
			SD345	D13	51.1	403
	D22	154.1	398	224.9	581	
	D32	313.7	395	458.3	577	

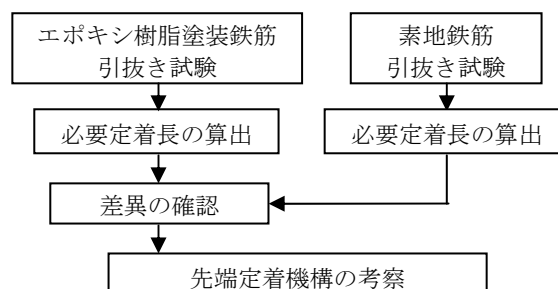


図-3 評価方法

(2) 付着強度から求めた必要定着長

4.2の観察結果から、充てん材-コンクリート界面での付着の影響が大きいため、(1)の方法に加えて、実降伏荷重に到達する前に耐荷力が低下したケースの付着応力と鉄筋の実降伏強度から必要定着長（以下、必要定着長 l_{yb} と略記）を求めた。

これら2種類の方法で求めた必要定着長の比較を表-4に示す。表-4中の項目について以下に説明する。

- 1) 引抜き荷重 P は、載荷履歴中の最大荷重とした。引抜き荷重を、引抜き変位量が 0.04mm となる時点 (JSCE-G503-1999), $0.002D$ (D :鉄筋径 (mm)) となる時点 (JSCE-E516-2003), あるいは引抜き変位量の増加が顕著となる時点 (図-4中のA点) の荷重と定義する方法もある。しかし、本実験の測定方法では 0.04mm , $0.002D$ (mm) となる時

点を合理的に定義しにくいこと、また、実験ケースごとに異なる荷重-変位関係の傾向によりA点を合理的に定義しにくいケース (例えば D32-45-1) があったことから適用しなかった。

- 2) 付着長 l_b は、4.2の観察結果から先端定着プレート上面から充てん材表面までの部分が付着に有効に寄与すると考えたので、定着長の実測値から先端定着プレートの厚さを減じた値とした。ただし、過去の実験結果を参照した素地筋の定着長は、実測値が明確でなかったため、各実験ケースの設定定着長から先端プレート厚を減じた値とした。
- 3) 付着強度 f_b は、式 (1) によって算出した。
$$f_b = P / (S_u \times l_b) \quad (1)$$
- 4) 必要定着長 l_{yi} は、式 (2) によって算出した。
$$l_{yi} = S_{req} / S_u \quad (2)$$

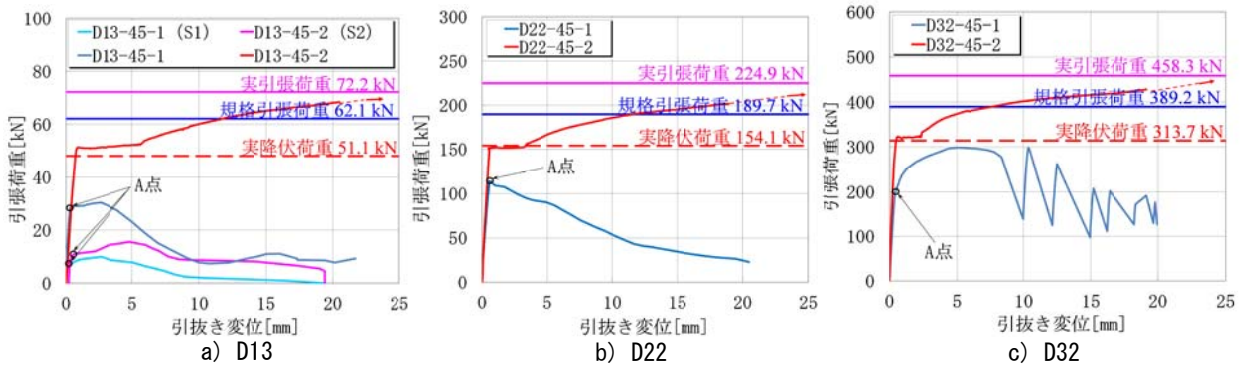
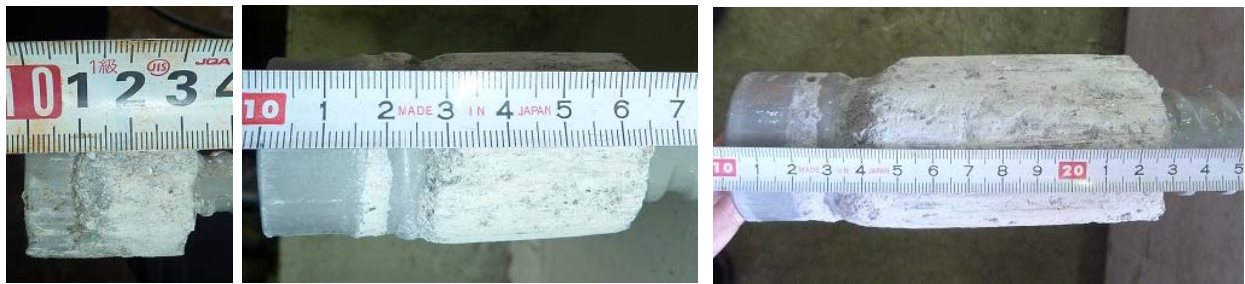


図-4 荷重変位曲線

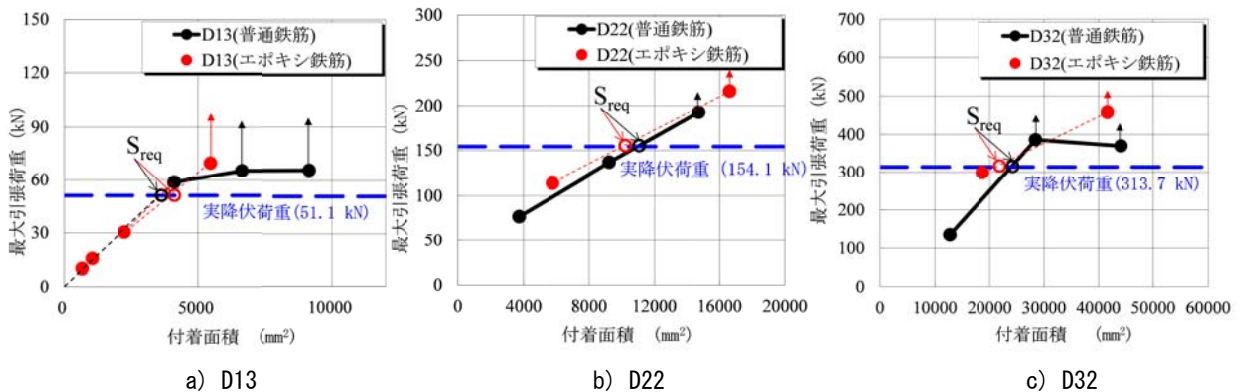


a) D13

b) D22

c) D32

写真-3 引抜後の先端定着部の状態



a) D13

b) D22

c) D32

図-5 必要定着面積 S_{req}

ここに、 S_{req} は必要定着面積を表し、実降伏荷重に到達する前に耐荷力が低下したケースと規格引張荷重以上実引張荷重以下で除荷したケースのプロットを結んだ直線と実降伏荷重との交点から求める。

5) 必要定着長 l_{yb} は、式 (3) によって算出した。

$$l_{yb} = f_{sy} / f_b \quad (3)$$

6) 必要定着長 l_{yi} , l_{yb} の比率は、素地筋に対するエポ筋の l_{yi} , l_{yb} の比であり、1 より大きい値はエポ筋の必要定着長が長いことを表す。

4.4 付着強度および必要定着長の比較

(1) 付着強度 f_b の比較

素地筋に対するエポ筋の f_b の比率は、D13 では 1.07, 1.06, 1.03 であり、D22 では同比率が 0.96 であった。これらの値は、通常のエポキシ樹脂塗装鉄筋の無塗装鉄筋に対する付着強度の比率より大きい。ただし、D22 では素地筋同士の f_b の比率が 0.72 となったので、安全側の評価となるように f_b の大きい素地筋 1 を比較の対象とした。素地筋 2 の f_b の比率が 0.72 となった原因については明確ではない。

D32 では D32-45-1 の f_b が大きいので、同比率が 1.51 と、他のケースと比較して高率となった。

(2) 必要定着長 l_{yi} の比較

図-5 では、D13 と D22 の場合には素地筋とエポ筋の実験結果が近い値となったが、D32 の場合には両者の間にばらつきが見られた。

表-4 では、素地筋に対するエポ筋の l_{yi} の比率は、D13 では 1.18, 1.18, 1.18, D22 では 0.88, D32 では 0.79 であった。D13 では、基準とした素地筋に対して若干高率となった。D22, D32 では低率になった。

(3) 必要定着長 l_{yb} の比較

素地筋に対するエポ筋の l_{yb} の比率は、D13 では 1.00, 1.01, 1.04, D22 では 1.01, D32 では 0.60 であった。D13, D22 では、基準とした素地筋に対してほぼ同率となった。D32 では、付着強度 f_b の比率が大きいことから、素地筋に対して低率となった。

5. 考察

ここでは、必要定着長 l_{yb} と必要定着長 l_{yi} について、以下の 2 つの観点から考察する。

1) 算出方法の違いの影響

2) エポ筋と素地筋との比較

(1) D13 シリーズ

D13 シリーズにおける l_{yb} の比率は 1.00, 1.01, 1.04, l_{yi} の比率は 1.18, 1.18, 1.18 であった。

算出方法の違いに着目すると、 l_{yi} の比率は l_{yb} の比率よりも 13~18% 程度高率である。

エポ筋と素地筋との比較に着目すると、 l_{yb} の比率では素地筋とエポ筋とではほとんど差がないことがわかる。 l_{yi} の比率では素地筋に対してエポ筋では 18% 程度高率である。

l_{yi} の比率が大きいことは、通常のエポキシ樹脂塗装鉄筋の表面付着の場合であれば、付着強度低下の影響を受けやすい D13 (節高 0.5~1.0mm) に、表-2 に示す塗装被膜を施したことが影響したと考えられる。しかし、先端プレート定着における l_{yb} の増大はこれほど顕著ではないので、厚い塗装被膜だけが l_{yb} の増大の要因とは言えない。4.3. (1) で述べたように、仮に本実験の引張耐力が最大荷重を上回る場合には、引張耐力を用いて内挿により求めた必要定着長は、最大荷重を用いて内挿により求めたそれよりも短くなる。その場合には、 l_{yi} の比率は低減される可能性がある。

表-4 必要定着長の比較

項目	単位	D13				D22			D32		
		素地筋	D13-45-1(S1)	D13-45-2(S2)	D13-45-1	素地筋1	素地筋2	D22-45-1	素地筋	D32-45-1	
引抜き荷重 (P)	kN	58.6	10.0	15.6	30.4	76.8	136.5	114.1	134.8	298.6	
削孔径	mm	32	30	30	30	35	35	36	50	55	
単位付着面積 (S_u)	mm ² /mm	100.5	94.2	94.2	94.2	110.0	110.0	113.1	157.1	172.8	
付着長 (l_b)	mm	41.0	7.0	11.0	22.0	34.0	84.0	51.0	81.0	108.0	
付着強度 (f_b)	計算値	N/mm ²	14.2	15.2	15.0	14.7	20.5	14.8	19.8	10.6	16.0
	比率		1.00	1.07	1.06	1.03	1.00	0.72	0.96	1.00	1.51
鋼材面積	mm ²	126.70				387.10			794.20		
実降伏荷重 (f_{sy})	kN	51.1				154.1			313.7		
4.3 (1) の方法	必要定着長 l_{yi}	mm	35.7	42.3	42.0	42.0	100.7	99.7	88.6	152.3	120.6
	比率		1.00	1.18	1.18	1.18	1.00	0.99	0.88	1.00	0.79
4.3 (2) の方法	必要定着長 l_{yb}	mm	35.7	35.8	36.0	37.0	68.2	94.9	68.9	188.5	113.5
	比率		1.00	1.00	1.01	1.04	1.00	1.39	1.01	1.00	0.60

*素地筋:過去に引抜き試験に供した無塗装横筋鉄筋を用いたプレート定着型せん断補強鉄筋(各試験ケースの鉄筋・定着プレートと寸法・材質が同じもの)

このように先端プレート定着におけるエポ筋の必要定着長が素地筋のそれよりも長く評価される要因は、算定方法や塗膜厚など複数存在する可能性があると考えられる。

(2) D22 シリーズ

D22シリーズにおける l_{yb} の比率は1.01, l_{yi} の比率は0.88であった。

算出方法の違いに着目すると, l_{yi} の比率は, l_{yb} の比率よりも13%程度低率であった。

エポ筋と素地筋との比較に着目すると, l_{yb} の比率は素地筋とほぼ同率であった。 l_{yi} の比率は素地筋のそれよりも13%程度低率であった。

(3) D32 シリーズ

D32シリーズにおける l_{yb} の比率は0.60, l_{yi} の比率は0.79であった。

算出方法の違いに着目すると, l_{yi} の比率は, l_{yb} の比率よりも30%程度高率であった。

エポ筋と素地筋との比較に着目すると, l_{yb} および l_{yi} の比率は、素地筋のそれよりも各々21%程度および40%程度低率であり、エポ筋の必要定着長が素地筋のそれよりも顕著に短くなった。このように、算出方法にかかわらず、エポ筋の必要定着長が顕著に短く評価された。この要因については明確ではないものの、以下の要因などが影響を与えるものと考えられる。

- ① 削孔径、鉄筋径、先端定着プレート径のバランス
- ② コンクリートによる充てん材の拘束効果
- ③ 削孔時の孔壁粗度の差異

(4) 考察のまとめ

- 1) D13 シリーズで見られたエポ筋の必要定着長が長めに評価される要因は、算定方法や塗膜厚など複数存在する可能性があると考えられる。
- 2) D13 および D22 シリーズでは、付着強度から求めたエポ筋の必要定着長 l_{yb} の比率が素地筋とほとんど差がないので、後施工プレート定着型鉄筋の先端定着では、エポ筋のふしに対する支圧抵抗力よりも先端定着プレートの支圧力と充てん材-コンクリート界面の付着力の影響が大きいと考えられる。

(5) 先端定着機構の推察

(1)～(4)で整理した考察、表-5 に示すエポ筋の後施工定着と鉄筋表面付着との相違などから、後施工先端定着機構について以下のように推察した。

- ① 先端定着プレートによる充てん材の支圧力が充てん材-コンクリート界面の摩擦や付着を介してコンクリートに伝えられる

表-5 鉄筋表面付着と後施工定着の相違点

	通常のエポキシ樹脂塗装鉄筋の表面付着	エポ筋の後施工定着
付着界面	エポキシ樹脂とコンクリート	エポキシ樹脂と充てん材 充てん材とコンクリート
支圧抵抗力	鉄筋のふし	先端定着プレートと鉄筋のふし

- ② 先端定着プレートの支圧力により生じる充てん材の横ひずみをコンクリートが拘束することで、両者の界面に対して圧縮応力が働き、界面摩擦の増加と付着力の向上に寄与する

6. まとめ

本実験の範囲においては、以下の知見を得た。

- 1) 引抜き試験後の先端定着部の観察、エポ筋と素地筋との必要定着長の比較の結果から、後施工プレート定着型鉄筋の先端定着機構では、エポ筋のふしに対する支圧抵抗力よりも先端定着プレートの支圧力と充てん材-コンクリート界面の付着力の影響が大きいと考えられる。
- 2) 必要定着長の評価では、算定方法や塗膜厚など複数の要因がばらつきを生じさせる可能性があると考えられる。先端定着性能はせん断耐力に与える影響が大きいので、付着強度の低減率、製造方法および塗膜厚の管理などはエポ筋指針[改訂版]に準拠するなど、安全側に運用することが望ましい。

参考文献

- 1) 財) 土木研究センター、建設技術審査証明報告書(建設審証第0522号)、後施工プレート定着型せん断補強鉄筋、2011.8
- 2) 土木学会：コンクリートライブラリー112 エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いる鉄筋コンクリートの設計施工指針【改訂版】、pp.7～9、2003.11
- 3) 小林茂敏、片脇清士、森浜和正：エポキシ塗装鉄筋の力学的特性に関する2,3の実験、コンクリート工学年次論文集、Vol.4、pp.85-88、1982
- 4) 日本大学工学部コンクリート工学研究室HP：「せん断力を受ける鉄筋コンクリート部材」
- 5) 池田尚治、山口隆裕：エポキシ樹脂塗装鉄筋の表面形状とコンクリートとの付着強さについて、土木学会年次講演集、Vol.39、No.5、pp.43-44、1984.10
- 6) 池田尚治、山口隆裕、伊東裕之：エポキシ樹脂塗装鉄筋の付着に関する研究、土木学会年次講演集、Vol.40、No.5、pp.157-158、1985.9