

論文 エポキシ樹脂塗装鉄筋の付着改善に関する検討

津村 壽樹^{*1}・上田 隆雄^{*2}・新井 康裕^{*3}・宮川 豊章^{*4}

要旨：塩害環境における有効な防食手段の一つとしてエポキシ樹脂塗装鉄筋が利用されるケースが増加している。コンクリート構造物の補強鉄筋としてエポキシ樹脂塗装鉄筋を用いた場合に、鉄筋表面の防食塗装が健全であれば高い防食効果が期待できる半面、通常の鉄筋を用いた場合と比較してコンクリートとの付着強度の低下は避けられない。そこで本研究では、防食層に熱硬化性樹脂骨材を混入することで表面に凹凸を与え、エポキシ樹脂塗装鉄筋の付着性能を向上させることを試みた。この結果、特に鉄筋すべりの小さい場合の付着応力が通常のエポキシ樹脂塗装鉄筋と比較して向上する傾向が認められた。

キーワード：エポキシ樹脂塗装鉄筋, 付着強度, 鉄筋引抜き試験, 両引試験, ひび割れ分散性

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物は一般的に耐久性に優れた構造形式であり、適切な維持管理のもとに長期間の供用が可能である。これに対して、コンクリート構造物が早期に劣化する状況も多数報告されており、それらの中でも塩害や中性化による鉄筋腐食問題は、重要な課題として認識されてきた。特に海洋環境や、寒冷地の凍結防止剤散布環境における塩害は、鉄筋や PC 鋼材の腐食を著しく促進し、構造物としての耐荷性など力学的な性能の低下に至る状況も考えられる深刻な劣化形態と言える。

厳しい鉄筋腐食環境に鉄筋コンクリート構造物を建設する場合には、所要の耐久性を確保するために、十分な防食方法を検討する必要がある。防食効果を得る方法としては、コンクリートの W/C を小さくすることで塩化物イオンの拡散係数を小さくする方法やかぶりを大きくする方法などが考えられるが、より高い防食性能が求められる場合には、鉄筋表面に耐食性に優れた樹脂をコーティングした防食鉄筋が検討される。防食鉄筋の中でも現在最も普及しているのがエポキシ樹脂塗装鉄筋であり、長期耐久性などに関する検討が進みつつある¹⁾こともあって近年その需要は増加している。

エポキシ樹脂塗装鉄筋をはじめとする防食鉄筋をコンクリート中に埋め込んだ場合、鉄筋とコンクリートとの間に介在する防食層の影響で普通鉄筋よりも付着応力が低下し、このような傾向は特に鉄筋すべり量の小さい場合に顕著となる²⁾。また、特にエポキシ樹脂塗装鉄筋の場合、鉄筋表面が滑りやすいことから施工時の取り扱いが難しいといったことも指摘されている。

そこで本研究では、付着性能や施工性能の改善を目的として表面に凹凸を形成させたエポキシ樹脂塗装鉄筋

について、鉄筋引抜き試験と両引試験によって付着性状の改善効果を確認することとした。また、鉄筋引抜き試験時にコンクリートに発生する AE を測定することにより、付着破壊のメカニズム推定も併せて行うこととした。

2. 実験概要

2.1 使用鉄筋

本研究で使用した鉄筋は、普通鉄筋、普通エポキシ樹脂塗装鉄筋、高付着型エポキシ樹脂塗装鉄筋の3種類としたいずれの鉄筋も同種で D16 SD295A 相当の鉄筋径および材質のものを用いた。鉄筋の物理的および化学的性質を表-1に示す。

土木学会のエポキシ樹脂塗装鉄筋の品質規格 (JSCE-E 102-2003) では、付着強度を確保しつつ防食効果を得るための塗膜厚として $220 \pm 40 \mu\text{m}$ を規定している。この場合、付着強度は無塗装鉄筋の 85% 以上を確保することが規定されている。付着強度を大きくするためには、塗膜厚を薄くすることが一つの手段として考えられるが、この場合、防食効果が低下することが懸念される。

本研究で採用した高付着型エポキシ樹脂塗装鉄筋は、防食層が2層構造となっており、下層の1層目で防食効果を確保し、上層の2層目で付着性能を改善することを目標としている。図-1に示すように、上層については、熱硬化性樹脂骨材入りのエポキシ樹脂塗装を施すことで表面を凸凹に仕上げ、コンクリートとの付着力を高めることを試みている。防食層が2層構造となることによりピンホールを減らす効果が期待できる上、表面がざらざらとして滑りにくくなるために、施工性の向上も得られる。塗膜厚は1層目が $200 \pm 20 \mu\text{m}$ 、2層目が $40 \pm 20 \mu\text{m}$ で合計 $240 \pm 40 \mu\text{m}$ とし、全体の層厚としては、規

*1 徳島大学大学院 先端技術科学教育部知的力学システム工学専攻 (正会員)

*2 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部エコシステムデザイン部門准教授 工博 (正会員)

*3 (株)明希 専務取締役

*4 京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻教授 工博 (正会員)

表-1 鉄筋の諸性質

降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び (%)	化学成分(wt.%)				
			C	Si	Mn	P	S
400	546	27	0.24	0.26	0.91	0.020	0.029

表-2 コンクリートの配合

W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
		W	C	S	G	AE 減水剤	AE 剤
55	46	175	318	811	972	1.6	0.02

表-3 コンクリートのフレッシュ性状および強度

スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度(N/mm ²)
6.0	5.0	37.9

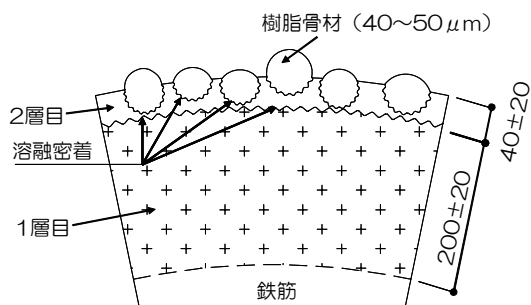


図-1 高付着型エポキシ樹脂塗装鉄筋の断面模式図

格値よりも若干大きくなるように作製した。普通型および高付着型エポキシ樹脂塗装鉄筋の外観を写真-1に示す。外観上は両者に大きな違いは無いが、表面の手触りは大きく異なる。

2.2 供試体の作製

供試体の作製に用いたコンクリートの配合を表-2に示す。得られたコンクリートのフレッシュ性状および材齢 28 日の圧縮強度は表-3に示す通りとなった。

鉄筋引抜き試験用供試体は、100×100×100mm の立方体コンクリートとし、その断面中央に長さ 800 mm の鉄筋を 1 本配した。鉄筋の自由端として、コンクリート外の突起部分を 5mm 設けた。また、載荷板からの応力の均等化を図るために 36mm を非付着区間とし、付着長は鉄筋径の 4 倍にあたる 64mm とした。なお、コンクリートの割裂を防止するための補強筋として φ6mm のスパイラル筋を 30mm ピッチで配した供試体も併せて作製した(図-2 参照)。

両引抜き試験用の供試体は、50×50×760mm の角柱コンクリートとし、その正方形断面中央に長さ 1500mm の鉄筋を 1 本配した。

コンクリート打設の翌日に脱型後、すべての供試体に



写真-1 エポキシ樹脂塗装鉄筋の外観
(左：高付着型，右：普通)

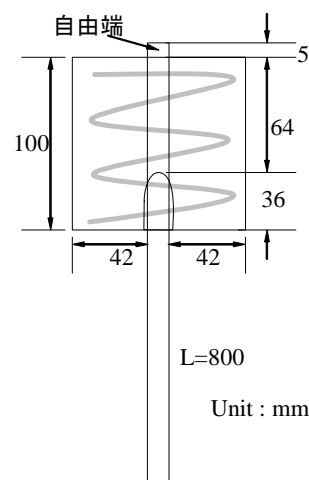


図-2 鉄筋引抜き試験用供試体

ついて、20℃の恒温室中で 28 日間の封緘養生を行った。養生終了後、直ちに各種載荷試験を行った。なお、供試体は各要因につき 3 体ずつ作製した。

2.3 載荷試験

すべての載荷試験は 2000 kN 容量の万能試験機を用いて行った。鉄筋引抜き試験は JSCE-G503「引抜き試験による鉄筋とコンクリートとの付着強度試験方法」に従って行い、鉄筋引抜き荷重、鉄筋の自由端変位と、コンクリートの AE ヒット数を測定項目とした。なお、自由端変位を測定する変位計は容量 20 mm のダイヤルゲージとした。AE センサは、供試体の相対する側面 2 面について

表-4 鉄筋引抜き試験における破壊モードと付着強度比

鉄筋種類	スパイラル筋	破壊モード	付着強度比 (%)	自由端変位 0.002D における付着応力比 (%)
普通鉄筋	なし	割裂	100	100
	あり	引抜け	100	100
エポキシ樹脂塗装鉄筋	なし	割裂	83.2	63.2
	あり	引抜け	85.1	71.5
高付着型エポキシ樹脂塗装鉄筋	なし	割裂	86.1	112.1
	あり	引抜け	92.0	109.8

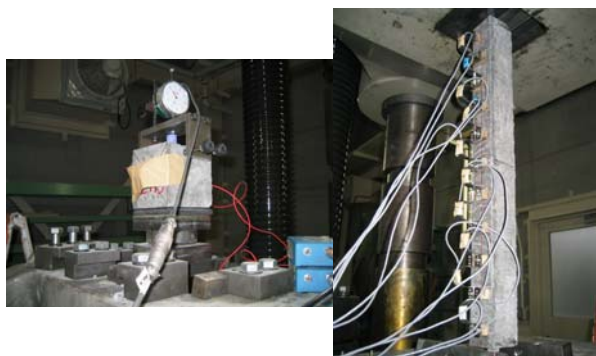


写真-2 載荷試験状況 (左: 引抜き, 右: 両引)

て鉄筋直上中心位置にワックスを用いて貼り付けた (写真-2 参照)。AE 波の測定条件としては、検出した信号を増幅器で 40 dB に増幅し、閾値は 43 dB とした。また、フィルターの条件を 10 kHz 以上 1000 kHz 以下に設定した。なお、計測した AE の中でエネルギーが 0 となるものについては、電気ノイズとみなして、データの中から取り除くこととした。

両引試験では、供試体の鉄筋両端を引張した時の鉄筋引張荷重と、供試体に貼り付けた π 型ゲージの変位量を測定した。 π 型ゲージは、基長 50 mm、容量 2 mm のゲージを合計 12 個連続でコンクリート長手方向に設置した (写真-2 参照)。なお、鉄筋の降伏後はクロスヘッドストローク値が降伏時から 20mm 増加するまで載荷を続けた。載荷終了後はひび割れ本数を測定することで、ひび割れ分散性を評価した。

3. 鉄筋引抜き試験

3.1 付着強度

鉄筋引抜き試験で得られた付着強度および自由端変位が 0.002D=0.032 mm における付着応力の平均値をそれぞれ、図-3 および図-4 に示す。また、各供試体の破壊モードと、普通鉄筋の場合を 100% とした時の付着強度比を表-4 に示す。図-3 によると、スパイラル筋の有無に関わらず、普通鉄筋を用いた場合の付着強度が最も大きく、普通のエポキシ樹脂塗装鉄筋を用いた場合

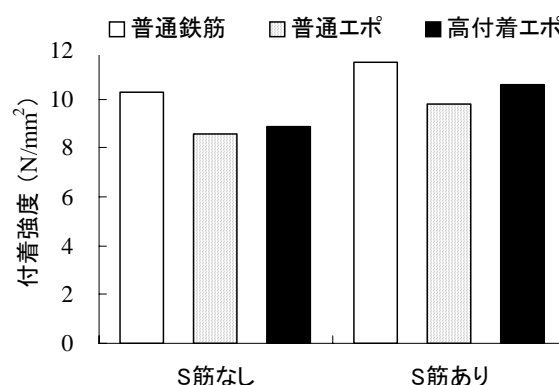


図-3 付着強度

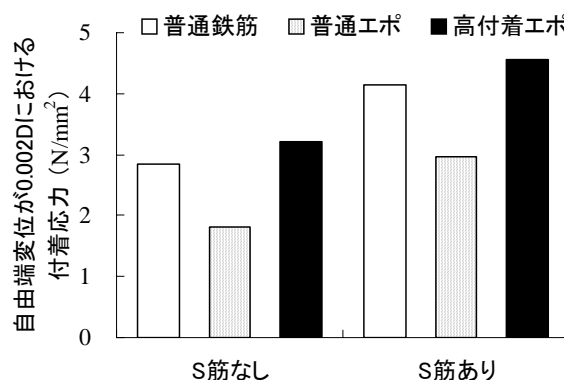


図-4 自由端変位 0.002D における付着応力

が最も小さくなった。高付着型のエポキシ樹脂塗装鉄筋については、普通タイプと比較すると若干大きな付着強度を示しているものの、増加割合は数%程度となっている。これに対して、図-4 によると、鉄筋のすべり出し部分である、自由端変位が 0.002D の時の付着応力は高付着型のエポキシ樹脂塗装鉄筋を用いた場合が最も大きくなっており、普通のエポキシ樹脂塗装鉄筋の場合と比較して大きく改善されていることが分かる。表-4 によると、普通のエポキシ樹脂塗装鉄筋の付着強度比は概ね 85% 程度と、JSCE-E103 「エポキシ樹脂塗装鉄筋用棒鋼

の品質規格」で規定された 85%に近い結果となっているのに対して、高付着型エポキシ樹脂塗装鉄筋は、スパイラル筋を配した場合で 90%以上の付着強度比を確保している。一方、自由端変位 0.002D における付着応力比については、普通のエポキシ樹脂塗装鉄筋の場合には 60~70%程度とかなり小さい値となっているのに対して、高付着型では 100%を超える付着応力比となっている。以上の結果より、今回採用した鉄筋表面状態の改善効果は、エポキシ樹脂塗装鉄筋の弱点となりやすい、鉄筋すべりの小さい部分で発揮されやすいものと考えられる。

表-4 に示したように、スパイラル筋を配していない供試体は全て鉄筋軸に沿ったひび割れとともにコンクリートの割裂によって破壊し、スパイラル筋を配した供試体は全て鉄筋が引抜けている。これは鉄筋が引抜かれる時にコンクリートに生じる割裂力に対してスパイラル筋による拘束効果が、抵抗したことによるものと考えられる。JSCE-E516「エポキシ樹脂塗装鉄筋の付着強度試験方法」では、D19 鉄筋を 1 辺 150 mm の立方体コンクリートに埋設したものを供試体の標準としている。本研究では、用いた鉄筋が D16 であったこともあり、1 辺 100 mm の立方体コンクリートを供試体として採用したが、このことがスパイラル筋を配さない供試体の割裂破壊の一因になっているものと考えられる。コンクリートが割裂破壊した場合には、コンクリートの引張強度が支配要因となるので、鉄筋引抜げに伴う摩擦力も含めた付着強度の把握は困難であるものと考えられる。

3.2 付着応力-自由端変位曲線

鉄筋引抜き試験の結果得られた付着応力-自由端変位曲線を、スパイラル筋を配していない供試体とスパイラル筋を配した供試体について、それぞれ図-5 および図-6 に示す。なお、図中の各曲線は各要因の代表例を示したものである。

図-5 によると、最大荷重でコンクリートが割裂破壊するまでの曲線の傾きは、2 種類のエポキシ樹脂塗装鉄筋で大きく異なることが分かる。普通のエポキシ樹脂塗装鉄筋の場合と比べて高付着型は同じ付着応力に対する自由端変位が抑制されており、普通鉄筋と同様の傾きとなっている。この結果では、2 種類のエポキシ樹脂塗装鉄筋は付着強度としては同程度の値となるが、最大荷重における鉄筋すべり量は高付着型の方が小さい値となっていると言える。

図-6 によると、スパイラル筋を配した供試体の付着応力は最大値後も、コンクリートの割裂に伴って急激に低下することなく、自由端変位が増大しながら徐々に応力が低下するという引抜け挙動が見られる。普通エポキシ樹脂塗装鉄筋は、図-5 の場合と比較すると、スパイラル筋による拘束の影響で、付着応力の最大値までの自

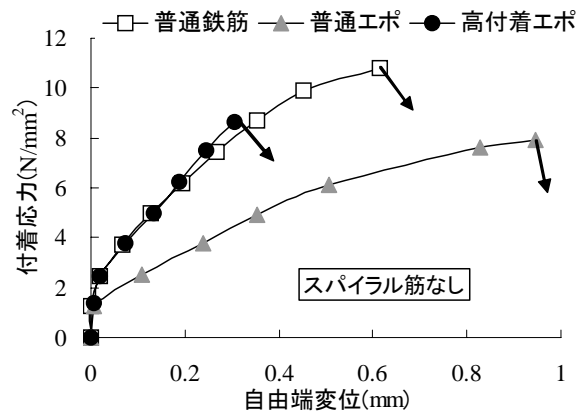


図-5 付着応力-自由端変位曲線
(スパイラル筋なし)

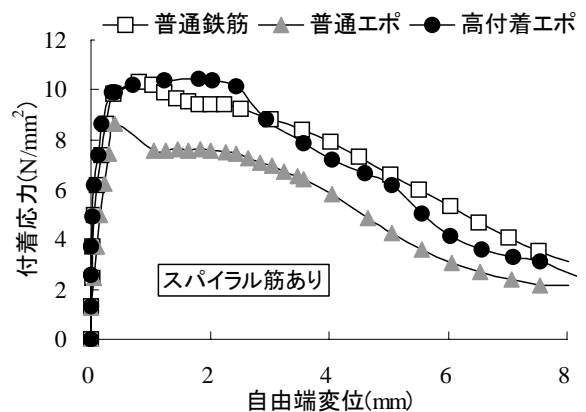


図-6 付着応力-自由端変位曲線
(スパイラル筋あり)

由端変位は抑制され、普通鉄筋よりもやや大きい引抜き量を示す程度であるが、最大値を示した後は速やかに付着応力が減少しており、曲線と横軸の囲む面積で定義される付着じん性は他の供試体よりも小さい。これに対して、高付着型の場合には、普通鉄筋と同様の曲線を示しており、付着じん性も普通鉄筋に近いものとなっている。このことより、高付着型エポキシ樹脂塗装鉄筋は表面の粗度を高めたことで、鉄筋引抜け時におけるコンクリートと鉄筋との間の界面状態が改善され、鉄筋引抜けに対する抵抗力が高まったものと考えられる。

3.3 AE による破壊メカニズムの推定

鉄筋引抜き試験の際に測定されたコンクリートに発生する AE の積算頻度数と付着応力との関係を、スパイラル筋を配した供試体と配していない供試体についてそれぞれ、図-7 および図-8 に示す。また、AE の積算頻度数と自由端変位との関係について、同様の図を図-9 および図-10 に示す。

図-7 および図-8 によると、スパイラル筋を配した供試体は鉄筋種類によらず、スパイラル筋を配していな

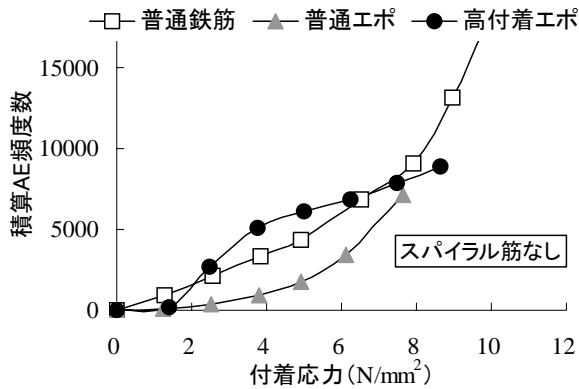


図-7 積算 AE 頻度数と付着応力の関係
(スパイラル筋なし)

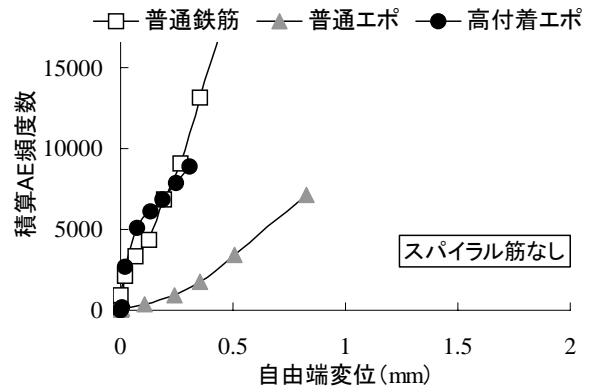


図-9 積算 AE 頻度数と自由端変位の関係
(スパイラル筋なし)

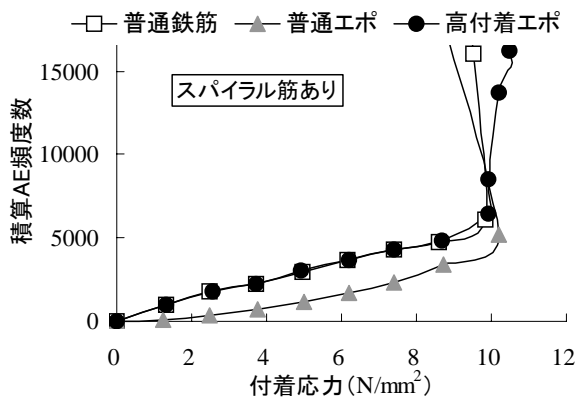


図-8 積算 AE 頻度数と付着応力の関係
(スパイラル筋あり)

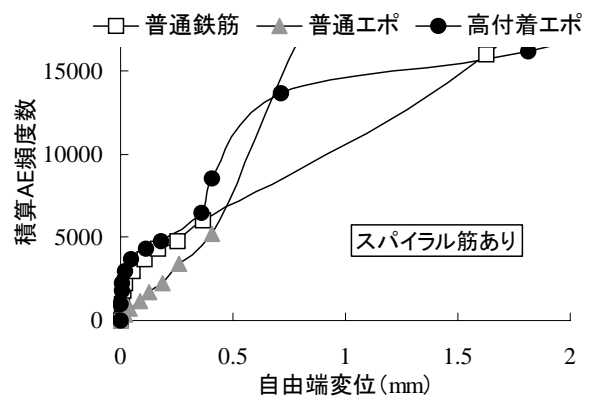


図-10 積算 AE 頻度数と自由端変位の関係
(スパイラル筋あり)

いものに比べ、付着応力の小さい範囲で AE 頻度数は小さいが、最大付着応力を迎える直前になると、急激に AE 頻度数が増加していることが分かる。これは鉄筋の異形部分によるコンクリート割裂力がスパイラル筋による拘束力を上回ったとき、急激なコンクリートの内部ひび割れの進展および破壊が起こるためと考えられる。スパイラル筋を配していない場合では、最も付着応力の小さい段階から AE が検出されているのは普通鉄筋で、次いで高付着型エポキシ樹脂塗装鉄筋、普通エポキシ樹脂塗装鉄筋の順となった。普通鉄筋は防食層が介在しないため、コンクリートとの密着性が最も高く、付着界面におけるコンクリートの破壊が最も発生しやすかったものと考えられる。これに対して、普通エポキシ樹脂塗装鉄筋は全体的に AE 頻度数が少なく、防食層の影響でコンクリートの破壊が抑制されたまま付着応力が増大していることが分かる。一方、高付着型の場合には、付着応力が 2N/m² を超えるころから、AE 頻度数が大きく増加しており、普通鉄筋の値を超える状況も見られる。これは、エポキシ樹脂塗装鉄筋の表面粗度を高めたことが原

因でコンクリートからの抜け出しに抵抗していることが原因と考えられ、前述した鉄筋のすべり出し時点における付着応力の増大現象と対応しているものと考えられる。

図-9 および図-10 によると、スパイラル筋の有無によらず、普通鉄筋と高付着型エポキシ樹脂塗装鉄筋は自由端変位が小さい段階から AE 頻度数が増加していることが分かる。これまでの結果を勘案すると、普通エポキシ樹脂塗装鉄筋は、防食層の影響で付着界面におけるコンクリートのひび割れや破壊が抑制され、付着応力が小さいまま自由端変位が大きくなる傾向がある。これに対して、高付着型は鉄筋異形部分の機械的作用が発揮される最大荷重レベルでは、普通エポキシ樹脂塗装鉄筋に対する優位性は小さくなるものの、鉄筋の抜出しに抵抗する効果は認められる。

4. 両引試験

両引試験の結果得られた、荷重- π 型最大変位量曲線を図-11に、荷重- π 型平均変位量曲線を図-12に

示す。図-11に示した π 型最大変位量とは、供試体に貼り付けた12個の π 型ゲージの変位量の内、ある荷重レベルにおいて測定された最大値とする。また、図-12に示した π 型平均変位量とは、12個の π 型ゲージの内、ひび割れを跨いだ π 型ゲージに関してある荷重レベルにおいて測定された変位量の平均値とする。なお、 π 型ゲージによる測定は、どれか一つのゲージの測定値が2mmに達した時点まで行うものとした。

図-11より、鉄筋が降伏するまでの荷重に対する π 型最大変位量は普通エポキシ樹脂塗装鉄筋の供試体が最も大きいことがわかる。高付着型の場合には、付着挙動の改善により、ひび割れの進展による変位の局所化を防いでいると言える。また、図-12によると、 π 型平均変位量は普通エポキシ樹脂塗装鉄筋の場合が最も小さな値で終了している。この平均変位量は、12個の π 型ゲージの内、どれか一つが2mmに達するまで求めていることから、普通エポキシ樹脂塗装鉄筋は平均的な変位量が小さい内に、どこかのひび割れが急速に開いたことがわかる。一方、高付着型の場合には、 π 型平均変位量の最大値が普通鉄筋の場合よりも大きく、1.4mm程度まで達している。これは、鉄筋降伏後もひび割れが供試体全体に様に発生することで、各ひび割れの幅が急速に開くことを防いだものと推測される。ただし、載荷試験終了後に供試体に発生したひび割れの本数を確認したところ、すべての供試体で15本程度と同等なものであった。これより、エポキシ樹脂塗装鉄筋を高付着型とすることによるひび割れ分散性の向上効果については、本実験では検証が困難であったものと考えられる。

5. まとめ

本研究結果をまとめると次のようになる。

- (1) 鉄筋引抜き試験により得られたエポキシ樹脂塗装鉄筋の付着強度は普通鉄筋の85%程度となり、高付着型とした場合でも普通鉄筋の付着強度には至らなかったものの、付着じん性が改善する傾向を示した。
- (2) 自由端変位が0.002Dと小さい段階では、高付着型とすることでエポキシ樹脂塗装鉄筋の付着応力が大幅に改善され、普通鉄筋の付着応力を上回る値が得られた。
- (3) 鉄筋引抜き試験時にコンクリートに発生するAEを測定した結果、スパイラル筋を配していない供試体の付着応力や自由端変位の増加に伴うAE頻度数は、普通鉄筋の場合に載荷初期段階から増加する傾向を示し、エポキシ樹脂塗装鉄筋は全体的に小さな値となったが、高付着型の場合には、普通鉄筋と同様のAE発生傾向を示した。
- (4) 両引試験の結果、エポキシ樹脂塗装鉄筋の供試体は、

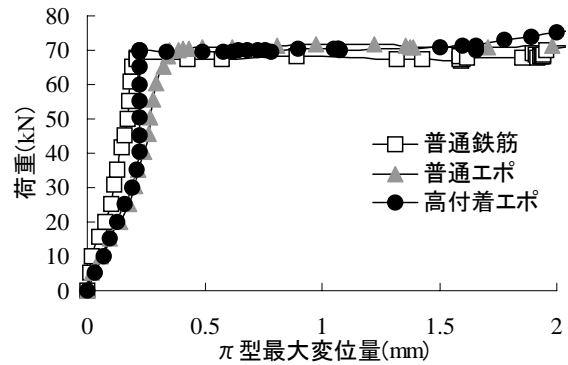


図-11 荷重と π 型最大変位量の関係

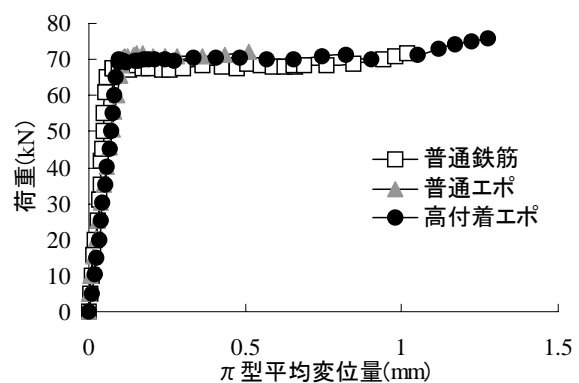


図-12 荷重と π 型平均変位量の関係

ひび割れの局所的な進展に伴って、同一引張荷重に対する π 型ゲージの変位量が普通鉄筋に比べ大きくなる傾向が見られた。高付着型の場合には、終局時のひび割れ分散性に大きな変化は認められなかったが、普通エポキシ樹脂塗装鉄筋に見られたようなひび割れの局所的な進展を抑制する傾向が見られた。

謝辞

本研究の実施にあたり、(株)竹中工務店およびパシフィックコンサルタンツ(株)からご協力をいただきました。また、AEの測定に関して、徳島大学 渡邊健 助教にご指導をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 星野富夫, 魚本健人, 小林一輔: 海洋環境下に15年間暴露したエポキシ樹脂塗装鉄筋ならびに亜鉛メッキ鉄筋を用いた鉄筋コンクリート梁の耐久性と防食効果, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp. 883-888, 1997.6
- 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], 2004.11