

論文 ポーラスコンクリートとエポキシ樹脂塗装鉄筋との付着特性

小川洋二^{*1}・島 弘^{*2}・河野 清^{*3}

要旨：内部に連続した空隙を持つポーラスコンクリートにエポキシ樹脂塗装鉄筋を埋め込み、片引き試験を行って付着性状を検討した。局所付着応力－局所すべり関係は、通常のコンクリートと同様に鉄筋のひずみの影響を受け、自由端すべりを生じないように定着長を十分長くすると鉄筋の位置によらず一つの関係を示す。定着長を鉄筋径の10倍とした場合の引抜き荷重－自由端すべり関係は、コンクリートの圧縮強度により大きく変化し、付着強度はコンクリート強度の2/3乗に比例する。また、無塗装鉄筋と比較しても付着強度はほとんど変わらない結果を得た。

キーワード：片引き試験，局所付着応力，付着強度，空隙率，圧縮強度

1. はじめに

従来、建設分野において、コンクリートに求められていた性質は、強度および耐久性であった。しかし、地球環境問題がクローズアップされている現在では、すべての生産活動において環境の十分な配慮が必要とされてきており、コンクリートにおいても地球に優しい機能の付加が求められるようになった。このような背景のもと、コンクリート内部に連続した空隙を持たせることによって、水や空気を自由に通す性質を持つポーラスコンクリートが見直され始めており、その性質を生かすためにさまざまな用途への研究が行われている〔1〕～〔4〕。

ポーラスコンクリートは、その構造上、脆弱部分となる空隙を多く有するほど透水・透気性は向上するが、強度は減少するという性質がある。そのため、現状では対象とする用途に応じた透過機能と強度特性のバランスを常に考慮する必要がある。しかし、ポーラスコンクリートの透過機能を損なわないように、補強材との複合構造としての耐力を確保するという視点からの研究はほとんどなく、ポーラスコンクリートの特異な性質を有効に活用する上で検討が必要である。

そこで本研究では、補強材として防錆処理の施されたエポキシ樹脂塗装鉄筋を対象とし、ポーラスコンクリートとの複合構造とするときに重要となる両者間の応力伝達作用である付着性状について、片引き試験を行って実験的に検討した。

2. 実験概要

2. 1 実験要因および実験項目

実験要因は、ポーラスコンクリートの性質として空隙率および水セメント比、鉄筋の定着長、鉄筋の性質としてエポキシ樹脂塗装の有無とした。表-1に実験条件を示す。実験項目は、コンクリートの圧縮強度、鉄筋の引抜き荷重および自由端すべり量とした。定着長を要因とする供試体（No. 1, 2）については、鉄筋軸に沿った局所ひずみを併せて測定した。

* 1 徳島大学助手 工学部建設工学科（正会員）

* 2 徳島大学助教授 工学部建設工学科，工博（正会員）

* 3 徳島大学教授 工学部建設工学科，工博（正会員）

2. 2 使用材料および配合

セメントは、早強ポルトランドセメントを使用し、骨材は、粒径が5～10mmの硬質砂岩碎石(比重2.50, 吸水率3.18%, 実積率55.7%)を使用した。補強材として用いたエポキシ樹脂塗装鉄筋は、横ふし形状で、SD345, D16のものを使用し、防錆処理の有効性判定基準に合格したものである。鉄筋の支圧面積係数BA [5] は6.2%である。エポキシ樹脂は、ビスフェノール系塗料であり、鉄筋への塗布厚さは約200 μ mである。

ポーラスコンクリートの配合は、細骨材を一切使用せず、単位粗骨材容積を骨材の実積率から求め、骨材間の空隙をセメントペーストが均等に充填していくとして設計した。空隙量は、単位セメントペースト量によって変化させた。コンクリートの配合を表-2に示す。

表-1 実験条件

供試体番号 (No.)	定着長	空隙率 (%)	水セメント比 (%)	エポキシ樹脂 コーティング
1	20D	20	35	有り
2	40D	20	35	有り
3		10		
4		20		
5	10D	30	35	有り
6		40		
7			25	
8	10D	20	30	有り
9			35	
10	10D	20	35	無し

表-2 ポーラスコンクリートの配合

供試体番号 (No.)	空隙率 (%)	水セメント比 (%)	単位容積質量(kg/m ³)		
			水	セメント	骨材
1,2,4,9,10	20	35	127	364	1393
3	10	35	180	513	
5	30	35	75	214	
6	40	35	23	64	
7	20	25	107	427	
8	20	30	118	393	

2. 3 供試体

供試体は、図-1に示すように、断面が20×20cmの直方体コンクリートブロックの鉛直方向中央に鉄筋を埋め込んだものである。コンクリートは上方から鉄筋軸と平行に打ち込んだ。高さは鉄筋径の15倍(15D)の24cmを基準とした。供試体の载荷端近傍には、コンクリートの拘束条件の影響を除くために、5Dの非定着部を設けた。また、コンクリートの割裂ひびわれを防止するために補強筋としてSD345, D6のスパイラル鉄筋(直径18cm, 4cmピッチ)を配置した。定着長を要因とした供試体では、鉄筋の軸方向のひずみ分布を測定するために、定着部に5D間隔で表裏にひずみゲージを貼付した。

2. 4 载荷方法

図-1に示すような試験装置で、センターホール型ジャッキを用いて静的载荷による片引き試験を行った。载荷速度は、鉄筋の非定着部に貼付したひずみゲージにより約100 μ /minに制御した。引抜き荷重はロードセルを用いて、

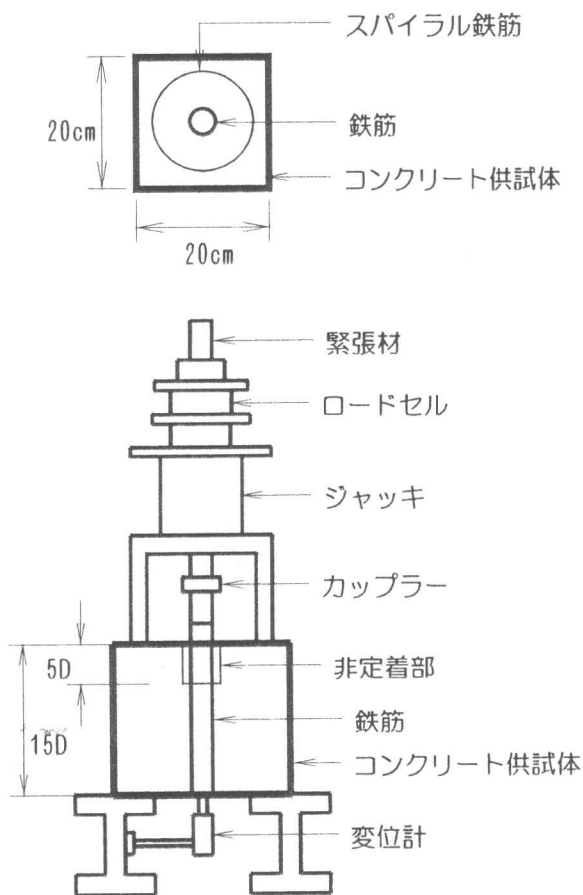


図-1 供試体および試験装置

自由端すべり量は変位計を用いてそれぞれ測定した。

3. 実験結果および考察

3. 1 局所付着応力-すべり関係

定着長が異なる供試体 (No. 1, 2) における鉄筋のひずみ分布を図-2, 図-3に示す。鉄筋のひずみ分布は、定着長が20Dと短い場合は、自由端にすべりを生じたため、引抜き荷重の増加にしたがって、下に凸型の曲線分布から直線的なひずみ分布に移っていった。定着長が40Dとなると、鉄筋の自由端すべりを生じない十分な長さとなり、下に凸型の連続した滑らかな曲線分布を示し、任意の同じひずみ量に対するひずみ分布曲線の傾きがほぼ等しくなった。つまり、それぞれの荷重におけるひずみ分布曲線は、一つの曲線を平行移動することによって得られる形となっていた。

次にそれぞれの供試体の局所付着応力-すべり関係を図-4, 図-5に示す。ここで、任意の点における局所付着応力およびすべり量は、それぞれの点におけるひずみ分布曲線の傾き、および自由端すべり量とその点までのひずみの積分から求めた[6]。局所付着応力-すべり関係は、定着長が短いとき、鉄筋に沿う位置によって異なり、自由端に近い位置ほど付着応力は大きくなる傾向を示す。しかし、定着長が十分長い場合、局所付着応力-すべり関係は、鉄筋位置によらず一義的な関係を示すことが分かる。このように鉄筋の定着長が異なると、自由端すべりが生じることによる鉄筋のひずみが影響するため、局所付着応力-すべり関係は異なったものとなる。この傾向は、通常のコンクリートとねじふし鉄筋の場合[6]と同様である。

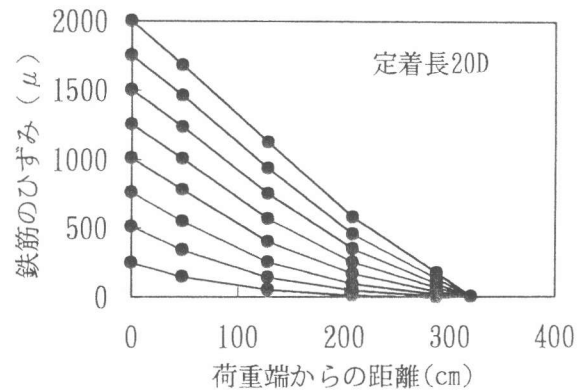


図-2 鉄筋ひずみ分布 (No. 1)

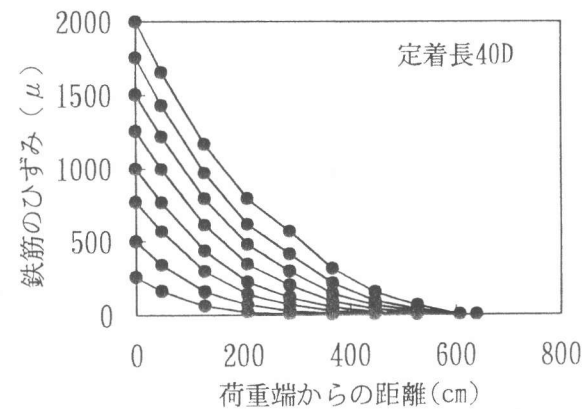


図-3 鉄筋ひずみ分布 (No. 2)

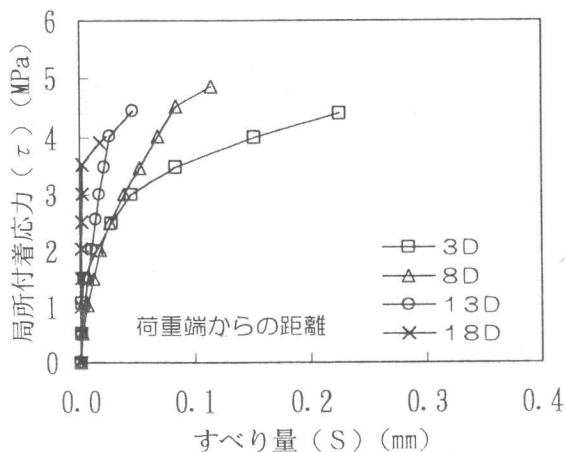


図-4 定着長20Dの τ -S関係

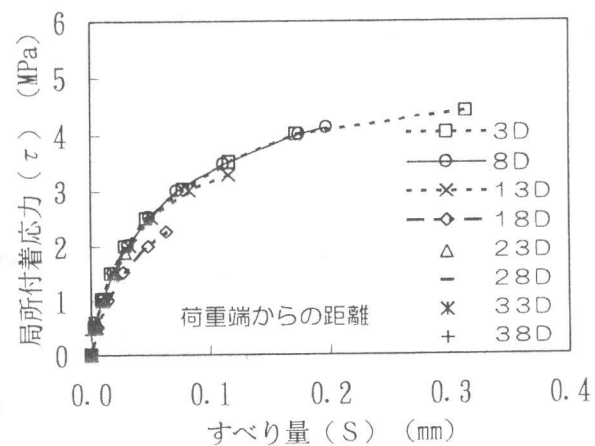


図-5 定着長40Dの τ -S関係

3. 2 引抜き荷重－自由端すべり関係

定着長を 10D と等しくした供試体における、ポーラスコンクリートの圧縮強度と付着強度を表－3に示す。付着強度は、最大引抜き荷重を鉄筋の付着全周面積（15.9cm×5 cm）で除して求めた。No. 4 と 9 は同一配合のコンクリートであるが、試験材齢が異なるため圧縮強度が異なっている。

表－3 実験結果

供試体番号 (No.)	圧縮強度 (MPa)	付着強度 (MPa)
3	36.1	6.13
4	20.8	3.78
5	7.4	2.59
6	4.0	1.65
7	19.2	4.05
8	17.5	4.11
9	14.7	3.86
10	20.8	3.70

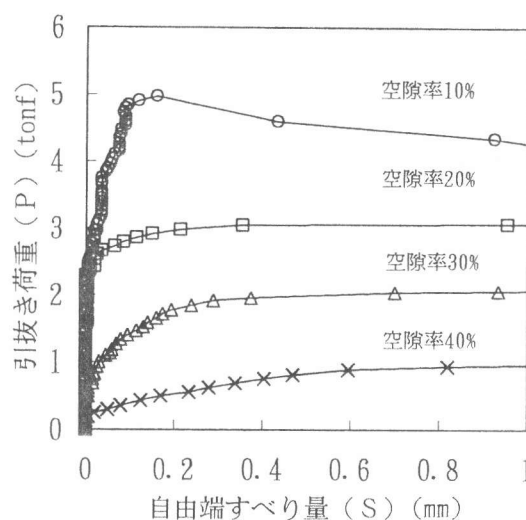
(1) コンクリートの空隙率の影響

定着長を 10D としたときの引抜き荷重と自由端すべりの関係について、コンクリートの空隙率を変化させた供試体 No. 3～6 の結果を図－6 に示す。この図より、ポーラスコンクリートの空隙率が変化することにより引抜き荷重－自由端すべり関係は異なり、同一すべり量に対して空隙率が小さくなるほど引抜き荷重が大きくなった。また、鉄筋が引き抜けるまでの最大荷重は、空隙率が小さいほど大きくなった。この理由として、ポーラスコンクリートは、空隙率が小さくなるほど指数関数的にコンクリート強度が大きくなるので、それとともに鉄筋周囲のコンクリートの剛性が大きくなり

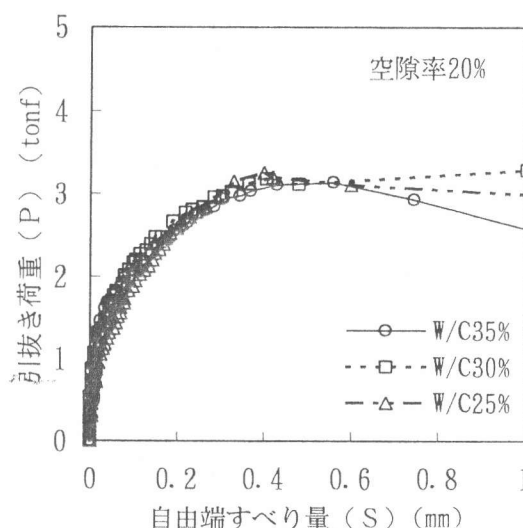
[3]，引抜き荷重に対する抵抗力が大きく増加するため、自由端すべり量が小さくなったと考えられる。また、最大荷重を示すときのすべり量が小さくなったのは、剛性が大きくなるにつれて脆性的な挙動が顕著になるためと考えられる。

(2) 水セメント比の影響

ポーラスコンクリートの圧縮強度が、引抜き荷重－自由端すべり関係におよぼす影響を検討するために、コンクリートの空隙率を一定とした供試体 No. 7～9 を用いて検討した。図－7 にそのときの引抜き荷重－自由端すべり関係を示す。ポーラスコンクリートの圧縮強度は、通常のコンクリートと異なり、水セメント比を変化させても大きな増減はなく、セメント空隙比に大きく影響される[2]ため、本実験水準の供試体においても、14.7MPa～19.2MPa の差にとどまった。つまり、ポーラスコンクリートが同一の空隙率であるとき、水セメント比が多少変化しても、セメント空隙比は大きく変化しないため圧縮強度はほぼ均一になり、剛性が同程度となるので、引抜き荷重－自由端すべり関係はほぼ同一の関係を示した



図－6 空隙率が異なるポーラスコンクリートの P－S 関係

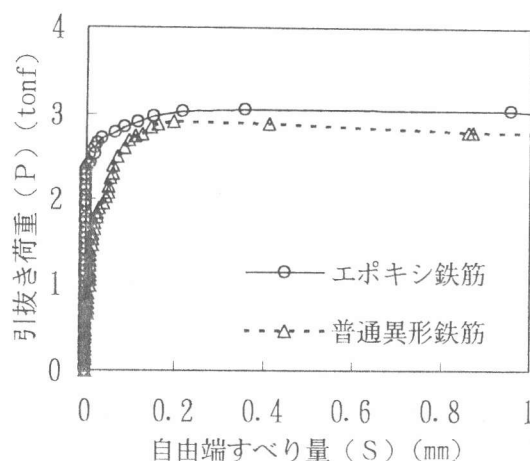


図－7 水セメント比が異なるポーラスコンクリートの P－S 関係

ものと考えられる。以上の結果から、ポーラスコンクリートとエポキシ樹脂塗装鉄筋との引抜き荷重－自由端すべり関係は、コンクリートの空隙率，すなわちセメント空隙比の相違によって生じる圧縮強度の違いによって大きく影響されるといえる。

(3) エポキシ樹脂塗装の影響

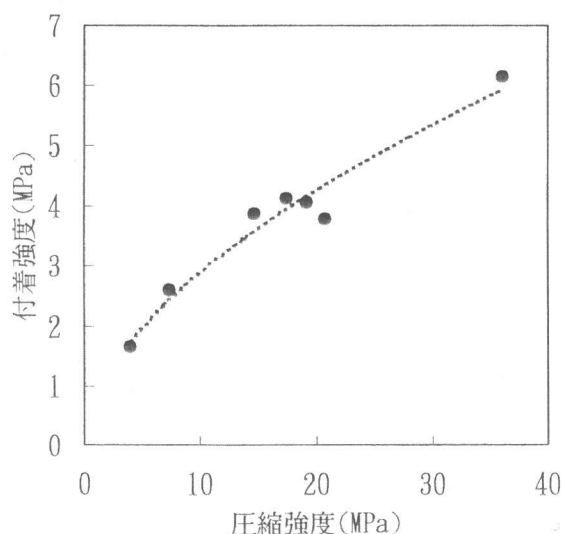
図－8は、鉄筋へのエポキシ樹脂塗装の有無が、付着性状におよぼす影響を検討したものである。普通コンクリートにおいて、エポキシ樹脂塗装鉄筋の付着強度は低下する傾向があるが、最大付着強度はむしろ増加したという報告がある〔7〕。本実験では、割裂ひびわれを生じないようにひびわれを拘束した条件下であったが、付着強度は無塗装の通常異形鉄筋と同等の結果を示した。つまり、エポキシ樹脂塗装鉄筋の付着特性は、通常鉄筋とほぼ同等といえる。



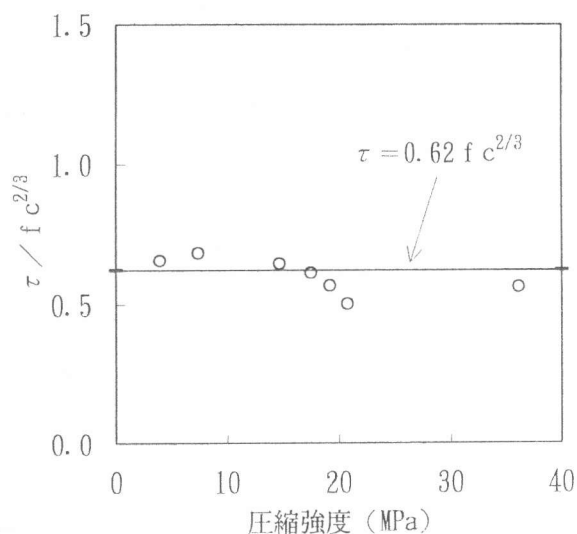
図－8 エポキシ樹脂塗装の有無が
P－S関係に及ぼす影響

3. 3 コンクリート強度と付着強度の関係

図－9にポーラスコンクリートの圧縮強度と付着強度との関係を示す。図のようにコンクリート強度が増加するにしたがって付着強度も増加している。通常のコンクリートの場合、付着強度はコンクリート圧縮強度の $2/3$ 乗に比例するとされている〔8〕ので、付着強度を圧縮強度の $2/3$ 乗で除して正規化した付着強度と圧縮強度の関係を図－10に示す。この図より、付着強度は、コンクリート強度の $2/3$ 乗にほぼ比例することがわかる。本実験結果では、比例定数は 0.62 となった。現行土木学会標準示方書における付着割裂ひびわれの発生を前提とした付着強度算定式では比例定数が 0.28 であり、本実験結果よりはかなり小さい。



図－9 コンクリートの圧縮強度と付着強度の関係



図－10 圧縮強度と正規化した付着強度の関係

4. まとめ

割裂ひびわれを生じないようにしたポーラスコンクリートとエポキシ樹脂塗装鉄筋の付着性状について以下の結果を得た。

(1) 局所付着応力－すべり関係は、定着長が短いときには鉄筋に沿う位置によって異なり、自由端に近いほど付着応力は大きくなる傾向がある。定着長が十分に長いときは、鉄筋に沿う位置によらず一義的な関係を示す。

(2) 引抜き荷重－自由端すべり関係は、ポーラスコンクリートの空隙率が異なることによる圧縮強度の変化に大きく影響を受ける。

(3) エポキシ樹脂の塗装の有無による鉄筋の付着特性の変化はほとんどない。

(4) エポキシ樹脂塗装鉄筋の付着強度は、空隙率および水セメント比の違いにかかわらず、ポーラスコンクリートの圧縮強度の $2/3$ 乗に比例する。

謝辞 実験の実施にあたって、卒研究生であった松岡 勤氏（現（株）鴻池組）に、また、エポキシ樹脂塗装鉄筋を提供していただいた安治川鉄工建設（株）に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 玉井元治, 河合 章: 連続空隙を有するコンクリートに付着する海洋生物の遷移に関する研究, 土木学会論文集, No.452/II-20, pp.81-90, 1992.8
- 2) 河野 清, 木下義康, 天羽和夫, 金澤英爾: 魚礁用超硬練りコンクリートに対する配合条件の影響, セメント・コンクリート論文集, No.46, pp.446-451, 1992.12
- 3) 小川洋二, 島 弘, 河野 清, 松尾保明: 炭酸ガスを吸収したポーラスコンクリートの物性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.1, pp.531-536, 1993.6
- 4) 柳橋邦生ら: 緑化コンクリートの研究, コンクリート構造物の緑化に関するシンポジウム論文報告集, pp.29-36, 1993.9
- 5) 國分正胤, 岡村 甫: 太径鉄筋の使用に関する研究, 土木学会論文報告集, 第 202 号, pp.103-113, 1972
- 6) 島 弘, 周 礼良, 岡村 甫: マッシブ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, 1987.2
- 7) 小林一輔, 伊藤利治, 武若耕司: エポキシ樹脂塗装鉄筋に関する実験的研究, コンクリート工学, Vol.21, No.2, pp.91-106, 1983.2
- 8) コンクリート標準示方書（平成 3 年版）設計編, 土木学会