

論文 水中で施工する樹脂接着系あと施工アンカーの耐荷性状に関する検討

小原 孝之^{*1}・山本 晴人^{*2}・新保 学幸^{*3}・丸山 久一^{*4}

要旨: 本研究は、躯体が水中に位置する橋脚の曲げ補強用のアンカーとして、水中で施工を行うあと施工アンカーの開発に関するものである。ビニルエステル系樹脂接着剤を用いた各種試験体の引き抜き試験結果に基づき、アンカーの形式や最適な穿孔径と孔表面の処理方法を明らかにし、さらに定着長さをパラメータとしたアンカーの引き抜き試験結果から水中あと施工アンカーの必要定着長算定式を構築した。

キーワード: あと施工アンカー、接着系アンカー、抜け出し変位、付着応力

1. はじめに

躯体が水中に位置する橋脚の耐震補強工事は、周辺を締め切ってドライアップを行い、気中で作業を行うのが一般的であるが、ドライアップにかかる費用は膨大であるため、建設コストを縮減する工法が強く求められている。このような背景から著者らは作業の大半を水中で行う補強工法の開発を目指した。工法の概要を図-1に示す。橋脚躯体の周囲に曲げ耐力制御用のあと施工アンカー鉄筋を配置し、その外側を鋼板を内包したプレキャストパネル型枠で巻き立て、間隙に水中不分離性モルタルを注入するものである^{1) 2)}。

本論文では、耐震補強に用いる曲げ耐力制御用補強鉄筋を水中で施工する樹脂接着系あと施工アンカー（以後、水中あと施工アンカーあるいは単にアンカーという）と考え、その研究成果について述べる。本水中あと施工アンカーには、鉄筋の破断で終局を迎えることが求められており、補強鉄筋に作用する引張荷重とフーチング天端からの鉄筋の抜け出し変位の関係もコンクリート中に埋め込まれた異形鉄筋と同等の性能が要求されている。

2. 水中あと施工アンカーの概要

2.1 水中あと施工アンカーの概要と施工法

水中あと施工アンカーの概要を図-2に、また、施工手順を図-3に示す。アンカー形式は、鉄筋とほぼ同等の径の孔を穿孔し樹脂注入後に補強鉄筋を設置するタイプと、孔径を大きくして定着端部に定着具を配置した鉄筋を樹脂注入後に設置するタイプの2種類を検討した。穿孔方法はハンマードリルを用いて削孔する方法と、ダイアモンドコアボーリングにより穿孔する方法の2種類を比較することとした。ハンマードリルにより削孔した孔表面は若干凹凸がある

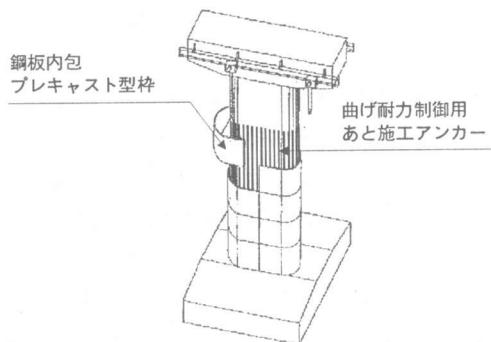


図-1 耐震補強工法の概要

*1 前田建設工業(株)技術本部技術研究所研究員 工修 (正会員)

*2 前田建設工業(株)技術本部技術研究所研究員 工修

*3 長岡技術科学大学大学院 工学部建設系

*4 長岡技術科学大学教授 工学部建設系 Ph.D. (正会員)

るが、ダイアモンドコアボーリングにより穿孔した孔表面は滑らかである。そこで、ダイアモンドコアボーリングによる穿孔については、図-3に示す方法で孔表面を目荒し処理することにより凹凸をつけ、接着剤とコンクリートの間の付着を確保する方法を検討した。

2.2 接着剤の概要

本研究に使用した接着剤は、ビニルエスチル系樹脂を主剤とするものである。樹脂の特性を表-1に示す。

3. 実験の概要

3.1 実験方法

実験はマッシブなコンクリート中に設置されるアンカーを想定し、図-4に示す2種類の実験方法で行った。アンカーの施工はすべてコンクリートブロックを水槽に沈めた水中で設置したが、試験時は気中でセンターホールジャッキを用いて引き抜いた。また、変位計を用いて抜け出し変位を計測した。実験方法Aは、樹脂を介したアンカーとコンクリートの間の付着強度を調べるもので、アンカー近傍に反力点を設置し、コーン状破壊を生じないようにした。実験方法Bは、反力点の間隔を広くとりコンクリートのコーン状破壊の影響も含んだものとした。

3.2 試験体の概要と実験結果

実験条件、各試験体の性質を表-2に示す。実験はすべて3体ずつ行った。得られた最大耐力比(P_{max}/P_u)、破壊形態も同表中に示した。

4. 効果的な水中補強アンカーの開発

4.1 穿孔孔表面の凹凸がアンカーの耐荷性状に及ぼす影響影響

孔表面の凹凸が耐荷性状に及ぼす影響を調べるために実施した試験体No.3～No.5の最大耐力比を図-5に示す。孔表面の凹凸の度合いは目視によると、ダイアモンドコアボーリングで穿孔した孔表面に目荒し処理を行ったNo.3が

表-1 接着剤の概要

可使時間 ^{*1} (min)	硬化時間 ^{*2} (min)	混合粘度 (mPa・s)	圧縮強度 (MPa)
7	45	2.0×10^6	120

*1: 樹脂のカートリッジの温度が20°Cの場合

*2: 打設されるコンクリートの温度が20°Cの場合

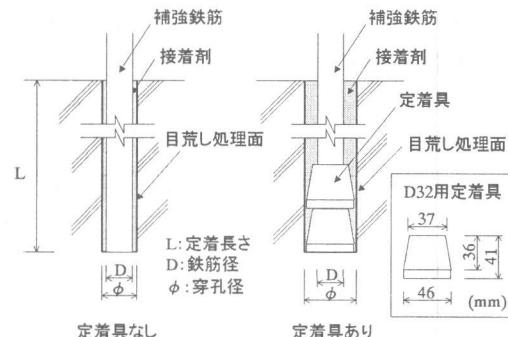


図-2 水中施工アンカーの概要

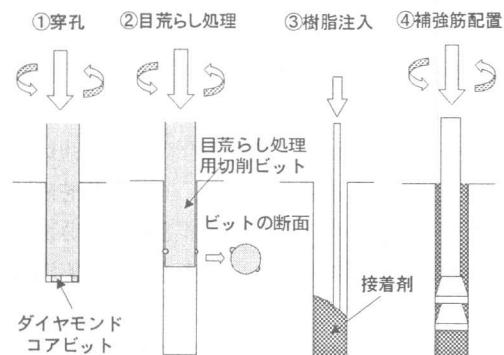


図-3 水中あと施工アンカーの施工手順

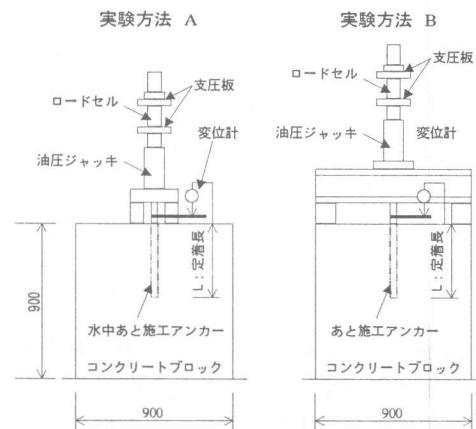


図-4 実験の概要

もっとも粗く、ハンマードリル穿孔による No.5 がそれに次ぎ、No.4 は孔表面がもっとも滑らかであった。図-5 から、No.3 の最大耐力比がもっとも大きく、No.5、No.4 の順であることから、孔表面の凹凸の度合いが最大耐力に大きく影響していることがわかる。また、各試験体の荷重と抜け出し変位の関係を図-6 に示す。これより、抜け出し剛性にも孔表面の凹凸が大きく影響していることがわかる。

4.2 補強筋径と穿孔径の関係が耐荷性状におよぼす影響と定着具の効果

試験体 No.2 と No.3 は鉄筋径が等しく、穿孔方法等も同じ条件で、穿孔径のみが異なるものである。また、No.1 は、No.2 の鉄筋の定着端部に定着具を設けたものである。各試験体の最大耐力比を図-7 に、荷重と抜け出し変位の関係を図-8 に示す。No.2 と No.3 を比較すると、穿孔径小さくした方が最大耐力が大きく、荷重と抜け出し変位の関係も剛である。穿孔径が大きいものは樹脂の体積も大きくなることから、樹脂の硬化にともなう収縮の影響、樹脂の剛性の影響を受けやすいものと考えられる。なお、図-7 によると、穿孔径が大きい場合でも定着

具を設けることにより最大耐力は改善されることがわかる。しかし、図-8 で明らかなように、No.1 の荷重と抜け出し変位の関係は No.2 のそれと比較して若干の改善が見られるものの、剛性はあまり改善されてはいない。

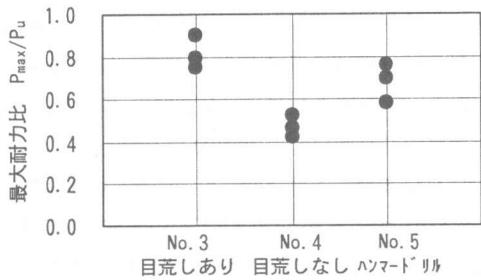


図-5 孔表面の凹凸の影響

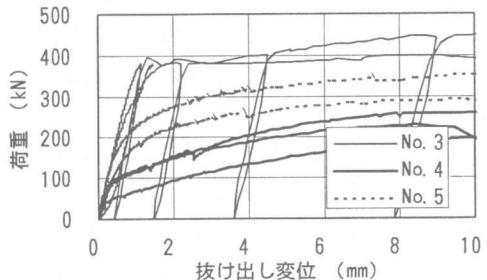


図-6 荷重と抜け出しの変位関係に及ぼす孔表面の凹凸の影響

表-2 試験体の概要と実験結果

シリーズ	No.	鉄筋仕様	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	コンクリート強度 (MPa)	窄孔方法	孔表面処理	孔径 (mm)	定着長さ × D	定着具	実験方法	破壊形態	最大耐力 (kN)	P _{max} /P _y	P _{max} /P _u			
I	1	D32 SD490	474	638	36.0	ダイヤモンドコアボーリング	目荒らし あり	51	A	有り FCD900	付着破壊	414	1.10	0.82				
	2											400	1.06	0.79				
	3											393	1.04	0.78				
	4						目荒らし 無し	10				145	0.38	0.29				
	5											271	0.72	0.53				
II	6	D32 SD345	364	581	36.3	ダイヤモンドコアボーリング	目荒らし あり	37		なし		268	0.71	0.53				
	7											455	1.21	0.90				
	8											380	1.01	0.75				
												400	1.06	0.79				
							目荒らし あり	10		B		214	0.57	0.42				
												235	0.62	0.46				
												265	0.71	0.52				
												293	0.78	0.58				
							目荒らし あり	20				385	1.02	0.76				
												354	0.94	0.70				
							目荒らし あり	27				453	1.57	0.98				
												433	1.50	0.94				
												466	1.61	1.01				

P_{max} : アンカーの最大耐力, P_y : 一軸引張試験より得られた鉄筋の降伏耐力, P_u : 同引張耐力

5. 水中あと施工アンカーの付着性状と定着長算定式

5.1 実験結果

試験体 No.6～No.8 のシリーズⅡについて、図-4 に示す 2 種類の方法で実験を行った。3 体の試験体のうちの 1 体には埋め込まれる部分にひずみゲージを添付して鉄筋のひずみを計測し、別の 1 体は載荷除荷を繰り返した。除荷は鉄筋の降伏、降伏時の抜け出し変位の 2 倍、4 倍、6 倍、10 倍時に行った。図-9 に各試験体の最大耐力比を示す。これより、No.7、No.8 は鉄筋の破断により終局を迎えていて、定着長の短い No.6 においても鉄筋の破断荷重近くの耐力を示している。また、実験方法 B により実験を行った No.8 において、コンクリートの天端付近で直径 15cm、深さ 5cm 程度の薄い剥離が観察されたが、耐荷性状に影響を及ぼすものではなかった。

5.2 既往のコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋のモデルとの比較

図-10～図-12 に No.6～No.8 の荷重と抜け出し変位の関係を示す。これより、各試験体の荷重と抜け出し変位の関係が剛であり、良好な付着性状を有していることがわかる。

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-すべり-ひずみ関係は島らのモデル³⁾によると、鉄筋に沿った位置の局所付着応力がすべり量とひずみの関数で表される。

$$\frac{\tau}{f_c} = 0.73(\ln(1+5s))^3 / (1+\varepsilon \times 10^5) \quad (1)$$

ここで、 $s=1000 S/D$ 、 τ は付着応力、 f_c' はコンクリート強度、 S はすべり量、 D は鉄筋径、 ε はひずみである。同モデルによる荷重と抜け出し変位関係の計算値も同図に示す。これらの比較から本水中あと施工アンカーが異形鉄筋と同等の付着性状を有していることがわかる。

5.3 鉄筋に沿った位置の付着応力分布

ひずみゲージを添付した試験体の計測結果より、鉄筋に作用している付着応力を検討するこ

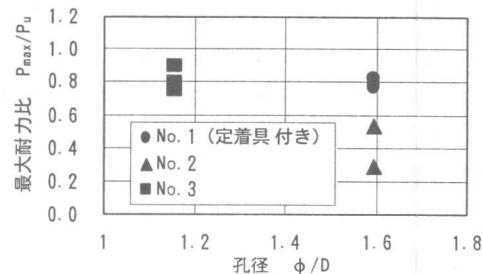


図-7 穿孔径と最大耐力比の関係と定着具の効果

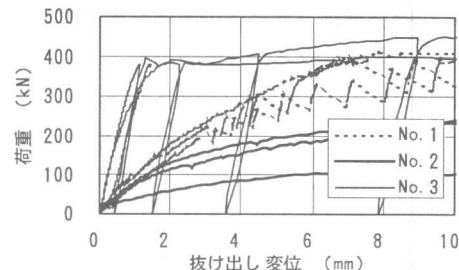


図-8 穿孔径が荷重と抜け出し変位関係に及ぼす影響と定着具の効果

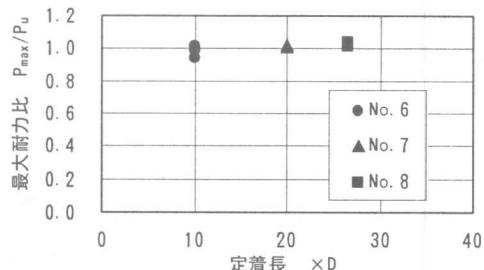


図-9 水中あと施工アンカーの定着長さと最大耐力比の関係

とした。付着応力は、その点における鉄筋の応力分布を前後の 3 点を結ぶ 2 次放物線で設定し、以下の式により求めた³⁾。

$$\tau = \frac{D}{4} \frac{d\sigma}{dx} \quad (2)$$

ここで、 $d\sigma/dx$ は鉄筋応力の傾き、 τ は付着応力、 σ は鉄筋の応力である。各試験体の鉄筋に沿った位置の付着応力分布を図-13～図-15 に示す。同時に、島らのモデルによる計算値も示す。図は、ひずみゲージが計測不能となる

直前のデータから求めたもので、最大耐力時のものではない。弾性領域と降伏領域で付着応力のレベルが異なるが、降伏領域では No.6～No.8 の各試験体間でおおよそ同程度で、4～8MPa 程度である。島らのモデルの計算値と比較すると、計算値の方が降伏領域における付着応力が小さい。また、本アンカーの方が弾性領域が長いため、弾性領域での付着応力は異形鉄筋の計算値に比較して小さくなっている。

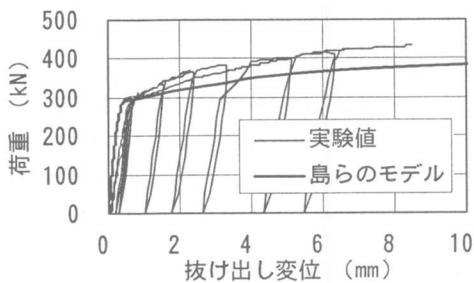


図-10 荷重と抜け出し変位の関係(No.6)

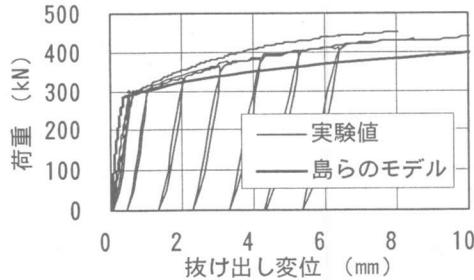


図-11 荷重と抜け出し変位の関係(No.7)

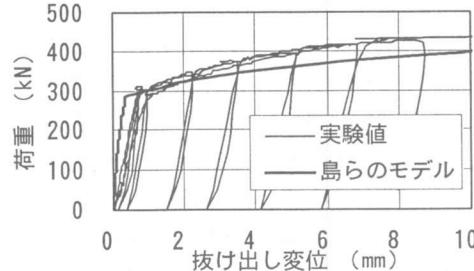


図-12 荷重と抜け出し変位の関係(No.8)

5.5 定着長算定式の構築

本アンカーの定着長算定式を構築するために、まず抜け出し破壊時の鉄筋周りの付着応力分布を鉄筋の降伏領域と弾性領域に分け、それぞれ

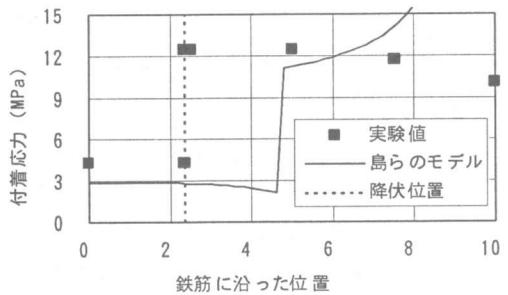


図-13 No.6 ($P=330\text{kN}$) の付着応力分布

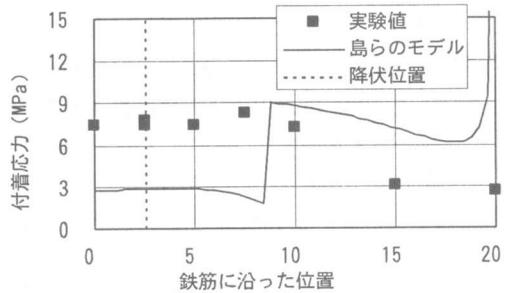


図-14 No.7 ($P=365\text{kN}$) の付着応力分布

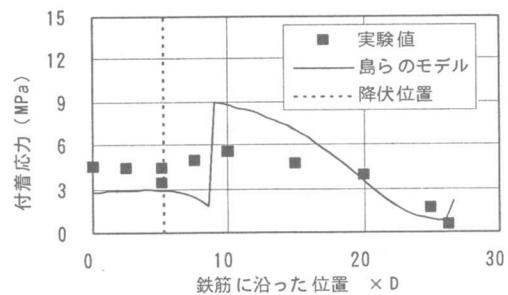


図-15 No.8 ($P=365\text{kN}$) の付着応力分布

矩形分布すると仮定する(図-16)。鉄筋に降伏を超える引張力(P)が作用した時の鉄筋周りの力のつり合いから以下のように表せる。

$$P = \pi D \tau_y L_y + \pi D \tau_e L_e \quad (3)$$

$$P - P_y = \pi D \tau_y L_y \quad (4)$$

ここで、 τ_y は降伏領域の付着応力、 τ_e は弾性領域の付着応力、 L_y は降伏領域の長さ、 L_e は弾性領域の長さである。実験より得られた降伏領域の付着応力は鉄筋に沿った位置でおおむね一定を示しているので、各試験体のおおよそ平均値の $\tau_y=5\text{MPa}$ を用いるものとする。

鉄筋破断耐力と付着破壊耐力とが等しいよう

な定着長さ(L_u)を持つアンカーを考える。この時、式(4)を最大荷重時(P_u)について以下のように表すことができる。

$$P_u = \pi D \tau_y L_{yu} + \pi D \tau_{eu} (L_u - L_{yu}) \quad (5)$$

$$P_u - P_y = \pi D \tau_y L_{yu} \quad (6)$$

ここで、 τ_{eu} は弾性領域でアンカーが負担できる付着応力の最大値、 L_{yu} は最大荷重時の降伏領域長さ、 $L_{eu}(=L_u - L_{yu})$ は弾性領域長さである。No.6は付着破壊し、No.7、No.8が鉄筋が破断したことから、No.7の定着長さが L_u に近かったと考えて、式(5)、式(6)に対して $D=3.2\text{cm}$ 、 $L_u=64\text{cm}$ として τ_{eu} 、 L_{yu} 、 L_{eu} は以下のように逆算される。

$$L_y = \frac{D}{4} \frac{f_u - f_y}{\tau_y} = 34.8\text{cm} \quad (7)$$

$$L_{eu} = L_u - L_y = 29.2\text{cm} \quad (8)$$

$$\tau_{eu} = \frac{D}{4} \frac{f_y}{(L_u - L_y)} = 10.0 \text{ MPa} \quad (9)$$

ここで、 f_y は鉄筋の降伏強度、 f_u は鉄筋の引張強度である。この時の弾性領域の長さ L_{eu} はNo.6の定着長さ(32cm)に近いので、No.6の降伏時の

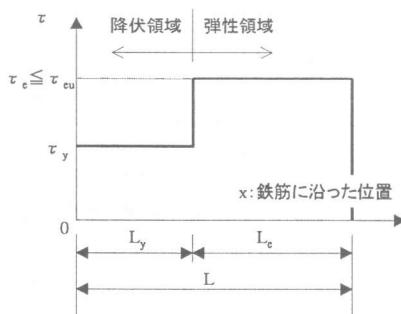


図-16 付着応力分布の仮定

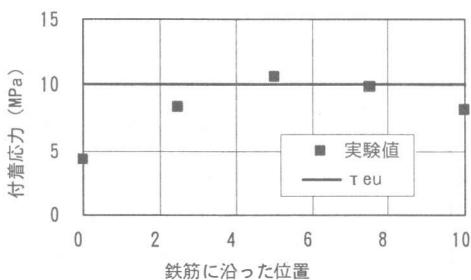


図-17 No.6 降伏時の τ 分布と τ_{eu}

応力分布に類似するはずである。図-17にNo.6の降伏時の付着応力分布と τ_{eu} の比較を示す。これより、付着分布の傾向をおおむね捉えていることがわかる。

以上より、ある引張荷重 P に対して必要な水中あと施工アンカーの定着長さ(L)は以下のように表すことができる。

$$L = L_{yu} + L_{eu} = \frac{D}{4} \frac{(f_u - f_y)}{\tau_y} + \frac{D}{4} \frac{f_y}{\tau_{eu}} \quad (10)$$

ここで、 $\tau_y=5\text{MPa}$ 、 $\tau_{eu}=10\text{MPa}$ である。

5. まとめ

本研究の範囲内で得られた結論を以下に示す。

- (1) ビニルエステル系樹脂を用いた水中で施工するあと施工アンカーの開発を目的として実験を行った。その結果、孔径が補強鉄筋の径に近く、孔表面を目荒し処理したものが最大耐力、荷重と抜け出し変位の関係ともに優れることがわかった。
- (2) 水中あと施工アンカーとして効果的なものについて、定着長さをパラメータとした実験を行った。ひずみ性状から付着応力分布を求め、降伏領域における付着応力は5MPa程度であることがわかった。以上から、付着応力分布をモデル化し、水中あと施工アンカーの必要定着長さを算定する式を構築した。

参考文献

- 1) 中島 良光ほか: プレキャストパネルによる高架橋の耐震補強工法に関する研究、「コンクリート系構造物の耐震技術」に関するシンポジウム論文報告集、日本コンクリート工学協会、pp229~235、1997.4
- 2) 鉄道総合研究所: 既存鉄道コンクリート高架橋柱等の耐震補強設計・施工指針—RCプレキャスト型枠工法編—、1996.12
- 3) 島 弘ほか: 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、第378号/V-6、pp.165~174、1987.2