

# 論文 CFRP ロッドのスリーブ定着およびモルタルとの付着性能に関する研究

今井富士夫<sup>\*1</sup>・篠崎隆治<sup>\*2</sup>・鞠 笑輝<sup>\*3</sup>・中澤隆雄<sup>\*1</sup>

**要旨**：本論文は炭素繊維系補強筋（CFRP）のスリーブ定着に対する各種充填剤の定着性能およびグラウト材としての無収縮モルタルとの付着性能を検討したもので、本研究で対象にした CFRP はストランド型のもではなく、繊維を直線状に束ねたリブを有するロッド型である。スリーブ定着試験ではスリーブと CFRP ロッドの間に詰める充填剤として、膨張セメントと 3 種類のエポキシ樹脂やアクリル樹脂の定着性能を検討し、無収縮モルタルと CFRP ロッドの付着試験ではロッドのリブ効果を確認するとともに、付着強度については CFRP ストランドや PC より線との比較も行った。

**キーワード**：CFRP ロッド，定着性能，付着強度，引張試験，膨張セメント，樹脂

## 1. はじめに

近年、土木構造物の補強材として連続繊維補強材が使用されるようになってきた。連続繊維補強材としては炭素繊維やアラミド繊維などが挙げられ<sup>1)</sup>、これらの連続繊維補強材は非腐食材料で耐蝕性に優れ、構造物の耐久性向上に優れた利点を有するものである。

連続繊維補強材は PC 橋の緊張材や既設 RC 橋の外ケーブル補強工法での外ケーブル定着用 RC ブラケットと RC 桁の腹板との摩擦接合での締付け材あるいはグラウンドアンカーなどに利用されている<sup>2), 3)</sup>。

本研究で対象とする炭素繊維系補強材（CFRP）はストランド型のもではなく、炭素繊維が直線に束ねられたリブ付きの CFRP ロッドであり、繊維が力の作用する軸方向に平行であることから、炭素繊維の強度を有効に利用できる利点を有している。

このような CFRP ロッドの定着法として楔を利用したものも見受けられるが、CFRP は局部的な支圧やせん断に弱いことを考慮して、本研究では定着方式として充填剤を利用した鋼製

スリーブによる方式を検討するもので、この種の研究は久保田らの膨張材やエポキシ樹脂を定着材とするものがあるが、その対象は CFRP ストランドである<sup>4)</sup>。

さらに、グラウンドアンカーなどに CFRP ロッドを採用する場合にはロッドとグラウト材との付着性能も重要な因子となる。

本論文では基礎的研究として、CFRP ロッドのスリーブ定着については膨張セメントおよびエポキシ樹脂やアクリル樹脂などの 4 種類の充填剤による定着性能を引張試験により検討している。さらにグラウト材としては無収縮モルタルを採用し、ロッドと無収縮モルタルとの付着性能を確認した。付着性能での検討内容は、ロッド表面に施されたリブの効果や他のアンカー材である CFRP ストランドや PC より線の付着強度との比較からその有効性についての検討を行っている。

## 2. スリーブ定着試験

### 2.1 実験概要

実験で使用した CFRP ロッド（以後、ロッド）

\* 1 宮崎大学 工学部土木環境工学科 教授 工博（正会員）

\* 2 宮崎大学大学院 工学研究科 博士前期課程

\* 3 (株)ジオセンターM 設計部



写真-1 リブ付き CFRP ロッド

表-1 CFRPロッドの公称値

| 呼び径 | 径<br>(mm) | 断面積<br>(mm <sup>2</sup> ) | 保証耐力<br>(kN) |
|-----|-----------|---------------------------|--------------|
| D8  | 7.9       | 46.1                      | 106          |
| D10 | 9.8       | 71.8                      | 165          |

※ 弾性係数 : 160 kN/mm<sup>2</sup>  
伸び率 : 1.44%

表-2 充填材の種類と材料定数

| 記号  | 成分    | 圧縮強度                 | 引張強度                 | 付着強度                 |
|-----|-------|----------------------|----------------------|----------------------|
|     |       | (N/mm <sup>2</sup> ) | (N/mm <sup>2</sup> ) | (N/mm <sup>2</sup> ) |
| ARA | エポキシ系 | —                    | —                    | 11                   |
| HRD | アクリル系 | 50                   | 15                   | —                    |
| DBD | エポキシ系 | 78                   | 56                   | —                    |

は写真-1 に示すようなもので、ロッド表面には約 0.3mm 程度のリブが螺旋状に施されている。ロッドの公称値は表-1 に示すもので、定着試験では D10 を使用しており、D10 の保証耐力は 165kN である。

ロッドと鋼製スリーブとの定着に使用した充填剤のうち、樹脂系の充填剤は表-2 に示す 3 種類であり、エポキシ系あるいはアクリル系樹脂で、表はこれらの材料定数である。

膨張セメント (ECM) は 40N/mm<sup>2</sup> の膨張圧を基準とした。

試験での定着治具の概要は図-1 に示すように、定着用の鋼製スリーブ (外径 φ30mm、内径 φ20mm) にロッドを挿入し、その隙間に膨張セメントや樹脂を充填するものである。ただし、引張試験機に固定する部分は φ36mm と増厚するために、スリーブと同一材種の鋼製キャップを付設し、キャップ側の先端から 40mm は定着治具とロッドの間には充填剤はなく、ゴム栓を挿入した。

スリーブからのロッドの引抜け量は試験機ヘッド間の距離の変化量を変位計で測定したものを便宜的に置き換えたものである。よって、

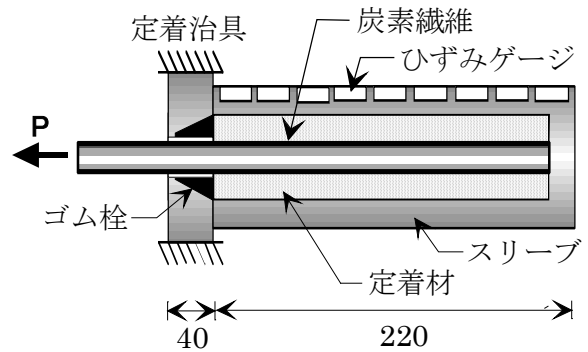


図-1 定着治具の概要

以後の考察に使用される「引抜け量」にはスリーブやロッドの弾性変形なども含まれたものとなっている。スリーブのひずみは図に示すようにスリーブ表面の材軸方向に密にひずみゲージを貼付して測定した。

実験の当初に使用したスリーブには規格 S45C ( $\sigma_y=345\text{N/mm}^2$ ) を使用したが、ロッドの保証耐力に達する引張荷重以前に降伏したため、後半の実験では熱処理された降伏強度の高い S45CQT ( $\sigma_y=490\text{N/mm}^2$ ) を使用した。

## 2.2 引抜け性状

4 種の充填剤の定着性能を確認するために、引張荷重に対する引抜け量について考察する。

図-2 は各充填剤による引張荷重-引抜け量 (試験機ヘッド間距離の変化量) の関係を示したもので、図中の破線は「保証耐力」である。

鋼種 S45C を利用したスリーブ実験ではロッドの保証耐力の 2/3 程度の 110kN でスリーブが

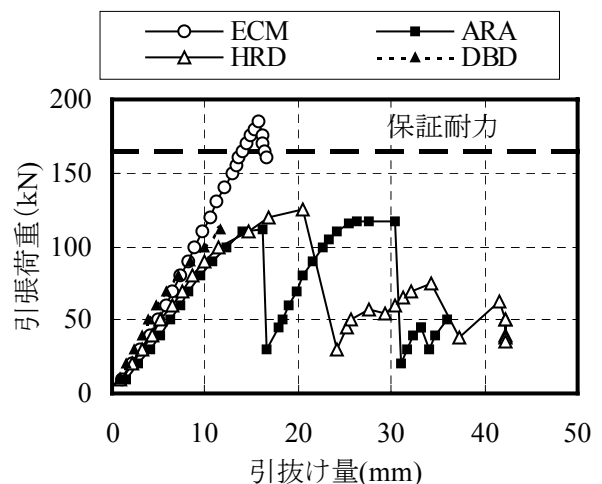


図-2 荷重に対する引抜け量  
(スリーブ: S45C)

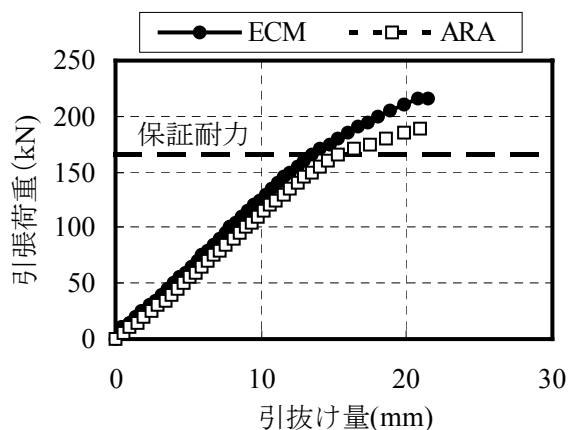
降伏した。スリーブのこのような状態においても、充填剤に膨張セメントを使用したものでは保証耐力を超える引張荷重 183 kN までロッドは引抜けることなく破断したが、3つの樹脂系充填剤ではいずれも公称破断強度の 70～78% 程度の引張荷重で引抜けており、リブも破壊していた。

荷重に対する初期の引抜け剛性はエポキシ樹脂系 ARA とアクリル系樹脂 HRD が膨張セメント ECM とエポキシ樹脂 DBD に比べてやや劣るものの大きな差異はないと思われる。

次に、熱処理された降伏強度の高いスリーブ（前述の S45CQT）に変更して実験を行った結果を示したものが図－3 である。この実験では充填剤は膨張セメントと先の実験で最も破壊荷重が低かったエポキシ樹脂 ARA（表－3 を参照）の 2 種類について実施した。図から明らかのように、樹脂 ARA でも保証耐力を超える引張荷重を維持できている。また、引抜き剛性も保証耐力までは両者ともにほぼ同等であると云える。

表－3 はこれらの実験での破壊荷重と破壊状況を整理したものである。破壊状況が「引抜け」の場合にはロッドのリブ破壊がすべてに観られたが、「破断」では破断直後にロッドがスリーブ内に打ち込まれた状態となり、リブの最終状況を観察することはできなかった。

今回の実験では強度の高いスリーブを使用



図－3 荷重に対する引抜け量  
(スリーブ：S45CQT)

表－3 引張試験の結果

| スリーブ<br>種類 | 充填剤 | 最大荷重<br>(kN) | 破壊状況 |
|------------|-----|--------------|------|
| S45C       | ECM | 200          | 破断   |
|            | ARA | 117.5        | 引抜け  |
|            | HRD | 125.5        | 引抜け  |
|            | DBD | 128.5        | 引抜け  |
| S45CQT     | ECM | 215          | 破断   |
|            | ARA | 188          | 破断   |

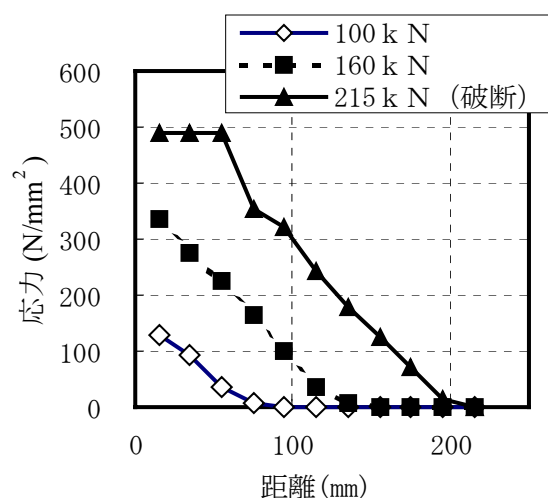
すれば、安定した強度を維持できることは明らかではあるが、「引抜け」のリブ破壊とスリーブ降伏のいずれが主たる要因であるかについては、今後実験を重ね、検討していく必要があると考える。

## 2.3 スリーブの応力性状

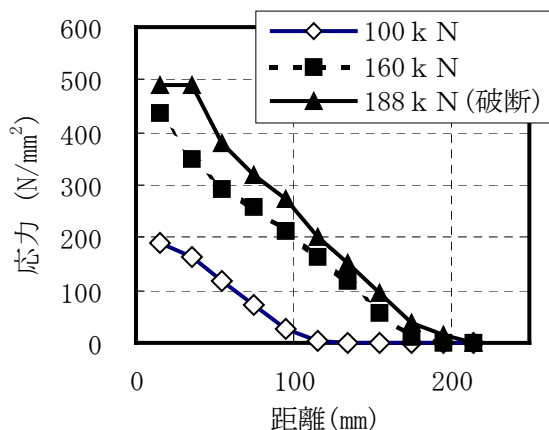
スリーブの荷重に対する軸方向応力分布について整理したものが図－4 と図－5 である。いずれも高強度スリーブを使用した場合の結果で、図－4 は膨張セメント、図－5 は樹脂 ARA である。

ここでの応力はスリーブに貼付したひずみゲージから測定されたひずみにスリーブの弾性係数  $E=2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$  を使用して換算したものであり、応力がスリーブの公称降伏応力を超えた場合には一定の降伏応力に留めた表現になっている。

いずれもスリーブの先端で最大の応力を呈し、スリーブの奥行き方向へと行くにしたがい、



図－4 スリーブ軸方向の応力分布  
(膨張セメント ECM)



図－5 スリーブ軸方向の応力分布  
(エポキシ樹脂 ARA)

次第に小さくなっている。両者を比較すると、同一荷重時（例えば、引張荷重 100kN）での応力分布は膨張セメントが樹脂 ARA に比べて小さくなっている。さらに、スリーブ表面の応力が 0 となる箇所すなわちスリーブの定着長さは引張荷重 100kN において比較すると、膨張セメント ECM では先端から約 100mm であるのに対して、樹脂 ARA では約 115mm と 15%程度長くなっており、その長さの違いは荷重が増加するに伴って顕著となっている。

これらの結果は膨張セメントに比べてエポキシ樹脂は荷重に対する変形が大きいことに起因しているものと考えられる<sup>4)</sup>。

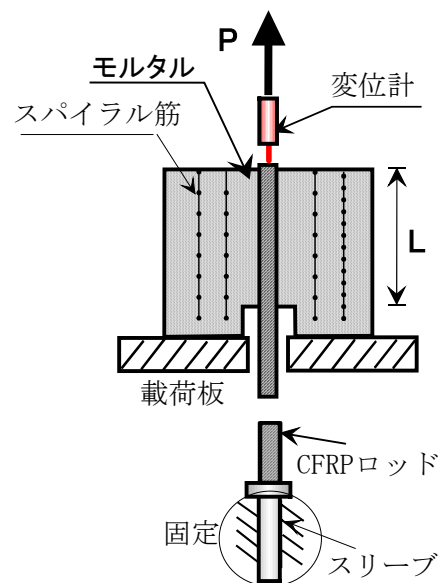
実験事例が少なく、一般的な結論とは言い難いが、本実験の結果からはエポキシ樹脂 ARA に比べて、膨張セメントのほうがロッドの定着性能は高いようにと思われる。

### 3. モルタルとの付着試験

#### 3.1 実験概要

ロッドを PC 構造物の内ケーブルのようにコンクリートに付着させる場合やグランドアンカーなどに採用するときにはロッドの周囲には無収縮モルタルなどのグラウト材が使用されることになる。そこで、本章ではこのようなモルタルとロッドの付着性能について検討する。

図－6 は付着試験の概要を示したものであ



図－6 付着試験の概要

る。試験体は断面が 100mm×100mm のモルタル角柱の中央部にロッドが固定されたものであり、図に示す付着長  $L$  は 100mm（モルタル角柱の全高さは 130mm）及び 150mm（全高さ 180mm）の 2 種類とし、非付着長はいずれも 30mm とした。また、モルタルのひび割れを防止するために、鋼製網をスパイラル筋としてモルタル内部に 2 段配置した。本実験で使用した無収縮モルタルの  $W/C=50\%$  で、圧縮強度は  $39.7\text{N/mm}^2$  であった。

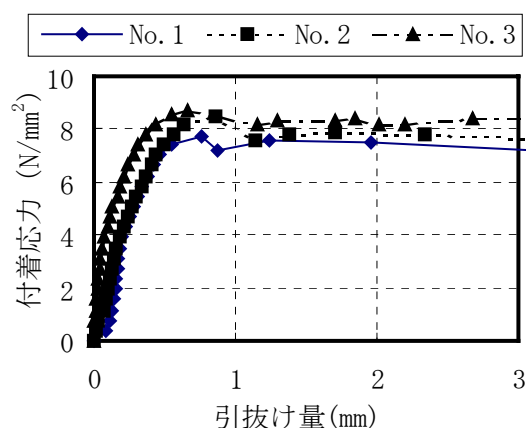
ロッドはリブの効果を確認するために、D10 と D 8 の 2 種類の径についてリブ付きロッドとリブ無しロッドを使用した。

引抜け量は図－6 に示すように、モルタル角柱の頂部に引き出されたロッドの変位量を変位計にて測定した。

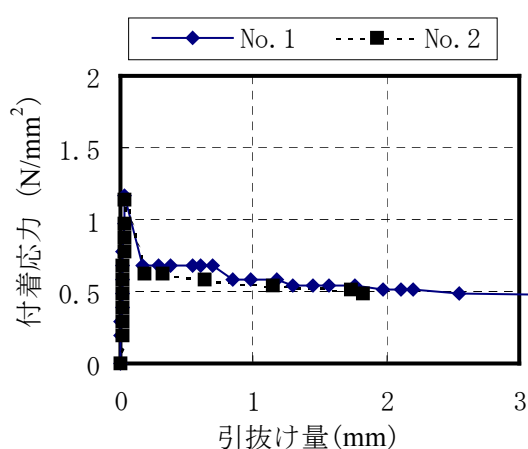
#### 3.2 引抜け状況

本節では引張荷重に対する引抜け状況について検討する。次節で付着強度について考察するため、本節で考察に使用する図の縦軸の力は引張荷重をロッドの周面積で除したロッド周囲の単位面積あたりの力すなわち「付着応力」で表示している。

図－7 は径が 8mm のリブ付きロッドの応力に対する引抜け量を示したものであり、図－8 は同一径のリブ無しロッドについて示したも



図－7 引抜け量（リブ付き：D8）



図－8 引抜け量（リブ無し：D8）

のである。

リブ付きロッドでは付着応力が  $8 \text{ N/mm}^2$  までは応力に対して変位はほぼ線形に増加しているが、これ以降では付着応力はほぼ一定で変位のみが増加している。リブ無しロッドでは応力がおよそ  $1.2 \text{ N/mm}^2$  に達したとき、 $0.6 \text{ N/mm}^2$  まで急激に低下し、その後、変位は増加するが、応力は徐々に低下している。

図に示す変位 3mm までの応力低下は、リブ付きロッドではほとんど観られず、リブ無しロッドでは初期の大きな低下後は緩やかな応力低下が生じている。

最大付着応力をロッドとモルタルの付着強度とみなせば、リブ付きロッドは付着強度に達した以降でも変位は増大するが、強度も維持するようである。両者の付着強度を比較すると、リブ付きロッドはリブ無しロッドの 6 倍以上の付着強度を有していることになる。このこと

から、0.3mm 程度のリブの付着に対する効果は高いことが判る。

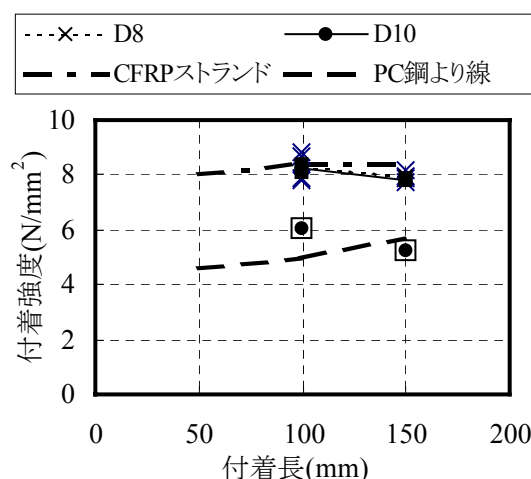
### 3.3 付着強度と付着長

リブ付きロッドの付着長に対する付着強度について示したものが図－9で、供試体は 5 体である。図中の D8 と D10 の破線と実線は各付着長の平均値を結んだものである。ただし、D10 での●を□で囲んだデータは平均値を算出する際には除外している。また、「CFRP ストランド」と「PC 鋼より線」は文献 5) より引用したものである。

まず、ロッドの付着性能について検討する。D8 と D10 の径の異なるロッドについて観ると、付着強度は径の違いによる差異はほとんど見受けられない。これらの付着長と付着強度の関係については、いずれも付着長が長くなると、付着強度は低減する傾向を示している。

次にロッドと文献 5) から引用した CFRP ストランドおよび PC 鋼より線の付着強度を比較する。PC 鋼より線は付着長が長くなると付着強度は増加する傾向にあるが、CFRP ストランドでは付着長 50mm から 100mm までは付着強度は増加するが、それ以上の付着長では付着強度はほぼ一定となっている。また、両者の付着強度を比較すると、CFRP ストランドが PC 鋼より線に比べてかなり大きくなっている。

ロッドの付着強度は CFRP ストランドと比べ、付着長 150mm ではやや低下するものの、



図－9 付着強度と付着長

100mm ではほぼ同等となっている。

これらの結果から、リブ付きの CFRP ロッドは PC 鋼より線よりも高い付着強度が期待でき、CFRP スtrand とほぼ同じような適用性を有しているものと云えよう。

#### 4. あとがき

本論文は炭素繊維が直線に束ねられたリブ付き CFRP ロッドのスリーブ定着に対する種々の充填剤の定着性能とグラウト材としての無収縮モルタルとの付着性能について、実験的に検討したものである。スリーブ定着用の樹脂としては膨張セメントとエポキシ樹脂やアクリル樹脂などの 4 種類についての定着性能を検討し、無収縮モルタルとの付着性能については、PC 鋼より線や CFRP スtrand との比較検討を行った。

ここで得られた結果を要約すると以下のようになる。

- (1) CFRP ロッドの公称破断強度に達する引張力に対して、十分な強度を有する鋼製スリーブを利用すれば、樹脂系充填剤も膨張セメントと同様にロッドの破断強度まで定着力を維持できるものと思われる。
- (2) CFRP ロッドの無収縮モルタルとの付着強度は PC 鋼より線よりも大きく、CFRP スtrand とほぼ同等となるが、CFRP ロッドでは付着長が 100mm 以上では付着強度は

やや低下する傾向が示された。

- (3) ロッドの表面に付したリブは付着強度を大きく高めている。

#### 謝 辞

本研究を実施するに際して、長崎大学大学院生産化学研究科博士後期課程の久保田慶太様には貴重なご意見を賜ったことに感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針(案)，コンクリートライブラリー88，1996
- 2) 永井淳一ほか：曾根高架橋ほか2橋の橋梁補強工事，プレストレストコンクリート，Vol.37，No.6，pp.42－51，1995
- 3) 酒井博士ほか：CFRP ケーブルのPC吊橋への適用に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.317－322，2003
- 4) 久保田慶太ほか：定着法の違いがCFRP より線の疲労性状に及ぼす影響について，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.2，pp.955－960，2003
- 5) (財)土木研究センター：土木系材料技術・公募型技術審査証明報告書(第503号)，1994