

ポーラスコンクリートと鉄筋を内蔵したコルゲートチューブの付着性能に関する基礎研究

Bond Properties between Corrugated Tube Encased Reinforcement Bar and Porous Concrete

引抜き試験 曲げ試験 空隙率 同 沖山 友麻\* Yuma OKIYAMA 同 大畑 卓也\*\* Takuya OHATA  
付着長さ 付着応力度 正会員 山本 貴正\*\*\* Takamasa YAMAMOTO

会員外 ○千原 隼人\* Hayato CIHARA

同 鈴木 啓太\* Keita SUZUKI

同 大畑 卓也\*\* Takuya OHATA

正会員 山本 貴正\*\*\* Takamasa YAMAMOTO

1. はじめに

1.1 本研究の目的・背景

幅広い分野で使用されている安価なかつ錆びないポリプロピレン製のコルゲートチューブ(CT)の芯に鉄筋を配置し、隙間にグラウト材を充填した補強筋(鉄筋内蔵CT)の付着性能の基礎的資料を得ることを目的として、既報1)に引き続き、比較的断面が小さい鉄筋D6と、その外径に近い公称内径7.4mm(外径は10.2mm)を有するCTを用いた鉄筋内蔵CTによるポーラスコンクリート(以下、POC)との付着性能について、単純梁曲げ試験、片側引抜き試験を通じて検討している。以下、明記しない限り、統計学的な推定・検定の有意水準は5%とする。

1.2 本報における造語の定義

本報で用いる造語を次のように定義する。

- ・設計かぶり厚主筋径比 $[c/d]$ : 通常鉄筋の公称径またはCT公称径に対する試験体短手方向の設計かぶり厚
- ・第1ピーク時曲げ応力度: 曲げ試験体の第1ピーク時(後掲図-4参照)の最外縁曲げ応力度
- ・通常鉄筋: CTが挿入されていない無被覆鉄筋
- ・鉄筋内蔵CT: 無被覆鉄筋をCTに挿入し、隙間をグラウトした補強筋
- ・非付着区間: 片側引抜き試験における荷重端側非付着区間(後掲図-1参照)
- ・補強効果比: 無補強の曲げ試験体の最大曲げモーメントに対する主筋を有する曲げ試験体の最大曲げモー

メント

- ・CT付着喪失破壊: CTに曲げひび割れが到達することで生じる鉄筋内蔵CTと母材の付着力の喪失による耐力劣化
- ・例)通常鉄筋D6: 主筋がD6の無被覆鉄筋
- ・例)CT10.2(D6): 鉄筋D6が公称径10.2mmのCTに挿入されている鉄筋内蔵CT
- ・POC: ポーラスコンクリート
- ・0.2%D相当付着応力度: 0.2%D付着応力度に相当する付着応力度

2. 実験について

2.1 検討項目

片側引抜き試験を通じてPOCと鉄筋内蔵CTの付着応力度を、また中央一点集中載荷のPOCの単純梁曲げ試験を通じて鉄筋内蔵CTを主筋としたPOCの補強効果比を、また検討した。それぞれ表-1および表-2に、試験体概要が示してある。表-1中の非付着区間(後掲図-1参照)は、片側引抜き試験の載荷板からの応力を均一化して、試験誤差を小さくするために設けた<sup>2)</sup>。各表中のグラウト材の圧縮強度は、それぞれ強度管理用試験体(後述2.3参照)の折片圧縮強度の標本平均と標準変動係数である。

2.2 使用材料

鉄筋は呼び名D6およびD10の異形棒鋼を使用した。CTはポリプロピレン製のスリットなしの公称径10.2mmを使用した。グラウト材およびPOCの結合材に使用した

表-1 POC引抜き試験体の概要

| 試験体<br>荷重載荷面<br>設計短手幅<br>×長手幅 | 非付着<br>区間 | 主筋名称       | グラウト材<br>圧縮強度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | $c/d$ | 設計長   | 設計<br>付着長 | $n$ |
|-------------------------------|-----------|------------|---------------------------------------|-------|-------|-----------|-----|
| 95mm×100mm                    | なし        | CT10.2(D6) | $m:56.5$<br>[ $s/m:1.2\%$ ]           | 1.41  | 100mm | 100mm     | 3   |
|                               | あり        |            |                                       |       | 150mm | 100mm     | 6   |

$m$ : 標本平均  $s$ : 標本標準偏差  $n$ : 同一条件試験体

表-2 POC曲げ試験体の概要

| 試験体<br>荷重載荷面<br>設計高<br>×設計幅 | 主筋名称       | グラウト材<br>圧縮強度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | $c/d$ | $n$ |
|-----------------------------|------------|---------------------------------------|-------|-----|
| 100mm×95mm                  | 通常鉄筋D10    | -                                     | 4.75  | 3   |
|                             | CT10.2(D6) | $m:49.2$ [ $s/m:0.8\%$ ]              | 4.40  | 3   |
|                             | -          | -                                     | -     | 3   |

\* 愛知工業大学工学部建築学科 学部生

\*\* 豊田工業高等専門学校建築学科 講師 博士(工学)

\*\*\* 愛知工業大学工学部建築学科 准教授 博士(工学)

Undergraduate Student, Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Aichi Institute of Technology

Assist. Prof., Dept. of Environmental and Urban Engineering, National Institute of Technology, Toyota College, Dr. Eng.

Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Aichi Institute of Technology, Dr. Eng.

水は水道水、セメントは普通ポルトランドセメント(密度 3.15g/cm<sup>3</sup>, 比表面積 3250cm<sup>2</sup>/g)である。POCの固相となる骨材は、瀬戸市下半田川町産の6号砕石(粒径:13mm-5.0mm, 表乾密度:2.70g/cm<sup>3</sup>, 吸水率:0.52%, 実積率:57.8%)を使用した。

### 2.3 試験体作製

#### (a) 鉄筋内蔵 CT

鉄筋内蔵 CT は、鉄筋無挿入の CT のみが配置されている曲げ試験体を作製した後、足踏注入器(踏込吐出量 10cc/回, 踏込力量 15kg, 吐出圧力 3.0MPa, ノズル公称外径 6.0mm)でグラウト材を CT 内に注入し、続いて、鉄筋 D6 を芯に挿入して作製した。この注入経路の排出側には、グラウト材が漏れないように布テープを貼付している。グラウト材のセメント水比を 2.2 とした。なお、強度管理用試験体を、JIS R 5201 に準拠して鋼製三連型枠で成形した。POC の結合材の水セメント比は 35%, 設計空隙率を 20% とした。粗骨材の容積率の調合値は JIS A 1104:2019 に準拠して測定した実積率としている。なお、無補強の POC の曲げ試験体を補強ありと同様の方法で 3 体成形した。

#### (b) 引抜き・曲げ試験体

引抜き試験体の作製は、主に JSTM C 2101 に準拠した。なお、鉄筋内蔵 CT を主筋とする試験体の付着区間の長さは、文献 3) を参考にして、主筋公称径の 10 倍程度となる 100mm として設計している。非付着区間は、公称内径 11mm(公称厚 2.0mm)の亚克力管が配置されている。

公称内寸 100mm×100mm×400mm の長方形型枠に混練した POC を打設し、引抜きおよび曲げ試験体をそれぞれ成形した。なお、型枠に 2 層 50 回突きで詰め込み、その後、各型枠の上面に揃うようにならした。最後に、打設方向の高さが 95mm となるように、表面振動機(バイブレーションタンパ, 起振力 1.23kN)による締固めを施した。

各主筋は、POC 打設時に位置を確保するため、型枠板の側面中央に設けたそれぞれ CT 公称径および鉄筋公称径の+2.0mm 寸法の開孔に通している。ただし、引抜き試験体は、型枠板の両側面側に非付着区間となる亚克力管を配置している。また、この材齢 3 週後に、コンクリートカッターで計画した寸法になるように、長方形試験体を切断した。一つの長方形試験体につき、切断することで、両端が非付着区間あり、中央が非付着区間なしの引抜き試験体となる。

### 2.4 試験・計測

#### (a) 片側引抜き試験体

JSTM C 2101:1992 に準拠して主に片側引抜き試験を実施し、最大引抜き荷重時の最大付着応力度( $\tau_{max}$ )を次式で

算出した。

$$\tau_{max} = \frac{P_{max}}{S} \quad (1)$$

ここに  $P_{max}$ : 最大引抜き荷重  $S$ : 表面積

また、付着長さを考慮し、0.2%D 付着応力度に相当する付着応力度を自由端すべり量が付着長さに  $5.0 \times 10^{-5}$  を乗じた値に到達したときの付着応力度とした。

鉄筋内蔵 CT の表面積を CT の付着区間の外周表面積とした。表面積は、周長と付着区間長の積としている。通常鉄筋および鉄筋内蔵 CT の周長は、それぞれ公称値および CT 公称径と円周率の積である。CT と母材モルタルの付着力は、引抜き荷重を挿入されている鉄筋のみに与え、グラウト材を介して伝達させた。なお、引抜き試験体の概要が図-1 に示してある。なお、CT へ鉄筋を挿入する前かつコンクリートカッターで切断する前に空隙率試験を JCI-SP02-1 の容積法に準拠して材齢 1 週間間隔で計 3 回実施した。その後、コンクリートカッターで切断し、各試験体の空隙率試験を上記と同様に実施した。

#### (b) 単純梁曲げ試験

左右対称スパン 150mm の中央一点集中荷重の単純梁曲げ試験を図-2 に示すように実施した。主筋は、試験体の中央に配置している。なお、試験体中央に変位計を設置し、たわみを測定している。また、荷重方向の側は打

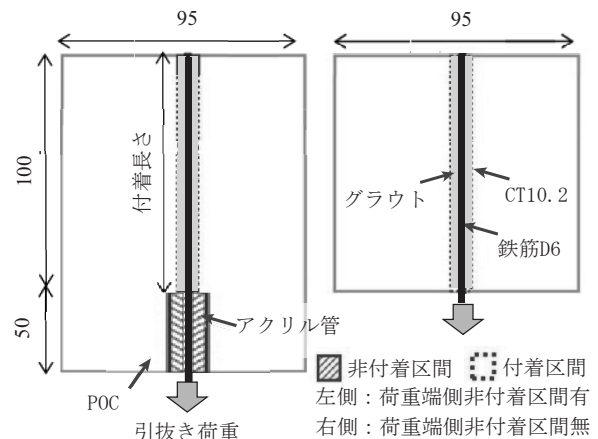


図-1 片側引抜き試験の概要

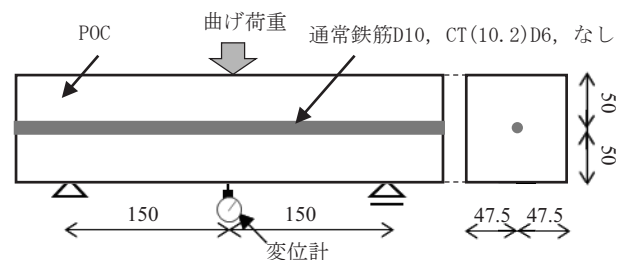


図-2 単純梁曲げ試験の概要

設面を側面として試験を実施している。母材 POC の曲げ試験においては、荷重が均等に伝わるように、支点および載荷点と試験体の間に厚さ 1.0mm のゴムシートを挿入している。

### 2.5 材料試験

グラウト材とモルタルの各強度管理用試験体の強さ試験を JIS R 5201:2015 に準拠して実施し、各曲げ強度・折片圧縮強度を計測した。また、無筋の POC の曲げ試験と空隙率試験を、前述 2.4 の試験方法と同様に実施した。

## 3. 実験結果・考察

### 3.1 片側引抜き試験

#### (a) 空隙率試験

表-3 に、切断前と切断した後の引抜き試験体の空隙率試験結果を示す。括弧内は標本標準偏差または標本標準偏差の信頼区間を表している。なお、1 体の長方形試験体から切断された 3 体の片側引抜き試験体の空隙率試験で測定した水中質量および気中質量それぞれの標本平均の和から求めた空隙率は、表中の上段から順に 30.1, 29.8 および 27.7% であり、これら全て切断前の長方形試験体の空隙率の信頼区間に存在している。

#### (b) 片側引抜き試験

図-3(a) (b) に、引抜き試験体の最大付着応力および 0.2%D 相当付着応力度と空隙率の標本平均の関係に及ぼす非付着区間有無の影響を示す。図中の実線は、非付着区間有を対象として最小二乗法により算出した線形近似線を表している。相関係数  $[r]$  は、非付着区間有の試験体を対象として算出している。なお、全試験体ともに採取破壊状況は、CT の引抜きである。

同図より、非付着区間有の最大付着応力および降伏付着応力相当とともに、それぞれ空隙率と負の相関が認められる。なお、それぞれの母相関係数の信頼区間は、 $-0.35 \sim -0.99$  および  $-0.08 \sim -0.98$  である。

母材 POC の片側引抜き試験体の最大付着応力は、空隙率にもよるが、非付着区間有の群においては、 $0.24 \sim 0.81 \text{ N/mm}^2$  であり、単純に母材モルタル<sup>1)</sup>と比較すると、著しく小さい。このことも次節の CT10.2(D6) で補強された試験体の補強効果比が 1.0 であることに影響している可能性がある。なお、非付着区間無は、同図に示すように、各付着応力と空隙率に関係がないように見受けられる。このことについては、試験体数が少ないこともあり、今後、再検討する必要がある。

### 3.2 単純梁曲げ試験

#### (a) 最終破壊状況

試験中の目視によると、全曲げ試験体ともに、最大曲げ荷重到達(無補強および CT ありの試験体はひび割れ荷

重に相当、後述 3.2 (b) 参照)後に、曲げ引張りひび割れを確認した。なお、通常鉄筋 D10 で補強された試験体は、明確な曲げ圧縮ひび割れおよび付着割裂を観察できていない。このことから、最終破壊状況を CT 付着喪失と仮定している。

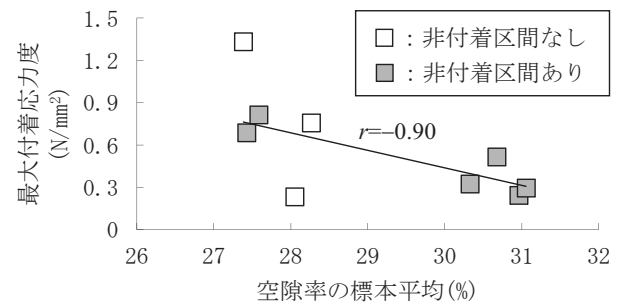
#### (b) 曲げ荷重-たわみ関係

図-4 に、通常鉄筋 D10 および CT10.2(D6) で補強された曲げ試験体の曲げ荷重-中央たわみ関係の例を併せて示す。同図に示すように、通常鉄筋 D10 で補強された試験体は、サイドピークが生じている。これは母材モルタ

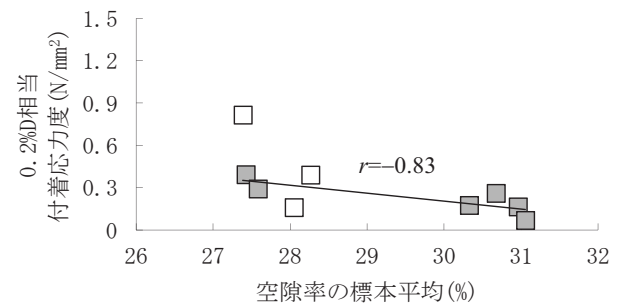
表-3 POC片側引抜き試験の実験結果

| 長方形試験体         |                          | 引抜き試験体(上から端, 中央, 端) |        |            |               |
|----------------|--------------------------|---------------------|--------|------------|---------------|
| $m$ [s]        | $\mu$ [σ]信頼区間            | $m$                 | $s$    | $\mu$ 信頼区間 | $\sigma$ 信頼区間 |
| (%)            | (%)                      | (%)                 | (%)    | (%)        | (%)           |
| 30.0<br>[0.38] | 29.1-31.0<br>[0.20-2.40] | 30.9                | [0.13] | 30.6-30.9  | [0.07-0.79]   |
|                |                          | 27.5                | [0.12] | 27.1-27.7  | [0.06-0.74]   |
|                |                          | 31.1                | [0.05] | 30.9-31.2  | [0.03-0.32]   |
| 29.7<br>[0.17] | 29.3-30.1<br>[0.09-1.10] | 30.4                | [0.12] | 30.0-30.6  | [0.06-0.74]   |
|                |                          | 28.0                | [0.10] | 27.8-28.3  | [0.05-0.65]   |
|                |                          | 30.5                | [0.17] | 30.3-31.1  | [0.09-1.07]   |
| 27.8<br>[0.17] | 27.4-28.2<br>[0.09-1.84] | 27.5                | [0.02] | 27.4-27.5  | [0.01-0.13]   |
|                |                          | 28.1                | [0.17] | 27.8-28.7  | [0.09-1.08]   |
|                |                          | 27.7                | [0.35] | 26.7-28.4  | [0.18-2.17]   |

$\mu$ :母平均  $\sigma$ :標準偏差



(a) 最大付着応力度



(b) 0.2%D相当付着応力度

図-3 最大・0.2%D相当付着応力度と空隙率の関係

ル<sup>1)</sup>と同様である。一方、CT10.2(D6)で補強された試験体は、最大曲げ荷重到達まで、荷重が劣化した後に再び上昇する現象が生じていない。このことから、以下、CT10.2(D6)で補強された試験体の補強効果比を1.0としている。なお、表-4には、POC曲げ試験体の実験結果が示してある。表中の第1ピーク時曲げ応力度 $[\sigma_{m1}]$ は、平面保持を仮定して、鉄筋の曲げ応力度を無視した次式で算出している。

$$\sigma_{m1} = \frac{M_{m1}}{Z}, \quad Z = \frac{b \cdot h^2}{6} \quad (1)$$

ここに  $M_{m1}$ :第1ピーク時の曲げモーメント  $b$ :試験体幅  $h$ :試験体高さ

CT10.2(D6)で補強された試験体の最終破壊状況は、試験終了後の母材割裂およびCTの変形を観察できていないため、CT付着喪失と推定している。

図-5に、第1ピーク時曲げ応力度と空隙率の標本平均の関係が示す。図中の曲線は、全試験体を対象として算出した次式である。

$$\sigma_{m1} = \sigma_m \cdot e^{-\beta \cdot P} \quad (2)$$

ここに  $\sigma_m$ :結合材の曲げ強度の標本平均(=8.92N/mm<sup>2</sup>)  $\beta$ :実験変数  $P$ :空隙率

最小二乗法により、実験変数は3.8となる。式(2)による推定値に対する実測値の標本平均は0.99、標本標準偏差は0.10、最大値は1.17、最小値は0.80である。

以上を踏まえると、母材POCの主筋が鉄筋内蔵CTの曲げ試験体は、そのモルタル<sup>1)</sup>と異なり、母材が連続してCTと付着していないため、曲げひび割れがCTに到達すると、CTとPOCの付着力が喪失しやすいと考えられる。また、これは、本試験方法では、主筋が試験体の中央に配置されていることから、POCの曲げひび割れ発生時に鉄筋内蔵CTが引張力を負担していないことも起因していると推測される。加えて、前報のCT14.1(D10)の補強と同様の結果であるため、鉄筋内蔵CTの径は、付着性能、補強効果比に影響を及ぼしていないと考えられる。

#### 4. おわりに

既報1)に引き続き、CT10.2(D6)とPOCとの付着性能について、単純梁曲げ試験、片側引抜き試験を通じて検討した。

#### 謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金(基盤C, 研究課題番号21K04343)の助成による。

#### 参考文献

1) 山本貴正, 大畑卓也:鉄筋が挿入されているコルゲ

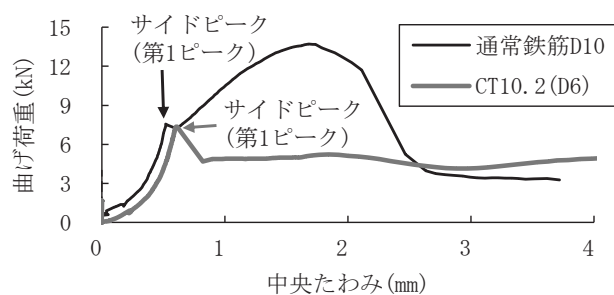


図-4 曲げ荷重-中央たわみの例

表-4 単純梁曲げ試験の実験結果

| 主筋         | 第1ピーク時  |                            |       | 最終破壊状況 |
|------------|---------|----------------------------|-------|--------|
|            | 空隙率 (%) | 曲げ応力度 (N/mm <sup>2</sup> ) | 補強効果比 |        |
| 通常鉄筋D10    | 25.4    | 3.56                       | 1.81  | CT付着喪失 |
|            | 27.1    | 3.20                       | 1.90  | CT付着喪失 |
|            | 27.4    | 3.03                       | 1.82  | CT付着喪失 |
| CT10.2(D6) | 24.0    | 2.87*                      | 1.00  | 曲げ破壊** |
|            | 24.7    | 3.36*                      | 1.00  | 曲げ破壊** |
|            | 27.7    | 3.37*                      | 1.00  | 曲げ破壊** |
| なし         | 22.4    | 3.82*                      | 1.00  | 曲げ破壊   |
|            | 23.3    | 3.38*                      | 1.00  | 曲げ破壊   |
|            | 25.3    | 3.97*                      | 1.00  | 曲げ破壊   |

\*最大曲げ荷重到達時の曲げ応力度 \*\*CT付着喪失による

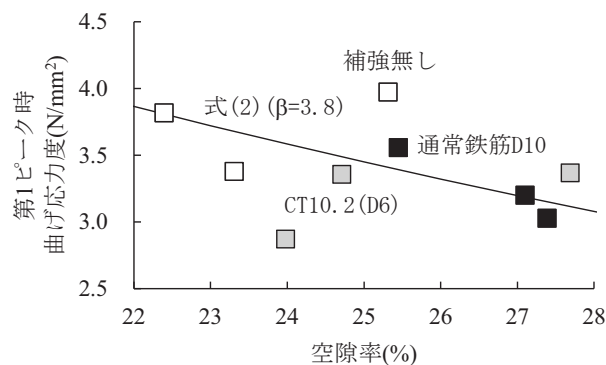


図-5 第1ピーク時曲げ応力度と空隙率の関係

ートチューブの付着性能について、防錆管理, Vol. 65, No. 8, pp. 281-288, 2021.8

- 2) 村田二郎: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(案),コンクリート工学, Vol. 23, No. 3, pp. 8-11, 1985
- 3) 小川洋二, 島弘, 河野清: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, コンクリート工学年次論文集, Vol. 17, No. 1, pp. 701-706, 1995