

鉄筋が挿入されているコルゲートチューブの付着性能について

山本 貴正*

Takamasa YAMAMOTO

大畑 卓也**

Takuya OHATA

本稿では、コルゲートチューブ (CT) の芯に無被覆の鉄筋を挿入し、隙間をグラウトした補強筋 (鉄筋内蔵 CT) と積レンガなどに使用されているモルタル、連続空隙を有するポーラスコンクリート (POC) との付着性能について実験的に検討した。その結果、鉄筋内蔵 CT は、モルタルとの付着応力伝達機構は、その通常の鉄筋と同程度の可能性があること、POC との付着力は本試験方法では喪失しやすいなどの知見を得た。

キーワード：片側引抜き試験、かぶり厚、付着割裂破壊、曲げひび割れ、最大曲げモーメント

1. はじめに

1.1 背景・目的

鉄筋で補強されるコンクリート構造物は、かぶり厚が規定されている。かぶり厚を規定されている制限値以下にすることができれば、例えば、塀や間仕切り壁に使用される空洞レンガ積みの美観性をさらに高めることができる。また、ポーラスコンクリート (POC、図1) 例えは1) は、透水性能でゲリラ豪雨による都市型水害を抑制する建設材として、近年、注目されているが、連続空隙を有しているため、従来型のコンクリートと同様の無被覆の鉄筋 (無被覆鉄筋) による補強を施すことができない。

以上の背景のもと、筆者らは、幅広い分野で使用されている安価なプラスチック樹脂製のコルゲートチューブ (CT) に注目した。CT の芯に無被覆鉄筋を挿入し、隙間をグラウトした補強筋 (鉄筋内蔵 CT) を従来の鉄筋の代替とすれば、特殊な生産管理が不要かつ現場施工が可能でもあるため、これは、経済的にも優れた鉄筋の発錆抑制になり、上述の望みを満たすことが可能であると考えた。

本稿は、これまでに筆者らが得ている実験データをもとに、鉄筋内蔵 CT とモルタル及び POC の付着性能について検討している^{注1)}。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。

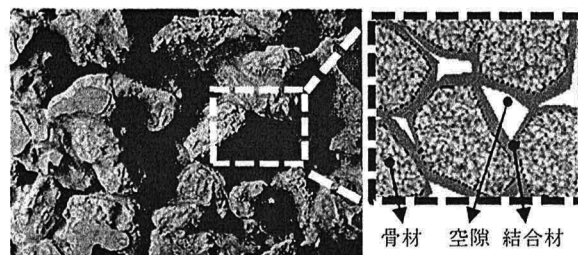


図1 ポーラスコンクリート (概念図)

1.2 本文における造語の定義

本文中における主な造語を次のように定義する。

- ・設計かぶり厚主筋径比 $[c/d]$ ：通常鉄筋の公称径又は CT 公称径に対する試験体短手方向の設計かぶり厚
- ・挿入鉄筋及び鉄筋引抜き破壊：鉄筋内蔵 CT に挿入されている鉄筋又は通常鉄筋の引抜きによる耐力劣化
- ・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5参照) の外縁曲げ応力度
- ・通常鉄筋：CT に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3参照)
- ・母材割裂破壊：母材のモルタル又は POC の主筋に沿う割裂ひび割れによる耐力劣化 (後掲写真3参照)

* 愛知工業大学 (〒470-0356 愛知県豊田市八草町八千草1247) 博士 (工学)
Aichi Institute of Technology (1247, Yachigusa, Yakusa-cho, Toyota-shi, Aichi, 470-0356, Japan) Dr. Eng.

** 豊田工業高等専門学校 (〒471-8525 愛知県豊田市栄生町2-1) 博士 (工学)
National Institute of Technology, Toyota College (2-1, Eisei-cho, Toyota-shi, Aichi, 471-8525, Japan) Dr. Eng.

- ・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：試験体の主筋が D6 の無被覆鉄筋
- ・例) CT10.2 (D6)：鉄筋 D6 が公称径 10.2 mm の CT に挿入されている鉄筋内蔵 CT

の最大付着応力度を、中央一点集中荷重の単純梁曲げ試験を通じて主筋の鉄筋内蔵 CT で補強されているモルタル及び POC の補強効果比を検討した。なお、表 1 (a) (b) に、実験・試験体概要が示してある。実験は、予備、本、追加の 3 期にわたり実施している。表 (a) 中の非付着区間は、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³⁾。各表中の母材及び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 2.3.2 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. 実験について

2.1 検討項目

片側引抜き試験を通じて母材モルタルと鉄筋内蔵 CT

表 1 実験・試験体概要

(a) 片側引抜き試験 (母材モルタル)

実験	ID	試験体 荷重載荷面 設計短手幅 × 長手幅	非付着 区間	CT 公称径 (mm)	鉄筋 呼び名	主筋名称	c/d	設計長	設計 付着長	母材 圧縮強度 (N/mm ²)	グラウト材 圧縮強度 (N/mm ²)	計画 n	ID
予備	01	150 mm × 150 mm	なし	23.7	D10	CT23.7 (D10)	2.66	150 mm	100 mm	23.8 [15.9%]	67.7 [3.58%]	2	01
	02		あり			—	2.66						02
	03		—	通常鉄筋 D10	7.37	03							
本	11	39 mm × 100 mm	あり	—	D10	通常鉄筋 D10	1.55	60 mm	40 mm	29.9 [6.94%]	134 [8.89%]	3	11
	12			17.5		CT17.5 (D10)	0.61	105 mm	70 mm				12
	13			23.7		CT23.7 (D10)	0.32	150 mm	100 mm				13
	14			—	D25	通常鉄筋 D25	0.27						14
追加	21	39 mm × 100 mm	あり	—	D10	通常鉄筋 D10	1.55	60 mm	40 mm	32.5 [13.0%]	—	3	21
	22			10.2		CT10.2	1.41						22

n：同一条件試験体のサンプル数 各強度の [] 内：標本変動係数

(b) 単純梁曲げ試験

実験	ID	母材	試験体 荷重載荷面 設計高 × 幅	CT 公称径 (mm)	鉄筋 呼び名	主筋名称	c/d	グラウト 注入方向	母材 曲げ強度 (N/mm ²)	母材 圧縮強度 (N/mm ²)	グラウト材 圧縮強度 (N/mm ²)	計画 n	ID
予備	01B	モルタル	60 mm × 60 mm	23.7	D25	通常鉄筋 D25	0.68	鉛直	5.52 [7.00%]	29.3 [12.6%]	—	2	01B
	02B				D10	CT23.7 (D10)	0.77						67.7 [3.58%]
本	11B	モルタル	39 mm × 100 mm	—	D10	通常鉄筋 D10	1.55	鉛直	5.98 [6.31%]	29.9 [6.94%]	134 [8.89%]	3	11B
	12B			17.5		CT17.5 (D10)	0.61						12B
	13B			23.7		CT23.7 (D10)	0.32						13B
	14B			—	D25	通常鉄筋 D25	0.27						14B
追加	21B	モルタル	39 mm × 100 mm	—	D10	通常鉄筋 D10	1.55	鉛直	5.24 [8.04%]	36.4 [11.6%]	—	3	21B
	22B			10.2		CT10.2 (D6)	1.41						49.2 [7.98%]
	23B			—	—	1.41	水平	39.9 [10.5%]					23B
	31B	POC	100 mm × 95 mm	—	D10	通常鉄筋 D10	4.75	水平	3.53* [7.13%]	—	—	3	31B
32B	14.1			CT14.1 (D10)		3.05	35.6 [13.6%]						32B

* 空隙率の標本平均 23.7%、標本標準偏差 3.53%

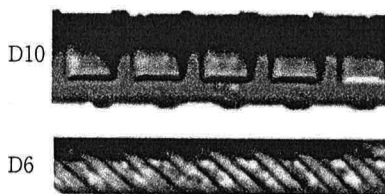
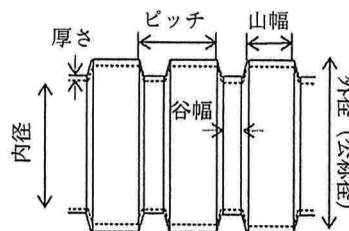


写真 1 鉄筋 (異形棒鋼) の外観の例



本文中表記	CT23.7	CT17.5	CT14.1	CT10.2
公称径 (mm)	23.7	17.5	14.1	10.2
内径 (mm)	19.5	13.2	10.7	7.4
ピッチ (mm)	3.6	3.5	2.7	2.7
山幅 (mm)	2.0	2.2	1.5	1.54
谷幅 (mm)	0.8	0.7	0.6	0.6
厚さ (mm)	0.25	0.25	0.25	0.25

図 2 コルゲートチューブ (CT) の寸法

2.2 使用材料

2.2.1 鉄筋・コルゲートチューブ

鉄筋は呼び名 D25、D10 及び D6 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 23.7、17.5、14.1 及び 10.2 mm を使用した。なお、これら異形棒鋼の外観の例が写真 1 に、CT の寸法が図 2 に示してある。

2.2.2 セメント硬化体

グラウト材、モルタル及び POC の結合材に使用した水は水道水、セメントは普通ポルトランドセメント（密度 3.15 g/cm^3 、比表面積 $3,250 \text{ cm}^2/\text{g}$ ）である。モルタルの細骨材は、予備と本実験では多治見市大畑町産の山砂（表乾密度 2.55 g/cm^3 、吸水率 1.78%、実積率 65.3%）、追加実験では瀬戸市下半田川町産の山砂（表乾密度 2.58 g/cm^3 、吸水率 1.45%、実積率 57.7%）を使用した。予備と本実験のグラウト材に使用した混和剤は高性能減水剤（主成分はポリカルボン酸系コポリマー）である。POC の固相となる骨材は、瀬戸市下半田川町産の 6 号碎石（粒径：13 mm ～ 5.0 mm、表乾密度： 2.70 g/cm^3 、吸水率：0.52%、実積率：57.8%）を使用した。

2.3 試験体作製

2.3.1 鉄筋内蔵 CT

グラウト注入方向が鉛直の鉄筋内蔵 CT は、まず垂直に立てた CT の下底に布テープを貼付し、その後、CT 内にグラウト材を流し込んだ。続いて、無被覆鉄筋を芯に挿入して作製した。なお、CT の立て方、表面の養生などは、文献 2) を参照されたい。水平方向の鉄筋内蔵 CT は、鉄筋無挿入の CT 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 10 cc/回、踏込力量 15 kg、吐出圧力 3.0 MPa、ノズル公称外径 6.0 mm）でグラウト材を CT 内に注入し、続いて、無被覆鉄筋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、予備と本実験では 4.0、追加実験では 2.5 とした。なお、予備と本実験では、セメント質量比 6.0% の混和剤を添加している。グラウト材の強度管理用試験体を、JIS R 5201:2015 に準拠して鋼製三連型枠で成形した。写真 2 に、作製した鉄筋内蔵 CT の例が示してある。

2.3.2 モルタル・POC

モルタルのセメント水比及び砂セメント比を、予備と本実験ではそれぞれ 1.7 及び質量比で 3.5、追加実験では



写真 2 鉄筋内蔵CTの例 [CT23.7 (D10)]

それぞれ 1.5 及び体積比で 3.0 とした。モルタルの各強度管理用試験体を、JIS R 5201:2015 に準拠して鋼製三連型枠で成形している。

POC の結合材の水セメント比を 35%、設計空隙率を 20% とした。粗骨材の容積率の調値は 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 の曲げ試験体を後述 2.3.4 と同様の方法で 3 体成形した。

2.3.3 引抜き試験体

引抜き試験体の作製は、主に JSTM C 2101:1992 に準拠した。鉄筋内蔵 CT を主筋とする試験体の非付着区間及び付着区間の長さは、それぞれ CT 公称径を鉄筋公称径に置換して、JSTM C 2101:1992 に準拠して設計している（前掲表 1 (a) 参照）。なお、予備実験の主筋が通常鉄筋 D10 の試験体の非付着区間及び付着区間の長さは、その鉄筋内蔵 CT と同一としている。

非付着区間は、主筋が CT23.7 (D10) はグラウト材が注入されていない公称径 23.7 mm の CT からなる。通常鉄筋 D25 は、厚さ 2.0 mm 程度となるように D25 に巻き付けた布テープからなる。CT17.5 (D10) は公称内径 20 mm（公称厚 2.7 mm）の塩ビ管、通常鉄筋 D10 は予備と本実験ともに公称内径 13 mm（公称厚さ 2.2 mm）の塩ビ管、追加実験では公称内径 11 mm（公称厚 2.0 mm）の亚克力板が配置されている。

各主筋は、モルタル打設時に位置を確保するため、型枠の側面中央に設けたそれぞれ CT 公称径及び鉄筋公称径の +2.0 mm 寸法の開孔に通している。試験体の養生は、型枠を脱型したモルタル打設の翌日から強度試験実施まで水中とした。

2.3.4 曲げ試験体

公称内寸 100 mm × 100 mm × 400 mm の長方形型枠に混練したモルタル及び POC を打設し、曲げ試験体を成形した。なお、POC については、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。後に、打設方向の高さが 95 mm 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 1.23 kN）による締固めを施した。

2.4 試験・計測

2.4.1 片側引抜き試験

JSTM C 2101:1992 に準拠して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（ τ_{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

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。

通常鉄筋及び鉄筋内蔵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3に示してある。

2.4.2 単純梁曲げ試験

左右対称スパン150mmの一点集中荷重の単純梁曲げ試験を図4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、支点及び荷重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。また、空隙率試験をJCI-SPO2-1の容積法に準拠して実施した。

2.4.3 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2.4.2の試験方法と同様に実施した。

3. 引抜き試験体の実験結果・考察

3.1 最終破壊状況

3.1.1 非付着区間有無（予備実験）

予備実験の主筋がCT23.7(D10)の非付着区間有無それぞれの引抜き試験体[ID02,01]の終破壊状況は、鉄筋破断及び母材割裂である。母材割裂破壊した非付着区間なしの試験体[ID01]の割裂面を写真3に示す。

同写真の割裂面より、母材モルタルに付着していたCT23.7の表面凹凸の痕跡が認められる。このように母材割裂破壊が生じたのは、非付着区間ありの試験体と比較して、載荷板からの応力が不均一であり、鉄筋破断又は主筋の引抜きが生じる前に、母材モルタルの引張応力度が局部的に引張強度に到達したためと考えられる。引張応力度が生じたのは、写真に示すモルタル割裂面に痕跡しているCT23.7の表面凹凸を踏まえ、通常鉄筋の節と同様に、CTの蛇腹状の凹凸でモルタルが外側に圧されるためと考えられる。

3.1.2 CT有無（予備実験・非付着区間あり）

予備実験の主筋が通常鉄筋D10の引抜き試験体[ID03]は、CT23.7(D10)の試験体[ID02]と異なり、鉄筋破断に先行して鉄筋引抜き破壊が生じた。これは、通常鉄筋D10を被覆している母材モルタルの強度が、CT23.7(D10)のグラウトの強度より低いこと、また付着長が同一であるため、必然的に、通常鉄筋D10はCT23.7(D10)と比較して、母材モルタルとの付着区間の表面積が小さいことに起因していると考えられる。

3.1.3 CT有無（本・追加実験）

本・追加実験のD10を用いている引抜き試験体の終破壊状況は、CT有無に関係なく、全て母材モルタルの付着割裂である。このCTありについては、通常鉄筋D10の節と同様に、CTの蛇腹状の凹凸でモルタルが外側に圧されるためと考えられる（前述3.1.1参照）。

主筋がCT10.2(D6)の試験体[ID22]の終破壊状況は、CTに挿入されているD6の引抜き破壊である。上記の主筋にD10を用いている試験体[ID21]と異なり、母材割裂に先行してD6の引抜き破壊が生じたのは、D10とD6の節の形状（前掲写真1参照）が影響していると考えられる。なお、この試験終了後の試験体を割裂破壊させた母材モルタルの割裂面を写真4に示す。同写真より、母材モルタルの割裂面に、付着していたCT10.2の表面凹凸の痕跡が認められる。このことから、CT10.2(D6)においても、モルタルとの付着を期待できると考えられる。

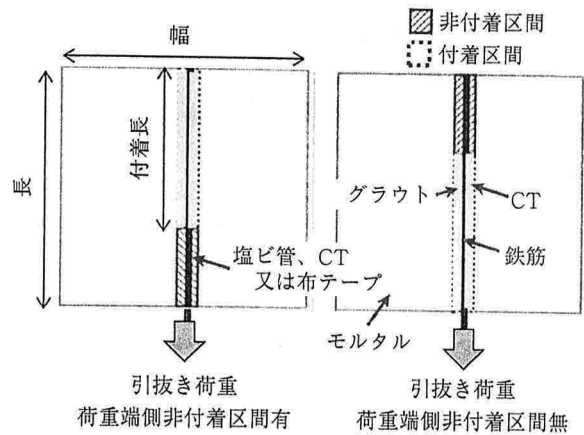


図3 片側引抜き試験の概要

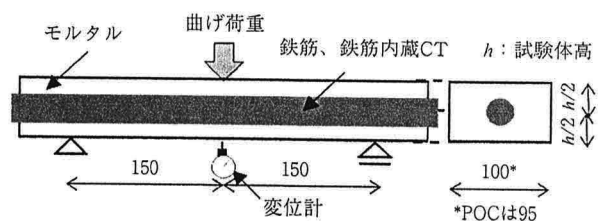
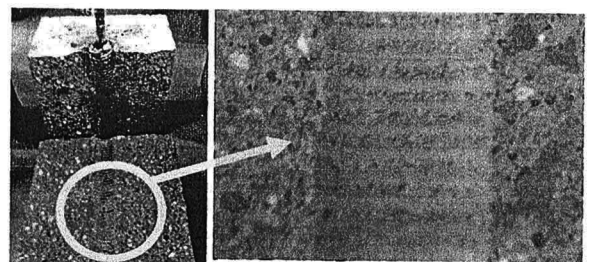


図4 単純梁曲げ試験の概要



付着区間のCT23.7の表面凹凸の痕跡

写真3 主筋がCT23.7(D10)の引き抜き試験体の割裂面

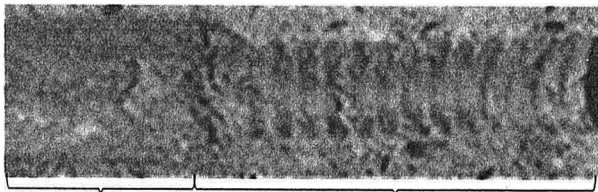


写真4 主筋がCT10.2(D6)の引き抜き試験体の割裂面

3.2 最大付着応力度

3.2.1 非付着区間有無 (予備実験・CTあり)

表2に、予備実験の主筋がCT23.7 (D10) の引き抜き試験体の最大付着応力度を示す。表に示すように、非付着区間なしとありの群の最大付着応力度は、最大値と最小値の範囲が重複していないため、ここでは、最大付着応力度を標本平均で検討する。

同表より、非付着区間ありの群の最大付着応力度は、そのなしと比較して高いことがわかる。これは、非付着区間なしの試験体は、そのありと比較して載荷板からの応力が不均一であることが起因していると考えられる(前述3.1.1参照)。なお、上記は、既往研究の主筋が通常鉄筋の試験の結果と同一の傾向である⁴⁾。以上より、鉄筋内蔵CTと母材モルタルの付着応力伝達機構は、通常鉄筋のそれと同程度の可能性があると推測できる。

3.2.2 設計かぶり厚主筋径比が同一 (本・追加実験)

表3に、本・追加実験の設計かぶり厚主筋径比が比較的近い主筋が通常鉄筋と鉄筋内蔵CTの引き抜き試験体の最大付着応力度を示す。ここでは、各群の最大付着応力度に及ぼす設計かぶり厚主筋径比の影響は無視する。

同表に示すように、本実験の群は、鉄筋内蔵CTの最大付着応力度の標本平均が、通常鉄筋のそれより高い。なお、これら平均値はt検定すると有意差なしとはいえない。全試験体ともに終破壊状況が母材割裂であることも踏まえ、これは、CTは無被覆鉄筋と比較して柔軟性に優れることから、CTの蛇腹状の凹凸から生じるリン

表2 最大付着応力度と非付着区間有無 (予備実験)

主筋名称	ID	非付着区間	最大付着応力度 (N/mm ²)			最終破壊状況
			標本平均	最大値	最小値	
CT23.7 (D10)	01	なし	5.53	5.69	5.37	母材割裂
	02	あり	5.96	6.04	5.83	鉄筋破断

表3 通常鉄筋と鉄筋内蔵CTの最大付着応力度

実験	ID	主筋名称	母材圧縮強度 (N/mm ²)	最大付着応力度			最終破壊状況
				標本平均 (N/mm ²)	m/s (%)	c/d	
本	14	通常鉄筋 D25	29.9	2.11	13.9	0.27	母材割裂
	13	CT23.7 (O10)		2.82	9.51	0.32	母材割裂
追加	21	通常鉄筋 D10	32.5	5.94	11.2	1.55	母材割裂
	22	CT10.2 (D6)		4.38	20.9	1.41	挿入鉄筋引抜

m/s : 標本変動係数

グテンションが、通常鉄筋の節のそれより小さいためと考えられる。

同表中の追加実験の群は、鉄筋内蔵CTの最大付着応力度の標本平均が、通常鉄筋のそれより低い。なお、これら平均値はt検定すると有意差なしとはいえない。これは、本実験と比較して、試験体の設計かぶり厚主筋径比が大きいため、主筋がCT10.2 (D6) の試験体は、その通常鉄筋D10のような母材割裂破壊が生じる前に、挿入されている鉄筋D6が引抜けたことが起因していると推測される。

3.2.3 CT有無 (本実験)

表4に、主筋にD10を用いている本実験の引き抜き試験体の最大付着応力度を示す。通常鉄筋D10の群は、1体が型枠脱型時にモルタルが欠けたためサンプル数は2である。表に示すように、各主筋の群の最大付着応力度は、最大値と最小値の範囲が重複していないため、ここでは、標本平均で検討する。

表4 CT有無と最大付着応力度 (本実験)

ID	主筋名称	最大付着応力度				c/d
		標本平均 (N/mm ²)	m/s (%)	最大値 (N/mm ²)	最小値 (N/mm ²)	
11*	通常鉄筋 D10	5.62	7.31	5.91	5.33	1.55
12	CT17.5(D10)	3.80	10.0	4.04	3.36	0.61
13	CT23.7(D10)	2.82	9.51	3.11	2.78	0.32

*サンプル数は2 最終破壊状況：全て母材割裂

同表より、最大付着応力度は、主筋が通常鉄筋D10、CT7.5 (D10)、CT23.7 (D10) の試験体の順に、低いことがわかる。これは、既往研究⁵⁾の通常鉄筋の引き抜き試験の結果と同様に、引張応力が作用するかぶり厚が影響していると考えられる。

4. 母材モルタルの曲げ試験体の実験結果・考察

4.1 最終破壊状況

母材モルタルの曲げ試験体の終破壊状況は、比較的設計かぶり厚主筋径比が大きく主筋がCT23.7 (D10) 及びCT10.2 (D6) [ID02B、22B、23B] の試験体は、それぞれともに、写真5 (a) に示すように、目視で曲げ圧壊と母材割裂ひび割れを確認できないため、また補強効果比が1.0を超えるため、推定でCT付着喪失(後述4.4.1、4.4.3参照)とした。これら試験体ともに、試験終了後のCTは、目視では変形を確認できない。他の試験体は、全て母材付着割裂[写真5 (b)]である。なお、全試験体共通して、荷重載荷点かつ最大曲げ荷重付近で、曲げひび割れを目視で観察することができた。

4.2 曲げモーメントと中央たわみの関係

図5に、母材モルタルの曲げ試験体中央の曲げモーメ

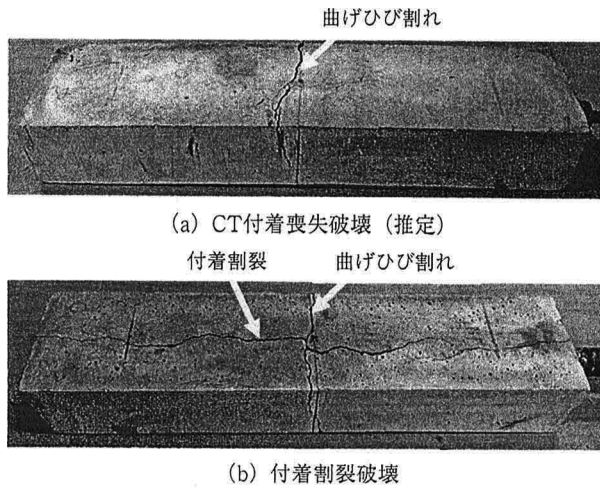


写真5 曲げ試験体の最終破壊状況の例

ント $[M]$ とたわみの関係の例を示す。縦軸は、次式で算出したモルタル単体の最大曲げ荷重時の曲げひび割れモーメント $[M_b]$ で除してある。

$$M_b = Z \cdot f_b, \quad Z = \frac{b \cdot h^2}{6} \quad (2)$$

ここに b : 曲げ試験体幅の実測値、 h : 曲げ試験体高の実測値、 f_b : 前掲表 1 (b) 示す母材モルタルの曲げ強度の標本平均

同図に示すように、曲げモーメントと中央たわみの関係は、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る。ここでは、その極大値を発生順に第 1, 2... n ピークと呼ぶ。発生回数 n は、同一条件下での試験体においても異なり、最大で第 3 ピークまで生じた。なお、第 1 ピークは、CT 有無に関係なく、モルタル単体のひび割れモーメント付近で生じている (後述 4.3 参照)。

4.3 第 1 次ピークのモルタルの曲げ応力度

図 6 に、母材モルタルの各曲げ試験体の第 1 ピーク時曲げ応力度を示す。縦軸は、このモルタル単体の曲げ強度の標本平均 $[m]$ と標本標準偏差 $[s]$ による標準得点 (z 値) である。なお、同一条件試験体群において、第 1 ピークの発生を確認できない試験体が存在するため、プ

ロット数が、設計サンプル数と一部異なる。第 1 ピーク時曲げ応力度 $[\sigma_{m1}]$ については、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。

$$\sigma_{m1} = \frac{M_{m1}}{Z}, \quad Z = \frac{b \cdot h^2}{6} \quad (3)$$

ここに M_{m1} : 1 次ピーク時の曲げモーメント

同図中の黒塗印で示す主筋が通常鉄筋 D25 の試験体を除くと、式 (3) で算出した第 1 ピーク時曲げ応力度の各 z 値は、各同一条件試験体群あわせて $m \pm s$ 及び $m \pm 2s$

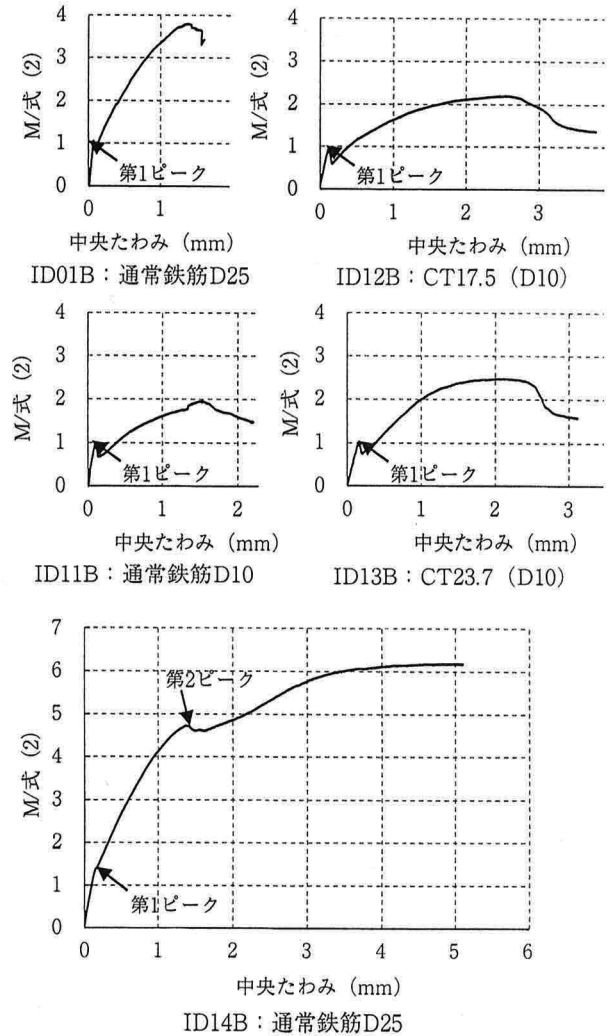


図5 曲げ荷重と中央たわみの関係の例

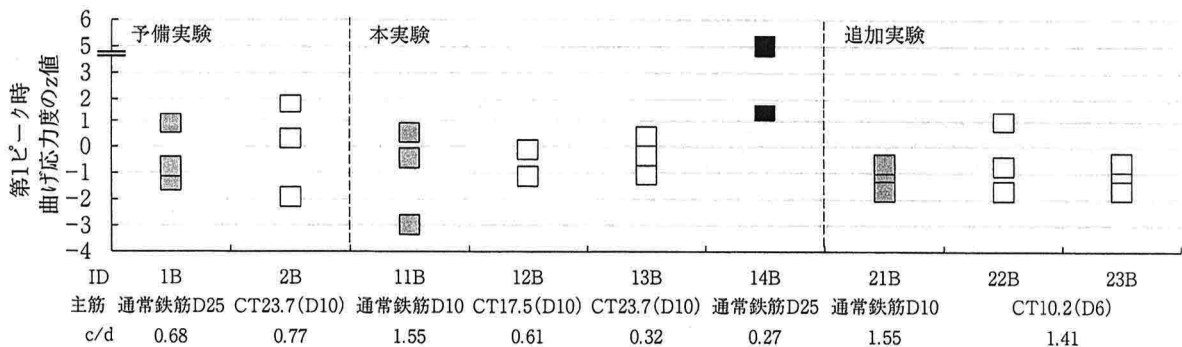


図6 第1ピーク時の曲げ応力度 (母材モルタルの曲げ試験体)

以内に存在する試験体の標本比率は、それぞれ 0.52 及び 0.96 である。主筋が通常鉄筋 D25 の試験体は、 z 値が $m + 3s$ 超に存在しているが、これはかぶり厚主筋径比が比較的小さいため、鉄筋の曲げ応力度が影響していると考えられる。なお、式(3)に鉄筋の曲げ応力度を加味した式(4)で算出した本実験の試験体の第1ピーク時曲げ応力度は、各 z 値ともに $m \pm 3s$ 以内に存在する。詳細は、既報²⁾を参照されたい。

$$\sigma_{ml} = \frac{M_{ml}}{Z - Z_s \left(1 + \frac{E_s \cdot D}{E_m \cdot h} \right)} \quad (4)$$

ここに Z_s : 鉄筋の断面係数、 E_s : 鉄筋のヤング係数 205 kN/mm²、 E_m : 母材モルタルの静弾性係数 (JIS A 1149:2017 に準拠して計測) D : 鉄筋公称径

以上のことから、主筋が鉄筋内蔵 CT の試験体は、通常鉄筋のそれと同様に、モルタルの曲げひび割れ発生時に、第1ピークが生じている可能性があると考えられる。なお、第1ピーク後の荷重劣化は、モルタルの曲げひび割れ発生で、曲げ引張力の鉄筋の負担が増え、圧縮縁から中立軸までの距離が小さくなることが起因していると考えられる。

4.4 補強効果比

4.4.1 設計かぶり厚主筋径比が同一

表5に、母材モルタルの設計かぶり厚主筋径比が比較的近い主筋が通常鉄筋と鉄筋内蔵 CT の曲げ試験体の実験結果を示す。表より、各実験群ともに、主筋が鉄筋内蔵 CT の補強効果比は、その通常鉄筋と比較して低いことがわかる。なお、これら平均値は t 検定すると有意差なしとはいえない。

同表に示す本実験の曲げ試験体の補強効果比と、前述 3.2.2 の引抜き試験体の最大付着応力度は、単純に照合すると、高低関係が成立していない。なお、各試験体ともに母材割裂破壊が生じている。これは、前述 4.3 を踏まえ、曲げ試験では、主筋である通常鉄筋 D25 は曲げ抵抗、C23.7 (D10) は引張抵抗しており、各母材割裂破壊時の応力分布が異なるためと推測される。

前段落の補強効果比と最大付着応力度の高低関係は、追加実験では成立している。これは、本実験と比較して、設計かぶり厚主筋径比が大きいため、主筋が CT10.2 (D6) の曲げ試験体は、その通常鉄筋 D10 のような母材割裂破壊をする前に、CT 付着喪失による破壊を生じたことが起因していると考えられる。

4.4.2 CT 有無 (本実験)

表6に、本実験の D10 を使用している曲げ試験体の実験結果を示す。全試験体ともに、終破壊状況は、母材割裂である。また、表に示す各群の補強効果比の平均値は、分散分析によると有意差ありとはいえない。

前述 3.2.3 より、母材割裂破壊した引抜き試験体の最大付着応力度は、かぶり厚主筋径比が小さいほど低い傾向がある。また、前述 3.1.2 において、断面寸法かつ使用鉄筋が同一の引抜き試験体は、必然的に主筋の CT 径が大きいほど、付着区間の表面積が大きいため、母材割裂破壊時の最大引抜き荷重が高くなりやすいと推測した。これらを踏まえると、断面寸法かつ使用鉄筋が同一の曲げ試験体は、主筋の CT 径が大きいほど、かぶり厚主筋径比が小さくなり付着割裂破壊時の付着応力度は低くなるが、付着区間の表面積が大きくなる。それゆえ同表に示す各試験体の補強筋効果比の差は表れにくいと考えられる。

4.4.3 グラウト注入方向 (追加実験)

表7に、主筋が C10.2 (D6) の曲げ試験体の実験結果を示す。グラウト材を水平方向に注入した曲げ試験体の補強効果比の標本平均は、その鉛直方向と同程度である。なお、これら平均値は t 検定すると有意差ありとはいえない。このことから、水平方向に注入したグラウトは、十分に充填されていると考えられる。

同表に示すように、各方向に注入されているグラウト材の圧縮強度の標本平均は差がある。なお、これら平均

表5 通常鉄筋と鉄筋内蔵 CT (母材モルタルの曲げ試験)

実験	ID	主筋名称	母材 曲げ強度 (N/mm ²)	補強効果比		c/d	最終破壊状況
				標本 平均	m/s (%)		
予備	01B	通常鉄筋 D25	5.52	3.76	0.97	0.68	母材割裂
	02B	CT23.7 (010)		2.08	8.39	0.77	CT 付着喪失*
本	14B	通常鉄筋 D25	5.98	4.85	6.99	0.27	母材割裂
	13B	CT23.7 (010)		2.38	8.53	0.32	母材割裂
追加	21B	通常鉄筋 D10	5.24	3.40	3.78	1.55	母材割裂
	22B	CT10.2 (D6)		2.22	4.29	1.41	CT 付着喪失*

*: 推定

表6 CT 有無 (母材モルタルの曲げ試験)

実験	ID	主筋名称	補強効果比				c/d
			標本平均	m/s (%)	最大値	最小値	
本	11B	通常鉄筋 D10	2.11	4.31	2.20	2.02	1.55
	12B	CT17.5(D10)	2.27	7.04	2.45	2.16	0.61
	13B	CT23.7(D10)	2.38	8.53	2.51	2.14	0.32

最終破壊状況: 全て母材割裂

表7 グラウト注入方向 (母材モルタルの曲げ試験)

実験	ID	グラウト 注入方向	グラウト材 圧縮強度 (N/mm ²)	補強効果比		最終破壊状況
				標本平均	m/s (%)	
追加	22B	鉛直	49.2	2.22	4.29	CT 付着喪失*
	23B	水平	39.9	2.20	4.95	CT 付着喪失*

*推定 主筋名称: CT10.2 (D6) c/d = 1.41

値はt検定すると有意差なしとはいえない。また、全試験体ともに、試験終了後の母材割裂及びCTの滑りを観察できていない。これらと、前段落の補強筋効果比に及ぼすグラウト注入方向の影響はないことを踏まえ、同表に示す試験体の終破壊状況をCT付着喪失と推定している。

5. 母材 POC の曲げ試験体の実験結果・考察

表8に、母材 POC の曲げ試験体の実験結果を示す。表中の第1ピーク時曲げ応力度は式(3)で算出している。なお、主筋がCT14.1(D10)の曲げ試験体は、母材モルタルと異なり、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(前掲4.2参照)が生じていない。このことからCT10.2(D6)の群の補強効果比を1.0としている。また、主筋がCT14.1(D10)の曲げ試験体は、試験終了後の母材割裂及びCTの変形を観察できていないため、終破壊状況をCT付着喪失と推定している。なお、主筋が通常鉄筋D10の試験体は、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る^{注2)}。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。

6. おわりに

本論で得られる知見を、次のように整理する。

- 1) 鉄筋内蔵CTと母材モルタルの付着応力伝達機構は、通常鉄筋のそれと同程度の可能性がある。
- 2) 鉄筋内蔵CTの母材モルタル割裂破壊時の付着応力度は、通常鉄筋のそれより高い。ただし、設計かぶり厚主筋径比が大きくなると、母材割裂破壊が生じる前に、CTに挿入されている鉄筋が引き抜けてしまい、鉄筋内蔵CTの最大付着応力度は、通常鉄筋のそれより低くなる。
- 3) 設計かぶり厚主筋径比が大きいほど、鉄筋内蔵CTの母材モルタル割裂破壊時の付着応力度は高くなる。
- 4) 母材モルタルの主筋が鉄筋内蔵CTの曲げ試験体の第1ピークは、その通常鉄筋と同様に、モルタルの曲げひび割れ発生時に生じている可能性がある。
- 5) 主筋が中央に配置されたモルタルの最大曲げモーメントに及ぼすCT有無及びCT径それぞれの影響は、同一寸法では表れにくい。
- 6) 本試験方法では、鉄筋内蔵CTとPOCの付着力は、喪失しやすい。

表8 母材 POC の曲げ試験

実験	ID	主筋名称	容積法空隙率 (%)	第1ピーク時曲げ応力度 (N/mm ²)	補強効果比	最終破壊状況
追加	31B	D10	25.4	3.51	1.83	母材割裂
			27.1	3.16	1.82	母材割裂
			27.4	3.03	1.92	母材割裂
追加	32B	CT14.1(D10)	24.0	2.87*	1.00	CT付着喪失**
			24.7	3.36*	1.00	CT付着喪失**
			27.7	3.35*	1.00	CT付着喪失**

*最大曲げ荷重到達時の曲げ応力度 **推定

注

- 1) 本稿の予備と本実験は、既報2)のデータである。本稿ではこれらと引き続き実施した追加実験のデータを併せて、再度、鉄筋内蔵CTの付着性能について検討している。
- 2) 母材 POC の各曲げ試験体は、空隙率が異なるため、補強効果比は、第1ピーク時の曲げモーメントに対する最大曲げモーメントとしている。なお、主筋がCT14.1(D10)及び通常鉄筋D10の試験体それぞれの式(3)による第1ピーク時曲げ応力度と無補強の試験体の曲げ強度は、平均値をt検定すると、ともに有意差ありとはいえない。

謝辞

本稿の研究成果は、公益財団法人内藤科学技術振興財団研究助成及び愛知工業大学研究特別助成の支援による。また本研究に取り組むにあたり、愛知工業大学の山田和夫教授、豊田工業高等専門学校の河野伊知郎教授、白田太講師にご指導いただいた。

参考文献

- 1) 畑中重光(編著):透水性コンクリート(POC)の基礎と実践、コンクリート新聞社、初版(2019)。
- 2) 山本貴正、大畑卓也、山田和夫:鉄筋を内蔵したコルゲートチューブとモルタルとの付着性能に関する基礎研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.41、No.2(2019)。
- 3) 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)。
- 4) 若林和義、鈴木敏夫、志村明春、鈴木澄江:引抜きによる鉄筋とコンクリートとの付着強度試験の供試体小形化に関する検討、コンクリート工学年次論文集、Vol.38、No.1、pp.387~392(2016)。
- 5) 神野晴夫、藤井 栄、森田司郎:割裂を伴う付着特性の寸法効果に関する研究、日本建築学会学術講演梗概集、構造II、pp.747~748(1986)。

受理日:令和3年6月4日