

論文 鉄筋が挿入されているコルゲートチューブとポーラスコンクリートとの付着性能について

山本 貴正*1・大畑 卓也*2

要旨: ポリプロピレン製のコルゲートチューブ(CT)内をグラウトし、そこに鉄筋を挿入した補強筋(鉄筋内蔵CT)とポーラスコンクリート(POC)との付着性能について、片側引抜き試験と単純梁方式の曲げ試験を通じて、また POC のプレキャスト化を目指し、鉄筋内蔵 CT を利用した継手部の曲げ性能について検討した。その結果、引抜き試験体の最大付着応力度は、容積法空隙率に関連せず、ばらつきやすい可能性があること、また継手を有する曲げ試験体は、無筋の試験体と比較して、最大曲げ荷重は大きいなどの知見を得た。

キーワード: 主筋, 片側引抜き試験, 単筋梁, 空隙率, 継手

1. はじめに

ポーラスコンクリート(POC)は、連続空隙による透水、保水、植生などの機能があり環境負荷低減、また豪雨対策などの防災に貢献しうる社会基盤材料として期待されている。なお、コンクリート特有の脆性破壊を防ぐため、POC に従来のコンクリートと同様に無塗装鉄筋による補強を施すと、連続空隙の存在で補強鉄筋が腐食してしまう。そこで、著者らは、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(以下、CT)に注目した。CT内をグラウトし、そこに鉄筋を挿入した補強筋(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、経済的にも優れた鉄筋の発錆抑制になると考えた¹⁾。

既報 2)において、鉄筋内蔵 CT と POC との付着性能について、実験的に検討した。その結果、片側引抜き試験を通じて、CT は比較的柔軟性が優れているため、延性的な破壊をする付着力低下が、脆性的な破壊をする付着割裂よりも先行すること、また中央集中荷重が作用する単純梁方式の曲げ試験(単純梁曲げ試験)を通じて、鉄筋内蔵 CT の補強効果により POC の最大曲げ荷重の向上が期待できること、さらに片側引抜き試験と同様に、付着力低下が生じやすいため延性的な破壊をしやすい、などの知見を得た。

上記を踏まえ、既報 2)に引き続き、本論では、追加実験として実施した鉄筋内蔵 CT で補強されている母材が POC の片側引抜き試験を通じて、鉄筋内蔵 CT と POC との付着性能について、また POC のプレキャスト化を目指し、鉄筋内蔵 CT を利用した継手部の曲げ性能について検討している。後述の継手部については、母材をモルタルとした予備実験を実施している。ここでは、明記しない限り、

統計学的な推定・検定の有意水準は 0.05 とする。

2. 実験計画とその概要

2.1 検討項目

既報 2)の調査空隙率(後掲式(1)参照)が 0~20%の鉄筋内蔵 CT で補強されている母材 POC の引抜き試験体と、この追加実験として作製した調査空隙率 25%の引抜き試験体の最大付着応力度と空隙率の関係を検討した。追加実験の試験体は、既報 2)の試験体と寸法かつ使用材料が同一である。POC の粗骨材を結合する材料(以下、結合材)の水セメント比(以下、W/C)は 35%である。なお、鉄筋内蔵 CT の付着力低下で決定した最大付着応力度は、鉄筋内蔵 CT 周辺に付着している POC の空隙率と関連している可能性があるため、全ての引抜き試験体を切断し、鉄筋内蔵 CT 周辺の POC の空隙率についても検討した。これら概要が表-1 に示してある。

鉄筋内蔵 CT で補強された母材が POC およびモルタルそれぞれの単純梁曲げ試験を実施し、これら曲げ性能に及ぼす鉄筋有無・継手有無の影響について検討した。表-2 にこれら概要を示す。母材が POC およびモルタルそ

表-1 片側引抜き試験関連の概要

	調査空隙率 (%)	結合材 W/C	同一条件の試験体数	切断後の試験体寸法(公称値)
追加実験	25	35%	6	40mm×40mm×150mm
既報2)	0, 10, 15, 20		4	(空隙率のみ計測)

表-2 単純梁曲げ試験関連の概要

母材	試験体寸法(公称値)	継手	鉄筋内蔵 CT	同一条件の試験体数
モルタル	100mm×39mm×400mm	あり	あり	3
POC	100mm×95mm×400mm	なし	あり, なし	

*1 愛知工業大学 工学部建築学科准教授 工博 (正会員)

*2 豊田工業高等専門学校 環境都市工学科講師 工博 (正会員)

それぞれの試験体は、既報 2) および 1) それぞれの試験体と寸法かつ使用材料が同一である。なお、参考のため、母材である POC とその標準円柱試験体の圧縮試験も併せて実施した。試験体寸法はφ100x200mm であり、材齢 1 日に脱型、その後、水中養生をした。

2.2 調合・使用材料

POC の調合設計は、式(1)を満たすようにした。

$$1.0 = P + V_G + V_B \quad (1)$$

ここに P : 調合空隙率 V_G, V_B : 骨材および結合材の容積率の調合値

結合材およびグラウト材の W/C はそれぞれ 35% および 47%、骨材の容積率の調合値は JIS A 1104 に準拠して計測した実積率とした。

鉄筋は異形鉄筋 D6 を、CT はポリプロピレン製のスリットなし(閉断面)の公称径 10.2mm(内径 7.4mm, ピッチ 2.7mm, 山幅 1.5mm, 谷幅 0.6mm, 厚さ 0.25mm)を使用した。モルタル、POC の結合材およびグラウト材ともに水は水道水、セメントは普通ポルトランドセメント(密度 3.15g/cm³, 比表面積 3250cm²/g)とした。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/cm³, 吸水率: 0.52%, 実積率: 57.8%), モルタルの細骨材は多治見市大畑町産の山砂(表乾密度 2.55g/cm³, 吸水率 1.78%, 実積率 65.3%)とした。混和剤は使用していない。

2.3 試験体作製

(1) 練混ぜおよび打ち込み

POC は、まず、結合材であるセメントペーストを先練りし、続いて骨材をミキサ内に投入して POC を練混ぜた。練混ぜは、容量 100l の二軸強制練ミキサを使用している。これら練混ぜ方法は、既報 2) と同一である。練混ぜた POC を、公称内径 100mm・公称高 200mm の円柱型枠に棒突き回数を 2 層 30 回で詰め込み標準円柱試験体を成形した。併せて、引抜きおよび曲げ用の試験体を、CT のみが配置された公称内寸 100mm×100mm×400mm の長方形型枠にて 2 層 50 回で詰め込み成形した。次に、それぞれ型枠の上面を揃うようにならし、続いて、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、標準円柱試験体は 15 秒間手動で、引抜きおよび曲げ用の試験体は、ともに締固め方向に 5.0mm 沈下するように施した。なお、先練りした結合材を、POC と同様に円柱型枠に詰め込み成形している。

各 CT は、POC 打設時に位置を確保するため、型枠板の側面に設けた CT 公称径の+2.0mm 寸法の開孔に通している。引抜き試験体は、両側面側に外径 12mm・肉厚 2mm のアクリル管を配置している。このアクリル管の箇所は、非付着区間となる³⁾。予備実験の母材モルタルの曲げ用

試験体は、容量 55.6l のモルタルミキサで練混ぜたモルタルを仕切り鋼板 22mm×100mm×400mm が長手方向中央に配置されている公称内寸 100mm×100mm×400mm の長方形型枠にて成形した。なお、公称高さは 39mm である。

(2) 鉄筋内蔵 CT を有する試験体(母材モルタル)

予備実験の継手ありの単純梁曲げ試験体は、図-1 に示すように、鉄筋無挿入の CT が配置されている長方形モルタルを、まず中央で切断し(切断後の試験体を、曲げ用試験片と呼ぶ)、次に、これら両片を接触させて、布テープを継手部周辺に 1.5 周で巻き、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 内に注入した。続いて、異形鉄筋 D6 を芯に挿入して作製した。なお、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。継手なしについては、これらと同様にグラウトした後、鉄筋を挿入して作製している。

(3) 鉄筋内蔵 CT を有する試験体(母材 POC)

長方形型枠で作製した引抜き用および継手ありの曲げ用の長方形 POC を、図-2(a) に示すように、中央で切

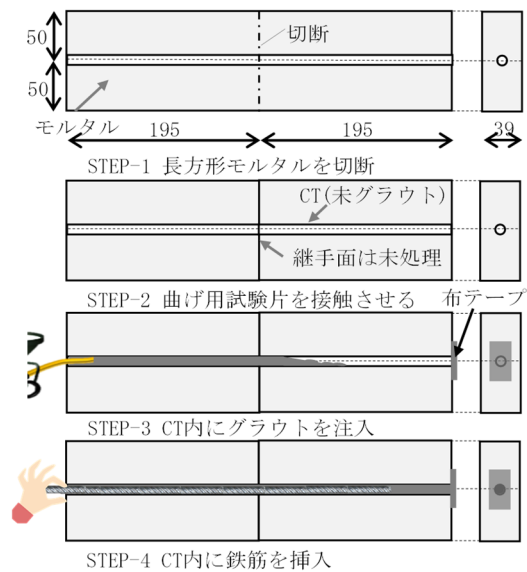
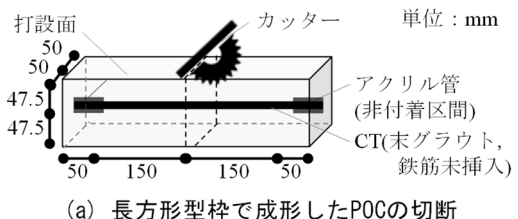
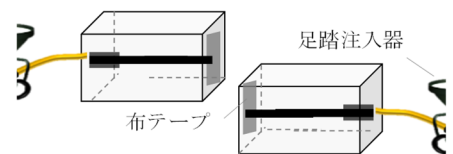


図-1 継手ありの曲げ試験体の作製(母材モルタル)



(a) 長方形型枠で成形した POC の切断



(b) 切断後に CT 内をグラウト(続いて、鉄筋挿入)

図-2 引抜き試験体の作製

断した。その後、各片を、図-2(b)および図-3 に示すように、また前項の予備実験と同様に、足踏注入器でグラウト材をCT内に注入し、続いて、異形鉄筋D6をその芯に挿入して作製した。継手なしの曲げ試験体は、これらと同様に、グラウトした後、鉄筋を挿入して作製している。なお、参考のため無筋のPOCも作製している。

(4) 引抜き試験体の切断

試験終了後の引抜き試験体を、図-4 に示すように、長手方向が付着長さかつ短手方向の鉄筋内蔵CTが中央に位置するようにコンクリートカッターで切断した。以後、切断後の試験体を付着区間試験片と呼ぶ。

2.4 試験方法

(1) 片側引抜き試験関連

JSTM C 2101:1992 に準拠して主に片側引抜き試験を実施し、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、図-5 に示すように荷重が均等に加わるよう、支点および荷重点と試験体の間に厚さ1.0mmのゴム板を挿入している。また計測用フレームを設置し、自由端すべり量を変位計で計測している(例えば、4)。追加実験の同一条件の試験体数は6である。

(2) 単純梁曲げ試験関連

母材モルタルおよび母材POCの曲げ試験は、それぞれ図-6(a)(b)に示すように実施した。母材モルタルは、既報1)と同様に中央に補強筋を配置した。母材POCは、鉄筋内蔵CTの補強効果を期待できる単筋梁とした²⁾。それぞれ計測用フレームを設置し、同図(a)(b)に示すように試験体のたわみを変位計で測定(例えば、4)、併せてクロスヘッド移動量を測定している。最大曲げ荷重到達までは変位計、それ以降は、最大曲げ荷重到達時の中央たわみとクロスヘッド移動量の増分の和を中央たわみとした。母材POCについては、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。なお、荷重が均等に伝わるように、支点および荷重点と試験体の間に厚さ1.0mmのゴム板を挿入している。同一条件の試験体数は3である。

POCと結合材の標準円柱試験体の圧縮強度をJIS A 1108に準拠して計測した。試験体の両端面には、アンボンドキャッピングを施している(例えば、5)。POCについては、静弾性係数をJIS A 1149に準拠して計測した。区間変位を測定するコンプレッソメータと試験体の接点に、厚さ0.3mmのアルミを3枚挿入している(例えば、6)。POCおよび結合材それぞれの試験体の標本数は7および3である。

(3) 空隙率試験

母材POCの試験体については、CT内に鉄筋を挿入する前に、JCI-SP02-1の容積法に準拠して空隙率試験を実施し、全空隙率(容積法空隙率)を計測した。なお、容積法空隙率は、鉄筋内蔵CTの箇所を控除して計測している。

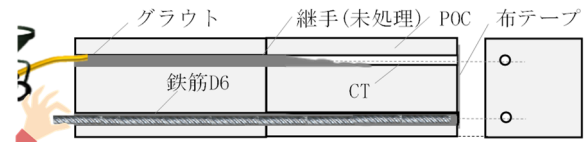


図-3 継手ありの曲げ試験体の作製(母材POC)

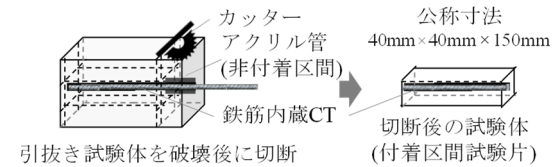


図-4 破壊後の引抜き試験体の切断

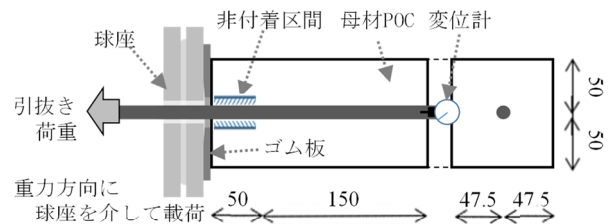
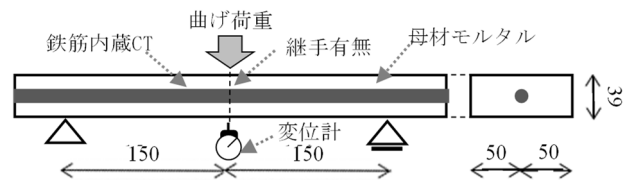
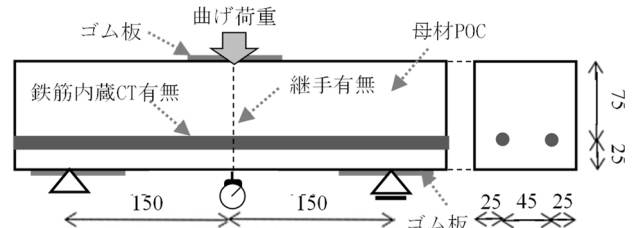


図-5 片側引抜き試験の方法(概略図)



(a) 母材モルタル



(b) 母材POC

図-6 単純梁曲げ試験の方法(概略図)

3. 実験結果・考察

3.1 片側引抜き試験

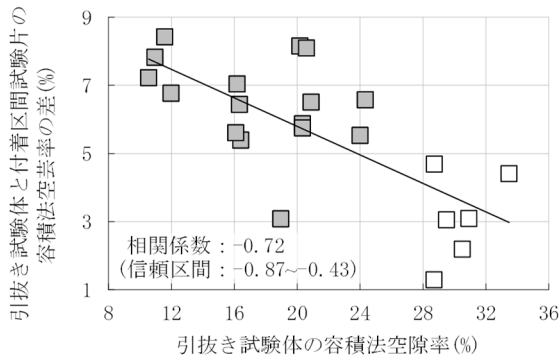
(1) 破壊状況

追加実験の引抜き試験体は、すべて既報2)の試験体と同様に、荷重端側の鉄筋内蔵CTが抜き出ていることを試験終了後に確認した。なお、荷重端および自由端ともに、グラウトの破壊を確認できていない。これらのことから、CTとPOCの界面付近の付着力低下で破壊が進行したと考えられる。そこで、既報2)と同様に、最大引抜き荷重時の最大付着応力度を次式で算出した。

$$\tau_{max} = \frac{P_{max}}{S} \quad (2)$$

ここに τ_{max} : 最大付着応力度 P_{max} : 最大引抜き荷重
 S : 表面積

表面積の算出において、鉄筋内蔵CTの周長は、CT公称径と円周率の積とした。



試験体 薄黒塗印：既報2) 白抜き印：追加実験

図-7 片側引抜き試験体の容積法空隙率

(2) 容積法空隙率

図-7に、前報2)および追加実験それぞれの引抜き試験体と付着区間試験片の容積法空隙率の差を併せて示す。

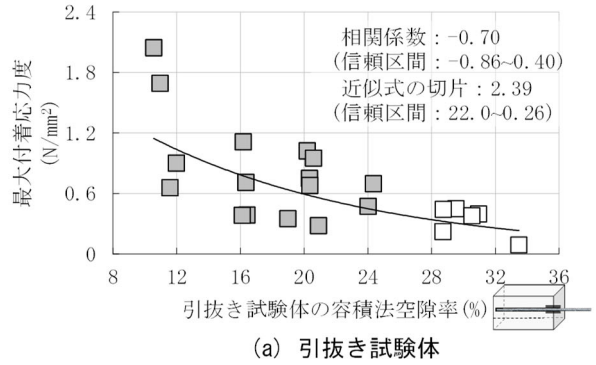
図の横軸は引抜き試験体の容積法空隙率である。図中にはこれら関係の相関係数が示してある。図中の実線は、全試験体を対象として最小二乗法により算出した線形近似線である。

同図に示すように、引抜き試験体と付着区間試験片の容積法空隙率の差と引抜き試験体の容積法空隙率は負の相関がある。また、全試験体ともに、縦軸の値は正であり、付着区間試験片の容積法空隙率は、引抜き試験体のそれより小さい。これは、容積法空隙率が小さいほど、膜厚が増加する骨材表面の結合材⁷⁾が、CTに付着したことが起因していると考えられるが、現状では言及できないため、今後の検討課題とする。

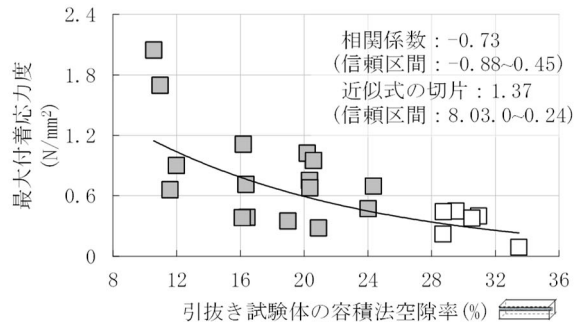
(3) 最大付着応力度と容積法空隙率

図-8(a)(b)に、既報2)と追加実験の試験体の最大付着応力度と引抜き試験体および付着区間試験片の容積法空隙率の関係をそれぞれ併せて示す。図中には、薄黒塗印で示す既報の試験体を対象として算出した最小二乗法による指数近似線と最大付着応力度の自然対数と各容積法空隙率の相関係数が示してある。なお、追加実験の試験体は、既報2)の試験体と作製方法は同一であるが、結合材の強度に差異が生じている可能性があるため、ここでは近似線と相関係数の算出において対象していない。

同図(a)(b)に示すように、既報の試験体の最大付着応力度の自然対数と引抜き試験体の容積法空隙率は、無相関であるが、その付着区間試験片とは負の相関がある。なお同図(a)(b)より、白抜印で示す追加実験の試験体においても各指数近似線付近に存在しているが、容積法空隙率に関連せず、最大付着応力度の観測値と近似値の相対誤差(標本平均0.077, 標本標準偏差0.57, 最大値1.44, 最小値-0.42)は比較的大きいことが見受けられる。これら相対誤差より、また前項3.1(2)を踏まえ、鉄筋内蔵CTとPOCの最大付着応力度は、CTとPOCの界面付近の空隙

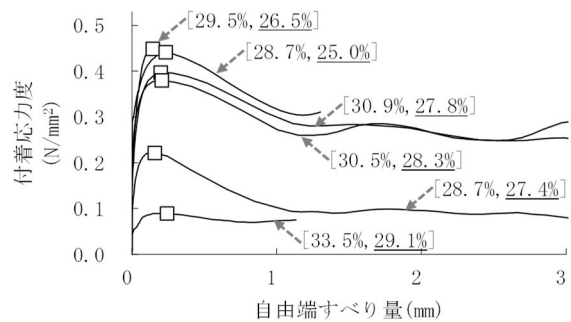


(a) 引抜き試験体



(b) 付着区間試験片

図-8 最大付着応力度



括弧内は容積法空隙率:[引抜き試験体, 付着区間試験片]

図-9 付着応力度と自由端すべり量

分布が影響していると考えられる。

(4) 付着応力度と自由端すべり量の関係

図-9に、引抜き試験体の付着応力度と自由端すべり量の関係を示す。付着応力度は、前項3.1(1)の破壊状況を踏まえ、引抜き荷重を付着区間の表面積で除して算出した。図中の括弧内は、引抜き試験体と付着区間試験片の容積法空隙率を表している。

同図より、最大付着応力度到達以降の付着応力度-自由端すべり量関係は、最大付着応力度かつ容積法空隙率に関連せず、延性的な挙動を示していることが見受けられる。これらについては、CTが比較的、材質の柔軟性に優れているため、CTの蛇腹状の凹凸部分でモルタルを押し開けようとする応力の放射方向の成分により生じるCT周辺の割り裂き応力が小さいためと考えられる²⁾。

3.2 曲げ試験(母材モルタル)

(1) 破壊状況

試験中の目視によると、鉄筋内蔵CTで補強されてい

る母材モルタルの曲げ試験体は、継手なしについては、最大曲げ荷重到達後に曲げ引張りひび割れを確認した。継手ありは、最大曲げ荷重到達後に曲げ引張り側の継手部の隙間が拡大した。なお、曲げ圧縮破壊かつ着割裂破壊を確認できないため、母材モルタルと CT の付着力低下で最大曲げ荷重が決定したと考えられる。

(2) 曲げ荷重—中央たわみ関係

図-10 に、鉄筋内蔵 CT で補強されている母材モルタルの曲げ試験体の曲げ荷重と中央たわみの関係を示す。図中の黒塗印および薄黒塗印はそれぞれ継手ありおよびなしの試験体の最大曲げ荷重を表している。

継手なしの群は、比較的小さい曲げ荷重および中央たわみにおいて、荷重が低下した後に再び上昇する現象が生じた。これは、モルタルの曲げ引張りひび割れ発生で、中央に配置されている鉄筋の曲げ引張力の負担が増え、中立軸長さが著しく小さくなるのが起因していると考えられる⁷⁾。一方、継手ありの群は、この現象が生じていない。これは、継手においてモルタルが曲げ引張力を負担しないため、曲げ荷重載荷時から鉄筋が曲げ引張力を負担しており、中立軸長さが著しく小さくならないことに起因していると推測される。

図中の黒塗印および薄黒塗印で示す継手ありとなしの群の最大曲げ荷重は、平均値および標準偏差ともに、有意差ありとは言えない。これらのことから、母材モルタルの曲げ試験体の最大曲げ荷重に及ぼす継手の影響はないと考えられる。

同図より、継手ありの群は、最大荷重到達後の挙動(曲げ靱性)が継手なしの群と比較して劣ることが見受けられる。上述より、これは継手ありの群は、そのなしと異なり、継手部の影響で、曲げ荷重載荷時から鉄筋が曲げ引張力を負担していたことが起因していると考えられる。

3.3 曲げ試験(母材 POC)・圧縮試験

(1) 母材の POC の圧縮試験結果

図-11 (a) (b) に、曲げ試験体の母材である POC の標準円柱試験体の圧縮強度および静弾性係数と容積法空隙率関係をそれぞれ示す。なお、標準円柱試験体の標本数は7であるが、内2体はコンプレッソメータの取り付けに不備があり、静弾性係数を計測できていない。図(a)中の実線は、空隙率ゼロの POC と仮定した結合材の標準円柱試験体を含み、最小二乗法で算出した指数近似線である。なお、結合材の圧縮強度の標本平均は 62.4N/mm²、標本変動係数は 0.080 である。図(a)中には、結合材を含む全試験体を対象とした圧縮強度の自然対数と容積法空隙率の相関係数が示してある。

同図(a)に示すように、POC の圧縮強度の自然対数と容積法空隙率は負の相関がある。一方、静弾性係数は、同図(b)より、容積法空隙率と関係がないように見受けられ

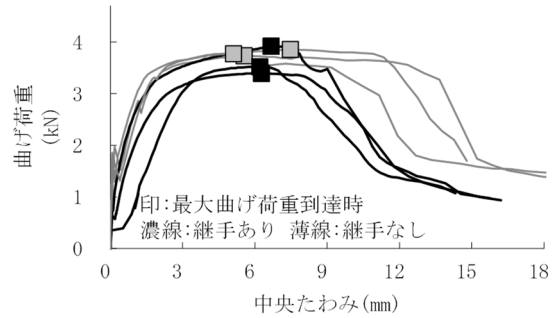
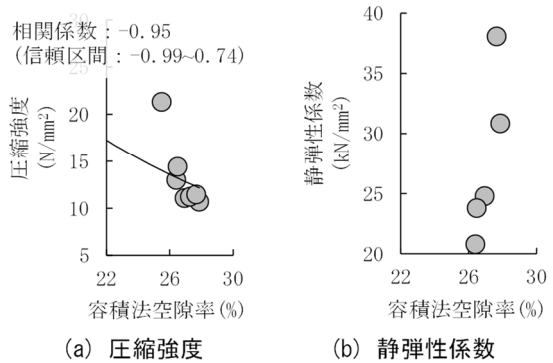


図-10 母材モルタルの曲げ荷重と中央たわみの関係



(a) 圧縮強度 (b) 静弾性係数

図-11 POCの圧縮試験結果



(a) 継手あり (b) 継手なし

写真-1 母材POCの最終破壊状況の例(曲げ引張側)

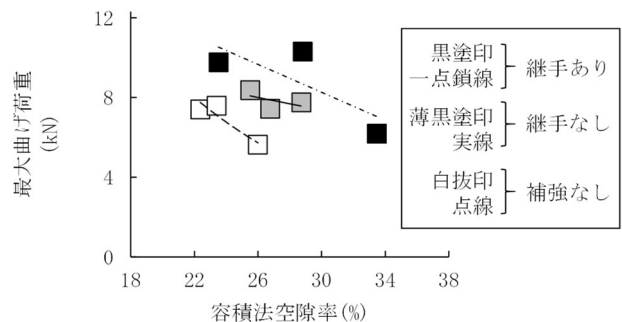


図-12 母材POCの最大曲げ荷重

る。後者については、各試験体の骨材の容積率が影響していると考えられる⁷⁾。

(2) 破壊状況

試験中の目視により、鉄筋内蔵 CT で補強されている母材 POC の曲げ試験体の破壊状況は、前述 3.2(1) 項の母材モルタルと同様であることを確認した。これにより母材 POC と CT の付着力低下で最大曲げ荷重が決定したと考えられる。なお、写真-1 (a) (b) に例として継手有無それぞれの試験体の最終破壊状況が示してある。

(3) 最大曲げ荷重

図-12に、母材 POC の曲げ試験体の最大曲げ荷重と容積法空隙率の関係に及ぼす鉄筋内蔵 CT による補強効果および継手有無の影響を示す。継手ありの群の容積法空隙率は、切断する前の長方形 POC の観測値である。これら因子群を対象として、最小二乗法により算出した線形近似線が図中に示してある。

同図より、鉄筋内蔵 CT で補強されている試験体は、無筋の試験体と比較して、最大曲げ荷重は大きいことが見受けられる。このことから、鉄筋内蔵 CT の補強効果により最大曲げ荷重の向上が期待できると考えられる。なお、継手ありの群の最大曲げ荷重は、そのなしと比較して大きいように見受けられるが、このことについては、試験体数が少ないため、実験データの蓄積が得られた後に検討する課題としたい。

(4) 曲げ荷重－中央たわみ関係

図-13は、前掲図-10の対象としている母材モルタルの曲げ試験体を、母材 POC のそれに置換している。同図より、各継手有無の群ともに、最大曲げ荷重到達後の挙動は、比較的延性的であることが見受けられる。これは、破壊状況(前項 3.3(2)参照)、また CT は比較的柔軟性が優れていること(前述 3.1(4)参照)より、延性的な破壊をする付着力低下が、脆性的な破壊をする付着割裂よりも先行したためと推測される。

4. おわりに

鉄筋内蔵 CT で補強されている母材が POC の試験体の付着性能と、鉄筋内蔵 CT を利用した継手部の曲げ性能について実験的に検討した。本論で得られた知見を、次のように整理する。

- 1) 最大付着応力度の観測値と近似値の相対誤差は、容積法空隙率に関連せず比較的大きい。これは、CT と POC の界面付近の空隙分布が影響していると考えられる。
- 2) 鉄筋内蔵 CT で補強されている母材 POC の継手ありの曲げ試験体は、最大曲げ荷重到達後に曲げ引張側の継手部の隙間が拡大した。なお、曲げ圧縮破壊かつ付着割裂破壊を確認できないため、CT と POC の付着力低下で最大曲げ荷重が決定したと考えられる。
- 3) 鉄筋内蔵 CT で補強されている母材 POC の継手ありの曲げ試験体は、無筋の試験体と比較して、最大曲げ荷重は大きい。

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金(基盤 C, 研究課題

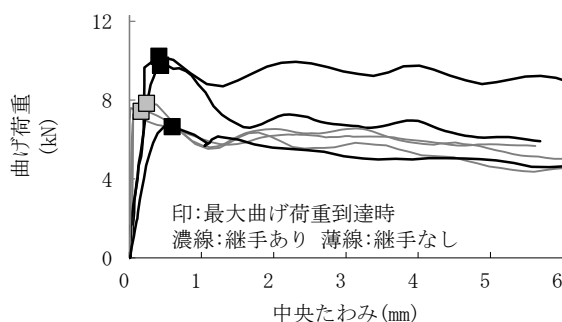


図-13 母材 POC の曲げ荷重と中央たわみの関係

番号 21K04343)の助成、愛知工業大学研究特別助成の支援による。また実験を遂行するにあたり、愛知工業大学工学部建築学科の加藤真輝さん、奈須田麻由さんの協力を得た。

参考文献

- 1) 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, pp. 1123-1128, 2018
- 2) 山本貴正, 大畑卓也, 白田太: コルゲートチューブとポーラスコンクリート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. 44, No. 2, pp. 661-666, 2022
- 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) 谷川恭雄(著者代表): 構造材料実験, 森北出版, 第3版, 2003.10
- 5) 武田昌也, 齋藤俊克, 出村克宣: ポーラスコンクリートの圧縮強度試験用供試体の載荷下端面へのアンボンドキャッピングの適用性の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 43, No. 1, pp. 1013-1018, 2021
- 6) 武田昌也, 齋藤俊克, 出村克宣: ポーラスコンクリートの静弾性係数推定式における高炉スラグ微粉末およびフライアッシュの混和剤係数の検討, セメント・コンクリート論文集, Vol. 75, pp. 195-201, 2021
- 7) 山本貴正, 大畑卓也, 河野伊知朗: 6号砕石を有するポーラスコンクリートの静弾性係数・圧縮強度と粗骨材の容積率の関係, コンクリート工学年次論文集, Vol. 42, No. 1, pp. 245-250, 2020
- 8) 吉田知弘, 国枝稔, 音野琢也: ポーラスコンクリートの空隙分布が曲げ強度に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 26, No. 1, pp. 1437-1442, 2004