3D コンクリートプリンティングにおける出力パラメータが鉄筋付着強度および積層界面付着強度に及ぼす影響

Influence of Printing Parameters on Rebar Bond Strength and Layer Interface Adhesion in 3D Concrete Printing

水田　武利*[1]，高岡　怜*[1]
TAKETOSHI MIZUTA, REI TAKAOKA

本報は，3D コンクリートプリンティング（3DCP）専用モルタル材料（PMO）を用いた部材における，鉄筋引抜き強度および積層界面付着強度を検討したものである。鉄筋引抜き試験では，D13，D16，D19 の鉄筋をフィラメントの積層方向に対して直角および平行に配置し，JSCE-G 503-2013 に準拠した引抜き試験を実施した。直角配置が最も高い付着強度を示し，層間打重ね時間の増加により強度が低下することが確認された。また，JSCE-K 561-2013 に準拠した積層界面付着強度試験を実施し，鉛直方向コアの付着強度が最も低く，積層面が力学的弱点となることが明らかとなった。

キーワード：3D コンクリートプリンティング，鉄筋引抜き強度，積層界面付着強度，出力方向

This study experimentally investigated the rebar bond strength and interlayer adhesion strength in members produced by 3D Concrete Printing (3DCP) using the proprietary printable mortar "PMO". Pullout tests conforming to JSCE-G 503-2013 were conducted on D13, D16, and D19 rebars embedded perpendicular and parallel to the printing direction. Specimens with rebars placed perpendicular to the printing direction exhibited the highest bond strength, which decreased with increasing layer deposition waiting time. Supplementary layer interface adhesion tests per JSCE-K 561-2013 confirmed that vertically drilled cores had the lowest adhesion, identifying the layer interface as a mechanical weak plane in 3DCP structures.

Keywords: 3D Concrete printing, Rebar bond strength, Interlayer adhesion, Printing direction

1. はじめに

近年，建設産業における労働力不足の深刻化および生産性向上の必要性を背景として，デジタルファブリケーション技術の一形態である 3D コンクリートプリンティング（以下，3DCP）が世界的に注目を集めている。3DCP は，コンピュータ制御されたガントリ型またはロボットアーム型の押出機構を用い，フレッシュモルタルを層状に積層造形する技術であり，型枠の省略による工期短縮，複雑な形状の容易な実現，および廃棄物低減による環境負荷軽減といった多くの利点を有する。

一方，橋梁や建築躯体など構造用途への 3DCP の実用展開においては，積層界面における力学的弱面の発生，材料の異方性，および鉄筋との付着性能の確保が技術的課題として挙げられている [1),2)]。特に，鉄筋を組み込んだ 3DCP 部材の引張・曲げ挙動を設計に反映するためには，鉄筋とモルタル間の付着強度を定量的に把握することが不可欠である。しかしながら，国内外において 3DCP 用材料に関する JIS・JSCE 規格は整備途上にあり [3)]，設計に供しうる実測データの蓄積が急務となっている。本報では，市販の 3D プリンタ用のモルタル（以下，PMO）を対象材料に実施した実験結果について報告する。PMO はスランプフロー，ポンプ圧送性，打重ね可能時間，および硬化後の強度発現性のバランスに優れた専用配合材料であり，国内における 3DCP 実証施工において実績を有する。著者らは，出力方向と層間打重ね時間の出力パラメータおよび鉄筋径が鉄筋付着強度に及ぼす影響を確認するために，JSCE-G 503-2013[4)]に準拠した鉄筋引抜き試験により定量的に評価した。さらに，引抜き試験の結

*[1] 土木事業本部土木技術部

果から，直角配置試験体の付着強度が層間打重ね時間に強く依存することが確認されたため，この現象の力学的背景を解明する目的で，JSCE-K 561-2013[5]に準拠した積層界面付着強度試験を実施した。本報では鉄筋引抜き試験と積層界面付着強度試験の実施概要，実験結果，および両者を統合した考察を報告する。

2. 鉄筋引抜き試験

(1) 使用材料

3DCP 用材料として PMO を使用した。PMO はセメント系プレミックス材料であり，水結合材比（W/B）は約 35%，最大骨材粒径は 2.5 mm である。ポンプ圧送および積層造形に適した特性を持ち，材齢 28 日の圧縮強度は 70 MPa級に達する高強度材料である。実施工で一般的なコンクリートとの性能差を把握するベンチマークとして，水セメント比 55%の普通コンクリート（以下，N コン）の試験体も作製した。

使用鉄筋は異形棒鋼 D13，D16，D19（SD345）であり，付着長は鉄筋径の 4 倍とした。PMO コア供試体（φ50 ×100 mm）の平均圧縮強度は 67.3 MPa（静弾性係数：26.6 GPa），普通コンクリート（φ100×200 mm）は 48.9 MPa（静弾性係数：35.5 GPa）であった（**表-1**）。なお，PMO は高強度であるものの，弾性係数は N コンより低い傾向を示しており，その要因として高充填材配合による骨材量および粗骨材剛性の相違が影響していると考えられる。

(2) 試験体

PMO 試験体の製造には，ガントリ型 3D プリンタ（ノズル口径：φ30 mm，積層高さ：12 mm，積層幅：40 mm）を使用した。鉄筋の配置方向は，ノズルの出力進行方向（**図-1**）に対して直角方向（以下，直角）と平行方向（以下，平行）の 2 種類を設定した。鉄筋は試験体断面の高さ方向および幅方向の中央に配置した。試験体は高さの約半分まで3Dプリンタにより積層した時点で鉄筋を設置し，その後さらに積層することで鉄筋を埋設した。また，試験体はノズルの連続的な出力を確保するため，3 体分を横並びにして一体で積層造形した。各試験体の境界部にはフレッシュ状態でアクリル板を挿入し，個別の供試体に分離した。なお，供試体寸法は JSCE-G 503-2013[4]に準拠している。

出力面積が大きい場合は次の層を出力するまでに一定の時間が空くため，層間打重ね時間として 0 分，5 分，10 分の 3 水準を設けた。0 分は積層直後に次の層を出力する打重ね時間 0 分を示す条件であり，5 分，10 分は次の層を出力するまでに時間を空け，5 分，10 分の打重ね時間を反映させた条件である。試験体はすべて温度 20℃，相対湿度 60%の養生とし，材齢 28 日に試験を実施した。試験体

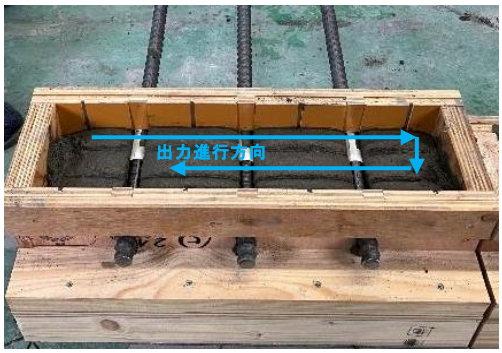


図-1 ノズルの出力進行方向



写真-1 試験体外観（3DCP プリント）

表-1 使用材料の特性

材料特性	PMO（3DCP）	普通コンクリート（N コン）
圧縮強度 (MPa)	67.3	48.9
静弾性係数 (GPa)	26.6	35.5
供試体寸法	φ50×100 mm	φ100×200 mm
水結合材比 W/B	約 35%	約 55%

表-2 鉄筋引抜き試験体一覧

試験体名	層間打重ね時間	試験条件	鉄筋径
D16_Ncon	—	普通コンクリート	D16
D16_Base	—	3DCP 基準	D16
D16_直角_0 分	0 分	直角	D16
D16_直角_5 分	5 分	直角	D16
D16_直角_10 分	10 分	直角	D16
D16_平行_0 分	0 分	平行	D16
D16_平行_5 分	5 分	平行	D16
D16_平行_10 分	10 分	平行	D16
D13_直角_0 分	0 分	直角	D13
D19_直角_0 分	0 分	直角	D19

の種類および数量を**表-2** に，試験体外観を**写真-1** に示す。なお，D16_Base は PMO 材料を 3D プリンタによる積層造形ではなく，型枠内に打ち込み成形した基準試験体であり，積層界面の影響を受けない条件として設定した。

(3) 試験方法

引抜き試験は JSCE-G 503-2013[4]に準拠し実施した。試験体を専用架台に固定し，鉄筋端部に油圧ジャッキを用いて単調引張載荷を行った。荷重はロードセルにより計測し，鉄筋の引抜き変位量は高感度変位計により測定した。なお，付着強度は式(1)により算出した。

$$\tau(\mathrm{MPa}) = \frac{P}{(\pi \times d \times l)} \quad (1)$$

P : すべり量が 0.002d に達したときの引張荷重(N)，d : 鉄筋径(mm)，l : 付着長(mm)

荷重載荷速度は 0.2 kN/s とし，出力方向の影響，鉄筋径の影響，層間打重ね時間の影響を観察した。各条件につき 3 体の試験体を用い，荷重の平均値から付着強度を算出した。試験装置の設置状況を**写真-2** に示す。

(4) 試験結果

a) 出力方向の影響

打重ね時間 0 分の D16 試験体の付着強度を出力方向別に比較した結果を**図-2** に示す。D16_Base（2.31 MPa）に対し，直角配置（D16_直角_0 分 : 3.17 MPa）が最も高い付着強度を示し，平行配置（D16_平行_0 分 : 2.83 MPa）がこれに続いた。鉄筋に引抜き力が作用すると，節（リブ）の支圧により鉄筋軸に対して放射状の圧縮力が生じ，これと直交する円周（フープ）方向に引張力が発生する。本試験で観察された破壊モードは全供試体とも鉄筋の引抜けであり，かぶりコンクリートの割裂破壊は認められなかった。すなわち，かぶりおよび拘束によって割裂には至らなかったものの，積層界面の存在は付着強度（引抜き耐力）の低下として現れたと考えられる。直角配置では積層界面が鉄筋軸と直交するため，円周方向引張力が積層界面に沿って作用し，界面が相対的に弱面となりやすい。実際に，付着強度が層間打重ね時間の影響を強く受けたこと（2.(4) c)参照）は，積層界面の品質が円周方向引張力に対する抵抗性を左右することを示唆している。一方，平行配置では積層界面が鉄筋軸方向と平行に形成されるため，円周方向引張力に対する積層界面の影響が相対的に小さく，打重ね時間による変化も表れにくかったと考えられる。

b) 鉄筋径の影響

鉄筋径が付着強度に及ぼす影響を**図-3** に示す（いずれも直角配置・打重ね時間 0 分）。D13 は 1.86 MPa，D16 は 3.17 MPa，D19 は 2.76 MPa であった。D16 が最大値を示したのに対し，D13 は鉄筋径および節高さが小さいため，1 層あたりの積層厚（12 mm）に対して節が相対的に浅く，モルタルが節間に十分に充填されにくかった可能性がある。その結果，節による機械的かみ合わせおよび拘束効果が十分に発揮されず，付着強度が低下した一因になったと推察される。D19 では，太径鉄筋の周囲の充填が不均一となりやすく，施工上の空隙形成が付着強度の低下に寄与したと考えられる。



写真-2 引抜き試験実施状況

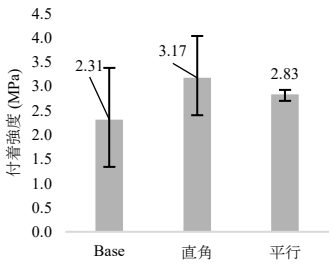


図-2 出力方向の影響（D16）

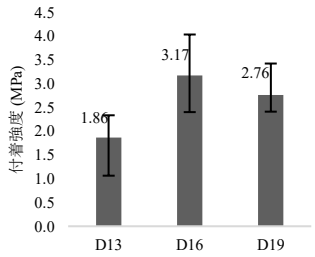


図-3 鉄筋径の影響

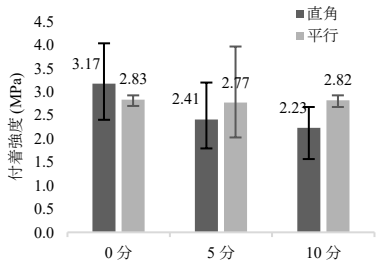


図-4 層間打重ね時間の影響（D16）

c) 層間打重ね時間の影響

層間打重ね時間が付着強度に及ぼす影響を**図-4** に示す。直角配置では打重ね時間の増加に伴い付着強度が明確に低下した（0 分：3.17 MPa，5 分：2.41 MPa，10 分：2.23 MPa)。打重ね時間の延長により積層界面での表面乾燥・先行硬化が進行し，次の積層材料との一体性が阻害されたことが主因と推察される。この現象は積層界面の品質が鉄筋付着に直接影響することを示す重要な知見であり，施工時における層間打重ね時間の管理が付着性能確保において極めて重要であることを示唆する。

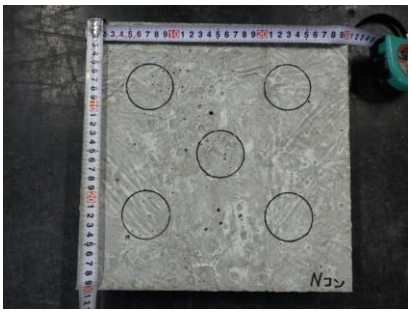
一方，平行配置では層間打重ね時間による有意な変化は認められなかった（0 分：2.83 MPa，5 分：2.77 MPa，10 分：2.82 MPa)。これは，平行配置では積層界面が鉄筋軸方向と平行に形成されるため，鉄筋引抜き時に発生する円周方向引張力に対する積層界面の影響が相対的に小さく，界面品質の変化が付着強度に及ぼす影響が限定的であったためと解釈できる。以上の結果から，直角配置は高い付着強度を発揮する一方で層間打重ね時間の影響を受けやすく，施工計画においては配置方向によらない施工条件の統一と打重ね時間の短縮が重要な管理事項であるといえる。

3. 積層界面付着強度試験

2 章の鉄筋引抜き試験において，直角配置の付着強度は層間打重ね時間に対して顕著な依存性を示す一方，平行配置ではその依存性が認められなかった。この配置方向による依存性の違いは，積層界面と鉄筋の相対位置関係が鉄筋付着特性に影響を及ぼすことを示唆している。そこで，積層界面の付着特性を直接かつ定量的に評価するため，JSCE-K 561-2013（コンクリート構造物用断面修復材の試験方法）[5]に準拠した積層界面付着強度試験を実施した。本試験では，コアの削孔方向を変化させることで，積層界面を横断する方向と並行する方向の付着強さの相違を把握することを目的とした。

(1) 試験体

PMO を用いた 3DCP 部材から，電動コアドリル（φ50 mm）を用いてコアを採取し，切削整形後にφ50 mm，深さ 40 mm の円柱試験体を作製した（**写真-3**)。コア削孔方向として，**図-5** に示すように出力進行方向，側面方向，および鉛直方向の 3 種類を設定した。鉛直方向削孔コアは積層界面を直交方向に横断するものであり，



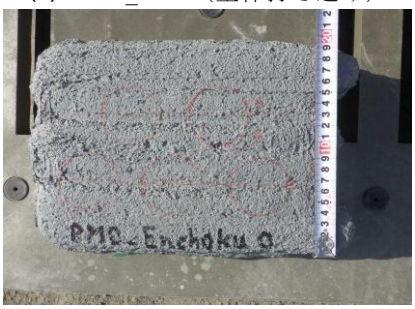
(a) N コン（基準コンクリート）



(b) PMO_Base（型枠打ち込み）

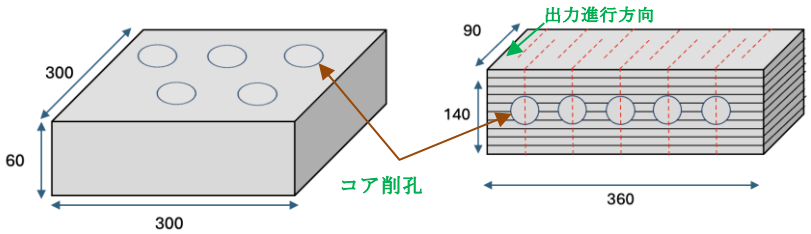


(c) PMO_Sokumen（側面方向削孔）

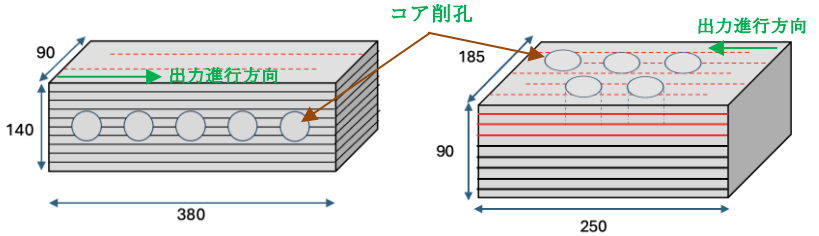


(d) PMO_Enchoku（鉛直方向削孔）

写真-3 積層界面付着強度試験 試験体



(a) N コン（基準コンクリート） (b) PMO_Insatsu（出力進行方向削孔）



(c) PMO_Sokumen（側面方向削孔） (d) PMO_Enchoku（鉛直方向削孔）

図-5 各供試体コア削孔概要



写真-4　コア削孔状況

表-3　積層界面付着強度試験体一覧

試験体名	コア削孔方向	打重ね時間
N コン	基準	—
PMO_Base	型枠打ち込み	—
PMO_Insatsu	出力方向	—
PMO_Sokumen	側面方向	—
PMO_Enchoku_0	鉛直方向 （積層直交）	0 分
PMO_Enchoku_5	鉛直方向 （積層直交）	5 分
PMO_Enchoku_10	鉛直方向 （積層直交）	10 分



写真-5　付着強度試験実施状況

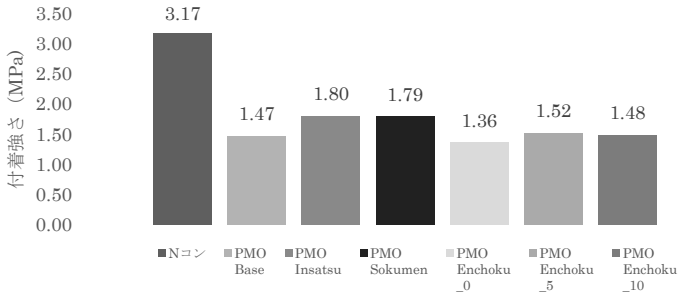


図-6　積層界面付着強度試験結果

積層面の影響が最も直接的に現れると想定した。比較対象として N コンおよび PMO 材料を型枠内に打ち込み成形した基準試験体 PMO_Base を作製した。

PMO_Enchoku については，鉄筋引抜き試験と同様に層間打重ね時間 0 分，5 分，10 分の 3 水準を**図-5(d)**内の赤線で示した積層界面に設けた。各試験体の詳細を**表-3** に示す。全試験体とも材齢 28 日における試験を原則とし，試験体数は各条件 5 体とした。

(2) 試験方法

コア削孔および試験の実施状況を**写真-4**，**写真-5** に示す。試験方法は JSCE-K 561-2013[5]に準拠した引張付着試験とした。コア上面をサンドブラスト処理後，接着剤を用いて鋼製ディスク（φ50 mm）を貼付し，24 時間養生後に引張試験機を用いて鉛直方向に引張荷重を載荷した。付着強さ（MPa）は最大荷重を載荷面積（φ50 mm 円面積）で除して算出した。

各試験体につき 5 点を計測した後，最大・最小を除く 3 点の平均値を代表値とした。破壊モードとして，界面破壊，材料内部の破壊，および接着剤層の破壊を記録し，実際の界面付着強さを適切に評価した。接着剤層での破壊が生じた場合は測定値を無効として除外し，再試験を実施した。

(3) 試験結果

各試験体の付着強さの試験結果を**図-6** に示す。基準となる N コンの付着強さは 3.17 MPa であった。PMO_Base は 1.47 MPa であり，PMO 材料自体の付着強さが普通コンクリートの約 46%に留まることが確認された。これは PMO 材料の高い圧縮強度（67.3 MPa）にもかかわらず，高充填材組成が引張付着強さの発現に不利に作用した結果と推察される。

PMO_Insatsu および PMO_Sokumen はそれぞれ 1.80 MPa，1.79 MPa を示し，PMO_Base より高い値となった。これは，型枠内への打込み成形がノズルからの押出し（積層造形）に比べて締固めが十分に得られず，母材内部に空隙が相対的に多く残存したことで，母材自体の付着強さが低下した可能性がある。一方，PMO_Insatsu および PMO_Sokumen では，削孔・載荷方向が水平な積層界面をほとんど横断しないため，実質的に積層界面を含ま

ない締固めの良好な母材内部の付着強さを計測したことで，相対的に高い値を示したと考えられる。積層面を直交方向に横断する PMO_Enchoku では，打重ね時間によらず 1.36～1.52 MPa の範囲にとどまり，全試験体中最も低い値を示した。打重ね時間による単調な傾向は認められなかったことから，本試験の範囲では打重ね時間の長短よりも「積層界面を横断すること自体」が付着強さの下限値を規定する支配的な因子であることが示唆された。

4. 考察

本報の実験を総合すると，PMO を用いた 3DCP 部材の付着特性は主として 2 つの要因によって規定される。第一は PMO 材料固有の付着強さであり，3DCP 用材料の高強度・低水結合材比という特性が，積層界面の有無によらず引張付着強さの発現に不利に作用したものと考えられる。

第二は積層界面の存在とその方向性であり，積層界面は局所的な力学的弱面として機能する。この傾向は鉄筋引抜き試験の結果と整合し，直角配置では鉄筋が複数の積層界面を横断するため打重ね時間の影響を強く受けた一方，平行配置では鉄筋軸が積層面と並行するためその影響が小さかった。

以上より，3DCP 構造部材の設計・施工では積層界面の管理が不可欠である。今後は，材料固有の付着強さ低下分と積層界面弱化分を安全側に見込んだ低減係数の設定と，配置方向・施工管理水準に応じた付着強度設計値の策定が課題である。

5. まとめ

本研究で得られた主な知見を以下に示す。

① 鉄筋引抜き試験では，ノズル進行方向に対して鉄筋を直角配置した試験体（D16，0 分）が 3.17 MPa と最も高い付着強度を示したが，いずれも N コンより低かった。鉄筋径では D16 が最大で，大径（D19）は充填不均一による低下が認められた。

② 直角配置では層間打重ね時間の増加に伴い付着強度が顕著に低下した（0 分：3.17 MPa，10 分：2.23 MPa，30 %低下）が，平行配置では有意な変化は認められなかった。

③ 積層界面付着強度試験において，鉛直方向コア（PMO_Enchoku）が最も低い付着強さ（1.36～1.52 MPa）を示し，積層界面が力学的弱面となることが定量的に確認された。

④ PMO_Base（1.47 MPa）は N コン（3.17 MPa）の約 46 %であり，高充填材組成に起因する材料固有の付着強さの低さが確認された。

⑤ 鉄筋引抜き試験（2 章）と積層界面付着強度試験（3 章）の結果は整合しており，3DCP 構造部材の設計では PMO 材料の固有強度，積層界面の方向性，および層間打重ね時間を統合的に考慮した設計値の設定が必要である。

今後は，試験体数の増加による統計的信頼性の向上，出力ノズル径・積層厚・出力速度など追加パラメータの影響評価，および長期耐久性（乾燥収縮，凍結融解，中性化）の検討が課題であり，これらの知見の蓄積が 3DCP 工法の国内設計標準の整備に向けた基礎資料となることが期待される。

謝辞：本研究の遂行にあたり，試験体の作製，鉄筋引抜き試験および積層界面付着強度試験の実施，ならびにデータ解析において多大なご協力をいただいたガルグ・ラフル氏に，ここに記して深く感謝の意を表する。

参考文献

1) Gebhard L., Esposito L., Menna C., Mata-Falcon J.: Inter-laboratory study on the influence of 3D concrete printing set-ups on the bond behaviour of various reinforcements, Cement and Concrete Composites, Vol.133, 104660, 2022
2) Marchment T., Sanjayan J.: Bond properties of reinforcing bar penetrations in 3D concrete printing, Automation in Construction, Vol.120, 103394, 2020
3) 土木学会：コンクリートライブラリー168 建設用 3D プリント埋設型枠を用いたコンクリート構造物の技術指針（案），2025.7

4) 土木学会：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（JSCE-G 503-2013），2013
5) 土木学会：コンクリート構造物用断面修復材の試験方法（案）（JSCE-K 561-2013），2013