

論文 建設用 3D プリンタで製造したプレキャストブロックの大型土木構造物への適用

北村 勇斗^{*1}・石関 嘉一^{*2}・藤村 博^{*3}・浜地 克也^{*4}

要旨：筆者らは、3D プリンタで製造した外殻の内部に超高強度繊維補強コンクリートを打ち込むことで構造物を構築する工法を開発し、ベンチや建築物を構築できることを確認した。本工法の大型土木工事における有用性を確認する目的で、3D プリンタで製作した外殻を用いてプレキャストブロックの製造を行い、海岸構造物に適用した。その結果、本工法を用いてプレキャストブロックを製造することで、鉄筋工の省略や、施工条件に合わせた形状合理化による建設現場の工程短縮や省力化の実現が可能となることを確認した。

キーワード：3D プリンタ, 超高強度繊維補強コンクリート, 生産性向上, プレキャスト, 突堤, 圧送

1. はじめに

近年、コンクリート工事の生産性向上を目的として建設用 3D プリンタ（以下、3DP）が注目されている¹⁾²⁾。3DP 用モルタル（以下、3DP モルタル）は、一般的に引張強度が低い³⁾ため、単独で構造物として用いることができない。筆者らは、3DP モルタルをプリントして製作した外殻に常温硬化型超高強度繊維補強コンクリート（以下、常温硬化型 UFC）を打ち込む工法を開発している。常温硬化型 UFC は高い引張強度や曲げ強度に加え、引張靱性も有するため、単独で構造物として使用できる。また、既存の UFC は蒸気養生を行うことが標準であるが、常温硬化型 UFC は、常温で硬化するため、蒸気養生が不要である。これまで、本工法によりベンチ³⁾や建築物⁴⁾を構築できることを確認してきた。しかし、実際の大型土木工事における生産性向上効果を確認できていない。

そこで、3DP を用いて、プレキャストブロック（以下、ブロック）の製造を実施し、大型海岸構造物の施工（写真-1）に適用した。その結果、本工法を用いることで、ブロック製作時の鉄筋工が省略できること、施工条件に合わせたブロックの形状合理化により、建設現場の工程短縮や省力化が実現できることを確認した。

2. 適用した構造物の概要

2.1 対象構造物

本稿で対象となるのは突堤構築工事（施工場所：神奈川県）⁵⁾である。完成図を図-1 に示す。突堤とは、海岸と直交方向に沖合に向けて設けられる堤防状の構造物であり、工事では全長 41.83m、幅 16.36m の突堤を構築した。鋼管矢板による仮締切り後、仮締切り内部を掘削し、

先端摺り付け部ブロック等の数種類のブロックを設置した。ブロックの空洞部及び側部、底部に水中不分離性コンクリートを打ち込むことで、突堤を構築した。

今回、先端摺り付け部ブロックを 3DP で製作した。当初のブロック形状を図-2 に示す。当初のブロックは、左右対称で片側計 26 枚のプレキャストパネル（鉄筋コンクリート製・厚さ 300mm）を陸上で PC 鋼棒にて連結し、大型ブロックとして、海中に 3 分割で設置する計画であった。

2.2 施工上の課題

(1) 工程短縮

施工現場は外海工事であることから、高波浪時にはブロックをはじめ、資機材を全て高台に退避させる必要が

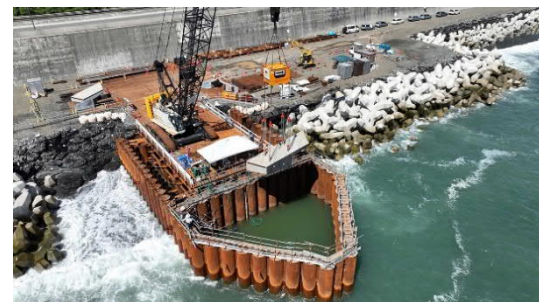


写真-1 大型海岸構造物の施工状況

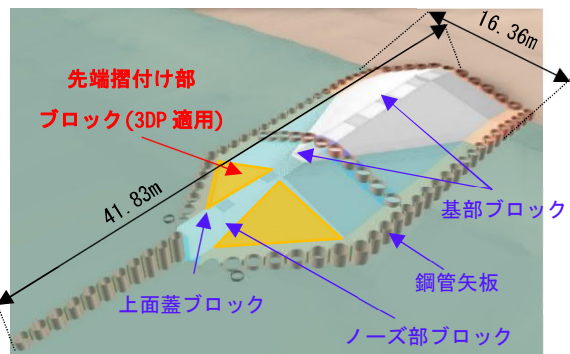


図-1 突堤完成図

*1 株式会社大林組 技術研究所生産技術研究部 修士（工）（正会員）

*2 株式会社大林組 技術研究所生産技術研究部 主席技師 博士（工）（正会員）

*3 株式会社大林組 東京本店西湘海岸突堤工事事務所 所長（非会員）

*4 株式会社大林組 土木本部生産技術本部設計第三部 上級主席技師 修士（工）（非会員）

あった。退避により工程が延伸するおそれがあり、搬入から組立・設置までの工程を短縮する必要があった。

(2)安全性向上

PC 鋼棒で連結したパネルを安全に揚重するためには、1 つのパネルあたり 2 点で吊る必要がある。この場合、例えば、12 枚のパネルを連結している図-2 に示すブロック③では、24 本の玉掛けワイヤーが必要となる。ブロックの設置は、潜水士が目視で位置を確認しながら作業するため、玉掛けワイヤーと潜水士が使用する送気ホースが絡まることが懸念された。また、ブロックの設置は見通しの悪い水中作業となるため、隣接するブロックと衝突するリスクが高い。最大約 35t の重量物であるため、隣接ブロックとの衝突による損傷が懸念された。

3. 事前検討

3.1 ブロックの形状

2.2 で示した課題解決のため、ブロックの形状を検討した。変更後の形状を図-3 に示す。分割数を 26 分割から 3 分割に削減することで、現場での連結作業や組立時間を省略した。また、1 ブロック当たりの玉掛けワイヤーが最大 4 本となり、水中での作業の安全性も向上した。

また、ブロックの内側部分を空洞化し、ブロック設置後に、水中不分離性コンクリートを空洞部に打ち込むこととした。さらに、ブロック設置用架台を高くし、ブロックの高さを 600mm 低減すると共に、現場打ちの水中不分離コンクリートに置換した。これらにより、ブロック自体の重量を軽量化した。ブロックの体積および重量の比較を表-1 に示す。当初設計では最大重量 35.5t であったブロックが約 1/2 の 17.6t まで軽量化し、衝突時のエネルギー低下により、損傷リスクを低減した。

3.2 3DP の適用

変更後のブロックは鋼製型枠では製造が困難な 3 次元的に変化する複雑な形状であったため、3DP でブロックの外殻を製作した。また、張出部（水中不分離性コンクリートに置き換えたことによって、部材厚が薄くなった部分）は、部材厚が薄く配筋作業が困難であったため、内部に常温硬化型 UFC を打ち込む複合構造とした。

3.3 3DP モルタルの耐摩耗性

ブロックは長期間の波浪、砂礫が打ち付けられることによる摩耗損傷が懸念されており、当初は設計基準強度 55N/mm² の高強度コンクリートを使用することが規定されていた。3DP モルタルの耐摩耗性は未確認であったため、スチールロッド式摩耗試験装置を用いて、3DP モルタルの摩耗試験⁶⁾を実施した。本試験は、回転するドラムの外周内面に供試体（135mm×150mm×300mm、摩耗面の面積 367.5cm²）を配置し、スチールロッド（Φ19×40mm×25 個、総質量約 2.2kg）を入れた状態で、流

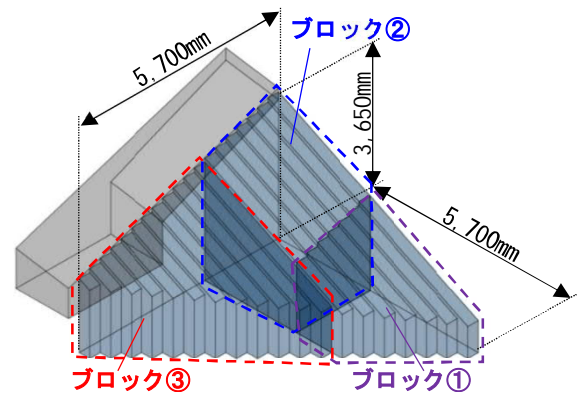


図-2 変更前の先端摺付け部ブロック概要

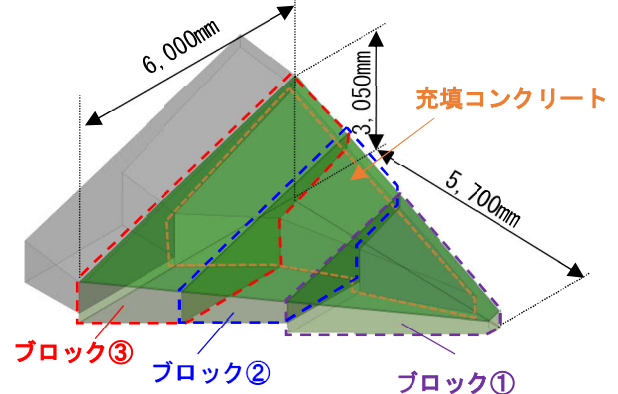


図-3 変更後の先端摺付け部ブロック概要図

表-1 先端摺付け部の重量の比較

種類	体積 (m ³)		重量 (t)	
	変更前	変更後	変更前	変更後
ブロック①	6.9	3.5	16.8	8.5
ブロック②	14.5	4.7	35.5	11.4
ブロック③	13.5	7.2	33.1	17.6
合計	34.9	15.3	85.5	37.6

水 0.5m³/h を流しながらドラムを毎分 50 回転させ供試体の摩耗面に衝撃作用を与え、単位摩耗量（単位面積あたりの摩耗容積）を求めるものである。試験では、1, 3, 5, 7, 10 時間後の単位摩耗量を測定した。供試体は、3DP モルタルを鋼製型枠に打ち込むことで製作した。3DP モルタルは既往の実験²⁾と同様のものを使用した。配合を表-2 に示す。3DP モルタルは、ポルトランドセメント、硬化促進剤、チキソ性調整剤、有機繊維をあらかじめ混合したプレミックス粉体と凝結遅延剤で構成されている。凝結遅延剤の添加量は P×0.20% とした。また、比較用に普通コンクリート（水セメント比 70.0%，空気量 4.5%，単位セメント量 234kg/m³，単位細骨材量 862kg/m³，単位粗骨材量 1039kg/m³）と高強度コンクリート（水セメント比 37.5%，空気量 4.5%，単位セメント量 467kg/m³，単位細骨材量 794kg/m³，単位粗骨材量 886kg/m³）についても供試体を作製した。試験体は、翌日脱型後、摩耗試験日

まで標準水中養生とした。摩耗試験日の圧縮強度（JISA 1108, 供試体数3本）は3DPモルタルで61N/mm², 普通コンクリートで31N/mm², 高強度コンクリートで78N/mm²であった。

図-4に摩耗試験結果を示す。なお、普通コンクリートと高強度コンクリートの試験結果より、単位摩耗量は圧縮強度に比例すると仮定して、圧縮強度55N/mm²の高強度コンクリートの単位摩耗量を推定した。また、常温硬化型UFCの試験結果⁶⁾も併せて示す。試験10時間後の3DPモルタルの単位摩耗量は、圧縮強度55N/mm²の高強度コンクリートの単位摩耗量（推定）の95%であり、高強度コンクリートと同等以上の耐摩耗性を有することを確認した。また、3DPモルタルの内側には、高強度コンクリートより耐摩耗性に優れた常温硬化型UFCが打ち込まれるため、3DPモルタルが消失した場合の耐摩耗性は高強度コンクリートに比べて著しく高いと考えられる。

3.4 ブロックの構造

張出部は上載荷重により曲げ破壊しないように、常温硬化型UFCの必要断面を部材計算により確認する必要がある。検討断面を図-5に示す。検討断面は、安全側とするため、張出部の長さが最も長い断面（ブロック③の陸側端部）とした。計算モデルは、図-6に示すように片持ち梁とし、上載荷重 $Q=5.00\text{kN/m}^2$, 自重 $W=10.80\text{kN/m}^2$ が作用するとした。ここで、安全側とするため傾斜角度はないものとしてモデル化した。また、上載荷重 Q は、施工時の作業員による荷重（群集荷重）として等分布荷重が作用した時を想定して設定し、自重 W は、常温硬化型UFCの単位体積重量 $\gamma=25.3\text{kN/m}^3$ と張出部の平均の部材厚さ 0.427m の積から算出した。この時、ひび割れが発生しないとして、弾性で考えると、固定端に生じる引張応力度 σ_t は以下式より算出できる。

$$\sigma_t = \frac{M}{Z} = \frac{(W+Q)BL^2}{2Z} \quad (1)$$

M : 固定端における曲げモーメント (N・mm)

Z : 固定端における部材の断面係数 (mm³)

W : 自重 (N/mm²)

Q : 上載荷重 (N/mm²)

B : 固定端における部材幅 (mm)

L : 片持ち梁の長さ (mm)

ここで、既往の研究⁷⁾では、3DP製の外殻に常温硬化型UFCを打ち込み製作した複合供試体に対して、3点曲げ試験を実施し、終局時まで3DPモルタルと常温硬化型UFCが一体となって荷重に抵抗することが確認されている。したがって、圧縮側（梁下側）の3DPモルタルを有効断面とみなした。3DPモルタルは引張強度が低いいため、引張側（梁上側）の3DPモルタルを無視すると、

表-2 3DPモルタルの配合

W/P (%)	単位量 (kg/m ³)		
	水	プレミックス	凝結遅延剤*
16.8	267	1590	3.18

※ 凝結遅延剤の添加率は適宜調整する

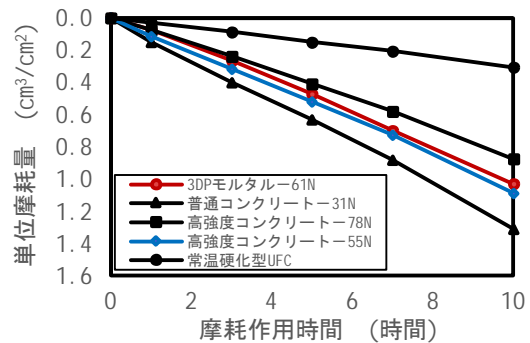


図-4 摩耗試験結果

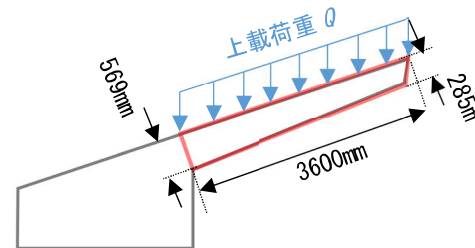


図-5 部材計算の検討断面

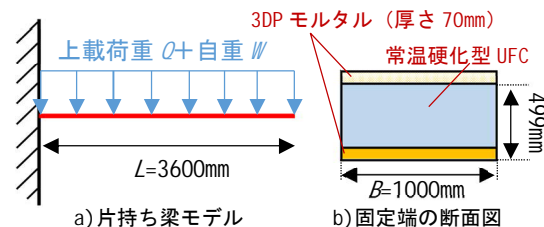


図-6 部材計算モデル

3DPモルタルの厚さ70mmのとき、 $Z=0.0415\text{m}^3$ である。式(1)より、 $\sigma_t=2.5\text{N/mm}^2$ であり、 σ_t は常温硬化型UFCのひび割れ発生強度の特性値⁸⁾ 8.0N/mm^2 の31%と十分に小さく、鉄筋を配置しない断面設計が成立した。これにより、鉄筋の配置を省略できた。

4. ブロックの施工

4.1 使用材料

(1) 3DPモルタル

3DPモルタルは表-2に示す配合とした。凝結遅延剤を $P \times 0.20\%$ 添加したときの凝結試験 (JISA 1147) の結果は、始発時間54分、終結時間57分であり、一般的なコンクリートに比べて凝結時間が非常に短く、高温時には水和反応が活性化され凝結時間が更に短くなる。また、有機繊維の添加量は少量であり、引張特性への影響はほとんどない。

(2) 常温硬化型 UFC

常温硬化型 UFC の配合を表-3に示す。常温硬化型 UFC は、土木学会の「超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)9」に準拠したセメント系複合材料であり、プレミックス粉体、細骨材、水、高性能減水剤、および鋼繊維で構成されている。鋼繊維は直径 0.16mm、長さ 13mm の形状のものを使用した。なお、常温硬化型 UFC は、上記指針の標準材料が加熱養生を必要とするのに対して、常温で硬化する点が異なる。

4.2 ブロックの製造・設置

(1) 外殻の製造方法

外殻製造状況を写真-2に示す。3DP は、コンクリート基礎に産業用ロボットアーム(6軸型)を取り付けた構成である。圧送配管は、モルタルポンプに内径1インチのマテリアルホースを取り付け、先端にノズルを設置した。圧送距離は15mである。ポンプで圧送した3DPモルタルをノズルから吐出することでプリントした。積層厚さは5mmとし、隣接するブロック同士の接触する面が、地面と水平となる向きでプリントした。打継部を設けながら、数日に分けて、1つの外殻を製造した。外殻の製造はプレキャスト工場の建屋内で行った。製造後は、屋外に移動し、直射日光を避けて保管、空気層を有するポリエチレンシートで封緘養生した。なお、外殻製造時に実施した品質管理試験に関しては4.3で示す。

(2) 常温硬化型 UFC の打込み

外殻製造後、常温硬化型 UFC の打込みを行った。常温硬化型 UFC は、工場内に設置したモバイルプラントを用いて製造した。練上がり後の常温硬化型 UFC をホップに投入し、クレーンにより打込み場所まで運搬した。打込み状況を写真-3に示す。打込み完了後は、打込み天端面を養生し、出荷まで屋外で保管した。製造時には、モルタルフロー(JIS R 5201, 0打)、空気量(JISA 1128)、モルタル温度(JISA 1156)の計測を行うとともに、硬化物性として圧縮強度試験(試験体数3本)と曲げ強度試験(JISA 1106, 試験体数4本)を実施した。モルタルフロー、空気量、モルタル温度の品質管理基準はそれぞれ $260 \pm 30\text{mm}$ 、3.5%以下、 10°C 以上であり、試験値はいずれも品質管理基準を満足する結果であった。圧縮強度は品質管理基準強度 180N/mm^2 以上を満足しており、曲げ強度は特性値 25.1N/mm^2 ⁸⁾以上であった。常温硬化型 UFC のフレッシュ性状および硬化性状は良好であった。

(3) ブロックの設置

養生後、ブロックは現場に搬入し、クローラークレーンにより設置した。ブロックの設置状況を写真-4に示す。組立作業が不要となり、現場作業の省力化を実現した。

4.3 3DP モルタルの試験項目

3DP モルタルは、プリント開始前に、練上がり直後と

表-3 常温硬化型 UFC の配合

W/P (%)	単用量 (kg/m ³)				鋼繊維 (kg/m ³)
	水	プレミックス	細骨材	高性能減水剤*	
12.6	230	1830	330	18.8	157

※ 高性能減水剤の添加率は適宜調整する



写真-2 外殻のプリント

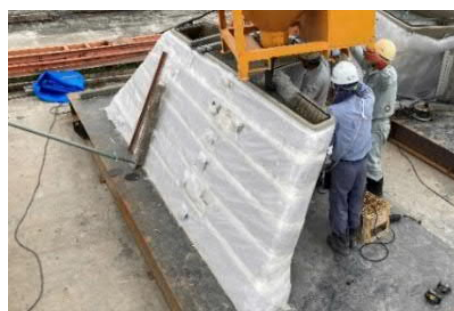


写真-3 常温硬化型 UFC の打込み



写真-4 設置

圧送後の試料を用いてモルタルフロー(15打)、モルタル温度を試験した。また、プリント開始前にノズル先端からのモルタルの吐出量と吐出量計測時のポンプ圧力を確認した。さらに、硬化物性として練上がり直後および圧送後の試料を採取し、圧縮強度の確認を行った。

(1) モルタルフロー

モルタルフロー試験機が施工地点に設置されていないため、スランブ試験(JISA 1150)用の平板上で試験した。15打フローの計測は、平板上にモルタルフロー試験用の突き棒を15回自由落下させることにより計測した。自由落下は、試料を中心とした半径100mmの円周上に、等間隔で80mmの高さから突き棒を5回落下させることを3回繰り返した。3DPモルタルの15打フロー

の経時変化を両試験方法で比較した結果、JIS 試験法で 159mm, 144mm, 127mm, 119mm のとき、簡易試験法では、161mm, 145mm, 129mm, 120mm であった。両試験値の違いは最大で 1.4% であった。今回使用したモルタル材料で、上記のフローレベルあれば、簡易試験法は概ね JIS 試験法の傾向と一致していた。

15 打フローの目標値を、120mm 以上かつ 160mm 以下、モルタル温度はそれぞれ 10℃ 以上とした。室内試験における事前検討より、JIS 試験法による試験値が 120mm 以上であれば閉塞を生じず圧送でき、160mm 以下であれば、吐出後もモルタルの形状が保持されることを確認しているため、上記を目標値とした。ただし、プリント形状やプリント速度より、モルタルに求められる性状は異なると考えられるため、今後の実験により、上記基準は最適化される必要がある。試験結果を図-7 に示す。15 打フローは目標値の範囲であったが、試験値の標準偏差は、練上がり直後で 7.54、圧送後で 8.53 であり、ばらつきが見られた。図-8 に練上がり直後のモルタル温度と 15 打フローの関係を示す。モルタル温度は 16.3~26.7℃ の間にあり、モルタル温度が高いほど 15 打フローが小さくなる傾向が見られた。練上がり時のモルタル温度が高くなる理由として、製造場所の温度や使用粉体の温度が高いことが挙げられる。製造場所の温度 (15.8~40.0℃) や使用粉体の温度 (17.5~24.9℃) の違いが、初期の水和性状に影響を及ぼし、練上がり直後の 15 打フローにばらつきが生じたと考えられる。なお、試験が簡易的な方法であったこともフローにばらつきが生じた理由として考えられる。また、練上がり直後と圧送後の 15 打フローの比較を図-9 に示す。図中の直線は原点を通過する近似直線であり、傾きが 1.00 であった。圧送によるフローの一方向的減少や増加は確認できず、圧送後もフレッシュ性状は良好であった。なお、モルタル温度も全ての試験で基準を満足した。以上より、製造場所の温度や材料温度の影響を受けるものの、練上がり直後や圧送後のフレッシュ性状は目標値の範囲となることを確認した。

(2) ポンプ圧力

ポンプ圧力は、ポンプ吐出口に設置した圧力計で計測した。吐出量は、30 秒間にノズル先端から吐出されたモルタルの重量から算出した。計測回数は 3 回とし、その平均を試験値とした。ポンプ圧力と吐出量の関係を図-10 に示す。吐出量とポンプ圧力の関係には相関が見られ、吐出量が多いほどポンプ圧力は大きくなった。ただし、吐出量とポンプ圧力の関係の決定係数の値は 0.4426 であり、吐出量とポンプ圧力の関係式を算出するまでには至らなかった。フローや製造場所の温度のばらつきがポンプ圧力と吐出量の関係に影響を及ぼしたと考えられる。ここで、圧送前の 15 打フローの大きさ (140mm 以下、

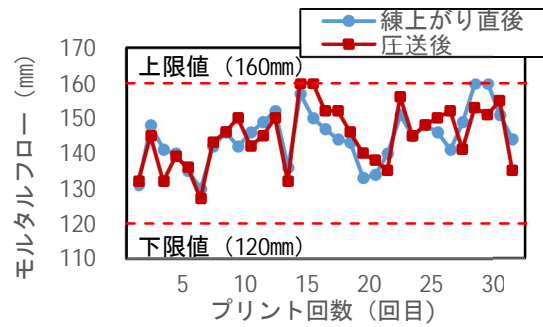


図-7 15 打フロー

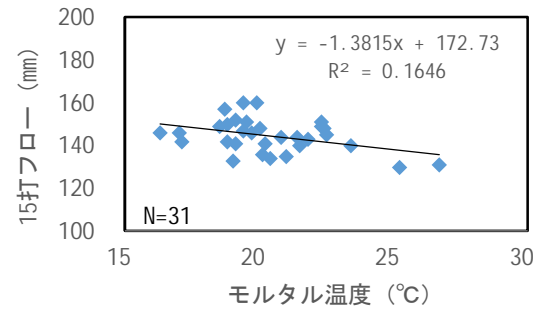


図-8 練上がり直後の温度と 15 打フローの関係

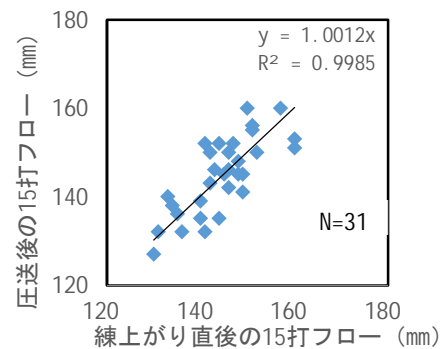


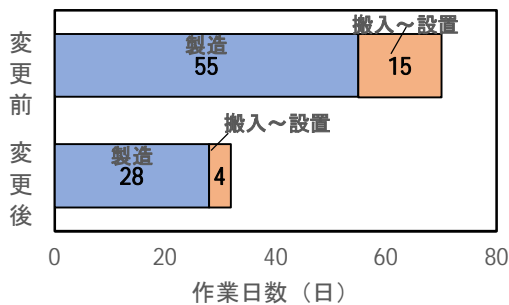
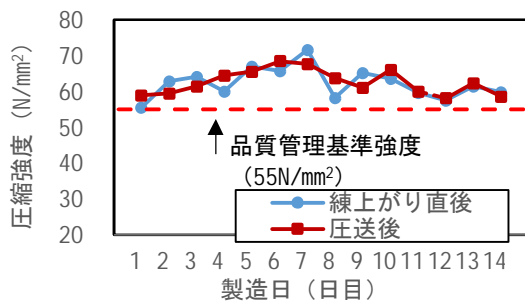
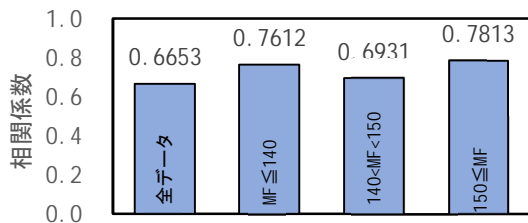
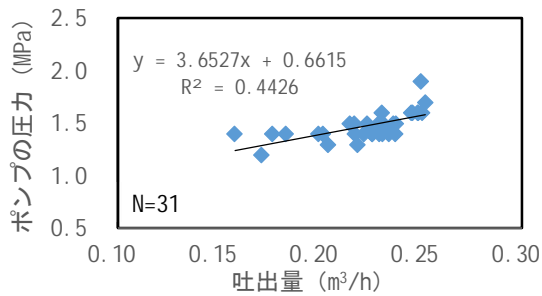
図-9 圧送前後の 15 打フローの比較

140mm より大きく 150mm より小さい、150mm 以上) によってデータを分類し、各データの吐出量とポンプ圧力の相関係数を求めた。結果を図-11 に示す。フローによってデータを分類することで、相関係数が大きな値となった。今後、フローや製造場所の温度をパラメータとした圧送試験を実施することで、より正確な吐出量とポンプ圧力の関係式を得る必要がある。なお、製造全体を通してポンプ圧力を確認 (5 分間隔で圧力計を目視確認) したが、最大 1.9MPa であり、ホースの耐圧 (3.0MPa) の 63% 以下の圧力となり、閉塞等も生じなかった。

(3) 圧縮強度

圧縮強度試験体は、直径 50mm × 高さ 100mm のモールドで採取し、材齢 28 日まで標準水中養生した。試験は製造日毎に行い、1 回の試験体数は 3 本とした。図-12 に圧縮強度試験結果を示す。すべての施工において、品質管理基準 (55N/mm²) を満足することを確認した。

以上より、工場内の温度が一定でないことで、練上がり直後のフレッシュ性状や圧送性状に若干の影響はある



ものの、目標値の範囲であり、硬化性状も良好であった。

4.4 工法比較

ブロック製造から設置までの作業日数の比較を図-13に示す。当初計画では、ブロックの型枠組立から打込み完了まで55日(養生抜き)で行う予定であった。一方で、3DPでは、外殻の製造14日、常温硬化型UFCの打込み8日、その他準備作業等6日の計28日(養生抜き)で行った。計画との比較ではあるが、製造に要する日数を50%程度まで短縮した。また、当初は搬入から設置まで15日を要する計画であった。3DPを活用することで搬入1日、設置3日の計4日に短縮できた。また、現場でのブロックの組立作業が不要となったことで、作業人数は延べ96人から28人へと削減でき、約71%の省力化を実現した。

以上より、3DPを活用することで、ブロックの製造と設置作業の工程短縮・省力化が可能であることを確認した。

4. まとめ

今回、3DPを活用してプレキャストブロックを製造し、大型土木工事に適用した。以下に得られた知見を示す。

- (1) 3DPを活用しブロックの形状を合理化することで、建設現場の工程短縮や省力化を実現した。
- (2) 3DPモルタルは高強度コンクリートと同程度の耐摩耗性を有することを確認した。
- (3) 常温硬化型UFCにより、3次的に複雑な形状の外殻への鉄筋の配置を省略できた。
- (4) 従来の型枠工法より短期間でブロックを製造することが可能であった。

参考文献

- 1) 北村勇斗, 石関嘉一, 武田篤史, 坂上肇, 荒木昭俊, 沼崎孝義: 3Dプリンタおよび吹付ロボットで製造したRC構造の荷重実験, 第76回土木学会年次学術講演会講演概要集, 第5部門, V-487, 2021
- 2) 北村勇斗, 石関嘉一, 高橋俊樹, 西村俊亮: 3Dプリンタとロボットを用いたPCaケーソン基礎の自動化製造に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, No.1, pp.1636~1641, 2023
- 3) 中村允哉, 坂上肇, 穴吹拓也, 石関嘉一: 3Dプリンティングと常温硬化型超高強度繊維補強コンクリートによる複合構造体の試験施工に関する報告, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.1, pp.1882-1887, 2020
- 4) 坂上肇, 大川悠奈, 北村勇斗, 木村達治, 鈴木貴博, 山形龍一: 建設用3Dプリンターにより建設した建築物「3dpod™」の設計と施工, 大林組技術研究所報, No.87, 2023
- 5) 国土交通省関東地方整備局: 西湘海岸直轄海岸保全施設整備事業, https://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000783275.pdf (閲覧日: 2024年1月4日)
- 6) 石関嘉一, 相良光利, 玉滝浩司, 西平宣嗣: 常温硬化型UFCを用いた耐摩耗部材の開発, コンクリート工学, Vol.51, No.11, pp.890~897, 2013
- 7) 坂上肇, 中村允哉, 穴吹拓也, 金子智弥, 松永成雄, 福見祐司: 建設用3Dプリンターにより製造したシェル型ベンチの設計と施工, 大林組技術研究所報, No.84, 2020
- 8) 土木学会: 超高強度繊維補強コンクリート「スリムクリート」に関する技術評価報告書, 技術推進ライブラリーNo.10, 2012
- 9) 土木学会: 超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案), 2004