

4. 3D プリンタにより製作した埋設型枠を用いた プレキャスト部材の適用事例の報告

株式会社大林組 ○吉村 瑞貴 西村 俊亮 小俣 光弘
北村 勇斗 宮入 斎
日本ヒューム株式会社 田口 拓望

1. はじめに

建設業では就労者数の減少に伴い、生産性向上が喫緊の課題となっている。その解決策の1つとしてコンクリート構造物のプレキャスト(以下、PCa)化が挙げられる。PCa工法は、鋼製の型枠を繰り返し使用することで同一部材を効率的に製造できるという特長がある。一方で形状が特殊な部位については型枠の持ち合わせがないため、PCa化には鋼製型枠の検討・製作から行う必要があり、コストおよび納期の面で課題がある。その解決方法の1つとして、3Dプリンタを用いて製作した埋設型枠(以下、3DP埋設型枠)を使用することが有効と考えられている。本稿では、L型擁壁の隅角部に3DP埋設型枠を用いたPCa化を適用した事例について、検討、製作、施工およびそれらの評価をとりまとめる。

2. 現場の条件

対象構造物は、国土交通省中部地方整備局発注の新丸山ダム本体建設工事の仮設備におけるL型擁壁である。図-1に示すようにL型擁壁を配置し、周囲より4m程高い地盤面を造成する。直線区間である標準部は既製品のPCa擁壁(H=4.5m)を設置する。一方、3か所のコーナー部については既製品がないため当初現場打設で計画を進めていたが、現場工程の短縮および効率化を目的に、標準外であるコーナー部に対応したPCa部材の製作の検討を行うこととした。新たに鋼製型枠を製作すると納期に余裕がなかったため、3DP埋設型枠の適用を決定した。

3. 製作方法の検討²⁾

図-2に3DP埋設型枠によるPCa化の検討フローを示す。

3.1 条件整理

現場の施工効率が最も高いのは、対象物を分割することなくPCa化することである。しかしその場合、重量・寸法が大きく運搬できない、

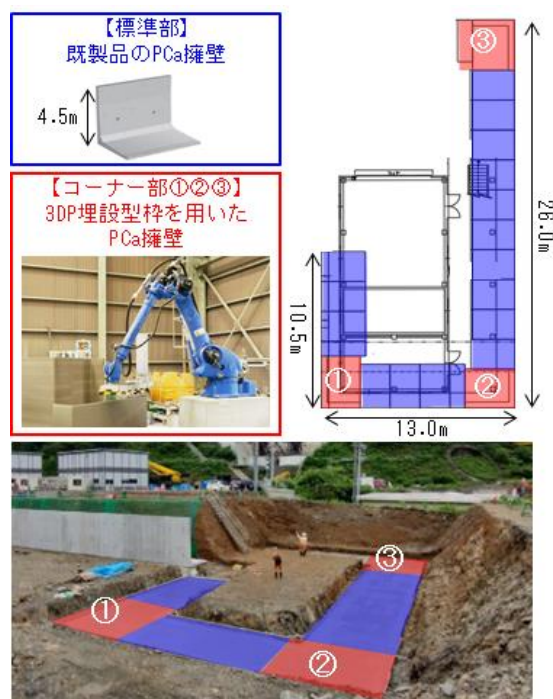


図-1 PCa部材設置箇所

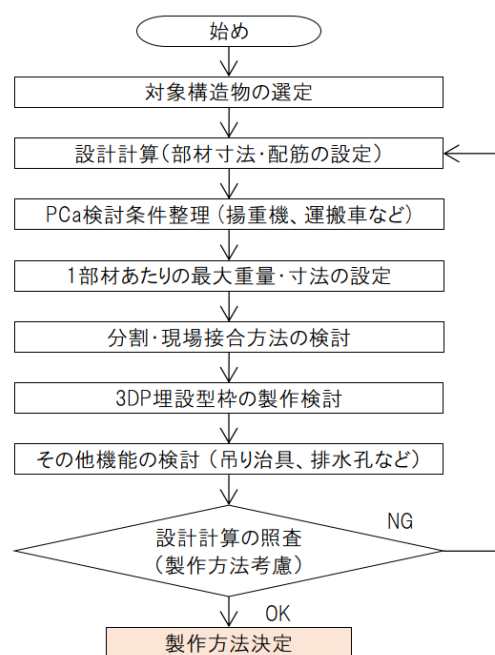
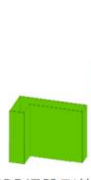




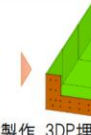
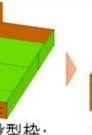
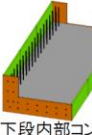
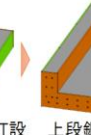
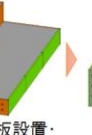


図-2 3DP埋設型枠によるPCa化の検討フロー

表-1 3DP 埋設型枠の比較

項目	【案①】壁を立たせた状態で製作	【案②】壁を寝かせた状態で製作
製作 ステップ	   	     
メリット	<ul style="list-style-type: none"> ・製作方法がシンプルでわかりやすい。 ・支保工を確実に行えば、内部コンクリートを1回で打設できる可能性がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・内部コンクリート打設時の側圧による型枠破損リスクが低い。 ・足場や転倒防止の設備が不要となる。 ・コンクリートの充填が確認しやすい。
デメリット	<ul style="list-style-type: none"> ・内部コンクリート打設時の側圧による型枠破損リスクが高く、対策には追加設備や打設速度の調整が必要となる。 ・足場や転倒防止の設備が必要となる。 ・コンクリートの充填が確認しづらい。 	<ul style="list-style-type: none"> ・薄板の3DP埋設型枠を寝かせる作業が発生し、型枠破損のリスクがある。 ・内部コンクリートの打設を2回に分ける必要がある。

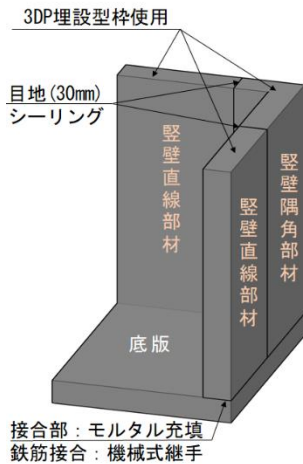


図-3 コーナー部の分割



写真-1 製作状況

使用する揚重機が大型になるといったデメリットが生じる。そのため、現地で使用できる揚重機、運搬車を考慮した部材の分割を検討する必要がある。本ケースでは一般部のL型擁壁を設置するために、220tのオールテレーンクレーンを使用する計画であったため、コーナー部についてもそれを用いて揚重することとした。運搬には低床トレーラーを使用することとし、両条件より部材あたりの最大重量を10t、短辺方向の最大寸法を2.99mと設定した。

3.2 分割検討

3.1で決めた条件に基づき分割を検討する。設計計算の結果、コーナー部の重量は約32tとなったため、底板、縦壁隅角部材、縦壁直線部材(2部材)の4部材に分割することとした(図-3)。縦壁直線部材は2部材あるが、製作上の人為的ミスを防止するために、仕様を統一した。

3.3 継手・目地の検討

底板と縦壁部材の接合については、軸方向鉄筋をモルタル充填式の機械式継手で接合する仕様とした。部材間には20mmの隙間を設けておき、機械式継手にモルタルを充填すると同時に隙間にもモルタルが充填される構造とした。

縦壁部材間の目地については3Dプリントの製作誤差が大きいことを考慮し、設計図上30mmの隙間を設けた。隙間は現地組立後にシーリング材で充填することとした。

3.4 製作方法検討

縦壁部材に対して3Dプリンタの適用を検討した。使用する3Dプリンタはロボットアーム方式である。3Dプリンタの可動範囲、材料の特性を踏まえて、縦壁部材は高さ方向に3分割してプリントすることとした。製作方法は2通りの方法を比較した(表-1)。表-1の案①が最もシンプルな考え方であるが、内部にコンクリートを打設するときの側圧対策が困難、生コンの充填確認が困難など課題が多い。これらの課題は今後の技術の発展で解決できる可能性があるものの、検討時点ではリスクの少ない案②の方が実現性が高いと判断し、案②の製作方法を選定した。

3.5 製作³⁾

写真-1に実際の製作状況を示す。

(1) 3DP埋設型枠製作

3DP埋設型枠は専用のプリント材料を積層して製作する。積層幅は15mm×2列、1層あたりの高さは5mmとした。

(2) 3DP埋設型枠・鋼製型枠設置

3つに分割した3DP埋設型枠と鋼製型枠を組み立てた。各型枠間にはゴム材(EPDM, t=10mm)を挟み縦壁部材としての寸法を調整した。天端面および下面に設置する鋼製型枠は吊り治具および機械式継手の固定のために必要となる。

(3) 鉄筋かご建込み

別途組立した鉄筋かごを型枠内に配置した。機

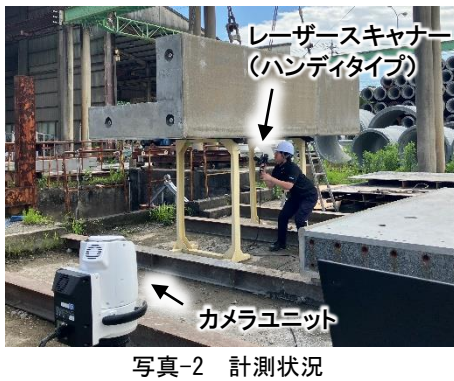


写真-2 計測状況

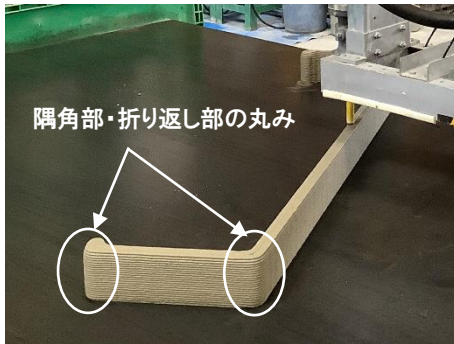


写真-3 3DP 埋設型枠製作状況

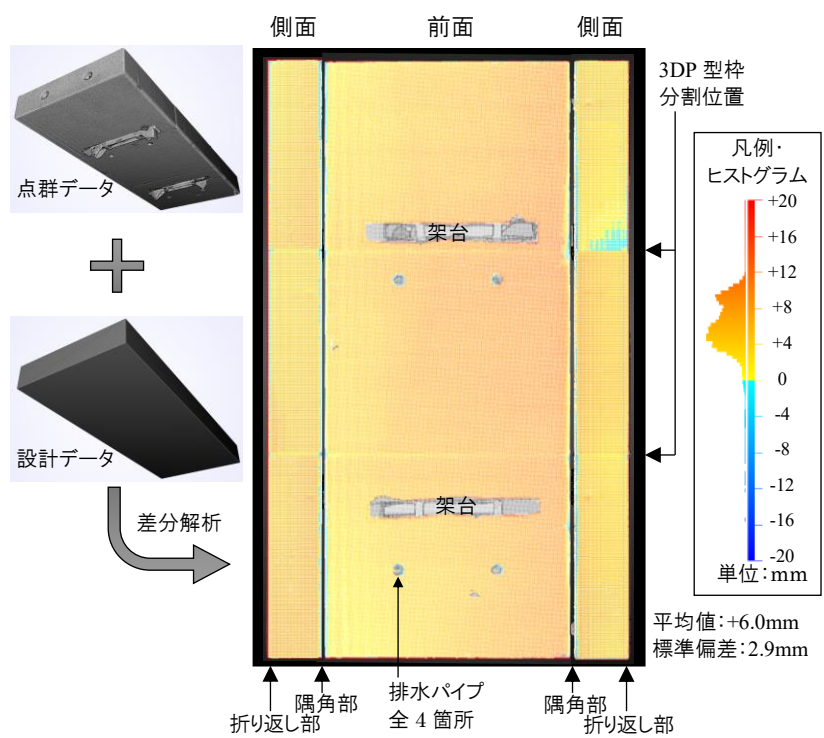


図-4 出来形の点群データと設計データの差解析結果

械式継手を鋼製型枠に固定し、かぶり部にスペーサーを配置することで鉄筋かごの位置を固定した。
(4) 下段内部コンクリート打設

内部コンクリートを打設した。積層の層間にもコンクリートのモルタル分が充填されるように、かぶり部分は入念に締め固めた。

(5) 上段型枠設置・上段内部コンクリート打設

堅壁隅角部材については、下段コンクリート打設後に鋼製型枠を設置し、上段コンクリートを打設した。

4. 精度検証⁴⁾

3D プリンタは可塑性のプリント材料を積層しながら造形するという特性上、一般的な型枠に比べて製作誤差が生じやすい。また、本ケースでは別々に製作した3DP埋設型枠を組み立てる方法を採用したため、製作誤差が出やすい条件であった。そこで、3次元レーザースキャナーを用いて3次元計測を行い、精度の検証を行った。

4.1 検証方法

レーザースキャナーにはハンディタイプの機械を用いた。カタログ上の計測精度は0.1mm程度である。写真-2に計測状況を示す。3次元レーザースキャナーにより取得した部材の点群データに3次元設計データを重ね合わせ、3DP埋設型枠側の面を対象にそれらの差分をとることで出来形を評価した。

4.2 検証結果

図-4に差解析の結果を示す。色が付いていない箇所は計測用の架台や排水パイプを表しており、評価対象外である。

図-4のヒストグラムより、出来形は設計値に対して-5～+15mm程度の誤差であった。平均値で+6.0mm、標準偏差2.9mmであった。壁厚400mmに対して平均6mmの誤差であれば、1.5%程度の誤差となる。構造計算時には、制限値に対して80～90%程度で部材仕様を決定することが多いため、この程度の誤差であれば構造上問題となることはほとんどないといえる。部材断面が小さい場合には相対的に誤差の影響が大きくなるが、その対策としては予め誤差を考慮して3Dプリンタのパスを設定することが有効と考えられる。

出来形が設計データより5mm程度小さくできている箇所が全体の3%弱あったが、これは隅角部や3Dプリンタのパスの折り返し点といった特定の箇所に多く見られた。写真-3に示すように、可塑性のあるモルタルでは明瞭な角部を表現することが難しく、丸みを帯びた形状となるため、隅角部は設計データより小さくなったと考えられる。また、3段目の側面部が一部分的に小さくなっているが、これは3つの3DP埋設型枠を人的作業により組み合わせることによって生じたものである。

本ケースのように複数の部材を隣に並べるような場合には、3DP埋設型枠の側面の精度が特に重要となるため、上記のような誤差を考慮して製作検討を行う必要がある。



写真-4 施工状況

表-2 L型擁壁隅角部の工法比較

項目	①現場打設	②鋼製型枠によるPCa工法	③3DP埋設型枠によるPCa工法
概要	底板・壁：現場打設	底板・壁下部：現場打設、壁：PCa	底板：PCa、壁：3DP埋設型枠PCa
現場工程	底板：1週間、壁：2週間 合計：約3週間（型枠解体まで含む）	底板：1週間、壁下部：3日、PCa壁：3日 合計：約2週間	コーナー部1箇所につき0.5日 合計：約2日
PCa製作工程	-	3か月	2.5か月
メリット	・現場施工による費用削減	・壁の打設回避による工程短縮 ・打設回避による管理省力化	・フルPCa化による工程短縮 ・②に比べPCa部材の製作期間短縮(約2週間) ・打設回避による管理省力化
デメリット	・打設施工計画、現場安全管理が必要 ・現場工程が最も長い	・継手配置のため工程短縮効果は小さい ・①に比べて費用が掛かる	・①に比べて費用が掛かる
①との費用比較	1.00倍	2.52倍	2.42倍
判定（※工程優先）	△	○	◎

5. 施工³⁾

写真-4に施工状況を示す。施工方法は一般的なPCa工法と同様である。部材を分割したため機械式継手による接合作業が現場で発生するものの、現場搬入から据え付けまでの作業をコーナー部1か所につき半日、3か所合計で1.5日で完了し、工程短縮につながった。壁部材間に設けていた幅30mmの隙間は、実際に組み立てると狭いところでは数mmの隙間となった。予め誤差を考慮して調整代を設けたことでスムーズな施工を実現できた。

6. 3DP埋設型枠によるPCa工法の評価²⁾

3DP埋設型枠によるPCa工法を、現場打設、鋼製型枠によるPCa工法と比較した結果を表-2に示す。③3DP埋設型枠によるPCa工法は、①現場打設に比べると、費用が2.4倍になるものの、現場工程を約3週間から約2日に短縮できた。また、②鋼製型枠によるPCa工法に比べて型枠の検討・製作期間が短いため、製作工程を0.5か月短縮でき、現場施工に製作を間に合わせることができた。

6.1 3DP埋設型枠の優位性

本ケースのように現場打設からPCaに変更する場合には、鋼製型枠の検討・製作期間がネックとなることが多いが、3Dプリンタであればすぐに3DP埋設型枠の製作に取り掛かることができるため、その点で大きなメリットがある。

また費用に関しては、3DP埋設型枠によるPCa工法は、少数部材の製作であれば、鋼製型枠と同程度の費用で製作工程を短縮できることがわかった。一方で同じ部材を大量に製造する場合には、一度製作さえすれば何度も転用ができる鋼製型枠によるPCa工法に利がある。現場で重視する項目に応じて適用する工法を判断する必要がある。

6.2 3DP埋設型枠の課題と展望

3Dプリンタは発展途上の技術であることから、2025年時点では材料費が高く、製作にも人手がかかっている。今後の普及による材料費の低減、一連の製作システムの構築が実現すれば費用が下がり、適用の幅がさらに広がることが期待される。

また、鉄筋コンクリート構造物に3DP埋設型枠を適用する場合、内部コンクリート打設時の側圧に耐える必要がある。3DP埋設型枠を厚く製作するなどすれば改善するが、その分かぶりが大きくなり構造自体に無駄が生じる。引張に強いプリント材料や簡易な側圧対策を実現できれば製作はさらに簡略化できる。

7. まとめ

実現場への適用を通じて、3DP埋設型枠の有効性を確認できた。適用には3Dプリンタや製作・施工方法の特性を十分に理解し、予め計画に見込んでおくことが重要であり、それにより一般的なPCa工法と同等の施工性を実現できる。

参考文献

- 1) 小俣光弘, 他: 建設用3Dプリンターの一般構造物プレキャスト部材への適用, ダム工学会研究発表会, 2024. 11
- 2) 西村俊亮, 他: 3Dプリンターにより製作した埋設型枠を用いたプレキャスト部材の製作方法の検討事例, 第52回土木学会関東支部技術研究発表会, 2025. 3
- 3) 西山愛梨, 他: 3Dプリンターにより製作した埋設型枠を用いたプレキャスト部材の製作, 施工, 出来形計測, 第52回土木学会関東支部技術研究発表会, 2025. 3
- 4) 西村俊亮, 他: 3Dプリンターにより製作したプレキャスト部材の3次元計測による出来形の評価, 令和7年度土木学会全国大会第80回年次学術講演会, 2025. 9