

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）の概要

井 口 重 信

近年、建設用 3D プリンティング技術の研究および実用化が急速に進展している。土木学会コンクリート委員会「建設用 3D プリンタによる埋設型枠設計・施工に関する研究小委員会（252 委員会）」では、建設用 3D プリンタを用いた埋設型枠およびそれを利用した構造物に関する技術指針（案）を取りまとめた。本指針（案）では、構造計画、設計、製造（プリント）、施工、維持管理の各段階において求められる基本的な考え方や手順を整理した。また、試験方法の規準案や具体的な適用事例も掲載し、3D プリンタによって構造物を構築するために必要な事項を網羅した内容とした。

キーワード：3D プリンタ、埋設型枠、コンクリート、機械化、省力化

1. はじめに

建設用 3D プリンタによる構造物の構築技術は、海外では一部で実用化が進み、橋梁や住宅などの施工に活用されている。国内においても、住宅や橋りょう基礎の埋設型枠などへの適用事例が増加している。土木学会コンクリート委員会「3D プリンティング技術の土木構造物への適用に関する研究小委員会（364 委員会）」では、2021 年 7 月から約 2 年間にわたり、3D プリンティング技術の課題や適用性について検討を行ってきた。その中で、埋設型枠のように要求性能が限定され、3D プリンティング技術の効果が得られやすい非構造部材から適用を進めることが、技術の標準化において有効であるとの意見がまとまった。これを受けて、2023 年 9 月に土木学会コンクリート委員会「建設用 3D プリンタによる埋設型枠設計・施工に関する研究小委員会（252 委員会）（委員長：東京大学 石田哲也教授）」が設置され、2025 年 2 月までの約 1 年半にわたり活動が行われた。

本小委員会では、建設用 3D プリンタを用いた埋設型枠の設計・施工において、製造方法や環境条件に応じたレオロジー特性や強度発現の制御技術、引張補強方法やプリント造形物の性能評価方法、設計法の確立といった構造面の課題、また連続的な材料供給、施工時の構造安定性の確保、装置故障時のトラブル回避策など施工面での課題を体系的に整理し、「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）」をとりまとめた。本稿では、この技術指

針（案）の概要について述べる。

2. 総則、構造計画（1 章、2 章）

図—1 に、本指針（案）の目次を示す。

本指針（案）は、コンクリート構造物を対象とし、セメント系材料を用いて建設用 3D プリンタで製造された無筋の埋設型枠（以下、「3D プリント埋設型枠」）を採用する場合における、構造計画、設計、製造、施工、維持管理の各段階における一般的な原則を示したものである。建設用 3D プリンタには、「結合材噴射（バインダージェット）方式」や「吹付方式」など複数の方式が存在するが、本指針（案）では、国内における大型造形物の適用事例が多い「材料押出方式」を対象とした。また、使用材料はセメント系材料に限定し、ジオポリマーや樹脂系材料を用いたものは本指針（案）の適用範囲外とした。「3D プリンティング」や「3D プリンタ」などの用語は、日本産業規格 JIS B 9441:2020「付加製造（AM）－用語及び基本概念」等において定義されているが、これらはセメント系材料による造形を想定していない。そのため、本指針（案）においては以下のように定義を一部修正し、適用範囲を拡張している。

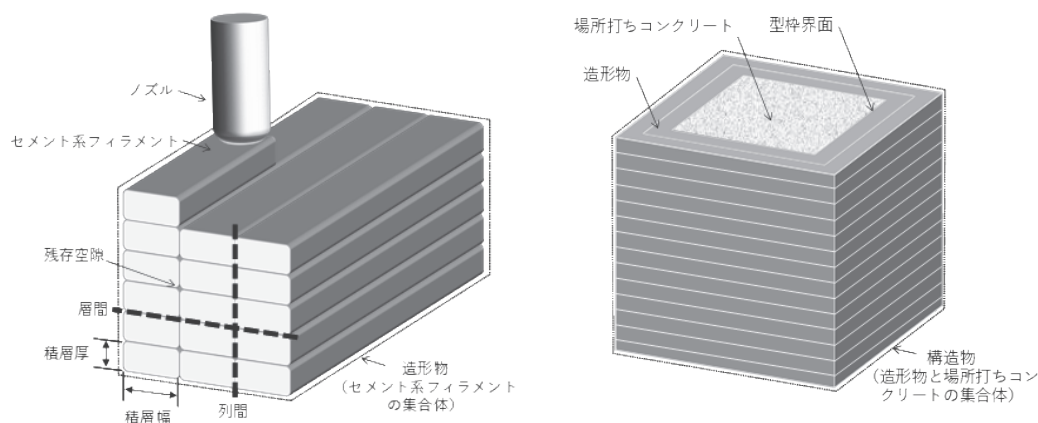
3D プリンティング：プリントヘッド、ノズルなどの印刷技術を使用してセメント系材料を積層し埋設型枠を製造する方法

3D プリンタ：3D プリンティングのために使用する装置
その他、3D プリンティングに際し良く使う造形物

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）

1 章 総 則 1.1 一 般 1.2 用語の定義 1.3 3D プリント埋設型枠の採用にあたっての検討方針 2 章 構造計画 2.1 一 般 2.2 調 査 2.3 要求性能 2.4 3D プリント埋設型枠の製造に関する検討 2.5 3D プリント埋設型枠を用いたコンクリート構造物の施工に関する検討 2.6 3D プリント埋設型枠を用いたコンクリート構造物の維持管理に関する検討 2.7 構造計画の記録 3 章 設 計 3.1 一 般 3.2 プリント材料の基本 3.3 3Dプリンタによる造形物の設計値 3.4 作 用 3.5 応答値の算定 3.6 照 査 3.7 3Dプリント埋設型枠と場所打ちコンクリートの一体性確保 3.8 3Dプリント埋設型枠の接合 4 章 3D プリント埋設型枠の製造 4.1 一 般 4.2 製造計画 4.3 3D プリント 4.4 プリント材料 4.5 計量および練混ぜ 4.6 積層 4.7 養生および保管	5 章 3D プリント埋設型枠を用いたコンクリート構造物の施工 5.1 一 般 5.2 施工計画 5.3 現場への運搬および現場での保管 5.4 架設および設置 5.5 3Dプリント埋設型枠の接合 5.6 構造物の構築 6 章 品質管理 6.1 一 般 6.2 製造時の品質管理 6.3 施工時の品質管理 7 章 検査 7.1 一 般 7.2 製造の検査 7.3 施工の検査 7.4 検査の記録 8 章 維持管理 8.1 一 般 8.2 維持管理計画 8.3 診 断 8.4 対 策 8.5 記 録 規 準 編 3Dプリンタで積層されたモルタル（コンクリート）造形物の圧縮強度試験用および静弾性係数試験用コア供試体の作り方（案）（JSCE-F 711-2025） 参 考 資 料 編 1 章 柱埋設型枠への適用に関する設計検討例 2 章 3Dプリント埋設型枠等のプリント事例
--	---

図－1 目次構成



図－2 造形物の断面に関連する用語

の断面に関連する用語なども、定義をした（図－2）。

3D プリント埋設型枠を用いたコンクリート構造物であっても、従来のコンクリート構造物の検討の流れと大きく変わることはなく、構造物の計画からはじまり構造物の設計、3D プリント埋設型枠の製造、コンクリート構造物の施工、コンクリート構造物の維持管理へと続くが、3D プリント埋設型枠を採用するにあたっての利点や留意点、各段階で検討すべき事項などについて詳述した。構造計画に際しては、3D プリント埋設型枠の特徴である、

- ・積層造形で製造されるため異方性を有する
- ・造形自由度が高く多様な形状を持つ
- ・凹凸を有する埋設型枠と場所打ちコンクリートからなる複合部材
- ・接合部を多く有する構造

などに留意するように促した。また、製造（プリント）する場所により考慮すべき事項が大きく異なるため、オフサイトプリント、ニアサイトプリント、オンサイトプリントの3区分に分けて記載をした。

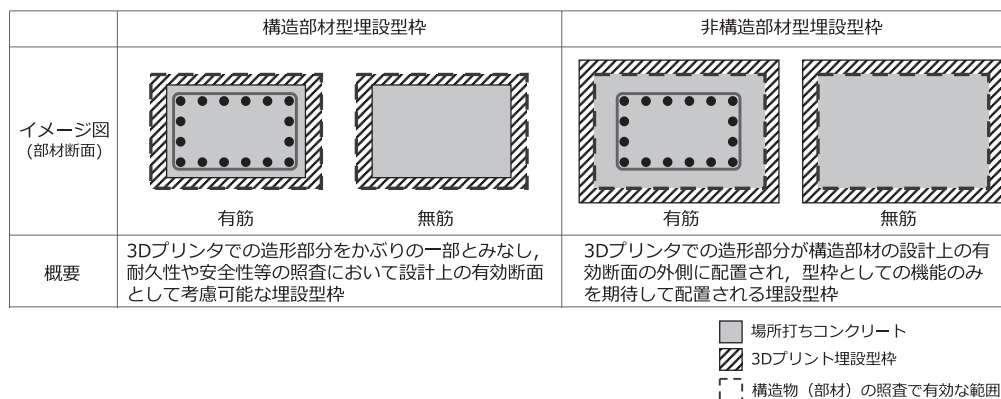
3. 設計（3章）

設計では、3D プリント埋設型枠の設計、およびそれを用いたコンクリート構造物の設計についての標準事項を記載した。設計に際しては、製造した3D プリント埋設型枠を構造部材型、非構造部材型のどちらとして用いるかをあらかじめ定めた上で設計を進める（図－3）。

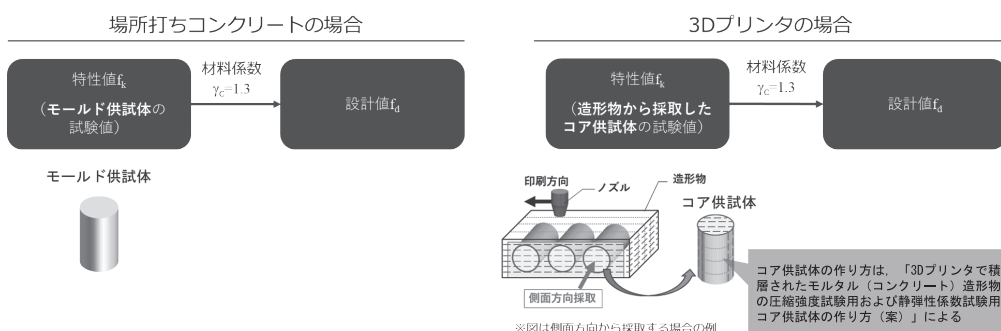
3D プリンティングにより製造した埋設型枠の場合、材料や3D プリンタおよび製造時の環境条件など

により品質が影響すると想定されることから、設計に用いる特性値については、3Dプリンタによる造形物から採取したコア供試体の試験値に基づいて定めることとした（図—4）。なお、コア供試体の作り方は、本指針（案）に準拠して作成した、「3Dプリンタで積層されたモルタル（コンクリート）造形物の圧縮強度試験用および静弾性係数試験用コア供試体の作り方（案）（JSCE-F 711-2025）」に依る。

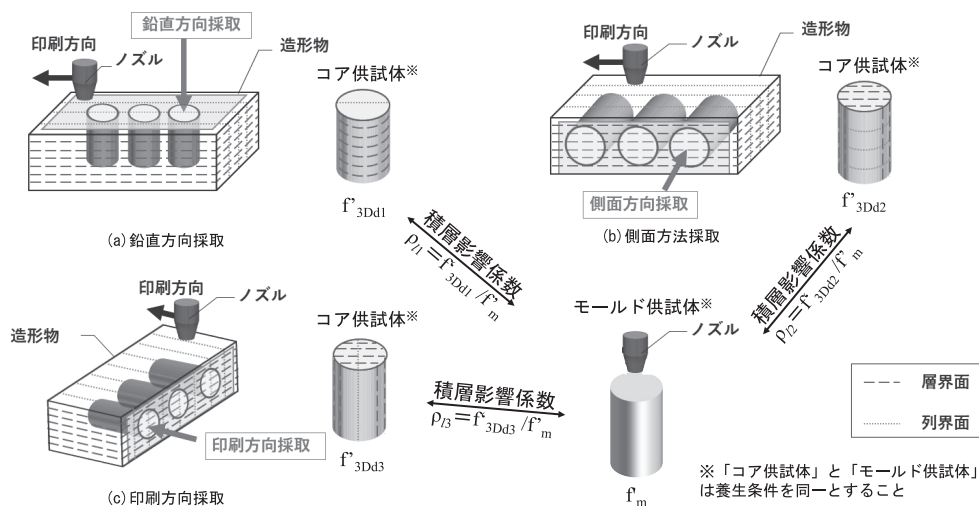
3Dプリンタによる造形物の特性値は、積層方向によって異なる場合も想定される。そのため、積層方向に応じた特性値を求めておく必要がある。同一プリント材料を型枠に打ち込んで製造したモールド供試体について各種試験値を取得することで、造形物から採取したコア供試体の試験値との比である積層影響係数 ρ_1 を得ておくことで、後述する品質管理においてモールド供試体の強度を用いてもよいとした（図—5）。ま



図—3 3D プリント埋設型枠の分類



図—4 3D プリントによる造形物の特性値



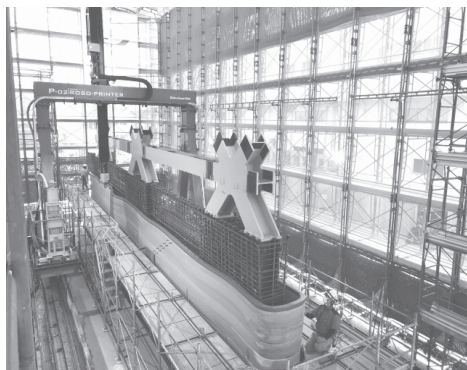
図—5 特性値の取得方法（圧縮強度の場合）

た、特性値を得るために作られた3Dプリンタによる造形物が想定される製造の諸条件に近い条件で作られたものであることを確認することを前提に、材料係数に1.3を用いて良いこととした。

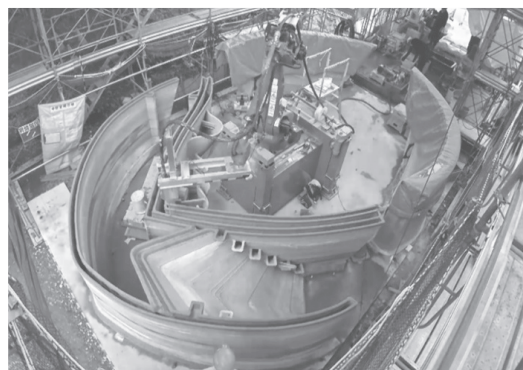
4. 3D プリント埋設型枠の製造、構造物の施工 (4章, 5章)

ロボットアーム型3Dプリンタの例を図—6に示す。
3D プリント埋設型枠の製造にあたっては、表—1

に示すような内容について検討した製造計画を立てる。積層中は、ポンプによる材料移送時の圧力、プリント材料の温度、吐出量、造形物とノズルとの距離や造形物の変形量などを各種デジタルデータで記録することで、従来工法よりも製造のトレーサビリティを向上させることができる。また、環境条件の変化や製造設備の不良等により生じる可能性のある不具合の例なども示した(図—7)。5章では、3D プリント埋設型枠を用いてコンクリート構造物を施工する際の留意点について記載した。



ガントリー型の3Dプリンタの例

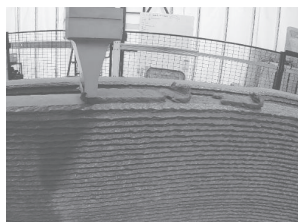


ロボットアーム型の3Dプリンタの例

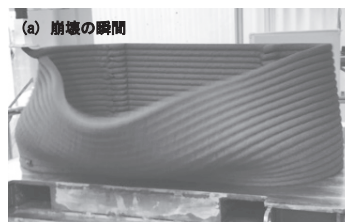
図—6 ロボットアーム型 3D プリンタの例

表—1 一般的な 3D プリント埋設型枠の製造計画の検討項目とその内容の例

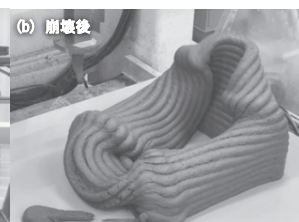
項目	内容
全般	製造場所、製造日・時間帯、環境条件(温度・湿度、風雨、振動、地面の平滑度)
3D プリンタ	プリンタの選定、点検方法
プリント材料	プリント原材料(プレミックス材料、セメント、水、骨材、混和材料、繊維等)の選定、配合、材料の調達、貯蔵、計量、練混ぜ(ミキサ)、品質管理方法
積層	積層パス(プリント方向)、プリンタの稼働時間、プリント速度、材料吐出量、ノズル形状、型枠分割数、型枠の付帯材料(鉄筋、金網、鋼材、アンカーボルト、配管等)の配置方法、品質管理方法
養生および保管	養生方法、養生の開始時期、養生期間、保管場所



ノズルでの材料閉塞により吐出が一部欠損した例

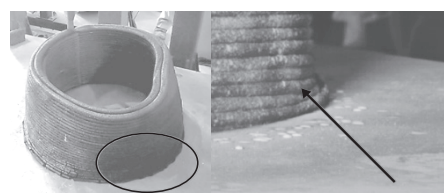


(a) 崩壊の瞬間

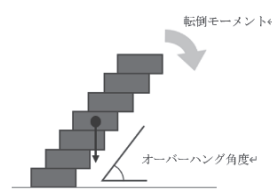


(b) 崩壊後

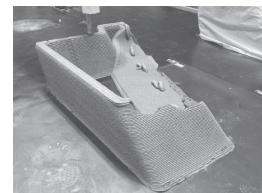
座屈による崩壊例



降伏による崩壊の例



転倒モーメントによる崩壊の例



図—7 製造の不具合による欠損・崩壊の例

5. 品質管理・維持管理（6～8章）

3D プリント埋設型枠の品質管理においては、設計で定められた構造物の形状および寸法を満足するように、3D プリント埋設型枠の製作精度を管理するとともに、3D プリントによる造形物の特性値を満足するような品質管理を実施する必要がある。製造の都度、コア供試体を作成し試験値を取得するのは煩雑となることから、実際の品質管理では、製造時に採取したモールド供試体の試験値 f_{mc} で管理することを基本とし、 f_{mc} を積層影響係数 γ_l で除した値が、設計時に定めた不良率を考慮した上で、積層供試体の特性値 f_{3dp} を上回ることを確認することで管理してもよいこととした（図—8）。

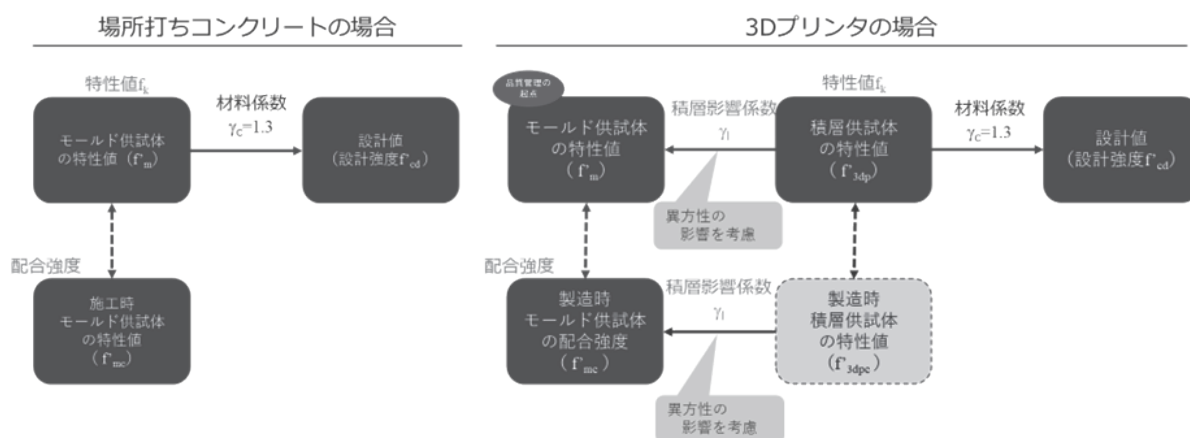
検査においては、オンサイト、オフサイト、ニアサイトの各種で検査者が異なるが、定められた品質管理規準に合致することを確認することで行う。維持管理

においても、従来のコンクリート構造物とほぼ同様であるが、3D プリント埋設型枠の場合、複雑な形状となること、積層物の凹凸により滞水などの可能性があること、などの特有の事項について考慮する必要がある。

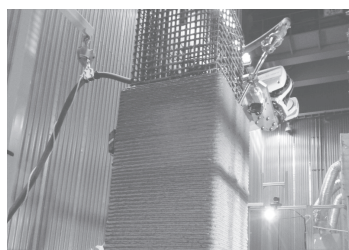
6. 規準編、参考資料編

本文、解説は、3D プリント埋設型枠およびそれを用いた構造物に関する標準的な記載としたが、具体的な実施例として参考資料編を添付した。この中では柱脚の柱型枠として用いる場合の設計検討例や、実際に適応事例などを紹介している（図—9）。

規準編は、別途、土木学会コンクリート標準示方書の規準編として制定予定の、「3D プリントで積層されたモルタル（コンクリート）造形物の圧縮強度試験用および静弾性係数試験用コア供試体の作り方（案）（JSCE-F 711-2025）」を掲載した。コア供試体の作り



図—8 特性値と合否判定基準値



大型新設柱（構造部材型）



岩盤型潜水突堤（構造部材型）



重力式擁壁（構造部材型）



ペDESTリアンデッキの柱（非構造部材型）



配管サポート基礎の型枠（非構造部材型）



建設部材用積層ブロック

図—9 参考資料編の事例

方に関する規準とその解説が記載されている。

7. おわりに

本指針（案）は、3D プリント埋設型枠およびそれを用いた構造物の、設計・施工・維持管理の各段階で求められる基本的な考え方と留意事項を網羅したものとなっている。建設現場の省人化、省力化の必要性が高まる中、建設用 3D プリンタに寄せられる期待は大きいものと考えている。建設用 3D プリンタの適用・活用之际、本指針（案）が参考になれば幸いである。最後に、本指針（案）の策定にあたり、建設用 3D プ

リントによる埋設型枠の設計・施工に関する研究小委員会においてご尽力いただいた委員各位に深く感謝申し上げます。

J C M A

【筆者紹介】

井口 重信（いぐち しげのぶ）
CalTa ㈱
COO

