

コンクリート3D プリント施工技術を用いた住宅の設計

Housing Design Using Concrete 3D Printing Construction Technology

益山 詠夢¹, 松岡 康友¹, 田中 浩也¹

Emu MASUYAMA¹, Yasutomo MATSUOKA¹, Hiroya TANAKA¹

¹ 慶應義塾大学

¹ Keio University

【要約】

昨今、コンクリート 3D プリント技術の発展は建設産業の新たな施工技術として期待が高まっている。われわれは日本でコンクリート 3D プリント施工技術を用いて住宅販売の展開を試みるベンチャー企業であるセレンディクス株式会社と約 50 平米の住宅(フジツボモデル)設計を共同で進めている。本稿ではその開発で得られた知見と課題について報告する。

キーワード: 3D, 大型3D プリンタ, コンクリート 3D プリント技術, 建築, デザイン

【Abstract】

In recent years, the development of concrete 3D printing technology has been expected to be a new construction technology in the construction industry. Keio University collaborates with a venture company (Serendix Inc.) that is planning to develop housing using concrete 3D printing construction technology in Japan, and we are designing a house (barnacle model) of about 50 square meters. This paper will explain the knowledge and the issues acquired through this research.

Keywords: Large-scale 3D printing, Concrete 3D printing Technology, Architecture, Design

1. 序論

昨今の建設現場での人材不足等の社会課題を契機として、建設施工への3Dプリンタの導入が広く検討されている。中でもコンクリートを材料としてもちいる3Dプリント技術への期待は高い。しかし、コンクリートは3Dプリントでひろく用いられている樹脂とは異なり、硬化時間が長く、柔らかい状態で積層する。そのため、従来の3Dプリントとは異なる新たな設計手法が必要となる。そこで我々は2021年より、セレンディクス株式会社[1]と産学連携で、コンクリート3Dプリント住宅の設計手法の研究開発を行った。本稿では新たに開発した設計手法とコンクリート3Dプリントによる試作実験について報告する。

*. 背景

3Dプリンタ技術を建築業界で施工技術として活用する研究は、2008年頃から盛んになりはじめた。2014年頃からコンクリートを材料にした住宅の施工実証事例が見られるようになった。2019年ロシア企業であるApis Cor社はコンクリート3Dプリント技術による世界最大の建築物となるドバイの庁舎[2]を完成させた。建物は二階建の高さ9.5m、床面積640㎡に及ぶもので、新しい施工技術の可能性を明示し建設業界から注目を集めた。日本国内でも限られた数であるが、建築系ベンチャー企業などがコンクリート3Dプリント施工技術を用いた実証プロジェクトが少しずつ進められている[3]。

コンクリート3Dプリント施工技術の実証事例を見て

みると、意匠設計の観点からは容易に曲面形状を造ることができる3Dプリンタ技術の特性を活かして自由な曲面が用いられたデザインが多くみられる。しかしながら曲面を多く持つ壁はインテリアや家具の収まりが悪くなるため内装工事や使用できるインテリアの制約、もしくはインテリアの特注などで、内装施工費用の上昇を招くことにつながる。また、建築工法については壁のみを3Dプリンタで出力し、屋根は木製の構造体を壁の上に乗せるという工法が主流になっている。理由として3Dプリント技術が水平面を広く持つ部材をプリントするのに適した技術でないこと、加えて3Dプリント時に許容される壁のオーバーハング(傾斜角度)に限界があるためであると推測する。積層型3Dプリントの場合、下の層が上の層を出力する際の支えとなり、コンクリートは硬化時間が長い材料である程度柔らかい状態でモルタルを積層していくことによるものであり、既存の木材工法を用いることが合理的だという判断であろう。われわれはその一方で、単一工法を使いオーバーハングの限界を考慮した屋根をプリントすることで、工期短縮や人件費削減などに寄与する可能性があるのではないかと考える。

これらの課題を解決することで3Dプリント施工技術が効率的に使われる新しい住宅のタイポロジーが必要だと考える。そこでわれわれは、コンクリート3Dプリント住宅のモデル「フジツボモデル」を開発した。フジツボモデルは約50平米の面積をもち、一般ユーザーが使用することを前提としている。

2. 設計プロセス

上述の課題を受けて、フジツボモデルの設計は以下の指針を設定した。なお、屋根まで単一工法で施工を目指す本設計は従来事例がほとんどない野心的な課題である。

表 1 設計指針

天井の高い過ごしやすい空間を作る
大きな開口の窓を設置する
設計上曲面は使い過ぎず、バランス良く使う
壁の角度はオーバーハングを考慮して斜行角 30 度内で設計する
壁から屋根まで単一工法でプリント施工する

設計はスケッチから着手し、そこから空間アレンジのスタディを展開した。スケッチでは天井の高い光の入りやすい空間を描いた(図 1)。

初期案では、6角形の形状した住宅で三つの部屋に別れた空間の壁の上に屋根が個別に乗せている。個々の屋根には上に大きく開いた天窓がある空間になっている(図 2)。

平面での空間アレンジのスタディを展開し、最終提案を策定した。この提案ではキッチン・ダイニング、寝室、スタディー、バスルームと三つの空間が繋がる空間となっている(図 3,4)。各部屋は有機的に繋がり、3D プリント技術により設置された場所で増殖していくイメージを思わせた。そして上部からみると「フジツボ」のように見えた。そこでこのシリーズを「フジツボモデル」と呼ぶことにした。



図 1. スケッチ

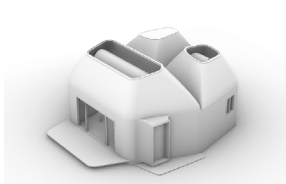


図 2. 初期案



図 3. 「フジツボモデル」完成イメージ

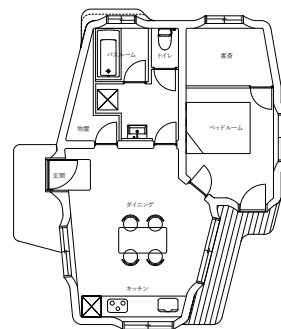


図 4. 「フジツボモデル」平面図

3. 工法の検証

3.1 コンクリート 3D プリンタ

カナダをベースとするコンクリート3D プリンタメーカー TAM (Twente Additive Manufacturing)社のタイヤの付いた移動可能なロボットアーム式のスライド可動型プリンタ Tilikum [4] (図 5)を利用した。Tilikum を用いたのは、一般的なコンクリート 3D プリンタの出力範囲は2平米程度と小さい。Tilikum はロボットアームがトラックの上をスライドし動きながらプリントできることで約60平米の出力範囲をもち本施工に有効であると判断した(図 6)。



図 5. TAM 社の Tilikum コンクリート3D プリンタ

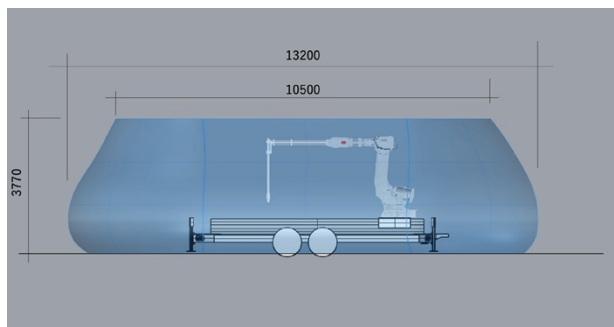


図 6. Tilikum のプリンタブルエリア(青色)

3.2 施工シミュレーション

「フジツボモデル」住宅をプリントする際に、以下の様に建物をつのセクションに分けてプリントすることを想定した。まずは垂直な Layer 1:壁セクション(グリーン)、次に Layer 2:壁から屋根に移り変わるセクション(オレンジ)、そして Layer 3:オーバーハング 30 度で積み上げられた屋根(グレー)となる(図 7)。

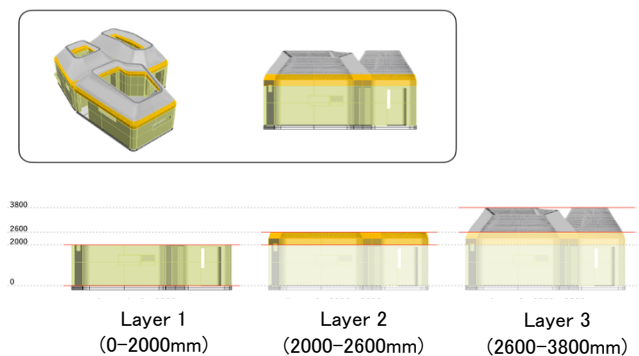


図 7. 建物を 3 つのセクションに分けてプリント

現場で施工することを前提に(図 8)の工程でシミュレーションを行った。

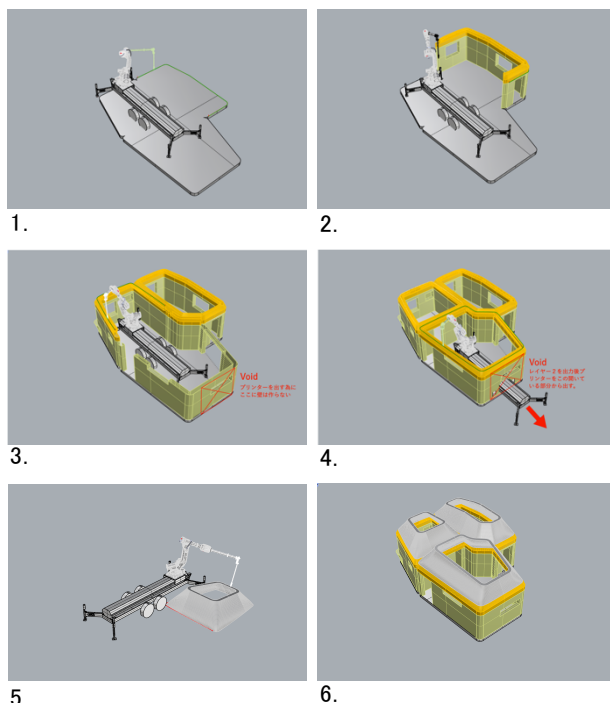


図 8. プリント施工シミュレーション. 1)ベタ基礎を打ちサイト内にロボットを入れる, 2)ベッドルームから壁をプリント開始, 3)バスルーム, ダイニング・キッチン壁をレイヤー2までプリントする, 4)プリンターを空間内から外に出す, 5)レイヤー3:屋根部分を別で床レベルでプリントする, 6)屋根をクレーンで壁の上に設置して完成。

3.3 オーバーハングに対する出力検証

2022 年 7 月に TAM 社 3D プリンタが日本に設置され、実際に 3D プリンタを動かしながらの実施検証が行われた。まずは、小さなテストモデルでオーバーハングの傾きが何度まで出力可能かを検証した。その結果、約 10 度までコンクリートが安定して積み上がり、その角度を超えると壁は座屈した。この結果を踏まえ、オーバーハングのある形状を崩さずにどのように出力するかが技術的課題として残った。

3.4 材料の選定

材料については、TAM 社のプリンター専用の材料規定は無く自由に材料を使えるのが利点であるが、機械の機構に適した材料を選出するのも技術的課題の一つである。TAM 社から提供された材料 A は勿論のこと普段使い慣れている材料でありスムーズに出力可能であったが(図 9)、セレンディクス社がよりローカルな材料を求めアジアから購入した2つの種類材料 B, と C においては TAM 社のポンプを使用し、途中で詰まってしまい出力不可になった(図 10)。ここで明らかになったのは、3D プリンター用コンクリート材料の中には、砂利、ファイバー、硬化促進剤、モルタルなどがミックスされているが、材料によりファイバー繊維の長さや量、また硬化促進材や砂利の量が異なることにより、長いホースから送り出すための十分な流動性を担保できない状態や、ファイバーが多くポンプ側が材料を押し出す圧力がないなどの問題が生じる。材料とプリンター機構の関係は相互に適合する必要がある。材料に関してアジアから入手できるものを選定中であるが、最終的には国内で生産されるものを使用していく予定である。



図 9. 材料出力検証

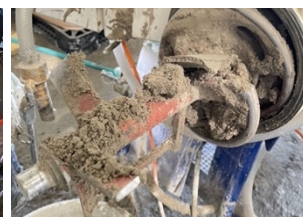


図 10. 材料がポンプ内に詰まった状態

3.5 施工検証

われわれは、出力可能な材料 A を使用し大型の出力施工検証を行った。この検証ではフジツボモデル以前にセレンディクス社で実施されている「Sphere」[5]の設計データを使い、全体の建築物の 1/4 のパーツを実寸スケールで出力すると同時に、前述したオーバーハングの出力に対する TAM 社の対応策の提案も含め出力検証を行った。具体的には、出力現場に囲いを作りそこにプリントしていく過程でプリント物のオーバーハングになる部分に「砂」をサポート材として詰め込むという手法である(図 11)。

施工検証の結果無事に綺麗な表面テクスチャーで大型パーツの出力に成功した(図 12)。また、「砂」を使ったサポート手法は、オーバーハングの角度の強い形状をサポートする意味では機能した。しかしながら、プリント工程において多くの人員による付き切りでの対応が必要となるため、オートメーションの工法を使いながらの合理的では無い手法と判断したため、不採用となった。



図 11. 砂をサポート材として使用する工法



図 12. 実寸大型施工検証

3.6 建築法規と工法

国内でコンクリート 3D プリントを用いた建設技術は全く新しい工法であり法規に関してもまだクリアしなければならない問題がある。われわれは、できるだけ早急に建築法規をクリアし国内で実施事例を作るために、ある程度戦略的な手法を取らなければならないと考えた。

コンクリート 3D プリントで建築物を建てる際の材料に関する課題は、第一に原則として建築基準法第 37 条に定められた「指定建築材料」を使わなければならないことにある。3D プリント用に作られたモルタル材料はそれ固有の技術特性に適合する為に作られたものであり、指定建築材料には該当しない。よって、これを建築物の主要構造部に使用の場合は、建築材料として新しく国土交通大臣の認定を受ける必要がある。国内では清水建設が繊維補強セメント複合材料「ラクツム」[6]を開発し、大臣認定を取得したという例もあるが、われわれは初めから大臣認定を取るのではなく、既存の「指定建築材料」を主要構造部の主材として用いることにした。すなわち、新しい工法を使いながらも既存の鉄筋コンクリート構造の基準に適合させた方法で建築基準法をクリアするという方法論である。具体的には「壁式鉄筋コンクリート造」を選択し、施工することとした。詳細を述べると、3D プリントで 50mm の厚さの壁を出力しそれを型枠とし、その中に 120mm (平屋で最低要求される壁厚) の空隙幅を造り、そこに配筋しコンクリートを流し込み、それを構造体として扱い、外側の 3D プリントされた型枠と一体となった 220mm の構造物となる (図 13)。

このアプローチが建築基準法に適合するか否かは建築主事の判断によると考えるが、先ずはこの工法で実施事例を作っていくことが重要であると考え。

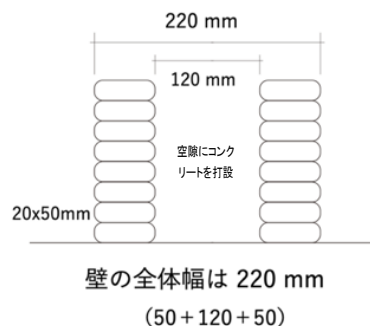


図 13. 3D プリントで施工する壁厚

4. 結論

設計フェーズそして、3D プリントを設置し実証実験を続けてきたが、さまざまな領域で課題があり、理想として考察していたことと、実際に現場で見えてきた知見との間にあるズレが顕著になり課題として浮かび上がってきた。具体的には、設計によるオーバーハングに対する課題、機械に適した、材料の選定。3D プリントに関しては、運搬可能であるため、オンサイトで建設することを想定していたが、実際にプリンタを使用し作業してみると、プリント時と、使用後のツールの清掃に大量の水が必要であり、汚水処理などの問題も存在し、電気に関しては 480V の電圧供給も必要であり、インフラの整った工場の整備で、プリントしたものを現場に運搬する方が、作業効率が良いのではないかとこの考察に至った。また、建築法規に関しては施工方法、材料の大臣認定の取得も必要であり、長い時間を掛けて取り組む必要がある。

次のステップとして、実寸スケールのプロトタイプ試作を通じて、これらの課題をクリアしながら研究開発を進めていきたい。

謝辞

本研究開発は慶應義塾大学がセレンディクス株式会社と共同で行われた研究から得た知見であり、建設業界で新しい施工技術に対してチャレンジし、開発に関われる機会を頂いたセレンディクス株式会社、飯田国大氏に感謝申し上げます。

参考文献

1. セレンディクス株式会社, <https://serendix.jp>
2. Apis Cor, <https://apis-cor.com/dubai-project/>
3. Polyuse, <https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000010.000049711.html>
4. Twente Additive Manufacturing, Tilikum <https://www.twente-am.com/midsize-and-mobile-printers/>
5. Sphere, Design by Clouds AO, <https://cloudsao.com/SERENDIX-SPHERE>
6. 清水建設, ラクツム, <https://www.shimz.co.jp/solution/tech368/>