

JCI-TC185F : 3D プリンティングのコンクリート構造物への適用に関する FS 委員会 第 3 回 全体委員会 議事録 (案)

- 日 時 : 2019 年 9 月 5 日 (水) 14:00~17:00
- 場 所 : JCI 第 5 会議室
- 出席者 : 丸屋 (途中退席), 石田, 石関 (途中退席), 大野, 百武, 桐山, 田原, 玉木, 横関, 小倉, 絹村, 木ノ村, JCI 高田 以上 13 名 (敬称略)
- 配布資料
 - 3-0 第 3 回全体委員会 議事次第
 - 3-1 第 2 回全体委員会 議事録 (案)
 - 3-2 施工 WG1 次調査その 1
 - 3-3 施工 WG1 次調査その 2
 - 3-4 施工 WG1 次調査その 3
 - 3-5 施工 WG1 次調査その 4
 - 3-6 3D プリンティング適用事例 (施工 WG)
 - 3-7 金属 3D プリンター ProX DMP シリーズご紹介
 - 3-8 工場見学報告
 - 3-9 土木学会第 73 回年次学術講演会 (V-283)
 - 3-10 土木学会第 73 回年次学術講演会 (V-284)
 - 3-11 土木学会第 73 回年次学術講演会 (V-286)
 - 3-12 3-11 の講演 PPT
 - 3-13 土木学会第 73 回年次学術講演会 (V-287)
 - 3-14 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北) 2018 年 (1473)
 - 3-15 3-14 の講演 PPT
 - 3-16~3-32 3D プリンティングのコンクリートへの適用に関する将来像 (各委員)
 - 3-33 リーフレット (International conference on construction 3D printing)
 - 3-34 リーフレット (Conference on 4D and Functional Printing 2018)

■ 議事

1. 委員長挨拶

今回は, WG からの報告に加えて 3D プリンティングのコンクリートへの適応に向けての将来像について議論するため多くの意見を頂戴したい旨説明があった。

2. 施工 WG 調査報告 (資料 No. 3-2~3-5)

2.1 資料 No. 3-2

ロシアにおける 3D プリンター開発企業 Apis Cor の適用事例について説明があった。無人の全自動で平屋の住宅を一日で製造可能とした。この技術は, 災害時の仮設住宅への適用を

想定している。プリンタヘッドが回転するようなデザインで、軸本体内にミキサが内蔵されている。材料はジオポリマーを用いている。極寒地域（-35℃）での施工条件と、断熱仕様の構造物となっている。

オランダの建設用 3D プリンタベンチャー CyBe Construction について報告があった。6 軸の産業ロボットアームを使用し、自走式となっている。施工スピードは 600mm/s で、アウトリーガーで本体を上昇させ 4.5m の高さまでの製造を可能とする。ドローン研究施設を建設した実績がある。

2.2 資料 No. 3-3

イタリアの WASP 社の適用例について説明があった。ガントリータイプの 3D プリンターで、トラックで運搬が可能である。改良土など自然の材料を利用しており、環境負荷の低減を意識している。施工速度 400mm/s 程度である。

アメリカの ICON 社の例について説明があった。従来の半額の価格で住宅を製造可能とすることを目標としている。ガントリータイプのプリンターを使用している。壁体内部のトラス構造の層間にエキスパンドメタルを配置することで、構造成立性を確保している。2019 年に住宅 100 棟を建設予定である。

2.3 資料 No. 3-4

中国の Winsun の適用例について説明があった。3D プリンターを用いて製造した部材パーツを現場で組み立てる方式である。ガントリータイプのプリンターで埋設型枠を作製し、内部に鉄筋を配置後、中詰めコンクリートを打ち込むことで部材とする。6 階建てのアパートの建設し、一般的な工法に比べて材料で 60%、工期で 30% 程度削減した。

さらに中国の HuaShang の適用事例について説明があった。多用されている積層式とは異なり、基礎から鉛直方向に伸びている鉄筋を挟み込むようにノズルを配置し、鉄筋を包むようにコンクリートを打ち上げていく方法である。

2.4 資料 No. 3-5

イギリスの Loughborough 大学の適用例について説明があった。同大学は、2007 年ごろから開発に着手しており、コンクリートの 3D プリント技術の先駆けである。複数のゼネコンと共同開発を進めてきている。ガントリー式とロボット式の両方でのプリンターを開発している。

さらに、ミュンヘン工科大学 (TUM) の適用例について説明があった。結合材噴射方式を採用しており、砂を敷き詰めた後、結合材を注入して選択的に固化させることで構造物を構築する方法である。材料押し出し方式も開発中であるが、結合材噴射方式よりも圧倒的にスピードが速いことを見出している。また、材料にウッドチップを混合して積層することで断熱性の高い壁を作製した実績がある。

⇒資料 No.3-2 の平屋の屋根はどうやって作るのか.

あらかじめ製造した屋根を、最後に載せるようにして、設置していると思われる.

⇒資料 No.3-3 について、メッシュ筋を入れたものがあるが、目的はなにか.

おそらく積層した材料が下にだれないように入れている.

⇒資料 No.3-4 の WinSun 社のものは、きれいな矩形に積層できているが、何か工夫されているのか.

おそらく、ノズルが工夫されている.

⇒資料 No.3-4 の HuaShang 社のものは、普通のコンクリートを使用している. かなり手間がかかっている.

2.5 資料 No. 3-6

調査結果一覧表のフォーマットについて修正したこの説明があった. 出展および新規性の評価結果が追加された.

3. 他産業の現状調査 WG (No. 7~8)

担当委員が不在のため、次回の報告とする.

4. 各学会での講演内容について報告

4.1 資料 No. 3-9 および No. 3-10

3D プリント技術をコンクリートの施工へ適用するにあたって、要求性の設定、試作機から大型化へのノウハウに関する内容等を報告した. 特殊なノズルを開発したことで、一筆書によらないプリント施工が可能となった. また、曲げじん性が載荷方向によって異なる（異方性がある）ことを報告した.

⇒質問はどんなだったか

繊維を入れている目的、開発の方向性はプレキャストか現場打ちか、繊維量を変えた場合に破壊モードが変わることがあったか、特殊ノズルの機構はなどであった.

⇒開発の方向性はどうするのか?の質問にどう答えたか.

使用するプリント方法で大きく変わる. ガントリー式だと大きさの限界があるのでプレキャスト向き、現場はロボットアーム式が向いていると答えた.

4.2 資料 No. 3-11, No. 3-12, No. 3-14, No. 3-15

大林組では3D プリンティング技術の最終目標は、月面での施工を可能とすることとしている. 学会報告では、材料押し出し方式によるモルタルの積層で部材を作製する技術について

て考察した内容である。また、積層間のモルタルの一体性について検討したところ目立った不連続部はなかったことを報告した。現状で使用しているノズルに適した積層厚や吐出量を検討した結果を報告した。その結果、アスペクト比が2以上のものが自立して積層できることを見出した。

⇒積層厚と積層幅の理論値とはなにか。

モルタルの吐出量から計算される幅と厚さである。

⇒ノズルの形は？

円形である。

⇒そのまま月面で動くのか？

動くと思われるが、材料がない。現地のものを使う必要がある。

⇒曲げ試験の打ち重ねの時間間隔は？

1分程度である。

4.3 資料 No. 3-13

前回の委員会で報告した JCI の内容をコンパクトにした内容である。

⇒どのようなプリント機械をつかっているのか。

大成建設で使用された小型の機械に近い。ガントリー式である。

ノズルの水平方向に穴があり羊かんのようにでてくる。載せて重ねているようなイメージである。

⇒プリントされた硬化体は、ひずみ硬化が大きくなっているがその理由は？配向による影響か？

エントラップトエアが減ることと、押し出しによる繊維の配向と思われる。

⇒配向が強いと、若干強度が下がっているように見えるが。

繊維を変えたものは同程度であった。

⇒積層面でひび割れが入るのか？

図-5 の下から 1/3 あたりに水平にひび割れが進展しているように、積層面に若干ひび割れが沿って入っている可能性がある。

⇒積層すると下層の材料が変形しないか

全体で高さ方向に5%程度自重で変形している。一番下の層で約10%程度変形していた。

⇒繊維無しのもルタルとの強度の比較はしていないのか。

この配合ではやっていない。繊維を除くと、モルタルが柔らかくなり、プリントできなくなるためである。

5. 資料 No. 3-33, No. 3-34 について報告

資料 No.3-33 について、シンガポールで開催された World's first international conference on construction 3D printing のリーフレットについて説明があった。

資料 No.3-34 について、10 月 11 日に開催される Conference on 4D and Functional Printing 2018 (主催: 慶応義塾大学 SFC 研究所ファブ地球社会コンソーシアム) について紹介があった。4D とは、時間軸あるいは価値軸などの新規価値の実現を表している。

6. 各委員より 3D プリンティングのコンクリートへの適用将来像について報告

6.1 資料 No. 3-18

3D プリンティング技術が広く普及するには、特有の価値を見出していく必要がある。例えば、①自由な 3 次元構造を可能とする、②省人化、省力化を可能とする、③施工可能環境の拡大を可能とすることを挙げる。これを実現するためには、それぞれ①位相最適化手法の確立、②材料の連続供給の方法や、積層不良などの検知システムが必要と考える。

⇒自由な 3 次元形状とは？わざわざそういう形を目指すということか。

構造の最適化を検討してみると、最終的に最適化された形が（従来の構造物とは異なる形状に）決まっていくと考える。

⇒構造最適化のソフトは、Abaqus などあるが、非線形的设计に使用できるものはあるか。

現状では存在しない。人工知能などを取り入れられればできるようになるかもしれない。

⇒じん性の最適化ソフトはあるのか。

現状はないが、今後必要になるかもしれない。

⇒構造の最適化を考える上で、なにが指標になるのか。そこが重要な点になると考える。

⇒なんのために 3D を使うのかがはっきりしない。省人化のために 3D プリンティングを使うのか。

⇒従来通りの方式でつくと、コストが合わないものがあつた場合、それを 3D プリンティングでの解決を検討する中で、もっと新しい設計概念が出てきたりすることも考えられる。

6.2 資料 No. 3-19

3D プリンティング技術で高層ビルの建設を実現するとした場合、材料の品質変動やミキサ/ポンプの管理、プリンター速度の制御など、それぞれの連動した動きが重要となる。3D プリンティング技術を普及させるためには、材料メーカー、装置メーカー、建設会社の連携が重要である。また、工法だけでなく、耐久性に関する検討も必要と考える。

⇒連続施工ができるようになれば、寝ている間にも施工できるようになり魅力的である。

ただ、世界的に見てもそこが一番苦勞しているように思える。施工の方法を考えるにしても、いろいろな選択肢がある。また、固まる材料を使用していると、ホッパーなどを洗うことなど、いろいろなシステムを考える必要がある。

⇒実情では、ほとんどが押し出し方式を採用している。

⇒2台のプリンターを同時に動かしてもよいのではないか。

⇒いろいろな検討を進める上で、パラドックスとなる事象が多いと考えられる。大型化していけば、AIなどで制御していけばいいのかもしれない。噴射式の方が最終的には良いのかもしれない。

⇒空想でもいいので、解決方法を探っていくことも大事と思う。そうすることで、実際にやれること、やらないといけないことが浮かびあがってくる。

⇒セメントに限らず他の材料を使ってもいいのでは。

⇒ジオポリマーはどうなのか。

⇒ジオポリマーは、原料が副産物なことが多いので、材料品質のばらつきの問題は、セメントよりも大きいと思われる。

⇒天然の材料を使用している例もある。

6.3 資料 No. 3-21

建設作業の熟練者が減少していくため、建設作業はデータをもとに行われるようになる。また、今後プレキャスト化は必須と考えられる。定置式の3Dプリンターで製造したプレキャスト部材で大きい構造物を建設することが、現状の3D技術の向かう方向と思う。

また、基材とデータはどこにでも持っていけるので、将来は未知なる世界での建設が可能になると考える。

6.4 資料 No. 3-22

3Dプリンティングによる自動化施工が最も有力と思う。ただ、部材の寸法により適した使い方がある。部材が厚い場合は、外郭を3Dプリントで作製し、内部に高流動コンクリートを流し込むのが良いと考える。将来的には、3Dプリンティングに適した、従来とは異なる概念の構造設計が望まれる。

3Dのように形状を自由に選択できる良さがある一方で、部材を標準化した方が望ましいなど反する考えもある。イーロンマスクのようにトンネル施工コストを1/10を目標にするなど、3Dプリンティング技術も明確に目標を定めて開発する必要があると考える。

⇒トンネルの吹付はまさに3Dプリントである。

6.5 資料 No. 3-23

3Dプリンティング技術を利用することで実現できることとして、①複数の材料を組み合

わせた傾斜機能材料の製造や、②単純形状の場合スピード向上や無人化、③トポロジー・形状最適化も組み合わせることで複雑形状のファサードの製造などが考えられる。

⇒積層した層によって性能が変わるということは面白い。

6.6 資料 No. 3-25

3D プリンティングマシンの大型化や低コスト化、部材の異方性の解消、設計技術の高度化が普及のために大事なことと考える。3D プリンティング技術の将来として、建築技術の流動化が可能になること、維持保全や復元が容易になること、未開の地への挑戦が可能となることなどを挙げた。

⇒技術の流動化については、何をブラックボックスにするのか考えないといけない。また、維持保全への利用もおもしろい。

6.7 資料 No. 3-26

3D プリンティング技術をコンクリートに適用した場合の新しい価値を考えることが重要である。設計、施工、共用・維持管理をシームレスに繋げられる解析手法を導入することによって、時間軸を加えた3D から4D への価値を見出すこともでき、さらにリノベーションの高度化も可能である。少品種多量生産から、多品種少量生産が適していると考える。オーダーメイドによる付加価値とはなにか考える必要がある。

⇒ゼネコンは現場ごとの単品生産がネックとなっているので、そこを3D プリンティング技術などで解決できるとよい。標準化と逆行しているが、それをロボットが効率的にやってくれるようにできるのであればよい。

6.8 資料 No. 3-27

3D プリンティングは段階的に製造スケールが大きくなり、最終的には3D ハウスや橋梁、マンションさらには惑星基地への適用も可能となる。そのために解決すべき課題として、ソフトウェアの開発や、外敵要因を受けにくいプリント方式、それに適したインク（造形材料）がある。また、規格や指針の整備も必要である。また、アメリカでは、道路の不陸の補修にも3D プリント技術が用いられている。ボストンコンサルティングが調査した現状の3D プリンティング事業におけるバリューチェーンについて紹介。

⇒ボストンコンサルティングのデータは最近のものか。

⇒そうである。インターネット上でも公開されている。

⇒法的な問題はどうすればいいのか。

⇒建築基準法など、すぐにどうこうできる問題ではないだろう。

⇒国が主導する会議などを通じて、政府への提言が可能。

⇒日本に技術を広めたい場合、先に海外で成功させることも一つの手として考えられる。

⇒土木研究所の立場から言うと、国土交通省へ提言する場合には、こういった委員会などを

通じて我々が情報や成果を整理して国交省へ情報を上げていくこともできる。

⇒ドイツも規制が厳しいが、3Dプリンティングのような一部の技術については国の対応が早い。

6.9 資料 No. 3-30

3Dプリンティングは、無人で、安全に、付加価値の高い造形物を作ることに優れる。建築工事では、1台のロボットが複数のノズルで圧縮材、引張材の同時施工を可能にすることや、土木では、杭や外構工事など無人化施工ができるようになると思う。

⇒現場打ちでの材料の安定性は非常に重要だろう。

6.10 資料 No. 3-31

3Dプリンティング技術の将来の普及のために必要な克服すべき課題を、材料、積層体(層間の一体化)、品質管理、制御、計測モニタリング技術の項目で整理した。Level 0(現状)では、コア技術の開発がまきに行われている。Level 1ではPCa埋設型枠を想定した無筋部材への適用、Level 2では、PCa構造部材を想定した引張部材への適用、その後大型部材や現場打ち構造物への適用を想定している。

⇒土木学会での報告については、試験体を切断したときに層間は一体化していたのか。

⇒試験体レベルでは問題なかったが、部材のスケールで課題が異なってくると考える。積層の時間間隔が変わるなど。付着性を向上させるには、化学的な処理や、施工上の工夫が必要であると思う。

6.11 資料 No. 3-32

3Dプリンティング技術は、施工自動化による生産性の向上に期待している。そのためには、技術の信頼性の確保のため評価方法などの標準化が必要と考える。また、土木研究所の役割として、建設に適した材料の情報の一元化や、共同研究などを用いて技術資料の整備、さらには技術基準の反映を行うことが挙げられる。

維持管理への利用は、国が抱える構造物の老朽化問題への対応として期待できる。

⇒科研などで行政機関の目に留まるようにすることもいいのでは。

6.12 総括コメント

3Dプリンティング技術は、省人化・省力化が望まれる今後の建設産業の動向を考えると避けては通れない技術の一つである。また、これまでにない新しい技術、新しい価値を生み出すことのできる技術としての位置付けもあると思う。

構造物への適用を具体的に考えていくと、非常に多くの課題が挙げられる。例えば、現場打ちなどと決めてケーススタディーをし、課題を絞り込んでいくことを行ってもよいと思う。最終的には、技術課題の解決に向けたロードマップとしてまとめてもよいと思う。

また、新しい技術を推進するために、必要な環境整備、法整備についても考える必要がある。

⇒法整備へつなげるために、民間企業でとられている手段の一つとして、JIS を作ることもある。

7. 前回議事録の確認（資料 No. 3-1）

第 2 回の議事録について内容を確認した。確認事項は以下である。また、これをもって JCI ホームページへの掲載の承認とした。

- ・ HP への公開にあたり、発言者氏名は削除する。
- ・ 委員メンバー外は、委員代理に修正する。
- ・ 2 頁目の「マッピングしたのち分類できないような」を「マッピングはしたが、空白で残った部分があった」との意に修正

8. 今後の予定

第 4 回 2018 年 10 月 9 日 14:00～17:00

※本日の資料を持参する。本日欠席委員の将来像のフリーディスカッションを行う。

以上