

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2回 全体委員会 議事録

- 日 時：2018年7月12日（木）9:30～12:00
- 場 所：JCI 第5会議室
- 出席者：丸屋，石田，田中，石関，大野，百武，桐山，玉木，斎藤，小林，
小倉，絹村，田邊，木ノ村，JCI 高田 以上，14名（敬称略）
- 配布資料
 - 2-0 第2回全体委員会 議事次第
 - 2-1 第1回全体委員会 議事録(案)
 - 2-2 構造WG 活動内容(案)
 - 2-3 構造に関する(構造的な特徴のある)文献のリスト フォーマット案
 - 2-4 3DP-FS委員会 構造WG1次調査
 - 2-5 3DP-FS委員会 材料WG1次調査
 - 2-6 材料WG 文献調査
 - 2-7 材料WG 調査報告
 - 2-8 文献より得られた各3DP技術の材料特性
 - 2-9 3DP適用事例
 - 2-10 (文献) Fresh and hardened properties of 3D printable cementitious materials for building and construction, *Arc. Civil Mech. Eng.* **2018**, *18*, 311-319
 - 2-11 3DPに適したひずみ硬化型セメント複合材料の開発
 - 2-12 高キソ性材料のフレッシュ性状および硬化物性に関する基礎検討
 - 2-13 平成30年度土木学会全国大会第73回年次学術講演会プログラム
 - 2-14 JCI年次大会講演プログラム
- 議事
 1. 委員長挨拶
丸屋委員長より改めて委員会の趣旨説明があった。
 2. 前回議事録の確認
大野委員から前回議事録（資料2-1）の確認があった。
 3. WG幹事確認
各WGの幹事の確認とWGでの活動方針の紹介があった。

4. 今年度の FS 委員会活動計画

丸屋委員長から今後の委員会活動について説明があった。

次回，第 3 回では土木学会全国大会での発表報告と将来像について議論する．第 4 回は建築学会全国大会での発表報告と解決すべき課題について抽出する．第 5 回は 11 月か 12 月に開催し，まとめ，報告書の作成分担を実施する．FS 委員会のメインは将来像と課題の抽出なので，これらを報告書にまとめていきたい．

5. WG の報告

5.1 構造 WG 資料

5.1.1 資料 2-2, 2-3

構造 WG では方針の決定と文献調査を開始したところである．STEP1 として，構造に関する論文のリストを作成し，10 月末目標で報告書概要を取りまとめる．STEP2 として，今後期待される構造と 3D プリンティング技術，補強材の配置，打ち継ぎ部の性能評価，また，材料 WG の成果を含めて構造に必要な材料特性についてとりまとめる．

以下のことを確認したい．

- ・提案している文献調査のフォーマットが適切であるか
- ・WG 間での統一が必要であるか
- ・文献調査の範囲をどこまで広げるか

→事務局からの情報として，1 月 21 日の報告書は対外的な発表をするものではない．研究委員会で評価するものである．FS 委員会の後継となる本委員会の終了時には，報告会の開催と正式な報告書を作る必要がある．

→フォーマットは WG 毎にまとめる．本委員会でも活かして充実させていく．文献の集約，全体で共有できるように．文献調査の範囲はプレスリリースなども含む．最新の情報を取り入れたい．国内特許は委員会メンバーのものが多く含まれると思うので，公開された場合は情報提供していただけるとありがたい．国際特許は網羅的ではなく情報収集で得られたものに関しては共有したい．

5.1.2 資料 2-4

リストアップした 5 本について概要をまとめた

- (1) *Automat. Constr.* **2017**, *83*, 247-258.

構造物としての分類法の提案．分類基準として 5 つの軸(寸法，吐出…)を導入．この方法でマッピングされた領域のうちまだ手がつけられていない領域もあった．

- (2) *Mater. Des.* **2016**, *100*, 102-109.

6 軸ロボットアームを用いた材料押出方式から，新たな積層法を提案している．層ごとに異なる吐出厚をもたせることで層間の接触厚を一定に保つ方法．

(3) *Additive Manufacturing* **2016**, *12*, 216-230.

積層法の提案. 曲線を滑らかにするために支持層を作製し, ノズルの高さを変えながら積層する. 二重曲面を有するサンドイッチパネルの例.

(4) *Constr. Building Mater.* **2018**, *165*, 218-231.

鉄筋の補強材を入れる方法の提案. RC 部材のセグメントを作製して補強鉄筋を外付けする.

(5) *Acta Astronaut.* **2014**, *93*, 430-450.

月面有人拠点への 3DP 技術の適用可能性を検討. 大気圧程度まで加圧された居住空間を保護するための外殻コンクリート. 要求される力学的・熱力学的性能を確保しつつ打設量を最小化するため独立気泡構造を提案. 結合材噴射方式を採用している.

論文としてでてくるものは材料の話題が多く, 構造のものは少ない.

→補強材としては繊維を含む?

繊維を含むものは多いが, 低添加である.

→前回紹介されていたスペイン, オランダの自転車道について論文はあるか.

HP での紹介のみ. 文献は出ていない. ネットに情報は出てくるが, 出来たことの報告のみで詳細はない. ウェブ情報の吸い上げは, 信憑性などの線引が難しい.

二重サンドイッチ構造は何に使おうとしているのか

→建築分野の意匠性では. 従来法では凸凹が目立つ構造ため, デモンストレーションとしているのではないか.

5.2 材料 WG の報告

第 1 回の資料から文献をピックアップして調査を分担している

5.2.1 資料 2-5

論文(1) *Acr. Civil Mech. Eng.* **2018**, *18*, 311-319.

シンガポール NTU の検討状況. チキソトロピー性, 粘性, および圧縮・曲げ強度を測定した. ジオポリマー系モルタル, セメントモルタルを扱った. チキソトロピー性の解析はレオメーター回転式粘度計を用いた. トルクと回転数の関係. フローカーブで囲まれる部分をチキソトロピー性とした.

レオロジー特性のまとめとして, 降伏せん断応力, チキソトロピー性, 塑性粘度の間に有意な相関は見られなかった.

力学性能については, ほぼすべてのシリーズに於いて, 材齢 7 日から 28 日までに優位な強度の増進が見られた.

論文(2) *J. Cleaner Prod.* **2018**, *167*, 281-288.

論文(1)を補うような情報があった。ジオポリマー系モルタル、フライアッシュとスラグ、アルカリ溶液の濃度などの情報。

レオロジー特性について、チキソトロピー性は時間とともに減少した。

チキソトロピー性の時間変化とポンプ圧送が可能なしきい値から可使時間が決定できる。

微細構造について、未反応フライアッシュの残存が見られた。

5.2.2 資料 2-7

ラフバラー大学の検討状況。2篇の論文を選択したところ使っている材料、配合は同じものであった。論文1で材料配合の最適化を図っており、論文2で力学試験から層構造の付着性および異方性を検討している。

論文(1) *Mater. Struct.* **2012**, *45*, 1221-1232.

論文(2) *Cem. Conc. Res.* **2012**, *42*, 558-566.

3DP 技術について4つの要求性能 Extrudability: 材料をノズル先端まで押し出す容易さと信頼性(押出性能), Workability: 材料のプリントしやすさとその信頼性(施工性), Buildability: 積層された硬化前の材料が変形することへの抵抗性(積層性), Open time: 上記性能を許容範囲内に保つことができる時間の長さ(可使時間)を提案している。

材料の配合最適化の結果と要求性能の評価方法を紹介。押出性能はフィラメント作製から評価、施工性はベーンせん断試験から評価、積層性はフィラメントを積層して保持できるかで評価、可使時間はベーンせん断試験を元に評価した。

5.2.3 資料 2-8

論文(1) *Automat. Constr.* **2012**, *21*, 262-268.

3DP 技術の概要をまとめた論文。方法と扱う材料、その特性の一覧を示した。

論文(2) *Cem. Conc. Res.* **2008**, *38*, 624-632.

論文(3) *Rilem Tech. Lett.* **2016**, *1*, 67-75.

積層方式でプリンティングしていくときにレオロジー特性と積層性を検討。コンクリートをビンガム流体と想定している。下の層が上の層の重量によって変形しないこと。材料の時間的な降伏値の増大と降伏値のバランスが重要である。

要求性能は世界共通で議論されているものか

→押出性能, 積層性, 可使時間の3つが共通で議論される項目

資料 2-7 と 2-8 はラフバラー大学の同じグループのようだった、要求性能などに関してガイドラインは出ているか？

→RILEM テクニカルレター(資料 2-8 の(3))など RILEM の専門委員会の中で議論されている最中である。各指標をどう評価するかは案を出し合っているようで、今年度中に何かしらの報告が出ると以前聞いたことがある。

→ラフバラー大学グループはかなり前から研究している

5.2.4 その他

BASF は、ドバイの建設に 3DP を用いるプロジェクトについて、3DP で建設し外装を仕上げる仕事を担当した。製作物は中国のウィンサンという会社が 3DP で作製した。材料にはセメント、ガラス繊維、砂、硬化剤、建設産業廃棄物を使っている。ニュースリリースに出ており、これ以上の情報はない。

また、スイスのシーカが発表した内容について調査したが、秘密保持で材料の内容は開示できないとのことであった。材料 WG で調査している文献を連絡し、材料に関しての文献を依頼した。

5.3 施工 WG の報告

5.3.1 資料 2-9

3DP 適用事例の一覧表を作成中。国別に見るとヨーロッパがほとんど。機材はロボットアームと門型、プリント方式は押出が多い。材料はセメント系がほとんどで、ネットベースの情報がほとんどである。

アメリカ Cazza 社はロボットアームのプリンタを発売している。ドバイのプロジェクトにも関与している。イギリスラフバラー大学はスカンスカ社との連携している。スペイン IAAC は 12 メートルの橋梁を 1.5 メートルの部材を組み合わせて製作した。高強度の粉末特殊材料で結合材噴射方式により製作したとのことである。

ドイツミュンヘン工科大学は結合材噴射方式の 3DP の研究開発を進めている。

- ・ 情報ソースも記載するとよい。
- ・ 材料情報も一覧表に追加する。
- ・ 将来像として提案するための分類軸を作成して整理すると、分布が把握できるのではないか
- ・ 施工と材料は文献が重なってくるのが想定される
- ・ 結合材噴射のメリット・デメリットなど整理できれば、解決策も提案できるのではないか
- ・ 3DP が可能な材料についての文献は出てくるが、コンクリート産業、建設業の革新的なものにつなげていくにはどうしたらいいか

6. JCI 年次大会での発表報告

6.1 資料 2-11

ドレスデン工科大での研究であり、繊維補強 SHCC を配合した検討結果である。

連続的に押し出せて、形状を保持できるような材料を作製し、壁試験体を切り出し、一軸引張試験を実施した。3DP と打ち込みでは両者に差はなく、同等の性能が得られた。

(当日の質疑)

質問 1：使用しているポンプは？

質問 2：フレッシュ性状、圧送性状と形状安定性、積層性は相関があるか。どのような材料を用いたか？

→ドレスデンでは繊維なしモルタルでこれまでやっていたが、小倉委員の提案で繊維を試した。空隙が減った。繊維の配向性が効果を出した。

ドレスデンの研究内容は先進的か？

→プリンタ自体は一般的なものだが基礎的な研究は進んでいる印象。大型の構造は作製していない。ドイツの材料メーカー、建設会社などと組んで、国費(科研費)を使って進めていた。ドイツの産学官の連携。民間と連携した例が非常に多い、ラフバラー大学、アイントホーフェン大学もそうである。民間と連携しているため、民間からの留学が受け入れられない場合もあった。

6.2 資料 2-12

3DP 用のモルタル材料の発表。要求性能を 4 点あげた。4 つの性能を満たすためモルタルフローの値を指標に開発した。積層するプリンティングマシンを開発し、硬化物性に関する基礎検討を行った。積層試験体では、積層面に対する載荷方向によって曲げ靱性に異方性が見られた。打ち重ねの時間間隔、温度影響について今後検討する予定である。

(当日の質疑)

質問 1：将来どういうところに使っていくのか

質問 2：「閉塞」の意味

→モルタル材料なので砂が入っている。ノズル内でロッキングすることを閉塞と表現している。

質問 3：3DP とわずに付加積層というタイトルとした理由は？(高田)

→3DP はいろんな方式があるが、付加積層はそのうちの一つの方法で、付加という言葉自体は特許庁の 3D プリンティング方式の分類で制定されている用語である。(木ノ村)

7. 3DP の将来性について（フリーディスカッション）

- 現場のコンクリート工事がガラッと変わるようなイメージ。コンクリート工事は昔から変わっていない。成熟した方法。個別のところでは、締固め不要のコンクリート、鉄筋の新素材、型枠の大型化など、進展はあるが、革新的なところを 3DP が担うのではないか。IoT, AI と新しい情報技術の進歩がある。生産性向上、施工者の安全、死亡災害をなくすことが期待されている。人型ロボットの採用よりも 3DP を含めたデジタルファブリケーションには生産性向上を含めた将来像を考えていきたい。現場打ち、プレキャスト、組み合わせ、これまでにないやり方などあるかと思う。
- 大学という教育現場で感じていることとして、3DP 技術には学生を惹きつける魅力がある。若い人たちに魅力的なものとして提案し、コンクリート分野に興味を持ってもらいたい。3DP だからこそできる新しい価値について議論したい。空間、価値、造形など多くの可能性がある。
- 新しいものを求めていくなら、歩み寄る事が大事である。材料、施工の革新を求めれば今までの技術で使えないものも出てくるし、職人、機械も現在のそのままの状態では使えないが、適材適所の対応をしていく必要がある。
- 会社の方針として本格的な開発はまだであるが、省人化無人化だけでなく 3DP でしかできないこと、例えば、型枠の制限のないものを作っていきたいと考えている。繊維をたくさん入れてもうまく施工できるような特徴をうまく使えるのではないか。
- 会社の方針として開発を進めている段階ではない。機械を専門として参画しており、制御や造形の精度を出すための方法に興味がある。表面処理、壁紙も自動化することもできるのではないか。
- 社内で設計のこだわりがある設計者が斬新なデザインを出してくることに對して、製作側が応えられていない状態もある。3DP で対応できればと考えている。材料、構造形式に興味がある。
- 3DP に取り組み始めると、どこに使えるのか、何の役に立つのかという問題に直面する。これらを想像しながらターゲットを決めて明確化していく必要性を感じる。例えば、車の自動運転技術が参考事例になるのではないか。いつまでに何をやるか、今何が足りないかといったマイルストーンに倣い、意識の共有があると良いのではないか。
- 国際的にも 3DP が出てきていて注目している。土木での使い方を探索する場合、現在

の現場での課題である型枠作製の職人不足と型枠にかかるコストの問題を解決できるのではと期待している。

- ・ 小型の住居といったアプリケーションが出てきている。災害時の仮設住宅が早くできるなどといった段階まで開発が進むことを期待している。
- ・ 混和剤メーカーとして新しい技術である 3DP に注目している。添加剤のポリカルボン酸は自由な形状を作製するのに適している背景があり、3DP にも適材適所の材料を決めないといけないと考えている。
- ・ 施工、材料を元に価値連鎖を分析し、全く新しい技術としての可能性を 3DP に期待している。
- ・ 材料面での課題を解決するために検討を進めたいと考えている。
- ・ 空間表現や災害時対応などの可能性を感じている。新しいものを社会に送るときの役割を全うし、本委員会に役立てればと考えている。
- ・ 3DP がどこに使えるだろうかという課題に対して、あらかじめ適用先を決めて技術で乗り越えていく方法もあると考えている。革新技术としてインパクトを残すには施工が難しいところを選んで挑戦する手もあるかと思う。大学ではわからない、施工の困難な箇所の具体例を共有してもらって検討していきたい。
- ・ セメント材料の可能性を高めていくモチベーション。材料特性と可能性。セメント・コンクリートが他産業で使われるようになるようなことも踏まえて本委員会の成果をまとめていければと考えている。

8. 今後の予定

- ・ 次回の全体委員会は 9 月 5 日（水）14 時から開催する。
- ・ 次回までに A4 一枚で図、文章など様式自由で 3DP の将来像を作成する。

以上