

論文 3D プリンティングに適したひずみ硬化型セメント複合材料の開発

小倉 大季*¹・Venkatesh N. Nerella*²・Viktor Mechtcherine*³

要旨： 3D プリンティングに適したひずみ硬化型セメント複合材料を開発した。開発した材料は、3D プリンティング装置から連続的に押し出すことができ、高さ 100 mm の試験体を積層造形により作製することができる。3D プリンティングで作製した試験体は、引張応力下において複数微細ひび割れ特性とひずみ硬化特性を呈し、その引張終局ひずみは、型枠に打ち込んで作製した試験体よりも高い値を示した。

キーワード： 3D プリンティング, 付加製造, 繊維補強セメント複合材料, ひずみ硬化型セメント複合材料

1. はじめに

近年、海外を中心に建設スケールの 3D プリンティング (Additive Manufacturing) 技術の研究開発が進められている¹⁾。3D プリンティングとは、立体物を表すデータをもとにして、スライスされた 2 次元の断面形状をコンピュータで計算し、この結果をもとに材料を積層造形して立体形状を作製する技術を指す。建設分野の 3D プリンティング技術としては、たとえば、層ごとにセメント系材料を積層して、部材を自動施工する技術がある。当該技術は、自由な形状の部材を作製できるだけでなく、型枠工なしでのコンクリート構造物の施工への展開なども見込まれ、様々な可能性が期待できると考えられている。

この 3D プリンティング技術を用いた施工においては、補強のための鉄筋を配筋することが難しいため、従来の鉄筋補強の代替となりうる補強法が必要となる。これまでに、いくつかの補強法が提案されているが¹⁾、その一つに短繊維を使用した補強がある。たとえば、Le *et al.*^{2),3)} は収縮を抑えるために、Hambach *et al.*⁴⁾ は曲げ強度を高めるために、繊維補強セメント複合材料を使用したプリンティングを行い、その効果を評価している。繊維補強セメント複合材料をプリント材料として用いた場合、ノズルから材料が押し出される過程で、繊維の配向が変化することを示した研究もある⁵⁾。しかしながら、3D プリンティングに繊維補強セメント複合材料を適用した研究は限られており、繊維の配向性の影響も含めて、その力学性能を定量評価した例は少ない。また、著者の知るかぎり、ひずみ硬化型セメント複合材料 (Strain-Hardening Cementitious Composites) を 3D プリンティングに適用した研究はない。

そこで、本研究では 3D プリンティング技術で作製する部材の力学性能を高める方法として、ひずみ硬化型セメント複合材料をプリント材料に用いることを提案し、



図-1 使用した 3D プリンティング装置

3D プリンティングに適したひずみ硬化型セメント複合材料の開発を試みた。そして、その力学性能を調べるために、型枠に打ち込んだ試験体とともに一軸引張試験を行い、引張特性を評価した。

2. プリンティング装置

図-1 に、本研究で使用した 3D プリンティング装置を示す。本装置は、フレッシュ状態のセメント系材料をノズルから押し出して、積層造形できる 3D プリンタである。先端のノズルにポンプが直結し、ポンプには材料投入用のバケットが接続された構造となっている。ノズルの吐出口は 20×30 mm のサイズで、ポンプには粒径 2 mm の材料までを移送できる一軸偏心ねじポンプを用いた。バケットに投入されたセメント系材料は、このポンプによってノズル先端まで移送される。

3. 実験概要

3.1 配合と使用材料

本研究では、水結合材比 (W/B) を 0.22 および 0.24 とした表-1 の配合を対象にして実験を行った。結合材

*1 清水建設 (株) 技術研究所 社会システム技術センター研究員 博士(工学) (正会員)

*2 Technische Universität Dresden, Institute of Construction Materials, M.Sc.

*3 Technische Universität Dresden, Institute of Construction Materials, Professor, Dr.-Ing.

表一 1 使用した配合

| 配合名 | W/B | S/B | 繊維混入率 V_f (vol%) |
|-----|------|------|-----------------------|
| A | 0.24 | 1.20 | 0.3 |
| B | 0.24 | 0.20 | 1.5 |
| C | 0.24 | 0.30 | 1.5 |
| D | 0.22 | 0.20 | 1.5 |

(B) の内訳は、質量比 75%のセメント、15%のシリカフューム、10%のフライアッシュである。セメントには、Portland-composite cement (CEM II/A-M (S-LL) 52.5R)を用いた。フライアッシュとシリカフュームは、材料の粘性や凝集性を高めるために使用した。シリカフュームについては、固形分 50%のシリカフュームスラリー（シリカフュームのブレン値：15~35 m²/g）の形態で添加した。細骨材（S）には、最大粒径 1.0 mm の砂を用いた。混和剤は、いずれの配合も高性能減水剤（ポリカルボン酸系、密度 1.06 g/cm³）を結合材質量に対して 2.0%混入した。繊維については、Kunieda *et al.*⁶⁾の研究を参考にして、長さ 6 mm のポリエチレン繊維（直径：0.012 mm、密度：0.97 g/cm³）を用いた。ミルシートによる繊維の引張破断強度は、2800 MPa である。

練混ぜには、容量 20 リットルの一軸パン型ミキサーを使用した。

3.2 材料のフレッシュ性状の評価方法

セメント系材料を 3D プリントする場合に要求される材料の性能は、従来の打込みによる施工において求められる性能とは異なる。たとえば Le *et al.*は、3D プリンティングを実現するために求められる主要な性能として以下を挙げている²⁾。

- 押出し性：供給システムで材料をノズル先端まで圧送するときの容易さ
- プリントビリティ：押出し装置で材料を積層するときの容易さ
- 形状安定性：積層された硬化前の材料が自重で変形することに対するの抵抗性

なお、3 番目の性能のことを Le *et al.*は buildability と定義しているが、本研究では形状安定性と呼ぶ。

上記の性能を評価するには、いくつかの方法がある。たとえば Perrot *et al.*⁷⁾は、フレッシュ状態の材料に荷重を与えたときの変位を計測し、材料の形状安定性を評価している。また、Kazemian *et al.*⁸⁾は、材料を実際に積層して形状安定性を評価する方法を提案している。しかし、これらの方法は載荷試験機を必要とするなど、必ずしも簡便な方法ではない。一方、従来の試験方法であるフロー試験の結果から、材料のプリントビリティや形状安定

性に対して一定の評価ができることを示唆する既往研究もある^{8),9)}。

そこで本研究では、プリント試験を行う前に、簡易的に材料のフレッシュ性状を評価するため、フロー試験を用いた。フロー試験は、JIS R 5201:2015¹⁰⁾に従い、以下の手順で行った。

- 試料をフローコーン（下部内径 100 mm、高さ 60 mm）に 2 層にわけて詰める。
- フローコーンを垂直方向に取り去り、モルタルが広がった後の直径を測定する。
- 15 秒間に 15 回の落下運動を与えた後、モルタルの直径を計測する。

本研究では、この結果から、落下運動の前後におけるフロー値の変化率を求めた。そして、この変化率が小さい配合のほうが材料の粘性や凝集性が高いものとみなし、形状安定性やプリントビリティが優れた配合であると判断することにした。なお、フロー試験は、材料の練上がりから 20 分後に行った。

3.3 試験体の作製

フロー試験で選定した配合は、3D プリンティング装置を使用したプリント試験に供して、材料の形状安定性や押出し性などの確認を行った。その後、3D プリンティング装置で材料を積層造形して壁形状の試験体（以下、プリント試験体と呼ぶ）を作製した。また、同様の配合を用いて、型枠に打込む方法でも試験体（以下、打込み試験体と呼ぶ）を作製した。

(1) プリント試験体

プリント試験体は、長さ 1000 mm、幅 30 mm、高さ 100 mm の壁形状である。所定のサイズの試験体を作製するために、材料を 7 層プリントした。プリントは、材料の練上がりから 20 分経過後に開始した。1 層のプリントが終了してから次の層のプリントを開始するまでの間隔が 1 分となるように材料を積層した。プリント速度は、50 mm/sec に設定した。プリント後は、表面の整形や振動台による締固めなどは行わずに、そのままの状態養生を行った。

(2) 型枠への打込みで作製した試験体

打込み試験体は、一軸引張試験用の試験体として、長さ 250 mm、幅 24 mm（試験区間内）、奥行き 40 mm のダンベル型の試験体を 4 体作製した。圧縮試験用の試験体としては、100 mm の角柱試験体を 3 体作製した。

型枠は、鋼製の型枠を使用した。型枠へは、試料を 2 層に分けて詰めた。1 層目を型枠の高さの 1/2 まで詰め、突き棒を用いて 15 回突いた。その後、2 層目を型枠の上層まで詰めて、同様に突き棒を用いて 15 回突いた。内部振動機は、繊維の配向に偏りが生じる可能性があったため、使用しなかった。

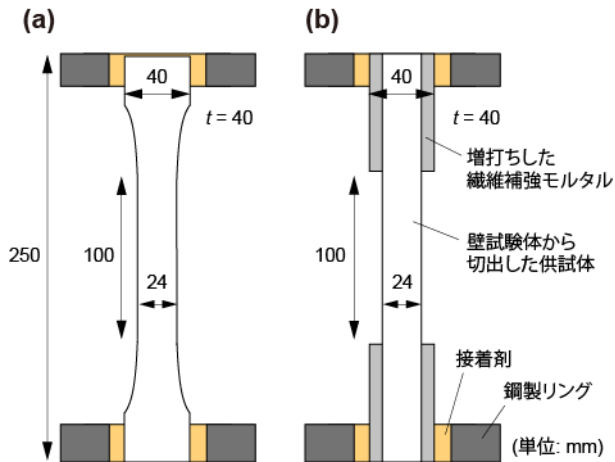


図-2 一軸引張試験の概略図：

(a) 打込み試験体；(b) プリント試験体



図-3 一軸引張試験のセットアップ

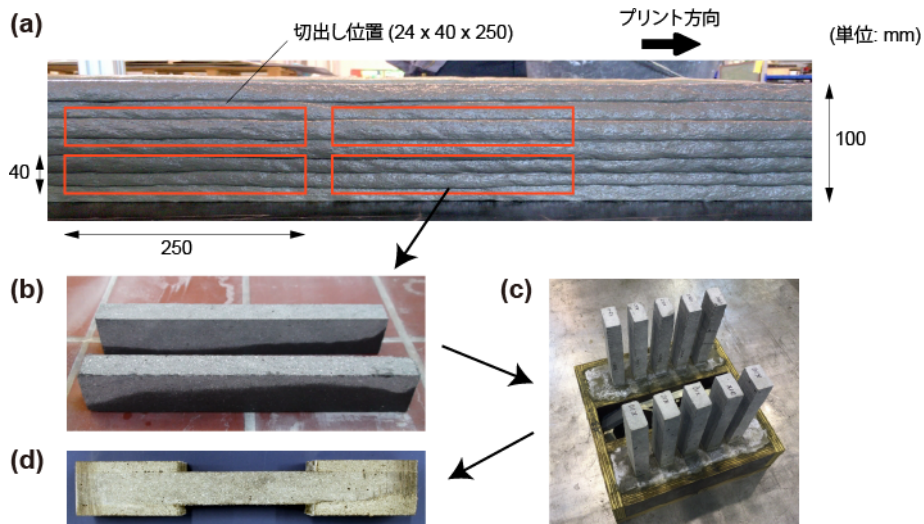


図-4 一軸引張試験のための準備：

(a) 壁試験体からの切出し位置；(b) 切り出した試験体；(c) 試験体端部の補強；(d) 補強後の試験体

(3) 養生方法

すべての試験体は、プリントおよび打込みの完了後から24時間後まで、水分が逸散しないように養生して実験室に静置した。その後、水中にて7日間養生し、恒温室（温度20℃、湿度65%RHの環境下）に移動させた。材齢23日の時点で恒温室から試験体を取り出し、実験室内にて载荷試験の準備を行った。圧縮試験については材齢28日に、一軸引張試験については材齢27～28日に、試験を行った。

3.4 力学試験

一軸引張試験には、図-2のように試験区間の断面が24×40 mmである試験体を用いた。载荷は、容量100 kNの試験機を用いて、試験速度0.05 mm/secの変位制御で行

った。両端固定の境界条件で試験を行うために、試験体の両端部に20 mmの鋼製リングを接着し、このリングを試験機にボルトで固定した。試験区間は、試験体中央の100 mmとした。試験区間内の変位を計測するために、図-3のように変位計を試験体の両側に配置した。

一軸引張試験に供した試験体は、打込み試験体の場合、先に述べたとおりダンベル形状を用いた。一方、プリント試験体の場合、図-4のように壁試験体から切り出した試験体を用いた。このとき、ダンベル形状に切断することが難しかったため、まずは長さ250 mm、幅24 mm、奥行き40 mmの直方体（図-4(b)）を切り出して、その後試験体の両端を補強した。端部の補強は、図-4(c)のように繊維補強モルタル（W/B=0.20、繊維混入率2.0

表-2 練上がりから 20 分後のフロー値

| 配合名 | フロー値 (mm) | | フロー値の 変化率 ($F_1/F_0 - 1$) |
|-----|---------------|---------------|-----------------------------------|
| | F_0 : 落下運動前 | F_1 : 落下運動後 | |
| A | 119 | 142 | 0.19 |
| B | 129 | 153 | 0.19 |
| C | 128 | 148 | 0.16 |
| D | 119 | 133 | 0.12 |

vol%) を両端部に増打ちする方法を採用した。この補強は、ひび割れの局所化が試験区間で発生するようにするための工夫である。最終的な試験体の形状は、図-4(d)のとおりである。なお、載荷試験は、この増打ちした繊維補強モルタルの材齢が 5 日の時点で行われた。

4. 実験結果

4.1 フロー試験

表-2 に、練上がりから 20 分後における各配合のフロー値を示す。落下運動を与える前のフロー値は、119～129mm の範囲であったが、15 回の落下運動を与えた後のモルタルの広がり方は、それぞれの配合で異なった。配合 A と D を比較すると、落下運動を与える前のフロー値は同等であるが、落下運動を与えた後のフロー値は、配合 A のほうが大きい。フロー値の変化率は、配合 D が 12% となり、ほかと比べて小さい値を示した。

3 章で述べたように、本研究では、このフロー値の変化率が小さい配合のほうが材料の粘性や凝集性が高く、プリンティングに適した配合であると判断した。この評価から、配合 D をプリント試験に供することにした。

4.2 プリント試験

図-5 に、配合 D の材料を 3D プリンティング装置で積層している状況を示す。材料は、ポンプで閉塞することなく、連続してノズルから押し出され、適切にプリントできていることがわかる。プリントされた材料は、材料分離することなく、表面に欠陥などは認められなかった。また、プリントされた層の縁は、角張った形状となった。これらの結果から、配合 D の繊維補強セメント複合材料は、押し出し性やプリンタビリティを満足する材料であることがわかる。

図-6 は、配合 D を使用して、最終的に作製した壁試験体である。7 層のプリントを行った後も、下層が大きく変形することなく形状は保持され、試験体が倒壊することはなかった。この結果から、上層からの荷重を受けても形状を保持できる性能（形状安定性）についても、本材料は要求性能を満足したといえる。なお、材齢 24 日の時点で、作製した壁試験体の表面観察を行ったとこ



図-5 作動中の 3D プリンティング装置



図-6 3D プリンティングで作製した壁試験体

表-3 力学試験の結果

| | ひび割れ 発生強度 (MPa) | 引張強度 (MPa) | 引張終局 ひずみ (%) | 圧縮強度 (MPa) |
|---------|-----------------------|---------------|--------------------|---------------|
| プリント試験体 | 4.25 (0.03) | 5.66 (0.02) | 3.21 (0.05) | - |
| 打込み試験体 | 4.63 (0.09) | 6.32 (0.04) | 1.67 (0.16) | 104 (0.02) |

* (): 変動係数

ろ、ひび割れは確認されなかった。また、壁試験体から力学試験用の試験体を切り出すときに、プリントした各層の層間で壊れることがなかったため、層間の付着は、脆弱ではないと判断できる。

4.3 力学試験

表-3 に、プリント試験体と打込み試験体のひび割れ発生強度、引張強度および圧縮強度をまとめて示す。ひび割れ発生強度は、一軸引張試験から得られた引張応力-ひずみ関係において、線形性が失われたときの応力から算出した。括弧内に示した値は、各強度の変動係数である。

図-7 に、一軸引張試験から得られた応力-ひずみ関係を示す。ひずみは、試験区間で計測した変位の平均値を試験区間の長さ 100mm で除した値である。いずれの試験体も初期ひび割れ発生後に擬似ひずみ硬化特性を示した。プリント試験体においては 3%程度まで、打込み試験体においては 1.5%程度までひずみ硬化を呈しながら変形していることがわかる。なお、図-8 は、それぞれのケースにおける代表的な載荷初期の引張応力-ひ

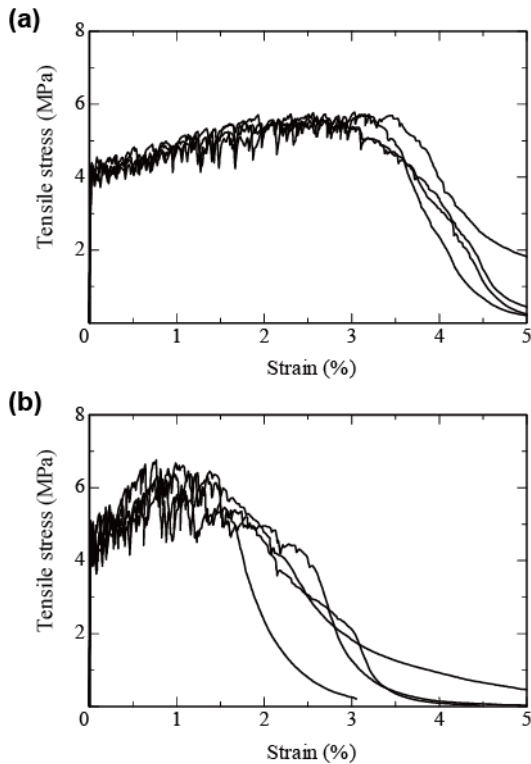


図-7 引張応力-ひずみ関係：
(a) プリント試験体；(b) 打込み試験体

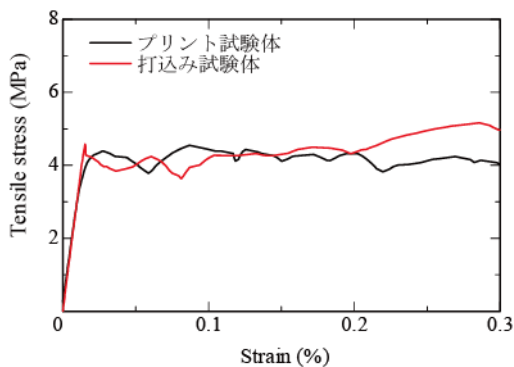


図-8 ひずみ 0.3%までの引張応力-ひずみ関係

ずみ関係であるが、弾性係数や初期ひび割れ発生後の挙動に顕著な違いは認められなかった。

表-3 には、引張応力-ひずみ関係における応力が大幅に低下したときのひずみ（以下、引張終局ひずみ）についても整理した。プリント試験体と打込み試験体を比較すると、プリント試験体のほうが終局ひずみの値は大きく、変動係数は小さい。

図-9 に、終局時のひび割れ発生状況を示す。プリント試験体は、試験区間内の全体にひび割れが分散しているものが多い。一方、型枠への打込みで作製した試験体では、複数ひび割れが観察されるものの、その範囲は限られている傾向にあった。この傾向は、4 体の試験体す

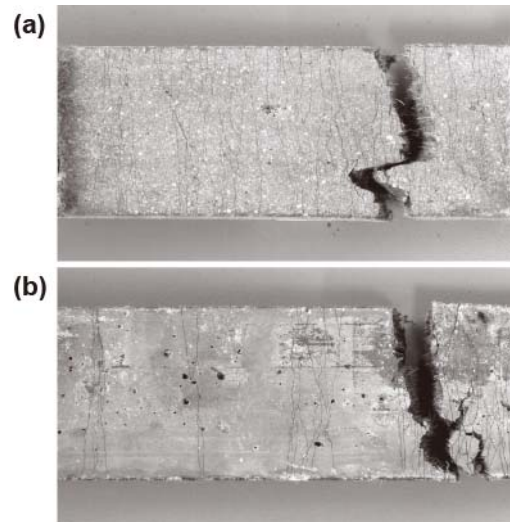


図-9 荷後のひび割れ状況：
(a) プリント試験体；(b) 打込み試験体

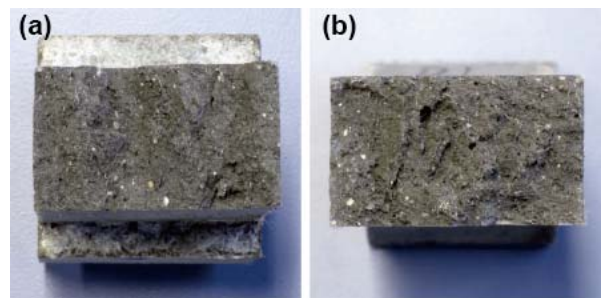


図-10 荷後の破断面：
(a) プリント試験体；(b) 打込み試験体

べてにおいて確認された。

図-10 は、荷後の破断面である。繊維は、プリント試験体と打込み試験体のいずれも、一様に分布していることが確認された。破断面で観察できる空隙については、プリント試験体のほうが少ない傾向が認められた。既往の研究³⁾においても、材料押し出し方式の 3D プリンティングで試験体を作製した場合、空隙が減少することが示されており、本試験でも同様の結果が得られたことになる。これは、ポンプで材料を押し出す過程で締固めの効果が働いたことが要因であると推察される。

また、目視による破断面の観察からは、プリント試験体において、ひび割れを直交する方向（押し出し方向と一致）に配向した繊維が多い傾向が定性的に認められた。この傾向は、繊維補強モルタルを使用した既往研究^{4),11)}で報告されている結果と符合する。先に述べたとおり、本研究では、粒径 2mm 以上の材料を通すことができないポンプを用いて材料を移送したため、材料の押し出し方向に繊維が配向した可能性が考えられる。

以上のことから、終局ひずみが型枠への打込みで作製した試験体よりも大きくなった要因として、(1) 試験体中の空隙が減少したこと、(2) プリントによって繊維の配向が整ったこと、が挙げられるが、詳細は今後のさらなる分析が必要となる。なお、繊維を離散化した数値解析による既往の検討では、繊維の配向状態が3次元の配向から2次元の配向に変化するほど、終局ひずみが大きくなることが示されている¹²⁾。この結果は、繊維配向が終局ひずみに影響を与えることを示唆するものである。

5. まとめ

本研究では、3Dプリンティング技術で作製する部材の力学性能を高める方法として、ひずみ硬化型セメント複合材料をプリント材料に用いることを提案し、3Dプリンティングに適したひずみ硬化型セメント複合材料の開発を試みた。開発した材料は、3Dプリンティング装置から連続的に押し出すことができ、高さ100 mmの試験体を積層造形により作製することができることを示した。また、プリントした試験体が引張応力下で複数微細ひび割れ特性とひずみ硬化特性を呈すること、型枠に打ち込んで作製した試験体よりも終局ひずみが大きくなることを示した。

積層間の力学特性（付着特性）を明らかにするためには、さらなる研究が必要であるが、本研究で示した結果は、鉄筋を配筋することが難しい3Dプリント部材の引張性能を向上するために役立つと考えられる。

参考文献

- 1) Perkins, I. and Skitmore, M.: Three-dimensional printing in the construction industry: a review, *International Journal of Construction Management*, Vol. 15, No. 1, pp. 1–9, 2015.
- 2) Le, T. T., Austin, S. A., Lim, S., Buswell, R. A., Gibb, A. G. F. and Thorpe, T.: Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete, *Materials and Structures*, Vol. 45, No. 8, pp. 1221–1232, 2012.
- 3) Le, T. T., Austin, S. A., Lim, S., Buswell, R. A., Law, R., Gibb, A. G. F. and Thorpe, T.: Hardened properties of high-performance printing concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 42, No. 3, pp. 558–566, 2012.
- 4) Hambach, M., Möller, H., Neumann, T. and Volkmer, D.: Portland cement paste with aligned carbon fibers exhibiting exceptionally high flexural strength (>100MPa), *Cement and Concrete Research*, Vol. 89, pp. 80–86, 2016.
- 5) Hambach, M. and Volkmer, D.: Properties of 3D-printed fiber-reinforced Portland cement paste, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 79, pp. 62–70, 2017.
- 6) Kunieda, M., Denarie, E., Brühwiler, E. and Nakamura, H.: Challenges for strain hardening cementitious composites – Deformability versus matrix density, *Proceedings of the Fifth International RILEM Workshop on HPRCC*, pp. 31–38, 2007.
- 7) Perrot, A., Rangeard, D. and Pierre, A.: Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques, *Materials and Structures*, Vol. 49, No. 4, pp. 1213–1220, 2016.
- 8) Kazemian, A., Yuan, X., Cochran, E. and Khoshnevis, B.: Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture, *Construction and Building Materials*, Vol. 145, pp. 639–647, 2017.
- 9) Rushing, T. S., Ghassan, A., Eick, B., Burroughs, J., Shannon, J., Barna, L. and Case, M.: Investigation of concrete mixtures for additive construction, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 23, No. 1, pp. 74–80, 2017.
- 10) 日本工業規格: セメントの物理試験方法 (JIS R 5201:2015), 2015.
- 11) Shen, B., Hubler, M., Paulino, G. H. and Struble, L. J.: Functionally-graded fiber-reinforced cement composite: Processing, microstructure, and properties, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 30, No. 8, pp. 663–673, 2008.
- 12) Kunieda, M., Ogura, H., Ueda, N. and Nakamura, H.: Tensile fracture process of strain hardening cementitious composites by means of three-dimensional meso-scale analysis, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 33, No. 9, pp. 956–965, 2011.