



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	三次元積層過程が支配するセメント系硬化体の力学的異方性と空隙の位相幾何学的連結性
Author(s)	中瀬, 皓太
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第17016号
Issue Date	2026-06-30
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k17016
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/100069
Type	doctoral thesis
File Information	Kota_Nakase_abstract.pdf, 論文内容の要旨 https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（工学） 氏名 中瀬 皓太

学 位 論 文 題 名

三次元積層過程が支配するセメント系硬化体の力学的異方性と空隙の位相幾何学的連結性
(Mechanical anisotropy and topological void connectivity of hardened cementitious materials
governed by additive manufacturing process)

建設業において、セメント系材料を吐出材料として用いた 3D コンクリートプリンティングが、従来の流込み施工と全く異なる施工方法により、省人化および省力化に資する技術として耳目を集めている。型枠を使用せずに三次元空間に直接材料を吐出して堆積させることから、革新的な構造形式や最適な材料配置を達成することができ、施工の自動化に留まらない、空間的な造形自由度と材料特性の制御を両立する高次の建設技術となることが期待される。このとき、3D プリンティング技術により造形されたコンクリート構造物 (3DP コンクリート) は、積層造形プロセスにおける条件 (積層パラメータ) によって、吐出材料間に積層界面が形成され、特異な空隙構造を有することになる。すなわち、フィラメント間に残置する残存空隙およびフィラメント内部に発生する内部空隙である。積層界面、残存空隙および内部空隙は 3DP コンクリートにおける重要な内部構造の構成要素であるため、力学特性および耐久性に及ぼす影響を評価することは不可欠である。本論文では、積層パラメータに伴う積層界面と残存空隙の空間的分布が破壊挙動に及ぼす影響を明らかにし、吐出プロセスに基づく内部空隙の幾何学的およびトポロジック的变化を解明することを目的とした。

本論文は、全 6 章により構成されており、各章の概要を以下に示す。

第 1 章では、序論として、3D コンクリートプリンティング分野における社会的背景および学術的背景、ならびに既往の研究を整理し、取り組むべき課題を明確にした上で、本論文の目的を示した。

第 2 章では、残存空隙が発生する 3DP コンクリートについて、積層経路に起因する残存空隙構造を可視化し、力学特性に及ぼす影響を評価した。特に、円柱供試体の圧縮応力下の挙動を調べるために、全ての層で同一方向に積層した場合と、直交する二方向に交互に積層した場合の残存空隙の空間的配置を X 線 CT 法により可視化した。加えて、圧縮載荷前後の供試体表面の 3D スキャンにより、残存空隙構造に起因する異方的な変形挙動を解明した。曲げ応力下に対しては、角柱供試体を用いて、供試体軸方向に平行に積層した場合、垂直に積層した場合、および交互に積層した場合の積層経路からひび割れ進展挙動を検討した。このとき、三点曲げ試験時に脆性的に発生して進展するひび割れに対し、ハイスピードカメラを用いたデジタル画像相関法 (DIC) によって、積層界面および残存空隙配置に起因するひずみ局所化領域を可視化した。これにより、3DP コンクリートにおける残存空隙は、流込みコンクリートと比較して著しく耐荷力を低下させることが明らかとなった。また、残存空隙がひび割れ発生箇所や進展経路となるため、適切な積層パラメータ選定によって、残存空隙を発生させない、あるいは逆説的に残存空隙の発生および配置を制御することが可能であることが示唆された。これにより、積層経路設計に基づく力学性能の制御が可能であることを示した。

第 3 章では、残存空隙が発生しない 3DP コンクリートを対象に、積層界面における微小ひび割れをアコースティック・エミッション (AE) 法によって検出および定量化した。これにより、3DP コンクリートの力学的異方性におけるひび割れ発生および進展メカニズムを解明した。すなわち、既往の研究により基本的な破壊性状として分類される trans-layer 破壊と inter-layer 破壊において、

AE 法と DIC を統合した手法によってひび割れの発生および進展挙動を評価した。このとき、AE 法の位置標定における不確実性を確率密度関数として考慮し、DIC におけるひび割れ幅変化と統合することで、ひび割れ開口における AE 発生挙動とひび割れ幅時間履歴の関係を定量化した。これにより、フィラメントを割裂し、積層界面に垂直にひび割れが進展する trans-layer 破壊では、ひび割れの開口初期から多数の AE が発生し、ひび割れ発生に高いエネルギーが必要であることが明らかとなった。一方で、フィラメント接着面で剥離し、積層界面に沿ってひび割れが進展する inter-layer 破壊では、ひび割れ開口初期において、ひび割れ幅が増加する一方で AE がほとんど発生せず、ひび割れ開口にほとんどエネルギーを必要としないことが分かった。これにより、3DP コンクリートにおける力学的異方性は、積層界面配置に基づくひび割れ開口に対するエネルギー消費プロセスの違いに起因することが明らかとなった。

第 4 章では、急増する 3DP コンクリート構造物の長期耐久性の検討において、今後重要となる内部空隙に対して、吐出プロセスが内部空隙の幾何学的変化およびトポロジー的变化に及ぼす影響を評価した。3DP コンクリートの耐久性においては、多孔質な積層界面が劣化因子の侵入経路となることが懸念される一方で、積層界面の品質向上に対する種々の対策によって、積層界面は多孔質な構造を有さず、積層界面で一体化した構造が達成される。しかしながら、内部空隙は、流込みコンクリートにおける気泡および空隙に相当し、その発生は不可避である。本章では、混和剤添加および吐出条件に基づく内部空隙の幾何学的変化を評価した。これにより、Air entrained 効果を有する混和剤により連行された気泡は、吐出プロセスによって、フレッシュ材料内部を移動および接近し、合体することが分かった。また、吐出条件により複数の空隙の合体挙動に差異が認められた。加えて、内部空隙の幾何学的変化に伴うグローバルな内部空隙構造の変化を評価するために、トポロジカルデータ解析手法であるパーシステントホモロジー (PH) を適用した。今後、力学性能および耐久性との関連を検討する必要があるものの、PH 解析によって、吐出プロセスに起因する内部空隙構造のトポロジー的特徴を定量化することが可能であり、耐久性における支配的な内部空隙構造を特定しうることを示した。

第 5 章では、著しい力学性能低下を招く残存空隙の発生を検出するために、硬化した 3DP コンクリートの内部構造を可視化する手法として、弾性波トモグラフィ法の適用可能性を調べた。残存空隙の発生を制御した 3DP コンクリートに対して、弾性波トモグラフィ法を適用し、残存空隙の発生に伴う弾性波伝搬速度の低下を評価した。これにより、弾性波トモグラフィ法により残存空隙を検出することが可能であることを示した。ただし、入力する弾性波によって、検出可能な残存空隙サイズが変化すると考えられ、適切な弾性波入力が必要であることが示唆された。加えて、圧縮応力条件下におけるひび割れの進展に対して弾性波トモグラフィ法を適用することで、弾性波伝搬速度分布の相対変化によって劣化進行を検出可能であることが明らかとなった。

第 6 章では、本研究により得られた知見を整理するとともに、今後の検討課題を総括した。本研究を通じて、積層パラメータにより変化する内部構造の空間形成メカニズムおよび 3DP コンクリートの特性に及ぼす影響を明らかにした。本研究で得られた知見を基盤とし、3D コンクリートプリンティングを高次の建設技術とするために、要求性能を満足するための最適な積層パラメータを選定する逆解析的なアプローチが今後の検討課題である。