



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_review.pdf, 審査の要旨 https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/



学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士 (工学) 氏名 中瀬 皓太

審査担当者 主 査 教 授 杉山 隆文
副 査 教 授 松本 高志
副 査 教 授 長井 宏平
副 査 准教授 橋本 勝文

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)

3D プリンティング技術として知られる付加製造技術は、省人化、省力化、施工の自動化、および材料配置の最適化を実現する新たな建設技術として、次世代のコンクリート構造物の構築において普及が期待されている。従来の流込み工法で使用される型枠が不要となり、セメント系印刷材料を三次元空間に直接吐出および逐次積層させることで構造物を造形する。このときその積層過程により、従来の流込みコンクリートとは異なる内部構造を有することになる。すなわち、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内部には、フィラメント同士の境界部分に積層界面が形成される。また、複数のフィラメントに囲まれた領域には残存空隙が生じ、フィラメント内部にも内部空隙が発生する。これらの内部構造は、使用材料や配合条件だけでなく、吐出および積層過程を含む造形プロセスにより規定され、結果として 3DP コンクリートの力学特性、破壊挙動および耐久性に影響を及ぼす。

本学位論文は、3DP コンクリートにおける造形プロセスによる内部構造の形成機構と、それに基づく性能発現の関係を明らかにすることを目的としている。特に、積層界面、残存空隙、および内部空隙を対象として、これらの空間的配置が力学的異方性、ひび割れ発生と進展を含む破壊挙動、ならびに空隙連結性の変化に及ぼす影響を明らかにしている。さらに、残存空隙を対象としたとき、硬化後の 3DP コンクリートの内部構造を非破壊で検出および可視化する手法の適用可能性を検討することで、3DP コンクリートの内部品質管理手法の確立に向けた基盤を示している。

すなわち、3DP コンクリートにおける力学的異方性は、単なる方向依存的な強度特性として理解されるものではなく、造形プロセスにより形成された内部構造の空間的配置に支配されることを示した。残存空隙については、異なる積層経路を使用して造形することで空間的配置を変化させ、X 線 CT 法、3D スキャン、およびデジタル画像相関法を用いて、圧縮および曲げ応力下の変形挙動と破壊挙動への影響を明らかにした。これにより、応力下における変形挙動およびひび割れ経路を規定する幾何学的脆弱部として作用し、破壊挙動の異方性を発現させることを示した。積層界面については、切欠きを有する 3DP コンクリート梁に対する三点曲げ試験にアコースティック・エミッション法およびデジタル画像相関法を適用し、積層界面に対して垂直にひび割れが進展するトランスレイヤー破壊と積層界面に沿ってひび割れが進展するインターレイヤー破壊を比較した。これにより、力学的異方性は破壊挙動において、ひび割れ発生における抵抗の差異とそれに伴う AE

発生挙動の対照性として顕在化することを示した。加えて、ひび割れ進展時には、積層界面が空間的配置によって、ひび割れ進展における二面的役割を果たすことを明らかにした。また、造形プロセスに起因する内部空隙の幾何学的変化を粒子形状指標によって定量化するとともに、位相データ解析であるパーシステントホモロジーを適用することで、内部空隙の空間的配置における位相幾何学的連結性として記述した。これにより、内部空隙が造形プロセスに伴って、単なる個々の幾何学的変化を示すだけでなく、空隙群としての連結性の変化であることを示すことで、3DP コンクリートの特異な空隙構造に対して新たな形成機構を明らかにした。また、硬化後の内部品質を対象として、弾性波トモグラフィ法による残存空隙の検出が可能であることを示した。

これを要するに、著者は、3DP コンクリートにおける三次元積層過程により支配される内部構造における積層界面や空隙の空間的配置と性能発現の関係に対して新しい知見を得たものであり、コンクリート工学に対して貢献するところ大なるものがある。よって、著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。