



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.pdf, 全文



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

北海道大学大学院 工学院 環境フィールド工学専攻
環境機能マテリアル工学研究室

Environmental Material Engineering Laboratory
Division of Field Engineering for the Environment
Graduate School of Engineering
Hokkaido University

中瀬 皓太

Kota Nakase

(2026 年 6 月)

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

研 究 概 要

3D プリンティング技術として知られる付加製造技術（Additive manufacturing）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、コンクリート構造物の構築においても耳目を集めている。型枠を使用せずに材料を三次元空間に直接吐出および逐次堆積（積層）させる造形過程により、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。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（3DP コンクリート）内部には、フィラメント同士の境界部分に積層界面（Layer interface）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（Inter-filament void）が生じ、フィラメント内部にも内部空隙（Intra-filament void）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。

先行研究においては、配合条件と積層パラメータに基づく内部構造の形成と局所的構造の把握、および巨視的な力学特性値との対応に主眼が置かれてきた。しかしながら、力学特性および耐久性においては、造形プロセスに起因する内部構造の形成メカニズムおよび局所的構造だけでなく、内部構造の空間的配置、さらには、その配置が力学特性値のみならず、ひび割れ発生およびその進展を含む破壊挙動に及ぼす影響を評価する視点は未だ十分ではない。加えて、内部空隙については、造形プロセスに伴う幾何学的変化や、空隙群としての構造変化を体系的に整理した例はほとんどない。同様に、硬化後の 3DP コンクリート内部を対象として、これらの内部構造を検出する品質管理手法についても、未だ十分な学術的基盤が確立されていない。

本研究では、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た。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評価した。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基盤を示すことを試みた。

その結果、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（DIC）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評価した。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（AE）法および DIC を適用し、積層界面に対して垂直にひび割れが進展する Trans-layer 破壊と積層界面に沿ってひび割れが進展する Inter-layer 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を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を示すことを明らかにし、3DP コンクリートに特異な空隙構造の形成機構に新たな理解を与えた。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。

以上より、本研究は、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対して、積層界面、残存空隙、および内部空隙として整理し、その空間的配置と性能発現の連関を統合的に示したものである。これにより、3DP コンクリートの力学的異方性および空隙構造の理解を深化させるとともに、今後の内部構造設計、破壊制御、および品質管理手法の高度化に資する学術的基盤を示した。

目 次

第 1 章 序論	1
1.1. 研究の背景	1
1.2. 既往の研究の整理と本研究の位置づけ	3
1.2.1. 吐出積層造形可能な配合設計	3
1.2.2. 3DP コンクリートの内部構造	3
(a) 積層界面 (Layer interface)	3
(b) 残存空隙 (Inter-filament void)	4
(c) 内部空隙 (Intra-filament void)	4
1.2.3. 3DP コンクリートにおける力学特性と耐久性	5
(a) 力学特性および破壊挙動	5
(b) 耐久性	6
1.2.4. 3DP コンクリートの内部構造に関わる非破壊検査手法の必要性	6
1.3. 本研究の目的	6
1.4. 本研究の構成	7
第 2 章 積層経路に起因する残存空隙構造が力学性能および破壊挙動 に及ぼす影響	10
2.1. はじめに	10
2.2. 実験概要	11
2.2.1. 使用材料と配合	11
2.2.2. 積層体の造形	11
2.2.3. 載荷試験	14
(a) 圧縮試験	14
(b) 曲げ試験	14
2.2.4. X 線 CT 法	14
2.2.5. 圧縮載荷前後の 3D スキャンによる変位分布の評価	16
2.2.6. 中央点載荷による三点曲げ試験時のデジタル画像相関法 (DIC)	17
2.3. 実験結果	18
2.3.1. 圧縮載荷試験の結果	18
(a) 内部空隙の観察	18
(b) 内部ひび割れの観察	19
(c) 圧縮載荷前後の変位分布の評価	21
2.3.2. 中央点載荷による三点曲げ試験における残存空隙の影響	22

(a)	曲げ強度への影響.....	22
(b)	高速度カメラを用いた DIC によるひずみ分布の可視化.....	23
2.4.	第 2 章のまとめ	25
 第 3 章 3DP コンクリートの力学的異方性における破壊メカニズムと 積層界面の二面的役割..... 27		
3.1.	はじめに	27
3.2.	実験概要	28
3.2.1.	Trans-layer 破壊および Inter-layer 破壊を想定した積層経路設計	28
3.2.2.	3DP コンクリートの造形	29
3.2.3.	切欠きを有する 3DP コンクリートの三点曲げ試験	30
3.2.4.	計測項目	32
(a)	アコースティック・エミッション (AE) 法.....	32
(b)	デジタル画像相関法 (DIC)	36
(c)	X 線 CT 法	37
3.3.	実験結果	37
3.3.1.	破壊挙動の評価	37
3.3.2.	フィラメント界面領域の観察	42
3.3.3.	破壊メカニズムにおける力学的異方性と積層界面の二面的役割	45
(a)	Trans-layer 破壊および Inter-layer 破壊におけるひび割れ発生挙動に対する pdAE-DIC 解析	45
(b)	Trans-layer 破壊および Inter-layer 破壊におけるひび割れ進展挙動における積層 界面の二面的役割.....	49
3.4.	考察	51
3.5.	第 3 章のまとめ	51
 第 4 章 吐出プロセスに起因する内部空隙の幾何学的およびトポロジ ー的变化..... 53		
4.1.	はじめに	53
4.2.	実験概要	54
4.2.1.	積層体の造形.....	54
4.2.2.	使用材料と配合	55
4.2.3.	X 線 CT 法	57
4.3.	解析手法	58
4.3.1.	等価空隙径と投影径に基づく幾何学的変化の評価.....	58
4.3.2.	Sphericity および Solidity に基づく幾何学的変化の評価	59
4.3.3.	パーシステントホモロジー (PH) を用いたトポロジーデータ解析 (TDA)	61

4.4. 実験結果	62
4.4.1. フィラメント断面画像の観察	62
4.4.2. 空隙径分布と硬化したフィラメント供試体の空隙率	63
4.4.3. 投影径による内部空隙の幾何学的変化の評価	64
4.4.4. 単一空隙の変形および複数空隙の合体に基づく内部空隙の幾何学的変化の評価	67
4.4.5. 内部空隙のトポロジー的变化の評価	68
4.5. 第4章のまとめ	72
 第5章 弾性波トモグラフィ法を用いた3DPコンクリート内部の残 存空隙検出	 73
5.1. はじめに	73
5.2. 実験概要	77
5.2.1. 3DPコンクリートの作製	77
5.2.2. 弾性波トモグラフィ法	79
5.2.3. 繰返し圧縮荷重およびデジタル画像相関法 (DIC)	83
5.3. 実験結果	84
5.3.1. 対象領域の表面画像による残存空隙の発生の観察	84
5.3.2. 弾性波トモグラフィ法により算出した弾性波速度分布	85
5.3.3. 圧縮荷重による劣化進行の可視化	86
5.4. 第5章のまとめ	88
 第6章 結論	 89
6.1. 各章における結論	89
6.2. 本研究の総括	92
6.3. 今後の課題と展望	93
 参考文献	 96
 謝 辞	 114

図表目次

図-1.1	3DP コンクリートにおける造形プロセスにより形成される内部構造と性能発現の連関	2
図-1.2	3DP コンクリートにおける力学的異方性（文献[31]から抜粋）	5
図-1.3	本研究の構成（a）章構成とタイトル（b）各章の相互関係	8
図-2.1	3DP コンクリートに発生する空隙	10
図-2.2	材料押出方式 3D プリンタ装置	12
図-2.3	積層経路パターン	12
図-2.4	円柱供試体および角柱供試体の採取（a）取得位置の概要（b）圧縮試験用の円柱供試体（c）曲げ試験用の角柱供試体	13
図-2.5	X 線 CT 法 の概念図	15
図-2.6	圧縮荷重前後の 3D スキャン	16
図-2.7	中央点荷重による三点曲げ試験の様子	17
図-2.8	圧縮荷重後の X 線 CT 画像（a）流込み供試体（b）条件(A)（c）条件(B)	18
図-2.9	条件(A)における残存空隙の抽出結果（a）三次元表示（b）二次元投影図（xy 断面）（c）二次元投影図（xz 断面）（d）二次元投影図（yz 断面）	19
図-2.10	条件(B)における残存空隙の抽出結果（a）三次元表示（b）二次元投影図（xy 断面）（c）二次元投影図（xz 断面）（d）二次元投影図（yz 断面）	20
図-2.11	圧縮荷重前後での 3D スキャンによる変位分布（a）条件(A)（b）条件(B)	21
図-2.12	各断面（z=5、25、45、65mm）における X 線 CT 画像と変位分布（a）条件(A)（b）条件(B)	22
図-2.13	三点曲げ試験結果	22
図-2.14	三点曲げ試験時の主ひずみ分布（a）流込み供試体（b）x-積層体（c）y-積層体（d）xyx-積層体（e）yxy-積層体	24
図-3.1	3DP コンクリートの破壊形式（a）Trans-layer 破壊（b）Inter-layer 破壊	28
図-3.2	第 3 章で使用した 3D プリンタ装置	29
図-3.3	三点曲げ試験の様子	31
図-3.4	破断時のひび割れ開口変位 $CMOD_c$ の算出方法	31
図-3.5	AE 波形の例	32
図-3.6	（a）供試体寸法（b）AE センサ配置	34
図-3.7	ACDM におけるひび割れ自動抽出プロセス	37
図-3.8	三点曲げ試験における荷重-CMOD 曲線と累積 AE イベント数	38
図-3.9	AE 位置標定結果（a）Type A-wet（b）Type B-wet（c）Type A-air（d）Type B-air	39
図-3.10	供試体軸方向（x 方向）における pdAE 分布（a）Type A-wet（b）Type B-wet（c）Type A-air（d）Type B-air	40
図-3.11	三点曲げ試験後のひび割れ面（a）Type A-wet（b）Type B-wet（c）Type A-air（d）Type	

B-air	42
図-3.12 3DP コンクリートの内部構造の可視化 (a) Type A-wet (b) Type B-wet (c) Type A-air (d) Type B-air.....	43
図-3.13 造形時のノズル移動と材料吐出の独立した機構による過剰吐出	44
図-3.14 pdAE および DIC における代表点の取得 (a) DIC におけるひずみ分布 (b) ACDM により抽出したひび割れ表面プロファイル (c) 各層の x 方向における pdAE のピークの抽出 (d) pdAE マップ、DIC および X 線 CT 画像の重ね合わせ	46
図-3.15 各層の選定点におけるひび割れ幅開口履歴と pdAE の関係	47
図-3.16 切欠き先端近傍 ($z=10\text{mm}$) における pdAE-ひび割れ開口幅履歴.....	48
図-3.17 ひび割れ発生における力学的異方性	48
図-3.19 ピーク荷重 $P_{\max}$ における各供試体の CMOD とひび割れ深さの比.....	50
図-3.18 CMOD=0.01mm および 0.1mm における ε_{xx} 分布 (a) Type A-wet (b) Type B-wet.....	50
図-4.1 (a) 3DP コンクリートにおける空隙構造 (b) 内部空隙の幾何学的変化	53
図-4.2 (a) 積層パラメータの定義 (b) フィラメント供試体の条件	55
図-4.3 第 4 章で使用した材料押出方式 3D プリンタ	57
図-4.4 第 4 章における解析の流れ (図内の数字は対応する節番号を示す)	58
図-4.5 座標軸の設定	59
図-4.6 等価空隙径と投影径に基づく幾何学的変化の評価 (a) 投影径の算出方法 (b) 単一の内部空隙の変形と複数の内部空隙の合体	60
図-4.7 (a) 複数空隙の合体によるくびれの形成 (b) 空隙ボクセルの凸包	60
図-4.8 パーシステントホモロジーにおけるフィルトレーション: (a) インプットデータ (b) $r = r_1$ (リング X が生成) (c) $r = r_2$ (リング X が消失、リング Y が生成) (d) $r = r_3$ (リング Y が消失) (e) パーシステンス図 (PD)	61
図-4.9 X 線 CT 画像 (a) AE_cast (b) AE_h15E10 (c) AE_h15E13 (d) AE_h20E10 (e) AW_cast (f) AW_h15E10 (g) AW_h15E13 (h) AW_h20E10.....	63
図-4.10 等価空隙径および空隙率 (a) AE_cast (b) AE_h15E10 (c) AE_h15E13 (d) AE_h20E10 (e) AW_cast (f) AW_h15E10 (g) AW_h15E13 (h) AW_h20E10	64
図-4.11 等価空隙径と投影径の x 方向成分の関係 (a) AE_cast (b) AE_h15E10 (c) AE_h15E13 (d) AE_h20E10 (e) AW_cast (f) AW_h15E10 (g) AW_h15E13 (h) AW_h20E10.....	64
図-4.12 等価空隙径と投影径の y 方向成分の関係 (a) AE_cast (b) AE_h15E10 (c) AE_h15E13 (d) AE_h20E10 (e) AW_cast (f) AW_h15E10 (g) AW_h15E13 (h) AW_h20E10.....	65
図-4.13 等価空隙径と投影径の z 方向成分の関係 (a) AE_cast (b) AE_h15E10 (c) AE_h15E13 (d) AE_h20E10 (e) AW_cast (f) AW_h15E10 (g) AW_h15E13 (h) AW_h20E10.....	66
図-4.14 Solidity-Sphericity マップ (a) AE_cast (b) AE_h15E10 (c) AE_h15E13 (d) AE_h20E10 (e) AW_cast (f) AW_h15E10 (g) AW_h15E13 (h) AW_h20E10	67
図-4.15 AE 配合における PD (a) AE_cast (b) AE_h15E10 (c) AE_h15E13 (d) AE_h20E10	69
図-4.16 PH による解析の流れ (本研究では、PH および PCA を対象とする)	70

図-4.17	主成分分析の結果（図中カッコ内は各主成分の寄与率）	71
図-4.18	ローディングプロット（a）第一主成分ベクトル（b）第二主成分ベクトル	71
図-5.1	造形前および造形中のモニタリング手法分類（文献[57]から抜粋）	74
図-5.2	時間軸を考慮した品質管理手法の分類（各手法に関する図は文献[16,21,58,204,207–210,214,219]より抜粋）	75
図-5.3	ガントリー式 3D プリンタ装置	78
図-5.4	積層パラメータによる吐出量計算	78
図-5.5	over-extrusion 条件による内部構造の制御	79
図-5.6	弾性波トモグラフィ法における解析フロー	80
図-5.7	弾性波トモグラフィ法の様子（a）鋼球打撃による弾性波励起（b）対象領域における波線経路とセル分割	81
図-5.8	セル分割と波線経路	82
図-5.9	圧縮载荷試験の様子	83
図-5.10	圧縮载荷サイクル	83
図-5.11	対象領域の表面画像（上段：表面画像、下段：空気部分の二値画像）（a）ev1.0（b）ev1.2（c）ev1.5	84
図-5.12	弾性波トモグラフィ法により算出した弾性波速度分布	86
図-5.13	圧縮载荷時の弾性波速度分布および主ひずみ分布（EWT：除荷後の弾性波トモグラフィ法）	87
図-6.1	本研究の概観	89
図-6.2	内部構造の構造記述子と能動的制御への展望	94
図-6.3	造形過程による機能勾配への展望	95
表-2.1	配合表	11
表-3.1	配合表（単位：kg/m ³ ）	29
表-3.2	AE パラメータの定義	33
表-3.3	AE センサ配置座標（単位：mm）	34
表-3.4	三点曲げ試験の結果	38
表-3.5	荷重-CMOD 曲線および AE 発生挙動における力学的異方性	41
表-4.1	各吐出条件における積層パラメータ	55
表-4.2	配合表	56
表-4.3	AE 配合と AW 配合のフレッシュ性状	56
表-4.4	流込み供試体とフィラメント供試体の種類	57
表-5.1	モニタリング手法の分類	74
表-5.2	配合表	77

第1章 序論

1.1. 研究の背景

セメント・コンクリート分野においては、労働人口および熟練工の減少、建設業における多量の温室効果ガス排出に伴って、省人化、省力化、効率的な施工の自動化に資する建設技術の確立が求められている。このとき、様々な産業分野で急速に開発と実用化が進んでいる付加製造技術 (Additive manufacturing: AM) をセメント系材料に適用する 3D コンクリートプリンティング (以下、3DCP) が注目を集めている[1-4]。AM は、デジタルデータを基に材料を付着させることにより造形する方法とされ、造形方法に応じて、液相光重合 (Vat photopolymerization)、粉末床溶解結合 (Powder bed fusion)、結合剤噴射 (Binder jetting)、シート積層 (Sheet lamination)、材料押出 (Material extrusion)、材料噴射 (Material jetting)、指向性エネルギー堆積 (Directed energy deposition) に分類される[5,6]。3DCP においては、三次元の設計データに基づき制御されたノズルから、セメント系材料を吐出し層ごとに堆積 (積層) させることにより造形する材料押出方式が主流となっており[1,7-9]、本研究においても、材料押出方式の 3DCP を対象とする。

コンクリートの施工においては、練混ぜられた材料は型枠に充填され締め固められる。その後、コンクリートが硬化して十分な強度を有すると型枠を取り外す。したがって、型枠形状が構造物の形状となる。一方で、3D プリンティング技術による造形では、材料を層ごとに付着させることから、型枠が不要であり、三次元空間に材料は直接吐出され、積層されることで造形する。これにより、型枠の不要化に伴う廃棄物の減容[10]、吐出および積層機構における機械使用による施工の自動化[11,12]、材料配置の最適化[13]などの可能性を有することから、新たなコンクリート施工技術として期待される。

一方で、3D プリンティング技術により造形されたコンクリート (以下、3DP コンクリート) においては、材料を層ごとに積層する造形方法に起因して、従来の型枠への流込みコンクリートと異なる内部構造を形成する[1]。すなわち、吐出されたひも状の材料 (以下、フィラメント) 同士の間には、不連続な境界部分として積層界面 (Layer interface) が形成される。さらに、フィラメントは使用するノズル形状に起因する表面形状を有するため、複数のフィラメントで囲まれる領域に空気が残置することがあり、残置した空隙を残存空隙 (Inter-filament void) と呼称する。空気部分はフィラメント間だけではなく、単体のフィラメント内部にも発生する。これは、流込みコンクリートにおける気泡および空隙と同等のものであり、内部空隙 (Intra-filament void) と呼称する。これらの内部構造は、使用材料、フレッシュ性状、および吐出積層における各種条件である積層パラメータ (Printing parameter) に依存して、3DP コンクリート内部に形成される。

これらの内部構造は、使用材料や配合条件だけでなく、造形プロセスに強く支配され[14,15]、結果として、3DP コンクリートの力学特性および耐久性の各種特性に影響を及ぼす[1,16]。すなわち、3DP コンクリートにおいては、造形プロセスにより形成される内部構造、および結果として得られる 3DP コンクリートの性能を一貫して評価することが求められる。

しかしながら、これまでの 3DCP 分野における内部構造に関する既往の研究では、配合条件と積層パラメータに基づく内部構造の形成の把握、および内部構造と力学特性における物性値との対応に主眼が置かれてきた。すなわち、内部構造要素である積層界面、残存空隙、内部空隙の 3DP コンクリート内部における空間的分布の形成とこれらの空間的配置により規定される動的なひび割れ発生および進展挙動に関する検討は十分であると言えない。新たな建設技術としての 3DCP を確立するためには、3DP コンクリ

ートの特性とそれを規定する内部構造、および内部構造を形成する造形プロセスの一貫した理解が不可欠である。

ここで、上述の造形プロセスに起因する内部構造の形成を経て性能発現に至る一連の関係に関する模式図を図-1.1に示す。なお、図中の黒実線は、既往の研究により多数の検討がなされている部分であり、黒破線は、連関が弱い、あるいは、既往の研究で検討が多くなされていない部分を示す。赤字および赤実線は、既往の研究において未整理の部分と捉え、本研究で検討する主な内容を示している。

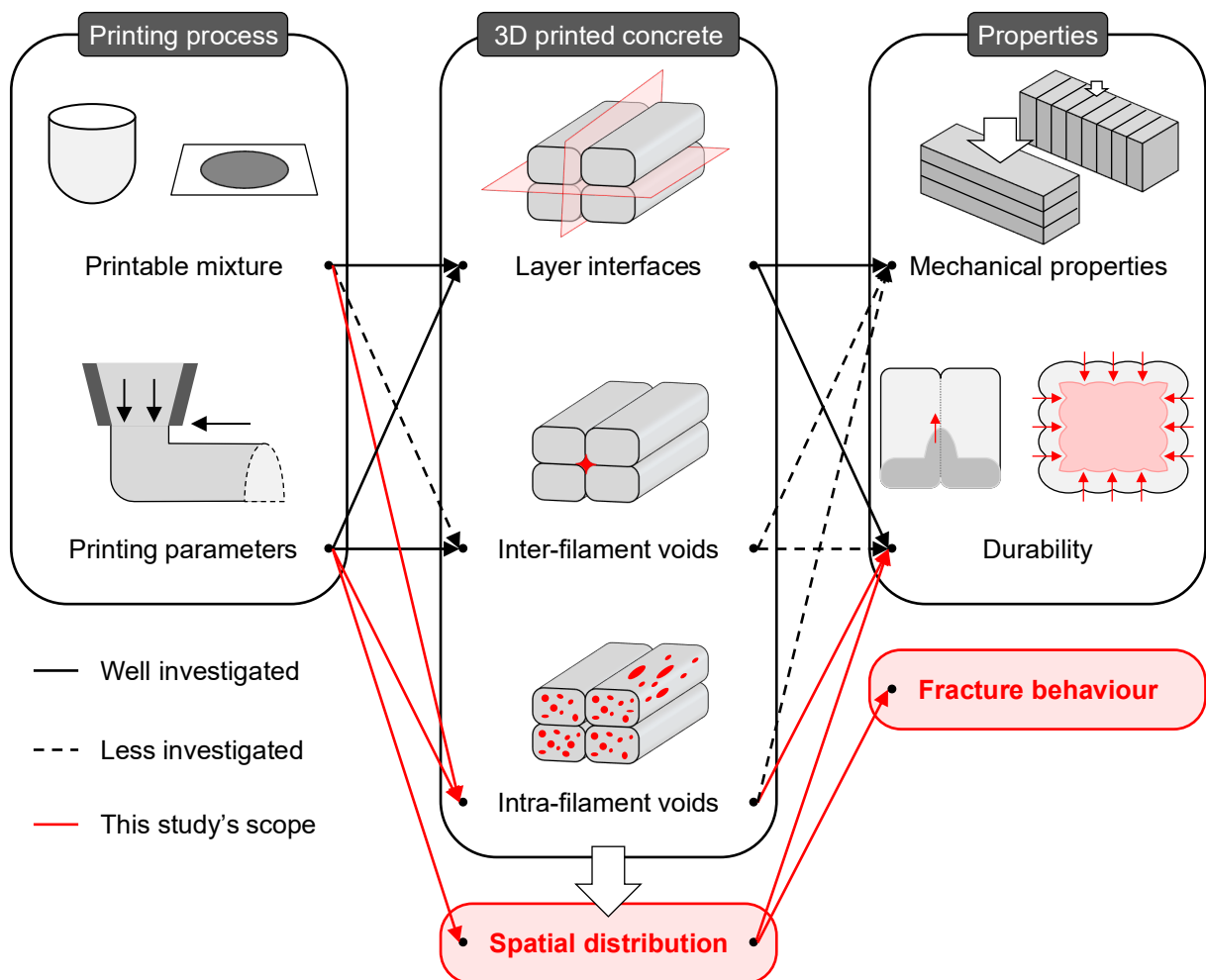


図-1.1 3DP コンクリートにおける造形プロセスにより形成される内部構造と性能発現の連関

図-1.1に示す通り、3DCP分野においては、配合条件および造形条件が積層界面や空隙構造の形成に及ぼす影響、ならびにこれらの内部構造要素が力学特性および耐久性に及ぼす影響が主に検討されてきた。一方で、内部構造の空間的配置、およびその配置と関連付けた破壊挙動の理解について検討は相対的に限られてきた。この背景として、3DCP分野における研究開発では、吐出および積層可能な材料配合の開発、高精度に積層造形可能な装置開発、造形された3DPコンクリートの特徴的な界面構造の観察、および方向依存的な力学的異方性の把握に主眼が置かれてきたことが挙げられる。次節では、このような観点から、既往の研究により整理されてきた3DPコンクリートにおける主要な知見を整理し、本研究の位置づけを明確にする。

1.2. 既往の研究の整理と本研究の位置づけ

1.2.1. 吐出積層造形可能な配合設計

3D プリンティング技術によるコンクリート構造物の造形においては、材料はホースおよびノズル内部を圧送され、ノズルから吐出された材料は層ごとに逐次積層される。このとき、吐出材料のフレッシュ状態における要求性能は、大きく次の 2 つが挙げられる[1,9]。第一に、圧送段階および吐出段階において、閉塞せずに圧送され、連続的に吐出される吐出性 (Extrudability) である。第二に、吐出後および次層の積層において、自重あるいは上層载荷により過度に変形せず形状を保持できる積層性 (Buildability) である。一般に、圧送および吐出段階では、高い流動性が求められる一方で、積層段階では、変形を抑制するために低い流動性が求められるため、これらの要求性能は相反するものであると考えられる。これに対し、せん断応力下では流動し、吐出後、せん断応力の作用が消失したとき、再度凝集することで粘度が増加するチキソトロピー性を材料に付与することにより要求性能を両立させることが試みられてきた。既往の研究では、使用材料や配合条件、ならびに各種レオロジー試験[17-19]を通じて、造形可能な材料条件およびその評価手法に関する知見が蓄積されている[16,20-26]。

1.2.2. 3DP コンクリートの内部構造

(a) 積層界面 (Layer interface)

3D プリンティング技術では、材料をフィラメント状に吐出して、層ごとに積層する。この造形方法に起因して、隣接するフィラメント、あるいは、上下層の境界部分には積層界面 (Layer interface) が形成され、特有の不連続面となることが知られている。フィラメント同士が密着して一体化すれば、積層界面は顕著な不連続面とはならないと考えられる。しかしながら、3D プリンティング施工における固有の性質であるフィラメント表面の水分状態、および積層時のフィラメント間への空気の巻き込みにより、局所的に多孔質な積層界面が形成されることが報告されている[27-30]。

型枠内に流し込む従来の流込みコンクリートと異なり、3DP コンクリートの造形においては、吐出された材料は吐出直後から大気中に暴露されることになる。これにより、吐出されたフィラメント表面からの水分の蒸発が発生し、特に、大型の構造物を造形するとき、ある層を吐出してから次層を積層するまでにかかる時間 (ギャップタイム) が長くなり、それに応じて水分蒸発への影響は大きくなる。ギャップタイムに応じたフィラメント表面の水分蒸発は、フィラメント表面に凹凸を誘発することになると考えられる。同時に、ノズルから吐出されたフィラメントは、表面に微小な凹凸を有することがある。これにより、フィラメント積層時には、水分蒸発およびフィラメント表面の凹凸部に起因して、空気の巻き込みが発生し、局所的に多孔質な積層界面が形成される[8,29,31,32]。

このような積層界面における局所的な多孔質な構造に関して、X 線 CT 法[33-35]、水銀圧入法 (MIP) [36,37]、走査型電子顕微鏡 (SEM) [30,38,39]を用いた空隙構造評価に関する事例が報告されている。研究グループによって異なる使用材料および配合条件における積層界面の局所的構造が検討されており、造形プロセスとしてギャップタイムと局所的な空隙率の関係を報告した例が見られる[31,39]。以上のように、積層界面構造に関しては、造形プロセスと内部構造の連関について一定の知見が蓄積されている。

また、上述のような不連続面としての積層界面を改善するための手法に関しても多くの検討がされている。具体的には、ノズル形状の改良によるかみ合わせに伴う接着面積の増加[40-43]や、次層を圧付けながら積層する Layer pressing[44]、次層積層の直前に液体を噴霧しフィラメント表面の乾燥を低減する方法

[45–47]、ならびに、造形後の養生条件により界面の緻密化を図る手法[48,49]が提案されている。

しかしながら、既往研究の多くは、積層界面の局所的な性状やフィラメント内部との相対的な組織構造の差異を主に検討しており、3DP コンクリート内部における積層界面の空間的配置およびその配置が力学性能に及ぼす影響については、十分に整理されていない。

(b) 残存空隙 (Inter-filament void)

セメント系材料に限らず、フィラメントを吐出および積層するとき、4つのフィラメントの間に空気が残置し、残存空隙 (Inter-filament void) を形成することがある[50]。長方形断面を有するノズルを使用し、フィラメント同士の接着面積の増加やフィラメント間の残存空隙の発生を低減する例も報告されている[51]。しかしながら、圧送および流動時に必要な吐出応力は円形ノズルの方が低いことが報告され[52]、連続的かつ安定した吐出には円形ノズルがより適すると考えられる。加えて、曲線部および折返し部を有する造形では、円形ノズルではノズル自体の回転機構が不要である一方で、矩形ノズルではノズルヘッドの回転が必要となる。以上の背景から、3DP コンクリートの造形においては、円形ノズルが主流である。

セメント系材料以外の3D プリンティング技術においては、残存空隙の形成やその幾何学形状に関する検討例[53,54]が見られるものの、3DP コンクリートにおける残存空隙そのものを対象とした検討例は限られている[52]。これは、造形プロセスにおけるフィラメント表面形状の保持や造形精度を向上させるための品質管理手法 (Process control) における検討が多数見られ[55–58]、3DP コンクリート内部に発生する残存空隙を主な検討対象にしてこなかったと考えられる。しかしながら、これらの検討は実験室内の比較的理想的な環境下における検討に留まり、実環境下においては、材料特性のばらつき、吐出機構の変動等により残存空隙が発生する場合がある[59]。このとき、残存空隙の空間的配置と力学的な破壊挙動に関する連関を検討した例はほとんどなく、残存空隙の空間的配置がひび割れ発生および進展挙動を含む破壊挙動へ及ぼす影響を評価する必要がある。

(c) 内部空隙 (Intra-filament void)

3DP コンクリートにおける内部構造においては、主に積層界面および残存空隙に対して、発生要因となる配合条件や造形条件と局所的構造の特徴が検討されてきた。しかしながら、これらの検討のみでは、3DP コンクリートにおける内部構造を十分に捉えることができず、個々のフィラメント内部に発生する空隙構造にも着目する必要がある。熱可塑性材料を用いた3D プリンティング分野においては、個々のフィラメント内部に発生する空隙は、内部空隙 (Intra-filament void) として認識されている[50,60]一方で、3DP コンクリートにおいては、主要な検討対象に付随する観察事項として扱われるに留まっており[33,61,62]、その形成要因と特性に関する理解は十分ではない。

多孔質な積層界面および残存空隙に対しては、配合条件と造形条件の最適化によって緻密化し、不連続面あるいは幾何学的脆弱部としての影響を低減できる可能性がある。しかしながら、その場合でも、フィラメント内部の空隙は依然として発生しうる。これは、内部空隙が流込みコンクリートにおける気泡および空隙と同様に、使用材料や練混ぜ工程において導入されるためである。コンクリートの長期耐久性において、空隙構造が主要な支配的要因の一つであることを考慮すると、3DP コンクリート内部の空隙構造と耐久性の関係を整理する必要がある。

このとき、3DP コンクリートでは、ノズル移動と材料吐出が共存する造形プロセスに起因して、流込み

コンクリートと異なる特徴的な空隙構造が発生することが報告されている[33,61,62]。すなわち、同一の材料および配合条件を使用した場合にも、流込みコンクリートが比較的等方的な球形状の空隙を有する一方で、3DP コンクリートの内部空隙は、不規則な形状を示す場合がある。これにより、造形プロセスが内部空隙の幾何学的変化に影響を及ぼすことを示唆している一方で、吐出条件と形状変化を体系的に評価した例はほとんどない。加えて、個々の内部空隙の幾何学的変化は、空隙群としての空隙構造変化を伴うと考えられ、配合および造形プロセスと内部空隙の幾何学的変化や空間的配置の連関を解明する必要がある。

1.2.3. 3DP コンクリートにおける力学特性と耐久性

3DP コンクリートにおいては、積層界面、残存空隙、および内部空隙といった内部構造によって、流込みコンクリートと異なる力学特性および耐久性が性能として発現する。そのため、3DP コンクリートの性能を理解する上で、内部構造と各性能の連関が既往の研究において整理されている。

(a) 力学特性および破壊挙動

3DP コンクリートでは、積層造形に起因して、積層界面、残存空隙、および内部空隙を有することから、流込みコンクリートと異なる力学特性を示す。特に、図-1.2 に示すように、圧縮、引張、曲げ応力下における強度は、積層方向と载荷方向に基づき変化する力学的異方性を示すことが多数報告されている[7,31,63–65]。既往の研究では、繊維の混入の有無などの使用材料[66]や配合条件[61]、層厚[67]、ノズル形状[68]、ギャップタイム[31]などの造形条件、温度環境など、力学的異方性における影響要因が検討されてきた。

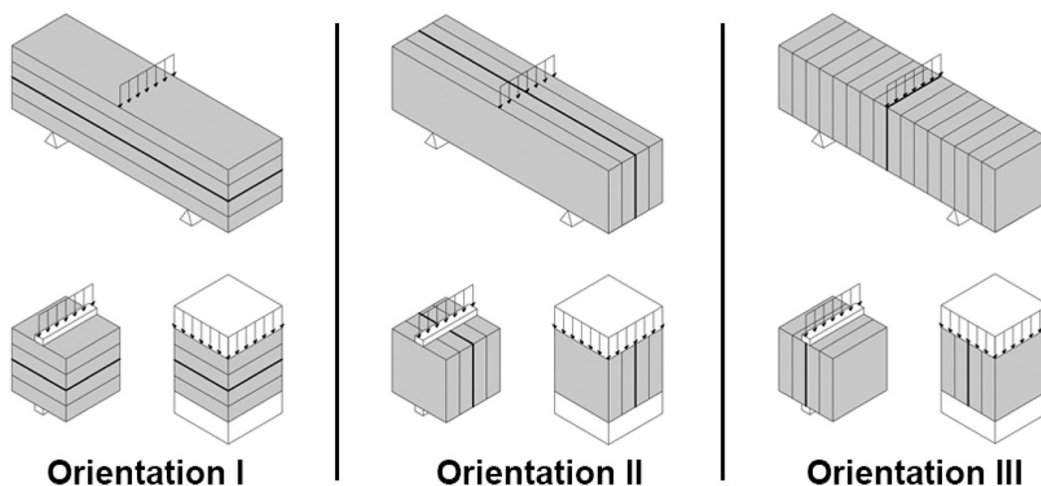


図-1.2 3DP コンクリートにおける力学的異方性（文献[31]から抜粋）

しかしながら、既往研究では、圧縮強度、引張強度、曲げ強度、最大荷重等の巨視的な力学特性値の方向依存性の評価が主として行われてきた。すなわち、ひび割れ発生位置、進展経路、破壊進行領域 (Fracture process zone : FPZ)、ポストピーク挙動を含む破壊挙動に関する検討は限られていた。近年、これらに関する検討[69–71]が増加しているものの、特定の材料および評価手法に偏っており、ひび割れの発生およ

び進展挙動を含む破壊力学的応答の更なる評価が必要である。

さらに近年では、3DP コンクリートにおける力学的異方性を積極的に活用し、生体模倣構造[72–76]や折り紙に着想したフィラメントの編み込み (Filament stitching) [77]を導入することによって、ひび割れ経路の複雑化を通じた構造の靱性向上を図った例が報告されている。これらの例では、力学的異方性を能動的に制御し、構造設計に取り入れようとするものであるが、多くは構造形式と破壊挙動の対応関係の評価した段階に留まっている。今後、3DP コンクリートにおける破壊挙動を規定する内部構造を明らかにし、力学的異方性の支配的要因を特定することが求められる。このとき、造形条件により形成される内部構造の空間的配置とひび割れ発生および進展挙動の連関を整理し、内部構造と破壊挙動を理解するための学術的基盤を構築することが不可欠である。

(b) 耐久性

3DP コンクリートにおける内部構造は、力学特性および破壊挙動に影響を及ぼすだけでなく、長期耐久性にも大きく影響する。従来の流込みコンクリートにおける空隙率、空隙径分布および連結性が物質移動性に影響を及ぼすのに加えて、層状に周期的に配置される積層界面の存在が影響因子として検討されている[78–81]。流込みコンクリートを比較対象としたレビューにおいても、3DP コンクリートにおける比較的多孔質な積層界面が、塩分浸透や炭酸化において劣化因子の侵入経路となることが指摘されている[62,79–82]。また、積層界面における劣化因子の侵入に対する抵抗性は、ギャップタイムの増加に応じて低下し、積層界面が耐久性においても支配的要因と考えられている。

一方で、1.2.2(c)で整理したように、積層界面構造においては、今後種々の対策および技術開発によって、多孔質な脆弱部とならないことが予想される。しかしながら、内部空隙は 3DP コンクリート内部に発生し、造形プロセスに起因して幾何学的変化を示す。したがって、3DP コンクリートの耐久性を理解するために、内部空隙とその空間的配置を含む空隙構造を評価する必要がある。すなわち、劣化現象の要因となる内部空隙構造を評価し、将来的な耐久性評価に展開する学術的基盤を構築することが求められる。

1.2.4. 3DP コンクリートの内部構造に関わる非破壊検査手法の必要性

3DP コンクリートの内部構造に関して、上述のように X 線 CT 法、MIP、SEM を用いた観察により、積層界面、残存空隙、および内部空隙の局所的構造が報告されてきた。また、これらの内部構造が力学特性値や耐久性に及ぼす影響が多くの研究により検討されている。一方で、これらの知見の多くは、3DP コンクリートの一部を採取して実施した局所的観察および破壊試験の結果に基づくものである。すなわち、硬化した 3DP コンクリート内部における欠陥の発生および存在について、非破壊により評価した例は限られている[83]。3DP コンクリートにおける品質管理については、フレッシュ性状評価、造形プロセス中のリアルタイムモニタリングおよびフィードバック制御を統合することで造形精度の向上を目的とした検討例が多い[55,58]。このとき、3DP コンクリートの内部構造と力学特性、破壊挙動、および耐久性の関係を理解し、実構造物への適用を拡大するためには、造形後の 3DP コンクリートにおける品質管理手法の構築が求められる。

1.3. 本研究の目的

以上の背景から、本研究では 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体系的に明らかにすることを目的とする。特に、配合条件および造形条件に起因して形成される積層界面、残存空隙、および内部空隙の空間的配置に着目し、これらの内部構造が力学特性値に現れる力学的異方性だけでなく、ひび割れ発生と進展を含む破壊挙動に及ぼす影響を評価する。また、これまで十分に検討されてこなかった内部空隙構造を対象として、造形プロセスと幾何学的変化および空隙構造変化との連関を明らかにする。加えて、これらの内部構造を非破壊で把握および可視化する手法の適用可能性を検討し、硬化した 3DP コンクリートの内部品質評価手法の基盤を示す。各章においては、内部構造における積層界面、残存空隙、および内部空隙のそれぞれの要素に対して、造形プロセスから内部構造の形成、さらに性能発現を一貫して評価することで、3DP コンクリートの内部構造設計および性能評価に資する学術的基盤を構築する。

1.4. 本研究の構成

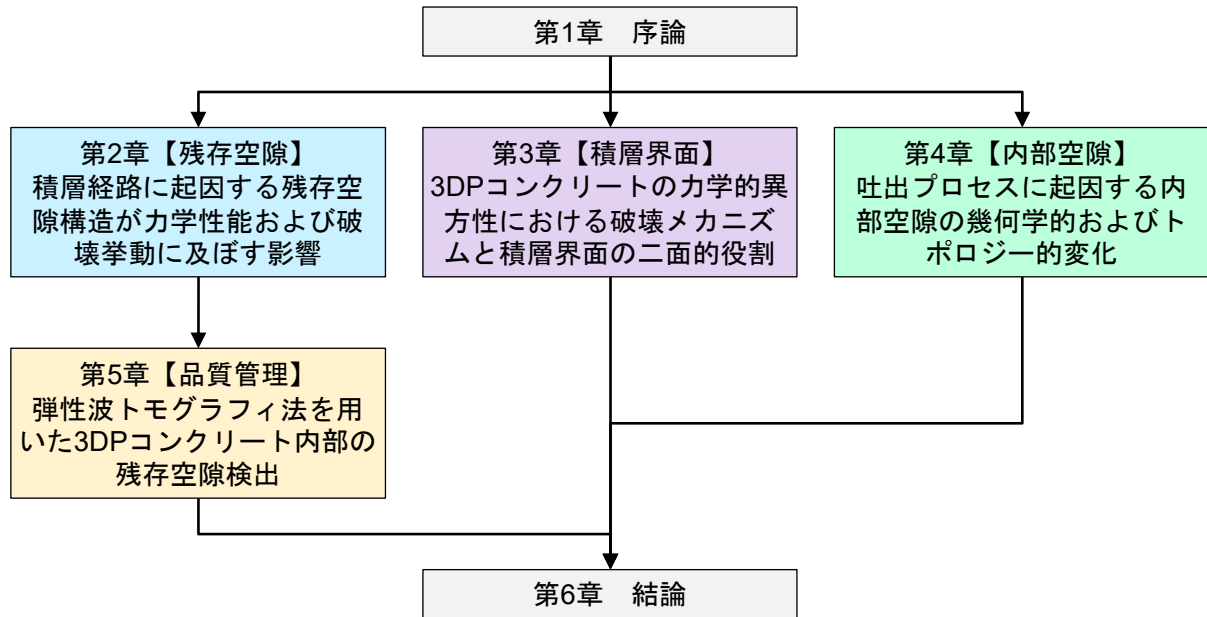
上述の背景および研究目的に基づく本研究の章構成および各章の相互関係を図-1.3 に示す。

第 2 章では、残存空隙が発生する 3DP コンクリートを対象にして、その空間的配置が力学特性および破壊挙動に及ぼす影響を評価した。残存空隙の空間的配置を規定する条件として、積層造形時のノズル移動経路（積層経路）を変化させ、3DP コンクリートを造形した。圧縮応力下の円柱供試体における残存空隙構造を X 線 CT 法により可視化し、圧縮載荷前後の 3D スキャンによって異方的な変形挙動を評価した。曲げ応力下の角柱供試体においては、脆性的な破壊挙動に対して高速度カメラを用いたデジタル画像相関法（DIC）を適用することで、ひずみの局所化領域およびひび割れ進展挙動を評価した。

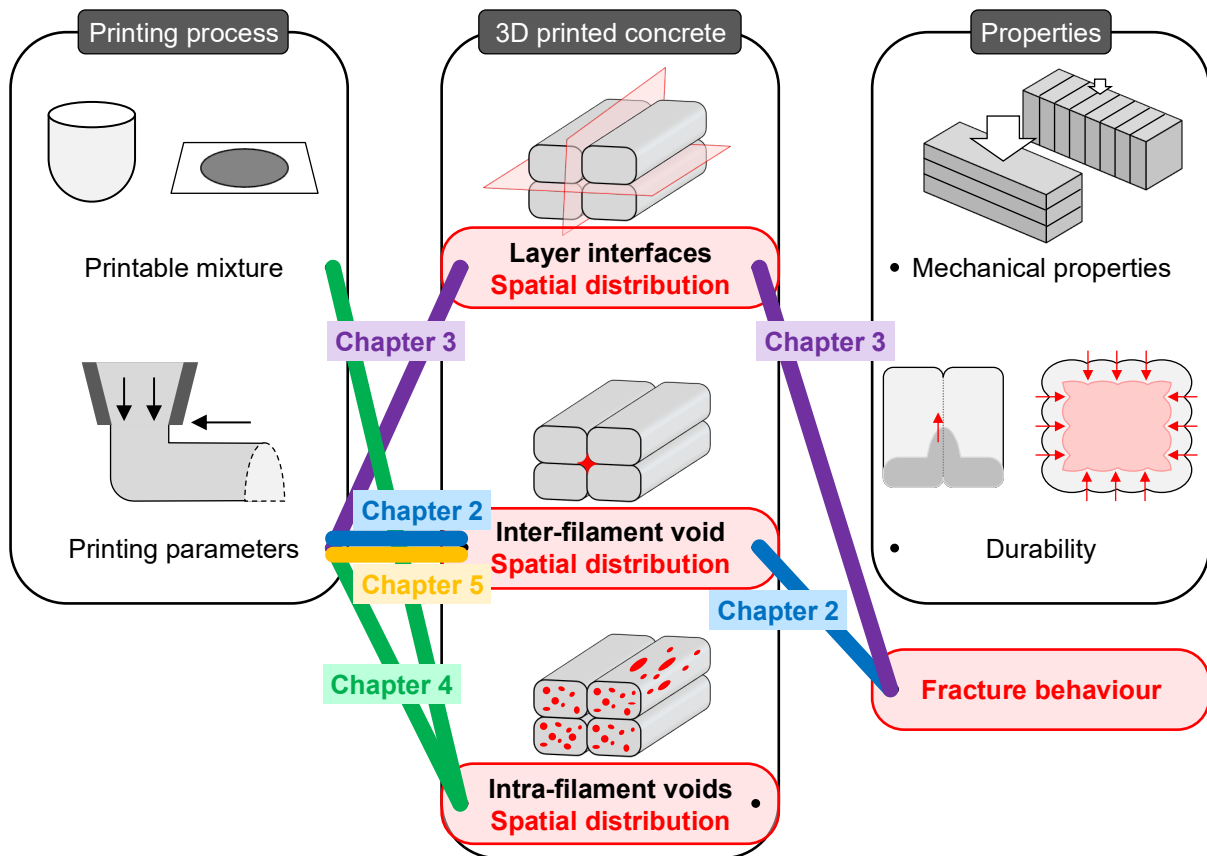
第 3 章では、積層界面の空間配置が 3DP コンクリートの破壊挙動に及ぼす影響を評価するために、切欠きを有する 3DP コンクリート梁に対する三点曲げ試験を実施した。このとき、フィラメント配向とひび割れ進展方向の関係から分類される力学的異方性における以下の 2 つの基本的な破壊形式を評価した。第一に、ひび割れが積層界面に対して垂直に進展し、フィラメントを割裂しながら破壊が進行する Trans-layer 破壊であり、第二に、ひび割れが積層界面に沿って進展し、フィラメントが剥離するように破壊が進行する Inter-layer 破壊である。このとき、微小破壊のモニタリングとしてアコースティック・エミッション（AE）法を適用し、AE 発生箇所の位置標定における不確実性を考慮した確率密度関数を導入した。これにより得られた AE の時空間的分布と DIC によって得られたひび割れ開口の時間履歴を統合した。以上の解析に基づき、3DP コンクリートの力学的異方性におけるひび割れ発生に対する抵抗の差異およびそれに伴う AE 発生挙動の対照性を検討した。

第 4 章では、これまでの先行研究で十分に検討されてこなかった造形プロセスと内部空隙の関係について、吐出プロセスに起因する内部空隙の幾何学的変化と空隙構造変化を検討した。このとき、幾何学的変化に対して、粒子形状解析に使用される指標を適用し、配合条件と吐出条件が個々の内部空隙の幾何学的変化に及ぼす影響を評価した。加えて、幾何学的変化に伴う空隙群としての空隙構造変化に対して、空隙構造をトポロジーデータとして捉え、位相的データ解析手法のパーシステントホモロジー（PH）を適用した。これにより、造形プロセスにおける配合および造形条件と内部空隙の連関を明らかにすることを試みた。

第 5 章では、硬化した 3DP コンクリートの内部構造を非破壊で評価するために、弾性波トモグラフィ法の適用可能性を検討した。このとき、第 2 章において検討したように、残存空隙の空間的配置が破壊挙動における脆弱部となることを考慮し、残存空隙の検出を対象とした。



(a)



(b)

図-1.3 本研究の構成 (a) 章構成とタイトル (b) 各章の相互関係

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、造形プロセス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。

第2章 積層経路に起因する残存空隙構造が力学性能および破壊挙動に及ぼす影響

2.1. はじめに

3DP コンクリートにおいては、型枠を不要とし三次元空間に直接、材料を吐出および堆積（積層）させる造形プロセスに起因して、図-2.1 に示すように、吐出材料であるフィラメント間に残置する空隙（以後、残存空隙）が発生することがある[1]。3DP コンクリートのフィラメント内部に発生する内部空隙とは異なり、残存空隙は、ノズル移動速度、フィラメントオーバーラップ幅、層厚、吐出量などの積層パラメータにより、その発生や形状をある程度制御可能である[84]。ポリマー材料の3D プリンティング技術に関する研究では、ある層厚を下回るとフィラメントが材料吐出方向に押し付けられることで、フィラメント間の残存空隙が材料によって充填され、密実な構造を達成できることが報告されている[85]。一方で、これらの検討は実験室レベルに留まっており、残存空隙の発生を完全に排除するものではない。また、3DP コンクリートにおける残存空隙の発生自体は報告されているものの[86,87]、力学特性として強度の異方性を指摘するに留まっており、残存空隙の構造的特徴と破壊の発生や進展との関係は十分に検討されていない[59]。

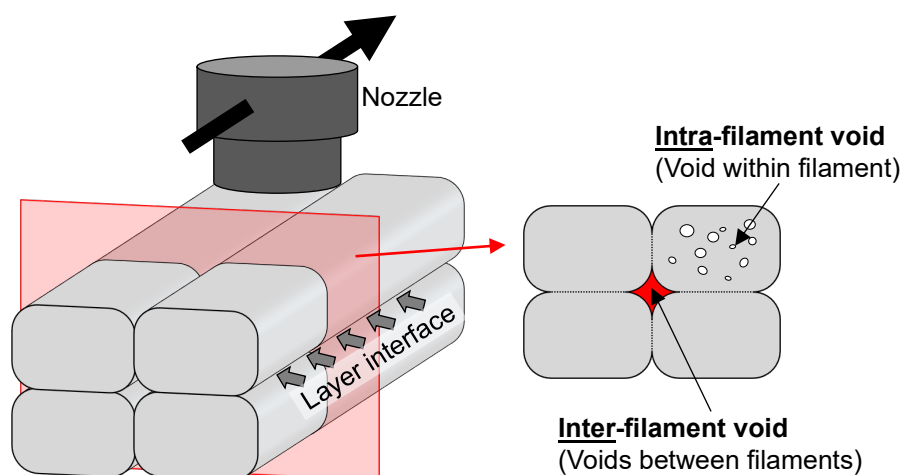


図-2.1 3DP コンクリートに発生する空隙

他方、3DP コンクリートにおいては、設計データを三次元空間に自由に配置することができるため、構造形態の決定における位相（トポロジー）最適化手法との親和性が高い[13,88]。トポロジー最適化は、制約条件下における目的性能を最大化する構造形態を導出する数学的手法であり、3D プリンティング技術の造形自由度により、コンクリート構造物においても活用例が見られる[13,89]。このとき、トポロジー最適化手法により決定される構造形態を造形する積層方向は一方向に限られないと考えられる。すなわち、構造形態の最適化に加えて、力学性能の異方性を考慮し、構造物内部の応力状態に対応する積層経路を決定する必要がある。

CFRP（Carbon Fiber Reinforced Plastics）のような複合材料においては、繊維方向と比較して繊維に垂直な方向に剛性および強度が低いことから、繊維の配向を変えながら積層した積層材料としての実用例が多い[90]。すなわち、繊維配向に起因する力学的異方性に対して、各層における繊維配向を組み合わせる

ことで構造部材としての利用を拡大してきた[91]。このとき、3DP コンクリートにおいてもフィラメント配向に基づく力学的異方性に対して、複数のフィラメント配向を混合することで、作用応力に対する効果的な構造を達成することができると考えられる。

3DP コンクリートにおけるフィラメント配向を決定する主要な積層パラメータは、造形プロセスにおけるノズル移動経路、すなわち、積層経路である。したがって、積層経路の違いによる 3DP コンクリート内部に形成される残存空隙構造の空間配置とその結果としての力学特性および破壊挙動に及ぼす影響を把握することが重要である。本章では、異なる積層経路によって造形した 3DP コンクリートに対して、X 線 CT 法により内部の残存空隙構造を可視化するとともに、圧縮および曲げ応力下における力学挙動への影響を実験的に評価した。

2.2. 実験概要

2.2.1. 使用材料と配合

普通ポルトランドセメントおよびシリカフュームを予め所定の割合で混合したプレミックス粉体を結合剤 (B) として使用した。また、細骨材 (S) として珪砂 (F.M. : 1.73、2.58g/cm³) を使用した。W/B を 20% とし、吐出性および積層性を両立するために、高性能減水剤を内割置換として添加した。配合表を表-2.1 に示す。

表-2.1 配合表

W/B (%)	Water (kg/m ³)	Binder (kg/m ³)	Sand (kg/m ³)	Superplasticizer (mass% to B)
20	217	1085	1085	1.6

はじめに、10L のホバートミキサに結合材および細骨材を投入し 30 秒間練り混ぜ、続いて高性能減水剤を含む練混ぜ水を投入し、さらに 2 分間練り混ぜた。一度、かき落とした後、高速回転により 2 分間練り混ぜた。練混ぜ直後のフレッシュ性状として、空気量が 7.1% であり、JIS R5201 に規定されたモルタルフロー試験により得られた 15 打フロー値が 149mm であった。また、同一の材料および配合を使用して作製した直径 50mm、高さ 100mm の流込み供試体における材齢 28 日時点での圧縮強度は 88.0N/mm² であることを確認した。

2.2.2. 積層体の造形

本章において使用した材料押出方式 3D プリンタ装置を図-2.2 に示す。本プリンタは、カートリッジ方式を採用し、少量の材料での吐出および積層を可能にすることで、材料開発および実験室サイズの積層体造形を対象としている。練り混ぜられたフレッシュ材料をカートリッジに充填し、装置に固定する。プリンタ装置に取り付けられたピストンの押下によりカートリッジ内の材料を押し出すことで、ノズルから材料を吐出する。ノズル移動経路は G-code に基づき、コンピュータ数値制御 (Computer Numerical Control : CNC) により制御される。すなわち、ノズル移動をプリントステージ上の x および y 方向、ならびに高さ方向の z 方向に対して制御し、 z 方向のピストンの押下を 4 軸目として制御している。直径 14mm の円形ノズルを使用し、フィラメント幅を 16mm と設定した。層厚は 10mm とし、ノズル移動速度は 30mm/s とした。

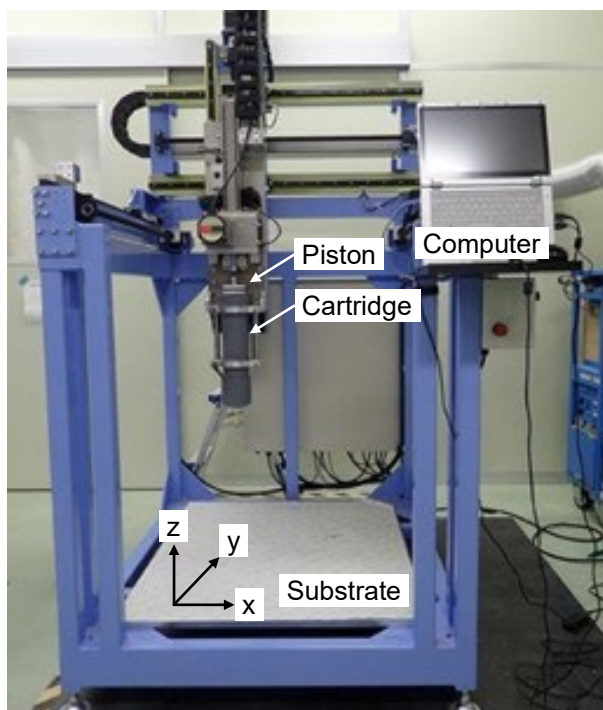


図-2.2 材料押出方式 3D プリント装置

本章では、図-2.3 に示す 4 つの積層経路パターンにより長さ 400mm、幅 100mm、高さ 100mm を目標値とする 3DP コンクリートを作製した。パターン(1)では、各層において最外殻を積層した後、内側に向かって円周を描くように積層した。パターン(2)では、最外殻の積層後、長辺方向に積層し、パターン(3)では、最外殻の積層後、短辺方向に積層した。パターン(4)では、奇数層目ではパターン(2)と同様に長辺方向に積層し、偶数層目ではパターン(3)と同様に短辺方向に積層した。これにより、交互に直交する二方向に積層した 3DP コンクリートを作製した。積層造形後は、20℃および 60R.H.環境下で気中養生とした。

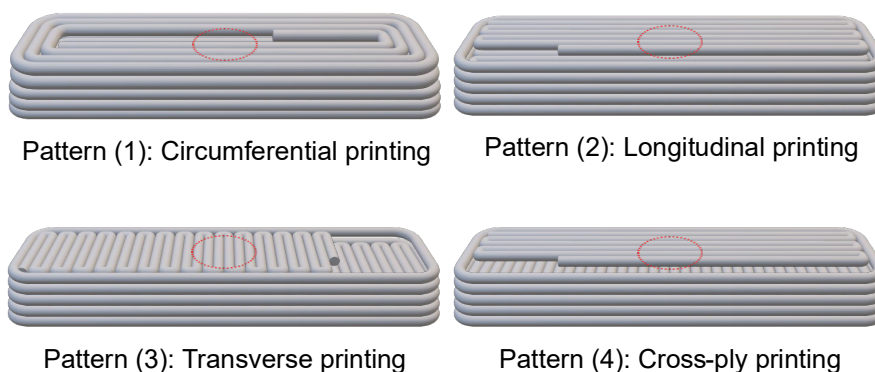


図-2.3 積層経路パターン

材齢 7 か月経過後、上述の積層経路パターンにより造形した 3DP コンクリートから、コア採取および

コンクリートカッターによる切出しによって、圧縮試験用の直径 45mm、高さ 90mm の円柱供試体および曲げ試験用の長さ 160mm、幅 40mm、高さ 40mm の角柱供試体を採用した。このとき、すべての 3DP コンクリートでは造形中の安定性向上のために、内部のプリントに先行して円周上に外殻を積層している。しかしながら、図-2.3 中赤点線で示すように、コア採取および切出し時には外殻からの供試体採取は行っていない。図-2.4 に円柱供試体および角柱供試体の採取位置等の概要を示す。

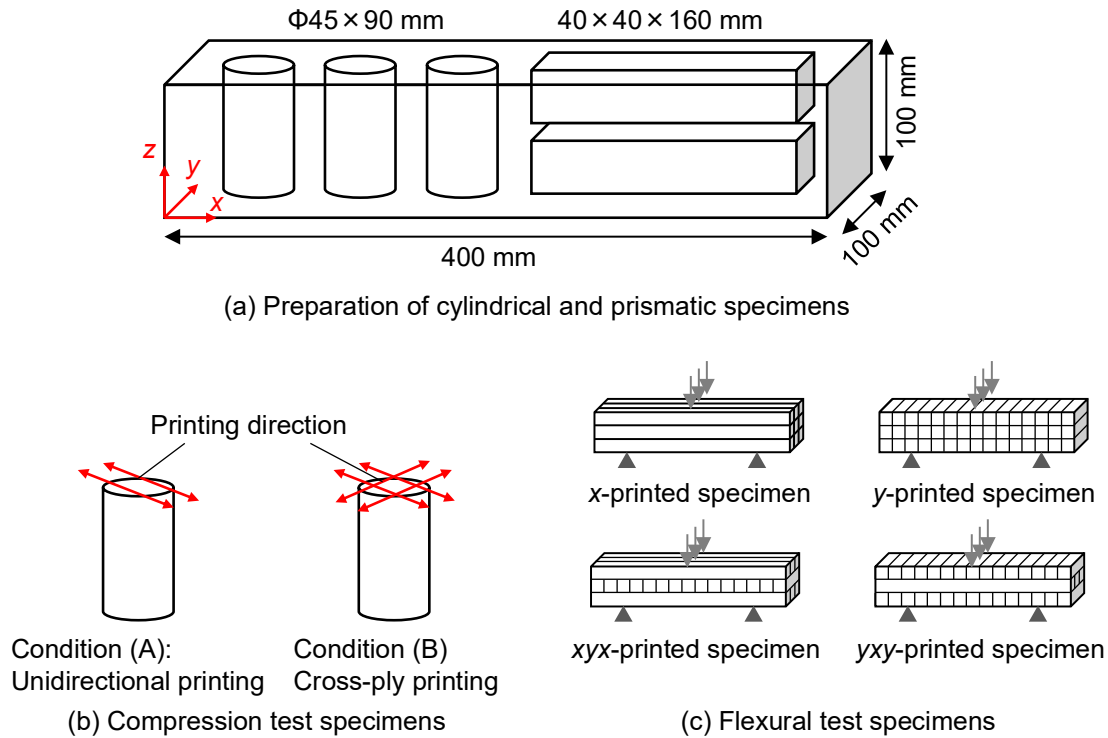


図-2.4 円柱供試体および角柱供試体の採取 (a) 取得位置の概要 (b) 圧縮試験用の円柱供試体 (c) 曲げ試験用の角柱供試体

3DP コンクリートの最外殻を除く中央部分から積層体を採取するとき、パターン(1)および(2)は、ノズル移動パスそのものは異なるものの、本章で適用した積層条件であるノズル移動速度 30mm/s およびフィラメント幅 16mm においては、隣接フィラメントの吐出時間差はいずれのパターンにおいても十秒オーダーである。すなわち、既往の研究で積層界面性状への影響が検討されている分 (min) オーダー[31]と比較すると、ギャップタイムは比較的小さいと考えられる。すなわち、本章における 3DP コンクリート造形では、ギャップタイムが界面形成の際に影響を及ぼしていることは想定しない。また、両者ともに積層体内部の主なフィラメント配向は長辺方向に対応しており、供試体数確保のために本章における円柱供試体および角柱供試体の採取では、これらを同一群として扱った。

加えて、円柱供試体の採取においては、パターン(1)および(2)だけでなく、パターン(3)においても、すべての層で同一方向に積層しており、取得した円柱供試体を 90° 回転することにより、同一の積層経路であるとみなすことができる。すなわち、円柱供試体において検討する積層経路は、条件(A)：すべての層で一方方向に積層した条件（パターン(1)～(3)）、および条件(B)：直交する二方向に交互に積層した条件（パターン(4)）に分類することができる。

角柱供試体の採取においては、約 3 層分の高さを有する積層体を採取することができ、積層経路に基づき、以下のように分類した。このとき、図-2.4(a)に示すように、長辺方向に x 軸、短辺方向に y 軸、および高さ方向に z 軸が対応するように座標軸を設定した。これにより、パターン(1)および(2)から、フィラメント配向が x 方向に対応する x -積層体、パターン(3)から、フィラメント配向が y 方向に対応する y -積層体を採取した。パターン(4)からは、最下層および最上層のフィラメント配向が x 方向に対応し、中間層のフィラメント配向が y 方向に対応する xyx -積層体を採取した。また、パターン(4)から最下層および最上層のフィラメント配向が y 方向に対応する yxy -積層体を採取した。

2.2.3. 載荷試験

材齢 9 か月経過後、採取した円柱供試体および角柱供試体に対して、それぞれ圧縮試験および曲げ試験を行った。

(a) 圧縮試験

圧縮材料として使用されるコンクリート材料において、圧縮応力下の 3DP コンクリートの破壊性状を評価するために圧縮試験を行った。このとき、造形した 3DP コンクリートからコア採取した円柱供試体（図-2.4(b)参照）に対して、積層経路による圧縮条件下の力学特性を評価した。積層造形に起因する隣接フィラメント間の凹凸によって、載荷面における応力の局所化を考慮して、石膏を用いたキャッピングにより載荷上下面を平坦にした。積層経路による圧縮応力下の力学応答として、ひび割れ発生状況および変形を評価するために、供試体表面にひび割れを目視で観察したとき載荷を中断した。載荷速度は $5.0\text{N/mm}^2/\text{min}$ に設定した。

(b) 曲げ試験

図-2.4(c)に示すように、複数の積層経路により造形した 3DP コンクリートから切り出した長さ 160mm、幅 40mm、高さ 40mm の角柱供試体に対して、中央点載荷による三点曲げ試験を行った。圧縮試験と同様に載荷面を石膏によりキャッピングし、荷重制御により 3.0kN/min の載荷速度とした。破壊時の荷重を計測することで、式 [2.1] により、曲げ強度を算出した。

$$f_b = \frac{3P_{\max}L}{2bh^2} \quad [2.1]$$

ここで、 f_b ：曲げ強度 (N/mm^2)、 $P_{\max}$ ：最大荷重 (N)、 L ：スパン (mm)、 b ：破壊断面の幅 (mm)、および h ：破壊断面の高さ (mm) である。このとき、スパン $L=120\text{mm}$ とした。また、破壊断面の幅および高さは、試験後の供試体の実測値を用いた。

曲げ試験は、流込み供試体および y -積層体をそれぞれ 2 体ずつ、 x -積層体を 3 体ずつ、ならびに xyx -積層体および yxy -積層体は 1 体ずつ実施した。

2.2.4. X 線 CT 法

積層経路に基づく 3DP コンクリート内部の残存空隙構造を可視化するために、X 線 CT 法を行った。X 線 CT 法の概念図を図-2.5 に示す。X 線 CT 法では、物体に対し方向から照射した X 線の透過強度を検出

器により取得する[92–94]。多方向から取得した二次元の透過データをコンピュータにより再構成することで、物体内部の三次元構造を非破壊で可視化する手法である。 I_{in} の X 線強度で照射された X 線が X 線吸収係数 μ を有する厚さ t の物体を透過したとき、透過後の X 線強度 I_{out} は、次の式 [2.2] により算出される。

$$I_{out} = I_{in} e^{-\mu t} \quad [2.2]$$

これにより、コンピュータによる再構成処理で得られる連続断層画像のグレースケールは、各ボクセルにおける X 線吸収係数を反映しており、その値は物体の密度および組成に基づくものである。すなわち、X 線 CT 法により得られる三次元画像データは、物体内部の密度分布を示すものと捉えることができる。得られた画像においては、フィルタによるノイズ処理や各オブジェクトのラベル化等の画像処理を適用することにより、対象とするオブジェクトのサイズ、空間分布、形状などを定量的に評価することができる。

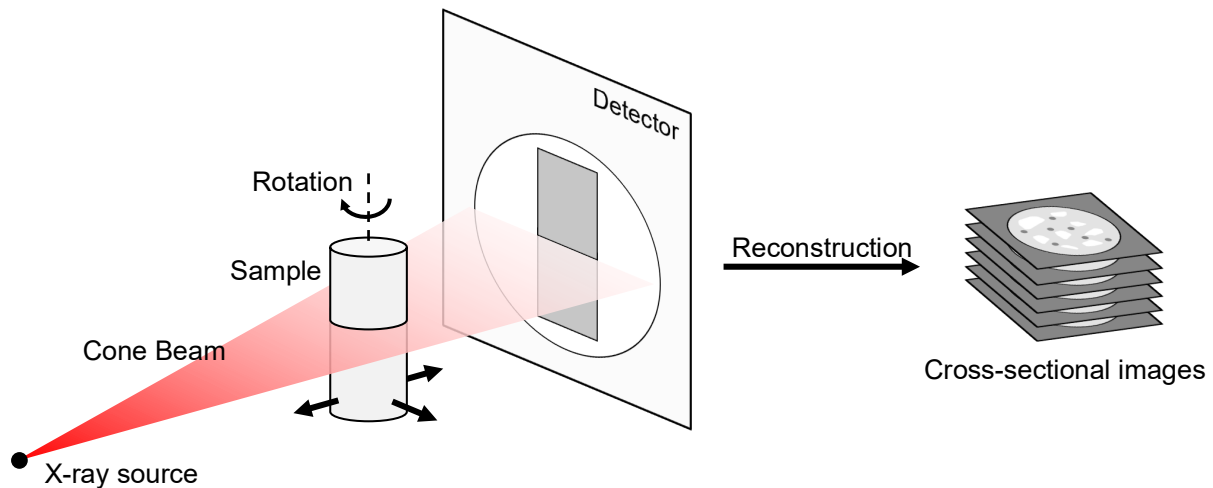


図-2.5 X 線 CT 法の概念図

コンクリート工学分野においては、ひび割れや空隙等の空気部分、ペースト部、骨材、鉄筋等の各構成要素の密度が異なることから、コンクリート内部の三次元的構造を可視化することができる。内部ひび割れの可視化[95,96]、空隙構造[97,98]や骨材分布[99]の定量化だけでなく、鉄筋腐食[100]や溶脱等の化学的劣化[101,102]に伴う密度変化によるコンクリート内部の変質挙動を画像として捉えることができる。近年では、機械学習および AI を用いた画像解析手法の高度化[103,104]、数値解析手法との統合[105]、力学試験と経時的スキャンによるひずみ分布の可視化[95,106]などの例が見られ、画像解像度、アーチファクトの制約下であるものの、内部構造を三次元的および定量的に評価できる手法として広く適用されている。

3DP コンクリートに対する適用事例では、積層界面領域における局所的な空隙構造[33,34,62,107]、圧送におけるせん断履歴に基づく材料不均質性[108]、吐出積層造形プロセスに起因する構成材料の空間分布[109]、残存空隙構造の可視化[109,110]、造形プロセス中に挿入された補強材近傍への空気の連行評価[111,112]など、内部構造の可視化および定量化に関して幅広い適用事例が見られる。すなわち、積層造形プロセスに起因する内部構造の不均質性を定量化するために、三次元的に内部構造を可視化する X 線 CT

法は、3DP コンクリート技術発展における有用な技術であるといえる。

本章における X 線 CT 撮影は、Rigaku CT lab HX-100 を使用し、管電圧 100kV および管電流 200 μ A とした。また、0.2mm 厚の Cu フィルタを使用することで、低エネルギーの X 線を遮蔽しアーチファクトの発生を低減した。撮影および再構成により、解像度 24.86 μ m/pixel および画像サイズ 2864 $\times$ 2864pixel の連続画像を取得した。X 線 CT 画像の解析には、Dragonfly および ImageJ を使用した。

2.2.5. 圧縮载荷前後の 3D スキャンによる変位分布の評価

先行研究では、ノズル移動方向と荷重作用方向の関係に基づき、3DP コンクリートは力学的異方性を示すことが多数報告されている[1,31,61,63,65,113,114]。このとき、多くの事例では、最終的な強度における方向依存性を報告しているが、応力の作用により得られる変形挙動を評価した例はほとんどない。

構造部材における変位の計測は、ひずみゲージを貼付した場合や LVDT を用いた局所的な変位計測が一般的である。しかしながら、変位を面的に評価したいときや、破壊の起点が事前に不明確なとき、局所的な変位計測では不十分な場合がある。このとき、载荷前後の 3D スキャンデータを用いて、変位を面的に計測した例が見られ、3D スキャンによる変形挙動の評価の可能性が報告されている[115]。

セメント系材料に限らず、3D プリンティング技術を用いて造形された既製品の表面形状をスキャンして構造分析を行った後、3D プリンティング技術により再生産するといったリバーシエンジニアリングにおいて、本手法は広く利用されている[116,117]。3D コンクリートプリンティングにおいては、積層造形前の設計データと造形後の積層体の点群データを比較することで、積層品質の評価を目的に出来形検査に用いた例が報告されている[9,118]。しかしながら、力学試験における変位分布の三次元的評価に対して適用した例はほとんどない。

本章では、圧縮载荷試験の前後において供試体表面データを取得し、比較することで異方的な変形挙動を評価した。図-2.6 に、圧縮载荷前後の円柱供試体の 3D スキャンの様子を示す。3D スキャナは SHINING 3D 社製 EinScan-SE を使用した。白色光 LED を光源とする非接触式の光投影方式である。スキャナに搭載された光源からパターン光を物体に照射し、物体表面の凹凸で反射したパターンをカメラで撮影することで、物体表面の三次元座標データを取得する。測定中に物体を配置したターンテーブルが回転することにより三次元的な測定が可能である。このとき、ターンテーブルに配置するため、一度のスキャンでは上下面を含む全方位からスキャンできないため、供試体の設置方向を変えながら複数回のスキャンを行

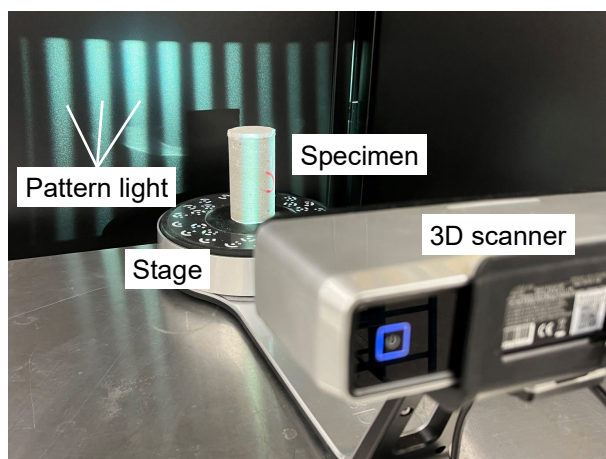


図-2.6 圧縮载荷前後の 3D スキャン

った。

載荷前後における2つの3D スキャンデータに対して、載荷前のポリゴンデータの各頂点から載荷後のポリゴンデータの各頂点までの最短距離を算出し、載荷による変位 δ と定義した。また、2.3.1(c)において後述する載荷に伴う変形を X 線 CT 画像と合わせて二次元的に可視化するために、式 [2.3] により圧縮載荷による変位を算出した。

$$(x_{plot}, y_{plot}) = (x, y) + \frac{|\delta|}{\delta_{max}} \times (x, y) \quad [2.3]$$

ここで、 (x_{plot}, y_{plot}) : 圧縮載荷後の変形を考慮した各ポリゴン座標の位置座標、 (x, y) : 圧縮載荷前の各ポリゴンの位置座標、 δ : 載荷前後の各頂点までの最短距離、および δ_{max} : 供試体全周における δ の最大値である。

2.2.6. 中央点載荷による三点曲げ試験時のデジタル画像相関法 (DIC)

3D スキャンと同様に、デジタル画像相関法 (DIC) は、構造部材の変形を面的に評価する手法として用いられる[119]。DIC では、物体表面に塗布したランダムパターンが載荷中に変化していく様子をカメラで撮影および追跡する。ランダムパターンをサブセットごとに追跡することで、各位置における変位を算出し、その空間勾配からひずみ分布を可視化することができる。DIC においては、載荷試験におけるひずみ分布の局所化からひび割れ発生および進展の可視化に有用である[120,121]。

中央点載荷による三点曲げ試験の様子を図-2.7 に示す。本章で検討する曲げ試験では、瞬間的に破壊が完了する脆性的な破壊を対象にしている。このとき、ひび割れ発生前における変位分布およびひずみ分布を可視化するために、撮影速度 4000fps、シャッター速度 1/20000s の高速度カメラを使用した。高速度カメラによる撮影では、破壊時を起点に前後約 1.5 秒間を連続画像として取得した。取得した画像は、1024 × 512pixel であり、解像度は 0.105mm/pixel であった。

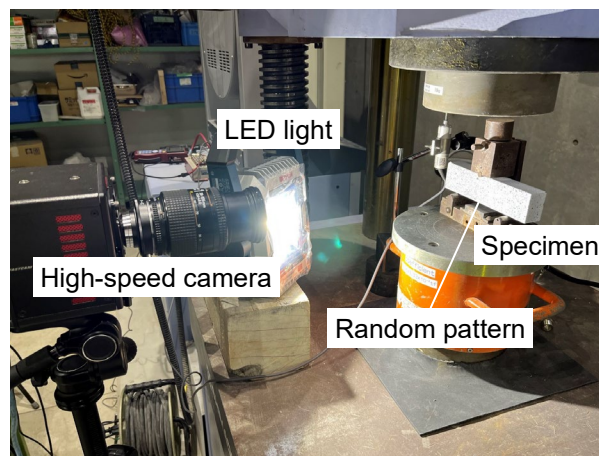


図-2.7 中央点載荷による三点曲げ試験の様子

2.3. 実験結果

2.3.1. 圧縮载荷試験の結果

図-2.8 に、圧縮载荷後の X 線 CT 法により得られた流込み供試体および 3DP コンクリート供試体における断面画像を示す。図中の黄色線は、X 線 CT 画像における横断面および縦断面画像において対応する各断面位置を示している。また、各画像左上にひび割れ導入時の応力度を示す。

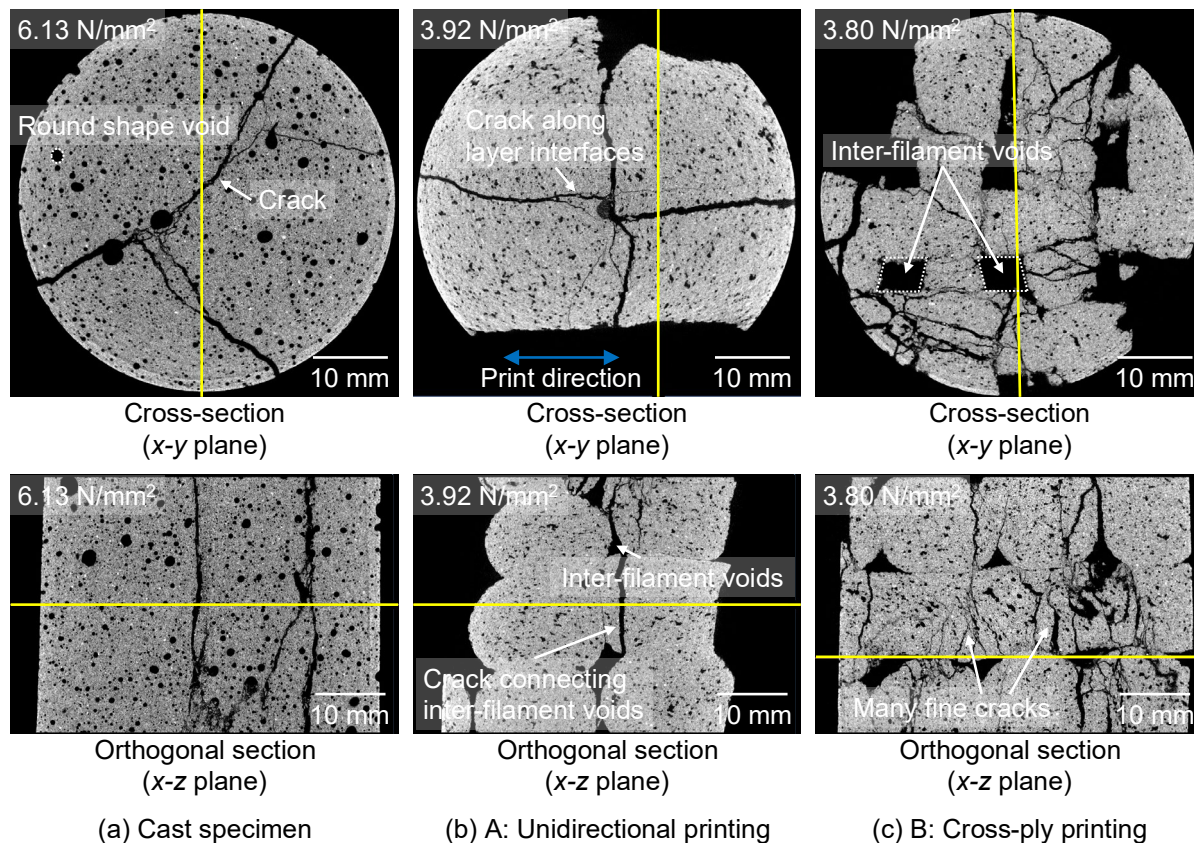


図-2.8 圧縮载荷後の X 線 CT 画像 (a) 流込み供試体 (b) 条件(A) (c) 条件(B)

(a) 内部空隙の観察

3DP コンクリートに発生する空隙において、フィラメント間に残置する残存空隙に対して、フィラメント内部に形成される空隙は内部空隙と呼称される。このとき、フィラメント内部に発生する内部空隙は、流込みコンクリートの気泡および空隙に相当するものであり、その発生は不可避である。3DP コンクリートにおいては、材料吐出方向とノズル移動方向が垂直になるとき、内部空隙が幾何学的変化を示すことが報告されている。内部空隙の幾何学的変化およびそれに伴う内部空隙構造の変化は第 4 章において評価するため詳細は譲るが、図-2.8 においても流込みコンクリートと 3DP コンクリートにおける内部空隙形状の差異が観察できる。すなわち、図-2.8(a)に示すように、流込みコンクリートは球形状の空隙を有する一方で、図-2.8(b)および(c)に示す 3DP コンクリートにおける内部空隙は、球形でない不規則な形状を示している。吐出造形プロセスに起因する内部空隙の変化は、特に耐久性に対して重要になると考えられ、詳細な評価が重要であり、これは第 4 章で詳述する。

(b) 内部ひび割れの観察

図-2.8 より、積層経路に基づき形成される異なる残存空隙構造に伴い、内部ひび割れにおいても異なる進展挙動が観察できる。図-2.8(a)に示すように、流込み供試体においては、内部ひび割れはランダムに進展している。図-2.8(b)に示す一方向のみに積層した条件(A)では、横断面画像において左右方向がノズル移動方向に相当し、縦断面画像ではフィラメント断面、およびフィラメント間の残存空隙が確認できる。内部ひび割れは、供試体高さ方向に残存空隙を結ぶように進展している。加えて、ひび割れの本数は少ないものの、幅の大きいひび割れが発生している。これに対し、図-2.8(c)に示す条件(B)では、横断面画像内で左右方向および上下方向がノズル移動方向にあたり、フィラメント間に格子状に残存空隙が発生している。これにより、多数の微細ひび割れが内部に発生している。

このとき、図-2.9 および図-2.10 に载荷前の条件(A)および(B)の積層体に対して、残存空隙を抽出した結果をそれぞれ示す。図中左上から時計回りに、三次元画像、 z 、 x および y 方向に投影し、平均値をグレースケールで表示した二次元画像を示す。すなわち、二次元投影図では、各方向に空気部分が多く分布するとき、投影図上で白く表示される。

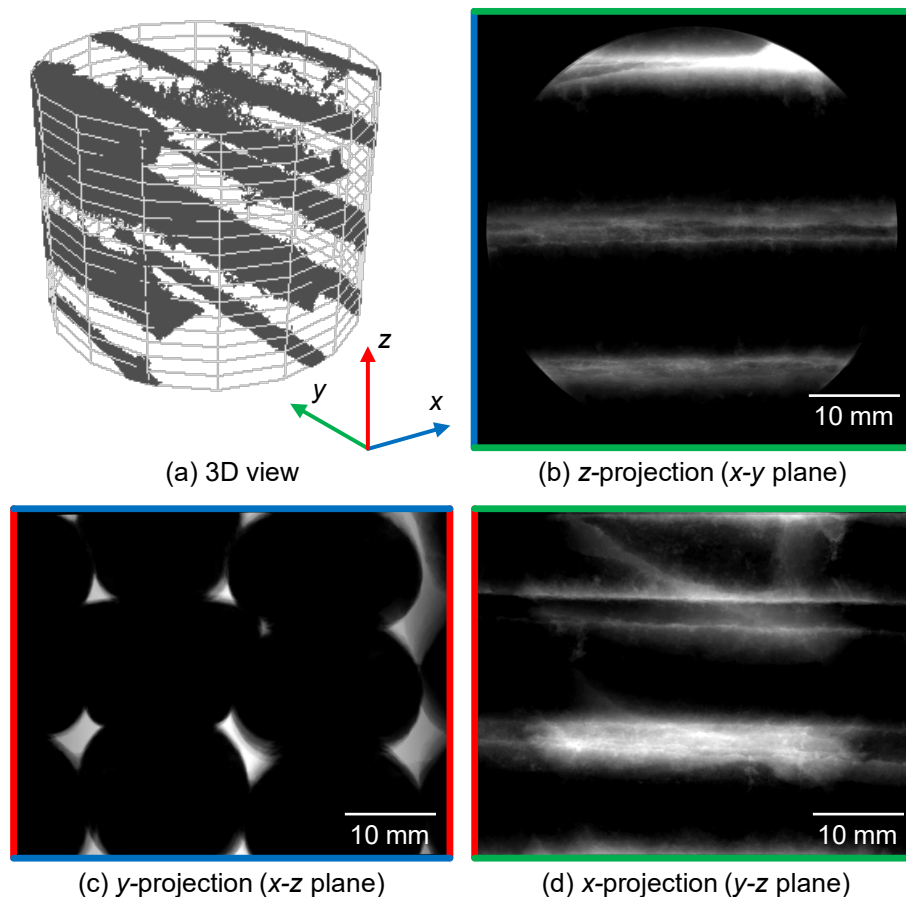


図-2.9 条件(A)における残存空隙の抽出結果 (a) 三次元表示 (b) 二次元投影図 (xy 断面) (c) 二次元投影図 (xz 断面) (d) 二次元投影図 (yz 断面)

図-2.9(a)より、一方向のみに積層した条件(A)においては、ノズル移動方向に基づくフィラメント配向

と同様に、残存空隙も一方向に整列している。これは、図-2.9(b)～(d)においても確認でき、図-2.9(c)では、整列したフィラメントが黒い領域で確認でき、フィラメント間にひし形形状の残存空隙が発生している。図-2.9(b)および(d)では、ノズル移動方向である紙面左右方向に沿って残存空隙が発生している。これにより、ひし形形状における頂点部分に応力が集中し、図-2.8(b)に示すように、上下に配置された残存空隙を結ぶ内部ひび割れが発生したことが理解できる。

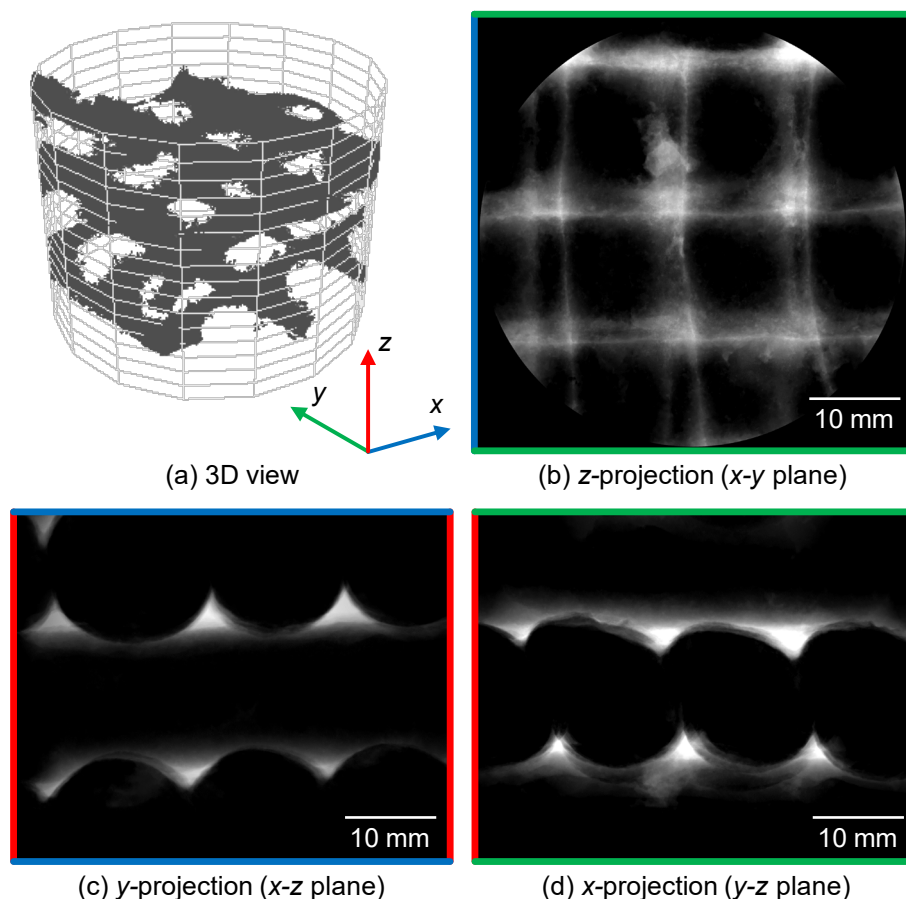


図-2.10 条件(B)における残存空隙の抽出結果 (a) 三次元表示 (b) 二次元投影図 (xy 断面) (c) 二次元投影図 (xz 断面) (d) 二次元投影図 (yz 断面)

図-2.10(a)より、直交する二方向に交互に積層した条件(B)では、より複雑な残存空隙構造が形成されている。図-2.10(b)に示すように抽出した残存空隙を z 方向に投影したとき、残存空隙は格子状に配置されていることが分かる。また、図-2.10(c)および(d)に示すように、紙面奥行方向に吐出された層のフィラメント間に残存空隙が形成されている。その上下の層は紙面左右方向に吐出されており、残存空隙は三角形形状を示している。これにより、残存空隙構造が複雑した結果、三角形形状の頂点における応力集中および応力伝達機構が複雑化したことで、多数の微細ひび割れが発生したことが理解できる。すなわち、条件(A)と比較して条件(B)では、残存空隙が積層体内部に分散して配置されたことで、図-2.8(c)に示すようにひび割れが局所化せず、多数の微細ひび割れが発生したと推察できる。

以上により、積層経路に基づく残存空隙構造によって、積層体内部における応力伝達機構が変化することで、内部ひび割れの進展挙動が異なる結果が示された。このとき、異なる内部ひび割れ進展挙動によっ

て、積層体の変形挙動が変化すると考えられる。次節において、異なる残存空隙構造に起因する積層体の変形挙動を3D スキャンによって評価した結果を示す。

(c) 圧縮载荷前後の変位分布の評価

载荷前後における3D スキャンによって取得したポリゴンデータに基づき、式[2.3]により算出した変位分布载荷後の供試体の写真と合わせて図-2.11 に示す。なお、図中のコンター図においては、载荷によって膨張した部分を赤に、収縮（欠落）した部分を青に示している。また、各図左の写真は、圧縮载荷後の供試体の様子を示し、供試体表面で確認されたひび割れを黄色点線で示す。

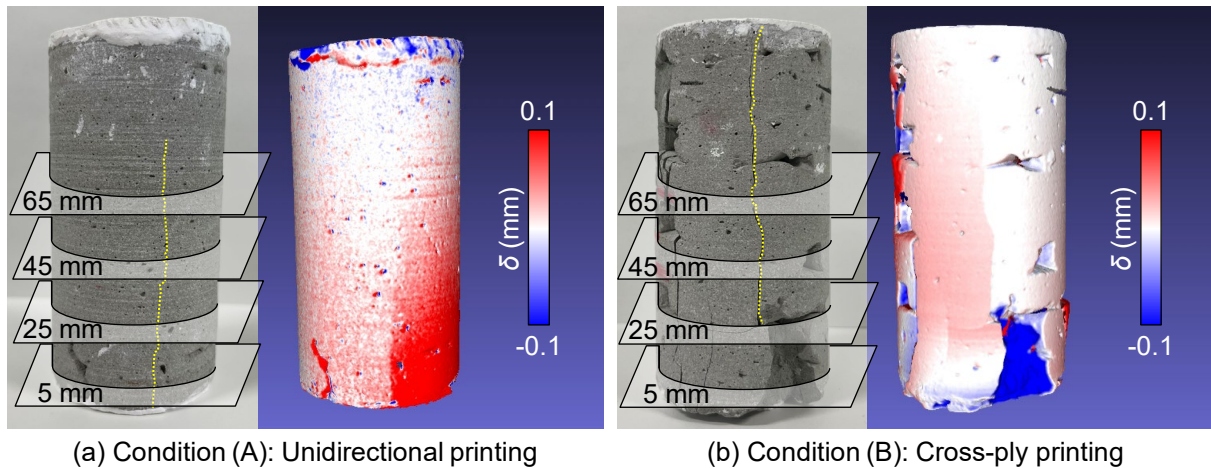


図-2.11 圧縮载荷前後での3D スキャンによる変位分布 (a) 条件(A) (b) 条件(B)

図-2.11(a)に示す条件(A)では、発生するひび割れを起点に膨張部分が確認できる。同様に、図-2.11(b)における条件(B)でも、ひび割れを起点に変位分布が変化する様子が確認できる。また、ひび割れ発生によって供試体片が欠落した部分が青く示されており、载荷前後での3D スキャンによって変位分布が評価できることが示された。このとき、X線CT法により得られた内部構造と統合して変位分布を示すために、供試体下面から5、25、45、および65mmに位置する断面における圧縮载荷後の断面画像と変位分布を図-2.12 に示す。図中の白実線は、载荷前の供試体表面座標を示し、赤実線および青実線は载荷後の式[2.3]により算出された座標を示す。このとき、青実線で示される部分は圧縮载荷によって一部欠損している部分を示す。これは、圧縮载荷によって面外方向の膨張変形による結果と考えられるため、式[2.3]において δ は大きさのみを考慮している。

一方向のみに積層した条件(A)では、図-2.8と同様にノズル移動方向は紙面左右方向であり、全断面においてノズル移動方向に対して直交する方向に大きく変形している。これにより、3DP コンクリートにおいては、多数の先行研究で報告されている強度の異方性だけでなく、2.3.1(b)で可視化した残存空隙構造に起因して異なるひび割れ進展挙動を示し、その結果、変形挙動にも異方性が発生する。異方的な変形挙動は三次元的な供試体表面座標データを用いることで評価できることが分かった。

これに対して、直交する二方向に交互に積層した条件(B)では、全断面において、条件(A)で確認された変形の異方性は確認できず、円周全体にわたって大きく変形している。積層経路によって残存空隙構造が変化し、3DP コンクリートにおけるひび割れ進展挙動ならびに変形挙動を支配する要因が格子状に複雑

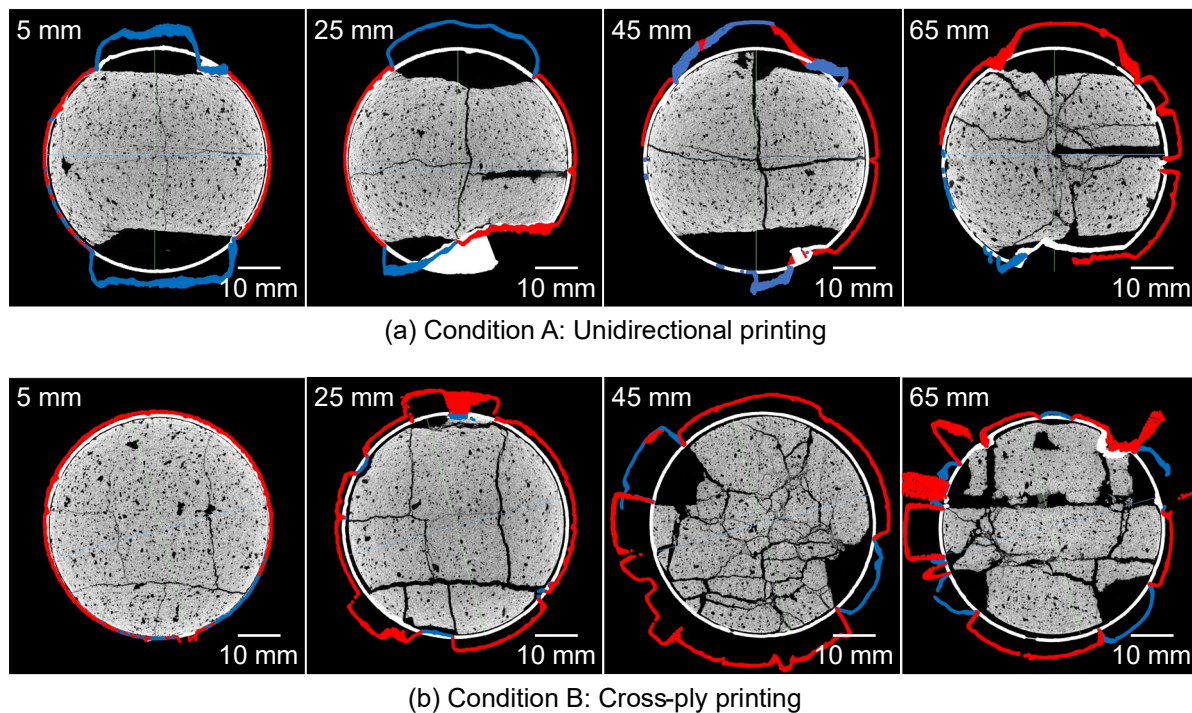


図-2.12 各断面 ($z=5, 25, 45, 65\text{mm}$) における X 線 CT 画像と変位分布 (a) 条件(A) (b) 条件(B)

に分布したことで、変形の異方性が消失し疑似等方的な変形挙動が発生したと考えられる。

2.3.2. 中央点載荷による三点曲げ試験における残存空隙の影響

(a) 曲げ強度への影響

図-2.13 に、中央点載荷による三点曲げ試験における最大荷重 $P_{\max}$ および式 [2.1] により算出された曲げ強度 f_b を示す。図中のエラーバーは標準偏差を示す。2.2.3(b)で言及したように、流込み供試体および y -積層体は各 2 体ずつ、 x -積層体は 3 体、ならびに xyx -積層体および yxy -積層体は 1 体ずつの結果を示している。

流込み供試体と積層体を比較したとき、すべての積層体の曲げ強度は流込み供試体を下回っている。積

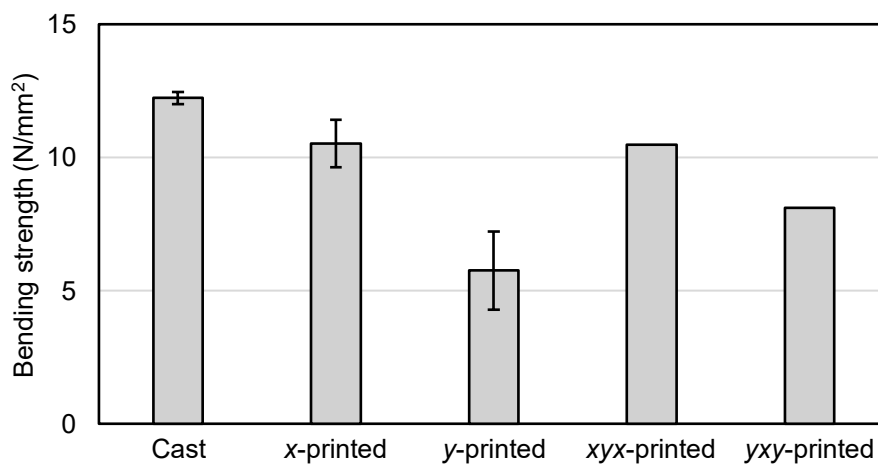


図-2.13 三点曲げ試験結果

層体では、長辺方向に積層した x -積層体の曲げ強度に対して、短辺方向に積層した y -積層体の曲げ強度は、約 40%低い値を示す。これは、短辺方向に積層したとき、隣接するフィラメント間の積層界面に対して垂直に引張応力が供試体下部領域で作用し、上下に配置された残存空隙を結ぶように容易にひび割れが進展したと考えられる。しかしながら、短辺方向の積層を含む xyx -積層体においては、 x -積層体とほとんど同じ曲げ強度を示している。また、 jxy -積層体においても、曲げ強度は y -積層体に対して約 40%向上し、 x -積層体と比較すると約 20%の低下に留まっている。これにより、短辺方向の積層を含む場合でも長辺方向の積層と組み合わせることで、曲げ強度の低下を軽減することができることが示された。

(b) 高速度カメラを用いた DIC によるひずみ分布の可視化

図-2.14 にひび割れ発生時を起点として、0.25 μ s 前後の供試体表面における主ひずみ分布を示す。当該供試体の曲げ強度をひび割れ発生時の図中左上に示す。また、各図中央において、各層のフィラメント部分を白点線で示す。

図-2.14(a)に示すように、流込み供試体において、ひび割れが発生する直前 (0.25 μ s 前) では、ひずみの局所化領域が観測できず、ひび割れは瞬間的に発生し、供試体下面から上面に向かって一直線に進展している。すなわち、流込み供試体は荷重に対する変形量が小さい脆性的な破壊挙動を示す。これに対して、積層体では、最下層においてひび割れ発生直前にひずみ局所化領域が確認できる。流込み供試体では、ひび割れ発生直前で、0.1%以上のひずみの局所化は生じていない一方で、積層体では、1~2%程度のひずみの局所化が確認できる。すなわち、流込み供試体に対して、曲げ強度は低下するものの、積層構造に伴い段階的に破壊が進行すると考えられる。

図-2.14(b)に示すように、 x -積層体では、中央の白点線で示すように積層界面および残存空隙による積層構造が確認できる。このとき、供試体下面から発生するひび割れについて、上面に向かって一直線に進展するのではなく、積層界面において進展方向を変えながら、層ごとに脆弱部を進展する段階的な破壊挙動が確認できる。これは、フィラメントを割裂しながらひび割れが進展していくとき、各層のフィラメントにおける脆弱部分が異なることにより、各層のひび割れ進展経路が異なったためと考えられる。

図-2.14(c)に示すように、 y -積層体においては、フィラメント断面形状および残存空隙の形成が確認できる。また、フィラメントの吐出順序により、フィラメントが傾斜している様子が確認できる。そのため、最下層では、隣接フィラメント間の積層界面に沿うように高ひずみ領域が局所化し、上層においても同様に積層界面に沿うようにひび割れが進展している。その結果、ひび割れ経路は下面から上面に向かって一直線にならず、カーブを描くような軌道になる。また、ひび割れ発生時のひずみは他の積層体と比較して小さく、ひび割れが発生する限界の引張ひずみが小さいことが分かる。これは積層界面に垂直に引張応力が作用したとき、ひずみがほとんど蓄積されないままひび割れ形成に至ったためであると考えられ、その結果、 y -積層体では曲げ強度が最も小さくなったと理解できる。この結果からも、積層界面および残存空隙が積層体における脆弱部となり、破壊の起点および経路になることが分かった。

図-2.14(d)に示すように、 xyx -積層体では、最下層と中間層の間に残存空隙が形成されている。一方で、ひび割れは下面から上面まで一直線に進展しており、流込み供試体における挙動に類似している。すなわち、最下層と中間層の間に形成された残存空隙はひび割れ進展経路にならず、破壊挙動にほとんど影響を及ぼしていない。その結果、曲げ強度においては、サンプル数の不足による統計的限界はあるものの、 x -積層体とほとんど同程度の曲げ強度を示したことが理解できる。一方で、図-2.14(e)に示す jxy -積層体で

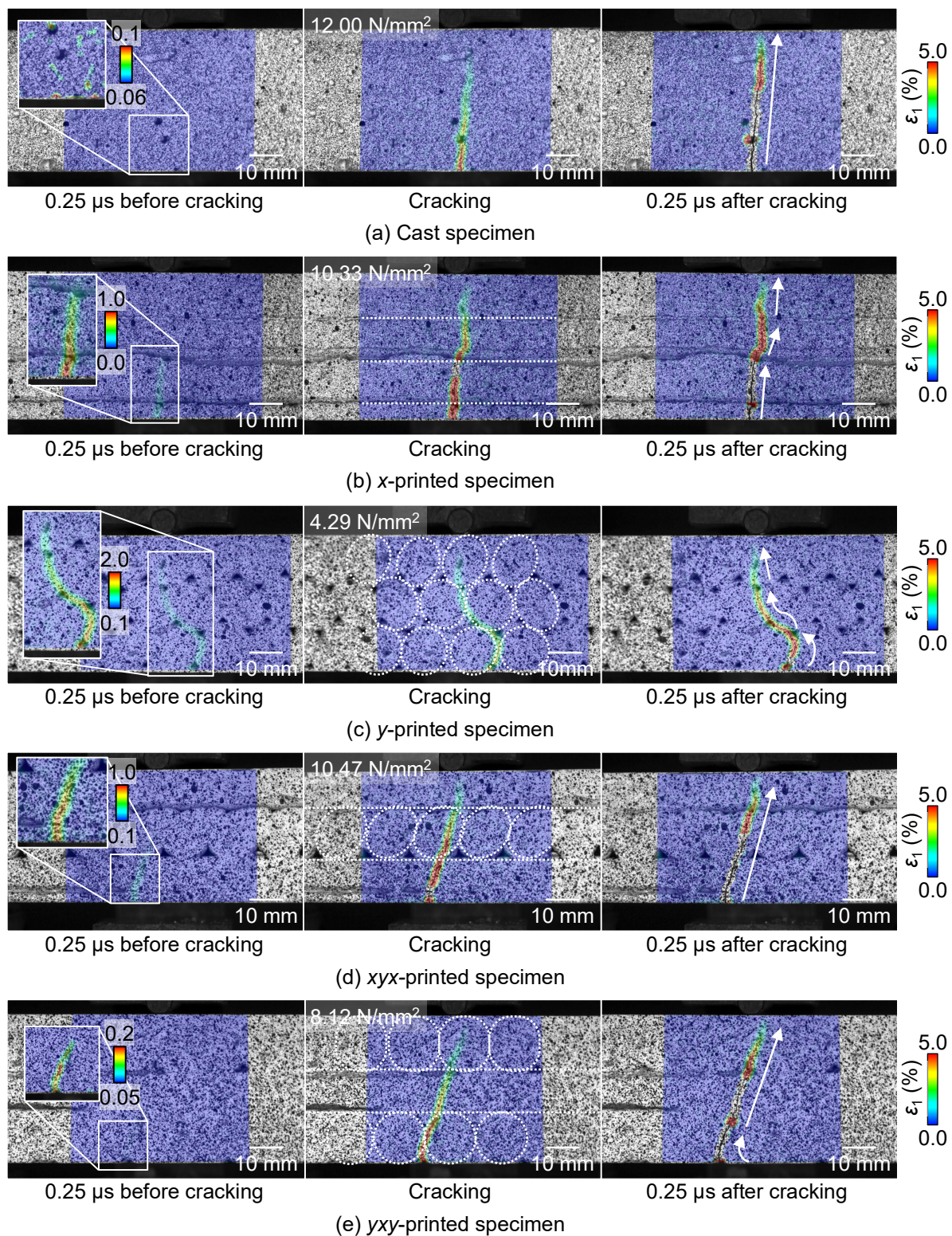


図-2.14 三点曲げ試験時の主ひずみ分布 (a) 流込み供試体 (b) x-積層体 (c) y-積層体 (d) xyx-積層体 (e) yxy-積層体

は、最下層において残存空隙からひび割れが発生し積層界面を沿うようにひび割れが進展している。ここでも、積層界面および残存空隙が破壊挙動における支配的要因であり、その結果、長辺方向の積層を含ん

でも、y-積層体に対する曲げ強度の向上が xyx -積層体ほどではなかったことが理解できる。

以上の結果から、長辺方向と短辺方向を組み合わせた積層経路設計を行うことで、y-積層体のような極端な強度低下を抑制しつつ、流込み供試体では達成困難なひび割れ分散効果を付与することができると考えられる。

なお、本章では、単一の配合条件を対象としたが、上述の得られた知見の一般化においては、配合条件が残存空隙構造の形成および破壊挙動に及ぼす影響を考慮する必要がある。配合の変化に伴うフレッシュ材料の粘性および降伏特性などレオロジック的变化は、吐出後のフィラメント形状および隣接フィラメントとの接着性状の変化に影響を及ぼす[85]。これにより、残存空隙の寸法および形状が変化する可能性があり、残存空隙端部における応力集中状態が変化し、破壊挙動に影響することが考えられる。一方で、本章で検討した残存空隙は、3DP コンクリート内部における比較的粗大な空間であり、幾何学的欠陥としてひび割れの起点および経路として作用するため、積層経路に起因する残存空隙構造とそれに伴う破壊挙動への影響そのものは、異なる配合においても一定の一般性があると考えられる。

2.4. 第2章のまとめ

本章では、積層経路に基づく残存空隙構造が3DP コンクリートの圧縮および曲げ破壊挙動に及ぼす影響を評価した。圧縮試験においては、すべての層で一方向に積層した積層体と直交する二方向に交互に積層した積層体を使用した。X線CT法により残存空隙構造を三次元および二次元投影図において確認し、内部ひび割れを観察した。加えて、載荷前後の3D スキャンデータを用いて、残存空隙構造に基づく内部ひび割れの結果得られる変形挙動の異方性を評価した。曲げ試験においては、フィラメント配向に基づくひび割れの発生および進展を高速度カメラで撮影した連続画像に対するDICによって破壊挙動を評価した。本章で得られた知見を以下に示す。

- 1 残存空隙構造について、積層経路に基づきすべての層で一方向に積層したとき、残存空隙はフィラメント配向に伴って一方向に整列する。これに対して、直交する二方向に交互に積層したとき、各層におけるフィラメント配向が変化し、格子状の複雑な残存空隙構造が形成される。
- 2 残存空隙構造の変化に伴って、すべての層で一方向に積層したとき、上下に配置された残存空隙を結ぶように内部ひび割れが進展する。直交する二方向に交互に積層したとき、格子状の残存空隙構造による複雑な応力伝達機構によって、内部ひび割れは微細なひび割れが多数発生する。
- 3 圧縮応力下の変形挙動について、すべての層で一方向に積層したとき、ノズル移動方向に垂直な方向、すなわち、隣接するフィラメント界面で割裂する方向に変位が卓越し、変形の異方性を示す。一方で、直交する二方向に交互に積層したとき、すべての断面で変形の異方性は確認できず、円周方向全体にわたって変形する。
- 4 三層分の高さを有する積層体に対して中央点載荷による三点曲げ試験を行ったとき、流込み供試体の曲げ強度に対して、積層体の曲げ強度は低い値を示す。長辺方向のみに積層した積層体の曲げ強度に対して、短辺方向のみに積層した積層体の曲げ強度は著しく低下する。一部の層を長辺方向に積層した積層体では、短辺方向のみの積層体より高い曲げ強度を示す。
- 5 曲げ応力下での破壊挙動においては、流込み供試体が示す瞬間的な脆性破壊と比較して、積層体は段階的な破壊挙動を示す。長辺方向のみの積層体では、層ごとにひび割れ進展方向が変化する。短辺方向のみの積層体では、残存空隙を結ぶように隣接フィラメント間の積層界面に沿ってひび

割れが進展する。長辺方向と短辺方向を混合した積層体では、最下層が短辺方向である場合、その残存空隙はひび割れ発生の起点になる。一方で、最下層が長辺方向であり、残存空隙が中間層部分に発生するとき、ひび割れ経路にならず、残存空隙の空間的配置が破壊挙動に影響を及ぼす。

本章における検討により、残存空隙が発生する 3DP コンクリートにおいて、積層経路に起因する残存空隙構造が 3DP コンクリートの力学性能および破壊挙動に支配的な影響を及ぼすことが分かった。

第3章 3DP コンクリートの力学的異方性における破壊メカニズムと積層界面の二面的役割

3.1. はじめに

第2章では、残存空隙が生じる3DP コンクリートの力学特性および破壊性状を評価した。このとき、積層経路に基づく残存空隙構造によって、ひび割れ発生および進展挙動が大きく影響され、3DP コンクリートの異方的な力学性状に対して、残存空隙の配置が重要であることが分かった。しかしながら、実際の構造物では、残存空隙を発生させない使用材料や配合および積層パラメータの選定が考えられる。したがって、残存空隙が発生しない、すなわち密実に積層造形された3DP コンクリートにおける破壊挙動の評価する必要がある。

このとき、破壊挙動に影響を及ぼす一因として、隣接するフィラメント同士の界面である積層界面が考えられる[1,39,51,122]。先行研究では、フィラメントの吐出後、次層の積層までの時間間隔（ギャップタイム）に基づき、フィラメント表面から水分が蒸発することで、フィラメント表面は、微細な凹凸を生じることが報告されている[27]。これにより生じた凹凸部分に次の層の積層時に空気が連行されることで、積層界面が多孔質な構造を有し、周期的に発生する多孔質な積層界面配置に基づき、3DP コンクリートは異方的な力学性能および破壊挙動を示す[63]。すなわち、積層界面における多孔質な構造が力学的異方性の発生要因であると考えられてきた[30,80,123]。

しかしながら、フィラメント表面からの蒸発を最小にすることで、積層界面が多孔質にならず連続的となるように積層を行った場合でも、硬化後の3DP コンクリートは力学的異方性を示すことが報告されている[124,125]。したがって、以上の3DP コンクリートにおける力学的異方性は、多孔質な積層界面に起因するものではなく、フレッシュ材料の管内流動時のせん断履歴に起因するフィラメント内部の材料不均質性に基づくものであると考えられる[7,20,126]。すなわち、ホースおよびノズル内を材料が圧送されるときに受けるせん断力により、フィラメント内部の骨材が中心部分に移動し、フィラメント表面では潤滑層が形成される[108,127]。これにより、フィラメント表層部分と内部部分で異なる組成を示していることが考えられる。先行研究では、これらの材料不均質性に基づくフィラメント内部の局所的な領域に対して、潤滑層由来のフィラメント表層部分を *Skin* と定義し、フィラメント内部を *Core* と定義している[27]。また、*Skin* は *Core* と比較して、骨材の含有率が20%少なく、未水和のセメントを60%多く有していると報告されている[27]。文献[27]では、多孔質な場合と密実な *Skin* の場合の両方を含む概念として、積層界面を *Filament Interfacial Zone (FIZ)* と呼称し、3DP コンクリート内部における FIZ の空間的配置を *Filament Interfacial Zone Network (FIZN)* としている。以上より、3DP コンクリートにおける力学的異方性の構造的要因は、多孔質な構造、あるいは、*Skin* と *Core* の組成上の差異であり、これは造形プロセスに起因する3DP コンクリート固有の性質である。

3DP コンクリートの積層界面が多孔質であっても、密実な場合でも、その配置と応力の作用方向の関係によって力学的異方性が発生するとき、力学的異方性を制御した設計を行うことで、3DP コンクリートに意図的な脆弱部の分散、あるいは局所化によって、流込みコンクリートでは達成できない性能を付与できる可能性がある[76,77,110]。このとき、文献[27]によって力学的異方性の静的な構造的要因が、管内流動時のせん断履歴に起因する *Skin* と *Core* の組成上の差異であることが解明された一方で、これらの組成上の差異に基づくひび割れ発生および進展挙動における積層界面の役割、すなわち動的な破壊メカニズム

は未解明のままである。

3DP コンクリートの力学的異方性に関して、積層界面配置と応力作用方向の関係に基づき、以下の二つの破壊形式が考えられる。すなわち、ひび割れが積層界面を横切るように進展する Trans-layer 破壊と、ひび割れが積層界面に沿って進展する Inter-layer 破壊の二種類である[69]。本章では、これらの破壊形式に対して、AE 法および DIC を統合したひび割れキネマティクス解析によって、ひび割れ発生時の AE 発生挙動および進展時のひび割れ開口幅の時間履歴における破壊力学的応答を評価した。積層造形においては、管内流動時のせん断履歴に起因する材料不均質性の発生を目的として、材料圧送にポンプシステムを採用したガントリー式 3D プリンタを使用した。その後、切欠きを導入することで Mode I の破壊を発生させ、三点曲げ試験における AE 発生挙動と表面ひずみ分布を可視化した。このとき、X 線 CT 法を行い、三次元的な材料密度分布に基づき、内部構造を観察することで、本章における 3DP コンクリートの積層界面における構造的要因が、空隙を伴う多孔質な構造か、材料不均質性による密実な構造かを同定した。

3.2. 実験概要

3.2.1. Trans-layer 破壊および Inter-layer 破壊を想定した積層経路設計

3DP コンクリートにおいては、積層造形時のノズル移動方向と硬化後の载荷方向の関係に基づき、力学的異方性を有することが多数報告されている[1,31,61,63–65,68,128–130]。このとき、先行研究においては、積層界面配置とひび割れ進展方向の関係により、図-3.1 に示すように、3DP コンクリートに発生する破壊を二つの基礎的な破壊形式に分類している[69,131]。第一に、フィラメントを割裂しながら積層界面に対して垂直にひび割れが進展する破壊形式が Trans-layer 破壊である。第二に、フィラメント同士が剥離するように積層界面に沿ってひび割れが進展する Inter-layer 破壊である。本研究においては、これら二つの破壊形式に分類される 3DP コンクリートの力学的異方性を評価するために、長辺方向のみの積層により造形した Type A および短辺方向のみの積層により造形した Type B の二種類の角柱供試体を造形した。

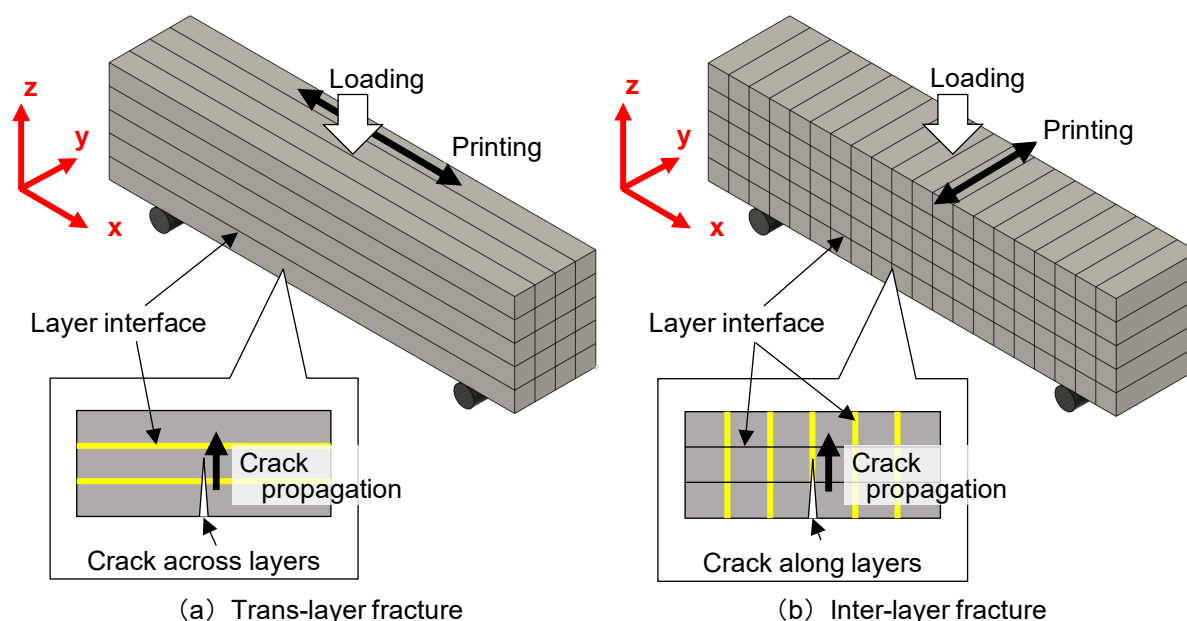


図-3.1 3DP コンクリートの破壊形式 (a) Trans-layer 破壊 (b) Inter-layer 破壊

3.2.2. 3DP コンクリートの造形

本章では、結合剤としてポルトランドセメント (CEM I 52.5R) およびシリカフューム (Elken Microsilica) 使用し、水結合剤比 27.5%とした。また、珪砂 (粒径: 0.25~0.50mm) を細骨材として使用し、砂結合剤比 100%とした。加えて、3DP コンクリートにおけるフレッシュ材料の要求性能である良好なポンプ圧送性および吐出後の形状保持性を両立するために、ポリカルボン酸系減水剤 (CUGLA HR con.35% SPL) を添加した。表-3.1 に配合表を示す。同一材料および同一配合を使用して作製した $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$ の流込み供試体における材齢 28 日時点の圧縮強度は 98.9MPa であり、 $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ の流込み供試体における材齢 28 日時点のヤング率は 37.5GPa であることを確認した。

表-3.1 配合表 (単位: kg/m^3)

Water	Cement	Silica fume	Sand	Superplasticizer
276	854	151	1004	8

図-3.2 に本章における 3DP コンクリート供試体作製に使用した 3D プリンタを示す。本プリンタは、デルフト工科大学に設置されたラボスケールのガントリー式材料押出方式の 3D プリンタである [34,49,77,132]。材料を吐出するステージのサイズは $700 \times 1000 \text{ mm}^2$ である。

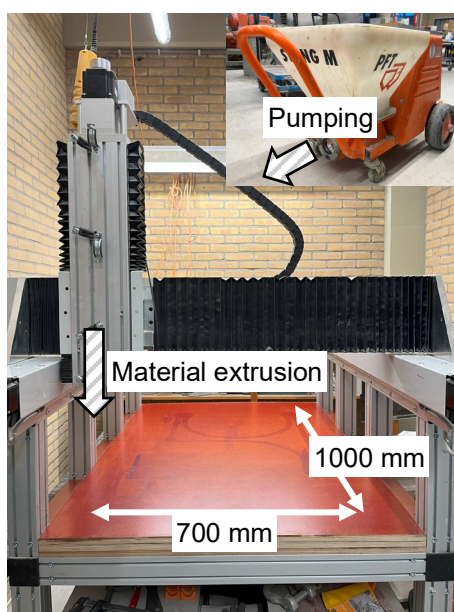


図-3.2 第3章で使用した 3D プリンタ装置

練混ぜられた材料は、ポンプ内に充填されスクリューの回転によりホース内を圧送され、プリンタ装置に取り付けられたノズルから吐出される。ノズルの移動は、ノズルの移動経路を三次元座標および移動速度を規定する G-code により入力され、コンピュータ数値制御 (Computer Numerical Control : CNC) システムにより制御されている。このとき、本プリンタにおける CNC システムはノズルの三次元的な移動経路を規定するものであり、ポンプ圧送システムと対応していない。そのため、ノズルの移動に関わらず、ノズルから一定の材料が吐出されることに注意を要する。本章では、直径 20mm の円形ノズルを使用し、

ノズルの移動速度は 4200mm/min に設定した。供試体の造形プロセスは、室温 20°C および湿度 55% 条件下の室内で実施した。

造形後、3DP コンクリートは室温 20°C および湿度 95% の環境制御室内での湿潤養生を行ったもの (wet) と造形時と同一の室内で気中養生 (air) を行ったものの二種類とした。図-3.1 に示す積層経路と上述の養生条件の組み合わせに基づき、以下の 4 種類の積層体を各 1 体ずつ取得した。すなわち、長辺方向の積層により Trans-layer 破壊を想定した Type A の湿潤養生 (Type A-wet) および気中養生 (Type A-air) と短辺方向の積層に基づく Inter-layer 破壊を想定した Type B の湿潤養生 (Type B-wet) および気中養生 (Type B-air) の 4 種類である。

3.2.3. 切欠きを有する 3DP コンクリートの三点曲げ試験

コンクリートは、圧縮強度に対して引張強度が約 1/10 程度の強度であり、破壊においては、引張応力下のひび割れ発生および進展に支配される (Mode I 破壊) [133]。加えて、先行研究で示されるように、積層界面の形成に起因する力学的異方性は、圧縮応力下と比較して引張応力下において顕著である[63,80]。このとき、流込みコンクリートにおいては、切欠きを有する梁に対する三点曲げ試験を用いて、Mode I 破壊におけるコンクリートの破壊エネルギーや引張軟化曲線を評価する手法が一般的である[134–137]。本章では、積層経路設計に基づく積層界面配置と三点曲げ試験における引張応力下のひび割れ発生および進展の関係を評価するために、切欠きを有する 3DP コンクリートにおける三点曲げ試験を行った。

積層造形された 3DP コンクリートにおいては、積層構造により供試体表面は凹凸を有する。本章では造形後の供試体表面を切断することにより、 $400 \times 80 \times 100 \text{ mm}^3$ (長さ×幅×高さ) の角柱供試体を取得した。3D プリンティング技術による実構造物の造形を想定したとき、上述の供試体表面の凹凸に対する表面処理は実施されない。しかしながら、本章では、基礎的な 3DP コンクリートの破壊性状を評価することが目的のため、多数の先行研究と同様に[63,110,138]、造形プロセスに起因する表面凹凸を切断して平坦な表面とした。

また、コンクリートカッターを用いて、供試体スパン中央部に幅 5mm、深さ 10mm の切欠きを導入した。このとき、三点曲げ試験によって得られる破壊エネルギーは、切欠き深さの影響を受けることが知られており、切欠き深さが深いとき破壊エネルギーは小さく、浅いとき破壊エネルギーは大きくなることが報告されている[137,139]。これは、切欠き深さの増加に伴って残存リガメント長さが減少することで、破壊進行領域 (Fracture Process Zone : FPZ) の発達供試体境界部分で制限されるためである。本章では 1 層分の高さとも一致する 10mm の深さの切欠きを導入することにより、上部 9 層分の破壊挙動を観測することを可能とした。

図-3.3 に三点曲げ試験時の様子を示す。切欠きをまたぐように前面および背面に LVDT (Linear Variable Differential Transformer) を貼付し (LVDT1 および LVDT2)、ひび割れ開口変位 CMOD (Crack Mouth Opening Displacement) を取得した。三点曲げ試験には、引張および圧縮において 100kN の容量を有する電気油圧サーボ方式の載荷試験機を使用した。当該試験機では、供試体に取り付けた 2 個の LVDT における平均信号を用いて、フィードバック制御を行う[140,141]。本章では、 $0.05 \mu\text{m/s}$ の速度で CMOD 制御することにより曲げ試験を実施した。

三点曲げ試験により得られた荷重-CMOD 曲線から、以下の式 [3.1] により破壊エネルギー G_F を算出した[142,143]。

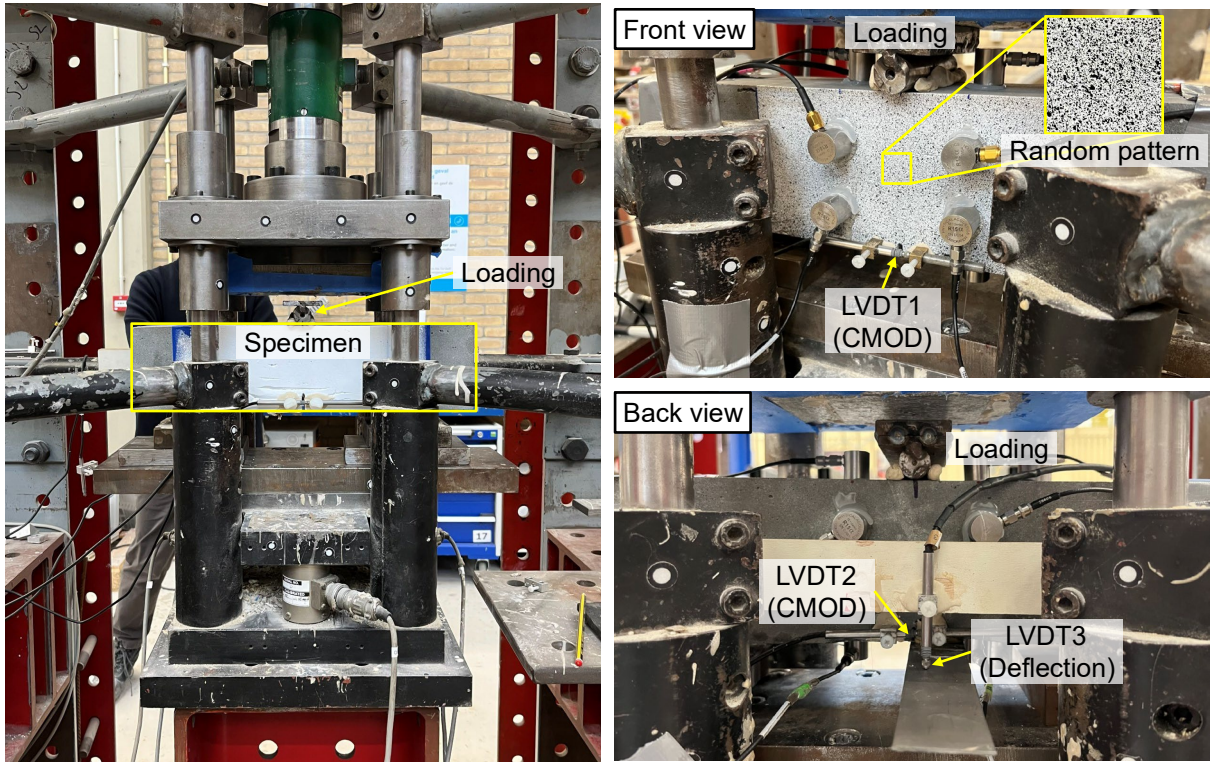
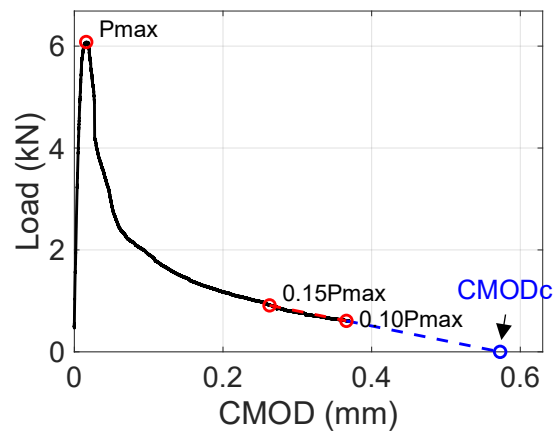


図-3.3 三点曲げ試験の様子

$$G_F = \frac{0.75W_0 + W_1}{A_{lig}} \quad [3.1]$$

$$W_1 = 0.75 \left(\frac{S}{L} m_1 + 2m_2 \right) g \cdot CMOD_c$$

ここで、 G_F : 破壊エネルギー (N/mm)、 W_0 : 供試体が破断するまでの荷重-CMOD 曲線下の面積 (N・mm)、 W_1 : 供試体の自重および載荷治具がなす仕事 (N・mm)、 A_{lig} : リガメント面積 (mm²)、 m_1 : 供試体の質量 (kg)、 S : 載荷スパン (mm)、 L : 供試体の全長 (mm)、 m_2 : 試験機に取り付けられておらず、破断するまで供試体に載っている治具の質量 (kg)、 g : 重力加速度 (9.807m/s²)、および $CMOD_c$: 破断時のひび


 図-3.4 破断時のひび割れ開口変位 $CMOD_c$ の算出方法

割れ開口変位 (mm) である。

このとき、三点曲げ試験時には供試体表面にセンサを貼付しており、破断によって供試体が落下したとき、センサが故障する可能性がある。これを防ぐとともに、最大荷重後の安定的なポストピーク挙動を取得するために、供試体の破断まで試験は行っていない。 $CMOD_c$ の算出には、図-3.4 に示すように、最大荷重 P_{max} に対して、 $0.10P_{max}$ および $0.15P_{max}$ を結ぶ直線を外挿したとき、荷重が 0 になるときのひび割れ開口変位 $CMOD$ を取得した。

3.2.4. 計測項目

(a) アコースティック・エミッション (AE) 法

アコースティック・エミッション (AE) は、「固体材料内部の微小な破壊、あるいはそれと同様なエネルギー解放過程によって発生する弾性波動現象」と定義され、発生する弾性波 (AE 波) をセンサにより検出する手法を AE 法と呼称する[144,145]。コンクリート等の準脆性材料において、荷重あるいは変位が与えられたとき、外力による仕事がひずみエネルギーとして固体材料内部に蓄積される。蓄えられたひずみエネルギーが限界に到達したとき、ひび割れの発生によりエネルギーは解放される。このとき、解放されたエネルギーはひび割れ表面を形成するためにほとんどが消費されるが[146]、その一部は、光、熱、弾性波等の発生に消費される。発生した弾性波は固体材料内部を伝搬し、材料表面に貼付されたセンサにより電気信号に変換され、AE 波は増幅器により増幅され検出される[144,147]。AE 法は、主破壊の発生に先行して発生する微細ひび割れのモニタリングによって、破壊の予兆を捉えることができるだけでなく、検出された波形解析を通じて破壊のメカニズムや特性を定量化することが可能である。AE センサにより検出される典型的な AE 波形の例を図-3.5 に示し、AE 解析に使用される代表的な AE パラメータとその定義を表-3.2 に示す。

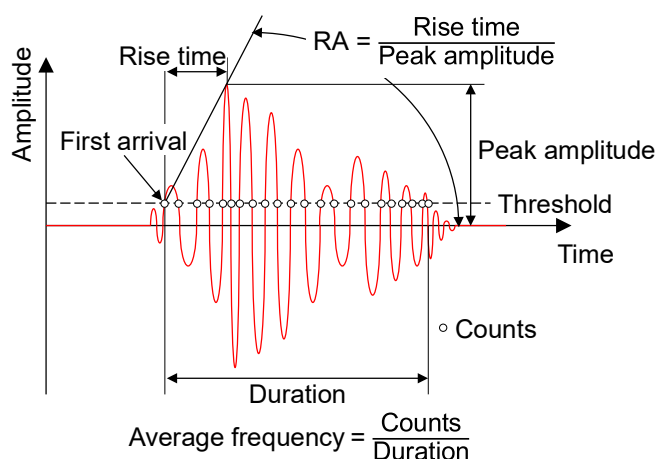


図-3.5 AE 波形の例

AE 法は、コンクリートのひび割れに伴い放出される AE 波をリアルタイムに高感度で検出することが可能である。AE 波の発生挙動をモニタリングすることにより、コンクリート構造物における破壊挙動をモニタリングすることができる。AE 法に関する詳細な歴史は先行文献に譲るが[144,147]、コンクリート工学分野における AE 法の利用は、北海道大学の横道英雄博士による載荷試験中のひび割れ形成に基づく

表-3.2 AE パラメータの定義

AE parameter	Unit	Definition
First arrival	s	Time when the signal first exceeds the threshold
Peak amplitude	dB or V	Maximum amplitude of the signal
Rise time	s	Time interval from the first arrival to the peak amplitude
Duration	s	Time interval from the first arrival until the signal no longer exceeds the threshold
Counts	-	Number of times the signal amplitude exceeds the threshold
RA value	s/V	Ratio between rise time and peak amplitude
Average frequency	Hz	Counts divided by duration

弾性波のモニタリングが初期のものであるとされる[148]。

AE 法では、複数の AE センサにおける検出時間差とセンサ配置から発生した AE 源位置を推定する（位置標定）ことが可能である[149–151]。また、検出された AE 波が有する波形情報（AE パラメータ）を用いてひび割れモードを推定する（ひび割れモード解析）ことが可能である[151–154]。

3DP コンクリートの破壊挙動のモニタリングに対して、AE 法を適用した例は限られているものの散見される[70,77,114,131,155]。三点曲げ試験において発生する AE 波に対して、AE パラメータを用いて機械学習により推定した基準に基づきひび割れモード解析を行った研究では、**Inter-layer** 破壊が発生する場合、**Trans-layer** 破壊が発生する場合と比較してせん断モードのひび割れ割合が増加することを報告している[70]。加えて、AE 発生挙動の変化に基づき、3DP コンクリートの破壊挙動は3段階のプロセスに分類することができ、3DP コンクリートの破壊挙動に対する AE 法を用いたリアルタイムモニタリングの有効性が報告されている[77]。しかしながら、これらの AE 法を用いた 3DP コンクリートの破壊挙動の評価は、ひび割れ発生から進展および破壊に至るまでのプロセスを包括的に記述するに留まっており、AE 法が有する微細ひび割れに対する高い検出性能および数 MHz オーダーの高い時間分解能を十分に活用していると言えない。すなわち、3DP コンクリート内部に三次元的に配置される積層界面に対して、発生および進展する微細ひび割れのキネマティクス解析は未だ行われていない。

また、残存空隙および積層界面に代表される 3DP コンクリート内部の不連続面によって、AE 波の伝搬挙動が複雑となり、位置標定が困難となるため、3DP コンクリートにおける AE 法による位置標定を行った例はほとんどない。そもそも、位置標定においては、流込みコンクリートにおいても、AE 波の到達時刻の初動検知エラー、センサ配置による標定バイアス[156–158]、およびコンクリート内部の材料不均質性等の複数の不確実性によって、高精度で位置標定を行うことが困難である[150,159,160]。本研究では、後述する AE 法と DIC 法を統合したひび割れキネマティクス解析によって、3DP コンクリートにおける積層界面におけるひび割れ発生および進展挙動を評価した。

図-3.6 に三点曲げ試験に供した積層体の寸法および AE センサの配置の概略を示し、表-3.3 に AE センサの座標を示す。供試体の前面、背面、上面、および下面に周波数範囲 50～400kHz および共振周波数 150kHz の AE センサ（MISTRAS R15a[161]）を 12 個添付した。図-3.3 に示す試験機における空間的制約のため、AE センサは酢酸ビニル樹脂系接着剤を用いて接着し、接着剤の硬化後 Pencil Lead Break 試験（PLB）における AE センサで受信される波の振幅値から接着状態を確認した。AE 波の計測は 32 チャン

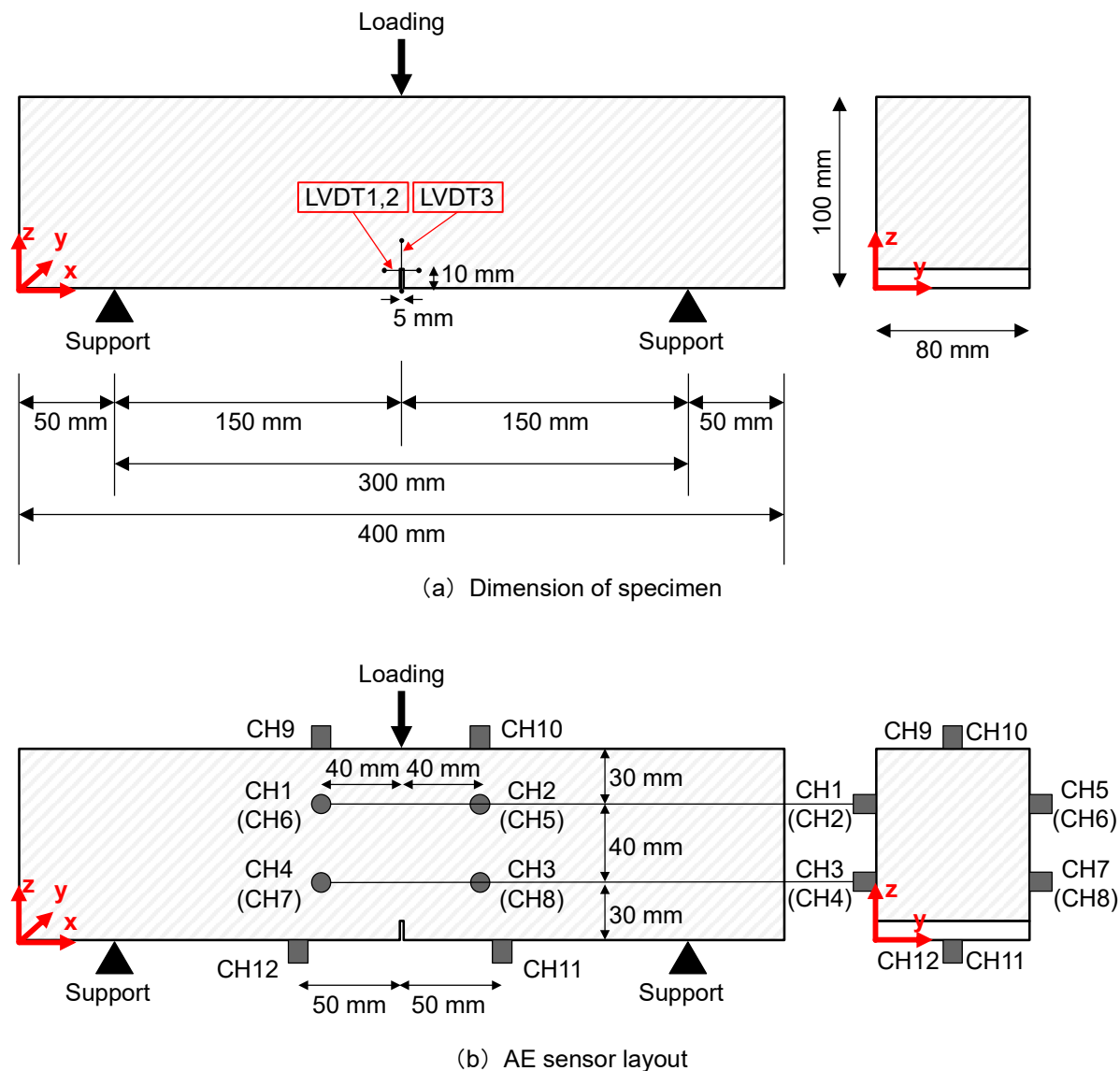


図-3.6 (a) 供試体寸法 (b) AE センサ配置

表-3.3 AE センサ配置座標 (単位 : mm)

CH	x	y	z	CH	x	y	Z
1	160	0	70	7	160	80	30
2	240	0	70	8	240	80	30
3	240	0	30	9	160	40	100
4	160	0	30	10	240	40	100
5	240	80	70	11	250	40	0
6	160	80	70	12	150	40	0

ネルを有する Micro-II Express Digital AE system によって実施した。データ取得時には、しきい値を 45dB とし、サンプリングレートは 5MHz とした。

上述のように、AE における位置標定には様々な要因によって誤差が生じる。AE 波の到達時刻差とセンサ配置から位置標定における計算を行うため、各センサにおける AE 波の到達時刻検出における誤差が発生する場合がある。また、センサ配置、およびコンクリート等の複合材料における内部構造の不均質性によって、伝搬経路は複雑になり、位置標定結果に誤差を生じる[150]。本研究では、式 [3.2] によって計算される残差を最小にするグリッドを探索するグリッドサーチ法によって位置標定を行った[149]。

$$r(x_{g,p}) = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N [\|x_{g,p} - x_{r,i}\| - \|x_{g,p} - x_{r,j}\| - c \cdot (t_{r,i} - t_{r,j})]^2, p \in \{1, 2, \dots, P\} \quad [3.2]$$

ここで、 $x_{g,p}$: グリッド p の座標、 $x_{r,i}$ 、 $x_{r,j}$: 受信センサ i および j の座標、 c : コンクリート中の P 波伝搬速度、 $t_{r,i}$ 、 $t_{r,j}$: 受信センサ i および j における AE 波の到達時刻、 P : グリッドの総数、および N : AE センサの総数である。

AE 位置標定における不確実性に起因する位置標定誤差を低減するために、各グリッドにおける AE 発生確率を考慮した位置標定が提案されている[160,162]。本手法では、標定された各 AE 源位置に対して、確率密度分布 (pdAE : probability density field of AE events) を導入する。

ある一つの位置標定された AE イベントに対して、実際の座標と位置標定された座標における誤差ベクトル Δ を式 [3.3] により定義する。

$$\Delta = x_s - x_g \quad [3.3]$$

ここで、 x_s : 実際の AE 源座標、および x_g : 推定された AE 源座標である。

実際の AE 源座標と推定された AE 源座標の座標差 Δ の大きさ $\|\Delta\|$ は、式 [3.4] により計算される。

$$\|\Delta\| = \sqrt{\sum_{i=1}^k \Delta_i^2}, \forall k \in \{1, 2, 3\} \quad [3.4]$$

ここで、 k : 対象領域の次元 (1 次元、2 次元、3 次元のいずれか)、 Δ_i : i 方向の誤差要素である。

このとき、位置標定における不確実性を考慮するために、誤差ベクトルの各成分 Δ_i が、互いに独立に平均 0 および標準偏差 σ の正規分布に従うことを仮定する。このとき、本章では、各軸方向に等方的な広がりを仮定している。3DP コンクリートにおいては、フィラメント配向に基づく異方的な弾性波進展挙動が考えられる。このとき、仮定する正規分布において、異方的な広がりを考慮することで、さらに位置標定誤差を考慮することが可能となると考えられるが、校正にかかる解析的コストが大きく、また内部構造を正確に反映することは困難であるため、本章では等方的な分布とした。しかしながら、本手法を提案した先行研究が $3000 \times 400 \times 400 \text{ mm}^3$ の大型の梁を使用している一方で、本章では、 $400 \times 80 \times 100 \text{ mm}^3$ と小さい梁を使用している。これにより、センサ間隔は比較的小さくなり位置標定における誤差は小さいものであると考えられる。以上から、本章では、 $\sigma=5 \text{ mm}$ の等方的な分布を仮定した。

以上の仮定に基づき、次元 k における多変量正規分布は、各次元における確率密度関数の積として導出

されるため、位置標定の誤差ベクトル $\Delta = (\Delta_1, \dots, \Delta_k)^T$ の確率密度関数は、式 [3.4] により算出される。

$$\begin{aligned} f_k(\Delta) &= \prod_{i=1}^k \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{\sigma} e^{-\Delta_i^2 / \sigma^2} \right) \\ &= \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^k} \frac{1}{\sigma^k} e^{-\|\Delta\|^2 / 2\sigma^2}, \forall k \in \{1, 2, 3\} \end{aligned} \quad [3.4]$$

これにより、ある点 $\mathbf{x}$ における確率密度分布 pdAE は、推定された AE 源座標を分布の中心として考えるため、式 [3.5] により計算される。

$$f_k(\mathbf{x}, \mathbf{x}_g) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^k} \frac{1}{\sigma^k} e^{-\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_g\|^2 / 2\sigma^2}, \forall k \in \{1, 2, 3\} \quad [3.5]$$

ここで、 $\mathbf{x}$: k 次元の対象領域内部の任意の点である。

モニタリング中に複数の AE イベントが発生するとき、それぞれの AE イベントに対して式 [3.5] により計算された確率密度分布 pdAE の足し合わせによって、任意の点 $\mathbf{x}$ における試験時に発生した累積の pdAE を式 [3.6] により計算する。

$$p_A(\mathbf{x}) = \sum_{a \in A} f_k(\mathbf{x}, \mathbf{x}_{g,a}) = \sum_{a \in A} \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^k} \frac{1}{\sigma^k} e^{-\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_{g,a}\|^2 / 2\sigma^2}, \forall k \in \{1, 2, 3\} \quad [3.6]$$

ここで、 A : 対象時間および対象領域において発生したすべての AE イベント、 $\mathbf{x}_{g,a}$: イベント a に対する推定された位置座標である。

本章では、以上の過程により算出された pdAE を用いて、AE 法における位置標定を行った。加えて、pdAE の算出によって、離散的な AE イベントの点標定から連続的な空間分布を有する pdAE マップへ変換することができる。これにより、破壊の進行に伴う AE イベントの時空間的な増加を評価することが可能になる。

(b) デジタル画像相関法 (DIC)

DIC はサンプル表面に塗布したランダムパターンの動きをカメラによって撮影することで、面的な変形分布を非接触で取得でき、ひずみ分布を計算することにより、ひび割れ開口およびすべりを評価することができる。DIC における解析手法では、複数の画像において設定したサブセット内の特徴が近似する部分を探索し、代表 pixel の変位を算出する。取得された変位場をひずみ場に変換することで、破壊進行におけるひずみ局所化領域を可視化することができる。

3DP コンクリートの破壊挙動に対する DIC の適用事例は、第2章で概説した通りであり、様々な適用例が見られる[61,110]。しかしながら、ひび割れ開口の時間履歴を定量的に評価した例はまだ限られており、Trans-layer 破壊および Inter-layer 破壊における積層界面でのひび割れ発生および進展メカニズムの解明が求められる。

図-3.3 に示すように、供試体前面を白色に下地を塗布した後、黒色塗料を噴射して、1~2mm 程度の黒点をランダムパターンとして塗布した。撮影には一眼レフカメラを使用し、0.2Hz の間隔で撮影を行い 8688×5792pixel のモノクロ画像を取得した。DIC の解析には、オープンソース MATLAB ソフトウェアである Ncorr を使用した[163,164]。

また、取得したひずみ分布に基づき、オープンソースソフトウェアである ACDM (Automated crack detection and measurement) を使用して、ひび割れ位置を特定することにより、ひび割れ開口およびすべりの時間履歴を取得した[162,165]。ACDM におけるひび割れ自動判定プロセスを図-3.7 に示す[165,166]。はじめに、DIC により算出された主ひずみ分布から高ひずみ領域を抽出した。次に MATLAB に実装されているモルフォロジー演算によって、高ひずみ領域をスケルトン化することでひび割れを抽出した。

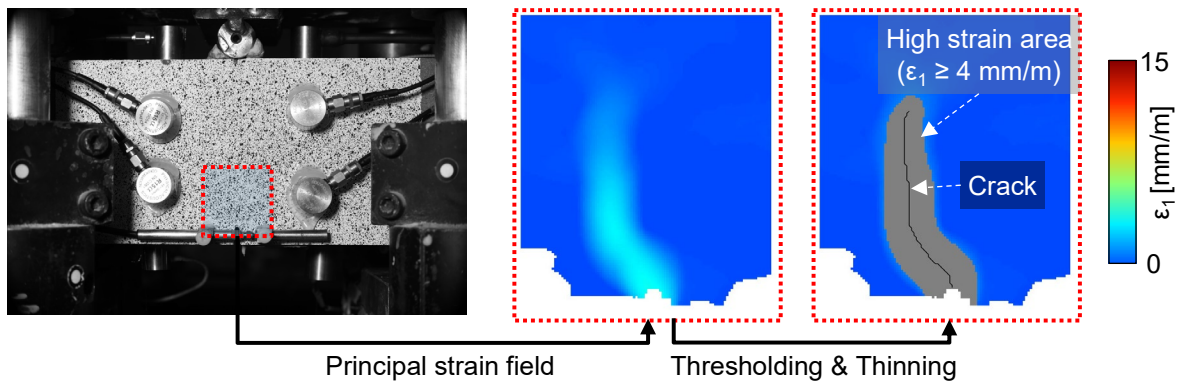


図-3.7 ACDM におけるひび割れ自動抽出プロセス

(c) X線 CT 法

本章では、積層経路設計に基づく内部構造を可視化するために、三点曲げ試験後の供試体に対して X 線 CT 法を適用した。供試体サイズが比較的大きいため、X 線 CT 法には、東芝社製 TOSCANER-34500FD を使用し、管電圧 320kV および管電流 1.2mA とした。撮影時には、2mm 厚の Cu フィルタを使用することで、低エネルギーの X 線を遮蔽し、アーチファクトの発生を低減した。これにより、2048×2048pixel の連続画像を取得した。このとき、断面画像の解像度は 0.094mm/pixel であり、スライス厚は 0.100mm/枚であった。

3.3. 実験結果

3.3.1. 破壊挙動の評価

図-3.8 に三点曲げ試験における荷重-CMOD 曲線と累積 AE イベント数を示す。また、表-3.4 に各供試体におけるピーク荷重 $P_{\max}$ 、式 [3.1] に基づき計算された破壊エネルギー G_F 、および曲げ強度 f_b を示す。累積 AE イベント数は試験中に発生した AE イベントの総数を示しており、AE イベントの増加によって破壊進行をモニタリングすることが可能である[167]。

表-3.4 に示すように、積層経路によらず、湿潤環境下で養生した供試体の破壊エネルギー G_F 、ピーク荷重 $P_{\max}$ 、および曲げ強度 f_b は、気中環境下で養生した供試体より大きい。これは、湿潤条件下の養生によって、水和反応が効果的に進行したためであると考えられる[168]。これにより、養生方法によって、力学

特性が変化することが示され、実施工条件においても養生方法は流込み施工と同様に、構造物の性能に影響を及ぼすことが分かった。

しかしながら、養生条件における力学性能の低下と比較して、積層経路条件に基づく力学性能の差異が著しい。図-3.8 に示すように、長辺方向に積層し Trans-layer 破壊が発生する Type A 供試体では、ピーク荷重を迎えた後も安定的な荷重低下を示し、ポストピーク領域において荷重を保持しながら CMOD が増加している。これに対応するように多数の AE イベントがポストピーク領域でも検出されている。これに対して、短辺方向に積層し Inter-layer 破壊が生じる Type B 供試体では、ピーク荷重後急激に荷重の低下

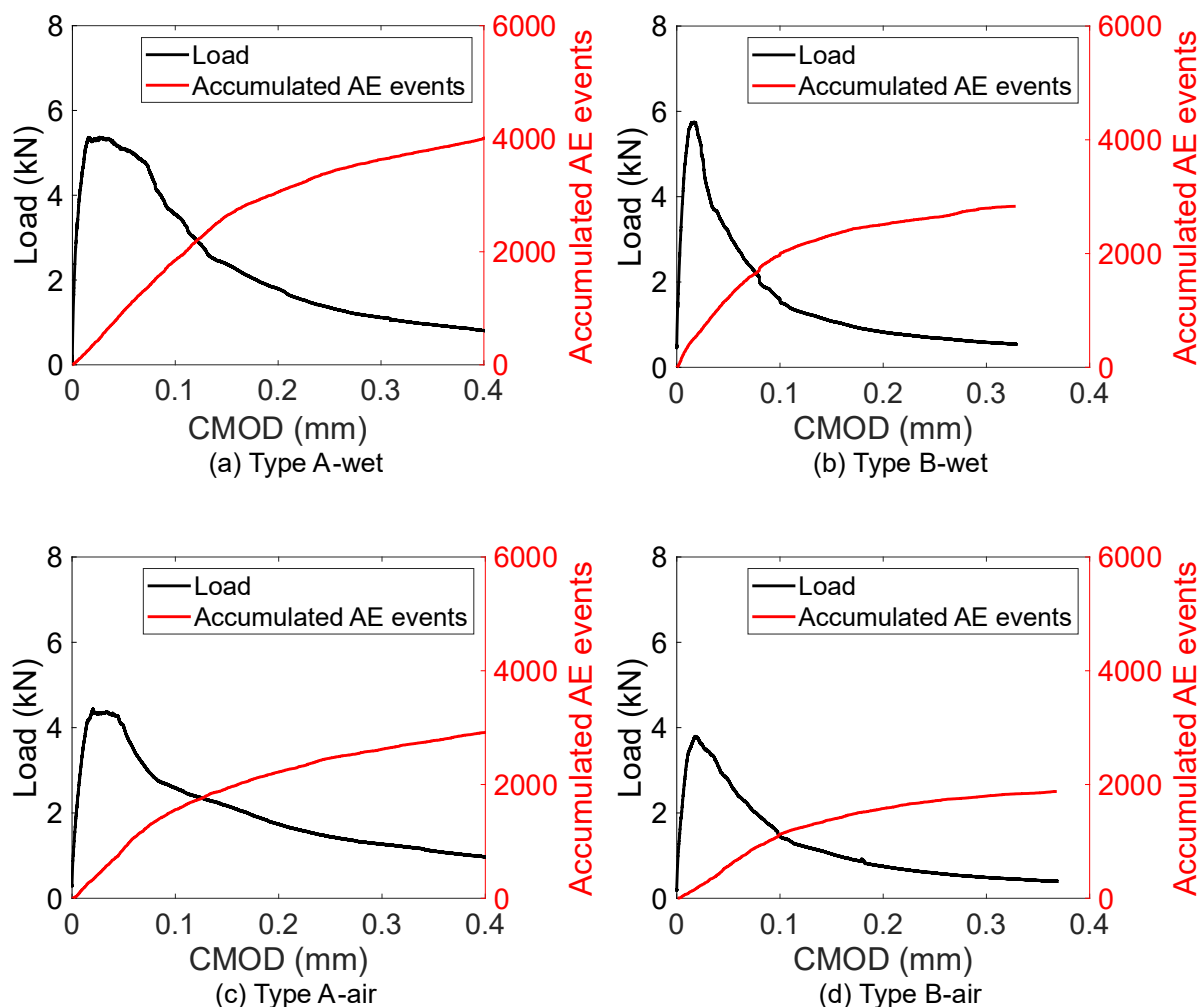


図-3.8 三点曲げ試験における荷重-CMOD 曲線と累積 AE イベント数

表-3.4 三点曲げ試験の結果

Curing condition	Printing path	G_F (N/mm)	P_{max} (kN)	f_b (N/mm ²)
Wet	Type A	131.8	5.4	3.7
	Type B	67.6	5.8	3.9
Air	Type A	119.9	4.4	3.2
	Type B	61.9	3.8	2.7

が観察でき、脆性的な破壊挙動を示している。加えて、試験中に計測された AE イベント数は同一の養生条件下の Type A と比較したとき少ない。その結果、荷重-CMOD 曲線下の面積に基づき算出される破壊エネルギーは Type A と比較して Type B は約 50%まで低下している。

上述のノズル移動方向と荷重作用方向の関係に基づく力学特性の差異は、力学的異方性として認識されており、3DP コンクリートにおいては、積層造形プロセスに起因して形成される不連続面である積層界面の存在により、多数の研究事例において報告されている[66,87,113,169]。しかしながら、本章における検討では、サンプル数の限りはあるもののピーク荷重および曲げ強度といった力学特性に大きな差はなく、破壊エネルギーにおいて主に力学的異方性が観測される。すなわち、第2章で観察されたような力学性能における顕著な力学的異方性は本章では発生しておらず、積層体内部構造は密実に形成されていると考えられる。破壊エネルギーが、単位面積当たりのひび割れ形成に消費されるエネルギーであることを考慮すると、本章で観察された破壊エネルギーにおける力学的異方性は、ひび割れの発生および進展挙動における Trans-layer 破壊と Inter-layer 破壊の異なるメカニズムに起因すると考えられ、次節以降において詳細に検討する。

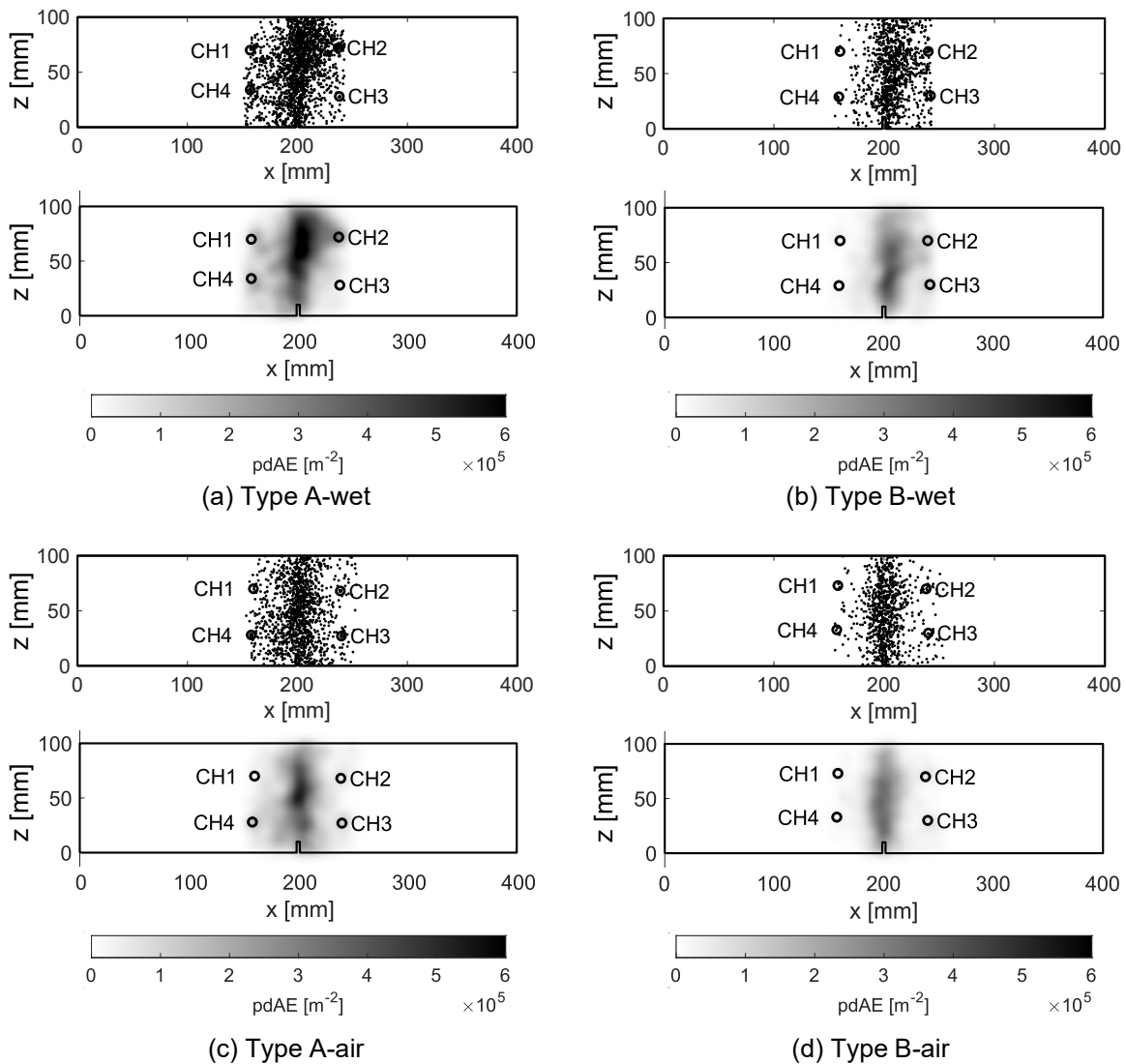


図-3.9 AE 位置標定結果 (a) Type A-wet (b) Type B-wet (c) Type A-air (d) Type B-air

図-3.8 において観察されるピーク荷重後のポストピーク領域における異方的な挙動は、上述のように AE 発生挙動においても観察されている。これらの AE イベントについて、式 [3.2] に基づく位置標定および式 [3.6] に基づき計算された pdAE の結果を図-3.9 に示す。pdAE の結果においては、複数の AE イベントによる累積の pdAE を白黒のコンターにより表しており、黒い領域ほど AE イベントの発生確率が高いことを示す。これにより、pdAE の値が大きく、より黒い領域では、ひび割れの発生位置に対応することが予想される。切欠きを有する供試体に対する三点曲げ試験では、スパン中央に最大曲げモーメントが作用することを考慮すると、pdAE マップにおいて高い pdAE を示す黒い領域がスパン中央部に集中しており、おおむね妥当な結果が得られていると考えられる。

図-3.9 に示すように、位置標定結果および pdAE マップともに同一の養生条件下においては、Trans-layer 破壊が発生する Type A は、より広範な領域に AE が分布している。一方で、Inter-layer 破壊が発生する Type B では、AE はスパン中央部分に集中して分布している。これは、Trans-layer 破壊では各層のフィラ

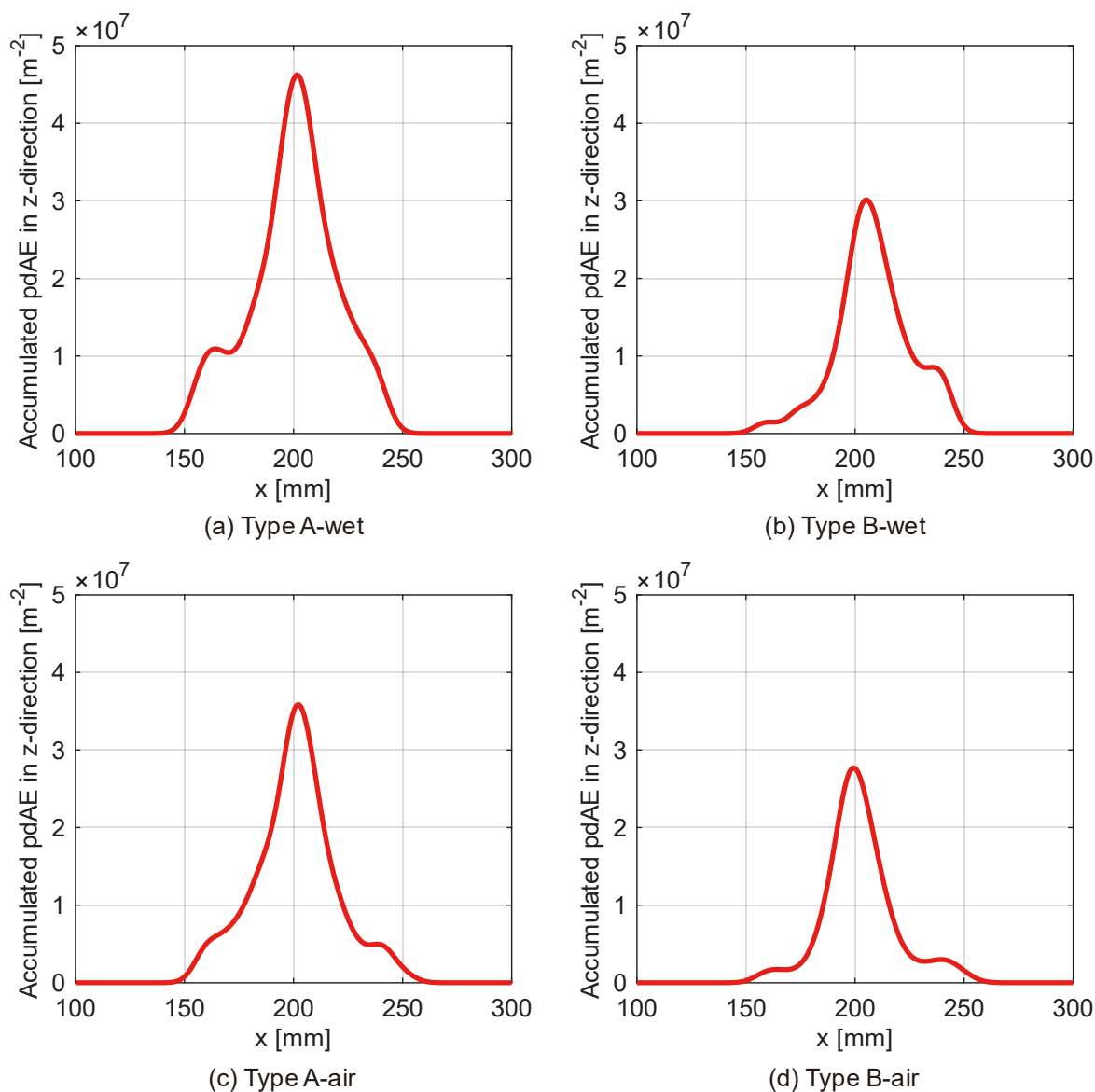


図-3.10 供試体軸方向 (x 方向) における pdAE 分布 (a) Type A-wet (b) Type B-wet (c) Type A-air (d) Type B-air

メントを割裂しながらひび割れが進展するとき、多数の AE が発生しながらひび割れが進展する一方で、Inter-layer 破壊では、各層をひび割れが進展するとき、スパン中央付近に配置された積層界面が脆弱部となり AE が局所的に発生したためである。これにより、各層をひび割れが進展するときに発生する AE イベント数が異なることで、载荷全体における累積の AE イベント数が異なると考えられる。

pdAE マップにおいては、離散的に算出される AE 位置標定に対して、計測および計算過程で生じる不確実性を確率密度として取り扱うことで、連続的な分布を取得することができる。これにより、Type A および Type B の供試体軸方向 (x 方向) における pdAE マップの分布を定量的に評価した。供試体軸方向の分布を評価するため、同一の x 座標の位置における pdAE の値を z 方向に足し合わせた。これにより、 x 方向の pdAE のラインプロファイルを作成し、結果を図-3.10 に示す。

図-3.10 に示すように、すべての試験体でスパン中央にあたる $x=200\text{mm}$ 付近でピークを示し、AE イベントは供試体スパン中央部に集中して発生したことが分かる。加えて、養生条件に関わらず、Trans-layer 破壊では、Inter-layer 破壊より高いピークを示し、試験中に多数の AE イベントが発生したことが分かる。一方で、 x 方向の pdAE の分布では、Type A の方が Type B よりも幅広い分布を示しており、Trans-layer 破壊で AE が分散して発生した一方で、Inter-layer 破壊では積層界面に AE が集中して発生したことが示唆される。

以上のように、巨視的な荷重-CMOD 曲線において、造形中のノズル移動方向と試験中の载荷方向の関係に基づき、3DP コンクリートの力学的異方性が確認された。このとき、力学的異方性は積層界面をまたぐように、あるいは沿うように進展するひび割れに起因して発生する AE 発生挙動をモニタリングすることにより評価できることが分かった。特に、pdAE による連続的な AE イベントの発生位置を評価することにより、Trans-layer 破壊および Inter-layer 破壊における積層界面配置の影響を評価することができた。本節において確認された Trans-layer 破壊と Inter-layer 破壊における巨視的な力学的異方性の特徴を表-3.5 に示す。

表-3.5 荷重-CMOD 曲線および AE 発生挙動における力学的異方性

	Type A (Trans-layer fracture)	Type B (Inter-layer fracture)
Load-CMOD	- Stable peak and gradual load drop - Larger fracture energy G_F	- Sharp peak load and abrupt load drop - Smaller fracture energy G_F
AE activity	- More AE events - Widespread AE source	- Less AE events - Localised AE source

ここで、表-3.5 および本節における結果から、3DP コンクリートの破壊挙動における積層界面の役割について、その空間的配置に基づき、以下の仮説が挙げられる。

- Trans-layer 破壊：Trans-layer 破壊では、供試体軸方向、すなわちフィラメント軸方向に対して垂直にひび割れが進展するとき、フィラメントを割裂しながらひび割れは進展するため、フィラメントの割裂にエネルギーが必要となる。加えて、積層によりひび割れ進展方向に周期的に配置された積層界面は、ひび割れの進展を物理的に抑制する crack arresting 効果を有すると考えられる。
- Inter-layer 破壊：Inter-layer 破壊では、隣接するフィラメント界面において容易にひび割れが発生および進展するため、各層においてひび割れが小さいエネルギーで進展することができる。これによ

り、ひび割れ発生および進展の経路となる積層界面は、ひび割れの進展を促進する crack acceleration 効果を有すると考えられる。

3DP コンクリートの破壊挙動における積層界面が有する上記の二面的な効果は、単なる強度の力学的異方性ではなく、造形プロセス由来の不均質な内部構造による破壊メカニズムの差異であると考えられる。次節以降では、微小ひび割れの発生を敏感に検出することができる AE 法と、ひび割れ発生および進展をひずみの局所化領域として捉えることができる DIC によって、材料不均質に基づく静的な構造的要因が動的な破壊メカニズムに及ぼす影響を検証する。

3.3.2. フィラメント界面領域の観察

上述の力学的異方性における破壊メカニズムを評価するとき、対象とする積層界面構造が、多孔質な構造であるか、材料不均質性に伴う密な FIZN であるかを特定する必要がある。本節では、X 線 CT 法により、内部構造を可視化することで、本章において造形した 3DP コンクリートの積層界面構造を観察した。

図-3.8 に示したように、本章で使用した 3DP コンクリートでは、破壊の進行を考慮した破壊エネルギーでは力学的異方性が確認されたものの、物性値として得られるピーク荷重と曲げ強度は、Type A および Type B 供試体において大きな差は見られない。図-3.11 に三点曲げ試験後の各供試体のひび割れ面の様子を示す。これにより、少なくとも目視では、本章における 3DP コンクリートは多孔質な構造ではなく、

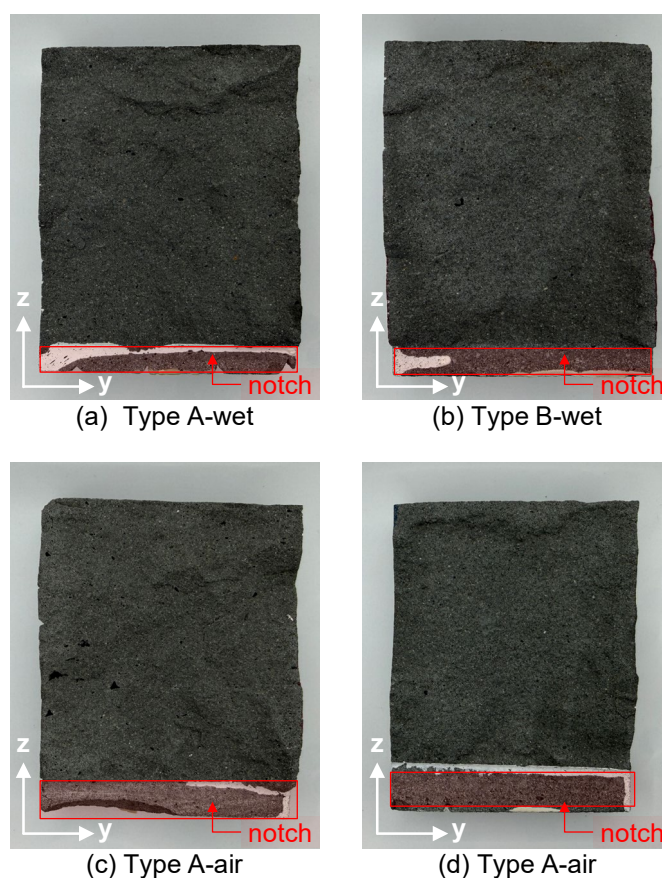


図-3.11 三点曲げ試験後のひび割れ面 (a) Type A-wet (b) Type B-wet (c) Type A-air (d) Type B-air

密実に積層造形されていることが分かる。

図-3.12 に X 線 CT 法により取得した供試体表面の 3D 画像および断面画像を示す。抽出した空気部分

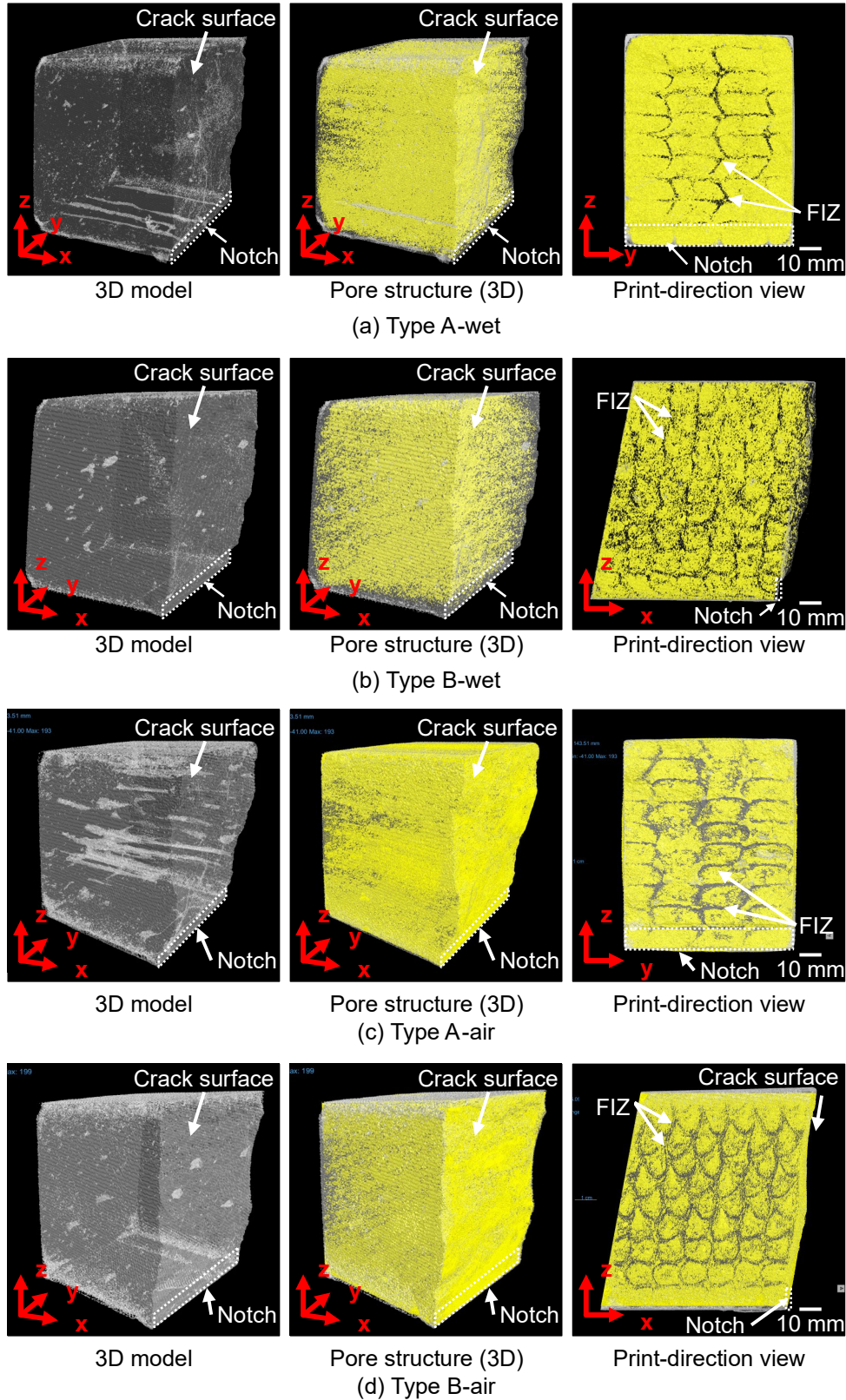


図-3.12 3DP コンクリートの内部構造の可視化 (a) Type A-wet (b) Type B-wet (c) Type A-air (d) Type B-air

よって、フィラメント形状が不規則になっていたと考えられる。折り返し地点が多い Type B では、上述の現象が Type A 以上に発生しており、その結果、図-3.12 で確認されたような供試体の高さ方向におけるフィラメント形状の差異が生じたと考えられる。しかしながら、ノズル移動と材料圧送の独立機構による過剰吐出は、結果的に Layer pressing[44]により積層体内部を密実にするものであったと考えられる。

以上の結果から、本章で検討する供試体の積層界面は多孔質な構造ではなく、空隙の少ない密な構造を有する FIZN が形成されていることが確認された。このとき、フィラメントの skin と core の材料不均質性に起因する力学的異方性の構造的根源が評価されている[27]一方で、これらの材料不均質性が破壊挙動に及ぼす影響は未解明であり、次節以降においてその影響を検討する。

3.3.3. 破壊メカニズムにおける力学的異方性と積層界面の二面的役割

3.3.1 では、造形時のノズル移動方向と載荷方向の関係に起因する三点曲げ試験における異方的な力学挙動を観察した。また、3.3.2 では、本章で検討した 3DP コンクリートの力学的異方性の構造的根源となる積層界面は、多孔質な構造ではなく、圧送プロセスに起因する材料不均質性による FIZN の形成によるものであることを確認した。しかしながら、3DP コンクリートの力学的異方性の本質的な特性を理解するためには、FIZN の形成を特定するだけでなく、FIZN を形成する内部の材料不均質性が破壊挙動におけるひび割れの発生および進展に及ぼす影響を評価する必要がある。本節では、3DP コンクリートの力学的異方性における構造的要因が破壊メカニズムとしてどのように顕在化するか解明するために、ひび割れの発生段階および進展段階における各過程を詳細に検討した。3.3.3(a)では、pdAE における連続的な AE イベントの確率密度を用いた空間的分布と DIC におけるひび割れ開口の時間履歴を用いて、ひび割れ発生における AE 発生挙動を評価する。また、3.3.3(b)では、3.3.1 で考察したひび割れ進展方向に対して垂直および平行に配置された積層界面が果たす二面的な crack arresting 効果と crack acceleration 効果について DIC を用いた評価を行った。

(a) Trans-layer 破壊および Inter-layer 破壊におけるひび割れ発生挙動に対する pdAE-DIC 解析

本節では、先行研究[162]により開発された pdAE および DIC から得られるひび割れ開口の時空間的履歴から、ひび割れキネマティクス解析を行った。図-3.14(a)に、DIC により算出した主ひびずみ分布の一例を示す。このとき、3DP コンクリートは積層構造を有することから、供試体高さ方向 (z 方向) に層厚 10mm 間隔で 10 層に分割した。その後、図-3.14(b)に示すように、3.2.4(b)で概説した ACDM の自動検出プロセスにより、供試体表面におけるひび割れプロファイルを抽出した。抽出したプロファイル上において、図中黒い「+」で示される切欠き部分を除いた $z=25, 35, \dots, 95\text{mm}$ の各層中央に対応する 9 点を選定し、各点におけるひび割れ幅開口履歴を取得した。同様に、図-3.14(c)に、pdAE マップにおいて、各層の x 方向の pdAE 分布におけるピークを抽出し、図中白い「×」で示す。このとき、図-3.14(d)に示すように、pdAE マップに DIC により抽出されたひび割れプロファイルを重ね合わせたとき、pdAE の各層の x 方向における pdAE ピークは、DIC によるひび割れプロファイルによく一致する。これにより、pdAE マップにおいて濃い領域、すなわち、AE イベントの発生確率が高い領域がひび割れ発生位置によく対応することが示された。ただし、一部の層で pdAE の各層のピーク位置とひび割れプロファイルが一致しない点が確認される。これは、AE が供試体奥行方向の y 方向を含めた三次元的な計測である一方で、DIC による評価は供試体前面における二次元的な評価に限定されているためである。

図-3.15 に DIC において抽出した各選定点におけるひび割れ開口幅履歴と、pdAE において対応するグ

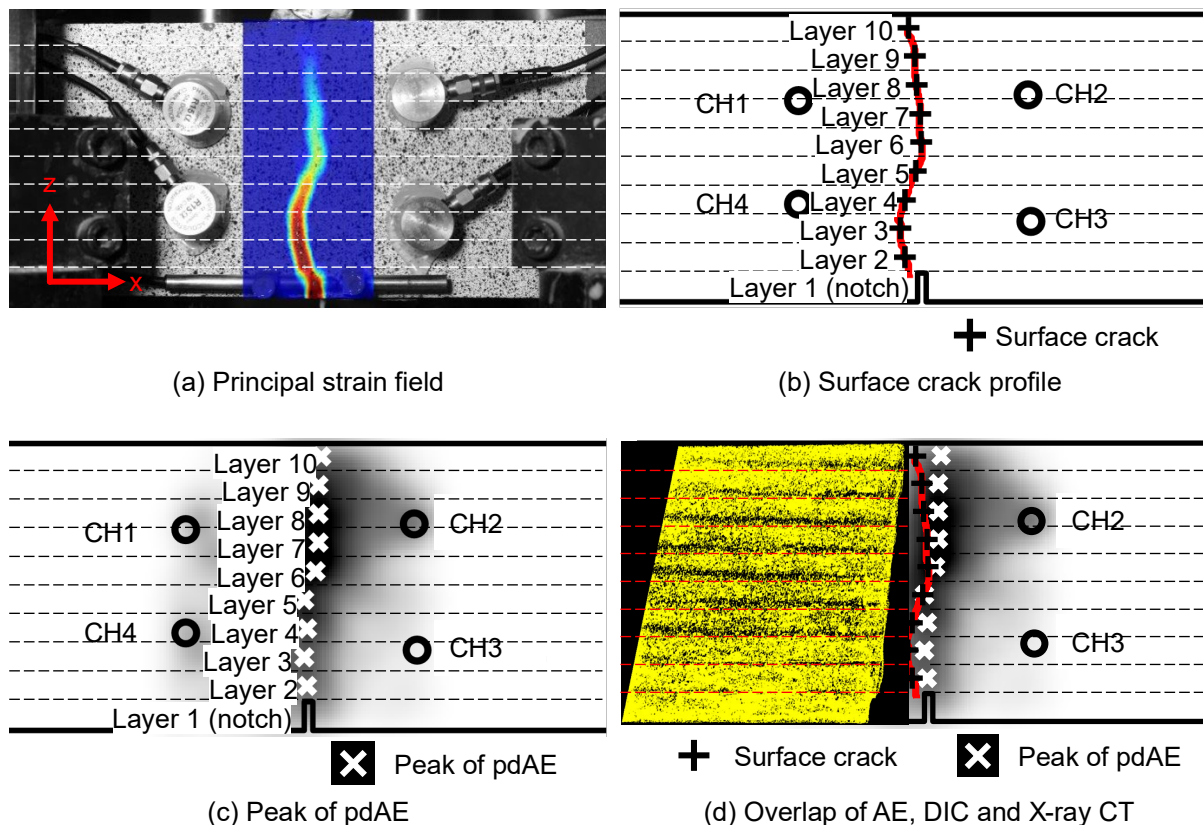


図-3.14 pdAE および DIC における代表点の取得 (a) DIC におけるひずみ分布 (b) ACDM により抽出したひび割れ表面プロファイル (c) 各層の x 方向における pdAE のピークの抽出 (d) pdAE マップ、DIC および X 線 CT 画像の重ね合わせ

リッドの pdAE の関係を示す。このとき、pdAE の変化に使用したグリッドは、図-3.14(c)に示した各層におけるピーク位置ではなく、DIC により抽出したひび割れプロファイルにおける各選定点に対応する点であることを注意を要する。

図-3.15 に示すように、ひび割れが開口しひび割れ幅が増加するのに伴って、pdAE は増加し、ひび割れに伴う AE の発生挙動が確認できる。ひび割れ幅は下層であるほど大きく開口しており、pdAE は Layer 5 から 7 程度の間層において高い数値を示す。これは、Trans-layer 破壊において、下層においてひび割れが発生するとき、ひび割れ先端に形成される FPZ が広域化[69]したことに伴い、中間層部分で多数の AE 波が検出されたためであると考えられる。これに加えて、当該領域がセンサに囲まれた部分であり、敏感に AE 波を検出した結果であると考えられる。また、ひび割れ幅の増加に伴う pdAE の増加傾向は、ひび割れ幅が大きくなるにつれて緩やかになり、0.1mm 程度のひび割れ幅に達して以降、pdAE はほとんど増加しない。これは、本章における 3DP コンクリートは 0.25 から 0.50mm の粒径を有する細骨材を使用しており、一定のひび割れ幅以上でひび割れ面における接触面が無くなった結果、AE がほとんど発生しなくなったためであると考えられる。

加えて、養生条件に関わらず Type A では、層ごとの pdAE の差が大きい一方で、Type B では層によらず、pdAE の値はほとんど変わらない。これは、Type A においてフィラメントを割裂しながらひび割れが進展するとき、各層においてフィラメント割裂に消費され AE 波として発生するエネルギーが大きく、累

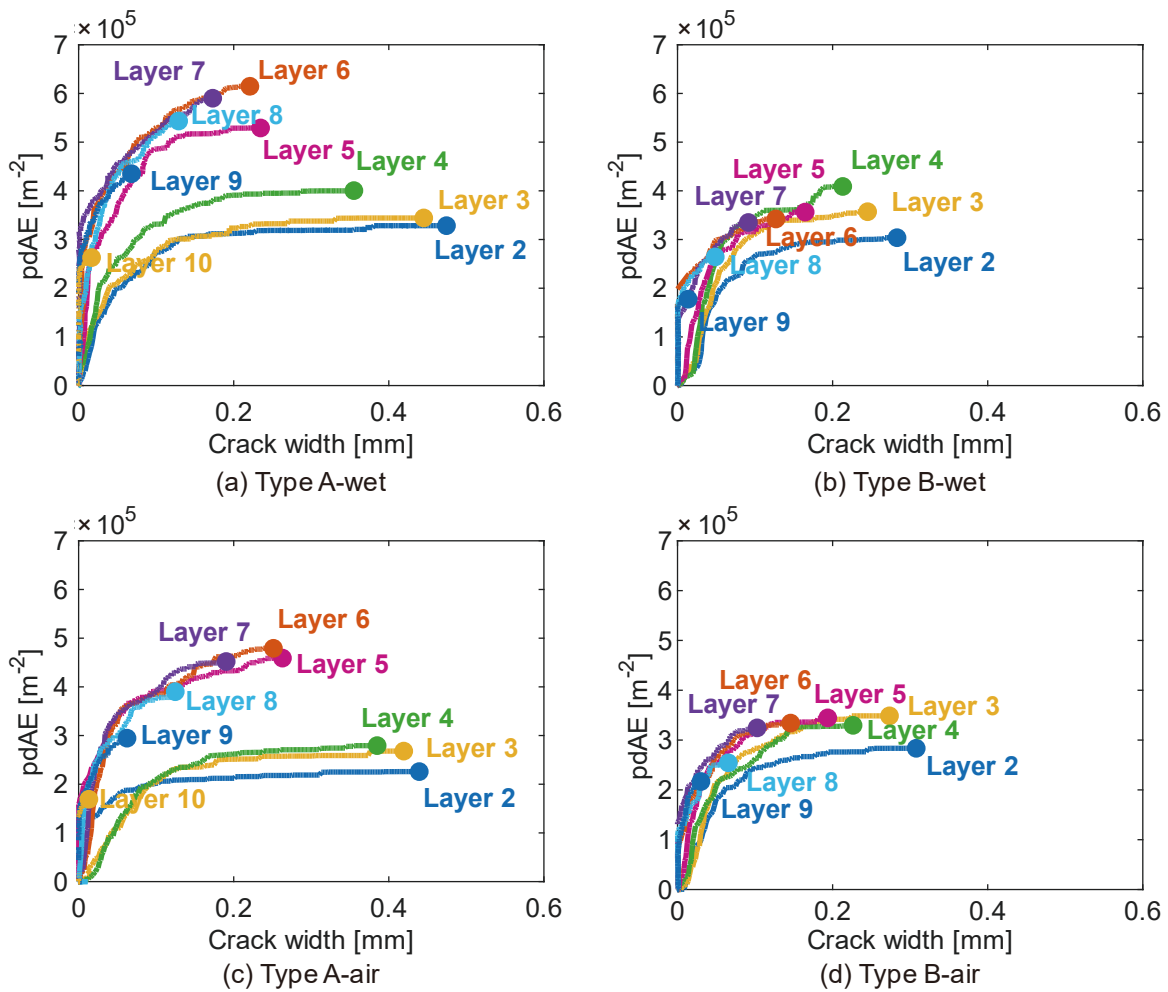
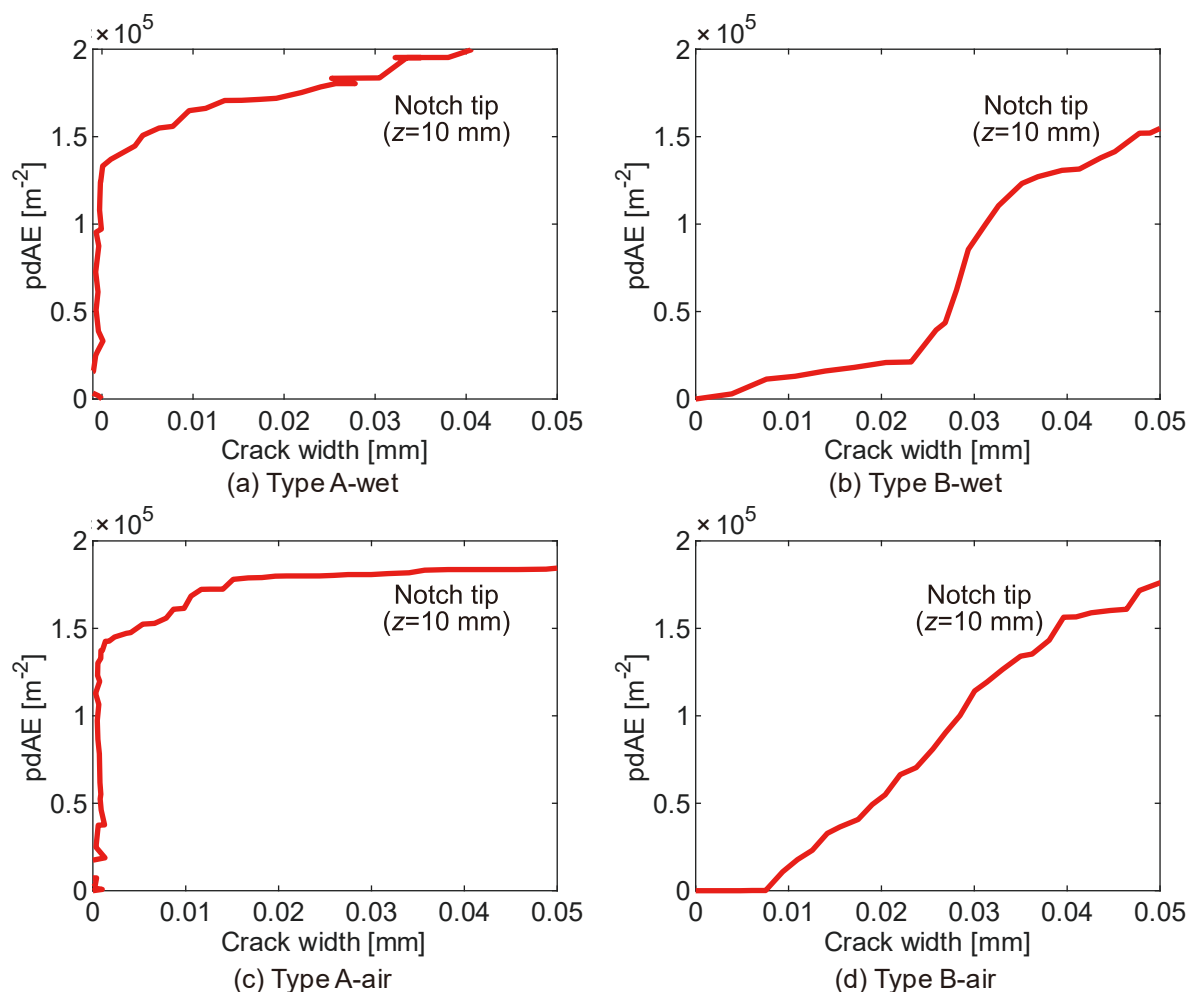


図-3.15 各層の選定点におけるひび割れ幅開口履歴と pdAE の関係

積の pdAE が大きくなったためであると考えられる。一方で、Type B では積層界面に沿ってひび割れが進展するとき、容易にひび割れが進展した結果、AE 発生が Type A と比較して限定的になったためであると考えられる。また、Type A では Layer 2 から 4 程度の下層が 0.4mm 程度以上のひび割れ開口幅まで達する一方で、Type B では 0.3mm 程度にとどまっている。これは、3.3.1 で記述したひび割れ進展における積層界面の crack arresting 効果および crack acceleration 効果に起因するものと考えられ、3.3.3(b) にて考察する。

ここで、ひび割れ発生時の挙動を詳細に観察するために、ひび割れプロファイルにおけるノッチ先端近傍 ($z=10\text{mm}$) での pdAE とひび割れ開口幅の時間履歴を図-3.16 に示す。

図-3.16 に示すように、Type A および Type B のひび割れ発生時において、ひび割れ開口幅の増加に伴って全く異なる pdAE の増加傾向が確認される。養生条件に関わらず、Trans-layer 破壊が発生する Type A では、ひび割れ発生直後、すなわち、ひび割れ開口幅が小さい段階から pdAE は高い値を示し、その後 pdAE の増加傾向は緩やかになる。これは、フィラメントを割裂する巨視的なひび割れが形成されるとき、骨材を有する core 領域において多数の微細ひび割れが発生し、連結する必要があるからである。フィラメント core 内部で多数発生する微細ひび割れに伴って、多数の AE 波が検出されるため、ひび割れ発生


 図-3.16 切欠き先端近傍 ($z=10\text{mm}$) における pdAE-ひび割れ開口幅履歴

直後から pdAE は高い値を示したことが理解できる。それに対して、Inter-layer 破壊が発生する Type B では、ひび割れ発生直後において、ひび割れ開口幅が増加する一方で、pdAE はほとんど増加しない。これは、3.3.2 で確認したように、本章において検討した 3DP コンクリートで形成される積層界面は、ペースト成分を多く含む skin から形成されているためであると考えられる。先行研究では、core と skin の局所的配合を模擬した供試体に対して強度試験を行ったとき、skin を模擬した供試体は、引張強度および曲げ

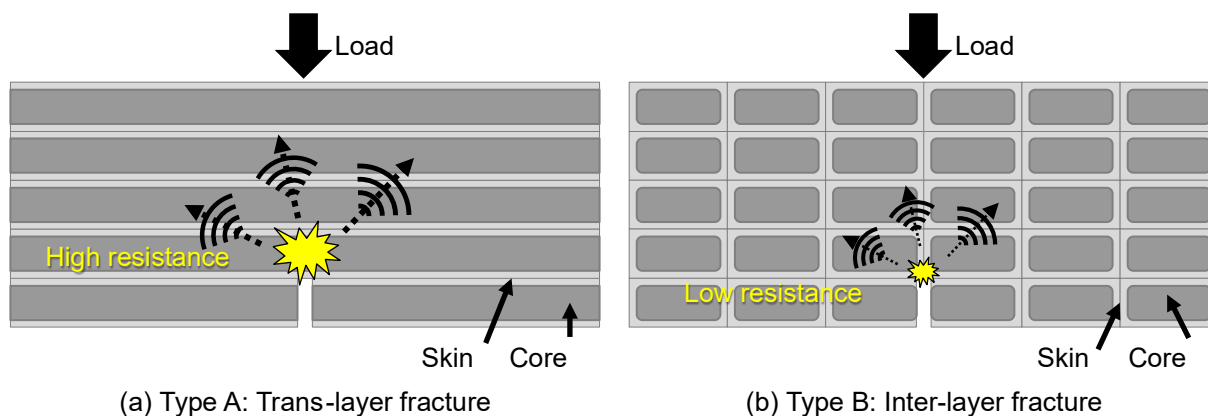


図-3.17 ひび割れ発生における力学的異方性

強度は、core を模擬したときより小さいことが報告されている[27]。これにより、Type B では、積層界面で局所的に発生する微細ひび割れが少なく、容易に微細ひび割れが連結することで巨視的なひび割れに発達するため、検出された AE 波が少なく、結果的に pdAE の増加が緩やかであったと理解できる。

上述の Trans-layer 破壊および Inter-layer 破壊における力学的異方性の動的なひび割れ発生メカニズムの概念図を図-3.17 に示す。

3DP コンクリートのひび割れ発生においては、フィラメントを割裂してひび割れが発生するとき (Trans-layer 破壊)、骨材部分を多く含む core を割裂するために、より多くのエネルギーを要する。これにより、主破壊に至るまでに、微細なひび割れがフィラメント内部で多数発生することにより、AE 波が多く検出される。これに対して、隣接するフィラメント界面に沿ってひび割れが発生するとき (Inter-layer 破壊)、骨材含有率が少なく引張強度が小さい FIZ でひび割れが発生するため容易にひび割れが形成され、ほとんど AE 波が放出されない。以上より、管内流動時のせん断履歴に基づく材料不均質性を構造的要因として発生する 3DP コンクリートの力学的異方性は、ひび割れ発生において、ひび割れ発生に対する抵抗の差異およびそれに伴う AE 発生挙動の対照性として顕在化することが明らかとなった。

(b) Trans-layer 破壊および Inter-layer 破壊におけるひび割れ進展挙動における積層界面の二面的役割

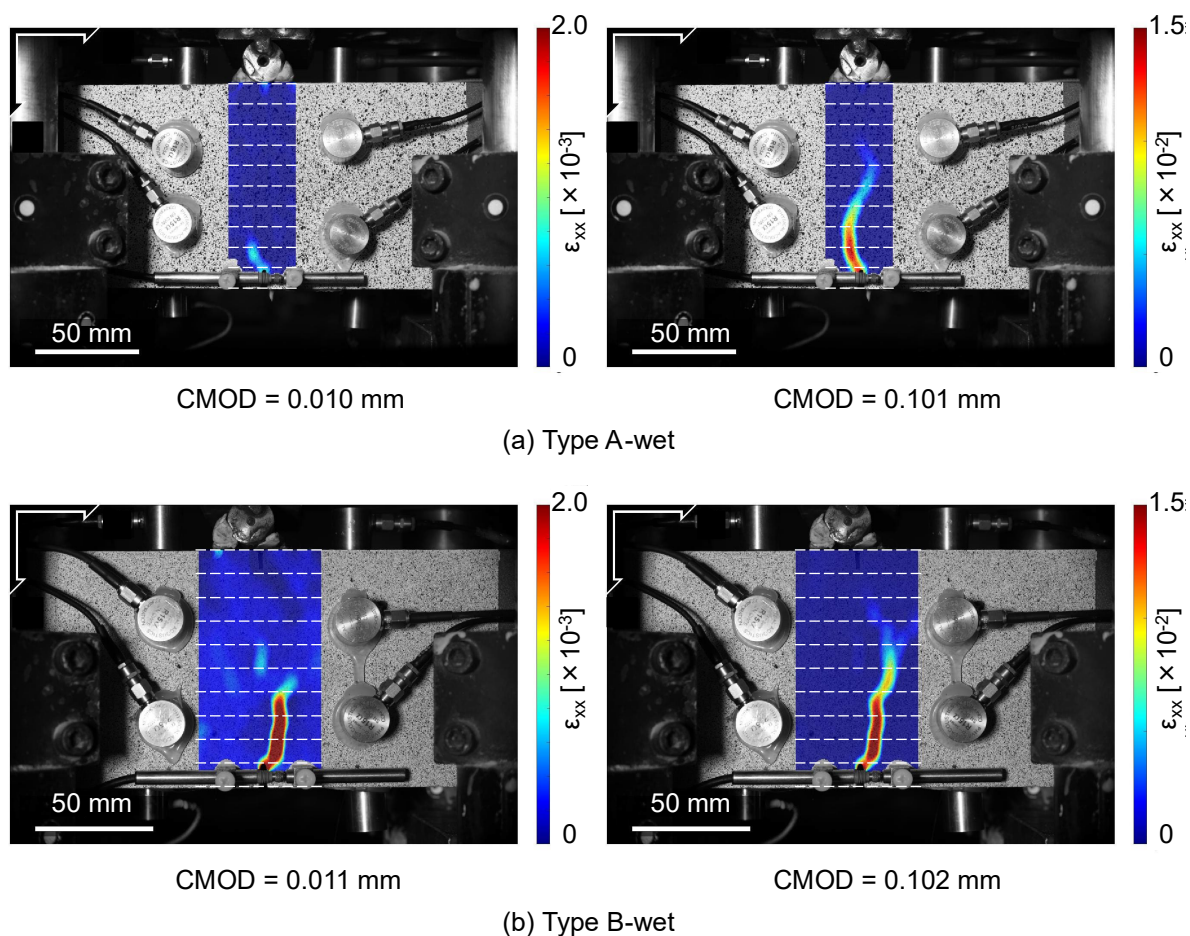
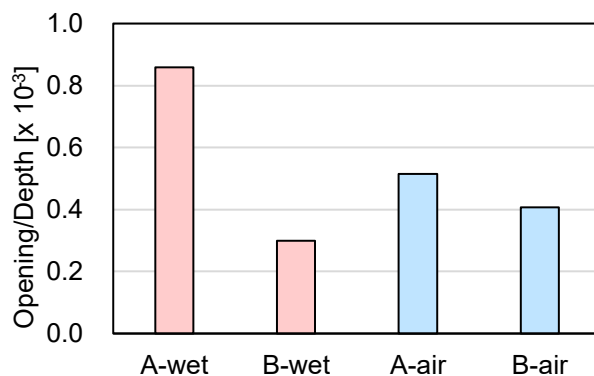
次に、ひび割れ進展挙動における積層界面の二面的役割について検討する。具体的には、材料不均質性に伴って形成される FIZ の空間的配置 FIZN に基づき、ひび割れ進展に対する crack arresting 効果および crack acceleration 効果を評価した。図-3.18 に Type A-wet および Type B-wet のひび割れ開口変位 CMOD が 0.01mm および 0.1mm における x 方向ひずみ ε_{xx} の分布を示す。

同一の CMOD において比較すると、Type A におけるひび割れは、Type B ほど供試体高さ方向に進展しておらず、相対的に緩やかなひび割れ進展挙動を示す。これは、Type A では、積層によって供試体高さ方向 (z 方向) に積層界面が周期的に配置され、ひび割れ進展経路において core が周期的に配置されるためである。このとき、3.3.3(a)で示したように、骨材含有率の高い core の割裂には高い抵抗を示すため、積層界面はひび割れ先端を拘束する crack arresting 効果を示すことが考えられる。これにより、同一の CMOD においても、Type A ではひび割れの進展がより深部まで到達しなかったことが理解できる。

一方で、Type B においては、Type A と比較して同一の CMOD において、より深くまでひび割れが進展している。これは、Type B において積層界面に発生するひび割れが、skin で形成される引張および曲げ応力下に弱く、ひび割れ発生に対する抵抗が小さい FIZ に発生し、容易にひび割れが進展したためであると考えられる。すなわち、Type B のひび割れ進展挙動においては、積層界面はひび割れの進展を促進する crack acceleration 効果を示し、ひび割れの形成および進展を容易にしたと考えられる。以上のように、本章で使用した 3DP コンクリートにおける積層界面は、ひび割れ進展挙動において、3DP コンクリート内部における空間配置に基づき、crack arresting 効果と crack acceleration 効果の二面的役割を果たすことが分かった。

図-3.18 において確認された同一の CMOD におけるひび割れ深さの差異を定量的に示すために、各供試体におけるピーク荷重 $P_{\max}$ における CMOD とひび割れ深さの比を図-3.19 に示す。

養生条件に関わらず、Type A は Type B よりひび割れ深さに対する CMOD が大きい。特に、湿潤養生条件によって養生した Type A-wet では、同一条件で養生した Type B-wet に対して約 3 倍の値を示す。すなわち、同一の深さまでひび割れが進展するために、約 3 倍のひび割れ開口が必要であることを示し、


 図-3.19 CMOD=0.01mm および 0.1mm における ϵ_{xx} 分布 (a) Type A-wet (b) Type B-wet

 図-3.18 ピーク荷重 P_{max} における各供試体の CMOD とひび割れ深さの比

Type A における積層界面が有する crack arresting 効果を示している。

以上のように、積層界面に対して垂直にひび割れが進展する Trans-layer 破壊では、破壊抵抗が異なる FIZ および core 領域が周期的に配置されることによって、ひび割れ先端の拡大が物理的に抑制される。このとき、前述の通り core 領域の割裂にはエネルギーを要するため、積層界面が crack arresting 効果を示す。その結果、同一の CMOD に対してもひび割れ深さが抑制され、結果的に破壊抵抗が増大することになることが分かった。これに対して、積層界面に沿ってひび割れが進展する Inter-layer 破壊では、引張応力下で脆弱な FIZ がひび割れの進展経路として機能する。ペースト部を多く含む FIZ は破壊抵抗が小さく容

易にひび割れ先端を促進する crack acceleration 効果を示す。これにより、微細なひび割れおよび AE 活動を伴わずに、主破壊が進展することで、低エネルギーでの破壊に至ることになることが明らかとなった。すなわち、3DP コンクリートにおける力学的異方性は、材料不均質性に伴う単なる skin および core の強度差によるものに留まらず、積層界面の空間配置がひび割れ進展を拘束および促進する二面的役割に起因することが分かった。

3.4. 考察

本章においては、積層経路および養生条件において各 1 体の供試体における試験結果を用いており、統計的検証について課題を残している。そのため、本章における議論は、厳密な統計的再現性ではなく、異なる養生条件下で独立に得られた結果の整合性に基づき議論している。本章で検討した異方的な破壊挙動の影響因子として、積層経路により決定されるフィラメント配向および積層界面の空間的配置、養生条件に起因するマトリクス強度および破壊エネルギーの差、ならびに、試験体間のばらつきおよび計測条件上のばらつきが考えられる。本章における実験結果から、養生条件はピーク荷重および破壊エネルギーの定量的な値に影響を及ぼした。一方で、荷重-CMOD 曲線の軟化域の形状、AE 発生挙動の傾向、および DIC における表面ひび割れ進展挙動は、Type A と Type B とともに各積層経路において、養生条件によらず一貫した傾向を示した。これにより、本章で観察された Trans-layer 破壊および Inter-layer 破壊における異方的な破壊挙動の主要因は、養生条件ではなく、積層経路により形成された内部構造に由来するものであると解釈できる。

以上より、積層経路に基づく力学的異方性の動的な破壊メカニズムに関する議論においては、各積層経路について観察された結果は、養生条件が異なる場合にも整合的に確認されたと考えられる。また、荷重-CMOD 曲線における巨視的な破壊応答、AE による微小破壊の経時的モニタリング、および DIC を用いた表面ひび割れに関するキネマティクス解析といった独立的な複数の計測手法のすべてにおいて、3.3.1 で考察された仮説を裏付ける結果を示している点も、本章の解釈の妥当性を補強するものである。

なお、本章では、積層経路以外の積層パラメータおよび配合は変化させていない。今後は、層厚やギャップタイムといった異なる積層パラメータや繊維および粗骨材を含む配合についても検討する必要がある。加えて、Trans-layer 破壊および Inter-layer 破壊が混在する複雑な破壊形式におけるひび割れ発生および進展挙動について検討することで、積層経路設計に基づく 3DP コンクリートの破壊制御を達成する基礎的な知見を提供することができる。

3.5. 第3章のまとめ

本章では、残存空隙が発生せず密実に吐出および積層された 3DP コンクリートを対象に、力学的異方性における基礎的な破壊形式である Trans-layer 破壊および Inter-layer 破壊におけるひび割れ発生および進展挙動を評価した。このとき、X 線 CT 法を用いて内部構造を可視化することで、対象にした 3DP コンクリートの積層界面状況を確認した。三点曲げ試験時には、AE 法によって、微細なひび割れに起因する AE 発生挙動をモニタリングし、DIC によって、供試体表面におけるひずみ分布を追跡した。本章により得られた知見を以下に示す。

- 1 Trans-layer 破壊では、Inter-layer 破壊と比較して、荷重-CMOD 曲線はピーク荷重後の引張軟化域において緩やかな荷重低下を示し、破壊エネルギーは大きい。

- 2 破壊エネルギーの大小に対応して、Trans-layer 破壊では、Inter-layer 破壊より多数の AE イベントが検出され、発生した AE イベントは Trans-layer 破壊ではより広範囲に分布し、Inter-layer 破壊ではスパン中央部に局所的に分布する。
- 3 本章で検討した 3DP コンクリートでは、積層界面は多孔的な構造を有さず、積層界面にはほとんど空隙が存在しない密な Filament Interfacial Zone Network (FIZN) が形成される。
- 4 pdAE による AE イベントの時空間的分布と DIC による表面ひび割れプロファイルの時間履歴を統合したとき、Trans-layer 破壊ではひび割れ発生時から多数の AE が発生する一方で、Inter-layer 破壊ではひび割れ発生時にほとんど AE が発生しない。これにより、管内流動時のせん断履歴に基づく材料不均質性を構造的要因として発生する力学的異方性は、ひび割れ発生に対する抵抗の差異およびそれに伴う AE 発生挙動の対照性として顕在化する。
- 5 Trans-layer 破壊では、ひび割れ進展方向に対して垂直に配置された積層界面は、ひび割れの進展を抑制する crack arresting 効果を示す。一方で、隣接するフィラメント間の積層界面は、ひび割れ進展に対して平行に配置され、容易にひび割れを進展させる crack acceleration 効果を示す。

本章により得られた 3DP コンクリートの異方的な破壊挙動に関する知見は、3DP コンクリートの破壊挙動に対する高精度な予測および構造性能を最大化するための積層経路設計の最適化に資するものである。養生条件は力学性能に影響を及ぼすものの、積層界面がひび割れ発生および進展において支配的な影響を有することは明らかである。逆説的に、積層経路設計に基づく戦略的な積層界面配置によって、ひび割れ発生位置の分散などを通じて、内部に分布する潜在的脆弱部を機能的構造に昇華できる点は、従来の流込み施工の自動化に留まらない 3D プリンティング技術の重要な利点の一つである。

第4章 吐出プロセスに起因する内部空隙の幾何学的およびトポロジ的变化

4.1. はじめに

本章では、フィラメント内部に形成される気泡および空隙である内部空隙（図-4.1(a)参照）が吐出プロセスに基づき示す幾何学的およびトポロジ的变化を評価する。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り、耐久性における脆弱部となることが報告されている[79,80,170]。一方で、積層界面品質の向上のために、造形プロセスにおける次層の積層直前にフィラメント表面に液体を塗布することでフィラメント表面からの水分の蒸発に基づく凹凸を軽減する方法や[45–47]、ノズル形状を改良することでフィラメント同士の機械的かみ合わせの向上[41,42,68]、ならびに養生条件による積層界面の改質[48,49]などに代表される対策が検討されている。これにより、多孔質ではなく密な構造を有する積層界面の達成も報告されており[23,27]、今後、積層界面領域は耐久性における脆弱部とならないと考えられる。

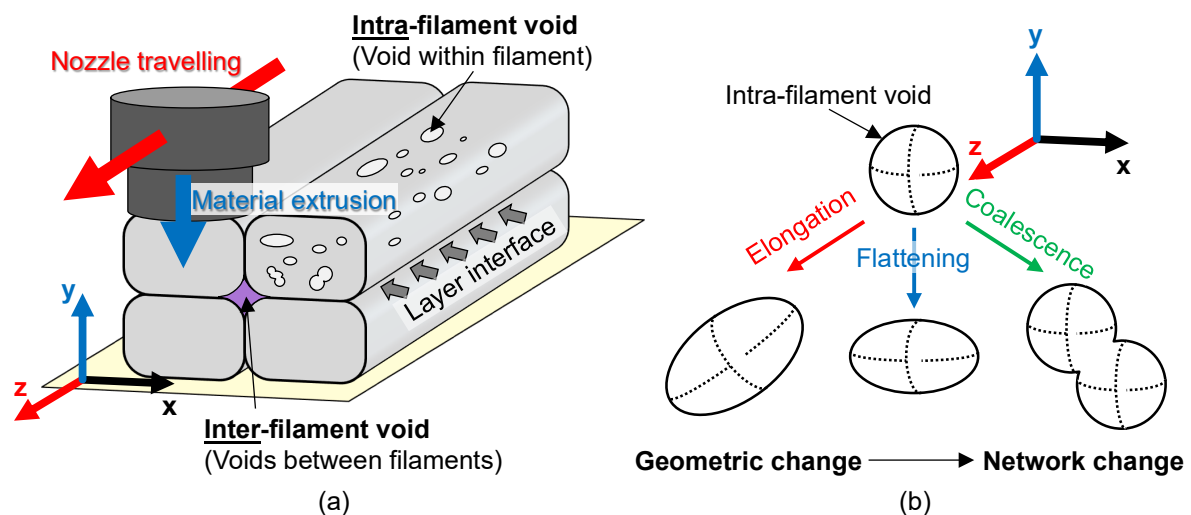


図-4.1 (a) 3DP コンクリートにおける空隙構造 (b) 内部空隙の幾何学的変化

このとき、3DP コンクリートの耐久性および物質移動においては、フィラメント内部に発生する内部空隙が重要になると考えられる。内部空隙は、流込みコンクリートにおける気泡や空隙に相当するものであり、その発生は避けられない。このとき、図-4.1(b)に示すように、内部空隙は 3DP コンクリート造形における吐出積層プロセスによって、幾何学的変化を示すことが報告されている[33,34,61,171]。すなわち、材料吐出によって内部空隙は材料吐出方向に圧潰し、ステージ上への吐出とノズル移動の相対運動によって内部空隙はノズル移動方向に伸長することが考えられる[61]。加えて、硬化後の 3DP コンクリートの X 線 CT 画像において、内部空隙同士の合体が観察されている[171]。

これらの検討は、それぞれの研究対象である積層界面領域における局所的な空隙構造観察における補助的な観察として行われているため、吐出条件が内部空隙の幾何学的変化に及ぼす影響を体系的に検討したものではない。同様に、使用材料に基づく内部空隙構造に関する検討も不足しており、使用材料、特

に空隙構造に影響を及ぼすと考えられる混和剤添加による内部空隙構造の変化を評価する必要がある。加えて、個々の内部空隙の幾何学的変化はグローバルな内部空隙構造にも影響を及ぼすと考えられる。しかしながら、空隙率や空隙径分布等の空隙構造評価においては、内部空隙の幾何学的変化を考慮しておらず、吐出プロセスに基づく内部空隙の幾何学的変化に伴う内部空隙構造変化を適切に記述できない。

本章では、複数の吐出条件によりフィラメント供試体を作製し、X線CT法により取得した連続画像の画像解析により、内部空隙の幾何学的変化を評価した。このとき、粒子形状解析に使用される指標により、混和剤添加および吐出条件による個々の内部空隙の形状変化と複数の内部空隙の合体を分類することを目的とした。また、個々の空隙形状に加えて、集合体として形成される構造的特徴の評価として、近年、数学的理論を基盤として開発され、材料科学等の多様な分野への適用が活発に行われているトポロジーデータ解析（位相的データ解析）手法の一つであるパーシステントホモロジー（Persistent Homology : PH）を用いて、吐出条件に基づく内部空隙構造をトポロジー的に定量化した。

本章ではX線CT法を用いて内部空隙を評価するが、その空間分解能を踏まえると、対象とするのは概ね数十 μm 以上の空隙である。また、フレッシュ状態における連行空気や巻き込み空気に言及するとき、「気泡」と呼称する。

4.2. 実験概要

4.2.1. 積層体の造形

先行研究では、吐出されたフィラメントは、上層の積層によって鉛直方向に変形することが報告されており[44,172,173]、フィラメント断面の形状変化は、内部空隙の幾何学的変化にも影響を及ぼすと考えられる。本章では、上層積層による内部空隙構造変化の影響を排除し、吐出造形プロセスの影響のみを評価するために、単一のフィラメントを吐出および切出すことにより取得したフィラメント供試体を対象とした。

図-4.2に本章において検討する積層パラメータを示す。先行研究では、図-4.2(a)に示すように、フィラメント断面形状を決定する主要な積層パラメータとして、ノズル径 (D)、層厚 (h)、吐出量 (Q)、ノズル移動速度 (v) を挙げている[174–176]。また、3DPコンクリートの造形では、層間の接着面積を増加させることで、積層界面における付着性状の向上を目的とした手法が用いられることがある。具体的には、ノズル径より小さい層厚を使用して圧付けながら吐出する Layer pressing、およびノズル直下領域以上の材料を吐出する Over-extrusion が用いられている[27,44]。本章では、これらの吐出条件による内部空隙への影響を評価するために、直径 20mm の円形ノズルを使用して、ノズル移動速度を 30mm/s と設定し、層厚 (h) および吐出量 (Q) を実験条件として変化させた。

本章では、材料吐出に関わる積層パラメータとして、ノズル直下領域に対する等倍の吐出量 (Q_s) に対して、実際の吐出量 (Q_a) の比を表す吐出率 (E) を定義した。これにより、ノズル径および層厚により規定されるノズル直下領域に対して、多量の材料を吐出する Over-extrusion 条件を設定した。図-4.2(b)に示すように、本章では、ノズル直下領域に対して等倍の材料を吐出し、かつノズル径と同じ層厚を使用することで Layer pressing かつ Over-extrusion を伴わない No pressing 条件を基準とした。これを基準として、Layer pressing 条件または Over-extrusion 条件により、フィラメント供試体を作製した。作製されたフィラメント供試体の各条件における積層パラメータを表-4.1に示す。各吐出条件に基づき、フィラメント供試体名は同表に従う。

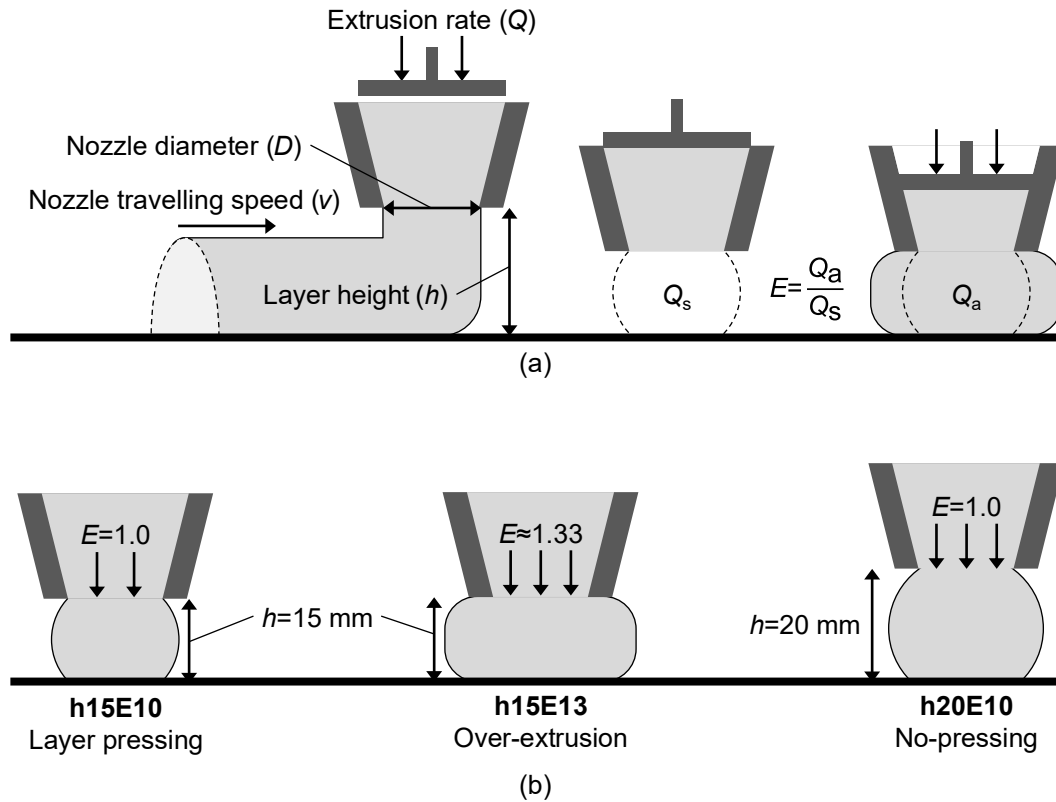


図-4.2 (a) 積層パラメータの定義 (b) フィラメント供試体の条件

表-4.1 各吐出条件における積層パラメータ

Printing Condition	h (mm)	Q_s (mm ³ /s)	Q_a (mm ³ /s)	$E=Q_a/Q_s$
h15E10 (Layer pressing)	15	7069	7069	1.0
h15E13 (Over-extrusion)	15	7069	9425	1.3 (≈ 1.33)
h20E10 (No pressing)	20	9425	9425	1.0

4.2.2. 使用材料と配合

3DP コンクリートにおけるフレッシュ材料は、以下の二つの相反する性状が求められる。すなわち、ホースおよびノズル内部を閉塞せずに圧送されるための吐出性 (Extrudability) と吐出後、変形および倒壊せずに上層積層に抵抗するための積層性 (Buildability) を両立する必要がある[20,22,177,178]。これらの要求性能を満足するために、種々の材料および混和剤が使用され、高性能 AE 減水剤の使用は主要な混和剤添加である[110,179]。一方で、高性能 AE 減水剤の添加によって連行される微小な気泡は、安定した形状を有すると考えられ[180–182]、添加する混和剤による内部空隙構造の変化に対する影響を評価する必要がある。本章では、高性能 AE 減水剤を使用した AE 配合および水中不分離剤を粘度調整剤として使用した AW 配合の2種類の配合を使用した。

AE および AW 配合ともに、セメントに普通ポルトランドセメント (C, 3.15g/cm³) を使用し、細骨材

に珪砂 (S, 2.65g/cm³) を使用した。AE 配合では、増粘剤入りポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤 (SP) を使用し、AW 配合では、水溶性セルロースエーテルを主成分とする粉体状の水中不分離剤 (AW) を添加した。表-4.2 に 2 種類の配合を示す。

表-4.2 配合表

Mixture	W/C (%)	Water (kg/m ³)	Cement (kg/m ³)	Sand (kg/m ³)	SP/C (%)	AW/C (%)
AE mixture	23	305	1324	728	2.6	-
AW mixture	35	400	1143	629	-	0.6

はじめに、セメントおよび細骨材 (AW 配合においてはこれらに加えて AW) を 2 分間混合し、プレミックス粉体とした。その後、水 (AE 配合においては水に加えて SP) を添加し、2 分間練混ぜた。かき落とし後、4 分間混練することでフレッシュ材料を用意した。練混ぜ直後のフレッシュ性状として、空気量、15 打フロー値およびベーンせん断試験により得られるせん断抵抗値を取得した。表-4.3 に 2 種類の配合のフレッシュ性状をそれぞれ示す。

表-4.3 AE 配合と AW 配合のフレッシュ性状

Mixture	Air content (%)	Martar flow value (mm)	Shear stress (kN/m ²)
AE mixture	3.5	148	0.98
AW mixture	4.7	140	0.59

図-4.3 に本章で使用した材料押出方式 3D プリンタを示す。当該プリンタ装置は、北海道大学において独自に開発されたものであり、実験室レベルでの研究活動のために少量の材料での吐出積層を実現することを目的としてカートリッジ方式を採用した[108,170,183]。

練混ぜられた材料は、カートリッジ内に充填され、プリンタ本体に取り付けられたピストンの押下によって、ノズルから吐出される。プリンタ装置およびノズル移動は、コンピュータ数値制御 (Computer Numerical Control: CNC) に基づき制御される。後述する X 線 CT 解析による軸設定と一致させるために、図-4.3 に示すように座標軸を設定する。すなわち、材料が吐出される基盤を xz 平面とし、特にフィラメント幅方向を x 方向およびノズル移動方向を z 方向とする。ピストンの押下方向 (材料吐出方向) を y 方向とする。4.2.1 で述べたように、直径 $D=20\text{mm}$ の円形ノズルを使用し、ノズル移動速度は $v=30\text{mm/s}$ に設定した。

フィラメント供試体の作製は、室温 20°C、相対湿度 60%に制御された室内で行った。比較用試験体として、AE 配合および AW 配合ともに、同材料および同配合を使用して直径 15mm 高さ 50mm の円筒形の型枠に流し込むことで流込み供試体を作製した。AE 配合および AW 配合について、表-4.1 に示す吐出条件により造形した造形物は、長さ 50mm にカットすることでフィラメント供試体を取得した。それぞれの配合および吐出条件に基づき、表-4.4 のように呼称する。すべての供試体は造形後、材齢 28 日まで 20°C および 60%R.H.の環境下で気中養生とした。

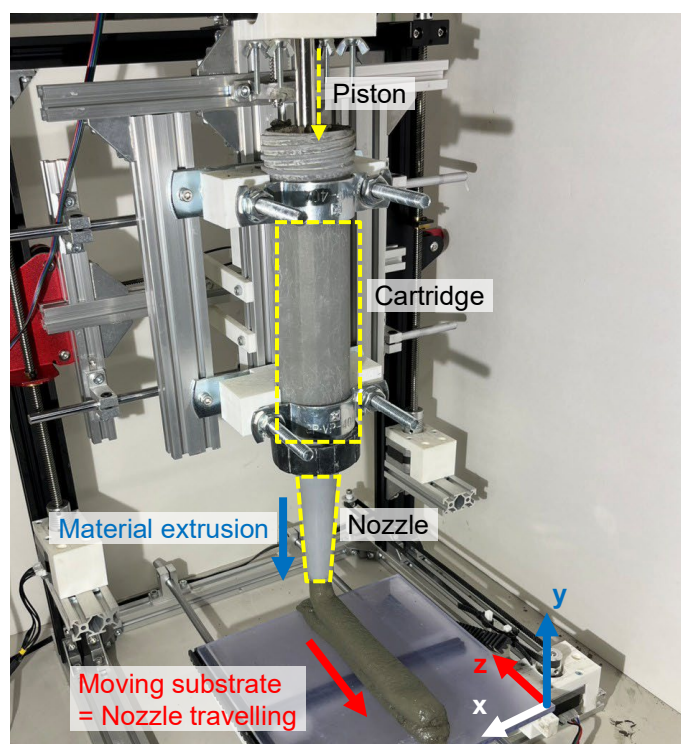


図-4.3 第4章で使用了材料押出方式 3D プリント

表-4.4 流込み供試体とフィラメント供試体の種類

Specimen name	Mixture	Manufacturing process	Printing condition
AE_cast	AE mixture	cast	-
AE_h15E10		printed	h15E10
AE_h15E13			h15E13
AE_h20E10			h20E10
AW_cast	AW mixture	cast	-
AW_h15E10		printed	h15E10
AW_h15E13			h15E13
AW_h20E10			h20E10

4.2.3. X線CT法

本章では、吐出プロセスに起因して変化する内部空隙構造を評価するために、X線CT法を適用した。本章では、マイクロフォーカスX線CT装置（Rigaku CT Lab HX-100）を使用し、管電圧 100kV および管電流 200 μ A とした。0.2mm 厚の Cu フィルタを使用し、低エネルギーの X 線を遮蔽することで、アーチファクトを低減した。再構成処理により、解像度 17.6 μ m/pixel および 2864 $\times$ 2864pixels の連続画像を取得した。

4.3. 解析手法

図-4.4 に本章における解析フローを示す。吐出プロセスおよび使用配合に基づく内部空隙の変化を評価する。4.3.1 では、先行研究に見られる投影径を用いた内部空隙の幾何学的変化を評価する。しかしながら、投影径を用いた評価では、単一の内部空隙の変形に基づく幾何学的変化と複数の内部空隙の合体に基づく幾何学的変化を区別できない。4.3.2 では、粒子形状解析に使用される Sphericity および Solidity を用いて、単一空隙の変形と複数空隙の合体を分類する。また、各空隙に着目して評価される幾何学的変化は、個々の内部空隙の集合体としての空隙構造に影響すると考えられる。4.3.3 では、内部空隙構造の変化を記述するためにトポロジーデータ解析（TDA）の手法の一つであるパーシステントホモロジー（Persistent Homology: PH）に基づき、内部空隙構造のトポロジー的变化を定量化する。

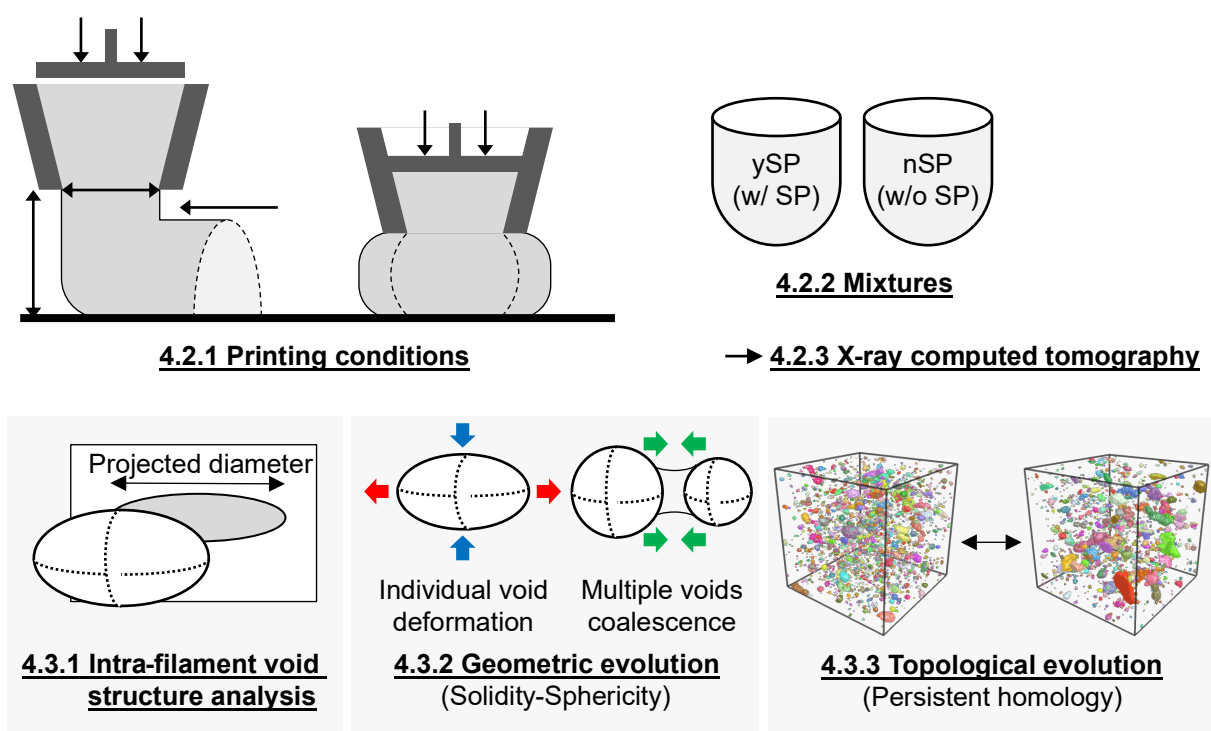


図-4.4 第4章における解析の流れ（図内の数字は対応する節番号を示す）

4.3.1. 等価空隙径と投影径に基づく幾何学的変化の評価

図-4.5 に 4.2.2 で規定したような本章で使用する座標軸を示す。フィラメント断面内において、フィラメント幅方向を x 方向、フィラメント高さ方向、すなわち材料吐出方向を y 方向とし、フィラメント供試体軸方向およびノズル移動方向を z 方向とする。造形したフィラメント供試体は、使用する吐出条件により断面形状が変化し体積が異なる。同一サイズの対象領域における内部空隙構造を評価するために、撮影領域からランダムに抽出した3つの $5 \times 5 \times 5 \text{ mm}^3$ の立方体領域を関心領域（Region of Interest: ROI）として設定した。

Otsu の二値化[184]により、抽出した空隙ボクセルに対して、クラスターラベリングを適用することで、個々の空隙ボクセルをラベル付けした。各空隙ボクセルの物性値を取得する際に、各空隙ボクセルを真球と仮定したとき、同一の体積を有する球の直径を等価空隙径（Equivalent Spherical Diameter : ESD）とし

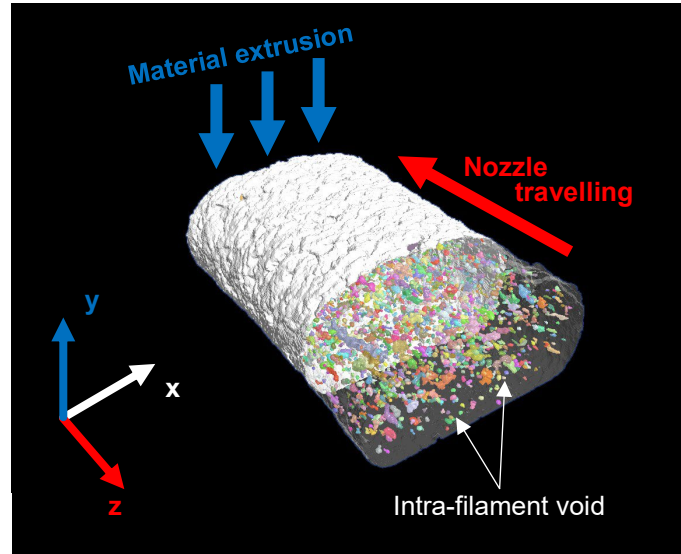


図-4.5 座標軸の設定

て、式 [4.1] により算出した。

$$\text{Equivalent Spherical Diameter (ESD)} = \left(\frac{V_{\text{void}}}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \quad [4.1]$$

ここで、 V_{void} : 空隙ボクセルの体積である。

3DP コンクリートにおける内部空隙の幾何学的変化を評価するとき、等価空隙径と投影径の関係から評価する例が多くみられる[33,34,61]。等価空隙径が真球を仮定したときの球の直径を算出するのに対し、投影径では、各空隙ボクセルを xy 、 yz および xz 平面に投影したときの各軸方向の長さを使用する。すなわち、ある空隙ボクセルが真球のとき、等価空隙径と各軸方向の投影径の長さは一致する。これに対し、図-4.6(a)に示すように、ある方向（例えば z 方向）に空隙ボクセルが伸長（あるいは圧潰）するとき、等価空隙径に対して投影径の z 方向成分は長く（あるいは短く）なる。これにより、内部空隙の幾何学的変化を各軸方向において評価することができる。

しかしながら、等価空隙径と投影径の関係に基づく幾何学的変化の評価では、図-4.6(b)に示すように、単一の空隙の変形に基づく幾何学的変化と複数空隙の合体に基づく幾何学的変化を区別できない。本章では、4.3.2 で詳述する粒子形状解析[185,186]に適用される Sphericity および Solidity に基づき、吐出プロセスに起因する内部空隙の幾何学的変化を評価する。

4.3.2. Sphericity および Solidity に基づく幾何学的変化の評価

上述の内部空隙の合体に起因する解析的課題において、等価空隙径と投影径に基づく評価では、複数空隙の合体に起因する空隙ボクセルのくびれを考慮していない。このとき、個々の空隙ボクセルの形状を式 [4.2] に示す Sphericity により定量化した。Sphericity は 0 から 1 の値を示し、空隙ボクセルが真球に近づくとき、値は 1 に近づく。

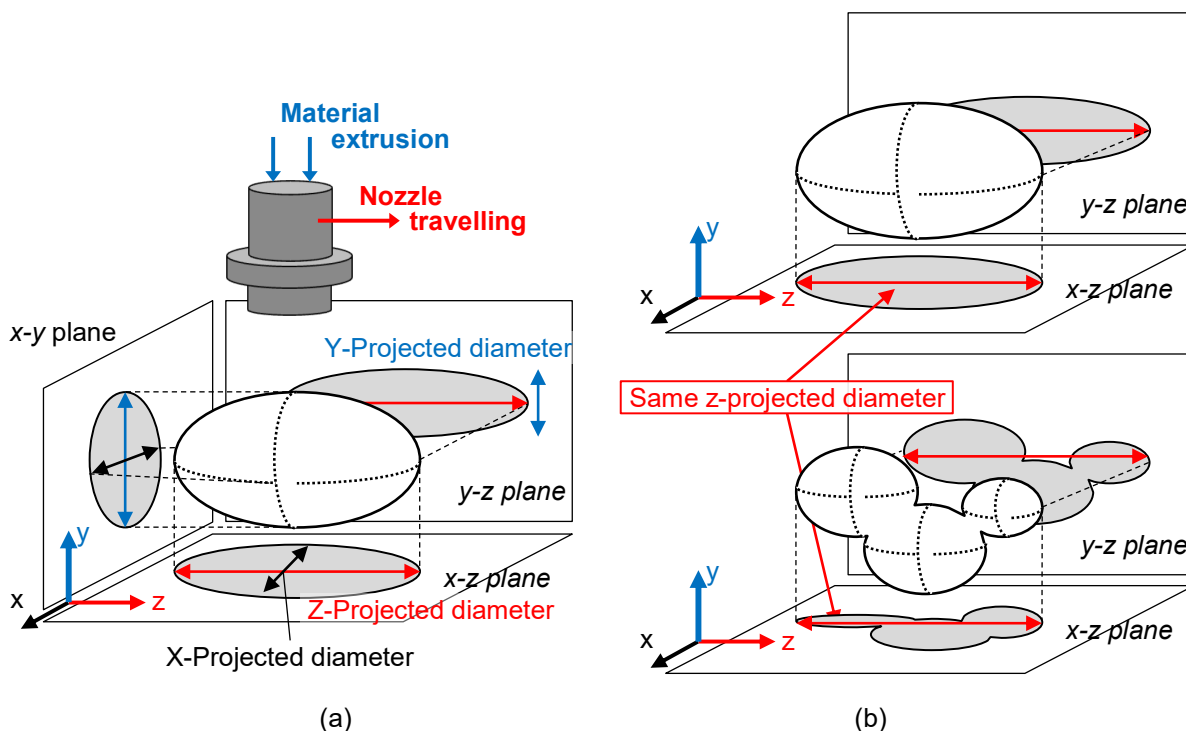


図-4.6 等価空隙径と投影径に基づく幾何学的変化の評価 (a) 投影径の算出方法 (b) 単一の内部空隙の変形と複数の内部空隙の合体

$$Sphericity = \left(\frac{6\pi^{1/2}V_{void}}{A_{void}} \right)^{\frac{2}{3}} \quad [4.2]$$

ここで、 A_{void} ：空隙ボクセルの表面積である。このとき、X線CT画像の最小単位はボクセルであり、立方体であるため、滑らかな表面積を表現できない。式[4.2]における表面積は、Lindbladの表面積推定方法[187]により算出した。

図-4.7(a)に示すように、複数の空隙が合体するとき、形成される空隙ボクセルはくびれを有する。このとき、複数空隙の合体に基づくくびれの形成を式[4.3]に示すSolidityにより定量化した。

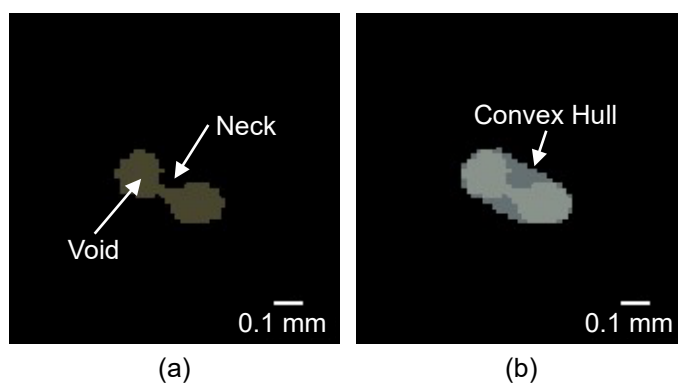


図-4.7 (a) 複数空隙の合体によるくびれの形成 (b) 空隙ボクセルの凸包

$$\text{Solidity} = \frac{V_{\text{void}}}{V_{\text{convex hull}}} \quad [4.3]$$

ここで、 $V_{\text{convex hull}}$ ：空隙ボクセルの凸包の体積である。

Solidity は各空隙ボクセルの体積と各空隙ボクセルの凸包 (convex hull) の体積比により算出され、0 から 1 の値を示す。図-4.7(b)に示すように、空隙ボクセルがくびれを有するとき、凸包の体積に対して空隙ボクセルの体積が小さくなるため、値は 0 に近づく[188]。また、真球および個々の内部空隙の変形の結果として形成される楕円球のとき、空隙ボクセルはくびれを有さないため、Solidity は 1 に近づく。

4.3.3. パーシステントホモロジー (PH) を用いたトポロジーデータ解析 (TDA)

トポロジーデータ解析 (Topological Data Analysis : TDA) は、データ集合に内在する幾何学的および位相的特徴を定量的に捉えるための数学的データ解析手法である。中でも、パーシステントホモロジー (PH) は、近年、開発と適用が盛んに行われている TDA の一つであり、データにおけるループやリング構造等のトポロジー的構造を定量化する手法である[189,190]。PH では、フィルトレーションと呼ばれる操作に起因するリングの発生 (Birth) と消失 (Death) を追跡する。PH は、数学的な理論の発展に伴い、多様なフィールドに適用されており、材料科学、生化学への適用事例が見られる[191–199]。セメント系材料に適用した例はほとんどないが、同様に多孔質な材料として岩石の透水挙動の解明に適用されている[192]。X 線 CT 画像等の画像データや機械学習との親和性が高く、今後、セメント系材料においても適用事例が増加すると考えられる。

図-4.8 に PH におけるフィルトレーションの概念図を示す。人間の目では図-4.8(a)に示す点群データにおいて、二つのリング構造を認識することが可能であるが、このデータのかたちを記述することは容易ではない。人間は無意識下で当該データに対して、各点を中心に適切な直径を有する円盤を設定していると考えられる。このとき、直径が大きいとき点群データは一つの塊になり、直径が小さいとき点群データは適切にグループ化できない。PH では、上述の操作を数学的に行うことで、データにおけるリング構造を定量的に捉えることになる。すなわち、各点を中心に直径を変化させることで、形成されるリング構造の一对一の発生と消失により特徴づける。

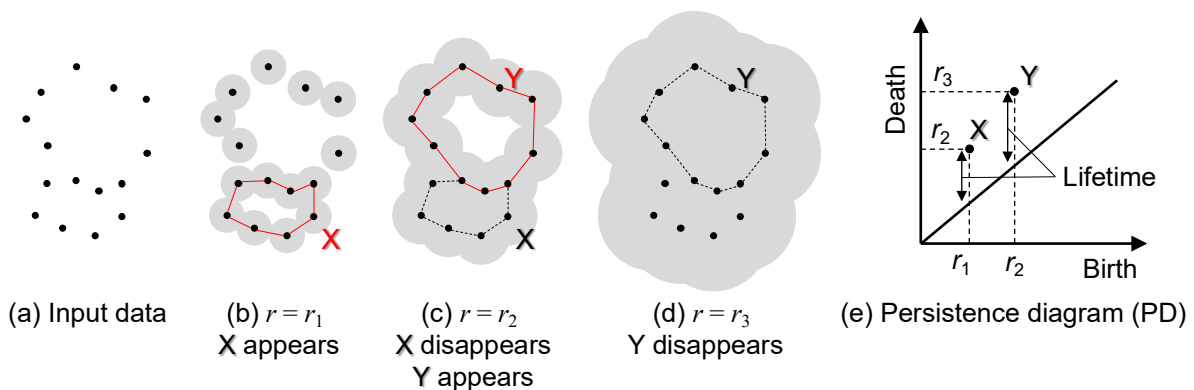


図-4.8 パーシステントホモロジーにおけるフィルトレーション：(a) インプットデータ (b) $r = r_1$ (リング X が生成) (c) $r = r_2$ (リング X が消失、リング Y が生成) (d) $r = r_3$ (リング Y が消失) (e) パーシステンス図 (PD)

具体的に、図-4.8(b)において、直径 $r=r_1$ を考えるとき、図中下部にリング構造 X が形成されることが分かる。同様に、 $r=r_2$ としたとき（図-4.8(c)参照）、図中上部に異なるリング構造 Y を観測することができる。このとき、リング構造 X は穴が埋まることにより消失する。その後、 $r=r_3$ のとき（図-4.8(d)参照）、リング構造 Y も同様に消失する。すなわち、リング構造 X では、 $r=r_1$ のとき発生し、 $r=r_2$ のとき消失する。リング構造 Y は、 $r=r_2$ のとき発生し、 $r=r_3$ のとき消失する。これにより、図-4.8(e)に示すように、これらのリングの発生と消失における直径を各軸にとることで、PH の結果であるパーシステンス図（Persistence Diagram : PD）を得る。このとき、すべてのリング構造は、発生のと消失するため、PD においては対角線 $y=x$ より上に点はプロットされ、対角線からの距離で表される発生から消失までを Lifetime と表す。すなわち、Lifetime が長いとき大域的な特徴でデータのかたちを特徴づける構造を示し、Lifetime が短いときノイズ等を含む不安定な特徴であると考えられる[189,191]。結果として、Lifetime の長いときは、空隙構造において持続的に表れる位相的特徴を示し、Lifetime が短いときは局所的な空隙配置や微小な凹凸および X 線 CT 画像におけるノイズの影響を受けやすいものと解釈できる。

PH の適用においては、多数のソフトウェアパッケージが様々な研究グループから提案されている。本章では、日本人研究者グループが開発し、マニュアルおよびチュートリアルが日本語において充実している HomCloud を使用した[200,201]。入力データは、4.3.1 で使用した ROI における空隙の二値画像とした。HomCloud により三次元の二値画像に対して距離変換を行い、レベルセット法に基づくフィルトレーションを適用した[189,200]。PH に関する詳細な数学的背景に関しては、先行研究を参照されたい[190,191,195]。

4.4. 実験結果

4.4.1. フィラメント断面画像の観察

図-4.9 に X 線 CT 法により得られた流込み供試体（(a)および(e)）およびフィラメント供試体（(b)~(d) および(f)~(h)）の xy 断面画像を示す。図中左下に内部空隙の拡大図を示している。設定した軸設定に基づき、xy 断面はフィラメント断面に対応している。

ノズル径 D より小さい層厚 h を使用したとき（図-4.9(b)、(c)、(f)および(g)参照）、フィラメントは圧付けながら吐出されており、吐出方向に押し潰された形状をしている。3DP コンクリートにおいて、円形ノズルを使用したとき、圧付けながら吐出することで、フィラメント上下面が平坦になることで、上層あるいは下層との接着面が増加する。これにより、積層界面における付着性状が向上することが知られている。これに対して、ノズル径 D と同一の層厚 h を使用したとき（図-4.9(d)および(h)参照）、吐出材料はステージ上に圧付けられずに吐出されており、より丸みを帯びた表面形状をしている。加えて、ノズル直下領域より多量の材料を吐出したとき（図-4.9(c)および(g)）、フィラメント供試体のため側方拘束がないため、吐出材料は x 方向に流動し、より平坦で押し潰されたフィラメント形状を示す。上述の積層パラメータに基づくフィラメント断面形状の変化は、AE 配合および AW 配合ともに確認され、先行研究で実験的および数値解析的に示されたものとも一致する[174,176]。

上述のように、吐出率 E および層厚 h 等の積層パラメータがフィラメントの断面形状に影響を及ぼすとき、フィラメント内部に発生する内部空隙も同様に積層パラメータの影響を受けると考えられる。流込み供試体（図-4.9(a)および(e)参照）とフィラメント供試体（図-4.9(b)~(d)および(f)~(h)参照）を比較したとき、流込み供試体は比較的球形状の空隙を有する一方で、フィラメント供試体の内部空隙は不規則な形状をしている。これは、先行研究で示された 3DP コンクリートの内部空隙の不規則な幾何学形状と一致

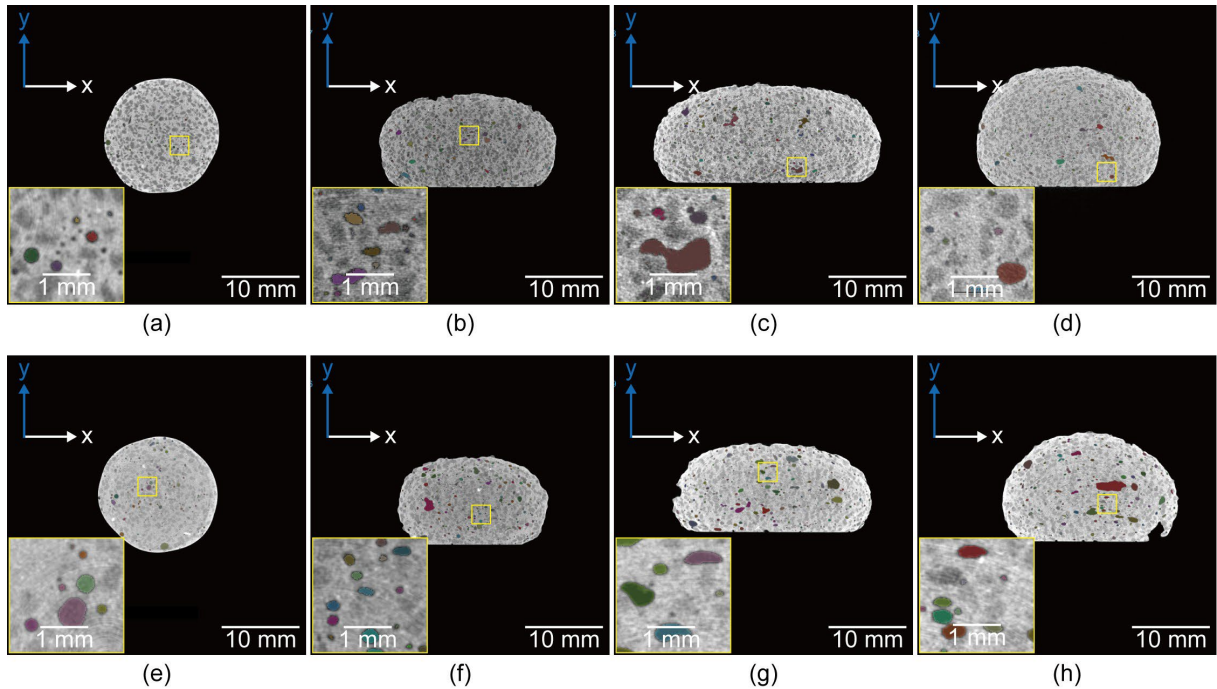


図-4.9 X線 CT 画像 (a) AE_cast (b) AE_h15E10 (c) AE_h15E13 (d) AE_h20E10 (e) AW_cast (f) AW_h15E10 (g) AW_h15E13 (h) AW_h20E10

しており[33,61]、3DCP の吐出積層プロセスに起因するものであると考察されている。以降の節では、これらの内部空隙の幾何学的変化およびそれに伴う内部空隙構造の変化を定量的に評価する。

4.4.2. 空隙径分布と硬化したフィラメント供試体の空隙率

図-4.10 に式 [4.1] により算出された等価空隙径に基づく空隙径分布およびランダムに抽出された 3 つの ROI における空隙率を示す。

流込み供試体（図-4.10(a)および(e)参照）とフィラメント供試体（図-4.10(b)~(d)および(f)~(h)参照）を比較したとき、AE 配合および AW 配合ともにフィラメント供試体は流込み供試体よりも高い空隙率を示す。これは、流込み供試体は適切な振動締固めを与えている一方で、フィラメント供試体ではカートリッジに充填する際に連行された気泡が内部空隙として残存したためであると考えられる。流込みコンクリートと比較して 3DP コンクリートの空隙率が高いことは、先行研究でも報告されており[34,107]、カートリッジ方式に限らず、吐出後に振動や突固めを付与できない 3DP コンクリート特有の結果であるといえる。

フィラメント供試体において、AE 配合（図-4.10(b)~(d)参照）と AW 配合（図-4.10(f)~(h)参照）を比較したとき、AE 配合では $100\mu\text{m}$ 以下の微小空隙が多量に連行されている。これは、高性能 AE 減水剤の添加により、微小な気泡が多量に連行された結果である[181]。しかしながら、AW 配合が吐出条件によらず、AE 配合より空隙率が高い。これは、 $500\mu\text{m}$ 以上の大径の空隙が多数連行されているためであり、カートリッジに充填された後、粘性の高い 3DP コンクリート内部から気泡が散逸することが困難であったため大径の気泡が残存したと考えられる。

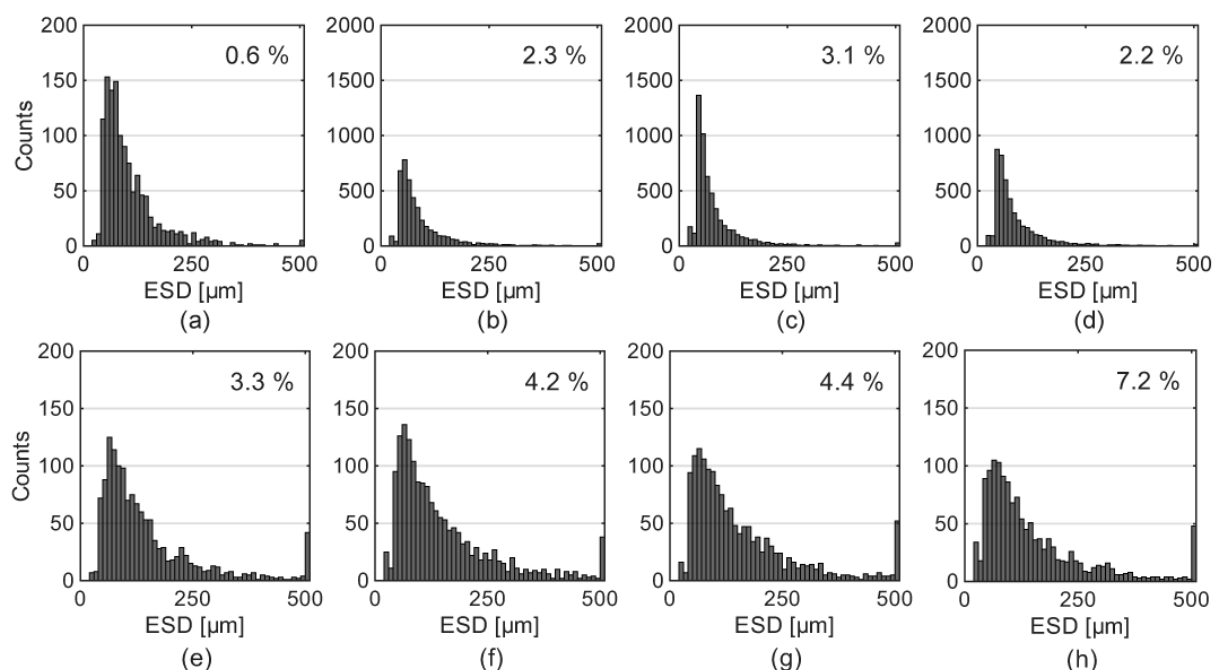


図-4.10 等価空隙径および空隙率 (a) AE_cast (b) AE_h15E10 (c) AE_h15E13 (d) AE_h20E10 (e) AW_cast (f) AW_h15E10 (g) AW_h15E13 (h) AW_h20E10

4.4.3. 投影径による内部空隙の幾何学的変化の評価

4.4.1 で観察された積層パラメータに基づくフィラメント供試体の断面形状の変化に伴う内部空隙の幾何学的変化を評価するために、投影径を用いた評価を行った。図-4.11、図-4.12 および図-4.13 に等価空隙径と投影径の x 、 y および z 方向成分をそれぞれ示す。図中の実線 $y=x$ に対して、左側にプロットされ

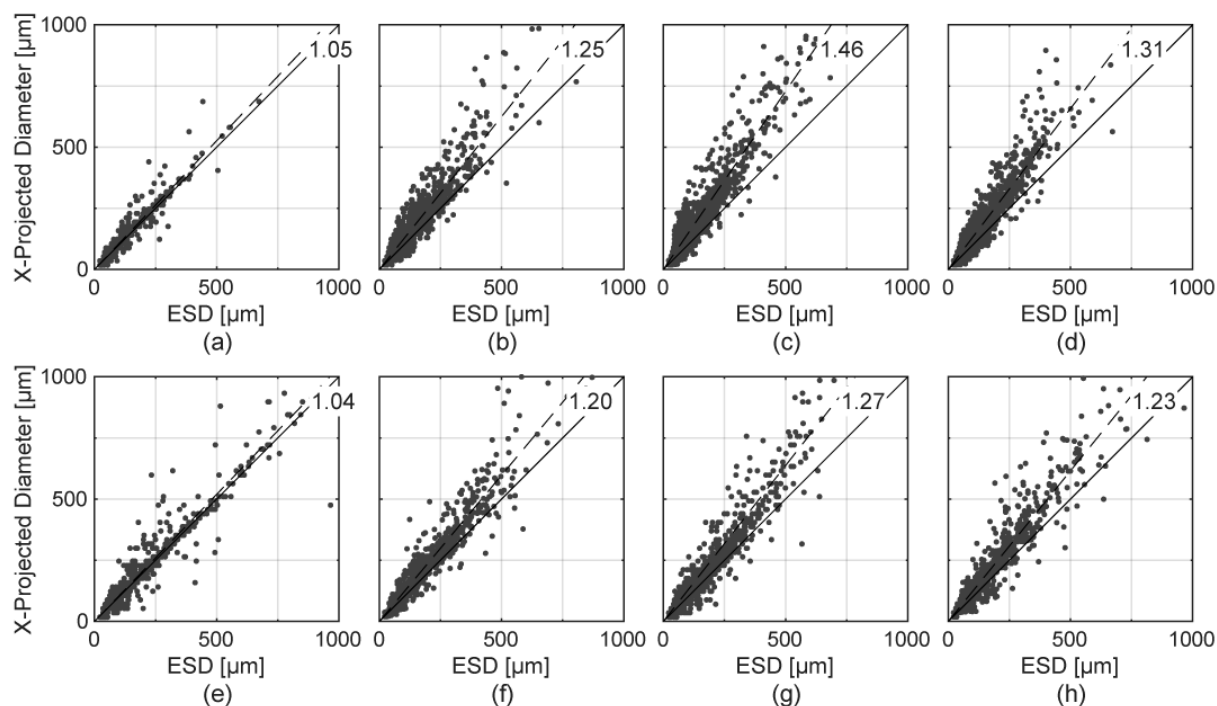


図-4.11 等価空隙径と投影径の x 方向成分の関係 (a) AE_cast (b) AE_h15E10 (c) AE_h15E13 (d) AE_h20E10 (e) AW_cast (f) AW_h15E10 (g) AW_h15E13 (h) AW_h20E10

る点は、伸長しており、右側にプロットされる点は圧潰していると判定される。また、内部空隙全体の伸長および圧潰の傾向を評価するために、近似直線を点線で示しその傾きを図中に示す。なお、近似直線の切片は0とした。

等価空隙径と投影径の x 方向成分の関係について、流込み供試体（図-4.11(a)および(e)参照）とフィラメント供試体（図-4.11(b)~(d)および(f)~(h)参照）を比較したとき、流込み供試体では近似直線の傾きが1に近く、内部空隙は x 方向、すなわちフィラメント幅方向には伸長および圧潰していない。一方で、フィラメント供試体では、AE 配合およびAW 配合に関わらず、すべての吐出条件で1よりも大きい近似直線の傾きを示す。これは、流込み供試体が比較的球形状の内部空隙を有するのに対し、フィラメント供試体は x 方向に伸長した内部空隙を有することを示している。流込み供試体では、型枠への充填および締固めにより、気泡は安定して存在していると考えられる。一方で、フィラメント供試体では、吐出材料は吐出後、拘束されておらず、自由に流動することができ、内部空隙の側方への伸長が発生したと考えられる。

フィラメント供試体において、吐出条件間で比較したとき、Over-extrusion 条件（図-4.11(c)および(g)参照）が、AE 配合およびAW 配合ともに最大の傾きを示している。これは、ノズル直下領域に対して約1.3倍の材料を吐出したことで、フィラメントが材料吐出時の応力を駆動力として x 方向に流動したとき、内部空隙も x 方向に伸長した結果であると考えられる。

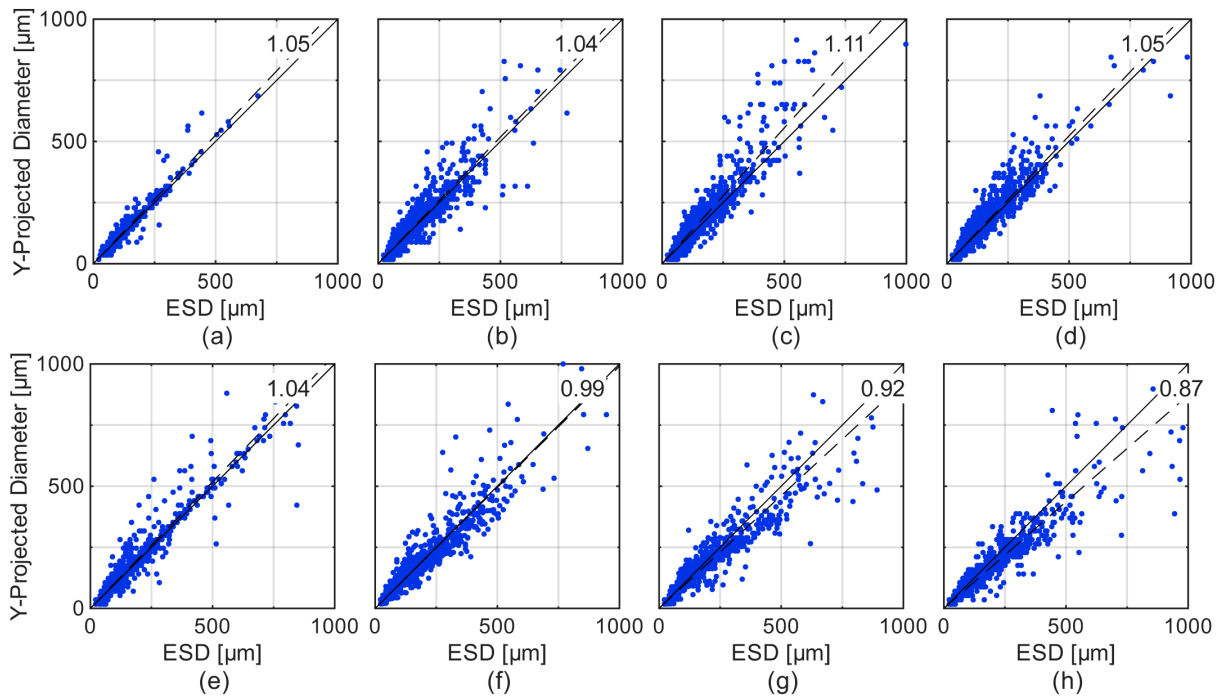


図-4.12 等価空隙径と投影径の y 方向成分の関係 (a) AE_cast (b) AE_h15E10 (c) AE_h15E13 (d) AE_h20E10 (e) AW_cast (f) AW_h15E10 (g) AW_h15E13 (h) AW_h20E10

等価空隙径と投影径の y 方向成分の関係について、 x 方向と同様に、流込み供試体（図-4.12(a)および(e)参照）の近似直線の傾きは1に近く、球形状の空隙を有している。AW 配合（図-4.12(f)~(h)参照）においては、近似直線の傾きは1より小さく、内部空隙は y 方向に圧潰している。これは、材料吐出時に受け

るステージからの反力によって、内部空隙は y 方向に圧縮されるためであると理解できる。一方で、AE 配合（図-4.12(b)~(d)参照）においては、近似直線の傾きは 1 より大きく、内部空隙は y 方向、すなわち、材料吐出方向に伸長していると判定される。これは、AW 配合との結果と相反するものであるが、図-4.9 の拡大図に示すように、AW 配合の内部空隙が y 方向に圧潰しているのが確認される一方で、AE 配合の内部空隙は y 方向に複数空隙が合体しているものが確認できる。すなわち、高性能 AE 減水剤を添加した AE 配合では、連行された安定な微小気泡は、材料吐出にかかる応力により個々の空隙が変形するだけでなく、複数の空隙が接近および合体した結果、等価空隙径より投影径が大きくなることが考えられる。これにより、AE 配合における y 方向の内部空隙の伸長と判定される図-4.12(b)~(d)における近似直線の傾きが 1 以上を示したことが理解できる。

等価空隙径と投影径の z 方向成分の関係について、流込み供試体（図-4.13(a)および(e)参照）では、 x および y 方向と同様に、近似直線の傾きは、フィラメント供試体（図-4.13(b)~(d)および(f)~(h)参照）と比較して、1 に近い値を示し、球形状の空隙を有している。 x および y 方向と比較して流込み供試体の近似直線の傾きが大きい値を示しているのは、流込み供試体の作製における流込み方向が z 方向に一致するため、 x および y 方向より伸長したためであると考えられる。

フィラメント供試体においては、AE 配合および AW 配合ともに、 z 方向の近似直線の傾きは、 x および y 方向より大きい値を示している。すなわち、フィラメント供試体においては、 x および y 方向以上に z 方向に相当するノズル移動方向への空隙の伸長が確認される。このとき、 z 方向への内部空隙の伸長は、ノズル移動方向のため、ノズル移動速度 v の影響を受けることが考えられる。本章では、ノズル移動速度 v を 30mm/s に統一しているため、 z 方向の内部空隙形状の変化は議論の対象としていないが、今後の重要な検討事項となる。

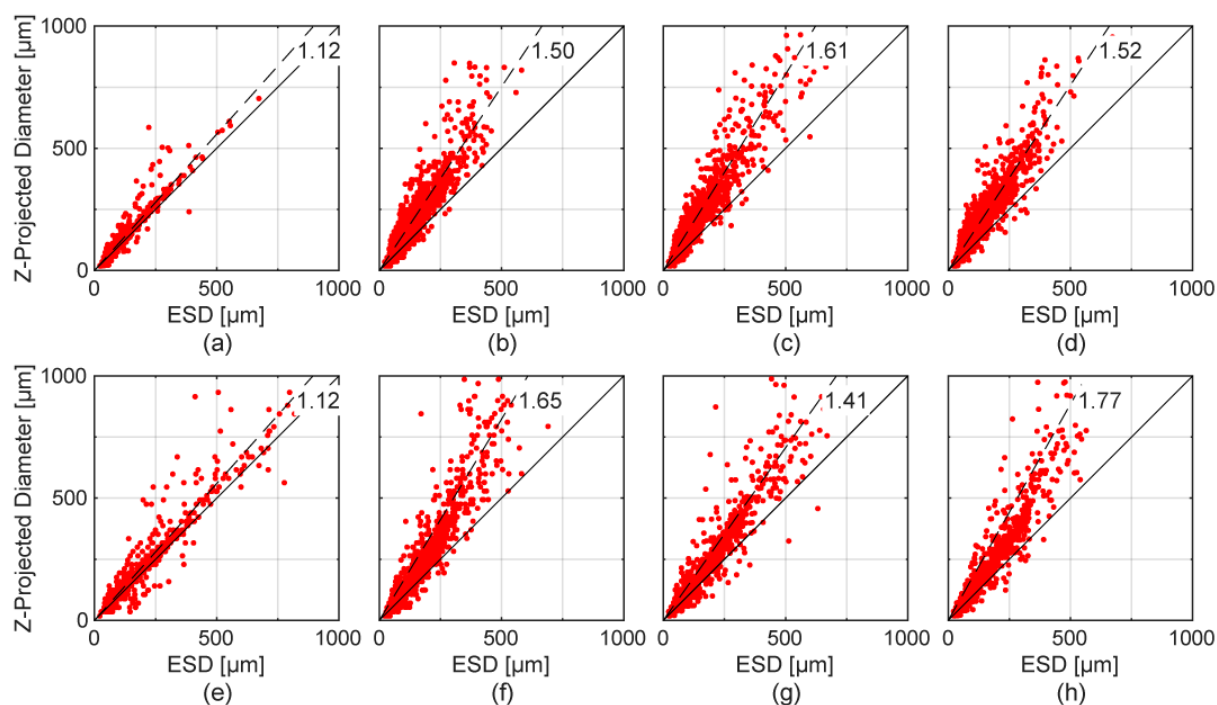


図-4.13 等価空隙径と投影径の z 方向成分の関係 (a) AE_cast (b) AE_h15E10 (c) AE_h15E13 (d) AE_h20E10 (e) AW_cast (f) AW_h15E10 (g) AW_h15E13 (h) AW_h20E10

4.4.4. 単一空隙の変形および複数空隙の合体に基づく内部空隙の幾何学的変化の評価

本項では、前項までに確認された y 方向、すなわち、材料吐出方向の内部空隙の幾何学的変化について、単一の内部空隙の変形（圧潰および伸長）と複数の内部空隙の合体を評価するために行った、Sphericity および Solidity に基づく結果を示す。4.3.2 で概説したように、複数空隙の合体においては、合体後の空隙はくびれを有する瓢箪型の形状を示す。図-4.14 に AE 配合および AW 配合における流込み供試体ならびにフィラメント供試体の Solidity-Sphericity マップを示す。図中の各データ（各空隙ボクセル）のカラーマップは、各空隙ボクセルの等価空隙径に基づき作成した。Sphericity が各空隙ボクセルの球形度を示し、Solidity が合体に伴うくびれの存在を定量化することを考慮すれば、図-4.14 におけるデータの分布領域に基づき以下のように考えられる。

- 右上領域（高 Solidity かつ高 Sphericity）：当該領域に分布する空隙ボクセルは、Sphericity および Solidity とともに高い値を示す。すなわち、真球に近い形状を有する。
- 右下領域（高 Solidity かつ低 Sphericity）：当該領域に分布する空隙ボクセルは、Sphericity は低い一方で、Solidity は高い値を示し、くびれを有さないが、球から遠い形状を示す。すなわち、楕円球のような形状を有し、個々の内部空隙の変形を示す。
- 左下領域（低 Solidity かつ低 Sphericity）：当該領域に分布する空隙ボクセルは、Solidity および Sphericity とともに低い値を示し、くびれを有し、球から遠い形状を示す。すなわち、瓢箪型の形状を有し、複数の内部空隙の合体を示す。

なお、左上領域（低 Solidity かつ高 Sphericity）に分布するオブジェクトは、球形の中空構造を示すことになるが、本章の検討では、X 線 CT 画像において空隙部分を二値化した連続画像を対象とするため、存

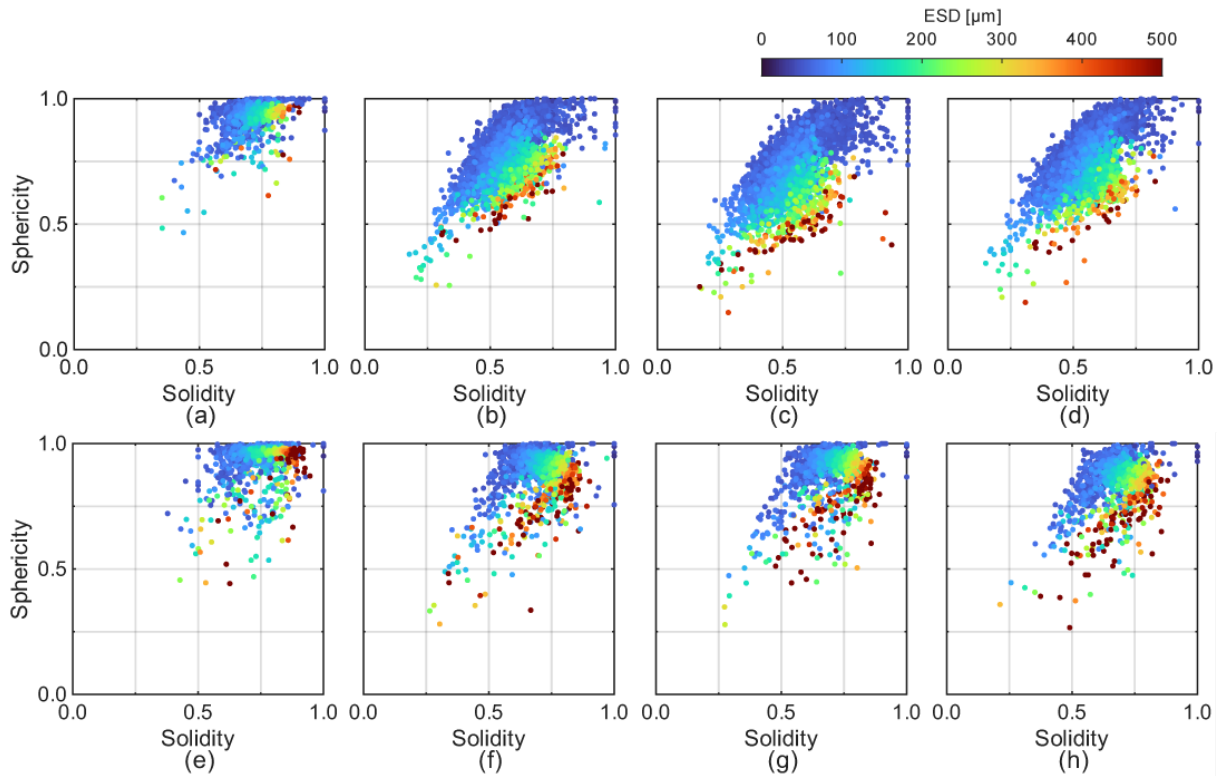


図-4.14 Solidity-Sphericity マップ (a) AE_cast (b) AE_h15E10 (c) AE_h15E13 (d) AE_h20E10 (e) AW_cast (f) AW_h15E10 (g) AW_h15E13 (h) AW_h20E10

在しないことに注意が必要である。

流込み供試体（図-4.14(a)および(e)参照）とフィラメント供試体（図-4.14(b)~(d)および(f)~(h)参照）を比較したとき、流込み供試体が右上領域に主に分布する一方で、フィラメント供試体は、右上領域から左下領域にかけてより広範な領域に分布している。これは、先述の通り、流込み供試体が球形状の空隙を有し、フィラメント供試体がいびつな形状の空隙を有することを示している。すなわち、供試体の製造方法に起因して、3DP コンクリートの内部空隙は不規則な幾何学形状を有することが示された。

流込み供試体において、AE 配合（図-4.14(a)参照）と AW 配合（図-4.14(e)参照）を比較したとき、AE 配合は、0.75 以上の Sphericity を示す空隙ボクセル、すなわち、球形の空隙を有するのに対して、AW 配合は、0.75 以下の Sphericity を示す空隙ボクセルも有している。これは高性能 AE 減水剤の添加に起因する微小で安定した気泡が連行された結果であると考えられ、Solidity-Sphericity マップによってセメント系材料の空隙の幾何学形状を評価できることが示された。

フィラメント供試体において、AE 配合（図-4.14(b)~(d)参照）および AW 配合（図-4.14(f)~(h)参照）を比較したとき、流込み供試体における AE 配合および AW 配合の結果とは逆の結果を示している。すなわち、AW 配合は、右上領域を中心に分布し Solidity および Sphericity とともに 0.5 以下の領域にほとんど分布していない。一方で、AE 配合では、Solidity および Sphericity とともに 0.5 以下の領域にも多数の分布が見られ、より広範な領域に分布している。特に、等価空隙径が大きい空隙ボクセルについては、AW 配合が右上領域に分布するのに対し、AE 配合では大きい空隙ボクセルは特に左下領域に分布している。これは、吐出およびノズル移動に起因する圧力を駆動力として、フィラメントが変形することに伴い、高性能 AE 減水剤添加による連行空気が、フィラメント内部を移動し接近した結果、複数の空隙が合体したと考えられる。これにより、図-4.14 において低 Solidity かつ低 Sphericity を示すような、くびれを有する大きな内部空隙が形成されたことが分かる。

フィラメント供試体の AE 配合における吐出条件を比較したとき、Over-extrusion 条件により吐出した AE_h15E13（図-4.14(c)参照）において、空隙ボクセルはより左下領域に分布しており、特に、大径の空隙ボクセルにおいて顕著な結果を示す。これは、圧付けながら過剰量の材料を吐出したことで、フィラメントが受ける圧力が増加した結果、内部空隙の合体がより発生したためであると考えられる。これにより、Over-extrusion 条件においては、内部空隙の合体を発生させ、内部空隙を粗大化させることが考えられ、吐出条件として避けるべき条件であることが示唆される。

なお、Solidity-Sphericity マップにおける評価では、単一の内部空隙の変形と複数の内部空隙の合体を区別して評価することが可能であることが分かったが、方向に関する情報が欠如している。すなわち、図-4.14 において、定量化された内部空隙の合体が x 、 y および z 方向のどの方向に発生しているかは不明であることに注意を要する。

4.4.5. 内部空隙のトポロジ的变化の評価

本項では、4.4.3 および 4.4.4 において解明された内部空隙の幾何学变化が、空隙群としてグローバルな内部空隙構造に及ぼす影響を評価することを目的として、4.3.3 において導入した PH 解析に基づき内部空隙構造を評価する。このとき、図-4.14 に示すように AE 配合において吐出条件による内部空隙の幾何学变化が顕著であることから、本項では、AE 配合を対象に PH 解析を行った結果を示す。

図-4.15 に AE 配合の PH 解析におけるパーシステンス図 (PD) を示す。図-4.15 においては、横軸にリ

リングの発生 (Birth) をとり、縦軸にリングの消失 (Death) をとる。PH 解析においては、リングの発生から消失までを Lifetime と呼称し、Lifetime が長いとき、図中の直線 $y=x$ からより離れた位置にプロットされることになる[189,202]。図は二次元ヒストグラムを示し、各ビンにおける頻度をカラー図で示している。

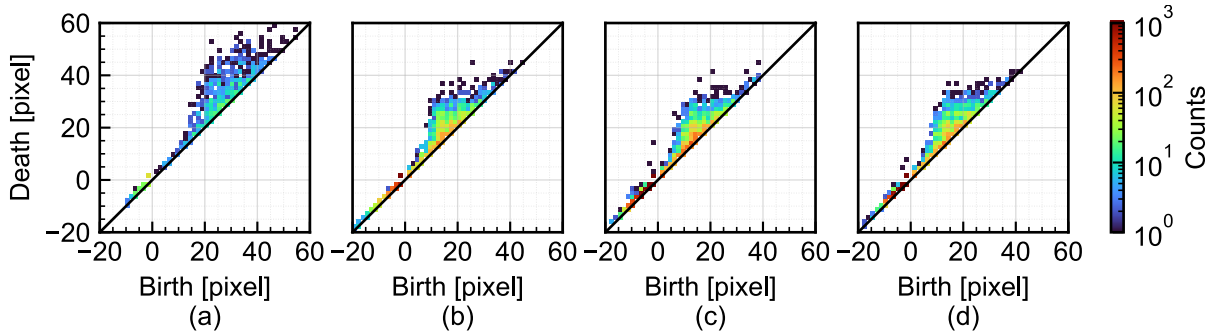


図-4.15 AE 配合における PD (a) AE_cast (b) AE_h15E10 (c) AE_h15E13 (d) AE_h20E10

流込み供試体 (AE_cast、図-4.15(a)参照) およびフィラメント供試体 (図-4.15(b)~(d)参照) を比較したとき、全く異なる PD を示している。第一に、流込み供試体 (AE_cast) では、図-4.10 に示すように空隙数がフィラメント供試体と比較して少なく、PD においても形成されるリングの数が少ない。加えて、フィラメント供試体より大きい Birth によってリングが形成されている。すなわち、流込み供試体 (AE_cast) 内部の空隙は物理的距離が離れていることが分かり、図-4.10(a)に示したようにフィラメント供試体に対して空隙数が少ないことに対応しており、その空間的配置が点在していると考えられる。加えて、 $y=x$ から離れた Lifetime が長いリングが多く確認され、トポロジー的に安定したリング構造が存在することが分かる。ここから、従来の流込みによる AE_cast と吐出造形プロセスによるフィラメント供試体が示す空隙構造はトポロジー的にも異なる構造であることが分かった。

フィラメント供試体において、吐出条件ごとに比較したとき、AE_h15E10 (図-4.15(b)参照) は、直線 $y=x$ から離れた位置および負の Birth 部分に多数分布している。Over-extrusion 条件によって、長寿命なリング構造が形成されていることが考えられる。負の Birth における多数のプロットは、入力データである空隙を抽出した二値画像において、空隙ボクセルを縮小していくときに観測されるリングである。すなわち、図-4.14 に示すような複数空隙の合体に伴って複雑な幾何学形状を有する内部空隙構造を反映している。これにより、吐出条件に基づく内部空隙構造の変化をトポロジー的に評価することが可能であることが分かった。

PH 解析におけるフィルトレーションによって得られる PD は、多数の情報を有し有用である一方で、図-4.15 に示すように目視等で容易にその違いを観察することが困難な場合がある[189]。このとき、図-4.16 に示すように PH 解析において得られる PD をベクトル化することで、機械学習における入力データを作成することができる。

ベクトル化したデータに対して、主成分分析 (Principal Component Analysis : PCA) 等を行うことで、トポロジー的構造を評価可能となる。加えて、物質移動性や力学特性とトポロジー的構造の相関を検討することにより、目的性能を支配するトポロジー的構造を特定し、逆解析することで、入力データにおいて可視化することができる[193]。本研究では、物質移動性との相関を最終目標として、第一に、吐出条件に起因するトポロジー的变化を評価可能な構造記述子の提案として、PH 解析を適用しており、以下で図-4.16

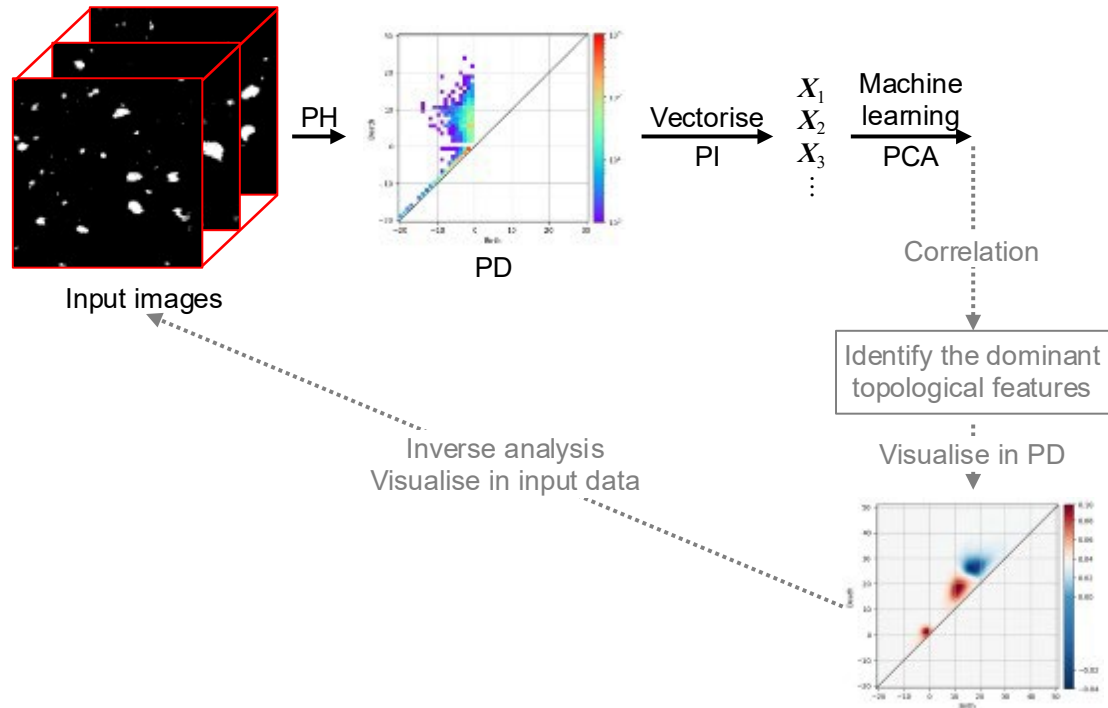


図-4.16 PHによる解析の流れ（本研究では、PHおよびPCAを対象とする）

に示すPDの主成分分析により、PH解析によって内部空隙構造を分類する。

PH解析によって算出したPDに対して、ベクトル化を行うことで特徴量を抽出した。このとき、PDに対するベクトル化手法には、HomCloud上に実装されたPersistence Image (PI)を適用した[189,200,203]。PIにおいては、PDにおける2次元ヒストグラムの各ビンの頻度値をベクトルの各要素とみなす。このとき、 $y=x$ の対角線から離れるほど、重要な情報を含むPDの特性を考慮し、対角線からの距離に基づく重みづけを適用した[203]。これによりPDが抽出したトポロジー的特徴をPIにより符号化したベクトルを用いて、主成分分析を行った。

主成分分析とは、多変量データにおいて、データの分散を最大化する主成分を定め、情報の次元を削減しながら、全体のばらつきを説明する多変量解析手法の一つである。データを十分に説明する重要な特徴量を抽出することで次元圧縮が可能となり、各主成分がすべてのデータにおいて説明可能な割合を寄与率により説明することができる。PIによりベクトル化したデータに対して、主成分分析を行った結果を図-4.17に示す。図中横軸(PC1)は第一主成分を示し、縦軸(PC2)は第二主成分を示す。

図-4.17に示すように、第一主成分および第二主成分の寄与率の合計で表される累積寄与率は97.9%であり、図によって、すべてのデータの97.9%を説明可能であることを示す。これにより、本章における吐出条件に基づく内部空隙構造のトポロジー的变化は図-4.17によってほぼすべて説明可能であるといえる。このとき、Layer pressing条件により吐出したAE_h15E10は、ROIの抽出位置に関わらず左下領域に集中して分布しており、同様のトポロジー的構造を有する内部空隙構造を有していることが分かる。これに対し、Over-extrusion条件により吐出したAE_h15E13は、右上領域に分散して分布している。これは、Over-extrusion条件によって過剰に吐出されたフィラメントによって、内部空隙が空間的に不規則に移動および合体したことで、ROIの抽出位置によって異なる内部空隙構造を示した結果であると理解できる。また、No pressing条件により吐出したAE_h20E10は、中間的な分布であり、その他の条件とは異なる分布

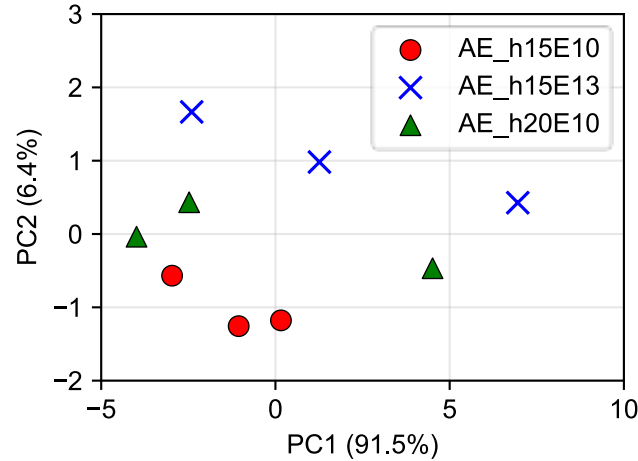


図-4.17 主成分分析の結果（図中カッコ内は各主成分の寄与率）

を示す。これにより、PH 解析および主成分分析によって、吐出条件に基づく内部空隙構造の変化を分類することが可能であり、内部空隙のトポロジー的变化の構造記述子として PH 解析が有用であることが分かった。加えて、Layer pressing 条件は、適切な圧付け吐出によって内部空隙の移動および合体が No pressing 条件に対して抑制されたことで、ROI 抽出位置によらずトポロジー的に安定的な内部空隙構造を形成するといえる。すなわち、Layer pressing 条件による吐出は、フィラメント上面を平坦にすることによって、上層のフィラメントとの接地面を拡大し、積層界面の付着性状を向上させるだけでなく、内部空隙構造のばらつきを低減し、品質の安定性に寄与する有効な吐出条件であることが分かった。

図-4.17 において、第一主成分および第二主成分が表すベクトルを可視化することで、各吐出条件間の PD における差異を確認することができる。PI では、各主成分に対応するベクトルを PD の形式に可視化することが可能である。図-4.18 に各主成分ベクトルの二次元ヒストグラム形式の分布を示す。各主成分ベクトルの正負は、各軸の正負に対応しており、図中赤で示される領域に多数データを有するとき、その ROI は正に分布し、青で示される領域に多数のデータがあるとき、負に分布する。

図-4.18(a)に示すように、第一主成分は、birth が 5 から 15 および death が 10 から 25 にあるとき正に分布し、birth が 15 から 25 および death が 25 から 35 にあるとき負に分布する。これを踏まえると、図-4.15(c)に示すように、AE_h15E15 は比較的 positive の領域に多数のデータを有している。また、図-4.18(b)に示

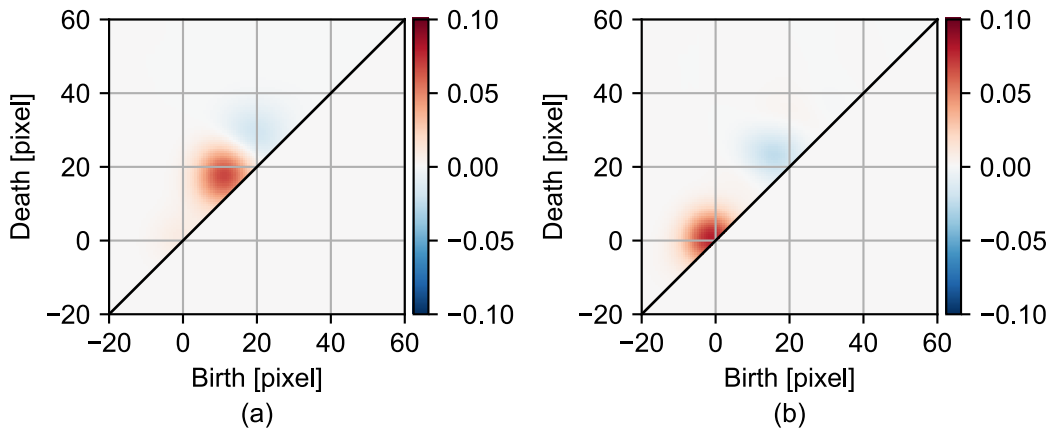


図-4.18 ローディングプロット (a) 第一主成分ベクトル (b) 第二主成分ベクトル

す第二主成分においては、AE_h15E13 は負の Birth を示すデータを多数有しており、主成分分析の第二主成分に対応する軸で高い値を示したことが理解できる。これらは、図-4.14(c)において観察されたように、AE_h15E13 における内部空隙の合体に基づくいびつな空隙形状への幾何学的変化の結果であると考えられる。以上のように、吐出条件に起因して変化する内部空隙の幾何学的変化に伴うトポロジー的变化を PH 解析によって特徴づけることが可能であることが分かった。今後、物質移動性や力学性能との相関を検討し、逆解析によって目的性能に対して支配的な影響を有するトポロジー的構造を特定する必要がある。これにより、要求性能を実現するために制御すべき内部空隙構造を明らかにし、目的に応じた吐出条件の選定指針を構築することが期待される。

4.5. 第4章のまとめ

本章では、今後 3DP コンクリートの長期耐久性の検討において重要と考えられるフィラメント内部に発生する内部空隙について、吐出条件に基づく幾何学的変化とトポロジー的变化を評価した。このとき、吐出条件として、ノズル径と一致する層厚によって圧付けを行わない No pressing 条件、ノズル径と比較して小さい層厚を使用し、フィラメントを圧付けながら吐出する Layer pressing 条件、およびノズル直下領域に対して多量な材料を吐出する Over-extrusion 条件によって、フィラメント供試体を作製した。また、連行される内部空隙の特性を変化させることを目的とし、高性能 AE 減水剤および水中不分離剤を混和剤として添加した二種類の配合を使用した。作製したフィラメント供試体に対して X 線 CT 法を適用し、取得された連続画像から空隙ボクセルを抽出した。空隙の二値画像に対して、投影径の各軸方向長さ、Sphericity、および Solidity によって、幾何学的変化を評価した。加えて、幾何学的変化に伴う内部空隙構造の変化を定量的に評価するために、トポロジカルデータ解析手法の一つであるパーシステントホモロジー (PH) 解析を適用した。本章により得られた知見を以下に示す。

- 1 高性能 AE 減水剤を混和剤に使用したとき、多数の微細な気泡が連行される一方で、水中不分離剤を混和剤に使用したとき、比較的粗大な空隙が形成される。
- 2 フィラメント幅方向の内部空隙について、Over-extrusion 条件は、多量の材料吐出に伴うフィラメント幅方向の材料流動によって、フィラメント幅方向の内部空隙の伸長を促進する。
- 3 材料吐出方向の内部空隙について、水中不分離剤を添加した配合では吐出条件に関わらず、内部空隙は圧潰する。一方で、高性能 AE 減水剤を添加したとき、投影径を指標としたとき、内部空隙は材料吐出方向に圧潰せず、伸長した結果を示す。
- 4 高性能 AE 減水剤を添加した配合は、材料吐出方向に圧潰していないような投影径を有する内部空隙が認められるが、これは、複数の内部空隙が合体に起因する。これは、高性能 AE 減水剤を用いた配合では、連行された安定的な微小気泡が吐出プロセスによってフレッシュコンクリート内部を移動および接近したことで、複数空隙の合体を生じるためである。一方で、水中不分離剤を添加した配合において連行される気泡は個々に変形する。
- 5 高性能 AE 減水剤を添加した配合における内部空隙は、圧付けながらノズル直下領域に対して多量の材料を吐出する条件において、内部空隙の合体による不規則な形状への幾何学的変化をより顕著に示す。
- 6 吐出条件に応じて内部空隙構造のトポロジーは変化し、Layer pressing 条件では、ROI 抽出位置によらない安定的な内部空隙構造が形成される。

第5章 弾性波トモグラフィ法を用いた3DP コンクリート内部の残存空隙検出

5.1. はじめに

本章では、3DP コンクリートにおける硬化後の内部品質検査手法として、非破壊検査手法の一つである弾性波トモグラフィ法の適用可能性を検討する。はじめに、3DP コンクリートにおける品質管理 (Quality control) について、先行研究における枠組みと具体的な手法を整理し、時間軸を考慮した視点を加えることで、弾性波トモグラフィ法の位置づけを明確にする。

3DP コンクリートにおいては、従来の型枠への流込み施工と異なり、型枠を使用せず三次元空間内に材料を吐出し堆積させることで造形する。これにより、吐出された材料は吐出直後から外気に曝され、温度および湿度などの環境条件の影響を受けるとともに、自重や上層の積層荷重によって変形および劣化することが考えられる。加えて、吐出積層による造形プロセスは、単純形状の型枠への流込みと比較して、様々な造形条件に敏感であると考えられる。造形の最終目標物は、環境条件および造形条件に対し不安定な造形プロセスの影響を受けるため、高品質な造形プロセスによって、高品質な構造物を造形する必要がある。こうした背景から、3DP コンクリートにおける品質管理手法は、造形前のフレッシュ性状および造形途中のリアルタイムモニタリングによって適切に Process control を行う必要がある[16,21,55,57,204,205]。

文献[57]では、これらのフレッシュ性状および造形プロセス中におけるモニタリング手法に対して、三つの観点から分類している。

第一に、破壊検査手法と非破壊検査手法の分類である。本来これらは、計測対象を破壊して物性を直接取得するか、非破壊で計測可能かに基づき分類される。破壊検査では、直接的に物性値を取得できる一方で、一度の検査によってサンプルは破壊するため、経時的な物性値の変化を計測することはできない。しかしながら、文献[57]では、時間依存的な材料特性を有するコンクリート材料に対して、Slow cone penetration 試験[206]等の継続的に材料特性の変化を計測可能な検査手法は、非破壊検査として分類していることに注意を要する。

第二に、実際の造形条件と異なる条件下において計測を行うことに起因する誤差により分類される。これを系統誤差の大小としており、系統誤差の大小では、造形物そのものとは異なり、計測用の代表的なサンプルを使用する場合や、実際の吐出および積層を再現しない計測ほど大きくなる概念である。

第三に、計測と造形プロセスの関係である。計測と造形プロセスの関係は、Off-line モニタリング、On-line モニタリング、In-line モニタリング、および In-situ モニタリングに分類される[55,57]。これらの分類は、表-5.1 にまとめるように、計測が造形プロセス外で実施されるか (Off-line)、造形プロセスを使用するか (On-line、In-line、In-situ) に基づき大きく分類される。また、計測対象が最終的なオブジェクトとして残されない (On-line) 場合と、残される場合 (In-line、In-situ) に分類される。最後に、計測対象がプロセスそのものであるか (In-line)、造形したオブジェクトであるか (In-situ)、により分類される。表-5.1 について、In-situ モニタリングにおける造形プロセスの使用は「Yes (No)」としている。これは、後述するように、文献中では造形前および造形中のモニタリングを対象としているため「Yes」であるが、本章では、造形後のモニタリングを含み、造形後はプロセスを使用しないことから「No」とした。上述の基準に基づく文献[57]におけるモニタリング手法分類図を図-5.1 に示す。

表-5.1 モニタリング手法の分類

Classification	Use of process	Retained in final object	Measured target
Off-line	No	No	-
On-line	Yes	No	-
In-line	Yes	Yes	Process itself
In-situ	Yes (No)	Yes	Final object itself

このとき、文献[57]におけるモニタリング手法の検討は、フレッシュ材料および造形プロセス中の手法を主に検討しており、造形後の3DP コンクリートの品質管理に関する手法の検討がされていない。すなわち、図-5.1における造形前と造形中のモニタリング手法分類に対して、3D プリンティング技術の実用化を考慮すると、練混ぜから硬化後、および長期の供用期間に亘って、網羅的に品質管理をする必要がある。したがって、従来の分類に対して、(1) 練混ぜから材料圧送までの造形前 (Before printing)、(2) 圧送、吐出、および積層を含む造形中 (During printing)、(3) 水和反応が進行し硬化した造形後 (After printing) の3つのフェーズに分け、時間軸を加味した適切な品質管理手法の選定が不可欠である。

図-5.2に、先行研究で見られる主なモニタリング手法に対して、時間軸と計測分類 (Off-line、On-line、In-line、In-situ) を統合したモニタリング手法のマッピングを示す。ここで、一度の計測で計測対象を損なう破壊検査を赤で示し、一度の計測で破壊せず継続的な計測が可能な非破壊検査を青で示す。

(1) 練混ぜから材料圧送までの造形前 (Before printing)

この段階では、主にOff-lineモニタリングによって、材料単体のフレッシュ性状を評価する事例が多い。従来の流込みコンクリートに対するスランプ試験[17,18]やフロー試験[110]が同様に実施され、ベーンせん断試験[207]、レオメータを用いたレオロジー性状の定量評価[20,24,25]が例として挙げられる。これらは、破壊試験として実施され、基本的な材料特性を報告するとともに、造形プロセスにおいて安定して供給や吐出可能であることをスクリーニングする役割を果たすと考えられる。また、非破壊検査としては、練混ぜからの経過時間に伴う超音波速度の変化から、強度発現を推定する手法[208]が報告されている。

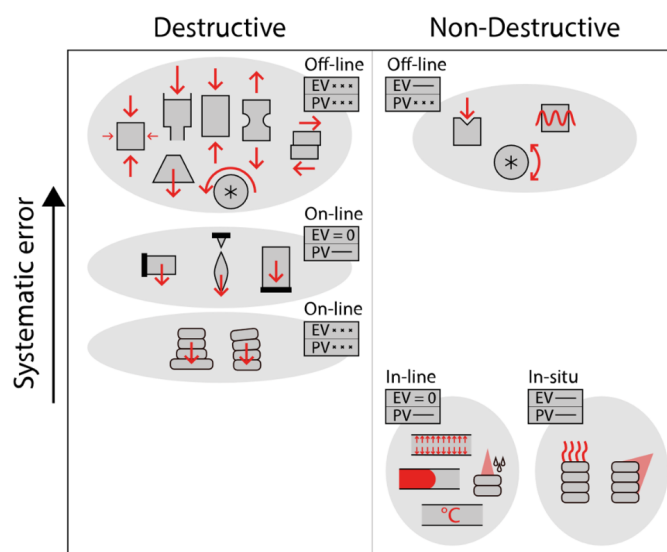


図-5.1 造形前および造形中のモニタリング手法分類（文献[57]から抜粋）

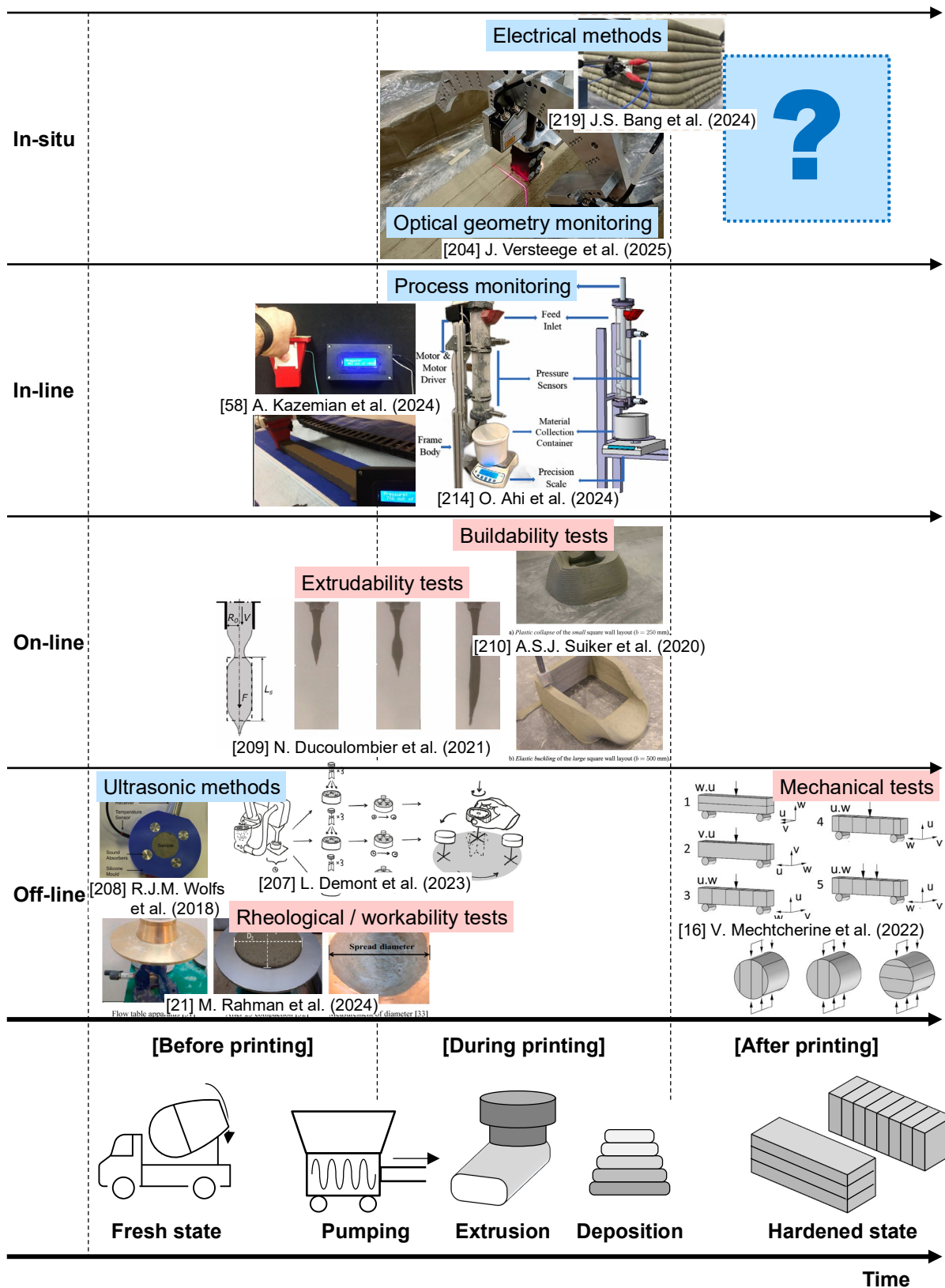


図-5.2 時間軸を考慮した品質管理手法の分類（各手法に関する図は文献[16,21,58,204,207–210,214,219]より抜粋）

(2) 圧送、吐出、および積層を含む造形中 (During printing)

造形プロセスが開始されると、文献[55,57]で報告されているように、計測対象と造形プロセスとの相互関係から On-line、In-line、および In-situ モニタリングの例が見られる。

On-line モニタリングでは、造形プロセスを実際に使用して、安定した吐出を評価する **Slugs test** [209] や、トライアル試験として限界の積層可能高さを評価する **Buildability test** の例[210,211]が見られる。加えて、この段階においては、吐出材料はホースおよびノズル内部を圧送される際のせん断履歴[20,127]を有しており、造形前の性状と変化している可能性がある[212]。そのため、吐出材料に対する貫入試験により、吐出後材料のフレッシュ性状を評価しようとする例[213]も報告されている。

In-line モニタリングでは、造形プロセスそのものをモニタリングするため、圧送時のポンプ圧力や流量計による材料吐出量のモニタリング[58,214]が見られる。これらは、後述する造形中の **In-situ** モニタリングによって得られたオブジェクトに関する情報に基づき、フィードバック制御することで調整されることがあり、適切にフィードバック制御されているか、モニタリングする目的がある。

In-situ モニタリングでは、造形中のオブジェクトそのものを計測対象とするため、ノズル近傍に設置されたレーザープロファイラを用いて、吐出直後のフィラメントの表面プロファイルの取得[204,205,215,216]などが報告されている。同様に、ノズル近傍に取り付けられたカメラによって、リアルタイムで造形をモニタリング[217,218]し、不連続吐出等の欠陥をフィードバックする例が見られる。これにより、次層積層において欠陥を充填する過剰吐出を行うことが考えられる。造形中の **In-situ** モニタリングおよび取得データに基づくフィードバック制御は、現在の3DP コンクリートにおける品質管理 (Quality control) における主流となっている[16,55,57,58]。その他に、電気的手法を用いて積層界面をモニタリングした例[219]や、赤外線サーモグラフィによる表面温度の変化をモニタリングした例[220,221]が報告されている。

(3) 水和反応が進行し硬化した造形後 (After printing)

造形後のフェーズでは、最終的な構造物としての品質および性能の保証が求められる。これまで、造形後の段階におけるモニタリングでは、硬化した3DP コンクリートからコア採取および切出しによって採取した供試体に対して、圧縮、引張、曲げ、せん断等の力学特性を評価する **Off-line** モニタリングの破壊試験[16,222,223]が一般的である。非破壊検査手法の適用例は、研究開発を目的とした3DP コンクリートの内部構造の可視化のためのX線CT法の適用が多い[33,34,36,224]。

しかしながら、前述の造形中の **In-situ** や **In-line** におけるリアルタイムモニタリングは、実験室内における理想条件下での適用に留まっており、不確定要素が多数関係する実環境下における実用可能性には、未だ課題を残している。加えて、造形中の厳格な品質管理を行ったとしても、造形中の偶発的な不連続吐出に伴う欠陥の導入[1]や、低 W/C 配合の使用に起因する乾燥収縮ひび割れ[225,226]等の初期欠陥を完全に排除することは困難である。これらの造形中に発生する内部の欠陥は、第2章で検討した残存空隙と同様に、応力集中箇所となり、脆弱部として構造物の耐荷性能や耐久性に影響を及ぼすと考えられる[59,84]。

したがって、造形後の硬化した3DP コンクリートに対する非破壊検査手法、特に、図-5.2 中右上に対応する造形物そのものを計測対象とする **In-situ** モニタリング手法を確立することは、3DP コンクリートの実施工事例増加において、喫緊の課題である。

以上の背景から本章では、実構造物への高い適用可能性を有し、内部品質のモニタリング手法として流込みコンクリート構造物に多く適用される弾性波トモグラフィ法[227-229]を適用した。特に、残存空隙

の発生は、3DP コンクリートの内部欠陥の代表例であり、第 2 章で示したように、破壊挙動において脆弱部となるため、その発生を検出することは重要である。そのため、残存空隙の検出を対象として、弾性波トモグラフィ法の適用可能性を検討した。加えて、供用期間中の応力作用に起因するひび割れ発生を想定し、力学的作用による劣化の進行をモニタリングすることを目的として、圧縮載荷サイクルに伴うひび割れの進展を弾性波トモグラフィ法によりモニタリングした。

5.2. 実験概要

5.2.1. 3DP コンクリートの作製

本章で使用した配合を表-5.2 に示す。使用材料には、普通ポルトランドセメントとシリカフュームを予め所定の割合で混合したプレミックス粉体を結合材 (B) として使用した。細骨材 (S) には、珪砂 (F.M. : 1.66、2.58g/cm³) を使用した。W/B は 20% とし、良好な吐出性と積層性を両立するために、ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤 (SP) を 1.6 (mass% to B) 添加した。フレッシュ性状として、練上がり直後のモルタルの 15 打フロー値は 154mm であった。また、同一の材料および配合により、直径 50mm 高さ 100mm の型枠を使用して作製した円柱供試体の材齢 28 日における圧縮強度は、105N/mm²であることを確認した。

表-5.2 配合表

W/B (%)	Water (kg/m ³)	Binder (kg/m ³)	Silica sand (kg/m ³)	SP (mass% to B)
20	217	1085	1085	1.6

本章では、第 2 章における 3DP コンクリート造形に使用したカートリッジ方式の 3D プリンタ (図-5.3 参照) によって、3DP コンクリートを造形した。すなわち、内径 77mm のカートリッジ内部に練上がり直後の材料を充填し、プリンタ装置に取り付けた。その後、ピストンの押下によって材料をノズルから吐出した。ノズル移動においては CNC 制御とし、事前に作成したノズル移動経路および材料吐出量を規定した G-code に基づきノズル移動を制御した。また、直径 16mm の円形ノズルを使用し、層厚を 10mm、ノズル移動速度を 25mm/s に設定した。

使用した 3D プリンタにおいては、カートリッジに充填したフレッシュモルタルをピストンの押下により押し出すことで材料吐出を行う。すなわち、材料の吐出量はピストンの押下量により規定されている。このとき、ノズル移動経路およびピストン押下量を規定する G-code においては、図-5.4 に示すように、ノズル直下領域に繰り出される材料吐出量 V_{out} は、カートリッジ内部でピストンにより押下されるフィラメント量とノズル先端から吐出されるフィラメント量が等しいことから、式 [5.1] により規定される。

$$V_{out} = E \cdot \frac{\pi D^2}{4} = whL$$

$$\therefore E = \frac{4whL}{\pi D^2} \quad [5.1]$$

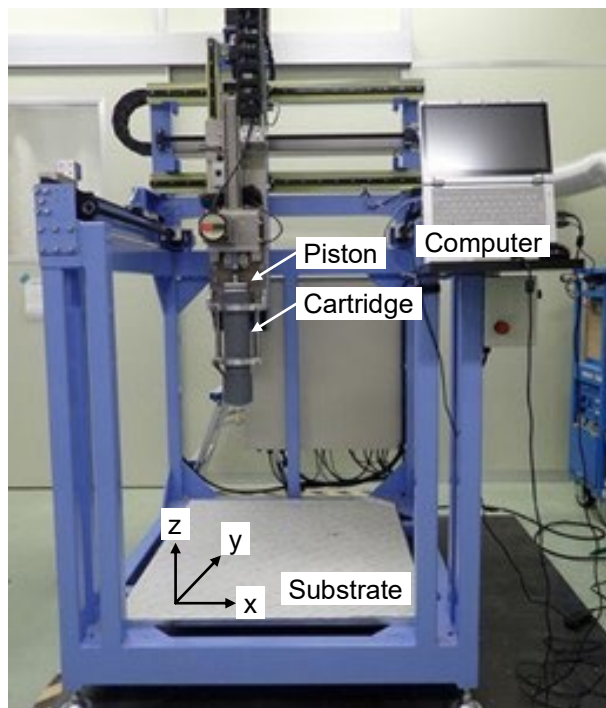


図-5.3 ガントリー式 3D プリンタ装置

ここで、 E ：単位時間当たりのピストン押下量（mm/s）、 D ：カートリッジの内径（mm）、 w ：フィラメント射出幅（mm）、 h ：層厚（mm）、および L ：単位時間当たりのビード長、すなわちノズル移動速度（mm/s）である。

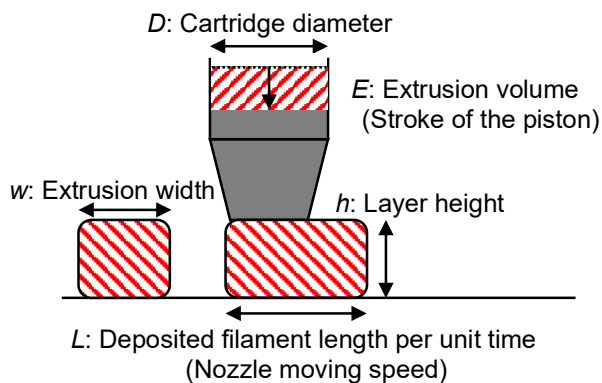


図-5.4 積層パラメータによる吐出量計算

本章で使用した 3D プリンタでは、カートリッジの内径 $D=77\text{mm}$ のため、算出される吐出量（単位時間当たりのピストン押下量）は、式 [5.2] により計算される。

$$E = \frac{4whL}{\pi D^2}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{4 \times 16 \times 10 \times 25}{\pi \times 77^2} \\
 &= 0.859 \text{ [mm/s]} \quad [5.2]
 \end{aligned}$$

このとき、吐出量を変化させることで、3DP コンクリート内部に形成される残存空隙の発生を変化させ、内部品質が異なる 3DP コンクリートを造形した。すなわち、ノズル直下領域に対する材料吐出量を多くする過剰吐出 (Over-extrusion) 条件によって、残存空隙が発生する部分を多量の吐出材料によって充填した。式 [5.2] により算出されたピストン押下量を基準条件 ev1.0 として、1.2 倍および 1.5 倍の材料を吐出した ev1.2 および ev1.5 供試体を作製した。図-5.5 に各供試体における吐出量の概要を示す。ここで、ev1.2 および ev1.5 の供試体におけるそれぞれのピストン押下量は、1.031mm/s および 1.288mm/s であった。不連続な吐出に基づく 3DP コンクリート内部の粗大な空隙は、実験的に再現することは困難であるが、残存空隙と同様に 3DP コンクリート内部に発生する空気部分であるため、残存空隙の検出が可能であれば、不連続な吐出に起因する空隙の発生も検出可能である。

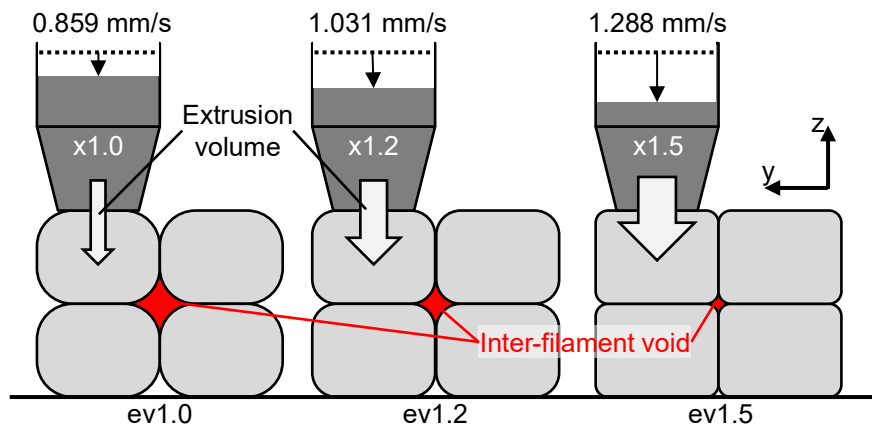


図-5.5 over-extrusion 条件による内部構造の制御

以上のような積層パラメータ選定によって、3DP コンクリート内部の構造を変化させた。第2章で言及したように、3DP コンクリート内部の残存空隙等による粗大な空隙の発生は、力学挙動にとって重要な要素である。すなわち、内部構造の密実性は 3DP コンクリートの積層品質であると考えられ、これらを非破壊で検出する手法の確立は不可欠である。上述の積層パラメータによって、 $400 \times 112 \times 100 \text{ mm}^3$ (長さ×幅×高さ) の直方体供試体を造形し、吐出が安定していると考えられるスパン中央付近から長さ 100mm を切出すことで、 $100 \times 112 \times 100 \text{ mm}^3$ の供試体を取得した。

5.2.2. 弾性波トモグラフィ法

固体材料内部を弾性波が伝搬するとき、均質と考えられる領域では弾性波は発信点から受信点まで最短距離を一直線に伝搬すると考えるのが妥当である。一方で、発信点と受信点の間に空隙やひび割れ等の欠陥部が存在するとき、弾性波はそれらの欠陥部を迂回して伝搬することになる。そのため、発信点および受信点の間に欠陥が存在するときには、健全部より弾性波の到達時刻は遅くなる。これらの性質を利用

することにより、弾性波トモグラフィ法では、対象領域の弾性波速度分布を得ることにより、対象領域の欠陥部を検出することが可能である[227-231]。弾性波の入力に簡便な鋼球打撃を用いることで、弾性波の伝搬速度からコンクリート構造物における内部構造の健全性を容易に検査することができ、注入材による補修効果の経時的変化の評価[228]、大型構造物の初期欠陥の検出[228]等への適用事例が見られ、In-situ で造形物の内部構造評価が可能である。

弾性波トモグラフィ法により、コンクリート構造物の対象領域における弾性波速度分布を算出するフローを図-5.6に示す。トモグラフィによる解析を行うため、入力値には、理論値としてセンサ間の弾性波伝搬時間を算出するためのセンサ配置および対象領域のセル分割を必要とする。加えて、実際の観測値として弾性波入力時刻と各センサに到達するまでの弾性波到達時刻の差から弾性波伝搬時間を入力する。これにより、理論値と観測値の残差が最小となるために、各セルにおける物理量を更新する逆解析を行う。

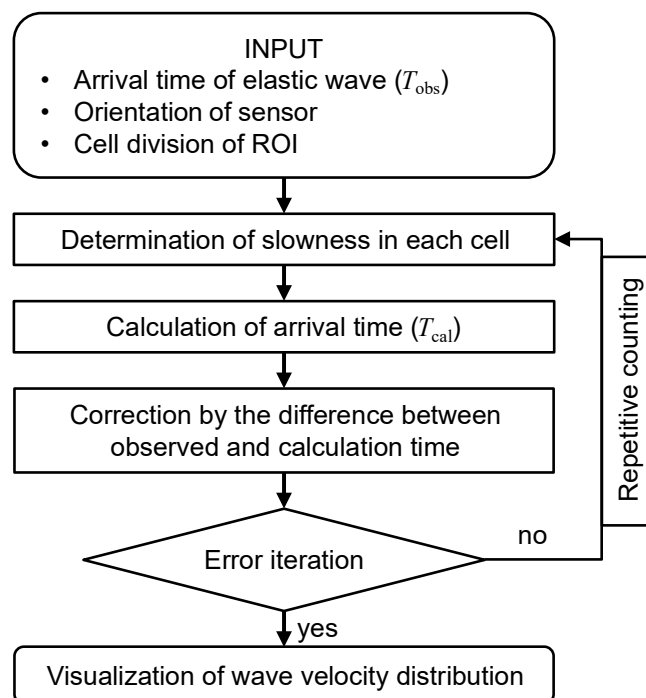


図-5.6 弾性波トモグラフィ法における解析フロー

本章では、図-5.7(a)に示すように、軸方向に直交する断面を対象領域として、供試体表面に周波数範囲100～900kHzの広帯域AEセンサ（MISTRAS WsA）を貼付した。異なる周波数の弾性波を入力することを目的として、鋼球径 $d_{steel}=6.10$ および19.15mmの2種類の鋼球を使用し、対象領域表面を打撃することによって弾性波を入力した。鋼球打撃においては、使用する鋼球径によって異なる周波数特性を有する弾性波が励起される[232]。このとき、それぞれの鋼球径により励起された弾性波の理論的な周波数は、 $d_{steel}=6.10\text{mm}$ のとき47.7kHzであり、 $d_{steel}=19.15\text{mm}$ のとき15.2kHzであった[232,233]。

はじめに、AEセンサをx方向に8個貼付し（CH1～CH8）、各センサ近傍を鋼球で打撃し、対面に貼付した4つのAEセンサにおける弾性波到達時刻を取得した。その後、y方向にAEセンサを貼付し（CH9～CH16）、同様の操作を行った。以上より、弾性波の波線経路は図-5.7(b)に示すようになり、すべてのセ

ルに波線が通過するように、対象領域を 6×7 の領域にセル分割を行った。

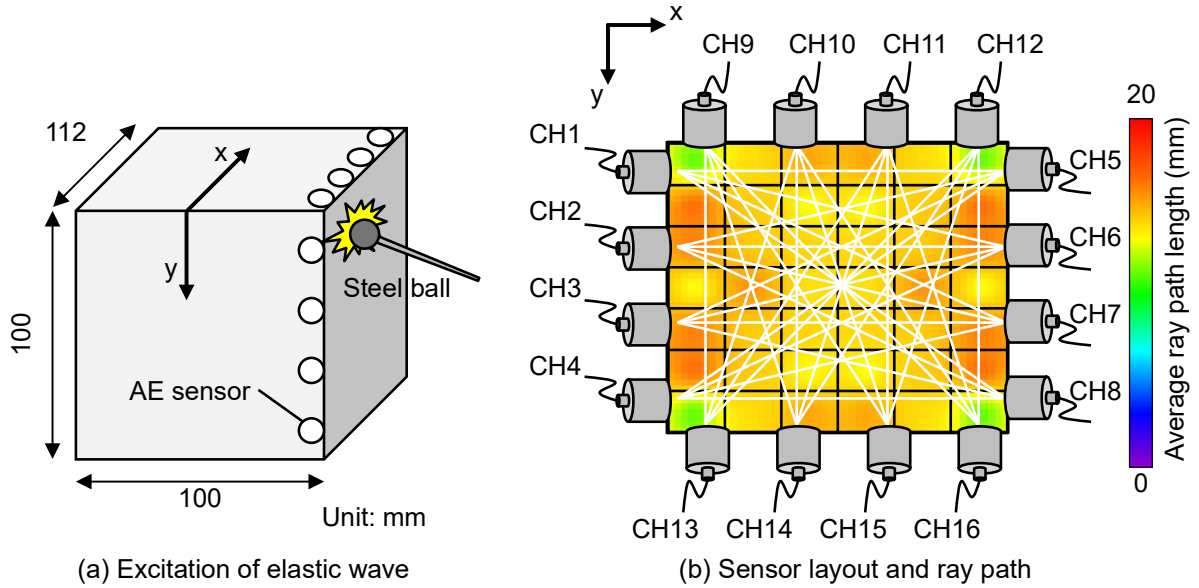


図-5.7 弾性波トモグラフィ法の様子 (a) 鋼球打撃による弾性波励起 (b) 対象領域における波線経路とセル分割

次に、発信センサおよび受信センサにおける弾性波到達時刻を読み取り、その差から弾性波伝搬時間を算出した。このとき、弾性波の到達時刻を高精度に特定するために、各センサにおける弾性波の立ち上がり時間の検出が重要である。先行研究では、赤池情報量規準 (Akaike's Information Criterion : AIC) を用いることにより、高精度に弾性波の立ち上がり時刻を読み取ることができると報告しており[228,234]、AE法の位置標定においてもその利用が報告されている[235]。AICはモデルの適合度を評価する指標であり、波形データにおいては、ある時間を境に二つの区間に分割したとき、それぞれの区間の自己回帰モデルの適合性を算出する[236]。すなわち、初動前のノイズ区間と初動後の信号区間では、異なるモデルに従うと仮定でき、分割点を時系列に沿って走査しながら、各区間におけるモデルの適合度を算出する。真の立ち上がり時刻において信号を分割したとき、AICは最小の値をとることから、AICが最小になる時刻を特定することで、波形の立ち上がり時刻として取得することができる[237,238]。実際の算出においては、分割された各区間の分散を計算することにより、式 [5.3] を用いて任意の時刻 $t=k$ における $AIC(k)$ を計算した[228,239]。

$$AIC(k) = k \log\{var(X[1, k])\} + (N - k - 1) \log\{var(X[k + 1, N])\} \quad [5.3]$$

ここで、 X_i : 時刻 i における振幅値 ($i=1, 2, \dots, N$)、 N : サンプル数、 $var(X[1, k])$: 波形振幅値 $X_1 \sim X_k$ までの分散、および $var(X[k+1, N])$: 波形振幅値 $X_{k+1} \sim X_N$ までの分散である。

これにより計算された $AIC(k)$ に対して、 $AIC(k)$ が最小となる $t=k$ を弾性波到達時刻として取得した。発信センサおよび受信センサにおいて算出された各到達時刻より、センサ間の弾性波伝搬時間の実測値 T_{obs} は、次の式 [5.4] により算出される。

$$T_{obs} = t_o - t_s \quad [5.4]$$

ここで、 t_s ：発信センサにおける到達時刻、および t_o ：受信センサにおける到達時刻である。

次に各センサ配置、セル分割および各セルの物理量から弾性波伝搬時間の理論値を算出した。図-5.8 に示すように、弾性波トモグラフィ法では、各セルの物理量として初期パラメータに速度の逆数で表されるスローネスを与える。

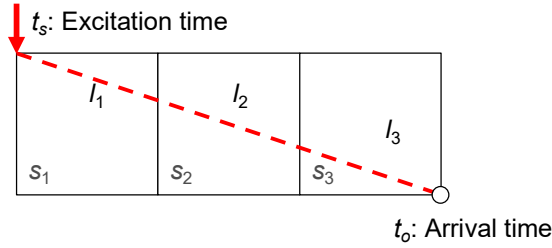


図-5.8 セル分割と波線経路

これにより、各センサ間の弾性波伝搬時間の理論値 T_{cal} は、各セルを横切る波線長と各セルのスローネスから、式 [5.5] により計算される。

$$T_{cal} = \sum_j s_j l_j \quad [5.5]$$

ここで、 s_j ：セル j におけるスローネス、および l_j ：セル j を横切る波線長である。

以上より、各センサ間の弾性波伝搬時間の理論値 T_{cal} と実測値の T_{obs} の残差 ΔT は、式 [5.6] により計算される。

$$\Delta T = T_{obs} - T_{cal} \quad [5.6]$$

その後、各波線経路で得られる弾性波伝搬時間の実測値と理論値の残差を最小化するために、各要素のスローネスを更新する繰り返し計算を行う。このとき、各セルにおけるスローネスの補正量 Δs_j および各セルの補正後のスローネス s'_j は、それぞれ式 [5.7] および式 [5.8] により計算される。

$$\Delta s_j = \sum_i \frac{\Delta T_i l_{ij}}{L_i} / \sum_i l_{ij} \quad [5.7]$$

$$s'_j = s_j + \Delta s_j \quad [5.8]$$

ここで、 L_i ：波線 i の全長、 ΔT_i ：波線 i に関する実測値と理論値の残差、および l_{ij} ：波線 i がセル j を横切るときの波線長である。

これらのスローネス更新のための繰返し計算によって、各セルのスローネスを算出した。スローネスは弾性波速度の逆数として表されるため、以上の手順により、対象領域における弾性波速度分布を取得することができる。

5.2.3. 繰返し圧縮载荷およびデジタル画像相関法（DIC）

3DP コンクリート内部に発生する残存空隙の検出に加えて、力学作用により劣化した3DP コンクリート構造物の破壊進行を評価するために、圧縮応力を繰返し作用させたときの弾性波速度分布を得た。本実験においては、鋼球径 $d_{\text{steel}}=6.10\text{mm}$ のみを弾性波励起に使用した。加えて、図-5.9 に示すように、载荷条件のため供試体上下方向（ y 方向）にセンサを配置できない。そのため、 x 方向のみにセンサを配置し、弾性波トモグラフィ法を行った。

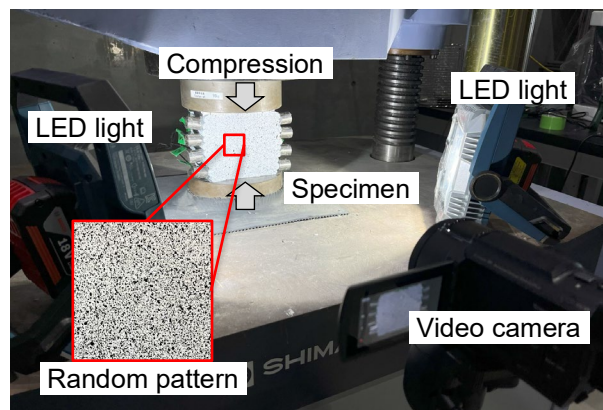


図-5.9 圧縮载荷試験の様子

図-5.10 に圧縮载荷サイクルを示す。0.4N/mm²/min の荷重制御により、3 段階に分けて圧縮载荷を行った。同一寸法の供試体に対して、1 サイクルで圧縮破壊したときの破壊荷重を予備試験により取得した。この破壊荷重に対して、30%および 60%に相当する荷重を目標に载荷を中断し、除荷後、弾性波トモグラフィ法を実施した。図-5.10 に示すように、実際に载荷を中断した荷重は、3 サイクル終了時の破壊荷重

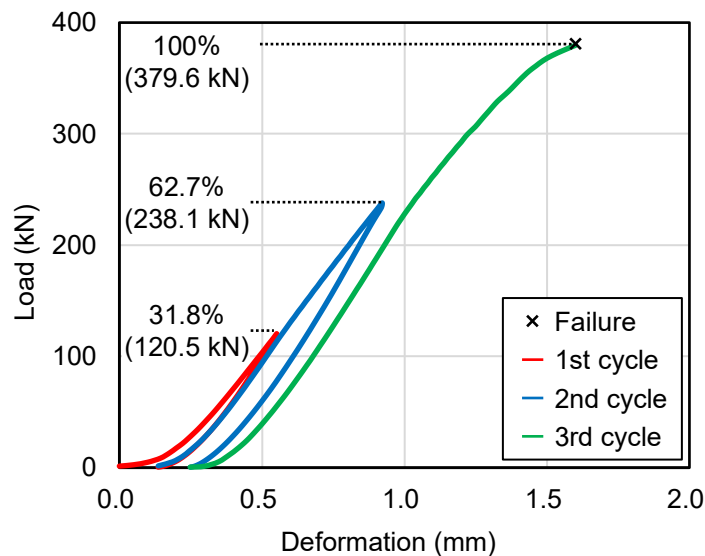


図-5.10 圧縮载荷サイクル

$P_{\max}=379.6\text{kN}$ に対して、1 サイクル目で 31.8% (120.5kN) であり、2 サイクル目では 62.7% (238.1kN) であった。

また、図-5.9 に示すように、対象領域とした供試体表面にランダムパターンを塗布し、載荷試験中にビデオカメラを用いて撮影することで、デジタル画像相関法 (DIC) を適用した。カメラレンズと供試体表面の距離を約 80cm とし、撮影速度 60fps により撮影した。DIC における表面ひずみ解析は GOM Correlate により行い、圧縮載荷サイクルの進行に伴う対象領域における表面ひずみ分布を評価した。

5.3. 実験結果

5.3.1. 対象領域の表面画像による残存空隙の発生の観察

図-5.11 に ev1.0、ev1.2 および ev1.5 における対象領域の表面画像および二値化処理に基づく空隙抽出画像を示す。図-5.11 下段の二値化画像における黄色実線は、供試体領域を示している。

図-5.11(a)に示すように、ノズル直下領域に一致する材料を吐出した ev1.0 では、整列するフィラメントが確認でき、フィラメント間に残存空隙が発生している。このとき、吐出されたフィラメントは、自重および上層の積層により変形することが考えられ、供試体下部ほど、上層積層に伴う変形により残存空隙を埋めることが考えられる。しかしながら、実際に本章で造形した 3DP コンクリートでは、残存空隙は供試体下部において集中的に発生している。先行研究においては、使用材料および 3D プリンタ装置に依存するものの、フレッシュ性状においては、15 打のモルタルフロー値が 150~190mm 以内であることが望ましいという報告がなされている[20,21,24,25]。本研究においては 154mm と目標範囲に収まっており、

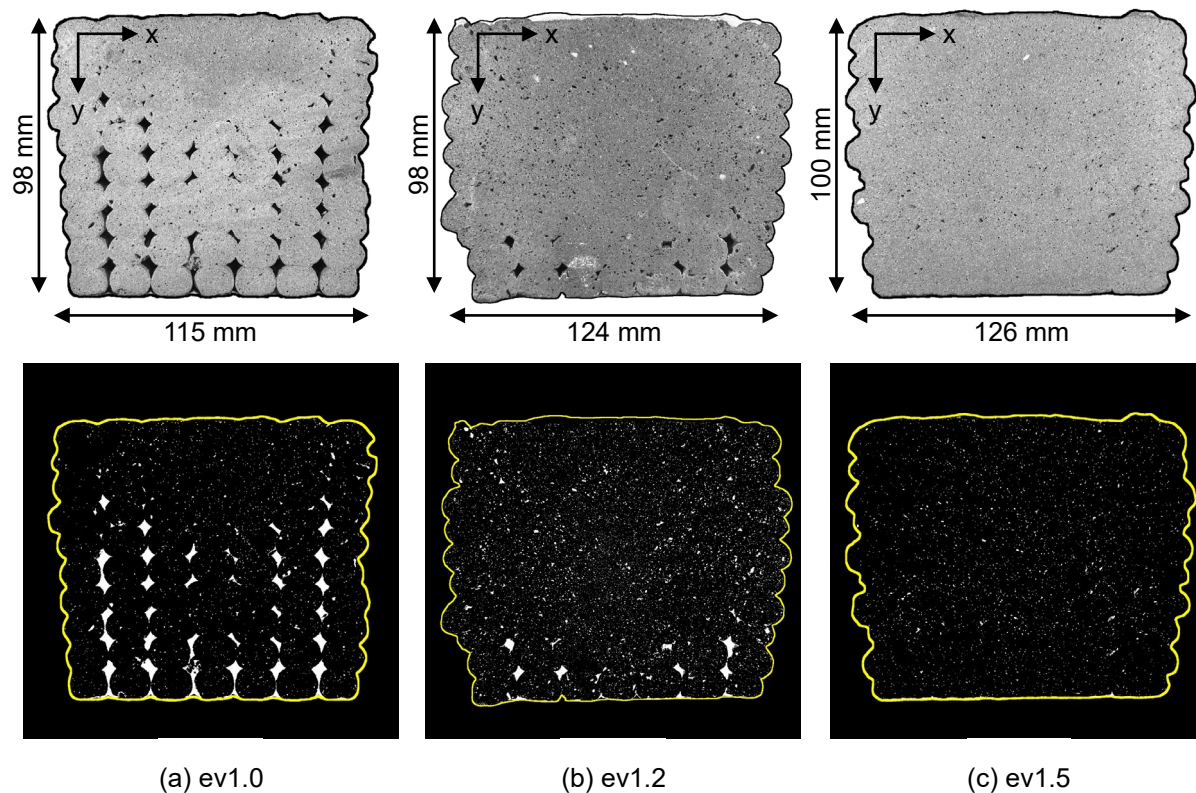


図-5.11 対象領域の表面画像（上段：表面画像、下段：空気部分の二値画像）(a) ev1.0 (b) ev1.2 (c) ev1.5

閉塞せずに連続的な吐出および積層造形が可能であった。しかしながら、目安内であるものの本研究で利用した材料のフレッシュ性状においては、粘性および形状保持性が比較的高く、その結果、下層におけるフィラメント自重および上層载荷に伴う変形は小さかったと考えられる。このため、下層積層において吐出されたフィラメントはほとんど積層せず、設定した層厚より大きかったことが考えられる。これにより、上層になるほどノズル先端と直下のフィラメント表面の距離が設定した層厚以下になり、材料は圧付けられながら吐出された。以上により、残存空隙は供試体下部に集中して配置され、上部領域では比較的フィラメント間に空隙が残存せず、残存空隙の発生がほとんど認められなかったと理解できる。

ピストンの押下量により制御された材料吐出量を ev1.0 に対して、1.2 倍にした ev1.2 では、上述の理由で供試体下部に一部残存空隙が発生している。しかしながら、残存空隙の発生は供試体下部の2～3層程度に限定されており、ev1.0 より密実な内部構造が形成されているといえる。同様に、吐出量を1.5倍した ev1.5 では、残存空隙はほとんど発生しておらず、密実な内部構造が発生している。これにより、吐出量を増加させた Over-extrusion 条件によって、3DP コンクリート内部の密実性を向上させることが分かった。これにより、残存空隙が発生している ev1.0 と比較して、ev1.2 および ev1.5 は内部の積層品質が高いといえる。以降の節では、Over-extrusion 条件による内部構造の積層品質を弾性波トモグラフィ法で評価した。

5.3.2. 弾性波トモグラフィ法により算出した弾性波速度分布

図-5.12 に ev1.0、ev1.2 および ev1.5 における弾性波励起に使用した鋼球径ごとの弾性波速度分布を示す。弾性波速度分布は、弾性波速度が低い領域を赤く、高い領域を青く示している。すなわち、健全部を青く示し、欠陥部を赤く示すことで欠陥を検出している。超音波伝搬速度に基づくコンクリートの品質区分表[240]から、「excellent」と判定される 4500m/s と「very poor」と判定される 2000m/s を用いて、弾性波速度分布を可視化した。

図-5.12 に示すように、ev1.0 では、低速度領域が対象領域に広く分布している一方で、ev1.2 および ev1.5 では、低速度領域の分布は限定的である。加えて、図-5.11 において残存空隙の発生が顕著に観察された供試体下部において、低速度領域が集中して分布している。残存空隙が発生している供試体下部における低速度領域の分布は、ev1.2 においても同様の傾向が確認できる。これにより、吐出量によって変化させた 3DP コンクリートの内部構造、すなわち残存空隙の発生を弾性波トモグラフィ法によって検出可能であることが分かった。

ここで、ev1.0、ev1.2、および ev1.5 のすべての 3DP コンクリートにおいて、CH2 と CH3 ならびに CH6 と CH7 の中間付近に局所的な低速度領域が発生している。これは、CH1～8 のセンサを貼付した供試体表面は積層によって凹凸を有した表面であるが、対象領域は矩形断面を仮定して計算した結果、該当部分に計算誤差が集中したためであると考えられる。加えて、図-5.7 に示すように、当該セルにおいては対象領域の外縁部分に位置するため、波線本数が比較的小さい。以上によって、計算誤差の局所化が発生したと考えられ、解析における表面凹凸の考慮および対象領域サイズとセンサ配置の最適化は今後の課題の一つである。しかしながら、残存空隙の発生および空間配置を適切に可視化することができており、弾性波トモグラフィ法による内部積層品質の評価は有用である。

入力する弾性波の周波数特性の違いにおいては、ev1.0、ev1.2 および ev1.5 すべてにおいて、低周波数を励起した $d_{\text{steel}}=19.15\text{mm}$ のとき、低速度領域は広範になだらかな分布を示している。弾性波励起に使用

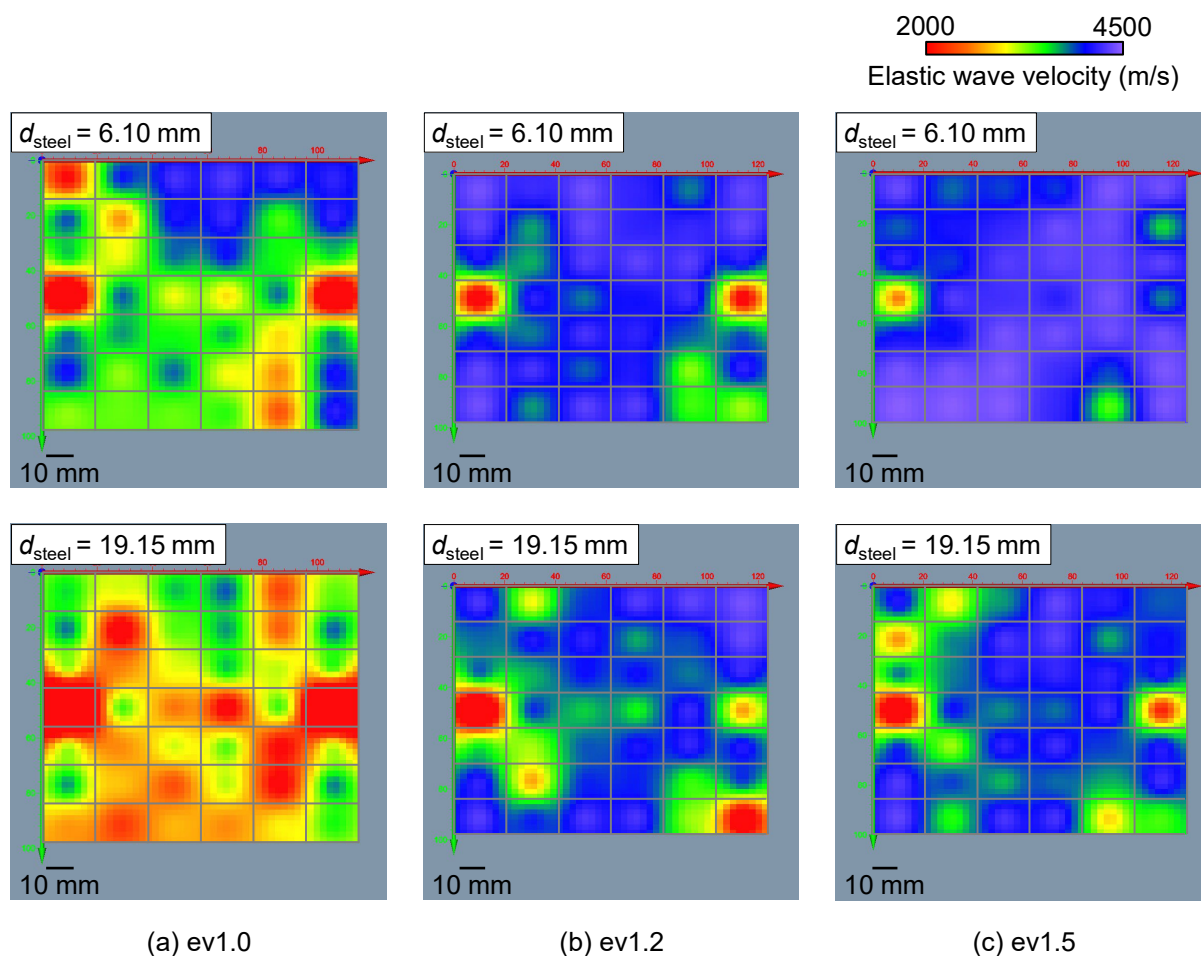


図-5.12 弾性波トモグラフィ法により算出した弾性波速度分布

する鋼球径を変化させたとき、入力される弾性波の波長が異なる。すなわち、鋼球径が大きいとき、入力周波数の波長は長くなる[232]。このとき、弾性波速度分布は個々の残存空隙構造ではなく、対象領域全体の平均的な構造を示すと考えられる。これにより、 $d_{\text{steel}}=19.15\text{mm}$ において低速度領域がなだらかに広く分布したことが理解できる。一方で、比較的高い周波数成分を有する弾性波を入力したとき、個々の残存空隙に対しより敏感であるため、局所的な低速度領域の分布が得られたことが分かる。本章では、簡便な弾性波入力のために、鋼球打撃によって弾性波を励起したが、個々の残存空隙を高分解能で検出するためには、より高周波成分を有する弾性波を入力することになる。しかしながら、高周波数成分は容易に固体材料内部で減衰するため[227,241]、より複雑な波線経路を考慮する必要性が生じ、検査目的とコストの関係から適切に判断することが求められる。

5.3.3. 圧縮荷荷による劣化進行の可視化

図-5.13 に ev1.0 における各圧縮荷荷サイクル（0%、31.8%、62.7%）終了時点の主ひずみ分布と除荷後の弾性波速度分布を示す。

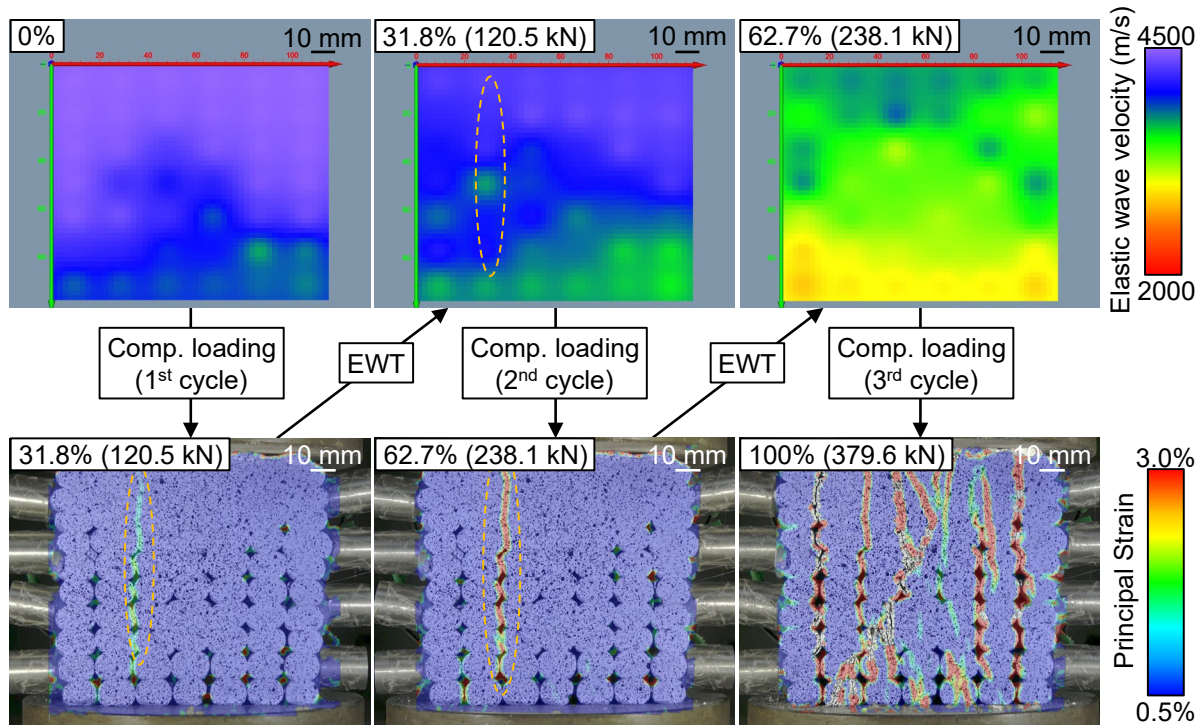


図-5.13 圧縮载荷時の弾性波速度分布および主ひずみ分布（EWT：除荷後の弾性波トモグラフィ法）

図-5.13 左上の载荷前の弾性波速度分布においては、図-5.12(a)に示した $d_{\text{steel}}=6.50\text{mm}$ の弾性波速度分布と異なっている。これは、5.2.3 で言及したように、本節における弾性波トモグラフィ法は、 x 方向のみにセンサを貼付して行っているためであることに注意が必要である。弾性波を取得する AE システムにおけるチャンネル数が 8 個であり、一度に x および y 方向の両方にセンサを貼付できないためである。また、5.3.2 と同様に x 方向の弾性波を計測した後、 y 方向にセンサを貼付しなす場合、センサの添付位置が各载荷サイクルごとに異なり経時的な評価が困難になるため、本節ではセンサの添付は x 方向のみに限定した。

圧縮载荷サイクルの進行に伴って、上下に整列した残存空隙を結ぶようにひび割れが発生し進展している。このとき、図-5.13 左下の 31.8% (120.5kN) まで载荷した 1 サイクル目終了時の主ひずみ分布より、対象領域左側にひずみ局所化領域が確認できる。除荷した後行った弾性波トモグラフィ法に基づく弾性波速度分布では、当該領域に対応する部分に低速度領域が発生していることが分かる。その後、62.7% (238.1kN) まで载荷した 2 サイクル目では、当該領域におけるひずみ局所化領域からひび割れが進展している。これに伴い弾性波速度分布では、低速度領域が対象領域全域にわたって分布している。このとき、局所的な分布ではなく広域的な分布になったのは、上下に整列するように発生した残存空隙を結ぶように、また、対象領域を左右に分断するようにひび割れが進展したためである。すなわち、 x 方向の波線経路に対して垂直にひび割れが発生したため、ほとんどの波線経路で同様に弾性波到達が遅れたことが予想でき、これにより広域的な弾性波速度分布が得られたためである。最後に、100% (379.6kN) まで载荷したとき、対象領域全域にひび割れが発生し破壊に至った。

以上より、弾性波トモグラフィ法によって、3DP コンクリートの力学作用による劣化の進行を弾性波速度分布として可視化できることが分かった。

5.4. 第5章のまとめ

本章では、3DP コンクリートの内部欠陥として発生する残存空隙の検出を目的とし、非破壊検査手法の一つである弾性波トモグラフィ法を適用した。特に、積層パラメータの一つである吐出量を調整することで、3DP コンクリート内部の残存空隙の発生を変化させた供試体を作製した。また、鋼球打撃による弾性波励起において、異なる2種類の鋼球径を使用することで入力弾性波の周波数を変化させた。加えて、上述の初期欠陥検出に加えて、力学作用下の破壊プロセスの進行を評価するために、圧縮载荷サイクルを適用した3DP コンクリートの载荷前後に弾性波トモグラフィ法を適用し、载荷中のDICにより取得した主ひずみ分布画像を比較した。以下に本章により得られた知見を示す。

- 1 吐出量が小さいとき残存空隙が発生し、弾性波トモグラフィ法により算出される弾性波速度分布は、低速度領域、すなわち欠陥部を示す領域が広く分布する。吐出量を大きくすることで、残存空隙の発生を軽減し、3DP コンクリートの内部品質を向上させたとき、弾性波速度分布は、高速度領域が広く分布し健全であることを示す。すなわち、弾性波トモグラフィ法は、3DP コンクリート内部の欠陥である残存空隙の検出に有用である。
- 2 弾性波励起に使用する鋼球径を大きくし低周波数を励起したとき、弾性波速度分布は広範囲に緩やかに分布する。鋼球径を小さくし高周波数の弾性波を励起するとき、弾性波速度分布における低速度領域は局所化する。
- 3 残存空隙を有する3DP コンクリートの圧縮応力下における破壊プロセスの進行において、弾性波速度分布はひび割れ発生位置に対応する低速度領域を示す。また、対象領域全域における破壊の進行を評価することができる。

本章では、簡便な弾性波励起手法として鋼球打撃を行った。本章によって得られた結果から、弾性波トモグラフィ法の適用は、初期欠陥としての残存空隙検出に有用であることが示されたが、今後、発信点および受信点における振幅の減衰を評価する減衰トモグラフィ法等の異なる評価手法を検討することで、硬化後の3DP コンクリートの品質検査手法の体系化を達成する必要がある。

第6章 結論

6.1. 各章における結論

近年、コンクリート工学分野においても研究開発が盛んに行われている 3D プリンティング技術では、吐出積層造形プロセスに起因して吐出材料間の不連続面および特異な空隙構造を示す。すなわち、吐出されたフィラメント同士の接着面に積層界面が形成され、フィラメント間には残存空隙が残置され、フィラメント内部には内部空隙が発生する。3D プリンティング技術では、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ため、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、流込み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になることが期待される。このとき、先行研究においては、フィラメント配向と载荷方向の関係に基づく力学的異方性の存在が認識されつつも、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と破壊挙動に関しての検討は限られている。加えて、造形プロセスに起因する内部空隙の幾何学的変化は、特定条件下で観察されている一方で、積層パラメータとの関係を体系的に検討した例はほとんどない。3DP コンクリートにおける造形プロセスと内部構造、および性能の連関を図-6.1 に示し、本研究により検討した部分を赤字、あるいは赤実線で示す。また、本研究により得られた各章における結論を以下に示す。

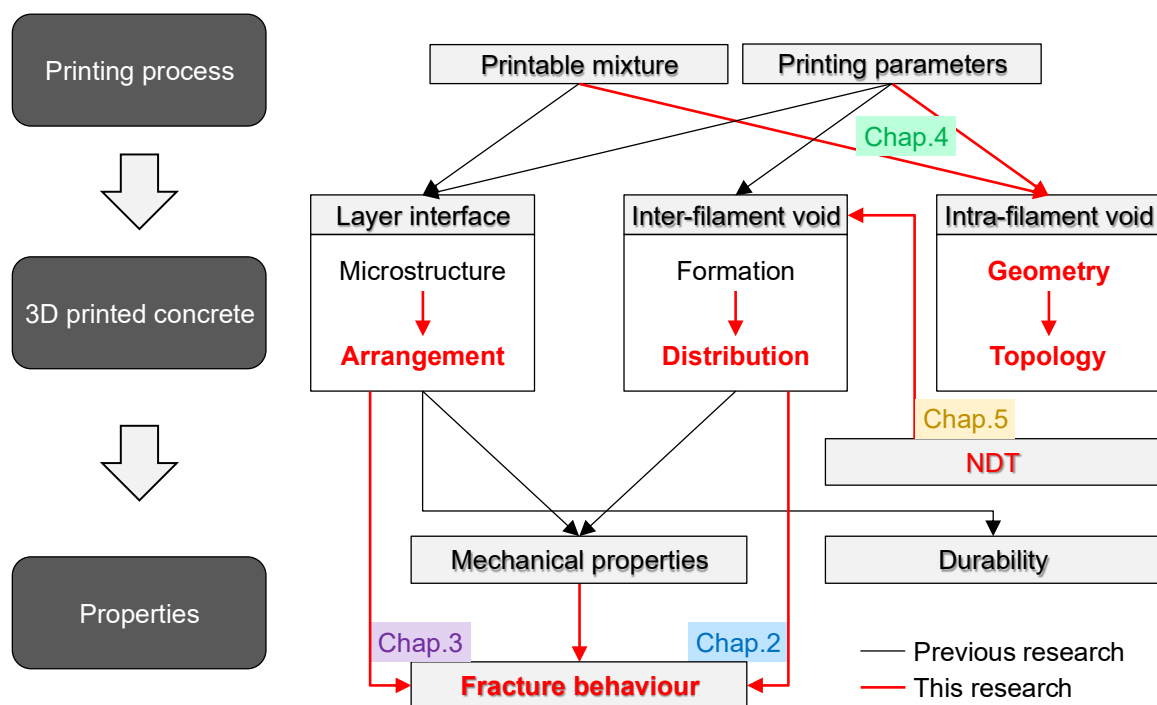


図-6.1 本研究の概観

第2章では、残存空隙が形成される 3DP コンクリートにおける破壊挙動を対象として、造形プロセスにおけるノズル移動経路である積層経路を変化させた 3DP コンクリートを造形し、圧縮および曲げ応力下における破壊挙動を評価した。圧縮試験に供した積層体では、载荷前の X 線 CT 法により、積層経路に伴う残存空隙構造を観察した。また、载荷前後の 3D スキャンデータを用いて、圧縮载荷における変形を面的に評価することで、異方的な破壊挙動を考察した。中央点载荷による三点曲げ試験に供した複数層の

積層体では、長辺方向および短辺方向の積層体に加えて、これらを組み合わせた積層経路を有する積層体を作製した。また、曲げ試験中の積層体表面のランダムパターンを高速度カメラで撮影し、デジタル画像相関法（DIC）を適用することで、ひび割れ発生および進展におけるひずみ分布を可視化した。

- 1 残存空隙構造について、積層経路に基づきすべての層で一方向に積層したとき、残存空隙はフィラメント配向に伴って一方向に整列する。これに対して、直交する二方向に交互に積層したとき、各層におけるフィラメント配向が変化し、格子状の複雑な残存空隙構造が形成される。
- 2 残存空隙構造の変化に伴って、すべての層で一方向に積層したとき、上下に配置された残存空隙を結ぶように内部ひび割れが進展する。直交する二方向に交互に積層したとき、格子状の残存空隙構造による複雑な応力伝達機構によって、内部ひび割れは微細なひび割れが多数発生する。
- 3 圧縮応力下の変形挙動について、すべての層で一方向に積層したとき、ノズル移動方向に垂直な方向、すなわち、隣接するフィラメント界面で割裂する方向に変形量が卓越し、変形の異方性を示す。一方で、直交する二方向に交互に積層したとき、すべての断面で変形の異方性は確認できず、円周方向全体にわたって変形する。
- 4 3層分の高さを有する積層体に対して中央点載荷による三点曲げ試験を行ったとき、流込み供試体の曲げ強度に対して、積層体の曲げ強度は低い値を示す。長辺方向のみに積層した積層体の曲げ強度に対して、短辺方向のみに積層した積層体の曲げ強度は著しく低下する。一部の層を長辺方向に積層した積層体では、短辺方向のみの積層体より高い曲げ強度を示す。
- 5 曲げ応力下の破壊挙動においては、流込み供試体が示す瞬間的な脆性破壊と比較して、積層体は段階的な破壊挙動を示す。長辺方向のみの積層体では、層ごとにひび割れ進展方向が変化する。短辺方向のみの積層体では、残存空隙を結ぶように隣接フィラメント間の積層界面に沿ってひび割れが進展する。長辺方向と短辺方向を混合した積層体では、残存空隙が最下層に配置されたとき、ひび割れ発生の起点になるものの、中間層部分に発生するとき、ひび割れ経路にならず、残存空隙の空間的配置が破壊挙動に影響を及ぼす。

第3章では、残存空隙が発生しない密実に積層された3DPコンクリートを対象とし、力学的異方性における基礎的な破壊形式である Trans-layer 破壊（フィラメントを割裂しながら積層界面に垂直にひび割れが進展する破壊）および Inter-layer 破壊（積層界面において剥離するように積層界面に沿ってひび割れが進展する破壊）を評価した。先行研究において、力学的異方性の構造的要因は、管内流動時のせん断履歴に起因する材料不均質性と、それに伴う組成上の差異および強度差であることが明らかにされてきた。しかしながら、積層界面の空間配置と破壊メカニズムの関係は未解明な点が多く、本章では、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を実施した。このとき、AE法とDICによって、積層界面配置とひび割れ発生および進展により規定される破壊挙動を時空間的にモニタリングした。

- 1 Trans-layer 破壊では、Inter-layer 破壊と比較して、荷重-CMOD 曲線はピーク荷重後の引張軟化域において緩やかな荷重低下を示し、破壊エネルギーは大きい。
- 2 破壊エネルギーの大小に対応して、Trans-layer 破壊では、Inter-layer 破壊より多数の AE イベントが検出され、発生した AE イベントは Trans-layer 破壊ではより広範囲に分布し、Inter-layer 破壊ではスパン中央部に局所的に分布する。
- 3 第3章で検討した3DPコンクリートでは、積層界面は多孔的な構造を有さず、積層界面にはほと

んど空隙が存在せず、密な組織構造を有する Filament Interfacial Zone Network (FIZN) が形成される。

- 4 pdAE による AE イベントの時空間的分布と DIC による表面ひび割れプロファイルの時間履歴を統合したとき、Trans-layer 破壊ではひび割れ発生時から多数の AE が発生する一方で、Inter-layer 破壊ではひび割れ発生時にほとんど AE が発生しない。これにより、管内流動時のせん断履歴に基づく材料不均質性を構造的要因として発生する力学的異方性は、ひび割れ発生に対する抵抗の差異およびそれに伴う AE 発生挙動の対照性として顕在化する。
- 5 Trans-layer 破壊では、ひび割れ進展方向に対して垂直に配置された積層界面は、ひび割れの進展を抑制する crack arresting 効果を示す。一方で、隣接するフィラメント間の積層界面は、ひび割れ進展に対して平行に配置され、容易にひび割れを進展させる crack acceleration 効果を示す。

第 4 章では、造形プロセスに起因するフィラメント内部に発生する内部空隙について、吐出条件に基づく幾何学的変化とそれに伴う空隙群としてのトポロジ的变化を評価した。第 3 章において確認されたように、積層界面領域が多孔質にならず、密な構造が達成され则认为られる。このとき、今後の 3DP コンクリートの耐久性の検討においては、内部空隙構造が重要な影響因子となる。第 4 章では、吐出条件として、ノズル径と一致する層厚を使用し、ノズル直下領域と同量の材料を吐出し、圧付けを行わない No pressing 条件を基準としたフィラメント供試体を作製した。このとき、積層界面における接着面積の増加による付着性状向上を目的として使用される 2 つの吐出条件を比較対象とした。第一に、ノズル径より小さい層厚を使用し、押し付けながら吐出する Layer pressing 条件と、第二に、押し付けながらノズル直下領域より多量の材料を吐出する Over-extrusion 条件である。加えて、添加する混和剤により連行される内部空隙を変化させる目的により、高性能 AE 減水剤あるいは水中不分離剤をそれぞれ添加した 2 種類の配合を使用した。作製したフィラメント供試体に対して X 線 CT 法を適用し、吐出条件に起因する空隙ボックスの幾何学的変化を評価した。また、内部空隙構造の評価として、トポロジカルデータ解析手法の一つであるパーシステントホモロジー (PH) を適用し、吐出条件による内部空隙構造のトポロジ的变化を評価した。

- 1 高性能 AE 減水剤を混和剤に使用したとき、多数の微細な気泡が連行される一方で、水中不分離剤を混和剤に使用したとき、比較的粗大な空隙が形成される。
- 2 フィラメント幅方向の内部空隙について、Over-extrusion 条件は、多量の材料吐出に伴うフィラメント幅方向の材料流動によって、フィラメント幅方向の内部空隙の伸長を促進する。
- 3 材料吐出方向の内部空隙について、水中不分離剤を添加した配合では吐出条件に関わらず、内部空隙は圧潰する。一方で、高性能 AE 減水剤を添加したとき、投影径を指標としたとき、内部空隙は材料吐出方向に圧潰せず、伸長した結果を示す。
- 4 高性能 AE 減水剤を添加した配合は、材料吐出方向に圧潰していないような投影径を有する内部空隙が認められるが、これは、複数の内部空隙が合体に起因する。これは、高性能 AE 減水剤を用いた配合では、連行された安定的な微小気泡が吐出プロセスによってフレッシュコンクリート内部を移動および接近したことで、複数空隙の合体を生じるためである。一方で、水中不分離剤を添加した配合において連行される気泡は個々に変形する。
- 5 高性能 AE 減水剤を添加した配合における内部空隙は、押し付けながらノズル直下領域に対して多

量の材料を吐出する条件において、内部空隙の合体による不規則な形状への幾何学的変化をより顕著に示す。

- 6 吐出条件に応じて内部空隙構造のトポロジーは変化し、Layer pressing 条件では、ROI 抽出位置によらない安定的な内部空隙構造が形成される。

第5章では、3DP コンクリートの品質管理手法の確立を目的に、残存空隙の検出に対して、弾性波トモグラフィ法の適用可能性を検討した。特に、積層パラメータの一つである吐出量を調整することで、フィラメント間に形成される残存空隙の発生を変化させた。加えて、応力作用下の破壊プロセスの進行を評価するために、圧縮载荷サイクルを適用した 3DP コンクリートに対して、各サイクルの除荷後に弾性波トモグラフィ法を適用した。圧縮载荷時の表面ひずみを DIC により可視化することで、弾性波トモグラフィ法における弾性波速度分布と破壊進行を比較した。

- 1 吐出量が小さいとき残存空隙が発生し、弾性波トモグラフィ法により算出される弾性波速度分布は、低速度領域、すなわち欠陥部を示す領域が広く分布する。吐出量を大きくすることで、残存空隙の発生を軽減し、3DP コンクリートの内部品質を向上させたとき、弾性波速度分布は、高速度領域が広く分布し健全であることを示す。すなわち、弾性波トモグラフィ法は、3DP コンクリート内部の欠陥である残存空隙の検出に有用である。
- 2 弾性波励起に使用する鋼球径を大きくし低周波数を励起したとき、弾性波速度分布は広範囲に緩やかに分布する。鋼球径を小さくし高周波数の弾性波を励起するとき、弾性波速度分布における低速度領域は局所化する。
- 3 残存空隙を有する 3DP コンクリートの圧縮応力下における破壊プロセスの進行において、弾性波速度分布はひび割れ発生位置に対応する低速度領域を示す。また、対象領域全域における破壊の進行を評価することができる。

6.2. 本研究の総括

図-6.1 に示すように、3DP コンクリートの力学的異方性における破壊挙動および階層的スケールを有する内部品質が、単なるフィラメント配向そのものによるものではなく、積層界面、残存空隙、内部空隙の空間的配置に強く支配されるものであることを明らかにしたものである。加えて、これらの内部構造の空間的配置は、造形プロセスに強く起因するものである。すなわち、3DP コンクリートにおける異方性は、方向依存的な強度差として現れるのではなく、ひび割れ発生箇所、進展経路、破壊の局所化あるいは分散、ならびに、破壊エネルギーの差異を含む破壊挙動の異方性として理解される。

第2章および第3章では、残存空隙が形成される場合とほとんど形成されない密実な場合の両方を対象にすることで、3DP コンクリートの破壊挙動を規定する構造的要因を段階的に解明した。これらの章で得られた知見は、3D プリンティング技術が流込み施工の自動化に留まらず、破壊挙動そのものを施工プロセスが規定する技術であることを示唆している。すなわち、同程度の最大荷重を示す場合でも、ひび割れ発生位置、進展経路、破壊進行の安定性が異なれば、造形した 3DP コンクリートの破壊形式は大きく異なる。したがって、内部構造の空間的配置を積層経路によって制御することは、3DP コンクリートに対して耐力のみでは記述できない構造性能を付与できる可能性を有する。また、この考え方は、乾燥収縮や長期供用期間中においても、脆弱部の局所化あるいは分散化を通じて、ひび割れ分布や劣化進行を制御

し得る概念に発展すると考えられる。

第4章では、3DP コンクリートにおける造形プロセスが規定する対象は、造形物の外形形状の精度だけでなく、フィラメント内部に発生する空隙構造そのものであることを示した。現在、3D プリンティング技術のプロセスコントロールにおいては、設計された3D デジタルデータを精緻に三次元空間内に造形することに主眼が置かれ、表面形状や寸法精度に基づく評価が多数行われてきた。しかしながら、セメント系材料においては、空気の巻き込みがほとんど不可避であり、吐出プロセスは、表面形状のみならず内部空隙の幾何学のおよびトポロジー的特徴も支配する。第4章により得られた結果は、吐出および配合条件に応じて、流込みコンクリートでは見られない内部空隙が圧潰、伸長、合体の幾何学的変化し、それに伴って内部空隙構造がトポロジー的に変化することを示している。これにより、3DP コンクリートのプロセスは、表面形状だけでなく内部空隙構造を変化させるものであると捉える必要があることを示している。

第5章では、造形プロセスに起因して形成される内部構造の品質管理手法の確立を目的として、弾性波トモグラフィ法の適用可能性を検討した。表面形状が設計データ通りに造形されていても、内部に意図しない残存空隙が発生していれば、それが破壊挙動に強く影響することは第2章で示されている。したがって、3DP コンクリートの造形後の品質管理は、外形寸法の精度確認だけでなく、内部品質を In-situ モニタリングによって非破壊で評価する枠組みが必要である。弾性波トモグラフィ法は、波動伝搬挙動を内部の欠陥検出に適用できる点で有用であり、本研究では、残存空隙の発生の検出および応力作用下での破壊進行評価に対して適用した。これにより、弾性波トモグラフィ法により3DP コンクリートの内部欠陥として残存空隙を検出可能であり、励起する周波数特性によって検出感度が変わることが示唆された。

以上のように、本研究は3DP コンクリートにおける造形プロセス、内部構造、力学特性と耐久性の関連性、および非破壊検査手法の連関を体系的に整理したものである。これは、3D プリンティング技術を生体模倣の発展の延長線上にない、内部構造の制御を通じて材料特性と空間造形を統合的に最適化する高次の建設技術として昇華するための学術的基盤を与えるものである。

6.3. 今後の課題と展望

本研究では、造形プロセスにより規定される内部構造が3DP コンクリートの性能に及ぼす影響を実験的に検討した。本研究における課題と今後の展望を示す。

今後の課題として、次の3つの課題が挙げられる。第一に、内部構造を造形プロセスによる個別の構造と捉えるのではなく、性能を規定する構造指標として一般化すること、第二に、内部構造の形成過程と耐久性の関連を明らかにすること、第三に、意図的に造形された内部構造を実構造物スケールで検証可能な非破壊検査手法の確立である。今後の展望として、これらの課題に取り組むことで、造形プロセスに支配された内部構造とそれに伴う性能を受動的に評価する段階から、性能実現に応じて内部構造を規定し、それを実現する造形プロセスを能動的に制御する段階へ昇華することが重要である。

第一に、内部構造を一般化可能な構造指標として整理することで、ひび割れ発生および進展を含む非線形破壊挙動を最適化することが可能になると考えられる。近年、生体模倣に基づくフィラメントの多方向配向による3DP コンクリートの靱性化に関する検討が増加している[73,74,76,77]。しかしながら、これらの検討は、それぞれ特有の生体模倣構造における有効性を示すものであり、破壊挙動における支配的要因となるフィラメント配向、および3DP コンクリート内部の非造形領域である残存空隙構造を特定するも

のではない。3D プリンティング技術における本質的な利点は、物体内部に意図的に非造形領域を設定し空間を導入する点にある。このとき、本研究において内部空隙構造の構造記述子として適用したパーシステントホモロジー（PH）を用いて、金属酸化物材料中のひび割れ発生における支配的なトポロジー的特徴を検討した例が報告されている[193]。すなわち、3DP コンクリートにおける残存空隙構造をトポロジー的構造として捉え、破壊挙動を支配するトポロジー的特徴を明らかにできる可能性を有する（図-6.2 参照）。特定された残存空隙構造を具現化する積層経路設計を導出するアルゴリズムとともに開発[242,243]を進めることで、個別の内部構造に起因する破壊挙動の観察から、所要性能に応じた内部構造を定め、それを実現する造形プロセスへの還元に発展させることができる。

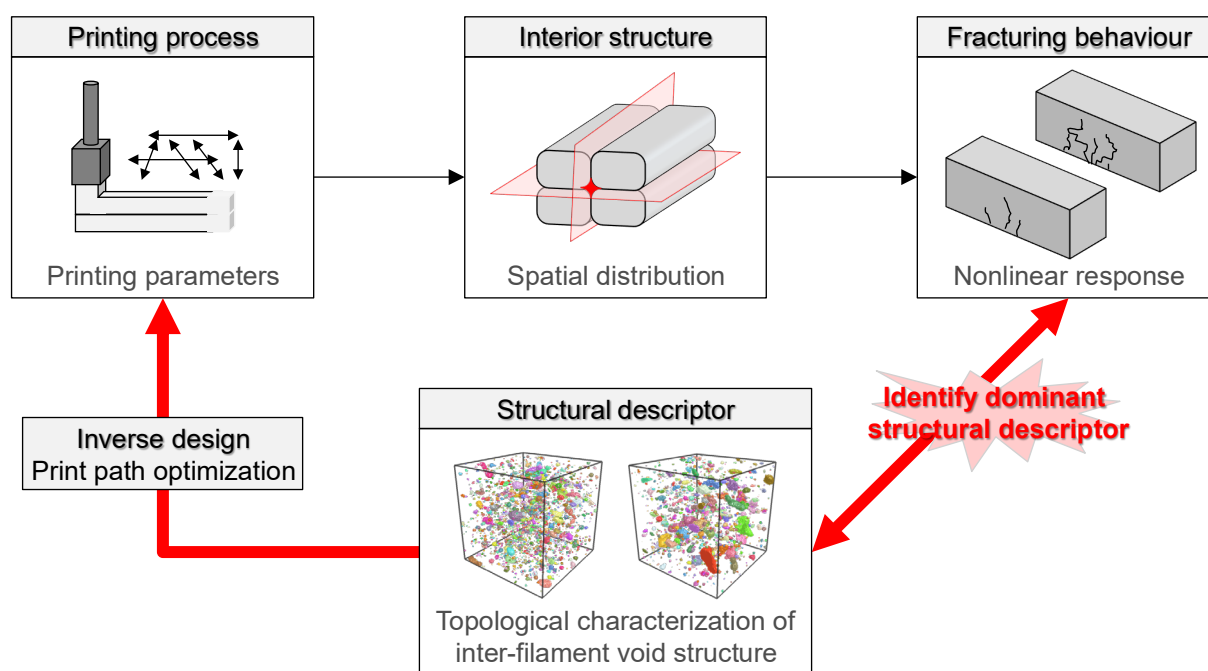


図-6.2 内部構造の構造記述子と能動的制御への展望

第二に、内部構造を造形プロセスによる最終状態としてだけでなく、形成過程と耐久性の関係を明らかにする必要がある。本研究においては、内部空隙について、単一のフィラメントを対象とし、積層によるフィラメント変形の影響を排除し、吐出条件固有の影響を主に評価した。しかしながら、実際には、吐出後のフィラメントは上層の積層に伴い変形を示し[172]、内部空隙の幾何学的変化およびトポロジー的变化に影響する可能性がある。今後、このような造形プロセスの進行に伴う内部構造の形成とそれに伴う積層部材高さ方向の内部空隙構造の差異を検討する必要がある。このとき、上層部と下層部において、内部空隙構造が異なり、物質移動特性等に顕著な差として確認できれば、3DP コンクリートは造形プロセスに基づく機能勾配を有する材料として捉えることができる（図-6.3 参照）。一方で、内部空隙構造に顕著な差が見られない、あるいは、見られても、物質移動特性において差異が見られない可能性も考えられる。これは、フィラメント単位の吐出積層造形に基づく積層構造が、積層界面等の不連続面を有する場合であっても巨視的には平均的な挙動を示す構造であることを示すものであり、解析的検討における入力物性値における有用な知見を提供すると考えられる。

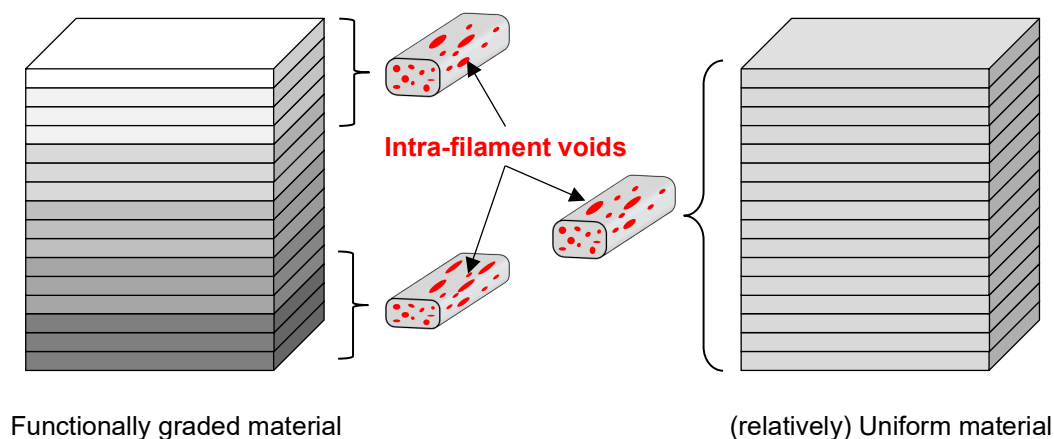


図-6.3 造形過程による機能勾配への展望

第三に、上述のような内部構造が能動的制御によって造形されたとき、実際の内部構造を検出し品質を保証する非破壊検査手法の確立が必要となる。弾性波を用いた非破壊検査手法では、実構造物スケールに対しても適用可能であり、本研究においてもその適用可能性を示した。今後、実験室スケールから実構造物スケールに展開するために、対象寸法、センサ配置、および検出対象のサイズ、形状、空間的配置と入力すべき弾性波の周波数特性と計測条件の関係を整理する必要がある。これにより、意図的に造形された内部構造が実際に形成されているか検査することができれば、内部構造の設計、造形、および検査を一体化した品質管理体制を提案することができる。

以上のように、本研究の課題および展望は、造形プロセスにより形成される内部構造と 3DP コンクリートの特性の関係を個別の現象およびメカニズムの理解から、一般化可能な内部構造指標および品質管理フレームワークへ発展させる点にある。今後は、多様な造形条件と性能指標を対象とした体系的検証を通じて、3DP コンクリートにおける三次元積層過程が支配する内部構造と性能への影響の連関をより定量的に整理することを目指す。

参考文献

- [1] R.A. Buswell, W.R. Leal de Silva, S.Z. Jones, J. Dirrenberger, 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research, *Cem. Concr. Res.* 112 (2018) 37–49. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.006>.
- [2] M.A. Hossain, A. Zhumabekova, S.C. Paul, J.R. Kim, A review of 3D printing in construction and its impact on the labor market, *Sustainability (Switzerland)* 12 (2020) 1–21. <https://doi.org/10.3390/su12208492>.
- [3] S.A. Khan, M. Koç, S.G. Al-Ghamdi, Sustainability assessment, potentials and challenges of 3D printed concrete structures: A systematic review for built environmental applications, *J. Clean. Prod.* 303 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127027>.
- [4] F.H. Tushar, M. Hasan, K. Hasan, J. Mawa, M. Habib, Factors affecting flowability and rheological behavior of 3D printed concrete: A comprehensive review, *Constr. Build. Mater.* 508 (2026) 145140. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2026.145140>.
- [5] ISO/ASTM 52900:2021(en), <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-2:v1:en> (n.d.).
- [6] 新野俊樹, 付加製造技術 (Additive Manufacturing) の概要, 成形加工 26 (2014) 142–147.
- [7] V. Mechtcherine, F.P. Bos, A. Perrot, W.R.L. da Silva, V.N. Nerella, S. Fataei, R.J.M. Wolfs, M. Sonebi, N. Roussel, Extrusion-based additive manufacturing with cement-based materials – Production steps, processes, and their underlying physics: A review, *Cem. Concr. Res.* 132 (2020) 106037. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2020.106037>.
- [8] P. Biranchi, S. Pshtiwan, L. Vittoria, *Additive Manufacturing for Construction*, Emerald Publishing Limited, 2024.
- [9] 日本コンクリート工学会, 3D プリンティングによるコンクリート構造物構築に関する研究委員会報告書, (2021).
- [10] H. Tu, Z. Wei, A. Bahrami, N. Ben Kahla, A. Ahmad, Y.O. Özkılıç, Recent advancements and future trends in 3D concrete printing using waste materials, *Developments in the Built Environment* 16 (2023) 100187. <https://doi.org/10.1016/J.DIBE.2023.100187>.
- [11] A.U. Rehman, I.G. Kim, J.H. Kim, Towards full automation in 3D concrete printing construction: Development of an automated and inline sensor-printer integrated instrument for in-situ assessment of structural build-up and quality of concrete, *Developments in the Built Environment* 17 (2024) 100344. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100344>.
- [12] S. Lim, R.A. Buswell, T.T. Le, S.A. Austin, A.G.F. Gibb, T. Thorpe, Developments in construction-scale additive manufacturing processes, *Autom. Constr.* 21 (2012) 262–268. <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2011.06.010>.
- [13] M. Bi, P. Tran, L. Xia, G. Ma, Y.M. Xie, Topology optimization for 3D concrete printing with various manufacturing constraints, *Addit. Manuf.* 57 (2022) 102982. <https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2022.102982>.
- [14] G.H. Ahmed, N.H. Askandar, G.B. Jumaa, A review of largescale 3DCP: Material characteristics, mix design, printing process, and reinforcement strategies, *Structures* 43 (2022) 508–532. <https://doi.org/10.1016/J.ISTRUC.2022.06.068>.

- [15] A. Paolini, S. Kollmannsberger, E. Rank, Additive manufacturing in construction: A review on processes, applications, and digital planning methods, *Addit. Manuf.* 30 (2019) 100894. <https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2019.100894>.
- [16] V. Mechtcherine, K. van Tittelboom, A. Kazemian, E. Kreiger, B. Nematollahi, V.N. Nerella, M. Santhanam, G. de Schutter, G. Van Zijl, D. Lowke, E. Ivaniuk, M. Taubert, F. Bos, A roadmap for quality control of hardening and hardened printed concrete, *Cem. Concr. Res.* 157 (2022) 106800. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2022.106800>.
- [17] Y.W.D. Tay, Y. Qian, M.J. Tan, Printability region for 3D concrete printing using slump and slump flow test, *Compos. B Eng.* 174 (2019) 106968. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2019.106968>.
- [18] A.W. Saak, H.M. Jennings, S.P. Shah, A generalized approach for the determination of yield stress by slump and slump flow, *Cem. Concr. Res.* 34 (2004) 363–371. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2003.08.005>.
- [19] N. Roussel, Correlation between yield stress and slump: Comparison between numerical simulations and concrete rheometers results, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* 39 (2006) 501–509. <https://doi.org/10.1617/s11527-005-9035-2>.
- [20] N. Roussel, Rheological requirements for printable concretes, *Cem. Concr. Res.* 112 (2018) 76–85. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2018.04.005>.
- [21] M. Rahman, S. Rawat, R. (Chunhui) Yang, A. Mahil, Y.X. Zhang, A comprehensive review on fresh and rheological properties of 3D printable cementitious composites, *Journal of Building Engineering* 91 (2024) 109719. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109719>.
- [22] T.T. Le, S.A. Austin, S. Lim, R.A. Buswell, A.G.F. Gibb, T. Thorpe, Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* 45 (2012) 1221–1232. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9828-z>.
- [23] B. Panda, N.A.N. Mohamed, S.C. Paul, G.V.P.B. Singh, M.J. Tan, B. Šavija, The effect of material fresh properties and process parameters on buildability and interlayer adhesion of 3D printed concrete, *Materials* 12 (2019). <https://doi.org/10.3390/ma12132149>.
- [24] A. V. Rahul, M. Santhanam, H. Meena, Z. Ghani, 3D printable concrete: Mixture design and test methods, *Cem. Concr. Compos.* 97 (2019) 13–23. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2018.12.014>.
- [25] C. Zhang, V.N. Nerella, A. Krishna, S. Wang, Y. Zhang, V. Mechtcherine, N. Banthia, Mix design concepts for 3D printable concrete: A review, *Cem. Concr. Compos.* 122 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104155>.
- [26] G. Ma, Z. Li, L. Wang, Printable properties of cementitious material containing copper tailings for extrusion based 3D printing, *Constr. Build. Mater.* 162 (2018) 613–627. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.12.051>.
- [27] J.T. Kolawole, R. Buswell, S. Mahmood, M.N. Isa, S. Cavalaro, S. Austin, D. Engelberg, J. Dobrzanski, J. Xu, P.J. Withers, On the origins of anisotropy of extrusion-based 3D printed concrete: The roles of filament skin and agglomeration, *Cem. Concr. Res.* 192 (2025) 107817. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2025.107817>.
- [28] Y. Zhang, Q. Ren, K. Van Tittelboom, G. De Schutter, Z. Jiang, Layer interface in 3D printed cement-based

- materials: Heterogeneous phase distribution and new insights into formation mechanism, *Cem. Concr. Compos.* (2025) 106337. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2025.106337>.
- [29] J.G. Sanjayan, B. Nematollahi, M. Xia, T. Marchment, Effect of surface moisture on inter-layer strength of 3D printed concrete, *Constr. Build. Mater.* 172 (2018) 468–475. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.03.232>.
- [30] Z. Geng, W. She, W. Zuo, K. Lyu, H. Pan, Y. Zhang, C. Miao, Layer-interface properties in 3D printed concrete: Dual hierarchical structure and micromechanical characterization, *Cem. Concr. Res.* 138 (2020) 106220. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2020.106220>.
- [31] R.J.M. Wolfs, F.P. Bos, T.A.M. Salet, Hardened properties of 3D printed concrete: The influence of process parameters on interlayer adhesion, *Cem. Concr. Res.* 119 (2019) 132–140. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2019.02.017>.
- [32] J. Kruger, G. van Zijl, A compendious review on lack-of-fusion in digital concrete fabrication, *Addit. Manuf.* 37 (2021) 101654. <https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2020.101654>.
- [33] J. Kruger, A. du Plessis, G. van Zijl, An investigation into the porosity of extrusion-based 3D printed concrete, *Addit. Manuf.* 37 (2021) 101740. <https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2020.101740>.
- [34] Y. Chen, O. Çopuroğlu, C. Romero Rodriguez, F.F. de Mendonca Filho, E. Schlangen, Characterization of air-void systems in 3D printed cementitious materials using optical image scanning and X-ray computed tomography, *Mater. Charact.* 173 (2021) 110948. <https://doi.org/10.1016/J.MATCHAR.2021.110948>.
- [35] Y. Wu, C. Liu, G. Bai, H. Liu, Y. Meng, Z. Wang, 3D printed concrete with recycled sand: Pore structures and triaxial compression properties, *Cem. Concr. Compos.* 139 (2023) 105048. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2023.105048>.
- [36] M.K. Mohan, A. V. Rahul, J.F. Van Stappen, V. Cnudde, G. De Schutter, K. Van Tittelboom, Assessment of pore structure characteristics and tortuosity of 3D printed concrete using mercury intrusion porosimetry and X-ray tomography, *Cem. Concr. Compos.* 140 (2023) 105104. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2023.105104>.
- [37] Y. Zhang, L. Yang, R. Qian, G. Liu, Y. Zhang, H. Du, Interlayer adhesion of 3D printed concrete: Influence of layer stacked vertically, *Constr. Build. Mater.* 399 (2023) 132424. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132424>.
- [38] J. Van Der Putten, M. Deprez, V. Cnudde, G. De Schutter, K. Van Tittelboom, Microstructural characterization of 3D printed cementitious materials, *Materials* 12 (2019). <https://doi.org/10.3390/ma12182993>.
- [39] R. Luo, B. Sun, X. Fei, H. Du, Interlayer strength loss in 3D printed concrete due to time-gap-induced macroporosity, *Constr. Build. Mater.* 497 (2025) 143924. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.143924>.
- [40] P. Shakor, S. Nejadi, G. Paul, A study into the effect of different nozzles shapes and fibre-reinforcement in 3D printed mortar, *Materials* 12 (2019). <https://doi.org/10.3390/MA12101708>.
- [41] L. Wang, Z. Huang, G.D. Nguyen, M. Karakus, Improving interlayer adhesion of 3D printed concrete by filament interlocking, *Journal of Building Engineering* 121 (2026) 115700. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2026.115700>.
- [42] S. Li, Y. Sun, Y. Qian, W. Chen, D. Zhang, X. Yu, Bio-inspired jigsaw-interlocking suture interfaces for

- enhanced flexural response of 3D-printed strain-hardening cementitious composites (3DP-SHCC), *Cem. Concr. Compos.* 166 (2026) 106395. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2025.106395>.
- [43] L. He, J.Z.M. Tan, W.T. Chow, H. Li, J. Pan, Design of novel nozzles for higher interlayer strength of 3D printed cement paste, *Addit. Manuf.* 48 (2021) 102452. <https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2021.102452>.
- [44] P. Carneau, R. Mesnil, O. Baverel, N. Roussel, Layer pressing in concrete extrusion-based 3D-printing: Experiments and analysis, *Cem. Concr. Res.* 155 (2022) 106741. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2022.106741>.
- [45] Y. Yan, M. Zhang, G. Ma, J. Sanjayan, Enhancing interlayer bonding strength of 3D printed ternary geopolymer using calcium carbonate whiskers spray, *Constr. Build. Mater.* 435 (2024) 136725. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2024.136725>.
- [46] Y.W.D. Tay, S.G. Lim, B.A. Fadhel, I.T. Amr, R.A. Bamagain, A.S. Al-Hunaidy, S.C. Paul, M.J. Tan, Potential of carbon dioxide spraying on the properties of 3D concrete printed structures, *Carbon Capture Science & Technology* 13 (2024) 100256. <https://doi.org/10.1016/J.CCST.2024.100256>.
- [47] G. Ma, N.M. Salman, L. Wang, F. Wang, A novel additive mortar leveraging internal curing for enhancing interlayer bonding of cementitious composite for 3D printing, *Constr. Build. Mater.* 244 (2020) 118305. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.118305>.
- [48] Q. Li, X. Gao, A. Su, X. Lu, Interlayer adhesion strength of 3D-printed cement-based materials exposed to varying curing conditions, *Journal of Building Engineering* 74 (2023) 106825. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2023.106825>.
- [49] Y. Chen, Z. Chang, S. He, O. Çopuroğlu, B. Šavija, E. Schlangen, Effect of curing methods during a long time gap between two printing sessions on the interlayer bonding of 3D printed cementitious materials, *Constr. Build. Mater.* 332 (2022) 127394. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.127394>.
- [50] X. Sun, M. Mazur, C.T. Cheng, A review of void reduction strategies in material extrusion-based additive manufacturing, *Addit. Manuf.* 67 (2023) 103463. <https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2023.103463>.
- [51] F. Bos, R. Wolfs, Z. Ahmed, T. Salet, Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing, *Virtual Phys. Prototyp.* 11 (2016) 209–225. <https://doi.org/10.1080/17452759.2016.1209867>.
- [52] M.M.R. Kiyani, S.M. Hussain, R. Emaan, M.B. Kamal, S.U. Rehman, R.D. Riaz, M. Usman, Influence of process parameters on 3D concrete printing: A step towards standardized approaches, *Case Studies in Construction Materials* 23 (2025) e05212. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e05212>.
- [53] N. van de Werken, H. Tekinalp, P. Khanbolouki, S. Ozcan, A. Williams, M. Tehrani, Additively manufactured carbon fiber-reinforced composites: State of the art and perspective, *Addit. Manuf.* 31 (2020) 100962. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100962>.
- [54] H.L. Tekinalp, V. Kunc, G.M. Velez-Garcia, C.E. Duty, L.J. Love, A.K. Naskar, C.A. Blue, S. Ozcan, Highly oriented carbon fiber–polymer composites via additive manufacturing, *Compos. Sci. Technol.* 105 (2014) 144–150. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2014.10.009>.
- [55] R. Wolfs, D. Bos, J.F. Caron, M. Gerke, R. Mesnil, R. Buswell, N. Ducoulombier, N. Hack, E. Keita, P. Kinnell, K. Mawas, V. Mechtcherine, L. Miranda, D. Sokolov, J. Versteeg, N. Roussel, On-line and in-line

- quality assessment across all scale levels of 3D concrete printing, *Cem. Concr. Res.* 185 (2024) 107646. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2024.107646>.
- [56] A.L. Bowler, S. Bakalis, N.J. Watson, A review of in-line and on-line measurement techniques to monitor industrial mixing processes, *Chemical Engineering Research and Design* 153 (2020) 463–495. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2019.10.045>.
- [57] D. Bos, R. Wolfs, A quality control framework for digital fabrication with concrete, *RILEM Technical Letters* 8 (2023) 106–112. <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2023.181>.
- [58] A. Kazemian, B. Khoshnevis, Real-time extrusion quality monitoring techniques for construction 3D printing, *Constr. Build. Mater.* 303 (2021) 124520. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124520>.
- [59] X. Liu, R. Buswell, S. Cavalaro, J. Xu, J. Dobrzanski, J.T. Kolawole, Influence of inter-filament voids on the failure mechanism and compressive strength of 3D printed concrete, *Constr. Build. Mater.* 510 (2026) 145266. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2026.145266>.
- [60] Y. Tao, F. Kong, Z. Li, J. Zhang, X. Zhao, Q. Yin, D. Xing, P. Li, A review on voids of 3D printed parts by fused filament fabrication, *Journal of Materials Research and Technology* 15 (2021) 4860–4879. <https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2021.10.108>.
- [61] H. Liu, C. Liu, G. Bai, Y. Wu, C. He, R. Zhang, Y. Wang, Influence of pore defects on the hardened properties of 3D printed concrete with coarse aggregate, *Addit. Manuf.* 55 (2022) 102843. <https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2022.102843>.
- [62] K.H. Ler, C.K. Ma, C.L. Chin, I.S. Ibrahim, K.H. Padil, M.A.I. Ab Ghafar, A.A. Lenya, Porosity and durability tests on 3D printing concrete: A review, *Constr. Build. Mater.* 446 (2024) 137973. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2024.137973>.
- [63] T.T. Le, S.A. Austin, S. Lim, R.A. Buswell, R. Law, A.G.F. Gibb, T. Thorpe, Hardened properties of high-performance printing concrete, *Cem. Concr. Res.* 42 (2012) 558–566. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.12.003>.
- [64] B. Panda, S. Chandra Paul, M. Jen Tan, Anisotropic mechanical performance of 3D printed fiber reinforced sustainable construction material, *Mater. Lett.* 209 (2017) 146–149. <https://doi.org/10.1016/J.MATLET.2017.07.123>.
- [65] A. Baktheer, M. Classen, A review of recent trends and challenges in numerical modeling of the anisotropic behavior of hardened 3D printed concrete, *Addit. Manuf.* 89 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.addma.2024.104309>.
- [66] H. Zhang, J. Wu, B.T. Huang, R.C. Yu, M. Xia, J.G. Sanjayan, Y.J. Huang, Cross-scale mechanisms of anisotropy in 3D-printed Ultra-High-Performance Concrete (UHPC), *Addit. Manuf.* 114 (2025) 105014. <https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2025.105014>.
- [67] S.A.O. Nair, A. Tripathi, N. Neithalath, Examining layer height effects on the flexural and fracture response of plain and fiber-reinforced 3D-printed beams, *Cem. Concr. Compos.* 124 (2021) 104254. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2021.104254>.
- [68] J.P. Mostert, J. Kruger, Reducing anisotropic behaviour of 3D printed concrete through interlocked filaments, *Mater. Struct.* 58 (2025) 1–19. <https://doi.org/10.1617/s11527-025-02723-9>.

- [69] Y. Tang, J. Xiao, T. Ding, H. Liu, M. Zhang, J. Zhang, Trans-layer and inter-layer fracture behavior of extrusion-based 3D printed concrete under three-point bending, *Eng. Fract. Mech.* 296 (2024) 109836. <https://doi.org/10.1016/J.ENGFRACMECH.2023.109836>.
- [70] J.G. Yue, D.E. Beskos, C. Feng, K. Wu, Hardened fracture characteristics of printed concrete using acoustic emission monitoring technique, *Constr. Build. Mater.* 361 (2022) 129684. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.129684>.
- [71] C. Ye, J. Xu, G. Lacidogna, Fracture behavior of 3D printed geopolymer concrete containing waste ceramic, *Cem. Concr. Compos.* 163 (2025) 106193. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2025.106193>.
- [72] M. Moini, J. Olek, J.P. Youngblood, B. Magee, P.D. Zavattieri, Additive Manufacturing and Performance of Architected Cement-Based Materials, *Advanced Materials* 30 (2018). <https://doi.org/10.1002/adma.201802123>.
- [73] G. Du, Y. Sun, Y. Qian, Flexural performance of nature-inspired 3D-printed strain-hardening cementitious composites (3DP-SHCC) with Bouligand structures, *Cem. Concr. Compos.* 149 (2024) 105494. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2024.105494>.
- [74] G. Du, Y. Sun, Y. Qian, Nature-inspired approach for enhancing the fracture performance of 3D printed strain-hardening cementitious composites (3DP-SHCC), *Eng. Struct.* 322 (2025) 119074. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.119074>.
- [75] J. Liu, S. Li, K. Fox, P. Tran, 3D concrete printing of bioinspired Bouligand structure: A study on impact resistance, *Addit. Manuf.* 50 (2022) 102544. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102544>.
- [76] A. Prihar, S. Gupta, H.S. Esmaceli, R. Moini, Tough double-bouligand architected concrete enabled by robotic additive manufacturing, *Nat. Commun.* 15 (2024) 7498. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-51640-y>.
- [77] W. Zhou, Y. Xu, Z. Meng, J. Xie, Y. Zhou, E. Schlangen, B. Šavija, Filament stitching: An architected printing strategy to mitigate anisotropy in 3D-Printed engineered cementitious composites (ECC), *Cem. Concr. Compos.* 160 (2025) 106044. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2025.106044>.
- [78] I. Taborda-Llano, A.A. Hoyos-Montilla, E. Asensio, A.M. Guerrero, J.I. Tobón, Influence of the construction process parameters on the mechanical performance and durability of 3D printed concrete (3DPC): A systematic review, *Journal of Building Engineering* 118 (2026) 114965. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.114965>.
- [79] K. Van Tittelboom, M.K. Mohan, B. Šavija, E. Keita, G. Ma, H. Du, J. Kruger, L. Caneda-Martinez, L. Wang, M. Bekaert, T. Wangler, Z. Wang, V. Mechtcherine, N. Roussel, On the micro- and meso-structure and durability of 3D printed concrete elements, *Cem. Concr. Res.* 185 (2024) 107649. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2024.107649>.
- [80] M.K. Mohan, A. V. Rahul, G. De Schutter, K. Van Tittelboom, Extrusion-based concrete 3D printing from a material perspective: A state-of-the-art review, *Cem. Concr. Compos.* 115 (2021) 103855. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2020.103855>.
- [81] Y. Zhang, H. Qiao, R. Qian, C. Xue, Q. Feng, L. Su, Y. Zhang, G. Liu, H. Du, Relationship between water transport behaviour and interlayer voids of 3D printed concrete, *Constr. Build. Mater.* 326 (2022) 126731.

- <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.126731>.
- [82] P. Sikora, M. Techman, K. Federowicz, A.M. El-Khayatt, H.A. Saudi, M. Abd Elrahman, M. Hoffmann, D. Stephan, S.Y. Chung, Insight into the microstructural and durability characteristics of 3D printed concrete: Cast versus printed specimens, *Case Studies in Construction Materials* 17 (2022) e01320. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2022.E01320>.
- [83] T. Shiotani, H. Asaue, N. Ogura, N. Okude, S. Artur, T. Ishida, Evaluation of permanent 3D printed formwork of a bridge pier using non-destructive testing methods, *Constr. Build. Mater.* 491 (2025) 142708. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2025.142708>.
- [84] M.P. Salaimanimagudam, J. Jayaprakash, Effect of printing parameters on inter-filament voids, bonding, and geometrical deviation in concrete 3D printed structures, *Mater. Lett.* 349 (2023) 134815. <https://doi.org/10.1016/J.MATLET.2023.134815>.
- [85] S. Jang, A. Boddorff, D.J. Jang, J. Lloyd, K. Wagner, N. Thadhani, B. Brettmann, Effect of material extrusion process parameters on filament geometry and inter-filament voids in as-fabricated high solids loaded polymer composites, *Addit. Manuf.* 47 (2021) 102313. <https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2021.102313>.
- [86] Z. Pan, D. Si, J. Tao, J. Xiao, Compressive behavior of 3D printed concrete with different printing paths and concrete ages, *Case Studies in Construction Materials* 18 (2023) e01949. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2023.E01949>.
- [87] D. Heras Murcia, M. Genedy, M.M. Reda Taha, Examining the significance of infill printing pattern on the anisotropy of 3D printed concrete, *Constr. Build. Mater.* 262 (2020) 120559. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.120559>.
- [88] Ohno. M, Recent Progress and Applications of Topology Optimization for Concrete: A Review, *Concrete Journal* 60 (2022) 282–290.
- [89] 木ノ村幸士, 田中俊成, 張文博, 井坂匠吾, 建設 3D プリンティング技術の可能性と用途拡大に向けた研究開発, *コンクリート工学* 61 (2023) 600–607. https://doi.org/10.3151/coj.61.7_600.
- [90] 石井陽介, 超音波スペクトロスコープを用いた炭素繊維強化複合材料積層板の層間界面特性評価に関する研究, 京都大学大学院, 2016. <https://doi.org/10.14989/doctor.k19688>.
- [91] Q. Sun, G. Zhou, H. Guo, Z. Meng, Z. Chen, H. Liu, H. Kang, X. Su, Failure mechanisms of cross-ply carbon fiber reinforced polymer laminates under longitudinal compression with experimental and computational analyses, *Compos. B Eng.* 167 (2019) 147–160. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.12.041>.
- [92] S. Brisard, M. Serdar, P.J.M. Monteiro, Multiscale X-ray tomography of cementitious materials: A review, *Cem. Concr. Res.* 128 (2020) 105824. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105824>.
- [93] T. Sugiyama, M.A.B. Promentilla, Advancing concrete durability research through X-ray computed tomography, *Journal of Advanced Concrete Technology* 19 (2021) 730–755. <https://doi.org/10.3151/jact.19.730>.
- [94] A. du Plessis, W.P. Boshoff, A review of X-ray computed tomography of concrete and asphalt construction materials, *Constr. Build. Mater.* 199 (2019) 637–651. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.12.049>.
- [95] A. Mishra, P. Carrara, M. Griffa, L. De Lorenzis, Fracture in concrete: X-ray tomography with in-situ testing,

- digital volume correlation and phase-field modeling, *Cem. Concr. Res.* 199 (2026) 108012. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2025.108012>.
- [96] K. Nakase, K. Hashimoto, T. Sugiyama, K. Kono, Evaluation of Internal Cracks and Three-Dimensional Deformation due to Different Nozzle Paths in a Material Extrusion 3D Printer, in: *The 16th International Congress on the Chemistry of Cement 2023 (ICCC2023)*, 2023: pp. 13–17.
- [97] A. du Plessis, B.J. Olawuyi, W.P. Boshoff, S.G. le Roux, Simple and fast porosity analysis of concrete using X-ray computed tomography, *Mater. Struct.* 49 (2016) 553–562. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0519-9>.
- [98] K. HASHIMOTO, H. YOKOTA, T. SUGIYAMA, T. KIKKAWA, Pore Structure Analysis of Mortar under Freeze-Thaw Cycles Using X-Ray Computed Tomography, *Journal of the Society of Materials Science, Japan* 62 (2013) 492–497. <https://doi.org/10.2472/jsms.62.492>.
- [99] G. Sokhansefat, M.T. Ley, M.D. Cook, R. Alturki, M. Moradian, Investigation of concrete workability through characterization of aggregate gradation in hardened concrete using X-ray computed tomography, *Cem. Concr. Compos.* 98 (2019) 150–161. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.02.008>.
- [100] J. Taheri-Shakib, A. Al-Mayah, Applications of X-ray computed tomography to characterize corrosion-induced cracking evolution in reinforced concrete: A review, *Journal of Building Engineering* 90 (2024) 109420. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109420>.
- [101] Y. Tan, T. Sugiyama, K. Hashimoto, Evaluation of transport properties of deteriorated concrete due to calcium leaching with coupled CT image analysis and random walk simulation, *Constr. Build. Mater.* 369 (2023) 130526. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.130526>.
- [102] Y. Tan, T. Sugiyama, K. Hashimoto, J. Liu, Transport of radioactive elements in concrete due to utilization of recycled aggregate contaminated with nuclides, *Constr. Build. Mater.* 471 (2025) 140689. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2025.140689>.
- [103] R. Lorenzoni, I. Curosu, S. Paciornik, V. Mechtcherine, M. Oppermann, F. Silva, Semantic segmentation of the micro-structure of strain-hardening cement-based composites (SHCC) by applying deep learning on micro-computed tomography scans, *Cem. Concr. Compos.* 108 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103551>.
- [104] W. Tian, X. Cheng, Q. Liu, C. Yu, F. Gao, Y. Chi, Meso-structure segmentation of concrete CT image based on mask and regional convolution neural network, *Mater. Des.* 208 (2021) 109919. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2021.109919>.
- [105] L. Remes, T.J. Massart, C. Frédérix, P. Hendrickx, P. Berke, CT-scan based mechanical finite element analysis of inter-filament voids in fused deposition modelling, *Addit. Manuf.* 114 (2025) 105032. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2025.105032>.
- [106] S. Hong, Z. Yuan, D. Pan, C. Kuang, B. Dong, S. Fan, Digital-volume-correlation-assisted crack extraction using X-ray computed tomography images of cementitious materials, *Cem. Concr. Compos.* 158 (2025) 105968. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2025.105968>.
- [107] A. Das, Y. Song, S. Mantellato, T. Wangler, D.A. Lange, R.J. Flatt, Effect of processing on the air void system of 3D printed concrete, *Cem. Concr. Res.* 156 (2022) 106789. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2022.106789>.

- [108] R. Yoshihara, K. Nakase, K. Hashimoto, T. Sugiyama, Y. Honda, Evaluation of Aggregate Distribution Heterogeneity in 3D Printed Concrete by Means of X-ray CT, *Buildings* 14 (2024). <https://doi.org/10.3390/buildings14041132>.
- [109] L. Pham, P. Tran, J. Sanjayan, Steel fibres reinforced 3D printed concrete: Influence of fibre sizes on mechanical performance, *Constr. Build. Mater.* 250 (2020) 118785. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118785>.
- [110] K. Nakase, K. Hashimoto, T. Sugiyama, K. Kono, Influence of print paths on mechanical properties and fracture propagation of 3D printed concrete, *Constr. Build. Mater.* 438 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137019>.
- [111] C. Liu, Y. Zhang, H. Liu, Y. Wu, S. Yu, C. He, Z. Liang, Interlayer reinforced 3D printed concrete with recycled coarse aggregate: Shear properties and enhancement methods, *Addit. Manuf.* 94 (2024) 104507. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2024.104507>.
- [112] H. Liu, M. Dai, C. Liu, H. Du, Targeted enhancement strategy for the rebar interface bond in 3D printed coarse aggregate concrete: Performance evaluation and mechanistic insights, *Cem. Concr. Res.* 203 (2026) 108175. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2026.108175>.
- [113] J. Xiao, H. Liu, T. Ding, Finite element analysis on the anisotropic behavior of 3D printed concrete under compression and flexure, *Addit. Manuf.* 39 (2021) 101712. <https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2020.101712>.
- [114] S. Skibicki, R. Dvořák, L. Pazdera, L. Topolář, D. Kocáb, M. Alexa, K. Cendrowski, M. Hoffmann, Anisotropic mechanical properties of 3D printed mortar determined by standard flexural and compression test and acoustic emission, *Constr. Build. Mater.* 452 (2024) 138957. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2024.138957>.
- [115] Miyagawa, Y, Shibayama, A, Kanazawa, K, Displacement Distribution Measurement of Specimens and Real Structure with 3D scanner, *Concrete Journal* 60 (2022) 796–802.
- [116] R.H. Helle, H.G. Lemu, A case study on use of 3D scanning for reverse engineering and quality control, *Mater. Today Proc.* 45 (2021) 5255–5262. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.828>.
- [117] A. Haleem, M. Javaid, R.P. Singh, S. Rab, R. Suman, L. Kumar, I.H. Khan, Exploring the potential of 3D scanning in Industry 4.0: An overview, *International Journal of Cognitive Computing in Engineering* 3 (2022) 161–171. <https://doi.org/10.1016/j.ijcce.2022.08.003>.
- [118] 山本伸也, 小倉大季, 阿部寛之, 菊地竜, 建設用3Dプリンティング技術の開発とその実用化, *コンクリート工学* 59 (2021) 655–660. https://doi.org/10.3151/coj.59.8_655.
- [119] T.C. Chu, W.F. Ranson, M.A. Sutton, Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics, *Exp. Mech.* 25 (1985) 232–244. <https://doi.org/10.1007/BF02325092>.
- [120] J.R. Yates, M. Zanganeh, Y.H. Tai, Quantifying crack tip displacement fields with DIC, *Eng. Fract. Mech.* 77 (2010) 2063–2076. <https://doi.org/10.1016/J.ENGFRACMECH.2010.03.025>.
- [121] Skarżyński, J. Kozicki, J. Tejchman, Application of DIC Technique to Concrete-Study on Objectivity of Measured Surface Displacements, *Exp. Mech.* 53 (2013) 1545–1559. <https://doi.org/10.1007/s11340-013-9781-y>.
- [122] F. Bos, C. Menna, A. Robens-Radermacher, R. Wolfs, N. Roussel, H. Lombois-Burger, B. Baz, D. Weger, B.

- Nematollahi, M. Santhanam, Y. Zhang, S. Bhattacharjee, Z. Jia, Y. Chen, V. Mechtcherine, Mechanical properties of 3D printed concrete: a RILEM TC 304-ADC interlaboratory study — approach and main results, *Mater. Struct.* 58 (2025) 183. <https://doi.org/10.1617/s11527-025-02686-x>.
- [123] Y. Chen, J. Kuva, A. Mohite, Z. Li, H. Rahier, F. Al-Neshawy, J. Shu, Investigation of the Internal Structure of Hardened 3D-Printed Concrete by X-CT Scanning and Its Influence on the Mechanical Performance, *Materials* 16 (2023). <https://doi.org/10.3390/ma16062534>.
- [124] E. Hosseini, M. Zakertabrizi, A.H. Korayem, G. Xu, A novel method to enhance the interlayer bonding of 3D printing concrete: An experimental and computational investigation, *Cem. Concr. Compos.* 99 (2019) 112–119. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.03.008>.
- [125] B. García de Soto, I. Agustí-Juan, J. Hunhevicz, S. Joss, K. Graser, G. Habert, B.T. Adey, Synchronized concrete and bonding agent deposition system for interlayer bond strength enhancement in 3D concrete printing, *Autom. Constr.* 123 (2021) 103546. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.04.004>.
- [126] K. Vallurupalli, N. Farzadnia, K.H. Khayat, Effect of flow behavior and process-induced variations on shape stability of 3D printed elements – A review, *Cem. Concr. Compos.* 118 (2021) 103952. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.103952>.
- [127] M. Choi, N. Roussel, Y. Kim, J. Kim, Lubrication layer properties during concrete pumping, *Cem. Concr. Res.* 45 (2013) 69–78. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.11.001>.
- [128] B. Sun, P. Li, D. Wang, J. Ye, G. Liu, W. Zhao, Evaluation of mechanical properties and anisotropy of 3D printed concrete at different temperatures, *Structures* 51 (2023) 391–401. <https://doi.org/10.1016/J.ISTRUC.2023.03.045>.
- [129] S. Xu, X.-T. Lin, X. Chen, Numerical investigation of anisotropic in 3D printed concrete specimens considering the effects of weak interfaces and pore-induced defects, *Constr. Build. Mater.* 502 (2025) 144388. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2025.144388>.
- [130] J. Yao, J. Luo, M. Qiu, K. Nagai, Mesoscale modeling of anisotropic compressive behavior and pull-out performance of 3D printed concrete with steel bars using 3D RBSM, *Constr. Build. Mater.* 489 (2025) 142214. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2025.142214>.
- [131] K. Nakase, Y. Zhou, K. Hashimoto, T. Sugiyama, Y. Yang, Acoustic emission monitoring of fracture behaviour of 3D printed concrete with different printing paths, *PROGRESS IN ACOUSTIC EMISSION* 21 (2025) 357–362.
- [132] Z. Chang, M. Liang, Y. Xu, Z. Wan, E. Schlangen, B. Šavija, Early-age creep of 3D printable mortar: Experiments and analytical modelling, *Cem. Concr. Compos.* 138 (2023) 104973. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2023.104973>.
- [133] J.G.M. Van Mier, Mode I fracture of concrete: Discontinuous crack growth and crack interface grain bridging, *Cem. Concr. Res.* 21 (1991) 1–15. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(91\)90025-D](https://doi.org/10.1016/0008-8846(91)90025-D).
- [134] D. Zhang, K. Wu, Fracture process zone of notched three-point-bending concrete beams, *Cem. Concr. Res.* 29 (1999) 1887–1892. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00186-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00186-6).
- [135] B. Chen, J. Liu, Experimental study on AE characteristics of three-point-bending concrete beams, *Cem. Concr. Res.* 34 (2004) 391–397. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2003.08.021>.

- [136] Y. Yin, S. Hu, C. Liang, Y. Sun, Crack extension resistance for a general three-point bending concrete beam, *Eng. Fract. Mech.* 290 (2023) 109490. <https://doi.org/10.1016/J.ENGFRACMECH.2023.109490>.
- [137] K. Ohno, K. Uji, A. Ueno, M. Ohtsu, Fracture process zone in notched concrete beam under three-point bending by acoustic emission, *Constr. Build. Mater.* 67 (2014) 139–145. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2014.05.012>.
- [138] S.C. Kou, C.S. Poon, M. Etcheberria, Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete, *Cem. Concr. Compos.* 33 (2011) 286–291. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2010.10.003>.
- [139] Y. Çağlar, S. Şener, Size effect tests of different notch depth specimens with support rotation measurements, *Eng. Fract. Mech.* 157 (2016) 43–55. <https://doi.org/10.1016/J.ENGFRACMECH.2016.02.028>.
- [140] H.A.W. Cornelissen, D.A. Hordijk, H.W. Reinhardt Summary, Experimental determination of crack softening characteristics of normalweight and lightweight concrete, *Heron* 31 (1986) 45–56.
- [141] H.W. Reinhardt, H.A.W. Cornelissen, D.A. Hordijk, TENSILE TESTS AND FAILURE ANALYSIS OF CONCRETE, *Journal of Structural Engineering* 112 (1986) 2462–2477.
- [142] Japan Concrete Institute, Method of test for fracture energy of concrete by use of notched beam, 2003.
- [143] S. Khalilpour, E. BaniAsad, M. Dehestani, A review on concrete fracture energy and effective parameters, *Cem. Concr. Res.* 120 (2019) 294–321. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2019.03.013>.
- [144] 大津政康, アコースティック・エミッションの特性と理論, 第2版, 森北出版株式会社, 2005.
- [145] A. Carpinteri, G. Lacidogna, Earthquakes and Acoustic Emission, Taylor & Francis Group, 2007.
- [146] A.A. Griffith, The phenomena of rupture and flow in solids, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character* 221 (1921) 163–198.
- [147] 大野健太郎, アコースティック・エミッション法の波形解析によるコンクリート破壊機構解明に関する研究, 熊本大学大学院, 2009.
- [148] 横道英雄, 池田郁雄, 松岡健一, コンクリートにひびわれが生ずるときの弾性波の伝達現象について, *セメント・コンクリート* 212 (1964) 2–6.
- [149] T. Kundu, Acoustic source localization, *Ultrasonics* 54 (2014) 25–38. <https://doi.org/10.1016/J.ULTRAS.2013.06.009>.
- [150] F. Zhang, L. Pahlavan, Y. Yang, Evaluation of acoustic emission source localization accuracy in concrete structures, *Struct. Health Monit.* 19 (2020) 2063–2074. <https://doi.org/10.1177/1475921720915625>.
- [151] M. Ohtsu, T. Shiotani, M. Shigeishi, T. Kamada, S. Yuyama, T. Watanabe, T. Suzuki, J.G.M. van Mier, T. Vogel, C. Grosse, R. Helmerich, M.C. Forde, A. Moczko, D. Breysse, S.A. Ivanovich, A. Sajna, D. Aggelis, G. Lacidogna, Recommendation of RILEM TC 212-ACD: Acoustic emission and related NDE techniques for crack detection and damage evaluation in concrete: Test method for classification of active cracks in concrete structures by acoustic emission, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* 43 (2010) 1187–1189. <https://doi.org/10.1617/s11527-010-9640-6>.
- [152] D.G. Aggelis, Classification of cracking mode in concrete by acoustic emission parameters, *Mech. Res. Commun.* 38 (2011) 153–157. <https://doi.org/10.1016/J.MECHRESCOM.2011.03.007>.
- [153] F. Zhang, Y. Yang, S.A.A.M. Fennis, M.A.N. Hendriks, Developing a new acoustic emission source

- classification criterion for concrete structures based on signal parameters, *Constr. Build. Mater.* 318 (2022) 126163. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.126163>.
- [154] K. Ohno, M. Ohtsu, Crack classification in concrete based on acoustic emission, *Constr. Build. Mater.* 24 (2010) 2339–2346. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2010.05.004>.
- [155] P.R. Prem, V. Ingle, V. Kumar, R. Darssni, Acoustic Emission Characterization Of 3d -Printed Ultra-High Performance Concrete Beams Under Bending, in: *International Association for Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures*, 2024. <https://doi.org/10.21012/fc11.092372>.
- [156] F. Zhang, Y. Yang, Acoustic Emission based Crack Tracking for Concrete Structures, 2019. <https://www.researchgate.net/publication/337428458>.
- [157] H. Takamine, Y. Ueda, K. Watabe, K. Hashimoto, T. Shiotani, Internal Damage Detection of RC Bridge Decks with Uniformly Distributed Elastic Wave Sources, *Journal of Acoustic Emission* 36 (2019) S67–S72.
- [158] T. Shiotani, K. Hashimoto, K. Watabe, H. Takamine, Damage Quantification of RC decks by Means of Rain-Induced AE Excitations and Source Location Bias, *Journal of Acoustic Emission* 36 (2019) S130–S135.
- [159] F. Zhang, Acoustic emission-based indicators of shear failure of reinforced concrete structures without shear reinforcement, Delft University of Technology, 2022.
- [160] F. Zhang, Y. Yang, M. Naaktgeboren, M.A.N. Hendriks, Probability density field of acoustic emission events: Damage identification in concrete structures, *Constr. Build. Mater.* 327 (2022) 126984. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.126984>.
- [161] MISTRAS, R15a sensor, 2011.
- [162] F. Zhang, Y. Yang, M.A.N. Hendriks, Investigation of concrete crack kinematics through probability density field of the location of acoustic emission events, *Constr. Build. Mater.* 400 (2023) 132595. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.132595>.
- [163] J. Blaber, B. Adair, A. Antoniou, Ncorr: Open-Source 2D Digital Image Correlation Matlab Software, *Exp. Mech.* 55 (2015) 1105–1122. <https://doi.org/10.1007/s11340-015-0009-1>.
- [164] Harilal R, Ramji M, Adaptation of Open Source 2D DIC Software Ncorr for Solid Mechanics Applications, in: *9th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics*, 2014.
- [165] N. Gehri, J. Mata-Falcón, W. Kaufmann, Automated crack detection and measurement based on digital image correlation, *Constr. Build. Mater.* 256 (2020) 119383. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.119383>.
- [166] N. Gehri, J. Mata-Falcón, W. Kaufmann, Refined extraction of crack characteristics in large-scale concrete experiments based on digital image correlation, *Eng. Struct.* 251 (2022) 113486. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2021.113486>.
- [167] G. Lacidogna, F. Accornero, A. Carpinteri, Influence of snap-back instabilities on Acoustic Emission damage monitoring, *Eng. Fract. Mech.* 210 (2019) 3–12. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2018.06.042>.
- [168] T.C. Powers, A discussion of cement hydration in relation to the curing of concrete, *Highway Research Board Proceedings* 27 (1948) 178–188.
- [169] G. Ma, J. Zhang, L. Wang, Z. Li, J. Sun, Mechanical characterization of 3D printed anisotropic cementitious material by the electromechanical transducer, *Smart Mater. Struct.* 27 (2018). <https://doi.org/10.1088/1361->

- 665X/aac789.
- [170] K. Nakase, K. Hashimoto, T. Sugiyama, H. Mori, R. Kishira, H. Oomori, Effect of Printing Parameters on Print Quality and Fracture Propagation Behavior of 3D Printed Concrete, *Digital Concrete 2024 - Supplementary Proceedings* (2024). <https://doi.org/10.24355/dbbs.084-202408171052-0>.
- [171] K. Nakase, T. Makino, K. Hashimoto, Y. Hama, Influence of layer height on intra-filament void structure and frost resistance of 3D printed mortar, *Cement Science and Concrete Technology* 79 (2025).
- [172] N. Ashrafi, S. Nazarian, N.A. Meisel, J.P. Duarte, Experimental prediction of material deformation in large-scale additive manufacturing of concrete, *Addit. Manuf.* 37 (2021) 101656. <https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2020.101656>.
- [173] H. Lian, T. Ding, Deformation of inclined concrete 3D printing: A computational fluid dynamics analysis, *Cem. Concr. Res.* 199 (2026) 108032. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2025.108032>.
- [174] R. Comminal, W.R. Leal da Silva, T.J. Andersen, H. Stang, J. Spangenberg, Modelling of 3D concrete printing based on computational fluid dynamics, *Cem. Concr. Res.* 138 (2020) 106256. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2020.106256>.
- [175] M.T. Mollah, R. Comminal, W.R. Leal da Silva, B. Šeta, J. Spangenberg, Computational fluid dynamics modelling and experimental analysis of reinforcement bar integration in 3D concrete printing, *Cem. Concr. Res.* 173 (2023) 107263. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2023.107263>.
- [176] K.K. Yang, J.H. Zhu, C. Wang, D.S. Jia, L.L. Song, W.H. Zhang, Experimental validation of 3D printed material behaviors and their influence on the structural topology design, *Comput. Mech.* 61 (2018) 581–598. <https://doi.org/10.1007/s00466-018-1537-1>.
- [177] S. Hou, Z. Duan, J. Xiao, J. Ye, A review of 3D printed concrete: Performance requirements, testing measurements and mix design, *Constr. Build. Mater.* 273 (2021) 121745. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.121745>.
- [178] Y. Zhang, Y. Zhang, G. Liu, Y. Yang, M. Wu, B. Pang, Fresh properties of a novel 3D printing concrete ink, *Constr. Build. Mater.* 174 (2018) 263–271. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.04.115>.
- [179] W. Zhou, 3D Printing of Engineered Cementitious Composites (3DP-ECC), University of Michigan, 2023.
- [180] N. Puthipad, M. Ouchi, A. Attachaiyawuth, Effects of fly ash, mixing procedure and type of air-entraining agent on coalescence of entrained air bubbles in mortar of self-compacting concrete at fresh state, *Constr. Build. Mater.* 180 (2018) 437–444. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.04.138>.
- [181] X. Huang, X. Hu, H.A. Umar, T. Bai, C. Shi, Formation and stability of bubbles in concrete and their influence on the performance of air-entrained concrete: A state-of-the-art review, *Cem. Concr. Compos.* (2026) 106466. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2026.106466>.
- [182] N. Puthipad, M. Ouchi, S. Rath, A. Attachaiyawuth, Enhancement in self-compactability and stability in volume of entrained air in self-compacting concrete with high volume fly ash, *Constr. Build. Mater.* 128 (2016) 349–360. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.10.087>.
- [183] R. Yoshihara, K. Hashimoto, T. Sugiyama, K. Nakase, Development and Validation of Finite Element Constitutive Model for Meso-scale Compressive Fracture Behavior of 3D Printed Mortar, *Digital Concrete 2024 - Supplementary Proceedings* (2024). <https://doi.org/10.24355/dbbs.084-202408211136-0>.

- [184] N. Ohtsu, A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms, *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.* 9 (1979) 62.
- [185] J.R. Aguilar Cosme, D.C. Gagui, H.E. Bryant, F. Claeysens, Morphological Response in Cancer Spheroids for Screening Photodynamic Therapy Parameters, *Front. Mol. Biosci.* 8 (2021). <https://doi.org/10.3389/fmolb.2021.784962>.
- [186] E. Berrezueta, J. Cuervas-Mons, Á. Rodríguez-Rey, B. Ordóñez-Casado, Representativity of 2D shape parameters for mineral particles in quantitative petrography, *Minerals* 9 (2019). <https://doi.org/10.3390/min9120768>.
- [187] J. Lindblad, Surface area estimation of digitized 3D objects using weighted local configurations, *Image Vis. Comput.* 23 (2005) 111–122. <https://doi.org/10.1016/J.IMAVIS.2004.06.012>.
- [188] C.B. Barber, D.P. Dobkin, H. Huhdanpaa, The Quickhull Algorithm for Convex Hulls, *ACM Transactions on Mathematical Software* 22 (1996) 469–483. <https://doi.org/10.1145/235815.235821>.
- [189] I. Obayashi, T. Nakamura, Y. Hiraoka, Persistent Homology Analysis for Materials Research and Persistent Homology Software: HomCloud, *J. Physical Soc. Japan* 91 (2022). <https://doi.org/10.7566/JPSJ.91.091013>.
- [190] M. Buchet, Y. Hiraoka, I. Obayashi, Persistent Homology and Materials Informatics, in: I. Tanaka (Ed.), *Nanoinformatics*, Springer Singapore, Singapore, 2018: pp. 75–95. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7617-6_5.
- [191] Y. Hiraoka, I. Obayashi, Persistent Homology and Its Applications to Materials Science, *Materia Japan* 58 (2019) 17–22. <https://doi.org/10.2320/materia.58.17>.
- [192] A. Suzuki, M. Miyazawa, J.M. Minto, T. Tsuji, I. Obayashi, Y. Hiraoka, T. Ito, Flow estimation solely from image data through persistent homology analysis, *Sci. Rep.* 11 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-97222-6>.
- [193] M. Kimura, I. Obayashi, Y. Takeichi, R. Murao, Y. Hiraoka, Non-empirical identification of trigger sites in heterogeneous processes using persistent homology, *Sci. Rep.* 8 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21867-z>.
- [194] E.P. Thompson, B.R. Ellis, Persistent Homology as a Heterogeneity Metric for Predicting Pore Size Change in Dissolving Carbonates, *Water Resour. Res.* 59 (2023). <https://doi.org/10.1029/2023WR034559>.
- [195] Z. Pan, A. Atila, E. Bitzek, L. Wondraczek, Topology of anisotropic glasses from persistent homology analysis, *J. Non. Cryst. Solids* 627 (2024) 122801. <https://doi.org/10.1016/J.JNONCRYSTOL.2023.122801>.
- [196] J. Wee, J. Jiang, A Review of Topological Data Analysis and Topological Deep Learning in Molecular Sciences, *J. Chem. Inf. Model.* (2025). <https://doi.org/10.1021/acs.jcim.5c02266>.
- [197] F. Jiang, T. Tsuji, T. Shirai, Pore Geometry Characterization by Persistent Homology Theory, *Water Resour. Res.* 54 (2018) 4150–4163. <https://doi.org/10.1029/2017WR021864>.
- [198] M. Saadatfar, H. Takeuchi, V. Robins, N. Francois, Y. Hiraoka, Pore configuration landscape of granular crystallization, *Nat. Commun.* 8 (2017). <https://doi.org/10.1038/ncomms15082>.
- [199] T. Shiraiwa, S. Kato, F. Briffod, M. Enoki, Exploration of outliers in strength–ductility relationship of dual-phase steels, *Science and Technology of Advanced Materials: Methods* 2 (2022) 175–197. <https://doi.org/10.1080/27660400.2022.2080483>.

- [200] I. Obayashi, HomCloud, (2025). <https://homcloud.dev/index.en.html> (accessed January 4, 2026).
- [201] 大林一平, パーシステントホモロジーに基づくデータ解析パッケージ HomCloud の紹介, n.d.
- [202] H. Edelsbrunner, D. Letscher, A. Zomorodian, Topological persistence and simplification, in: Proceedings 41st Annual Symposium on Foundations of Computer Science, 2000: pp. 454–463. <https://doi.org/10.1109/SFCS.2000.892133>.
- [203] H. Adams, T. Emerson, M. Kirby, R. Neville, C. Peterson, P. Shipman, E. Hanson, F. Motta, L. Ziegelmeier, Persistence Images: A Stable Vector Representation of Persistent Homology, 2017. <http://jmlr.org/papers/v18/16-337.html>.
- [204] J. Versteeg, R.J.M. Wolfs, T.A.M. Salet, Data-driven additive manufacturing with concrete: Enhancing in-line sensory data with domain knowledge, Part I: Geometry, Autom. Constr. 172 (2025) 106020. <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2025.106020>.
- [205] J. Versteeg, R.J.M. Wolfs, T.A.M. Salet, Data-driven additive manufacturing with concrete: Enhancing in-line sensory data with domain knowledge, Part II: Moisture and heat, Autom. Constr. 177 (2025) 106327. <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2025.106327>.
- [206] L. Reiter, T. Wangler, N. Roussel, R.J. Flatt, Slow penetration for characterizing concrete for digital fabrication, Cem. Concr. Res. 157 (2022) 106802. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106802>.
- [207] L. Demont, R. Mesnil, N. Ducoulombier, J.F. Caron, Affordable inline structuration measurements of printable mortar with a pocket shear vane, Constr. Build. Mater. 408 (2023) 133602. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133602>.
- [208] R.J.M. Wolfs, F.P. Bos, T.A.M. Salet, Correlation between destructive compression tests and non-destructive ultrasonic measurements on early age 3D printed concrete, Constr. Build. Mater. 181 (2018) 447–454. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.06.060>.
- [209] N. Ducoulombier, R. Mesnil, P. Carneau, L. Demont, H. Bessaies-Bey, J.F. Caron, N. Roussel, The “Slugs-test” for extrusion-based additive manufacturing: Protocol, analysis and practical limits, Cem. Concr. Compos. 121 (2021) 104074. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2021.104074>.
- [210] A.S.J. Suiker, R.J.M. Wolfs, S.M. Lucas, T.A.M. Salet, Elastic buckling and plastic collapse during 3D concrete printing, Cem. Concr. Res. 135 (2020) 106016. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106016>.
- [211] R.J.M. Wolfs, A.S.J. Suiker, Structural failure during extrusion-based 3D printing processes, International Journal of Advanced Manufacturing Technology 104 (2019) 565–584. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03844-6>.
- [212] R.J.M. Wolfs, T.A.M. Salet, N. Roussel, Filament geometry control in extrusion-based additive manufacturing of concrete: The good, the bad and the ugly, Cem. Concr. Res. 150 (2021) 106615. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2021.106615>.
- [213] 鈴木雅人, 建設用 3DP 材料におけるフレッシュ性状と積層造形性能の評価, 修士論文, 北海道大学大学院工学院, 2026.
- [214] O. Ahi, Ö. Ertunç, Z.B. Bundur, Ö. Bebek, Automated flow rate control of extrusion for 3D concrete printing incorporating rheological parameters, Autom. Constr. 160 (2024) 105319. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105319>.

- [215] R. Rill-García, E. Dokladalova, P. Dokládál, J.F. Caron, R. Mesnil, P. Margerit, M. Charrier, Inline monitoring of 3D concrete printing using computer vision, *Addit. Manuf.* 60 (2022) 103175. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103175>.
- [216] J. Versteeg, T.A.M. Salet, R.J.M. Wolfs, Sensory data mapping and database development for interlayer bond strength: Towards digital shadows in 3D concrete printing, *Addit. Manuf.* 120 (2026) 105105. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2026.105105>.
- [217] W. Cui, W. Liu, R. Guo, D. Wan, X. Yu, L. Ding, Y. Tao, Geometrical quality inspection in 3D concrete printing using AI-assisted computer vision, *Mater. Struct.* 58 (2025) 68. <https://doi.org/10.1617/s11527-025-02594-0>.
- [218] W. Cui, R. Guo, W. Liu, D. Wan, X. Shi, Y. Sun, J. Gong, Y. Tao, Quality assessment of 3D-printed concrete through quantitative visual inspection, *Structural Concrete* 26 (2025) 8292–8306. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/suco.70235>.
- [219] J.S. Bang, H.J. Yim, Unbonded interlayer evaluation in freshly 3D printed concrete using electrical resistivity measurements, *Case Studies in Construction Materials* 21 (2024) e03913. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03913>.
- [220] M. Sovetova, J.K. Calautit, Influence of printing parameters on the thermal properties of 3D-printed construction structures, *Energy* 305 (2024) 132265. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132265>.
- [221] J. Sun, J. Xiao, Z. Li, X. Feng, Experimental study on the thermal performance of a 3D printed concrete prototype building, *Energy Build.* 241 (2021) 110965. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110965>.
- [222] T. Ding, J. Xiao, V. Mechtcherine, Microstructure and mechanical properties of interlayer regions in extrusion-based 3D printed concrete: A critical review, *Cem. Concr. Compos.* 141 (2023) 105154. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2023.105154>.
- [223] X. Huang, W. Yang, F. Song, J. Zou, Study on the mechanical properties of 3D printing concrete layers and the mechanism of influence of printing parameters, *Constr. Build. Mater.* 335 (2022) 127496. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.127496>.
- [224] H. Lee, J.H.J. Kim, J.H. Moon, W.W. Kim, E.A. Seo, Correlation between pore characteristics and tensile bond strength of additive manufactured mortar using X-ray computed tomography, *Constr. Build. Mater.* 226 (2019) 712–720. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.161>.
- [225] S. Markin, J.A.L. Cordova, R. Combrinck, V. Mechtcherine, Deformation behaviour of 3D-printed concrete elements induced by plastic shrinkage, *Constr. Build. Mater.* 449 (2024) 138073. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138073>.
- [226] G.M. Moelich, P.J. Kruger, R. Combrinck, Mitigating early age cracking in 3D printed concrete using fibres, superabsorbent polymers, shrinkage reducing admixtures, B-CSA cement and curing measures, *Cem. Concr. Res.* 159 (2022) 106862. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106862>.
- [227] H.K. Chai, S. Momoki, Y. Kobayashi, D.G. Aggelis, T. Shiotani, Tomographic reconstruction for concrete using attenuation of ultrasound, *NDT & E International* 44 (2011) 206–215. <https://doi.org/10.1016/J.NDTEINT.2010.11.003>.
- [228] K. Hashimoto, T. Shiotani, T. Nishida, T. Miyagawa, Application of elastic-wave tomography to repair

- inspection in deteriorated concrete structures, *Journal of Disaster Research* 12 (2017) 496–505.
<https://doi.org/10.20965/jdr.2017.p0496>.
- [229] 桃木昌平, コンクリート構造物健全性評価のための弾性波トモグラフィ手法に関する研究, 博士論文, 京都大学, 2014.
- [230] H.K. Chai, K.F. Liu, A. Behnia, K. Yoshikazu, T. Shiotani, Development of a tomography technique for assessment of the material condition of concrete using optimized elastic wave parameters, *Materials* 9 (2016).
<https://doi.org/10.3390/ma9040291>.
- [231] A. Sagradyan, N. Ogura, T. Shiotani, Application of elastic wave tomography method for damage evaluation in a large-scale reinforced concrete structure, *Developments in the Built Environment* 14 (2023) 100127.
<https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100127>.
- [232] J., S. Mary, B., S. Wiliam, *Impact-Echo: Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry*, 1997.
- [233] J. Pandum, K. Hashimoto, T. Sugiyama, W. Yodsudjai, Impact-echo for different level cracks detection in concrete with artificial intelligence based on un/supervised deep learning, *Constr. Build. Mater.* 487 (2025) 142080. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2025.142080>.
- [234] T. Shiotani, K. Hashimoto, H. Asaue, T. Nishida, H. Takamine, K. Watabe, M. Fukuda, Lateral damage identification in RC slabs by several tomographic approaches with rainy induced elastic waves, *Journal of Mechanical Engineering* 64 (2018) 657–664. <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2018.5398>.
- [235] 大野健太郎, 下藺晋一郎, 沢田陽佑, 大津政康, AE 波初動部の自動読み取りの開発による SiGMA 解析の改良, *非破壊検査* 57 (2008) 531–536.
- [236] A. Hirotugu, Markovian representation of stochastic processes and its application to the analysis of autoregressive moving average processes, *Ann. Inst. Stat. Math.* 26 (1974) 363–387.
- [237] R. Sleeman, T. Van Eck, Robust automatic P-phase picking: an on-line implementation in the analysis of broadband seismogram recordings, *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 113 (1999) 265–275.
[https://doi.org/10.1016/S0031-9201\(99\)00007-2](https://doi.org/10.1016/S0031-9201(99)00007-2).
- [238] J.H. Kurz, C.U. Grosse, H.W. Reinhardt, Strategies for reliable automatic onset time picking of acoustic emissions and of ultrasound signals in concrete, *Ultrasonics* 43 (2005) 538–546.
<https://doi.org/10.1016/j.ultras.2004.12.005>.
- [239] N. Maeda, A Method for Reading and Checking Phase Time in Auto-Processing System of Seismic Wave Data, *Zisin (Journal of the Seismological Society of Japan. 2nd Ser.)* 38 (1985) 365–379.
- [240] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Guidebook on non-destructive testing of concrete structures, Training Course Series (2002) 110.
- [241] X. Sun, S. Fan, C. Liu, Attenuation characteristics of concrete using smart aggregate transducers: Experiments and numerical simulations of P-wave propagation, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* 35 (2024) 556–572. <https://doi.org/10.1177/1045389X231221132>.
- [242] 本田佳己, 橋本勝文, 杉山隆文, 中瀬皓太, 吉原怜, 深層学習によるたわみ量予測に基づく 3DP コンクリートの積層経路最適化, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集 25 (2025) 507–512.
- [243] L. Breseghello, R. Naboni, Toolpath-based design for 3D concrete printing of carbon-efficient architectural

structures, *Addit. Manuf.* 56 (2022) 102872. <https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2022.102872>.

謝 辞

本論文は、筆者が北海道大学大学院工学院環境フィールド工学専攻修士課程および博士後期課程に在籍中の研究成果について取りまとめたものです。本研究の遂行および8年余りの学生生活において、多くの方々にご支援いただきました。

本研究の遂行にあたり、北海道大学大学院工学研究院土木工学部門・杉山隆文教授には、指導教員として、論文審査における主査を務めていただくとともに、終始温かく懇切丁寧なご指導を賜りました。学部4年時に配属先の研究室選びに悩んでいたとき、先生の研究内容をうかがう機会をいただき、その研究内容の面白さと先生の熱意に感銘を受け、配属先を選びました。5年以上にわたり、先生の幅広い知識と貴重なご示唆により、ご指導いただきました。先生のご厚意に対し、心より御礼申し上げます。

同部門・橋本勝文准教授には、論文審査における副査を務めていただきました。また、修士進学時から本テーマを遂行する機会をいただき、様々な貴重な経験をさせていただきました。博士進学を決断したときから、セメント・コンクリート分野はもちろん、幅広い分野の研究者の方々と議論する機会を与えていただきました。さらに、博士1年時には、オランダ・デルフト工科大学への留学の機会をいただきました。研究者としても、一人の人間としても、これまでと全く異なる環境下に身を置いた経験は、かけがえないものになりました。重ねて感謝申し上げます。

杉山先生、橋本先生には、論文投稿、学会発表、留学、外部資金への申請など、折に触れて新たな挑戦の機会を与えていただきました。これらは当時の私にとって容易なものばかりではありませんでしたが、自身のコンフォートゾーンを出て、成長するための大きな契機となるとともに、日々の研究活動がさらに刺激的なものになりました。また、これらの挑戦に取り組む過程においては、常に惜しみないご支援とご助言をいただき、失敗を恐れず挑戦してみようとする姿勢を寛大に受け入れていただきました。さらに、先生方は私を一人の研究者として尊重し、研究内容について真摯に議論していただきました。そのような日々の議論と研究以外の様々なことも含めた対話は、私自身が独立した研究者として研究に向き合う意識を育んでくれました。先生方の研究に対する熱量や研究活動に取り組む姿勢は、今後の私の人生において、大きな道しるべとなりました。ここに重ねて深く御礼申し上げます。

同部門・松本高志教授、長井宏平教授には、論文審査における副査を務めていただき、研究内容に関する議論を通じて、多くのご助言をいただきました。特に、長井先生がお話されていた「良い準備をすることで、良いフィードバックをもらうことができる」という言葉は、他者との協働が不可欠な研究活動において、自身の考えや研究内容を的確に伝え、建設的なフィードバックを得ながら研究活動を発展させていく上で、今後も大切にすべき教えであると感じております。ここに心より感謝申し上げます。

3D コンクリートプリンティング分野の研究を進めるにあたり、3D プリンタ装置の所有は多くの研究者にとって、設備面で大きなボトルネックとなる部分です。本研究における種々の実験の遂行にあたり、多くの共同研究者の方々にご協力いただきました。

第2章および第5章における3DPコンクリートの作製においては、太平洋セメント株式会社中央研究所に設置されたプリンタ装置を使用しました。同研究所・河野克哉博士（Nghi Son Cement Corporationに出向中）、森寛晃氏、岸良竜博士、大森寛人氏には、供試体作製において多大なご協力をいただきました。また、研究所に伺った際の打ち合わせや論文投稿時には、多くの貴重なご助言をいただきました。ここに深く感謝申し上げます。

Chapter 3 is based on the research conducted during my stay at Delft University of Technology (TU Delft) from January to March 2025. I would like to express my sincere gratitude to Dr Yuguang Yang of the Department of Engineering Structures for kindly hosting me during my visit. His broad expertise in concrete structures and acoustic emission was invaluable. I am also deeply grateful to Dr Yubao Zhou for his comprehensive support in both experiments and data analysis. Despite his own PhD thesis, he worked closely with me throughout the research. Thanks to their generous support, I was pleased to receive the IAES Paper Award at IIIAE2025 Nagoya and the JSNDI Academic Encouragement Award (2025 年度日本非破壊検査協会 学術奨励賞) for the paper based on the experimental results in TU Delft. I sincerely look forward to continuing our collaboration and further developing this research together in the future.

第4章においては、北海道大学大学院工学研究院技術センター・本田佳己氏が開発した3Dプリンタ装置により、供試体を作製しました。北海道大学における3Dコンクリートプリンティングに関する研究活動においては、当該プリンタ装置が不可欠であり、本田氏がこれまで培ってきた高い専門性とコンクリート工学における最先端技術の融合により、本研究は飛躍的に加速することになりました。ここに深く感謝申し上げます。加えて、同大学大学院工学院環境フィールド工学専攻吉原伶氏、鈴木雅人氏、Mr. Di Lou、山田海矢氏、福地健人氏の3Dコンクリートプリンティングチーム諸子には、供試体作製において多大なご協力をいただきました。心より感謝いたします。また、第4章は、同大学大学院工学研究院建築都市部門および室蘭工業大学大学院もの創造系領域・濱幸雄教授との共同研究の一部です。定期的なミーティングおよび論文執筆の際には、濱先生がこれまでなされてきたセメント・コンクリート材料における気泡や空隙に関する知識に基づき、多大なご協力とご助言をいただきました。深く御礼申し上げます。

第2章および第4章におけるX線CT法に関する議論は、北海道大学大学院工学研究院建築都市部門・北垣亮馬教授が所有するX線CT装置をお借りし、実施したものです。ここに記し、御礼申し上げます。同様に、第2章におけるデジタル画像関連法に関する議論においては、同大学大学院工学研究院土木工学部門・渡部靖憲教授が所有する高速度カメラをお借りし実施したものです。快く装置をお貸ししていただくとともに、日頃より温かい励ましのお言葉と研究生活における貴重なご助言を賜りました。ここに記し、深く感謝申し上げます。

研究室の先輩方、同期、後輩の皆様とは、日々の研究室活動での真剣な議論から、他愛のない雑談やイベントを通じて、非常に刺激的で充実した研究室生活を送ることができました。特に研究室同期の高橋尚氏、彌永貫至氏においては、修士課程修了後も継続的に連絡を取り合う中で、博士号取得に関して温かく応援していただきました。ここに記し、感謝申し上げます。その他の皆様についても、今後の各々のステージでのご活躍を心より祈念するとともに、これまでの多大なるご支援に深く感謝いたします。また、研究室の秘書さんには、研究室生活における様々な面でサポートしていただきました。特に、海老澤直子氏は、環境機能マテリアル工学研究室の秘書業務に従事していただくようになった頃から、私が研究費を獲得し始め、様々な面でご支援いただきました。研究費での物品購入や出張申請等、煩雑な事務処理に関して多大なご助言とサポートをしていただきました。博士後期課程在学中には複数の研究助成を獲得しましたが、その研究活動を円滑に進めることができたのも、海老澤様に事務との連絡を密にとっていただき、不明点を解消していただけたおかげです。ここに示し、感謝申し上げます。

また、大学進学と同時に実家を離れて、学生生活を過ごす私を日々遠方から温かく応援し、援助してくれた家族に心から感謝を申し上げます。父は、研究者としての姿を幼いころから私に示してくれ、博士課

程への進学および博士課程での研究活動を常に応援してくれました。人生で最も尊敬する人である父が祖父の背中を追ったように、分野は違いますが、今後は、私とその背中を追っていくことが楽しみです。母は、何気ない日にも頻繁に連絡をくれ、遠方から温かく応援してくれました。そうした心遣いは、落ち込む日にも気分をリセットしてくれる心強いサポートでした。深甚なる感謝を申し上げます。

最後に、本研究は、多くの研究助成による支援を受けて実施したものです。JSPS 科研費 JP25KJ0501、JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム JPMJSP2119、(一財) 日本建設情報総合センター研究助成事業、一般社団法人セメント協会第 39 回セメント協会研究奨励金、北大研究者海外派遣支援プログラムの支援を受け実施いたしました。申請段階から採択後、研究期間にわたって、これらの研究助成に採択いただいたことで生まれたご縁が多々ありました。研究活動を進めるにあたり、自身の研究に求められていることを意識する契機となり、研究活動への社会からの期待を実感し、研究成果を社会へ還元することの重要性に触れる機会となりました。ここに記して皆様のご支援に謝意を表し、本論文の謝辞とします。

2026 年 4 月

中瀬 皓太

