

論文 AE 法を用いた積層経路が異なるモルタル積層体の曲げ破壊挙動の評価

中瀬 皓太*1・橋本 勝文*2・杉山 隆文*3・大森 寛人*4

要旨: 3D プリンティング技術によるコンクリートの造形においては、使用材料および配合に加え、ノズル形状や材料押出速度等の積層パラメータの選定が重要である。加えて、吐出材料間に形成される積層界面は積層体の力学的性能に大きく影響を及ぼすことが知られている。一方で、積層界面の配置に関連する積層パラメータである積層経路の影響は十分に検討されていない。本研究では、積層経路が異なる積層体の曲げ応力下における破壊進展挙動を評価した。特に、アコースティック・エミッション (AE) 法による評価を行った結果、積層界面の配置によって異なる破壊形態に伴う AE 発生挙動が観察された。

キーワード: 3D コンクリートプリンティング, 積層経路, 積層界面, AE 法, 曲げ破壊

1. はじめに

3D コンクリートプリンティングは近年、コンクリート施工において耳目を集める施工技術である。省人化施工による生産性および現場の安全性の向上ならびに自由曲面の実現が期待されている。年々指数関数的に施工事例が増加し、新たな施工技術としてますますの普及が見込まれる。このとき、3D プリンティング技術によって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、従来の流込み施工に対して、考慮すべき点が多い。流込み施工では、予め決定した形状の型枠内に材料を充填し、適切に締め固める。一方で、3DP コンクリートの造形では型枠を必要とせず、設計データを基に制御されたノズルから材料を三次元空間に直接吐出および堆積 (積層) させることで造形を行う。このため、従来の流込み施工においても考慮される使用材料の選定および配合に加えて、造形方法である積層パラメータを十分に検討する必要がある。現在、主に検討されている積層パラメータは、ノズル形状、材料押出速度および積層時間間隔 (ギャップタイム) である^{1) 2)}。これらの積層パラメータは流込み施工において考慮されることのないパラメータであり、3DP コンクリート特有の概念といえる。

材料の吐出および堆積による造形プロセスに起因して、3DP コンクリートには積層構造が形成される。このとき、吐出材料であるフィラメントの界面における積層界面の形成が指摘され、積層界面の物性が積層体の力学性能に大きく影響を及ぼすことが知られている^{3) 4)}。積層界面の形成は 3DP コンクリートの作製において避けられない現象であり、積層界面の形成に影響を及ぼす要因である積層パラメータや、積層界面領域における空隙構造お

よび力学特性に関する研究が行われている^{1) 2)}。

以上より、積層界面は 3D コンクリートプリンティングにおける重要な要素と位置付けられるが、積層界面における接着の程度や空隙構造が積層体の力学特性に及ぼす影響を考慮した例は見られるのに対し^{3) 4)}、吐出材料間に形成される積層界面の配置が積層体の力学特性に及ぼす影響を考慮した例は多く見られない⁵⁾。すなわち、積層体の造形において、積層界面の配置に関わる積層パラメータである積層経路が積層体の力学性能に及ぼす影響を検討した例はほとんどない。

積層界面の配置が積層体の力学特性に及ぼす影響を検討するとき、積層界面が積層体全体に対して微小な領域であることを考慮すれば、積層体の破壊挙動において微小破壊の検出が必要であると考えられる。本研究では、アコースティック・エミッション (AE) 法を用いて、異なる積層経路によって造形した積層体の曲げ応力下における破壊挙動を評価した。このとき、検出された AE 信号のパラメータ解析によって、異なる積層経路に伴って変化する積層界面の配置の影響を評価した。

2. 実験概要

2.1 積層体の作製

(1) 使用材料と配合

配合を表-1 に示す。使用材料として、普通ポルトランドセメントおよびシリカフュームから構成される 3DP 専用プレミックス粉体を結合材 (B) とし、珪砂 (F.M.: 1.66, 2.58g/cm³) を細骨材 (S) として使用した。水結合材比 (W/B) は 20% とし、ポリカルボン酸系高性能減水剤を練混ぜ水の一部として、1.6 (B×w%) 添加した。モ

*1 北海道大学大学院 工学院 環境フィールド工学専攻 (学生会員)

*2 北海道大学大学院 工学研究院 土木工学部門 准教授 博士 (工学) (正会員)

*3 北海道大学大学院 工学研究院 土木工学部門 教授 Ph.D. (正会員)

*4 太平洋セメント (株) 中央研究所 高機能コンクリートチーム 修士 (工学) (正会員)

ルタルフロー値として 15 打フローは 154mm となった。また、積層体と同材料および同配合を用いて型枠への流込みによって作製した直径 50mm かつ高さ 100mm の円柱供試体の材齢 28 日における圧縮強度は、105N/mm²であることを確認した。

(2) 積層経路

図-1 に示す積層経路により、112×100×400mm の積層体を造形した。使用した 3D プリンタのノズル径が 16mm のため、積層体はその倍数である 112mm の幅としている。既往の研究⁹⁾と同様に、パターン(1)では、外側から内側に向かって順に外周を囲うように積層している。パターン(2)では、長辺方向に往復するように積層する。パターン(3)では、短辺方向に往復するように積層を行う。パターン(4)では、奇数層目を長辺方向に積層し、偶数層目では短辺方向に積層を行う。

積層パラメータとして、ノズル径 16mm、積層ピッチ（一層あたりの高さ）を 10mm、ノズル移動速度を 25mm/sec に設定し、10 層積層後に造形完了とした。造形後の供試体の養生条件は気中養生とした。

2.2 アコースティック・エミッション (AE) 法

AE 法は、固体材料内部の微小な破壊に伴うエネルギーの開放過程に生じる弾性波現象を検出する手法である。コンクリート工学分野では、ひび割れの発生および進展と関連付けることで、構造物の破壊を評価できる^{6) 7)}。

図-2 に物体内部の微小破壊に起因して検出される AE 信号の例と AE パラメータを示す。本研究では、積層経

表-1 配合表

W/B (%)	単位量 (kg/m ³)			
	W	B	S	SP (B × w%)
20	217	1085	1085	1.6

路が異なる積層体の曲げ破壊挙動の解析に、AE 波形の立ち上がり時間および最大振幅の比で表される RA 値ならびに設定したしきい値を超える振幅数の累積数であるカウント数および AE 波形の継続時間の比で表される平均周波数を用いたひび割れモード分類を行った。AE 計測には広帯域 AE センサを使用し、サンプリングレート 1MHz (サンプル数：1024、プレトリガー：256μsec) とし、しきい値は 40dB とした。8 個の AE センサを図-3 に示す供試体表面位置に、酢酸ビニル樹脂系接着剤を用いて三次元的に配置した。

2.3 三点曲げ試験

作製した積層体に対して材齢 14 日経過後、三点曲げ試験を行った。載荷速度は 0.2mm/min に制御し、試験中に載荷装置から出力される荷重を取得した。その後、式(1)により供試体の曲げ強度を算出した。積層体の寸法誤差は、幅および長さが 1%以下、高さが 7%以下であることを確認し、曲げ強度の算出には実寸法を使用した。

$$f_b = \frac{3Pl}{2bh^2} \quad (1)$$

ここで、 f_b ：曲げ強度 (N/mm²)、 P ：最大荷重 (N)、 l ：スパン (mm)、 b ：破壊断面の幅 (mm)、 h ：破壊断面の高さ (mm) である。積層体と同材料および同配合を用いて作製した 100×100×400mm の流込み供試体および各パターンの積層体について 2 体ずつ試験を実施した。

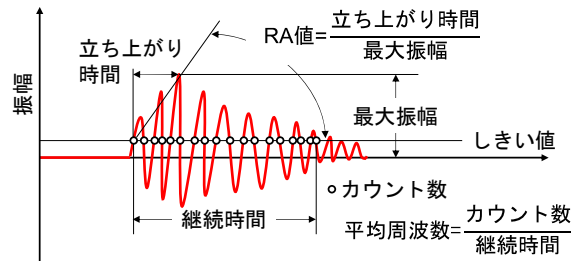
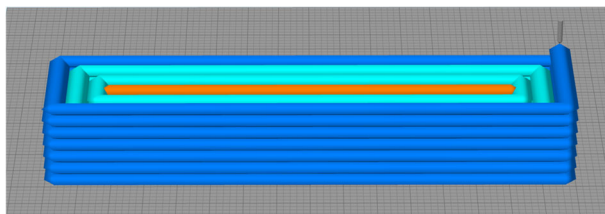
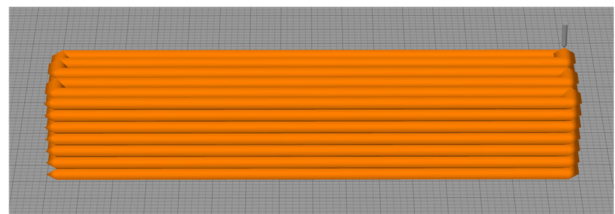


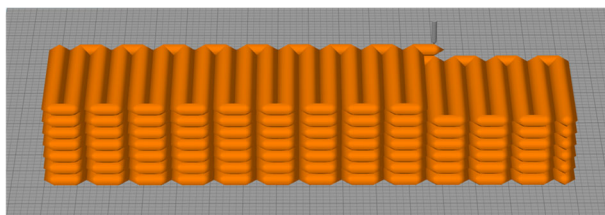
図-2 AE 波形の概要と用語の説明



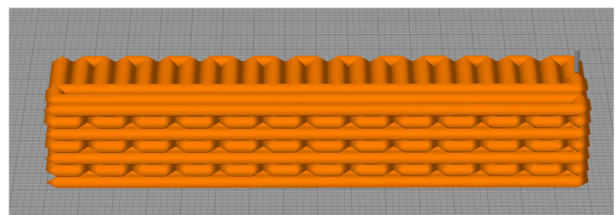
パターン(1)：外周を囲うように積層



パターン(2)：長辺方向に積層



パターン(3)：短辺方向に積層



パターン(4)：直交する二方向に積層

図-1 積層経路パターン

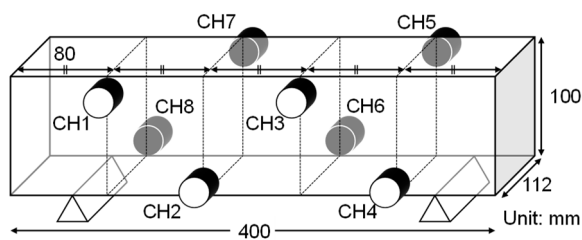


図-3 AE センサの配置

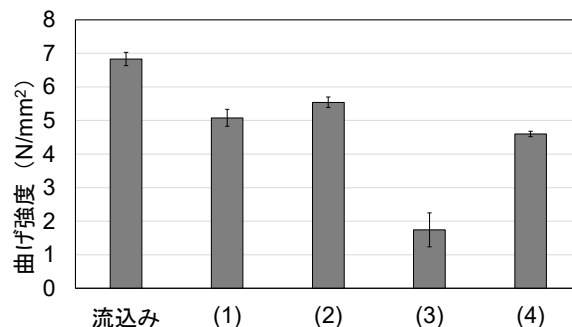


図-4 曲げ強度結果

3. 実験結果

3.1 曲げ強度

図-4 に三点曲げ試験により得られた各供試体の曲げ強度を示す。エラーバーは各データの最大値および最小値を示す。積層経路によらず、積層体の曲げ強度は流込み供試体の曲げ強度より小さい。これは、均質に流込みおよび適切に締められた流込み供試体に対して、積層体では、積層経路に起因して形成される積層界面に応力が集中した結果、曲げ強度が低下していると考えられる。

スパン間において、供試体軸方向に対して平行（長辺方向）に積層したパターン(1)および(2)の曲げ強度に対して、供試体軸方向に垂直（短辺方向）に積層したパターン(3)の曲げ強度は65%以上低下している。これは、短辺方向に積層した積層体では、引張応力が水平面内で隣接するフィラメントを割裂する方向に作用するためである。このように、積層経路が積層界面の配置に影響を及ぼし、積層体の力学性能に変化が現れることが示された。

直交する二方向に積層したパターン(4)において、偶数層目では曲げ強度が最小となる短辺方向への積層を含んでいるが、それと交互に奇数層目では、長辺方向に積層を行っている。そのため、パターン(4)の曲げ強度はパターン(3)に対して、164%向上している。すなわち、パターン(1)および(2)の曲げ強度に対して、約10%程度の低下に留まっている。これより、一部の層を長辺方向に積層することで、積層体の力学性能を向上させることができることが示された。

3.2 荷重および AE Hit 数の経時変化

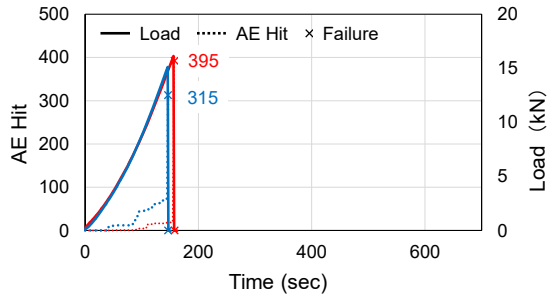
図-5 に三点曲げ試験における荷重および AE Hit 数の経時変化を示す。AE Hit 数は、曲げ試験時に8つのチャンネルで検出した AE 信号の累計数である。図の実線および点線はそれぞれ荷重および AE Hit 数を示し、図中の赤線および青線は積層経路パターンごとに三点曲げ試験を実施した2体の供試体の結果を示している。

図-5(a)に示す流込み供試体では、載荷荷重がピークを迎えた時点で、瞬間的に供試体が破壊し、短時間で AE 信号が検出されている。それに対して、積層体では、ポストピークにおいても一定時間、破壊に至らず AE 信号の検出が継続している。また、図-6 に示す破壊後の供

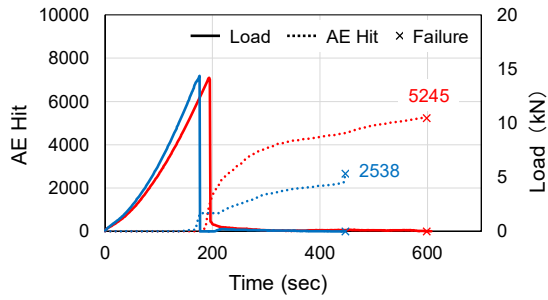
試体下面において、図-6(a)の流込み供試体ではひび割れは一直線に進展している。一方で、図-6(b)および(c)に示すパターン(1)および(2)ではフィラメントごとにひび割れの発生位置が異なる。これは、各フィラメントが応力を分担しながら、引張縁から逐次強度が小さい箇所からひび割れが生じたためと考えられる。段階的にひび割れが進展することで、フィラメント同士の噛み合わせにより荷重が保持されていたことを示唆している。すなわち、各フィラメントに発生したひび割れ位置が異なることで、フィラメントが噛み合い、ポストピークにおいて一定時間破壊に至らず、AE Hit 数が増加したことが理解できる。

パターン(1)および(2)では、スパン間の積層経路はどちらも長辺方向の積層であるが、図-6(b)および(c)に数字で示すように各層におけるフィラメントの積層順序が異なる。パターン(1)では、外側から内側に向かって外周を囲うように積層しているが、パターン(2)では、長辺方向に往復する形で積層を行っている。そのため、ギャップタイムに相当する、任意のフィラメントが吐出されてから隣接するフィラメントが吐出されるまでの時間は、パターン(2)の方が短くパターン(1)では比較的長くなる。これにより、水平面内で隣接するフィラメント間の接着力がパターン(1)の方が低下すると考えられる⁸⁾。結果として、図-6(b)においてパターン(1)の各フィラメントにおけるひび割れ位置のばらつきは、図-6(c)のパターン(2)におけるひび割れ位置のばらつきより大きい。加えて、図-4 に示す曲げ強度結果においても、パターン(1)の曲げ強度に対してパターン(2)の曲げ強度が高く、水平面内で隣接するフィラメント間における上述の接着力の影響を確認することができる。

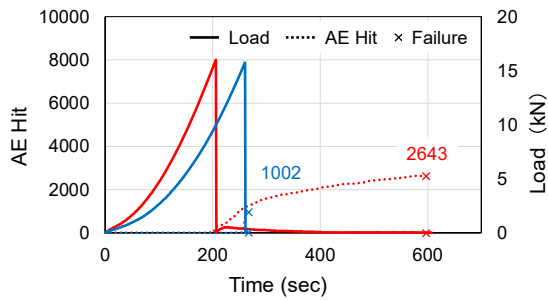
図-5(d)に示す短辺方向に積層したパターン(3)において、ピーク時の AE Hit 数が約6000 および9000 となり、ほかの積層経路パターンに対して多くの AE 信号が検出されている。これは、隣接するフィラメント間に形成された積層界面に対して垂直（引張）方向に応力が作用するためである。既往の研究⁹⁾においても示されてい



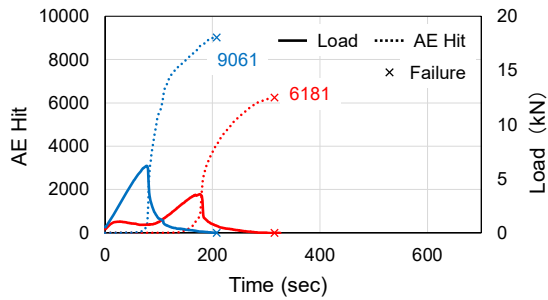
(a) 流込み供試体



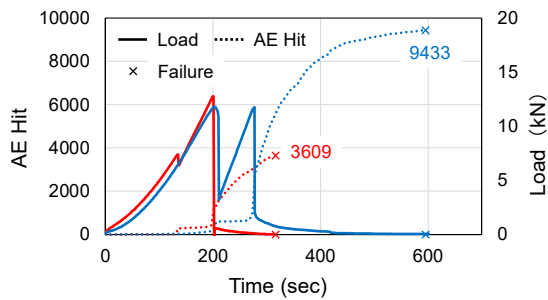
(b) パターン(1)



(c) パターン(2)

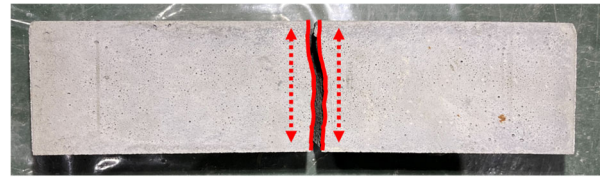


(d) パターン(3)



(e) パターン(4)

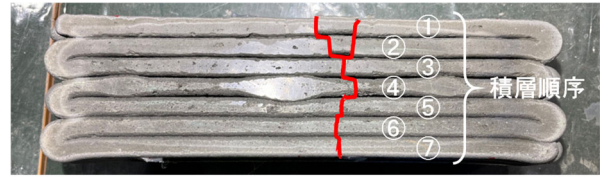
図-5 荷重および AE Hit 数の経時変化



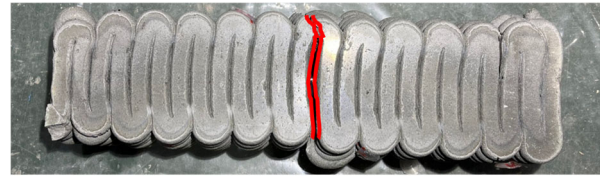
(a) 流込み供試体



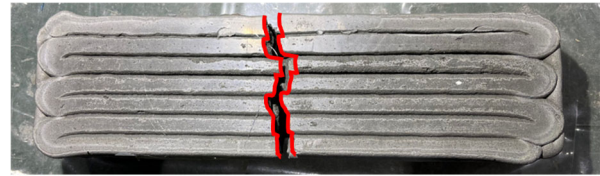
(b) パターン(1)



(c) パターン(2)



(d) パターン(3)



(e) パターン(4)

図-6 試験後の供試体下面におけるひび割れの様子

るように、積層界面は積層体における脆弱部分であり、破壊の起点となる積層界面に引張応力が作用することで、AE 信号を発生する微小破壊が多数発生したと考えられる。また、スパン中央の積層界面に応力が集中した結果、図-6(d)に示すようにひび割れ発生位置は積層界面に沿っており、ばらつきは小さい。

図-5(e)に示す長辺および短辺方向に交互に積層を行ったパターン(4)の結果において、青実線で示される荷重がプレピークにおいて一時的に減少している。これは、載荷装置および供試体間に設置した球座がずれたことにより荷重が除荷されたためである。ここで、試験を行った二つの供試体において、AE Hit 数が大きく異なることが確認できる。赤点線で示される積層体では比較的長辺方向に積層したパターン(1)および(2)に近い AE Hit 数である。一方で、青点線で示される積層体では、短辺方向

に積層したパターン(3)程度の AE Hit 数が検出されている。しかしながら、図-4 に示すようにパターン(4)の曲げ強度の変動係数は2%以下と小さい。そのため、大局的な曲げ破壊挙動には大きく影響を及ぼさないながらも、破壊進展挙動においては長辺方向に積層を行った層あるいは短辺方向に積層を行った層のどちらが支配的な要因を示したかを表していると言える。

3.3 ひび割れモードの分類

AE 信号のパラメータ解析による RA 値および平均周波数を用いて、供試体内部に発生した微小ひび割れを引張モードおよびせん断モードに分類できる^{6) 7)}。曲げ載荷時の破壊機構においては、破壊初期段階では引張モードを示す低い RA 値および高い平均周波数を持つ AE 信号が検出され、破壊の進展に伴って、せん断モードを示す高い RA 値および低い平均周波数を持つ AE 信号が検出されることが報告されている⁷⁾。すなわち、破壊初期段階にひび割れが形成される過程で引張モードの AE 信号が検出され、そのひび割れ面においてせん断モードのひび割れによる AE 信号が検出されることで曲げ破壊挙動の進行を評価できる。ひび割れモード分類のための RA 値と平均周波数間の線形関係の傾きについて一般的

な基準は定められていない。本研究では、3DP コンクリートの曲げ破壊時のひび割れモード解析を行った先行研究¹⁰⁾を基に 1:4 の割合を用いた。この直線より低 RA 値および高平均周波数(直線の左側)に位置する AE 信号が引張モードと分類され、高 RA 値および低平均周波数(直線の右側)に位置する AE 信号がせん断モードと分類される。図-7 に各供試体における RA 値および平均周波数の関係ならびにピーク荷重前後におけるひび割れモード割合を示す。図中の赤色および青色による表記は各パターンにおける二つの供試体をそれぞれ分類している。各点のプロットは、ポストピーク時に発生した AE 信号の解析結果を白抜きで表示している。モード分類におけるエラーバーは、各サンプルにおけるひび割れモード割合の最大値および最小値を示す。

図-7(a)および(f)より、流込み供試体においては、既往の研究^{6) 7)}に見られるように、プレピークに検出される AE 信号は低 RA 値および高平均周波数を有しており、グラフ左側に分布している。一方で、ポストピークに検出された AE 信号は高 RA 値および低平均周波数を示す、グラフ右側に分布している。この傾向は図-7(b)から(f)に示すように積層体においても見られ、曲げ載荷による

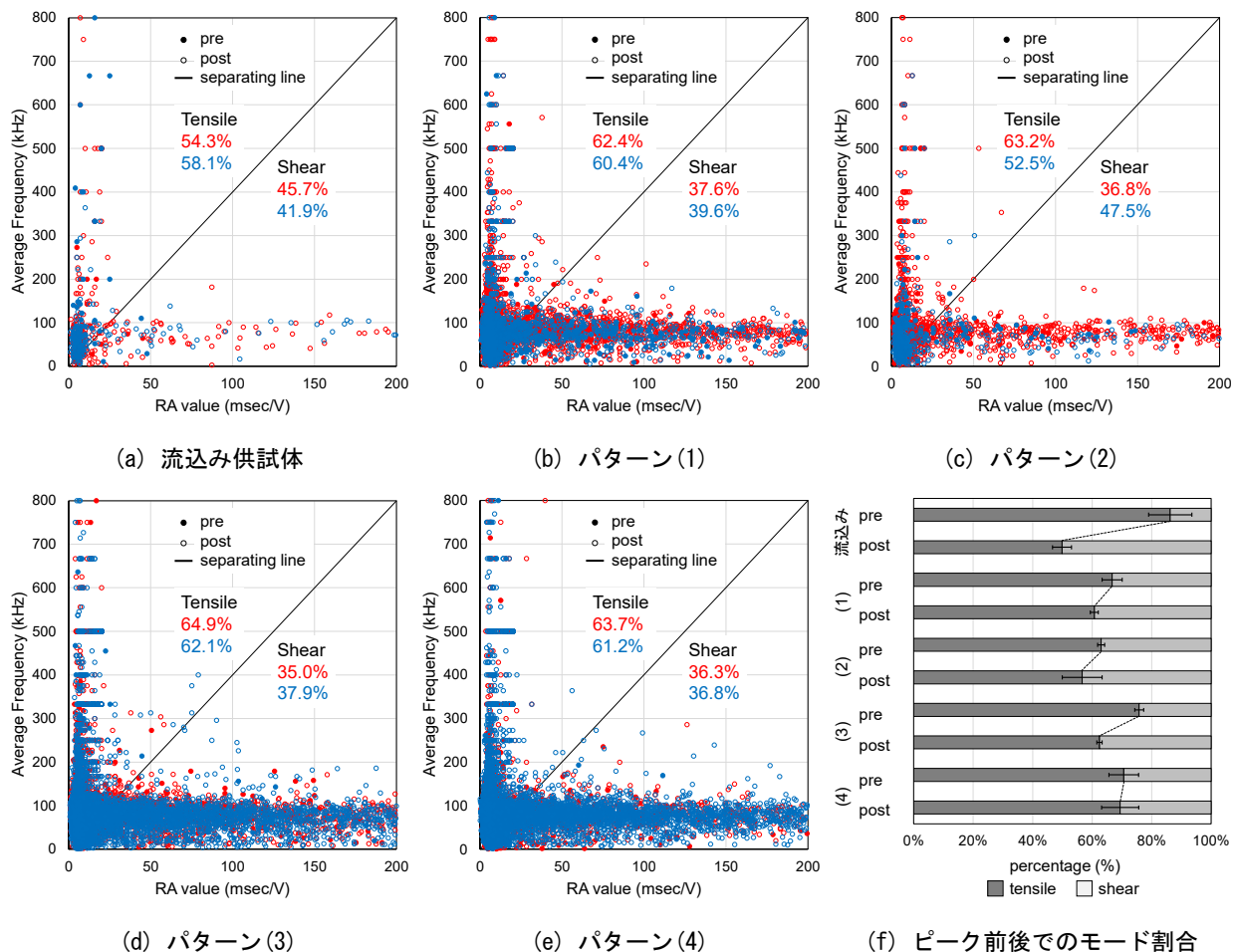


図-7 ひび割れモードの分類

破壊進展挙動は、初期段階に引張モードを示す AE 信号割合が卓越する。その後、破壊の進行に伴ってせん断モードを示す AE 信号割合が増加する。

図-7(f)に示すように、短辺方向に積層したパターン(3)では、引張モードの AE 信号の割合がその他の積層パターンに対して、プレピークにおいて多く、ピーク前後における減少率が大きい。これは、積層方向が供試体軸方向に垂直であるため、供試体下部に作用する引張応力が長辺方向に隣接するフィラメントを割裂する方向に作用しているためであると考えられる。すなわち、水平面内で隣接するフィラメント間に形成された積層界面に対して垂直に引張応力が作用することで、引張モードの微小破壊によって破壊が容易に進展していると考えられる。その結果、短時間でピーク荷重に到達し最小の曲げ強度を示したことが理解できる。

長辺および短辺方向に交互に積層したパターン(4)における引張モードの割合は、プレピークではパターン(1)および(2)と比較すると大きく、パターン(3)と比較すると小さい。ポストピークでは、パターン(4)における引張モードの割合が他の積層体に対して多い。これは、短辺方向の積層に起因する積層界面において、パターン(3)で見られたプレピークで容易に進行した破壊が、交互に積層された長辺方向の積層によりせき止められ、ポストピークにおいて発生したためであると考えられる。このことから、AE 法による破壊モードの同定により積層界面で発生する微小破壊を特徴づけることができ、短辺方向の積層によって引張破壊に伴うひび割れの発生が増加することが分かった。

4. まとめ

以下に本研究で得られた知見を示す。

1. 積層体の曲げ強度において、長辺方向に積層した積層体の曲げ強度に対して、短辺方向に積層した積層体では、曲げ強度が低下する。これは、応力の作用方向に対する積層界面の配置によるものであり、積層体の力学特性に積層界面の配置が影響するためである。また、長辺方向と短辺方向に交互に積層した積層体では、一部の層を長辺方向に積層を行うことで、短辺方向に積層した積層体に対して、曲げ強度が向上する。
2. 曲げ試験におけるピーク荷重を迎えたあと、流込み供試体では、瞬間的に破壊が進行する。積層体では、フィラメントごとに段階的に破壊が進展し、フィラメントが噛み合うことでポストピークにおいても AE Hit 数が増加し続ける。短辺方向の積層体では、破壊の起点となる積層界面が応力の作用方向に対して垂直に配置されたことで、他のパターンに対し

て多くの AE Hit 数が検出される。特に、ひび割れモード分類においては、引張モードの微小破壊が短辺方向の積層体で多くなる。3DP コンクリートの曲げ破壊挙動において、短辺方向への積層造形を行う場合、引張破壊に伴うひび割れの発生が増加する。

参考文献

- 1) Wolfs, R. J. M., Bos, F. P. and Salet, T. A. M.: Hardened properties of 3D printed concrete: The influence of process parameters on interlayer adhesion, *Cement and Concrete Research*, Vol.119, pp.132–140, May 2019.
- 2) Ding, T., Xiao, J. and Mechtcherine, V.: Microstructure and mechanical properties of interlayer regions in extrusion-based 3D printed concrete: A critical review, *Cement and Concrete Composites*, Vol.141, 105154, Aug.2023.
- 3) Xiao, J., Liu, H. and Ding, T.: Finite element analysis on the anisotropic behavior of 3D printed concrete under compression and flexure, *Additive Manufacturing*, Vol.39, 101712, Mar.2021.
- 4) Heras Murcia, D., Genedy, M. and Reda Taha, M. M.: Examining the significance of infill printing pattern on the anisotropy of 3D printed concrete, *Construction and Building Materials*, Vol.262, 120559, Nov.2020.
- 5) 中瀬皓太, 橋本勝文, 杉山隆文, 河野克哉: 建設用 3D プリンタの積層経路が異なるモルタル積層体の圧縮破壊時におけるひび割れ進展挙動と変形分布の関係, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.45, No.1, pp.1600–1605, 2023.7
- 6) Ohno, K. and Ohtsu, M.: Crack classification in concrete based on acoustic emission, *Construction and Building Materials*, Vol.24, pp.2339–2346, Dec.2010.
- 7) Aggelis, D. G.: Classification of cracking mode in concrete by acoustic emission parameters, *Mechanics Research Communications*, Vol.38, pp.153–157, Apr.2011.
- 8) Geng, Z. et al.: Layer-interface properties in 3D printed concrete: Dual hierarchical structure and micromechanical characterization, *Cement and Concrete Research*, Vol.138, 106220, Dec.2020.
- 9) Liu, H. et al.: Influence of pore defects on the hardened properties of 3D printed concrete with coarse aggregate, *Additive Manufacturing*, Vol.55, 102843, Jul.2022.
- 10) J. G. Yue et al.: Hardened fracture characteristics of printed concrete using acoustic emission monitoring technique, *Construction and Buildings Materials*, Vol.361, 129684, Nov.2022.