

論文 3DCP による積層体内の空隙評価への超音波法の適用

加藤 竜祥^{*1}・Khurram Shahzad^{*2}・藤 駿哉^{*1}・國枝 稔^{*3}

要旨：本研究では、3DCP による積層体内部の空隙の有無の評価を目的に、非破壊検査として超音波を用いた透過法により超音波伝播速度を算定し、測定部分をコア削孔した供試体の目視観察結果や密度との対応関係について考察を行った。その結果、モールドを用いた空隙のない供試体における超音波伝播速度に比べて、3DCP により積層した供試体での超音波伝播速度は小さい場合もあったが、切断した内部観察では空隙の影響か否かは判別できなかった。一方、空隙が連続的に生じている方向と超音波の測線が一致する場合においては、算定された超音波伝播速度によって空隙の有無が判別できる可能性が示された。

キーワード：3D プリンティング、空隙、透過法、超音波伝播速度

1. はじめに

近年、建設用 3D コンクリートプリンティング（以下、3DCP）を用いた研究が国内外において取り組まれており、実際に 3DCP を用いた様々な構造物の施工実績も数多く報告されている^{1,2)}。3DCP 技術を導入することで施工の自動化による人手不足の解消、工期の短縮、材料費の削減、複雑な形状の造形が可能となる。既往の研究では主に材料開発や 3DCP により作製されたモルタル硬化体の強度評価が多い。3DCP により作製された積層体においては、フィラメント間に図-1 に示すような空隙が生じる懸念がある。実構造物においては、そのような空隙が生じないような材料設計、プリントパスの設定を入念に行うことで、空隙発生に対するリスクを低減するが、プリント中の条件の変化により、空隙が生じる可能性もある。その場合に、空隙が生じているか否か、定量的にどの程度の寸法の空隙が生じているかを確認するために、コア削孔（小径コアを含む）をすることも可能ではあるが、超音波法など、非破壊的に評価できることが望ましい。

コンクリート内部の比較的大きな空隙を超音波法を用いて評価する試みは、鎌田ら³⁾がポーラスコンクリートの空隙率を測定しており、体積空隙率 30%程度までの評価が可能であることを示している。

本研究では、積層していく段階において、各層の変形量を測定し、高さごとのフィラメントの沈下具合を測定しながら構築した壁状の積層体に対して、非破壊検査として超音波を用いた透過法により超音波伝播速度を算定し、測定部分をコア削孔した供試体の目視観察結果や密度との対応関係について考察することで、3DCP による積層体内部の空隙の有無の評価を試みた。



図-1 フィラメント間の空隙の例

2. 実験概要

2.1 本研究で用いた 3D プリンタ

本研究で用いた 3D プリンタを図-2 に示す。プリンタ本体には六軸ロボットアーム用い、ホースでモノポンプと接続した。ポンプには脈動することなく一定量を圧送可能な回転容積式一軸偏心ねじポンプを用いた。ロボットアームの先端には内径 25mm の円筒ノズルを取り付けた。

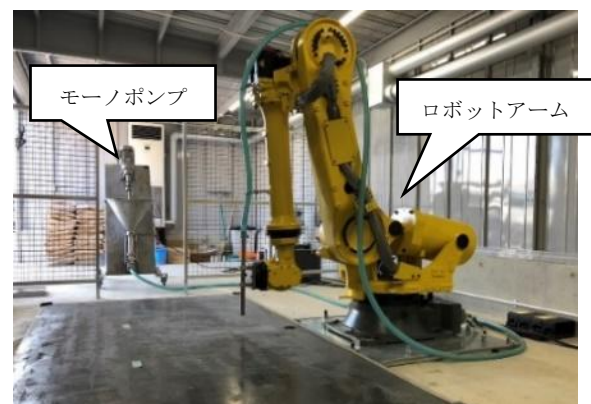


図-2 本研究で用いた 3D プリンタ

*1 岐阜大学大学院 自然科学技術研究科環境社会基盤工学専攻 (学生会員)

*2 岐阜大学大学院 工学研究科

*3 岐阜大学 工学部社会基盤工学科教授 博士(工学) (正会員)

2.2 使用する材料

積層に用いるモルタルは、定常的にポンプで押出しが可能な流動性と積層後に自立するコンシステンシーを有する必要がある。既往の研究⁴⁾に示された配合を参考に、表－1 に示す配合のモルタルを使用した。材齢 28 日において、モールド (φ50mm×100mm) に同一配合の材料を打ち込んだ円柱供試体を用いて強度試験を実施した結果を表－2 に示す。

表－1 モルタルの配合

単位量 (kg/m ³)					
水	セメント	混和材	膨張材	5号珪砂	混和剤
336	720	310	20	720	1.4

表－2 モルタルの硬化後の強度試験結果

	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)
σ ₂₈	65.6	4.3

2.3 積層体の作製

(1) 概要

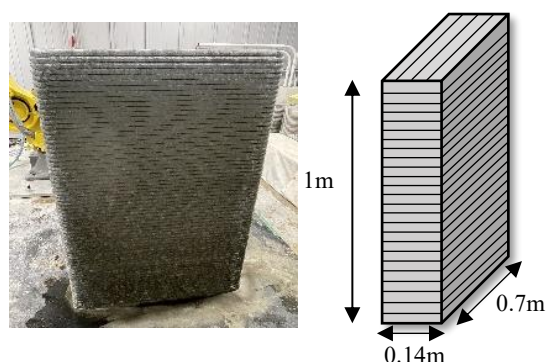
JIS R 5201 に準じた 15 打フロー値 160mm±2mm 程度のモルタルを用いて図－3 に示すように長さ 0.7m、高さ 1.0m、厚さ 0.14m の積層体を構築した。積層時にレーザー変位計をロボットアームの先端に取り付け、各層 4 列中の 2 列 (図－4 中の赤矢印) に対して、吐出されたフィラメント表面までの距離を測定した。測定の概要を図－5 に示す。積層開始時の距離を値 0 とし、積層中の距離の変化 (変形量) を測定した。なお、設計どおりに積層できていれば、測定点との距離が 0mm となり、マイナス側の値は設計高さよりも積層体上面が沈下しており、プラス側の値は、設計高さよりも積層体上面が高くなっていることを示している。また積層数が多く、土台となる下層が自重等により潰されないようにするため、ケイ酸ナトリウム水溶液の急結剤を滴下した。急結剤の滴下方法は、図－5 に示すように二本のパイプをノズルに沿わせ、最終的にノズルをつたってフィラメントの上面や側面に滴下し、フィラメントの外殻のみ硬化させる特徴がある。

(2) 積層中の変形量

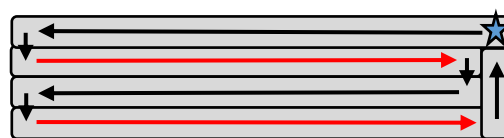
既往の検討において、15 打フロー値 150mm の材料を用いて積層していく段階において、壁の下段 (1 層目から 10 層目まで) の変形量を図－6 に示す。これによれば、最初の 4 層までは徐々に測定点からの距離が大きくなっていき、グラフも右下がりになっている。すなわち、鉄板の上に積層するため、鉄板とフィラメントの間での横方向の滑りが大きく、全体が潰れていることを示してい

る。逆に、図－7 に示すように壁の中段 (28 層目から 35 層目) での積層では、測定点との距離が -2mm と変化が少ないことから、全体の沈下が収まっている。本研究で用いたモルタルは、先述のとおり 15 打フロー値が 160mm 程度であることから、さらに沈下傾向を示すことが懸念された。よって、1 層目から 5 層目までの積層が完了する時間程度経過すれば、大きな沈下が生じないと考え、1 層目を積層したのち一旦積層を中断し、約 1 分 30 秒経過後に、第 2 層目以降の積層を再開した。

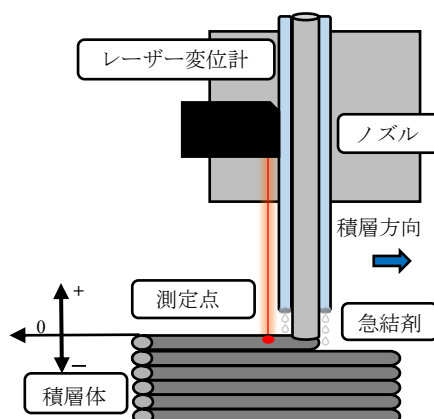
フローが 160mm のモルタルを用いた場合の下段から上段までの測定結果を図－8～10 に示す。また測定中の様子を図－11 に示す。下段に関しては、第 2 層目以降から徐々に測定点との距離が近づいていき、第 4 層目以降は、測定点との距離が一定となりその差は 0.5mm 程度となった。1 層目を積層してから時間を置いたため、鉄板上にある 1 層目のフィラメントの横移動が低減されたことによると考えられる。中段および上段においても、約 0.5mm 程度の差を保ったまま、積層出来ていることが分かる。



図－3 作製した積層体と積層体寸法



図－4 積層パスの順序 (始点：星印)



図－5 測定概要

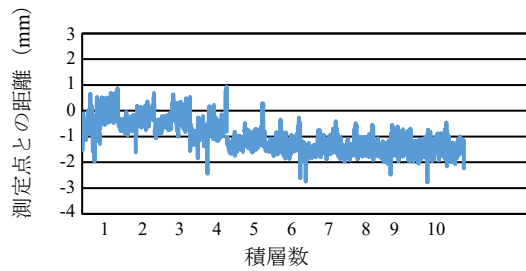


図-6 下段における測定点との距離（フロー150mm）

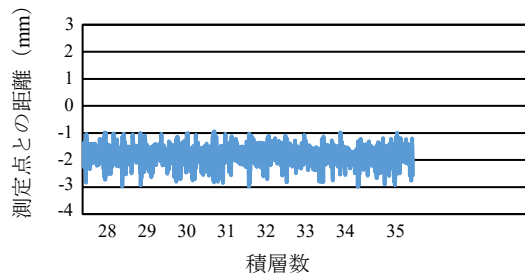


図-7 中段における測定点との距離（フロー150mm）

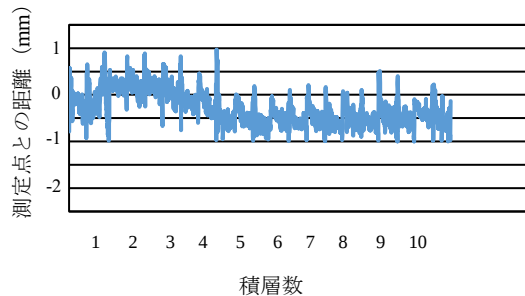


図-8 下段における測定点との距離（フロー160mm）

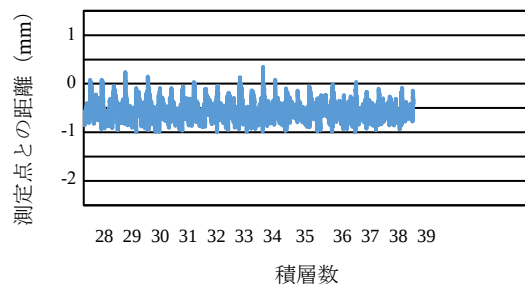


図-9 中段における測定点との距離（フロー160mm）

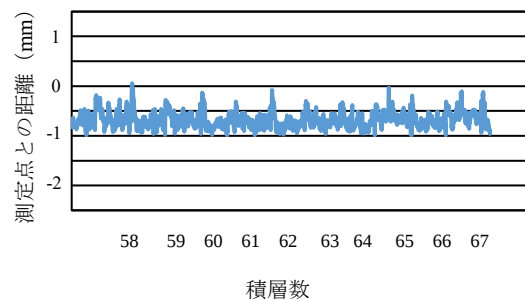


図-10 上段における測定点との距離（フロー160mm）

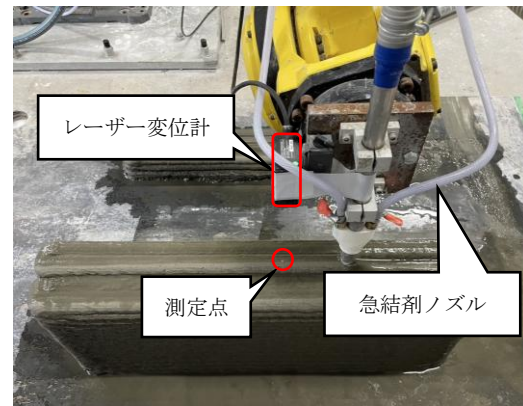


図-11 測定の様子

2.4 超音波法による超音波伝播速度の測定

15 打フロー値 160mm の材料を用いて構築した積層体に対して、高さ方向に 5 段階(1:最上段, 2:上段, 3:中段, 4:下段, 5:最下段)に分け、各段 5 か所において透過法により超音波伝播時間を測定し、積層体の厚さの実測値を用いて、超音波伝播速度を計算した。積層体における測定箇所を図-12 に示す。使用機器は、P 社製の超音波測定器を用いた。入力波は 20kHz～500kHz の成分を持つパルス波とし、探触子の直径は 50mm とし、共振周波数 54kHz のものを用いた。接触媒質には、コンクリート用接触媒質を用いた。

積層体の表面には、積層に伴って生じる 3DCP 特有の凹凸があるため、測定にあたっては、将来的に実構造物を対象に測定する可能性を考慮し、探触子を積層体の凹凸面に直接接触させて測定したケース（研磨無し）と、積層体表面の凹凸をグラインダーで平滑に研磨したケース（研磨有り）の 2 種類の条件で測定した。また、比較のために、基準となる伝播速度の計測には、モールド（φ50×100mm）に同一配合の材料を打ち込んだものを使用した。

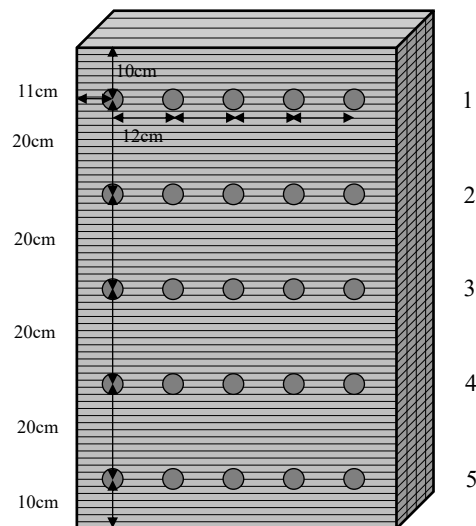


図-12 積層体における測定箇所

2.5 積層体からのコアの採取

作製した積層体において超音波にて測定した箇所からそれぞれコアを採取した。積層体内における採取箇所は図-12に示した超音波法の測定箇所と一致する。内径50mmのコアドリルを用いて、およそφ50×120mmの円柱供試体を得た。

3. 超音波伝播速度による内部空隙の評価

3.1 超音波伝播速度の算定

表面を削らずに直接測定した研磨無しのケースの結果を図-13に、表面を削った後の研磨有りのケースの測定結果を図-14にそれぞれ示す。縦軸は伝播速度、横軸は積層体における位置(1:最上段, 2:上段, 3:中段, 4:下段, 5:最下段)を表している。空隙が存在した場合には、特定の周波数の波が減衰するとともに、超音波は空隙の周りを沿って遠回りするような経路を取るため、超音波伝播時間が大きくなり、結果として超音波伝播速度が小さくなる。すなわち、超音波伝播速度が大きいほど内部の空隙が少ないことを意味している。なお、通常のコンクリートでは、使用材料やコンクリートの強度にもよるが、4000～4500m/secと言われており⁹⁾、今回使用したモールドの結果はその範囲にあり、測定方法として適切であると考えられる。

まず、研磨無しのケースのいずれの結果も、同一材料をモールドに詰めた結果との比較において、3DCPによる積層体での結果が明らかに小さくなっている。また、研磨有りの測定結果との比較から、研磨によって200m/sec程度の変化があることから、研磨無しの場合は明らかにフィラメント寸法に依存した表面の凹凸の影響が認められる。

3DCPによる積層体を対象としたケースの範囲内においては、研磨無しのケースの測定結果においては上段(2の位置)、研磨有りのケースでは中段(3の位置)において伝播速度がやや小さい結果となった。すなわち上段、中段に該当する測定箇所において空隙がある可能性が高いことを示している。

3.2 コアの採取と密度の測定

超音波法による測定終了後のコア供試体を用いて、密度を測定した。密度は十分に吸水させたコア供試体の質量を測定し、アルキメデス法により求めたコア供試体の体積で除して求めた。図-15に採取したコアの状況を示す。なお、写真中において赤枠で記載したものは列間剥離していたが、コア採取時に剥離したもので、超音波測定時には少なくとも密着していたと推察している。

上段(2の位置)において採取されたコア供試体では、積層されたフィラメント間に空隙が生じている部分があり、特に壁の外側に面したフィラメントに隣接して空隙

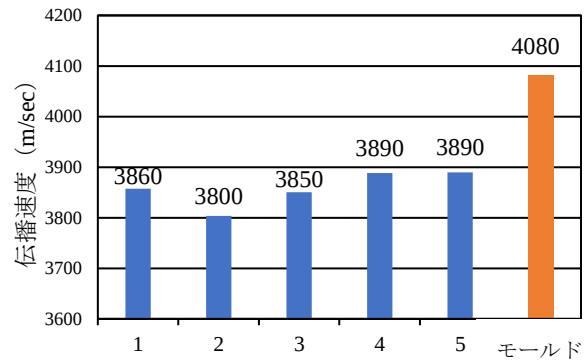


図-13 超音波伝播速度（研磨無し）

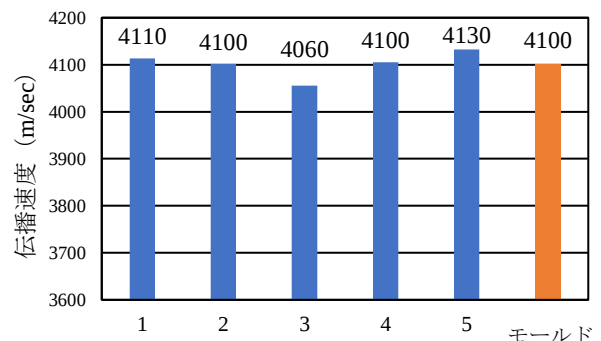


図-14 超音波伝播速度（研磨有り）

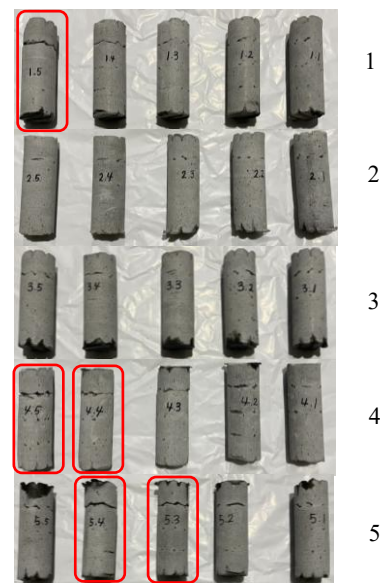


図-15 コアの状況

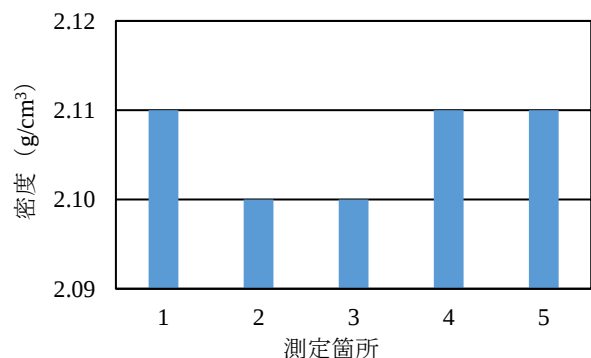


図-16 コアの密度

が生じていた。最も外側のフィラメントは外側から拘束されるものがないため、外側に移動し易いことが原因として考えられる。なお、壁の高さ方向において、空隙の発生状況に違いは認められなかった。

以上のように、コアの側面において目視にて確認できる空隙と、超音波伝播速度との関係性については明確にはできなかったため、コアの密度を測定した結果について考察を行った。同一高さの5本のコア供試体の密度の平均値を図-16に示す。およそ2.1g/cm³であり、各ケースにおいて、明確な違いは認められなかったが、上段(2の位置)および中段(3の位置)の密度がやや小さい結果であった。

4. 測定区間の長さによる影響

4.1 実験概要

3章にて使用した壁状の積層体(図-12)から、図-17の赤枠に示すように長さ200mmの供試体を3体切り出し、先の測定と同様の手順にて超音波伝播速度を算出した。図に示すように、同一供試体内において、測線を2つとし(A-A'測線、B-B'測線)、2か所で超音波の測定を行った。次に、長さ200mmの供試体の測定終了後、図-17に示すように長さ100mmとなるように切断した。例えば、供試体1からは2つの切片(切片1、切片2)が切り出され、それぞれについて先のA-A'測線とB-B'測線の2か所で超音波の測定を行うことで、測定長さの影響について検討した。

4.2 測定結果

表-3に200mmにおける超音波伝播速度を示す。3章で測定された高さ方向の位置とは異なるものの、超音波伝播速度はやや小さい結果となった。これは、測定区間が3章の場合に比べて約2倍となり、伝播距離が長くなることにより超音波が減衰したと推察される。よって、測定長さの異なる結果を比較する際には注意する必要がある。

表-4に、この供試体から切り出された切片1と切片2の結果を示す。なお、先述のとおり、超音波の測定は、200mm、100mmいずれの場合もA-A'測線とB-B'測線にて行った。

供試体1の切片1および供試体2の切片1を除けば、測線B-B'における超音波伝播速度が測線A-A'の結果に比べて小さくなっており、空隙の存在を示唆する結果を示している。

図-18に各切片について、測線に沿って切断した断面を示す。これによれば、表-4において超音波伝播速度が小さい測定箇所には明らかに空隙が確認でき、超音波伝播速度の結果と対応していることが分かった。特に空隙が連続的に生じている方向と、測線が一致しているた

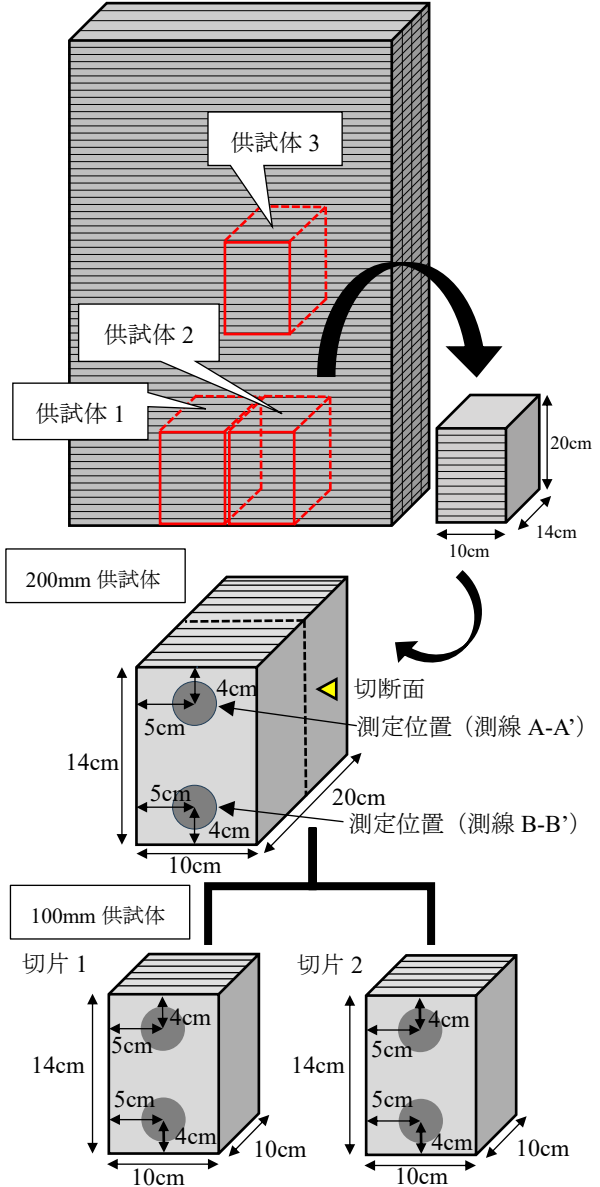


図-17 供試体採取位置(上図)と200mm 供試体(中央図)、100mm 供試体(下図)

表-3 200mm 供試体における測定結果

	測線 A-A'	測線 B-B'
供試体 1	3900	3860
供試体 2	3900	3860
供試体 3	3910	3860

単位 : m/sec

表-4 100mm 供試体における測定結果

	切片 1		切片 2	
	測線 A-A'	測線 B-B'	測線 A-A'	測線 B-B'
供試体 1	4000	4020	3940	3880
供試体 2	4020	4020	4100	3860
供試体 3	4260	4130	4250	4100

単位 : m/sec

め、超音波伝播速度の差異が顕著となったと推察された。

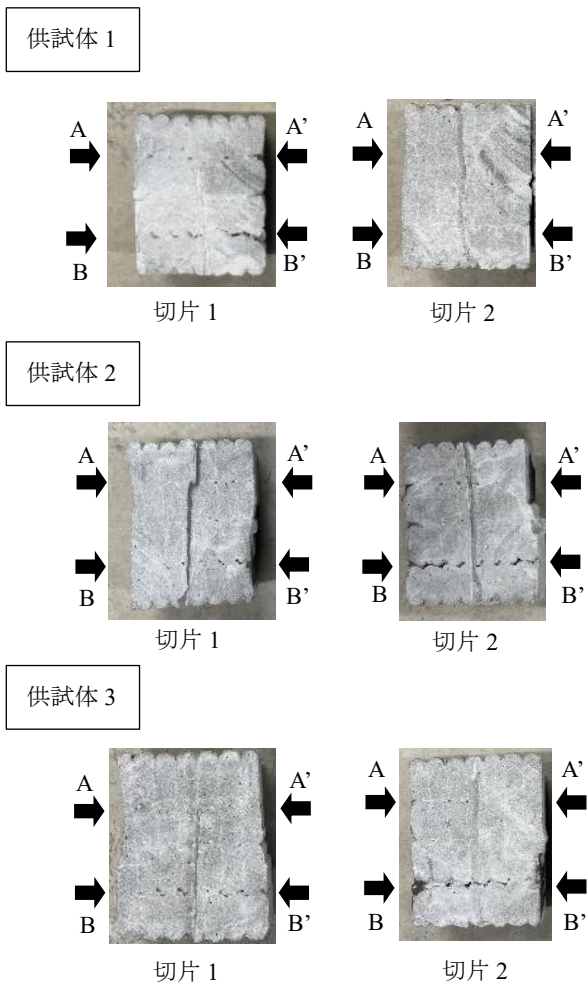


図-18 各供試体の断面

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- ・ 3DCP により積層した壁状の積層体を対象に超音波に

よる透過法を用いて超音波伝播速度を算定したところ、型枠に充填した場合に比べて小さくなる場合があり、内部に空隙が存在する可能性を示していることが分かった。ただし、コア削孔による目視観察を行ったところ、伝播速度の違いと空隙の量との関係は明確ではなかった。

- ・ コア削孔した供試体の密度は、当該箇所にて算定された超音波伝播速度とやや相関が認められたが、データの蓄積が必要である。
- ・ 空隙が連続的に生じている方向と超音波の測線が一致する場合においては、算定された超音波伝播速度によって空隙の有無が判別できる可能性が示された。

なお、空隙のサイズや連続性によっても、超音波法の適用範囲が変化することが示唆されたことから、定量的な検証が引き続き必要である。

参考文献

- 1) 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, 2021.11
- 2) 土木学会:3D プリンティング技術の土木構造物への適用に関する研究小委員会(364 委員会)成果報告書, 2023.10
- 3) 鎌田敏郎, 国枝稔, 島崎磐, 六郷恵哲: 超音波によるポーラスコンクリートの内部組成の評価, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.733-738, 1998
- 4) 藤駿哉, 石原弘登, 宮島朗, 國枝稔: 建設用 3D プリンタによるフィラメントの強度評価, 土木学会全国大会第 78 回年次学術講演会, V-420, pp.1-2, 2023
- 5) 日本コンクリート工学会: コンクリート診断技術'24, pp.147, 2024