

3D プリンティングで製作した積層体の強度特性

大成建設（株）技術センター 社会基盤技術研究部 正会員 ○ 張 文博 村田 哲
木ノ村 幸士 畑 明仁

1. はじめに

筆者らは、これまで開発した建設用 3D プリンティング技術に基づき、3 次元断面を有した全長 6m の PC 構造体（図-1）を設計・製作し、大型実証プロジェクトを行った。本プロジェクトは、積層構造に起因する硬化体物性の把握や、積層構造体の設計、施工ノウハウの蓄積、構造性能評価の基礎検討を目的としている。

本稿では、上記の構造体の設計に資するために、それぞれに積層体コアおよび中空角柱ブロック試験体（以下、中空積層部材）の強度特性を報告するとともに、確認された積層体特有の破壊形態に着目して考察を行う。

2. 試験概要

（1）配合および使用材料

積層材料の配合を表-1 に示す。結合材(P)には、高い初期反応性を有するセメントを使用した。細骨材には、最大粒径が 2mm、粗粒率が 2.86 の砕砂(S1)と比表面積が 8000cm²/g 程度の微粉末(S2)を併用した。混和剤には水溶性の分離低減剤(V)、ポリカルボン酸系高性能減水剤(SP)、消泡剤(De)および有機酸系の凝結遅延剤(Re)を用い、外割添加とした。実際に使用する際は、上記の全材料を予め混合してプレミックス粉体とした。

表-1 積層材料の配合								
W/P (%)	単位量 (kg/m ³)					添加量 (B×%)		
	W	P	S1	S2	V	SP	De	Re
37	271	732	879	366	37	0.20	0.20	1.20

（2）試験内容および試験体の製作方法

まず、積層体の基礎物性を把握するため、図-2 に示すように積層体からコアを採取して、圧縮強度、ヤング係数および割裂引張強度試験に供した。次に、構造体にプレストレス導入のための貫通孔を有するような中空構造体の強度や破壊形態を確認するため、図-2 に示す中空積層部材を製作し、圧縮試験を行った。なお、材齢 24 時間にてコアを採取した。また、積層体コアと中空構造体の比較基準として、それぞれにφ100×200/110mm およびφ50×100mm の突固め供試体を製作した。

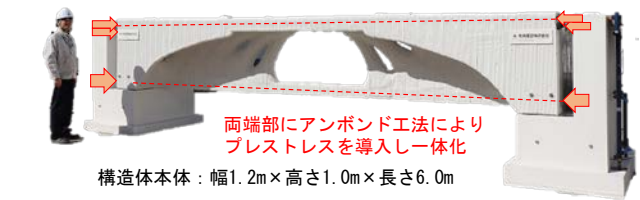


図-1 PC 構造体の概要



図-2 コア採取（割裂方向）および中空積層部材

材料の練り混ぜには 100L の二軸強制ミキサを用い、プレミックス粉体を 15 秒空練りし、注水後に 2 分練り混ぜ後かき落とし、更に 2 分練り混ぜた。

なお、積層体と中空積層部材の製作は、既往研究にて開発した 3D プリンティングシステム¹⁾を用いて実施した。材料の保管から材齢 24 時間までの期間中では、気温が外気温の影響で変動する同一の実験室で実施した。外気温に多少のばらつきがあったが、練混ぜ直後のフレッシュ性状に有意な差は見られなかった。

積層体コアおよびφ 100mm 突固め円柱試験体は、材齢 24 時間から各試験日までの期間、温度 20℃、湿度 60%R.H.の恒温恒湿室にて気中保管した。一方、中空積層部材およびφ50mm 突固め円柱試験体は、外気温の影響を受ける実験室内にて試験日まで気中曝露とした。

3. 試験結果

（1）積層体コアの基礎強度特性

圧縮強度、ヤング係数および割裂引張強度試験は、それぞれ JIS A 1108, JIS A 1149 と JIS A 1113 に準拠して実施した。割裂引張強度の測定方向は、図-2 に示すように、縦目と横目の 2 種類を設定した。

キーワード 3D プリンティング、積層体、圧縮強度、割裂引張強度、圧縮ヤング率

連絡先 〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町 344-1 大成建設(株) 技術センター 社会基盤技術研究部 TEL 045-814-7228

各強度値を図-3 に示す。突固め試験体に対する積層体コアの圧縮強度比は、材齢 7 日と 28 日でそれぞれに 0.85 と 0.82 となり、2 割程度減少した。また、積層体コアのヤング係数は材齢 7 日で 20.5GPa、28 日で 21.7GPa であった。一方、突固め試験体に対する積層体コアの引張強度比は、横目方向では 1 割程度減少したが、縦目方向では 2 割程度減少した。この結果から、割裂引張強度は縦目方向で顕著に低下する強度異方性が確認された。

積層体コアの圧縮破壊の状況を図-2 に示しており、層間に並んだ空隙を結ぶように縦方向にひび割れが進展する特徴がある。一方、縦目引張試験体の割裂面においても、層間に連続した筋状の空隙があり、それを結ぶようにひび割れが進展していた。従って、連続した筋状の空隙が積層体の弱部となってひび割れが進展したことで、力学特性に悪影響を与えるものと推察される。

(2) 中空積層部材の強度特性

突固め供試体と比べ、中空積層部材は、材齢 7 日の圧縮強度は同等であったが、28 日では、2 割ほど低い値を示した(図-4)。また、ヤング係数も 2、3 割程度低くなった。しかし、養生条件などに影響されるものの、中空積層部材は図-3 に示す積層体コアと同等あるいはそれ以上の強度特性を有することがわかった。そこで、後報²⁾にてクリープ試験や PC 構造体の設計は、図-3 に示す積層体コア 7 日の圧縮強度(30.0MPa)に準じて行った。

中空積層部材の荷重-変位曲線の一例および破壊状況を図-5 に示す。圧縮試験の変位は、部材各辺中央部において 4 測線(①~④)にて計測した。試験体の破壊形態は均等変形と偏在変形パターンの 2 種類に分類できる。均等変形パターンでは、荷重の増加に伴い 4 つの変位が同等であった。これに対して、図-5 に示す偏在変形パターンでは、最大荷重の 1/10 以内では均等に変形したが、荷重が増加すると、対称 2 箇所の変位(例えば、材齢 7 日の①と③)が明らかに大きく分離し、荷重の増大とともに変位の差が大きくなった。一方で、供試体破壊の変形パターンに関係なく、荷重-変位曲線には 2 つの共通点がある。まず、図-5 に示すように最大荷重の約 1/3 以下の範囲において、荷重が一定の時に変位が急激に変化した。また、各材齢の 3 体試験体の最大荷重がほぼ一致した。

試験体の典型的な破壊状況は、最大荷重の 1/3~1/2 の範囲において縦方向のひび割れが発生したのち、最大荷重において上端よりコーン状の斜めひび割れが発生

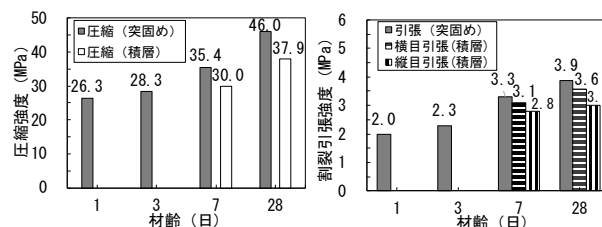


図-3 積層体コアの強度特性 (20°C, 60% R.H.)

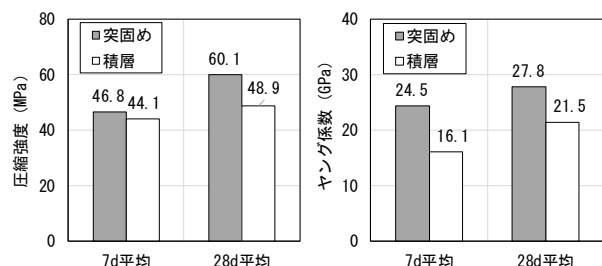


図-4 中空積層部材の強度特性 (夏期室内気中曝露)

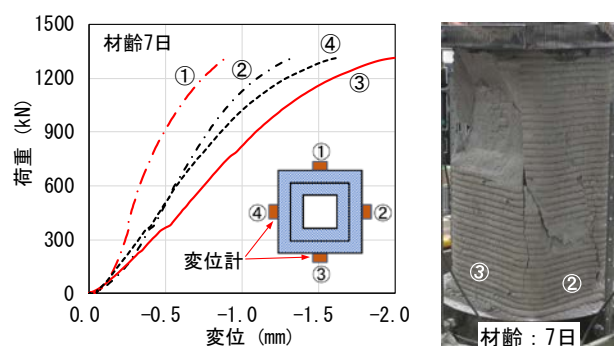


図-5 中空積層部材の荷重-変位曲線(偏在変形パターンの一例)および典型的な破壊状況

して破壊に至った(図-5)。ひび割れ面を観察すると、内殻と外殻の間に連続した筋状の空隙が存在していた。このことから、同図に示す変位が急激に変化したことは、積層体の内殻と外殻の横方向に隣り合う層の境目でひび割れが進展したことが推察される。

4. まとめ

積層体コアと中空積層部材の圧縮強度は、同条件の突固め供試体と比べ 2 割ほど低減する。また、積層体の割裂引張強度は顕著な異方性がある。積層体の層間に存在する空隙がその力学特性に大きな影響を与える。

謝辞

本研究の実施にあたり太平洋セメント(株)より材料を提供いただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 村田ら: 3D プリンタ技術を応用した新たなコンクリート施工法の開発と展望, 大成建設技術センター報, 第 51 号, pp.23-1~23-6, 2018.
- 2) 村田ら: 3D プリンティングで製作した積層体のクリープ特性, 第 75 回土木学会年次学術講演会講演概要集, 2020. (投稿中)