

論文 3D プリンティングで製作した積層体の硬化物性と収縮特性

村田 哲*1・張 文博*2・木ノ村 幸士*2・畑 明仁*2

要旨: 筆者らは、生産性や安全性の向上、新たな構造の実現を目指して建設用 3D プリンティング技術の開発を進めてきた。一方で、本技術による部材の製作においては、積層中の鉄筋補強が困難であるため、引張力が作用する構造部材に適用できないことが最大の課題であった。この課題を克服すべく、3D プリンティングで製作した部材を接合しプレストレスを導入して歩道橋として成立させる大型実証プロジェクトを実施した。本稿では、PC 歩道橋の設計に必要な積層体の各種硬化物性および収縮特性を取得した。3D プリンティングで製作した積層体では、強度異方性や特有の破壊形態、収縮の進行および収束が早いことが確認された。
キーワード: 3D プリンティング, 積層体, 硬化物性, 異方性, 圧縮クリープ, 乾燥収縮

1. はじめに

技能労働者の高齢化や新規入職者の減少に伴い、建設業の労働力不足は年々深刻化している。さらには、働き方改革による長時間労働の削減や事業継続性の観点からも、生産性の向上は、建設業における喫緊の課題である。

筆者らは、これまで生産性や安全性の向上、また従来型のコンクリート施工技術では難しい新たな構造の実現を目指して材料押出方式の建設用 3D プリンティング技術の開発を進めてきた¹⁾。高チキソトロピー性を有する特殊なセメント系材料を開発・適用し、実大規模の部材を迅速かつ高精度に自動製作できることや、トポロジー最適化手法を用いて全体の剛性を保ちながら軽量化を図った複雑な形状のベンチを、設計通りに製作実現できることを実証している^{2),3)}。

しかしながら、これらはいずれも意匠性を重視した非構造体でありオブジェという位置づけであった。一般的に、材料押出方式の建設用 3D プリンティングは、積層しながら鉄筋補強できないため、引張力が作用する構造部材に適用できないことが最大の課題とされている。現状、3D プリンティングへの適用が考えられる補強方法としては、事前に鉄筋等の補強材を配置する方法、短繊維を混合してプリンティングする方法やケーブル補強材を製作中に埋め込む方法、製作後に補強材を挿入しプレストレスを導入する方法が挙げられているが⁴⁾、実規模スケールでの構造設計・製作・性能評価事例は、世界的に見ても数例しかない^{5),6)}。

そこで、空洞や曲線を含む合理的な構造を形として再現できる 3D プリンティング技術の利点を生かすべく、3 次元的に断面が変化するアンボンド工法を用いた PC 歩道橋を設計し、構成する多種多様な断面部材を 3D プリンティングにより製作・接合した後、プレストレスを導入して PC 構造体として成立させる大型実証プロジェクト

を実施した。本プロジェクトは、積層構造に起因する硬化物性の把握や、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 PC 歩道橋の設計に資するために実施した事前の各種要素試験の結果を報告するとともに、確認された積層体特有の破壊形態やクリープ性状に着目して考察を行う。

2. プロジェクト概要

2.1 検討手順

本プロジェクトの検討手順を図-1 に示す。PC 歩道橋の設計に必要な、積層体の硬化物性および収縮特性の取得は、コア供試体を対象とする基礎物性試験、ブロック供試体を対象とする部材物性試験に分けて行った。詳細については後述するが、本稿はこれらの試験結果を対象としている。なお、本稿で得られた物性値を考慮した PC 歩道橋（橋桁）の最適設計、製作、構造性能評価については、別稿にて報告する。

2.2 構造緒元

参考までに、図-1 の最適設計を経て最終決定した PC 歩道橋の構造概要図を図-2 に示す。寸法は橋長 6.0m × 幅 1.2m × 高さ 1.0m であり、歩道橋上面に 5.0kN/m² の群集荷重の作用を考慮し、上フランジ端部に 2 本、下フランジ中央に 1 本の PC 鋼棒を配置する形状としている。

計 44 個のパーツで構成され、各パーツにはプリンティング時に PC 鋼棒の挿入孔を設けた。

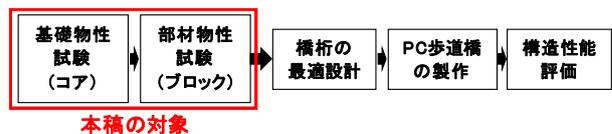


図-1 本プロジェクトの検討手順

*1 大成建設(株) 技術センター 社会基盤技術研究部 材工研究室 修(工) (正会員)

*2 大成建設(株) 技術センター 社会基盤技術研究部 材工研究室 博(工) (正会員)

3. 基礎物性試験の試験方法

3.1 配合および使用材料

本稿にて使用したセメント系材料の配合を表-1に示す。使用した結合材(P)は、初期の反応性を高めた速硬性を有するセメントである。細骨材には、砕砂(S1)および微粉末(S2)を併用している。砕砂(S1)の最大粒径は2mm、粗粒率は2.86である。なお、微粉末(S2)の比表面積は8000cm²/g程度の非常に微細なものを使用している。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。

3.2 試験体製作方法

実施した基礎物性試験の試験ケースを表-2に示す。使用する3Dプリンティングシステム(以下、「3Dプリンタ装置」という)は、既往の研究にて開発したものである¹⁾。材料の保管、材料の練混ぜ、試験体の作製、材齢24時間までの養生は同一の実験室で実施した。この実験室は、外気温の影響を受けて気温が変動する。試験体作製時の外気温O.T、コンクリート温度C.TおよびJIS R 5201に基づいて測定した練混ぜ直後のモルタルフローを表-3に示す。外気温にはばらつきがあるが、コンクリート温度は22~26℃、0打モルタルフローは107~108mm、15打モルタルフローは165~168mmで、練混ぜ直後のフレッシュ性状に有意な差は見られない。

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

圧縮強度試験、割裂引張強度試験、圧縮クリープ試験に用いる積層体コア試験体の作製方法を以下に示す。練り上がった材料を、ホップに投入した後、スクイーズポンプにより圧送し、ノズル先端から押し出し、水平かつ平滑な鋼製パレット上に積層する。ノズル径および押し

出される材料の幅は25mmで、1層当たりの高さは10mmである。コア試験体は、上述した3Dプリンタ装置によって製作したW375×B640×H200mmの積層体から、材齢24時間において上面より湿式法により採取した。コア試験体は、図-3に示すように積層時の痕跡(以下、積層痕という)がコア試験体の中央を通過するように採取した。同様に、割裂引張強度の測定に用いた試験体は、W375×B640×H110mmの積層体からコアを採取した。

乾燥収縮試験に用いた積層試験体は、W125×B600×H100mmの積層体を加工せずに用いた。突固め試験体は、JISA 1132に準拠して製作した。なお、材料の保管および材齢24時間までの養生は積層試験体と同一環境とし、材齢24時間において脱型した。積層体コア試験体および突固め試験体は、材齢24時間から各試験日までの期間、20℃、60%R.H.の恒温恒湿室にて気中保管した。

3.3 圧縮強度、ヤング係数、割裂引張強度試験

圧縮強度試験はJISA 1108に、割裂引張強度試験はJISA 1113に、ヤング係数の測定はJISA 1149に、それぞれ準拠して実施した。割裂引張強度の測定方向は、図-3に示すように、縦目と横目の2種類を設定した。コア試験体端面の積層痕を参考に、載荷方向と積層痕方向が一致する向きを縦目、直交する方向を横目と定義した。試験体数は材齢ごとに各3体とした。

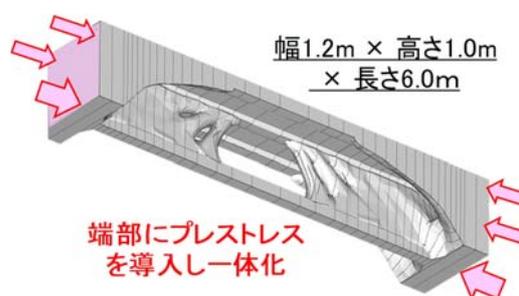


図-2 PC歩道橋の構造概要図

表-1 モルタルの配合

W/P [%]	単位量 [kg/m ³]					外割添加量 [B×%]		
	W	P	S1	S2	V	SP	De	Re
37	271	732	879	366	37	0.20	0.20	1.20

表-2 基礎物性試験 試験ケース

試験	試験体			ラベル	試験材齢 [日]
	寸法 [mm]	作製方法	備考		
圧縮強度	φ100×200	積層体コア		CP	7, 28
		突固め (鋼製型枠)		CC	1, 3, 7, 28
割裂引張強度	φ100×110	積層体コア	縦目	TPv	7, 28
			横目	TPh	7, 28
		突固め (鋼製型枠)		TC	1, 3, 7, 28
ヤング係数	φ100×200	積層体コア		(CP)	7, 28
圧縮クリープ	φ100×200	積層体コア	載荷	RL	7, 28
			無載荷	RN	7, 28
乾燥収縮	100×125×600	積層体		DP	1, 2, 3, 7, 14, 21, 28, 91
	100×100×400	突固め (鋼製型枠)		DC	1, 2, 3, 7, 14, 21, 28, 91

3.4 圧縮クリープ試験

圧縮クリープ試験は、JISA 1157 を参考に試験体数を 2 体として 20℃、60%R.H.の恒温恒湿室にて実施した。載荷開始材齢はそれぞれ材齢 7 日 (RL7) および 28 日 (RL28) とした。無載荷試験体、RN7 および RN28 の各試験体端面はエポキシ樹脂にてシールし、ひずみ測定開始材齢はそれぞれの載荷開始材齢とした。載荷応力度は、試験体 CP の圧縮強度の 1/3 に設定し、載荷持続期間は 56 日間とした。ひずみの計測は、各試験体の側面 4 ヶ所、計 8 ヶ所に貼付したゲージプラグを用いたコンタクトゲージ方法とし、結果は 8 ヶ所の平均値を使用した。

3.5 乾燥収縮試験

JISA 1129-2 を参考に、コンタクトゲージ方法により乾燥収縮ひずみを測定した。試験体数は各 3 体とした。材齢 24 時間後、ゲージプラグをエポキシ樹脂によって標点距離 350mm となるように貼付した。貼付面は、突固め試験体 (DC) では底面 (1 測線)、積層試験体 (DP) では両側面および底面 (計 3 測線) とした。基長はゲージプラグ貼付直後に測定するものとし、その後は 20℃、60%R.H.の恒温恒湿室にて保管しながら試験を継続した。

4. 基礎物性試験の試験結果

4.1 圧縮強度、ヤング係数、割裂引張強度

圧縮強度試験および割裂引張強度試験の結果を図-4、図-5 にそれぞれ示す。突固め試験体 (CC) に対する積層体コア試験体 (CP) の圧縮強度比 CP/CC は、材齢 7 日で 0.86、28 日で 0.83 となり、10~20%減少した。また、積層体コアのヤング係数は材齢 7 日で 20.5kN/mm²、材齢 28 日で 21.7kN/mm²であった。

一方、縦目方向の引張強度比 TPv/TC は、材齢 7 日で 0.85、28 日で 0.77 となり 15~25%減少した。横目方向の引張強度比 TPh/TC は、材齢 7 日で 0.94、28 日で 0.92 となり 5~10%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強度低下する強度異方性が確認された。

試験後の試験体の状況を写真-1 に示す。積層体コアの圧縮試験体 CP は、上端よりコーン状の斜めひび割れが発生し、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した。一方、試験体 TPv の割裂面を観察すると、層間に連続した筋状の空隙があり、これを結ぶようにひび割れが進展していた。すなわち、連続した筋状の空隙が弱部となってひび割れが進展したことで、引張強度比 TPv/TC が小さくなったものと推察される。横目方向では割裂面と筋状の空隙が直交するため、縦目方向ほどの引張強度の低下は見られなかったものと考えられる。

4.2 圧縮クリープ

圧縮クリープ試験時の載荷応力は載荷開始材齢の圧縮強度の 1/3 に設定した。すなわち、試験体 RL7 では 10.0

表-3 基礎物性試験体作製時の材料性状

試験体	O.T. [°C]	C.T. [°C]	モルタルフロー [mm]	
			0 打	15 打
CP	18	23	108	167
CC	18	22	107	168
DP, DC	24	23	108	165
RL	26	24	107	166
RN	28	26	107	165
TP, TC	28	25	108	165

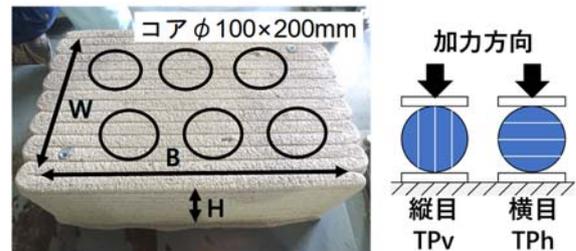


図-3 コア採取位置および割裂試験時の加力方向

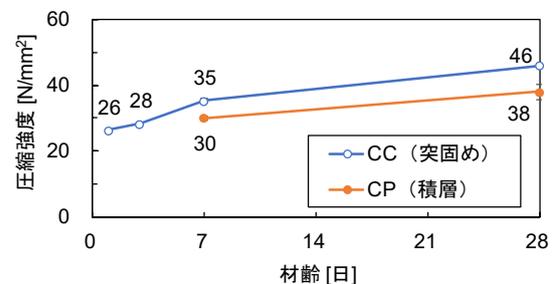


図-4 圧縮強度試験の結果

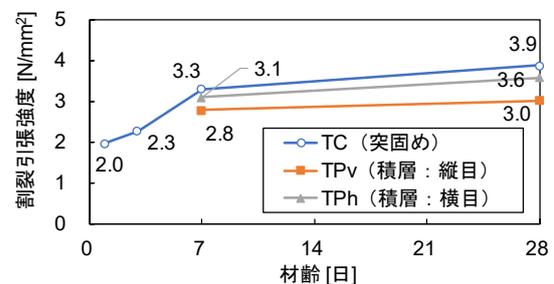


図-5 割裂引張強度試験の結果



写真-1 試験後の試験体の状況

N/mm²、RL28 では 12.6 N/mm² に設定した。圧縮クリープ試験におけるひずみの経時変化を図-6 に示す。載荷時弾性ひずみは試験体 RL7 で 508×10⁻⁶、RL28 で 610×10⁻⁶であった。なお、無載荷試験体で RN28<RN7 となっ

ているのは、RN7 では材齢 7 日以前の、RN28 では 28 日以前の乾燥収縮ひずみが含まれていないためである。一般的に、プレストレス構造物等の設計値に用いるクリープ係数 ϕ は試験期間 1 年の値を用いる。本稿では、荷重期間 1～56 日の測定値の回帰によって得られた対数近似式の決定係数 R^2 が 0.99 以上であることから、対数近似により荷重期間 365 日における予測値 ϕ_{365} を得ることとした。式(1)より得られたクリープ係数 ϕ_t から対数近似により求めた ϕ_{365} は RL7 で 4.53、RL28 で 3.34 である。

$$\phi_t = \frac{\varepsilon_{at} - \varepsilon_e - \varepsilon_{st}}{\varepsilon_e} \quad (1)$$

ここで、 ε_{at} は全ひずみ、 ε_e は荷重時弾性ひずみ、 ε_{st} は無荷重ひずみである。

4.3 乾燥収縮

乾燥収縮試験の結果を図-7 に示す。積層試験体 DP1～DP3 の値は底面と側面の 3 測線の平均値であり、突固め試験体 DC1～DC3 の値は底面の測定値である。突固め試験体は積層試験体と比較してばらつきが大きい、いずれの試験体も概ね材齢 28 日で $230 \sim 270 \times 10^{-6}$ 、材齢 91 日で $240 \sim 290 \times 10^{-6}$ の収縮ひずみが生じた。材齢 28 日以降のひずみの増加は小さく、乾燥収縮の収束が早いことが確認できる。この傾向は、圧縮クリープ試験における無荷重試験体 RL28 の挙動とも整合している。

5. 部材物性試験の試験方法

基礎物性試験では、積層体から採取したコア試験体から基本物性を得た。一方で、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部材がコア試験体と同様の強度特性および収縮特性を示すかどうかは未確認である。本章では、3D プリント装置を用いて作製した部材そのものの強度および収縮特性を測定する方法とその試験結果について報告する。

使用した材料は、基礎物性試験で用いたものと同様である。試験体の作製は、3 章と同様に 3D プリント装置を用いており、実験室内にて試験日まで気中暴露とした。試験体作製時の材料性状を表-4 に示す。基礎物性試験体作製時と比較すると外気温が約 10°C 、コンクリート温度が約 5°C 高いが、積層体の製作に問題はなく、W/P および各種外割添加剤は調整していない。

5.1 圧縮強度、ヤング係数試験

部材圧縮強度試験に供した試験体の概要を図-8 に示す。試験体の寸法は、外寸 $200 \times 200\text{mm}$ 、内寸 $100 \times 100\text{mm}$ 、厚さ 50mm 、高さ 400mm の中空角柱試験体である。試験材齢は 7 日および 28 日とし、試験体数は材齢ごとに 3 体とした。なお、比較用に $\phi 50 \times 100\text{mm}$ の突固め試験体を材齢ごとに 3 体、計 6 本作製し、同一環境・同一試験日にて JSCE-G 505 に準拠して圧縮強度試験に供した。比

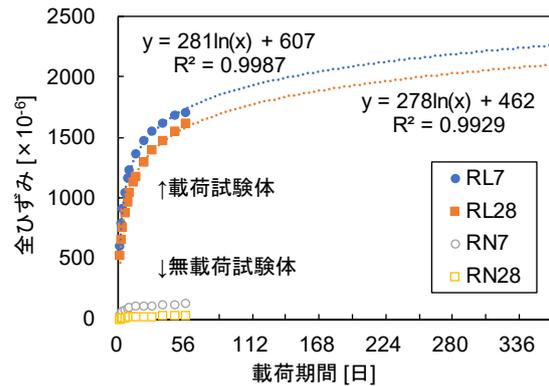


図-6 全ひずみの経時変化

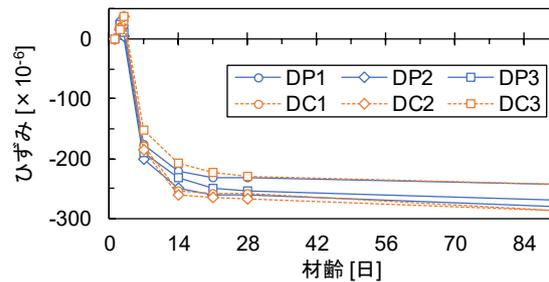


図-7 乾燥収縮ひずみの経時変化

表-4 部材物性試験体作製時の材料性状

試験体	O.T. [°C]	C.T. [°C]	モルタルフロー [mm]	
			0 打	15 打
圧縮	31	28	106	185
収縮 S1	31	28	106	174
収縮 S2	32	27	107	181

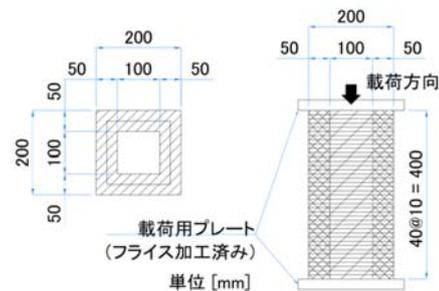


図-8 部材物性試験における圧縮強度試験体の概要

較用試験体に $\phi 50\text{mm}$ の試験体を用いた理由は、積層試験体の厚さが 50mm であり、これに統一するためである。

積層試験体は端面の研磨が困難であるため、試験日の前日に上面にキャッピング処理を施した。試験体の寸法は、図面から得られる理論上の断面積を用いた。これは、積層による側面の凹凸が著しく、凹部（断面積が最も小さくなる部分）では寸法の測定値が困難であり、凸部では断面積が過大評価となるためである。

本試験では、荷重-変位関係から見かけのヤング係数の算出を試みた。変位は、側面の凹凸によりひずみゲージの貼付が困難であったため、試験体の上下に平滑加工を施した鉄板を配置し、その鉄板間の変位を各辺の中央部の 4 測線にて測定することで測定した。

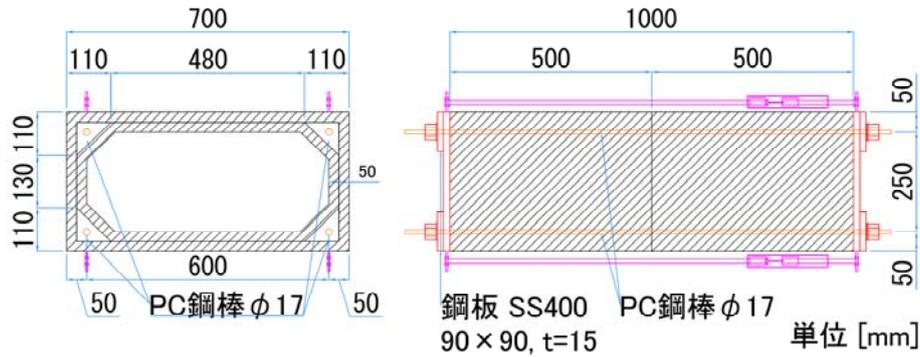


図-9 部材物性試験における圧縮クリープ試験体の概要

5.2 圧縮クリープ試験

積層部材圧縮クリープ試験に供した試験体の概要を図-9に示す。試験体は、材齢7日に緊張力を導入した試験体S1と、材齢33日に緊張力を導入した試験体S2の2体である。試験体寸法は、いずれも断面350×700mm、厚さ50mm、長さ500mmの中空積層試験体を長さ方向に2体接合した試験体である。緊張材にはφ17mmのPC鋼棒C種1号を用いており、PC鋼棒の定着には断面360×710mm、厚さ25mm、SS400の鉄板を用いた。試験体はこの鉄板の上に積層することにより製作し、接合面を水平かつ平滑にするために、材齢1日においてセメント系材料によるキャッピングを施した。部材の接合は緊張力を導入する前日とし、材料にはエポキシ樹脂系接着剤(JSCE-H101 適合品)を用いた。緊張力 P_t は、コンクリート標準示方書⁷⁾に従い、式(2)~(4)によって求めた。

$$P = P_e - \Delta\sigma_{pr} \cdot A_c \quad (2)$$

$$\Delta\sigma_{pr} = \gamma\sigma_{pt} \quad (3)$$

$$P_e = P_t - \frac{n_p \rho_p \phi_{365} P_t + E_p A_p \epsilon'_{cs}}{1 + n_p \rho_p (1 + \chi \phi_{365})} \quad (4)$$

ここで、 γ は緊張材のリラクセーション率、 P_e は設計緊張力226kN、 χ はエージング係数、 ϵ'_{cs} はコンクリートの収縮ひずみ、 n_p はPC鋼材のコンクリートに対するヤング係数比、 ρ_p は緊張材の断面積比である。

導入応力は、試験体S1で3.42N/mm²、試験体S2で3.23N/mm²とした。緊張力導入は、PC鋼棒4本に油圧ジャッキを取り付け、均等かつ同時に導入するものとした。緊張力導入後は速やかにワッシャーおよびナットでPC鋼棒を固定し、所定の緊張力が保持されていることを確認しながら油圧ジャッキを取り外した。緊張力の保持期間は、28日間とした。

6. 部材物性試験の試験結果

6.1 圧縮強度、ヤング係数

本稿では、測定した4つの変位を平均してみかけの応力ひずみ曲線を求め、圧縮応力が5および15N/mm²である2点の勾配により見かけのヤング係数を導出した。圧縮強度およびヤング係数を図-10に示す。材齢7日の

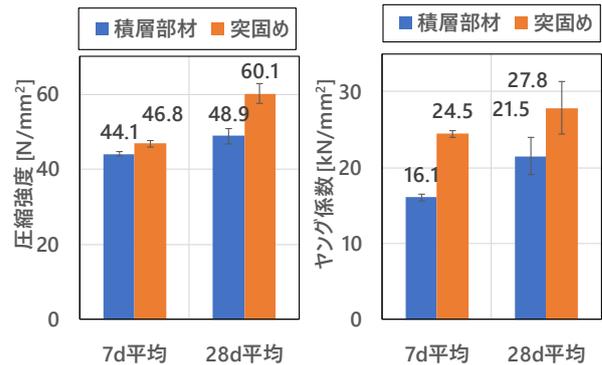


図-10 部材圧縮試験の結果

圧縮強度は同等であったが、材齢28日の積層部材試験体の圧縮強度は突固め試験体よりも20%ほど低い値を示した。前述の通り、積層体コア試験体の圧縮強度は突固め試験体と比較して10~20%程度低下することが確認されており、部材試験体においても同様の傾向が見られた。ただし、部材試験体は同一材齢の積層体コア試験体より強度が大きい。これは、積層体コア試験体の養生温度が20℃一定であった一方、部材物性試験体は外気温の影響を受けて30℃以上であったためと考えられる。

試験体の破壊状況を写真-2に示す。試験体は、最大荷重の1/3~1/2の範囲において縦方向の割裂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して破壊に至った。なお、この斜めひび割れは、試験体を構成する内殻と外殻の層の境目に進展し、内殻と外殻を分断している。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おり、筋状の空隙が弱部となってひび割れが進展したことが分かる。このことから、積層体は横方向に隣り合う層間の強度特性が低く、内殻と外殻のように隣り合う層の境目でひび割れが進展しやすいことが推察される。

部材試験体のヤング係数は突固め試験体と比較して材齢7日において35%程度、材齢28日において25%程度低い値を示した。圧縮強度と比較してヤング係数の低下率が大きい理由としては、締固めていないことにより層間に残留した粗大な空隙が圧縮変形することで変位が増大した可能性が高いと考えられる。



写真-2 試験体の破壊状況

表-5 収縮試験結果

試験体	試験材齢 [日]	弾性ひずみ [$\times 10^{-6}$]	クリープひずみ [$\times 10^{-6}$]	クリープ係数 (実測)
S1	7	304	264	0.87
S2	33	231	133	0.57

6.2 圧縮クリープ

試験体の変位を試験体の設計長 1000mm で除したみかけの全ひずみと載荷期間の関係を図-11 に、収縮試験の結果を表-5 に、それぞれ示す。積層体コア試験体に対して実測した部材試験体のクリープ係数の比は、材齢 7 日で載荷開始した場合で $0.87/4.53=0.19$ ，材齢 28 日で載荷した場合で $0.57/3.34=0.17$ となる。実測したクリープ係数は、積層体コア試験体のクリープ係数より大幅に小さいことが分かる。一方、試験時の載荷応力比は、材齢 7 日載荷の場合で $3.42/10.0=0.34$ ，材齢 28 日載荷の場合で $3.23/12.6=0.26$ である。

一般に、Davis-Glanville の法則により、持続応力が圧縮強度の 1/3 程度以下の場合、クリープひずみは応力に比例することが知られており、上記結果も凡そその傾向と整合している。以上より、実構造物設計時の導入緊張力には、載荷応力比を考慮して以下で定義する修正クリープ係数 ϕ'_{365} を用いることとする。

$$\phi'_{365} = \frac{\phi_{365}}{\sigma_{cr}} \cdot \frac{P_t}{A_c} \quad (5)$$

ここで、 ϕ_{365} は積層体コア試験体の材齢 365 日相当でのクリープ係数、 σ_{cr} は同圧縮クリープ試験時の載荷応力度、 P_t は導入緊張力、 A_c はコンクリート全断面の断面積である。

7. まとめ

本研究において得た知見を以下にまとめる。

- (1) 積層体コア試験体の圧縮強度は突固め試験体と比較して 10~20% 低下する。割裂引張強度は縦目方向で顕著に強度低下する強度異方性が確認された。
- (2) 乾燥収縮は、材齢 28 日で $230\sim 270 \times 10^{-6}$ となり、以降のひずみの増加は小さく収束も早い。

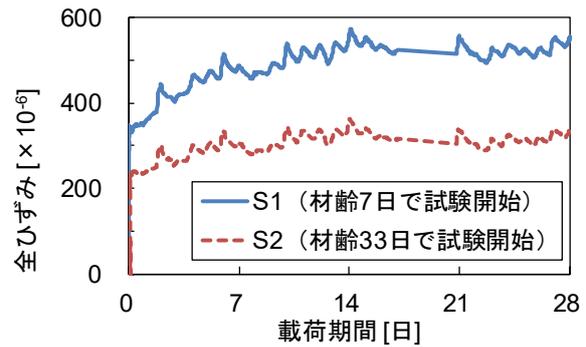


図-11 載荷期間と全ひずみの関係

- (3) 積層体は、横方向に隣り合う層間に連続した筋状の弱部を形成し、隣り合う層の境目でひび割れが進展する独特の破壊形態を有する。
- (4) 実構造物設計時の導入緊張力には、載荷応力比を考慮した修正クリープ係数を用いることを提案する。

謝辞

本稿の執筆にあたり、太平洋セメント株式会社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) 村田哲, 木ノ村幸士, 小尾博俊, 山本悠人: 3D プリント技術を活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) 村田哲, 木ノ村幸士, 前堀伸平, 宮本昌周: 3D プリンティングに適したセメント系材料の簡易な品質確認方法に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.2027-2032, 2019.
- 3) 木ノ村幸士, 村田哲, 小尾博俊, 山本悠人, 畑明仁: 建設用 3D プリンティング技術の開発と今後の展望, 土木学会建設技術研究委員会, 土木建設技術発表会 2019 概要集, pp.69-75.
- 4) D.Asprone, C.Menna, F.P.Boss et al., Rethinking reinforcement for digital fabrication with concrete, Cement and Concrete Research, (2018)112, 111-121.
- 5) M. Alawneh et al.: The world's first 3D-printed office building in Dubai, Proc. of 2018 PCI convention and National Bridge Conference, Denver, USA, 20-24 February, 2018.
- 6) B. Freek et al.: Large scale testing of digitally fabricated concrete (DFC) elements, Proc. of 1st Int. Conference on Concrete and Digital Fabrication -Digital Concrete 2018-, RILEM book series vol.19, pp.129-147, 2018.
- 7) コンクリート標準示方書 [設計編], 土木学会, pp.407-411, 2017.