

## 論文 高チキソ性材料のフレッシュ性状および硬化物性に関する基礎検討

村田 哲\*1・木ノ村 幸士\*1・橋本 貴之\*1・坂本 淳\*2

**要旨：**著者らは、コンクリート工の生産性向上を目的として付加積層技術の応用によるセメント系高チキソ性材料の施工法の開発に取り組んできており、本稿では、当該材料の配合特性に関して得られた知見を示す。まず、モルタルの付加積層が可能な小型試作機を使用して、当該材料の流動性および自立安定性を満足する最適なモルタルフローが 170~180mm 程度であることを確認した。さらに、付加積層により作製した試験体と突固めにより作製した標準的な試験体の硬化物性を比較し、圧縮強度が同等であること、曲げ強度および曲げじん性係数が積層方向に対して異方性がある可能性があることを明らかにした。

**キーワード：**付加積層, 高チキソ性材料, フレッシュ性状, 硬化物性, 異方性

## 1. はじめに

我が国では、少子化・高齢化に伴った生産年齢人口の大幅な減少が予想され、建設分野においては、今後 10 年間で技能労働者約 326 万人のうち、110 万人の高齢者が離職する可能性がある<sup>1)</sup>。また、コンクリート工の生産性は 1984 年以降の 30 年間でほとんど向上していない<sup>2)</sup>。両課題を背景として、コンクリート工の生産性向上は急務であるといえる。

コンクリート工の生産性向上を目的として、付加積層技術の応用によるコンクリート施工法の開発が世界各地で<sup>例えば 3),4),5)</sup>行われている。付加積層技術とは、3 次元のモデルをコンピュータで薄い層状の断面に分割し、分割した層を順に積層し接合することで 3 次元の積層体を得る技術である。

付加積層技術を用いたコンクリート工のメリットは、足場工、型枠工の軽減・省略による工期の短縮、現場作業の省力化など、従来行われてきたコンクリート工の建設プロセスが抜本的に変わり、大幅な省力化・省人化に伴う生産性の向上が見込めることである。また、機械化施工による品質の向上、騒音などの環境負荷低減、安全性の向上が見込める。さらに、意匠性の高い構造物を早期かつ容易に製作することが可能となる。例えば、曲面や幾何学的な面など、複雑な型枠の製作・組立に要する人件費と、型枠の材料費が削減できる。

一方で、付加積層による施工は、打重ね面への締固めができず一体化していない点が、従来の施工法と異なり、強度低下の原因となりうる。また、付加積層に用いる材料には、付加積層時にポンプからノズルまで閉塞せず抽出可能な流動性および付加積層時の自重に対する自立安定性を併せ持つ高いチキソ性が求められる。

著者らは、当該技術の研究開発への取組みの一つとして、付加積層用のセメント系高チキソ性材料（以下、積層材料）の付加積層技術について検討してきた。本稿で

は、当該材料の流動性および自立安定性について検証するとともに、付加積層による打ち重ねおよび積層材料への繊維添加が硬化体の強度特性へ及ぼす影響を確認するために、付加積層によって作製した試験体（以下、積層試験体）の圧縮強度試験および曲げタフネス試験を実施し、標準的に突固めを行った試験体（以下、突固め試験体）に対する強度と異方性について比較検討を行った。

## 2. 積層材料の配合検討

## 2.1 要求性能

積層材料は、前述のとおり、付加積層に必要な適度なフレッシュ性状を持つ必要がある。その要求性能は、下記の 4 点であると考えられる。(a) 練上がり後の流動性の経時変化が小さく、安定的に抽出できること。(b) 積層後は速硬性を有し、次ロット積層までの時間間隔を短くすることで施工サイクルを早めることができること。(c) ポンプからノズルまでの圧送性が良好であり、閉塞しないこと。(d) ノズル抽出後は自立安定し、積層時の上層の自重で下層が変形しないこと。本章では、通常モルタルのフレッシュ試験としてモルタルフロー試験、回転粘度計による塑性粘度および降伏値の測定を実施するとともに、モルタルの付加積層が可能な小型試作機(写真-1)を使用して付加積層試験を実施し、(a)~(d)の要求性能について検討した結果について考察する。

## 2.2 配合および使用材料

モルタルのフレッシュ試験（モルタルフロー試験、回転粘度計による塑性粘度および降伏値の測定）と付加積層試験を交互に繰り返し、積層材料の配合選定を行った。選定した配合を表-1 に示す。使用材料は、水道水 W、ポルトランドセメントを主成分とするプレミックス粉体 P、最大粒径 2.5mm の陸砂 S、凝結調整材 R、繊維長 12mm の短繊維 F である。配合選定は、配合 W253 と、水粉体比 W/P = 30%一定として単位水量を 5kg 増加した配合

\*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)

W258 と、10kg 増加した配合 W263 の 3 配合をベース配合とし、この 3 配合に短繊維 F を 0.1vol.%, 0.3 vol.% および 0.5vol.% 外割で添加した配合を、それぞれ配合 F0.1, F0.3 および F0.5 とした。練混ぜにはホバートミキサを使用し、フレッシュ試験時の練混ぜ量は 1L, 積層時は 7L とした。また、分割練混ぜを採用し、水量の 95% を一次水  $W_1$ , 5% を二次水  $W_2$  とし、 $W_1+S+R$  で低速 30 秒, P を投入して低速 60 秒,  $W_2$  を投入して高速 30 秒, F を投入して高速 60 秒, それぞれ練り混ぜた。

### 2.3 試験概要

#### (1) フレッシュ試験の概要

モルタルのフレッシュ試験としてモルタルフロー試験、回転粘度計による塑性粘度および降伏値の測定を実施した。フレッシュ試験の測定項目と測定頻度を表-2 に示す。試験は 20°C, 60% R.H. の試験室で実施した。

モルタルフロー試験を、JIS R 5201 に準拠して実施した。なお、本稿では、フローコーンを抜き、15 秒間に 15 回の落下運動を与えた直後のモルタルフローの値を単にモルタルフローと呼ぶこととする。モルタルフローの測定頻度は、練上がり直後と注水から 30 分毎とした。

また、二重円筒式回転粘度計を使用し、JIS Z 8803 に準拠してフレッシュモルタルのレオロジー特性の評価を試みた。回転粘度計の外側の円筒の内径は 42mm, 内側の円筒の外径は 22mm である。

この回転粘度計では短繊維を添加したモルタルの塑性粘度および降伏値は測定できないため、測定対象は配合 W253, W258 および W263 の 3 配合とした。測定は、有段速度変化法<sup>9)</sup>を用いた。有段速度変化法とは、回転速度を数段階指定し、次の回転速度になるまでの時間を一定とし、速度が切り替わる直前のトルクからせん断応力を測定する手法である。

#### (2) 付加積層試験の概要

表-1 の 6 配合について小型試作機(写真-1)を用いた付加積層試験を実施した。小型試作機は、3 次元モデルをコンピュータ上で層状に分割し、モルタルを付加積

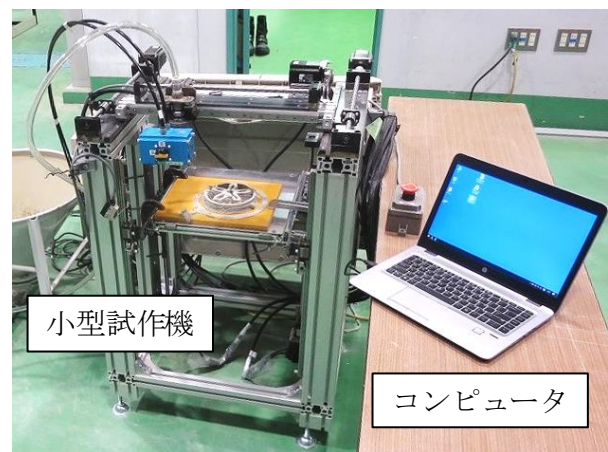


写真-1 小型試作機外観

表-1 積層材料の配合

配合	W/P (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				F (vol.%)
		W	P	S	R	
W253	30	253	844	1148	P×1.5%	-
F0.1						0.1
W258						-
F0.3		0.3				
W263		263	876	1093		-
F0.5						0.5

表-2 フレッシュ試験の測定項目と測定頻度

配合	フレッシュ試験の測定項目	
	モルタルフロー	塑性粘度および降伏値
W253	練上がり, 以降30分毎	練上がり
F0.1	練上がり, 以降30分毎	-
W258	練上がり	練上がり
F0.3	練上がり, 以降30分毎	-
W263	練上がり	練上がり
F0.5	練上がり, 以降30分毎	-

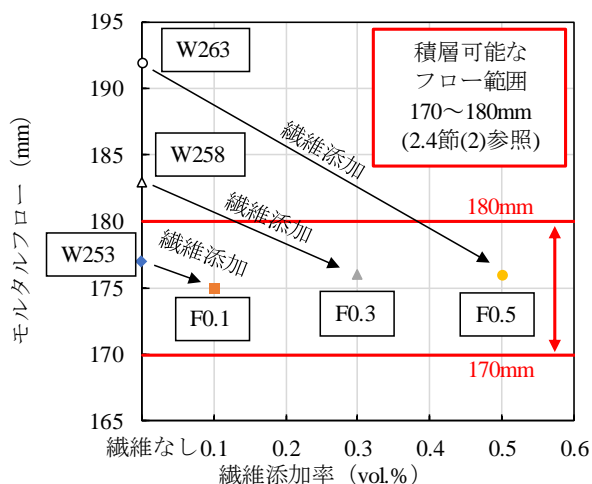


図-1 練上がり直後のモルタルフロー

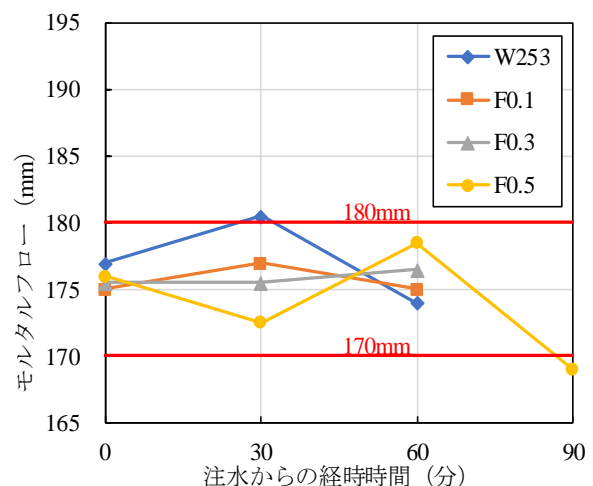


図-2 モルタルフローの経時変化

層することで3次元の積層体を作製することのできる機械である。小型試作機のノズル径は10mm、最大積層速度は120mm/s、積層可能範囲は幅250mm、奥行き250mm、高さ500mmである。付加積層試験では、ポンプからノズルまでの圧送性およびノズル抽出後の自立安定性を目視により確認した。

## 2.4 試験結果および考察

### (1) フレッシュ試験の結果と考察

練上がり直後のモルタルフローを図-1に、モルタルフローの経時変化を図-2に、それぞれ示す。単位水量の多い配合ほど練上がり直後のモルタルフローが大きく、繊維添加によって練上がり直後のモルタルフローは低下した。配合W258およびW263は練上がりのフローが180mm以上であり、後述する付加積層試験において下層が上層の積層時に変形し、積層が不可能な配合であったため、参考値として練上がりフローのみを測定した。配合W253、F0.1、F0.3およびF0.5の4配合は、注水から60分間モルタルフローが概ね170~180mmの範囲内にあり、流動性を一定に保持した。また、配合W253、F0.1、F0.3は90分以内、配合F0.5は120分以内に完全に硬化し、貫入抵抗値28.0N/mm<sup>2</sup>以上の凝結終結に至った。配合によって異なるが、凝結始発してから凝結終結に至るまでの時間は5分ほどであった。なお、凝結時間は凝結調整材Rの添加率により調整可能である。

二重円筒式回転粘度計を用いて測定したひずみ速度とせん断応力の関係を図-3に示す。測定結果より、ひずみ速度が高くなるに従いせん断応力が線形に増加しており、良好な線形性が確認できる。この直線の傾きを塑性粘度、切片を降伏値として表-3に示す。塑性粘度は3配合とも2.7~2.8 Pa・sでほぼ同等であり、降伏値は単位水量の多い配合ほど低くなった(配合W253 < W258 < W263)。

本積層材料における塑性粘度および降伏値を、高流動コンクリートと比較する。新藤ら<sup>7)</sup>および丸岡ら<sup>8)</sup>はそれぞれW/P=30%および34%の高流動コンクリートの粗骨材を除いたモルタルを対象に塑性粘度と降伏値を測定しており、塑性粘度は概ね7~15 Pa・s、降伏値は5~20 Paの範囲内であった。配合W253の塑性粘度は2.7 Pa・s、降伏値は11.4 Paであることから、塑性粘度は高流動コンクリートより低く、降伏値は高流動コンクリートと同程度であることがわかる。

降伏値とモルタルフローの関係を図-4に示す。3配合の測定結果ではあるが、モルタルの降伏値とモルタルフローの値には相関関係が見られる。今後、繊維補強モルタルの塑性粘度および降伏値を直接定量的に評価する手法について検討し、相関関係について検証する必要がある。

モルタルのフレッシュ試験の結果より、積層材料の要求性能(a), (b) について考察する。配合W253, F0.1, F0.3およびF0.5の4配合は、練上がりのモルタルフローが170~180mmであり、この流動性を60分間保持する。また、配合によって異なるが、凝結始発してから凝結終結に至るまでの時間は5分ほどであり、良好な速硬性を有していた。

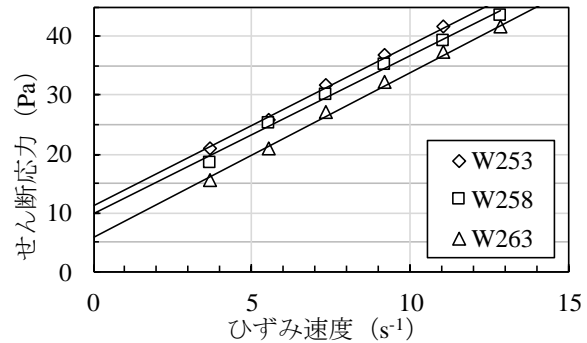


図-3 ひずみ速度-せん断応力

表-3 塑性粘度と降伏値

配合	塑性粘度 (Pa・s)	降伏値 (Pa)	練上がり直後のモルタルフロー (mm)
W253	2.71	11.36	177
W258	2.67	9.88	183
W263	2.80	5.92	192

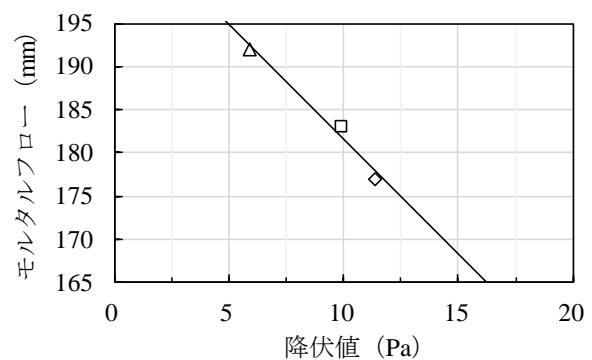


図-4 降伏値-モルタルフロー



写真-2 小型試作機によって作製した中空六角柱

## (2) 付加積層試験の結果と考察

付加積層試験では、写真-2 に示すような、捻りのある中空六角柱を作製した。中空六角柱の高さは 200mm (40 層) 程度、積層時間は 5 分程度である。すべての配合において、ポンプからノズルまでの圧送性が良好で、閉塞しなかった。一方、配合選定の過程でモルタルフローが 170mm 以下の配合を付加積層した場合、圧送性が低く、ノズルなどの狭隘部で閉塞する場合があった。配合 W253, F0.1, F0.3 および F0.5 の 4 配合はノズル抽出後の自立安定性が高く、目視による変形は生じなかった。一方、練上がりモルタルフローが 180mm 以上である配合 W258 および W263 は、付加積層時の自重で下層が変形する傾向であった。

ここまでの試験結果より、積層材料の要求性能(c), (d) について考察する。モルタルフローが 170mm 以下であると圧送性が低下して閉塞する傾向があり、180mm 以上であると降伏値の低下によって下層の自立安定性が低下し、上層の自重で下層が変形する傾向があった。すなわち、本研究で用いた付加積層試験用の小型試作機での付加積層に適したモルタルフローは 170~180mm 程度であると考えられる。該当する配合は W253, F0.1, F0.3 および F0.5 である。

## 3. 硬化物性に関する基礎検討

### 3.1 試験概要

試験体作製方法および積層材料への繊維添加が硬化物性へ及ぼす影響を確認することを目的として、圧縮強度試験および曲げタフネス試験を実施した。検討配合は、2章で付加積層に適した配合として選定した W253, F0.1, F0.3 および F0.5 の 4 配合とする。試験ケースおよび試験材齢を表-4 に示す。

突固め試験体は、圧縮強度試験は  $\phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$  の円柱試験体を JIS A 1108 に準拠して各 3 本、曲げタフネス試験は  $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 400\text{mm}$  の角柱試験体を JSCE-G 552-2013 に準拠して各 4 本作製した。積層試験体の作製は、Le ら<sup>9)</sup> および Nerella ら<sup>10)</sup> は、十分大きな積層体をカットまたはコアサンプリングして試験体を作製し、各種強度試験に供しているが、本研究では、理想的に積層された積層体を想定し、型枠内に積層材料を積層することで理想的な積層試験体を作製した。圧縮強度試験および曲げタフネス試験の試験体はいずれも、一層の厚さは 20mm とし、型枠内に一層毎に所定の容積の材料を打ち込んだあと、表面を均すことで積層を模擬し、2分間の積層時間間隔毎に上記作業を繰り返した。突き棒、木槌による締固めは行わないこととした。突固め試験体および積層試験体は材齢 1 日まで 20℃封緘養生とし、脱型後は 20℃, 60%R.H.の試験室にて気中養生を行った。

試験時、圧縮強度試験体は打込み面を研磨し、曲げタフネス試験体は加力部を石膏キャッピングした。

圧縮強度試験は打設面から型枠底面方向へ載荷した。曲げタフネス試験の載荷方向は、打設面から型枠底面方向へ載荷する方向を載荷方向 1、側面から載荷する方向を載荷方向 2 とした。曲げタフネス試験の載荷方向を図-5 に示す。曲げタフネス試験において、載荷点中央たわみがスパンの 1/150 すなわち 2mm となるまでの荷重-載荷点中央たわみ曲線下の面積を曲げタフネス  $T_b$  (N・mm) として、曲げじん性係数を次式により求めた。

$$F_b = \frac{T_b}{\delta_{tb}} \cdot \frac{l}{bh^2} \quad (1)$$

$F_b$  は曲げじん性係数 (MPa),  $\delta_{tb}$  は載荷点中央たわみ (2mm),  $l$  はスパン (300mm),  $b$  は試験体の幅 (100mm),  $h$  は試験体の高さ (100mm) である。

### 3.2 試験結果および考察

#### (1) 圧縮強度

材齢-圧縮強度の関係を図-6 に、硬化物性試験の結果を表-5 に、それぞれ示す。圧縮強度試験の結果は 3 体の平均値で、曲げタフネス試験の結果は 4 体の平均値である。材齢 7 日の圧縮強度は試験体作製方法および織

表-4 硬化物性試験の試験ケース

配合	試験体 作製方法	圧縮強度				曲げタフネス	
		1日	3日	7日	28日	方向1 7日	方向2 7日
W253	突固め	○	○	○	○	○*	
	積層	○	○	○	○	○	○
F0.1	積層	-	-	○	-	○	○
F0.3	突固め	○	○	○	○	○*	
	積層	○	○	○	○	○	○
F0.5	積層	-	-	○	-	○	○

※突固め試験体は載荷方向2で代表させた。

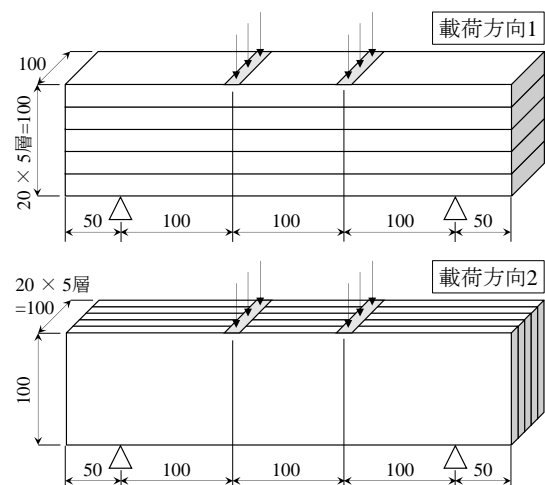


図-5 試験体概要および載荷方向



繊維添加率によらずほぼ同等であった。一方、材齢 28 日の圧縮強度は、10%以内の強度差ではあるが、積層試験体 < 突固め試験体、配合 F0.3 < 配合 W253 となり、試験体作製方法および繊維添加が材齢 7 日以降の圧縮強度の増進に影響を及ぼした可能性がある。強度増進が停滞した要因としては、積層界面からの水分の逸散や、繊維添加による粗大な空気の巻き込みが考えられる。今後、有意性のあるデータを蓄積するとともに、積層界面の水分逸散に関する追加検討を行い、試験体作製方法および繊維添加が圧縮強度に及ぼす影響について検証する必要がある。

## (2) 曲げ強度

曲げ強度は、配合 F0.3 の 6.5 N/mm<sup>2</sup> が比較的大きい点を除けば、4.6~5.3 N/mm<sup>2</sup> の範囲であった。積層試験体の荷重方向の及ぼす影響について検証する。配合 W253 の曲げ強度は、荷重方向 1 が 5.3 N/mm<sup>2</sup>、荷重方向 2 が 4.7 N/mm<sup>2</sup> で、荷重方向 1 > 荷重方向 2 であり、積層方向に対する異方性を示している可能性がある。この傾向は配合 F0.3 でも同様であった。なお、配合 F0.1 および F0.5 では荷重方向 1 と 2 で曲げ強度は同等であった。

試験体作製方法および繊維添加率が曲げ強度に及ぼす影響について検証する。配合 W253 の突固め試験体の曲げ強度は 5.2 N/mm<sup>2</sup> である。配合選定は W/P = 30% -

定であるため、これが表-1 の積層材料の配合強度と考えると、配合 F0.1 ではやや強度が低下するものの、配合 F0.5 の積層試験体の曲げ強度は 5.1~5.2 N/mm<sup>2</sup> であり、配合 W253 の突固め試験体の曲げ強度と同等であった。繊維を 0.5vol.% 添加すると試験体作製方法および繊維添加率によって曲げ強度のばらつきが小さくなることから、繊維添加率がある程度以上となると積層方向に対する異方性が低下する可能性がある。

## (3) 曲げじん性係数

繊維添加率が積層試験体のじん性に及ぼす影響を検証する。繊維添加率の異なる試験体の比較例として配合 F0.3 と F0.5 の積層試験体（荷重方向 2）の曲げ荷重-載

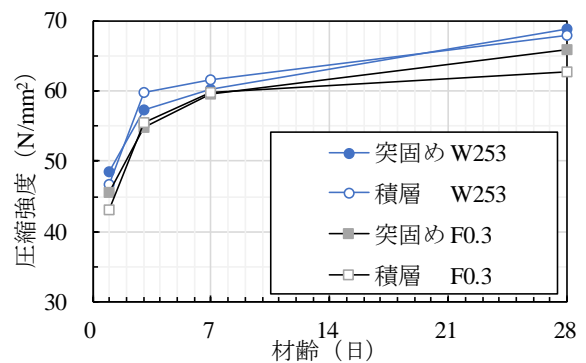


図-6 材齢-圧縮強度

表-5 硬化物性試験の結果

配合	試験体作製方法	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )				曲げ強度 (N/mm <sup>2</sup> )		曲げじん性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	
		1日	3日	7日	28日	方向1	方向2	方向1	方向2
						材齢7日		材齢7日	
W253	突固め	48.6	57.4	60.2	68.9	5.2		-	
	積層	46.8	59.7	61.5	67.9	5.3	4.7	-	-
F0.1	積層	-	-	61.6	-	4.7	4.7	0.1	0.1
F0.3	突固め	45.5	54.7	59.6	65.8	4.6		2.0	
	積層	43.1	55.6	59.7	62.7	6.5	5.1	2.1	1.8
F0.5	積層	-	-	59.8	-	5.1	5.2	2.5	2.4

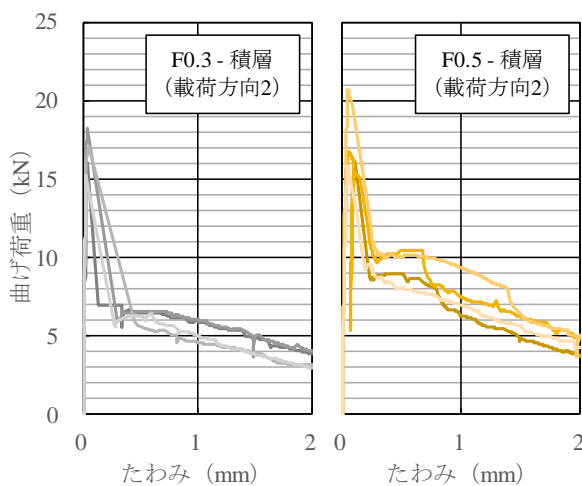


図-7 荷重点中央たわみ-曲げ荷重の一例

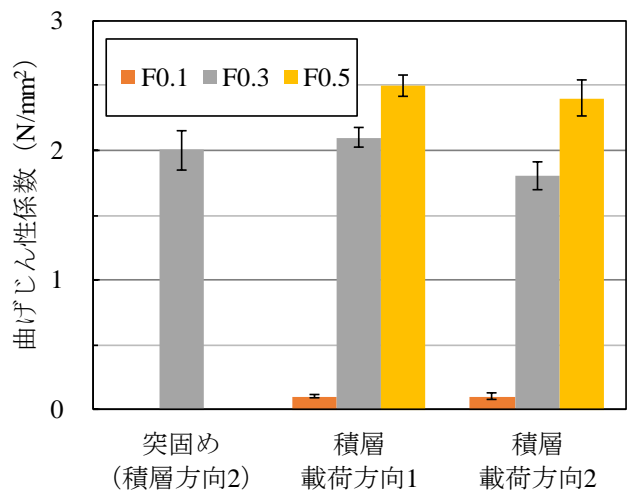


図-8 曲げじん性係数および標準誤差

荷点中央たわみの関係を図-7 に、曲げじん性係数および標準誤差を図-8 に、それぞれ示す。

図-7 より、配合 F0.3 および F0.5 は、ともに最大荷重に到達した後、ひび割れが発生し、荷重が大きく低下している。その際、配合 F0.3 は荷重 5~7 kN まで低下しているが、配合 F0.5 は荷重 8~10 kN までしか低下しない。この傾向は同じ配合の積層試験体の載荷方向 1 でも同様であった。すなわち、繊維添加率は、積層試験体のひび割れ発生後の曲げじん性に寄与することが確認できた。一方、配合 F0.1 は最大荷重に達したのち曲げひび割れが発生し、直ちに破断に至った。図-8 より、繊維添加率 0.1vol% では、繊維添加による曲げじん性係数への寄与が極めて小さいことがわかる。すなわち、本研究で用いた配合および短繊維を用いた範囲ではあるが、仮に繊維添加による積層体のじん性確保が要求性能となる場合には、0.3vol.% 以上の繊維添加率が求められると考えられる。

試験体作製方法および載荷方向がじん性に及ぼす影響を検証する。図-8 より、配合 F0.3 および F0.5 では、積層試験体の曲げじん性係数は、載荷方向 1 > 載荷方向 2 で、5%程度大きい。すなわち、積層方向に対する異方性を示している可能性がある。ただし、曲げひび割れの入り方および破壊性状は、目視観察による差はほとんどなかった。異方性の要因としては、積層試験体作製時に一層毎に均すため、繊維方向が型枠底面に平行な方向に配向しやすいこと、型枠底面を薄く均したため密実に打ち込まれており、載荷方向 1 ではひび割れ面に架橋する繊維本数が多かったことなどが考えられる。

なお、曲げ強度および曲げじん性係数の異方性およびばらつきの程度については、今後試験体数を増やして検討する必要がある。

#### 4. まとめ

本研究によって、以下の知見が明らかとなった。

- (1) 本研究で用いた付加積層試験用の小型試作機においては、モルタルフローが 170mm 以下であると流動性が低下して閉塞する傾向があり、180mm 以上であると下層の自立安定性が低下し、上層の自重で下層が変形する傾向がある。すなわち、付加積層に適した積層材料のモルタルフローは 170~180mm 程度であると考えられる。
- (2) 配合 W253, F0.1, F0.3 および F0.5 の 4 配合は、練上りのモルタルフローが 170~180mm であり、この流動性を 60 分間保持した。凝結始発してから凝結終結に至るまでの時間は 5 分ほどであり、良好な速硬性を有していた。なお、凝結時間は凝結調整材の添加率により調整可能である。
- (3) 材齢 7 日の圧縮強度は、試験体作製方法および繊維

添加率によらずほぼ同等である。材齢 28 日の圧縮強度は、10%以内の強度差ではあるが、積層試験体 < 突固め試験体、配合 F0.3 < 配合 W253 となり、試験体作製方法および繊維添加が材齢 7 日以降の圧縮強度の増進に影響を及ぼした可能性がある。

- (4) 材齢 7 日の曲げ強度および曲げじん性係数には、ばらつきがあるものの、積層方向に対する異方性がある可能性がある。

#### 謝辞

小型試作機の開発過程で、有明工業高等専門学校の前 眞真也准教授、岩本達也准教授の御協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省：国土交通白書，pp.3, 2017.
- 2) 一般財団法人：建設工事標準歩掛，1984.
- 3) Khoshnevis B. : Automated construction by contour crafting - related robotics and information technologies, Automation in Construction, Vol.13, Issue 1, pp.5-19, 2004.
- 4) Z. Malaeb, H. Hachem, A. Tourbah, T. Maalouf, N. E. Zarwi, F. Hamzeh : 3D Concrete Printing: Machine and Mix Design, International Journal of Civil Engineering and Technology, Vol.6, Issue 6, pp.14-22, 2015.
- 5) 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, Vol.45, Issue 8, pp.1221-1232, 2012.
- 6) 山田義智，富山潤：履歴現象を考慮した粘塑性流体の構成式に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.25, No.1, pp.899-904, 2003.
- 7) 新藤竹文，横田和直，横井謙二：高流動コンクリートの自己充填性とモルタルのレオロジー特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.18, No.1, pp.99-104, 1996.
- 8) 丸岡正知，藤原浩已，下山善秀，富田六郎：石灰石微粉末の各種特性とモルタルのフレッシュ性状の関係，土木学会論文集，No.725, V-58, pp.101-112, 2003
- 9) 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, Cement and Concrete Research, Vol.42, Issue 3, pp.558-566, 2012.
- 10) V. N. Nerella, V. Mechtcherine, M. Krause, M. Nather : 3D-Printing Technology for on-site Construction. bauma 2016 awarded multi-disciplinary research project of TU Dresden, Germany. NEWS.