

3D プリンタで作製したモルタル積層体の強度特性の検討

太平洋セメント(株)

同上千石理紗

同上河野克哉

○黒澤真一

星健太

前堀伸平

1. はじめに

押出方式の3Dプリンタによりコンクリートやモルタルを積層する際、層間に不連続面が生じることから積層間の強度が低下することが報告されている。そこで、当社は、そのような強度への影響を考慮した材料開発を進めるために、まずは、層間のある積層体が強度へ与える影響について把握することとした。具体的には、3Dプリンタを用いてモルタルの積層体を作製・養生し、積層体からコア抜きした供試体にて、強度特性（圧縮強度、曲げ強度、引張強度、層間付着強度）を評価した。

2. 実験概要

2. 1 装置の仕様および積層体の作製方法

3Dプリンタは、ガントリー型の押出式装置であり、押出し機構はカートリッジ式を採用している。その利点としては、材料を少量のロットで管理できるため、フレッシュ性状をコントロールしやすく安定した造形が可能となること、材料閉塞等のトラブルが生じた場合、カートリッジを交換することで改善できることなどが挙げられる。

積層体の作製方法は、容量15Lのホバートミキサにより練り混ぜたモルタルをカートリッジへ充填し、カートリッジを3Dプリンタへセットし積層した。積層条件は、ノズル直径14mm、射出幅16mm、層厚8mm、積層速度30mm/s、流量0.2L/minとした。作製した積層体は、温度20℃、湿度70%の環境下において気中養生を材齢21日まで行い、その後、コア抜きによりφ50×100mmの円柱供試体を、コンクリートカッターにより40mm×40mm×160mmの角柱供試体を採用し、気中養生をさらに7日間行い、合計28日間の気中養生を実施した。

2. 3 試験方法および検討内容

本実験に使用した粉体材料を表1に示す。結合剤(P)には、セメント鉱物系速硬成分を含有するセメントを用いた。細骨材(S)は、砕砂および石粉を併用した。混和剤は、いずれも汎用に入手できる粉末タイプの高性能減水剤、消泡剤および凝結遅延剤を適宜用いた。上記すべての材料を予め混合してプレミックス粉体とした。モルタルは、表2に示す配合を用いて作製した。

実験方法は、圧縮強度試験はJSCE-G505に、曲げ強度試験はJIS R 5201に、割裂引張強度はJIS A 1113に準拠して実施した。また、積層方向による材料の異方性について評価するために、図

表 1 使用材料

材料	種類	記号	密度	概要
結合材	速硬性セメント	P	3.03	比表面積 4,150cm ² /g
	砕砂	S1	2.71	最大粒径 2mm, F.M.=2.86
細骨材	石粉	S2	2.71	比表面積 8,160cm ² /g 45μmふるい残分 4.0%
	高性能減水剤	SP	-	ポリカルボン酸系粉末
混和剤	消泡剤	De	-	非イオン系粉末
	凝結遅延剤	Re	-	オキシカルボン酸系粉末

表 2 モルタルの配合

W/P (%)	単位量 (kg/m ³)				外割添加量 (P×%)		
	W	P	S1	S2	SP	De	Re
52.5	374	713	107	962	0.30	0.20	1.00

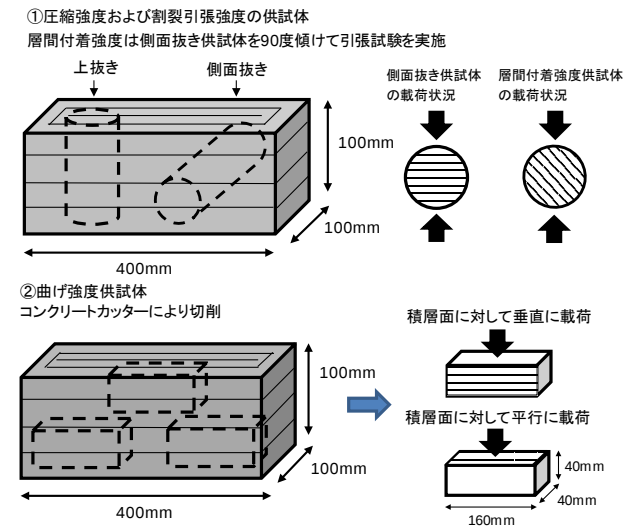


図 1 供試体作製方法および実験方法

キーワード 3D プリンタ, 圧縮強度, 曲げ強度, 引張強度, 層間付着強度

連絡先 〒285-8655 千葉県佐倉市大作 2-4-2 太平洋セメント(株) 中央研究所 TEL: 043-498-3836

1に示す方法で供試体を作製し、試験を実施した。層間付着強度試験は、層間に沿って載荷するために側面からコア抜きした供試体を90度傾けて、割裂引張強度試験を実施した。なお、積層体との比較として、JIS A 1132に準じて、型枠への流し込みにより作製した供試体（以下、突固め供試体）を作製した。また、供試体間の強度のばらつきを評価するため、各試験に供した供試体本数は6本とした。

3. 実験結果

3. 1 圧縮強度および曲げ強度

圧縮強度試験結果を図2に示す。図2に示す棒グラフは平均値、範囲を示すバーは、最大値、最小値を示している。突固め供試体は42.1 N/mm²となり、積層体は、上抜き供試体は43.2 N/mm²、側面抜き供試体は40.8 N/mm²となった。突固めと積層体の圧縮強度の平均値の差は約1~2 N/mm²程度であり強度差は小さかった。供試体間の圧縮強度のばらつきは、突固め供試体の変動係数の1.0%に対して積層体の変動係数は8.7%~9.5%となり大きくなった。これは、供試体の見かけ密度は、積層体の場合は1915 kg/m³であるものの、突固め供試体の場合の1947 kg/m³より小さくなっていること、また、コア抜きをした際に供試体に積層痕（積層間の空間）が残っていることから、強度のばらつきは積層痕が影響したものと考えられる。

曲げ強度試験結果を図3に示す。積層面に対して垂直方向に荷重を載荷した供試体は8.1 N/mm²、水平方向に載荷した供試体は7.3 N/mm²となり、突固め供試体の7.8 N/mm²に対して強度差は約0.3~0.5 N/mm²程度となり少なかった。供試体間の曲げ強度のばらつきは、突固め供試体の変動係数は3.6%に対して、積層体の変動係数は2.0%~3.8%となり、突固めと積層体の違いは見られなかった。

3. 2 割裂引張強度および層間付着強度

割裂引張強度試験結果を図4に示す。上抜き供試体は3.1 N/mm²、側面抜き供試体は3.4 N/mm²、突固め供試体は3.0 N/mm²となり、積層体は突固め供試体より3~13%高い強度を示した。コア抜き方向の違いによる強度差は見られなかった。強度のばらつきは、変動係数が19.7%~23.7%となり積層体は突固め供試体と同程度であった。層間付着強度は、2.6 N/mm²となり突固め供試体より13%程度、引張強度が低下し、強度のばらつきは変動係数が31.6%と大きくなった。これは、既往の知見¹⁾において、荷重の載荷方向と積層痕方向が一致する場合に引張強度が低下する結果と同様であった。強度の低下やばらつきについては、材料自体の固有の特性ではなく、上述のように積層痕が影響しているため、積層体を造形する際には上下の積層のタイミング（打重ね不良やコールドジョイントの防止）や、積層幅や積層厚さの最大化など、材料や筒先ノズル形状を含めた積層方法を工夫する必要があると考えられる。

4. まとめ

当社の3Dプリンタによりモルタル積層体を作製し、強度特性を評価した結果、圧縮強度や曲げ強度および引張強度については、突き固め供試体と同等かそれ以上の強度を示した。層間付着強度は低下したが、これは積層方法を工夫することで改善されると推察される。

参考文献

- 1) R.J.M. Wolfs, F.P.Bos, T.A.M.Salet, Hardened properties of 3D printed concrete : the influence of process parameters on interlayer adhesion, Cement Concrete Research, Vol.119, pp.132-140, 2019

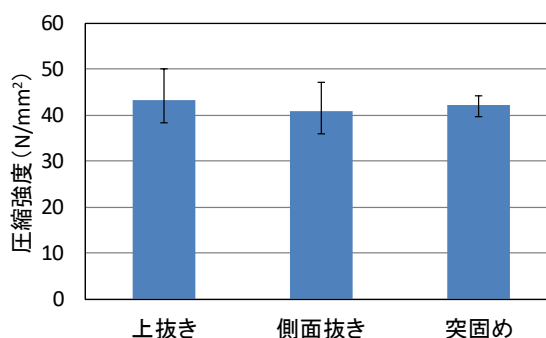


図2 圧縮強度試験結果

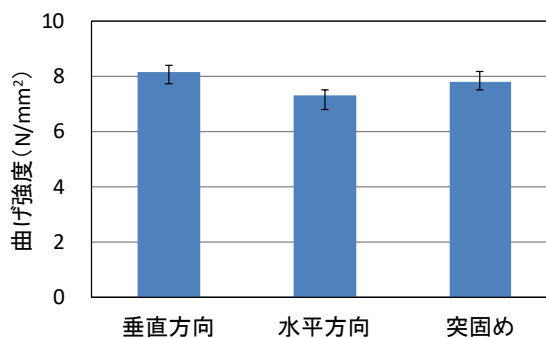


図3 曲げ強度試験結果

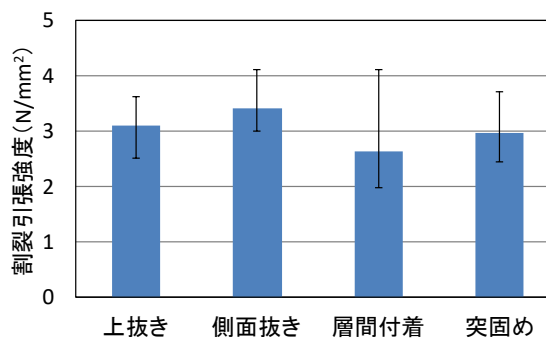


図4 割裂引張強度試験結果