

3D プリンティングにより成型した部材の初期強度と一体性に関する実験的検討

東日本旅客鉄道株式会社	正会員	○松田 聡美
東日本旅客鉄道株式会社	正会員	高見澤 拓哉
東日本旅客鉄道株式会社	正会員	井口 重信
會澤高圧コンクリート株式会社		東 大智

1. はじめに

近年、セメント系材料を用いた 3D プリンティング技術が注目されている。同技術はフレッシュ性状、品質安定性、施工性、耐久性など、多くのことが明らかになっていないのが現状であり、安定して構造物を構築するには課題が多い。本検討では、1 回のプリンティングで製作可能な構造や大きさの把握を目的に 2 つの実験的検討を行った。1 つ目は、製作中の強度が不十分であると上部の自重により変形が生じて予定した構造が製作できなくなるため、硬化前の強度特性について検討を行った。2 つ目は、製作物が大きくなると 1 層の積層に時間がかかり、打継ぎ箇所にコールドジョイント等の発生が想定されるため、一体性および積層可能時間についての検討を行った。

2 試験方法

2. 1 3D プリンターおよび材料

本検討で用いた 3D プリンターはロボットアーム方式で、連続練りミキサーで練り混ぜた特殊モルタルをポンプで圧送し、ロボットアーム先端のノズルから吐出する。練り混ぜからノズル吐出までの時間は 10～15 秒ほどで約 230mm/sec で吐出が可能であり、吐出するモルタルは 1 層あたり幅 40mm×高さ 20mm 程度である。試験に用いたモルタルは、ポルトランドセメント、珪砂、硬化促進剤がブレミックスされた粉体に、水、遅延材を添加して作成した。粉体部分の配合に関する情報は材料提供メーカーの特許が含まれるため、詳細は明らかではないが、粉体と水との混合比等は、表-1 に示すとおりである。

表-1 使用材料

粉体 (kg/h)	水 (kg/h)	遅延剤 (kg/h)	水粉体比
1800	170	4.85	0.094

2. 2 強度試験

製作中の強度把握を目的に、プロクター貫入試験を実施した。プロクター貫入試験は JIS A 1147「コンクリートの凝結時間試験方法」¹⁾ を参考に実施した。ノズルより吐出したモルタルを $\phi 150\text{mm} \times h300\text{mm}$ の円柱缶に採取し、上面からプロクター（針）を貫入し貫入抵抗値を計測した。試験の状況を図-1 に示す。ノズルより吐出されてからの経過時間で 30 秒後に貫入を開始し、以降 30 秒ごとに貫入できなくなるまで計測を行った。貫入できなくなった後の強度の確認には、JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」を参考に、ノズルより吐出したモルタルを直接 $\phi 50\text{mm} \times h100\text{mm}$ のモールド缶に採取して作製した試験体に対し、経過時間 30 分から 28 日までの間で圧縮強度試験を実施した。

2. 3 一体性確認試験

図-2 に作製した試験体の略図を示す。今回用いた 3D プリンターは吐出を開始すると途中で中断ができないことから、一筆書きで 1 辺が 320mm の立方形状に高さ 320mm になるまで積層し、一定時間の打継ぎ時間経過後に、二段目の立方体の積層を継続した。硬化後、試験体をワイヤーソーで切断し、打継ぎ箇所の一体性を目視で確認した。



図-1 プロクター貫入試験

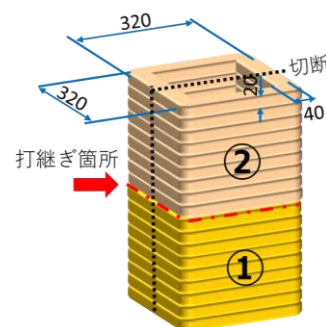


図-2 一体性確認試験体

キーワード 3D プリンティング, プロクター貫入試験, 一体性確認試験, 貫入抵抗, 打継ぎ

連絡先 〒331-8513 埼玉県さいたま市北区日進町 2 丁目 479 番地 JR 東日本研究開発センター TEL 048-651-2552

3. 試験結果

3. 1 強度試験

プロクター貫入試験の結果を図-3に示す。横軸は材料練り混ぜ時点からの経過時間を表している。測定開始から180秒までは針断面100mm²を用いても貫入抵抗値が計測できず、180秒で計測した貫入抵抗は0.3N/mm²であった。その後、390秒を境に急激に貫入抵抗が増加し510秒で28N/mm²に達した。計測の際に用いた針の断面積は、開始から360秒までは100mm²、390秒から420秒までは50mm²、以降は12.5mm²を使用した。なお、別途実施した圧縮強度試験では、材齢28日で63.7N/mm²となった。

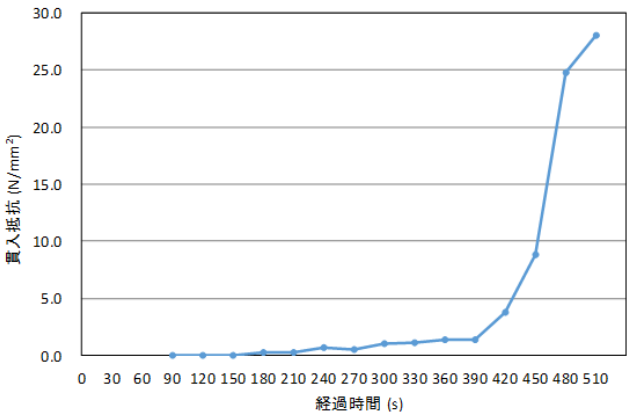


図-3 プロクター貫入試験結果

3. 2 一体性確認試験

打継ぎ時間を60、90、120、150、180秒の5種類に設定した境界面を作成し、それらの断面を確認した。表-2に断面状況及び打継ぎ箇所の断面縮小率を示す。60、90秒の断面では打継ぎ箇所に特徴すべき点を確認できなかったが、120、150、180秒の断面では打継ぎ箇所に他の箇所よりも多くの気泡が見られた。また、全ての打継ぎ目が、連続で積層した面と比較して断面幅が小さくなる傾向となった。断面幅は平均断面と比較し、69%~83%となった。

表-2 断面状況および打継ぎ箇所の断面縮小率

打継ぎ時間	60秒	90秒	120秒	150秒	180秒
図					
断面縮小率	80%	69%	72%	80%	83%

凡例： 連続的な気泡が見られる箇所

4. 考察

プロクター貫入試験より得られた貫入抵抗値は、プリント生成した材料の粘着力や一軸圧縮強さと相関があると考えられる。本試験結果からだけではこれらの絶対値を推定することはできなかったが、製作可能な部材構造を検討するうえでの重要な指標になると考えている。

一体性確認試験では、120秒以上の断面でコールドジョイントと思われる気泡が確認できた。締固めを行わないコンクリート等の打継ぎ目の場合、貫入抵抗0.1N/mm²で一体化が図られなくなる²⁾との知見もあることから、今回プロクター貫入試験で計測できなかった微小な領域の貫入抵抗値を計測することが出来れば、打継ぎ可能時間を推察できる可能性がある。また、一定時間経過した打継ぎ時間により、打継ぎ目部分の断面幅が小さくなる傾向があり、断面縮小分を考慮した構造計算が必要になるとと思われる。

5. おわりに

本検討により得られた知見を以下に示す。

- (1) プロクター貫入試験により初期の硬化速度を把握することが可能である。
- (2) 打継ぎ時間が120秒以降で打継ぎ箇所に気泡が見られる。
- (3) 打継ぎ目部分の断面幅の縮小が見られた。

参考文献

1) 日本産業規格, JIS A 1147 コンクリートの凝結時間試験方法
2) コンクリートライブラリー103号, コンクリート構造物におけるコールドジョイントと対策