

セメント系 3D プリントにより製作したモルタル板と粘性土の摩擦特性に関する実験的検討

(株)大林組

正会員 〇堀内 康平 西村 俊亮 高橋 敏樹

正会員 北村 勇斗 石関 嘉一

1. はじめに

近年、建設業界において労働人口の減少や高齢化が問題視されており、また少子高齢化に伴い次世代への技術継承や技術者育成が困難となっている。これらの解決策として、人の技術や労働力に依存しないで施工可能となる自動化・省人化技術が注目されている。3D プリント(以後、3DP)もその一例であり、土木分野ではモルタルを材料に用いる 3D プリントの適用検討が盛んに行われている。筆者ら¹⁾は 3D プリント埋設型枠を用いたプレキャスト圧入ケーソン基礎を提案しているが、積層型の 3D プリントを使用した場合、表面に幅約 5 mm、高さ約 1.2 mm 程度の凹凸が発生する。そのため、圧入ケーソンのような地盤に圧入する構造物に適用した場合、表面の凹凸が地盤内の土粒子と噛み合って摩擦を増大させ支持性能が向上する可能性がある一方で、施工時の圧入設備の能力増加が必要になる可能性もある。本研究では、一般的に土質試験で用いられている一面せん断試験機を用いて、3D プリントで製作したモルタル板(以後、3DP 板)と平滑なコンクリート板の粘性土に対する摩擦特性を比較した。

2. 試験概要

図-1 に試験イメージを示す。標準型一面せん断試験機を使用し、下せん断箱の代わりにコンクリート板あるいは 3DP 板(以後、試験体)を固定した(写真-1)。その上にせん断箱の上半分を置き、中に直径 60 mm、厚さ 1 cm の粘性土試料を配置し拘束圧をかけ、圧密が完了するまで 2 日程静置した。

粘性土には笠岡粘土を使用した。柔らかい沖積粘土層をイメージして含水比を 60 %に調整し、試料をせん断箱内に詰める際は試料の高さと質量で密度管理を行った。物理的特性を表-1 に示す。

試験時は試験体を水平方向に動かした。拘束圧を変えて 6 回試験し、得られた鉛直応力 σ -最大せん断

応力 τ 関係より最小二乗法にて摩擦角 φ を求めた。

拘束圧は、10, 20, 40, 50, 100, 200 kPa の 6 種類とした。拘束圧の決定方法は、静止土圧係数 $K_h=0.5$ および土の湿潤単位体積重量 $\gamma_t=19 \text{ kN/m}^3$ を用いて、 $\sigma'=K_h\gamma_t$ の式より、地中 20m での水平静止土圧を想定し 50, 100, 200 kPa とした。これらの拘束圧を用いて一度試験を行い、前述の方法にて摩擦角 φ 、粘着力 c を得た。得られた φ , c および、PC ウェル施工マニュアル²⁾に記載の「深さ 25 m での周面摩擦力度」である $\tau=7 \text{ kPa}$ をクーロンの破壊基準 $\tau=\sigma\tan\varphi+c$ の式に代入することで、施工マニュアル記載の周面摩擦力度に対応する拘束圧 10, 20, 40 kPa を算出した。

写真-2 に 3DP 板の一例を示す。3DP 板は 1 枚の大きな板から切り出して製作した。凹凸のばらつき

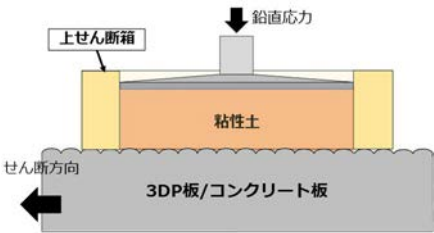


図-1 試験イメージ

表-1 粘性土の物理的特性

土 粒 子 密 度	ρ_s	g/cm^3	2.703
目 標 湿 潤 密 度	ρ_t	g/cm^3	1.606
目 標 含 水 比	w	%	60.0
液 性 限 界	w_L	%	62.1
塑 性 限 界	w_P	%	23.7
塑 性 指 数	I_P		38.4

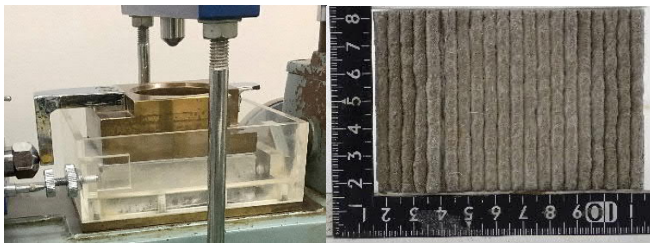


写真-1 試験体設置状況 写真-2 3DP 板の一例

キーワード：3D プリント，摩擦，圧入ケーソン，圧入抵抗
連絡先：(株)大林組 土木本部生産技術本部技術第一部 〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2, TEL:03-5769-1322

表-2 3DP モルタルの配合および仕様

単位量 (kg/m ³)			材齢 67 日 圧縮強度 (N/mm ²)
プレミックス 材料	凝結 遅延剤	水	
1590	3.18	267	

の影響を考慮し、拘束圧 50~200 kPa においては 3 枚使用した。表-2 に 3DP で使用するモルタルの配合および仕様を示す。3DP 用プレミックスモルタルは、ポルトランドセメント、細骨材、硬化促進剤、チキソ性調整剤、有機繊維を混合したものである。これに凝結遅延剤を加え、硬化速度を調整して使用した。

なお、本試験は CD 試験であり、実際の施工条件である UU 条件とは異なる。しかし、一般的な UU 試験方法である三軸圧縮試験では任意のせん断面を設定できず、改良型一面せん断試験機を用いた定体積急速せん断試験では結果が不安定となりやすいことから、本研究では一面せん断試験を用いた。

3. 試験結果および考察

摩擦試験で得られた鉛直応力 σ -最大せん断応力 τ 関係を図-2 に示す。以降は、試験結果を 10~20 kPa の低拘束圧帯と、40~200 kPa の高拘束圧帯の 2 領域に分けて考察する。

高拘束圧帯においては、3DP 板 3 枚のばらつきは小さく、凹凸の有無で摩擦角の正接($\tan\phi$)が約 1.49 倍増大した。一方、低拘束圧帯では、両者に大きな差がみられなかった。これは、拘束圧が小さいため、凹凸による摩擦角の差よりも粘土自体の粘着力の影響の方が大きかったからと考えられる。

3DP 板およびコンクリート板の摩擦角の正接 $\tan\phi$ および粘着力 c の比較結果を表-3 に示す。粘性土の場合、凹凸の有無で摩擦抵抗が最大で 1.5 倍ほど大きくなると考えられ、PC ウェル圧入時の圧入力とは従来の 1.5 倍を目安に設計すればよい。ただ、フリクションカットや滑材を活用することでそこまで摩擦抵抗は増えないと考えられるので今後検討する。

また、ケーソンの周面摩擦も 1.5 倍の増大を見込め、杭長短縮の可能性があるが、摩擦で凹凸が削れる可能性もあるため耐摩耗試験など検討が必要である。今後、実際の圧入抵抗を確認するため、実物大のケーソン試験体を製作して圧入試験を行う予定である。

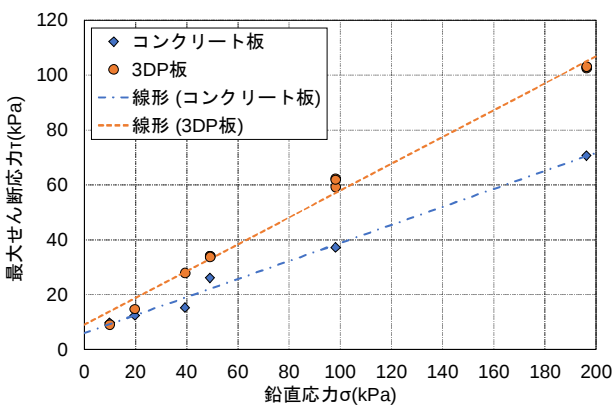


図-2 鉛直応力 σ -最大せん断応力 τ 関係

表-3 コンクリート-3DP の c , $\tan\phi$ 比較結果

試験体	c (kPa)	tanφ	
		近似線	B/A(%)
A コンクリート	6.03	0.328	100.0
B 3DP	9.09	0.488	148.8

4. まとめ

3DP 板と粘性土の摩擦試験を実施し、結果を通常のコンクリート板と比較した。今後、3DP 埋設型枠を用いて実物大の PCa 圧入ケーソン試験体を製作し圧入試験を実施することで、実際の圧入抵抗を確認する予定である。結論を以下に示す。

- (1) 拘束圧 50 kPa 以上においては、凹凸のある 3DP 板では平滑なコンクリート板に比べて摩擦角の正接が 1.5 倍程に増加した。
- (2) 拘束圧 20 kPa 以下においては、粘着力が支配的となり、凹凸の有無に関係なく同程度のせん断応力・摩擦角となった。
- (3) 3D プリント埋設型枠を PCa 圧入ケーソンに適用する際は、圧入力を 1.5 倍で計算すればよいが、滑材やフリクションカットにより軽減できると考えられる。また、周面摩擦も 1.5 倍を考慮できた場合は杭長短縮の可能性がある。

参考文献

1) 深澤連莉 他:3D プリントにより製作した埋設型枠を用いた PCa ケーソン基礎の性能確認, 土木学会全国大会第 77 回年次学術講演会, V-303, 2022

2) PC ウェル工法研究会:PC ウェル工法 設計・施工マニュアル 施工編, 2018.3