

高被圧地下水地盤でのソイルセメント柱体の打設性状に関する模型実験

中央大学 学生会員 ○大野 隼 正会員 西岡 英俊
(株) テノックス 非会員 渡邊 瑞貴 非会員 磯野 泰佑

1. 目的

地盤内にセメントミルクを注入し、混合攪拌して築造するソイルセメント柱体と鋼管を組み合わせた鋼管ソイルセメント杭工法は、場所打ち杭工法での施工が困難な被圧地下水を有する地盤において採用されることが多い杭工法の一つである。被圧地下水地盤での施工性に優れる鋼管ソイルセメント杭工法ではあるが、揚圧力とソイルセメント重量のバランスがある限界を上回った場合、杭自体の設計性能が低下する何かしらの不具合を生じる懸念がある。具体的には、ソイルセメント柱体内や原地盤との境界部に水みちが発生することでソイル柱体の出来形不足や杭周面摩擦抵抗力の低下による浮き上がり、セメント分の溶脱等による強度低下などが考えられる。鋼管ソイルセメント杭が施工可能な被圧地下水の条件を精度よく見極めるためには、これらの不具合の生じるメカニズムを明らかにしておく必要がある。しかしながら、これらの不具合が実際に生じた事例は現場試験施工を含め確認されておらず、そのメカニズムは明確になっていないのが現状である。

そこで本研究では被圧地下水地盤でのソイルセメント柱体の打設性状に関する、基礎的な実験として、打設高さ 1.5m 程度の模型ソイルセメント柱体に被圧水頭を与え、未固結時のソイルセメント中の被圧水の流動状況を観察するとともに、固化後の強度の違いについて検討した。

2. 模型実験概要

2.1 実験装置

本実験では、図 1 に示すように内径 150mm のアクリル管とボイド管の中に練り混ぜ直後のソイルセメントを高さ 1.5m まで打設し、その上に 100 mm の上水を張った後、それぞれの底に通水管で接続された給水タンクをハンドリフトにより上昇させることで被圧地下水環境下でのソイルセメント柱の混合攪拌直後の状態を模擬した。なお、比較対象として被圧なしのボイド管も用意した。

2.2 ソイルセメントの配合

- ①模擬地盤の作製：被圧水層上部の不透水層（粘性土地盤）を模擬するためトチクレー（比重 2.65）と東北珪砂 7 号（比重 2.62）を重量比 3:1 で混合し、飽和密度が 1.6g/cm³ となるよう加水した。
- ②ソイルセメント作製：模擬地盤 1m³ あたりのセメントミルクの配合仕様は、表 1 に示す施工管理要領²⁾を参考に、杭一般固化部での標準的な配合量（セメント、水、添加剤）を選定した。また、被圧地下水地盤での施工実績¹⁾を参考に、練り混ぜ後のソイルセメント密度を 1.5 g/cm³ 程度となるよう加水調整した。

2.3 揚圧力の安全率と試験ケース

本研究ではソイルセメント自重 W を揚圧力 U で除した次式の安全率 F_s を主たるパラメータとした。

$$F_s = \frac{W}{U} = \frac{\rho_t \times L_s + L_w}{L_s + L_w + h} \tag{1}$$

ここで、 ρ_t :ソイルセメント密度(g/cm³)、 L_s :ソイル柱長さ(mm)、 L_w :上水高さ(mm)、 h :ソイル柱上部水からの被圧水頭(mm)である。

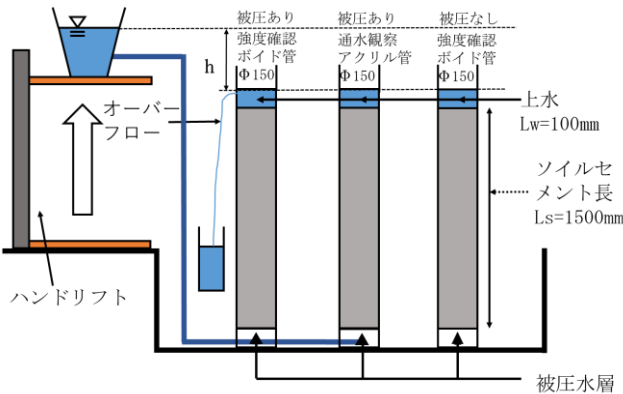


図 1 模型実験装置

表 1 セメントミルクの配合仕様²⁾

	セメント C (高炉セメント B 種)	水 W	ベントナイト B
比重	3.04	1.0	2.60
重量(kg/m ³)	300	300	30

※ W/C=100%, B/C=10%

キーワード ソイルセメント、被圧地下水

連絡先 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 中央大学理工学部都市環境学科 基礎・地下構造研究室 TEL：03-3817-1804

表 2 揚圧力作用時間とオーバーフロー水量

実験ケース	揚圧力作用時間	オーバーフロー水量
$F_s=1.05$	4 日間	なし
$F_s=1.00$	4 日間	1L 程度※
$F_s=0.95$	15 分	7L

※計量容器が溢れていたため正確な水量は不明

アクリル管の実験では蛍光塗料入りの水を給水タンクに入れ、ソイルセメント内を被圧水が流れる様子を観察し、 $F_s=1.05$, 1.0, 0.95, 0.91 と順に揚圧力を作用させた。それぞれのケースで5~10分程度揚圧力を作用させた。なお、被圧水がアクリル管内に溜まって排水せずに次のケースに移行した。

ボイド管の実験では、 $F_s=1.05$, 1.0, 0.95 の状態で、一定時間揚圧力を作用させた後、固化したソイルセメント柱体の品質調査を行った。ソイル柱上水の上端部に穴をあけ、揚圧力作用時にオーバーフローした水量を計測した(表 2)。固化したソイルセメント柱は切断し、水みちやクラックが発生しているかを確認した後、針貫入試験器³⁾を用いて強度を測定した。

3. 試験結果

3.1 被圧水移動状況観察結果

アクリル管のケースのうち、 $F_s=1.05$, 1.0, 0.95 まではソイルセメント柱体に変化は見られなかった。さらに揚圧力を高めた $F_s=0.91$ において初めて水の動きが見られるようになったが上に向かう流れよりも、ソイルセメント柱体に横方向のクラックを生じさせ、そのクラックが貫通してそれよりも上部のソイルセメント柱体を全体的に押し上げていた(図 2)。

3.2 強度試験結果

本研究では、固化後のソイルセメントの一軸圧縮強度 q_u (N/mm²) を、針貫入試験における 10mm 貫入時の針貫入勾配 N_p (N/mm) から、式(2)により推定した。なお、式(2)は、セメント添加量のみ変化させた模擬供試体 ($\phi 50$ mm, $h100$ mm) における N_p - q_u 関係 (q_u の範囲は 0.133~0.341N/mm²) から求めた。

$$q_u = 0.100N_p + 0.142 \quad (2)$$

針貫入試験実施のため、ソイルセメント上端部から約 20cm (上部), 60cm (中部) および 110cm (下部) で切り出し、切断面上面の計 9 か所で針貫入試験を実施した(図 3)。供試体上面での針貫入試験から推定した一軸圧縮強度の平均値 $q_{u,ave}$ (N/mm²) とその変動係数 V_{qu} を表 3 にまとめて示す。



図 2 アクリル管試験



図 3 針貫入試験実施状況

表 3 ソイルセメント柱体強度特性の推定結果

(一軸圧縮強さの平均値 $q_{u,ave}$ (N/mm²) と変動係数 V_{qu})

断面位置	強度値	被圧無	$F_s=1.05$	$F_s=1.0$	$F_s=0.95$
上部 (20cm)	$q_{u,ave}$	0.262	0.244	0.215	0.142
	V_{qu}	7.7 %	4.9 %	10.2 %	0.0 %
中部 (60cm)	$q_{u,ave}$	0.264	0.251	0.237	0.239
	V_{qu}	11.6 %	7.0 %	3.1 %	8.3 %
下部 (110cm)	$q_{u,ave}$	0.238	0.242	0.248	0.222
	V_{qu}	7.1 %	9.0 %	6.3 %	15.0 %

4. 考察

本研究で実施した模型実験より下記の知見を得ることができた。

- ・ソイル自重 W と揚圧力 U のバランスによって被圧水の影響が目視確認でき、 $F_s=1.0$ 程度 ($W=U$) になるとソイルセメント柱体内に通水現象が現れ、 $W<U$ では通水量が多くなり、 $F_s=0.9$ 程度でソイル柱体が形状を維持できなくなる傾向となった。
- ・同様に、ソイルセメント柱体の品質も被圧による通水量の多寡によってソイルセメント強度が低下する傾向がみられ、 $F_s=0.9$ 程度になるとソイル柱体上部の強度が 50%程度まで低下した。被圧水によるソイルセメント柱体内への加水現象が顕著になったものと推察される。
- ・本実験結果から、ソイルセメント柱体の品質確保ができる施工安全率は $F_s=1.05(1.1)$ 以上である。

5. まとめ

揚圧力の変化状態 ($1.0 \geq F_s > 0.9$) を模型実験で可視化することでソイルセメント品質の関係性が把握でき、安全率による鋼管ソイルセメント杭工法の施工安全性評価が適切であることが確認できた。今後は、被圧帯水層位置での攪拌混合状態を模擬した模型実験を行い、より精度の高い安全性評価式の構築を行いたい。

【参考文献】

- 1) 曾我大介, 川中島寛幸, 黒田晴, 佐名川太亮: 被圧地下水を有する地盤における鋼管ソイルセメント杭の品質確認, 第 56 回地盤工学研究発表会, No.12-8-3-04, 2021.2) 鋼管杭・鋼矢板技術協会: 鋼管ソイルセメント杭工法施工管理要領, p.20, 2017.3) 土木学会: 軟岩の調査・試験の指針 (案), 1991.