

深層混合処理工法による改良体の強度確認手法に関する考察

(株)テノックス ○土屋 政人
 溝口 栄二郎
 村山 徹
 旭化成建材(株) 正会員 小川 和也

1. はじめに

近年、深層混合処理工法により築造した改良体(以下、コラムと称す)に羽根付き鋼管を埋設する複合的基礎杭が開発され、中低層建物への適用が増加している。この工法では、期待する杭の周面摩擦力や先端支持力に応じてコラムの設計基準強度が設定されるため、通常の深層混合処理工法においても言えることであるが、適切な品質管理によりコラムの高強度化に対応することは合理的な設計を行う上で重要な課題である。

深層混合処理工法によって築造したコラムでは、未固化状態で採取したソイルセメントをモールドに充填してモールドコアの一軸圧縮試験による品質確認¹⁾が行われる場合がある。しかし、原位置で築造されたコラムから採取されたボーリングコアとモールドコアでは養生期間中の排水条件や応力状態が異なるため、モールドコアの一軸圧縮強さがボーリングコアより小さく評価される傾向にあることが指摘されている²⁾。このような品質管理上の課題でモールドコアによる品質管理を行う場合には、コラムの設計基準強度に上限を設け、支持力を低減して設計を行っているのが実状である。

そこで、モールドコアの応力状態と排水状態がボーリングコアと同等になるように加圧養生を考案し、この方法が一軸圧縮強さに及ぼす影響を検討した。

本検討では、千葉県四街道市の試験サイトより採取した試料土を用いた室内試験により、加圧の有無および加圧時間が一軸圧縮強さと湿潤密度に与える影響を検討し、加圧時間を設定した。次に、試験サイトにて試験コラムを築造し、加圧養生したモールドコアとボーリングコアの一軸圧縮強さ、湿潤密度、含水比を比較し、加圧養生仕様(加圧時間、加圧力度)の妥当性を検証した。また、簡易な装置が実現場で適用できるか否かを検討した。

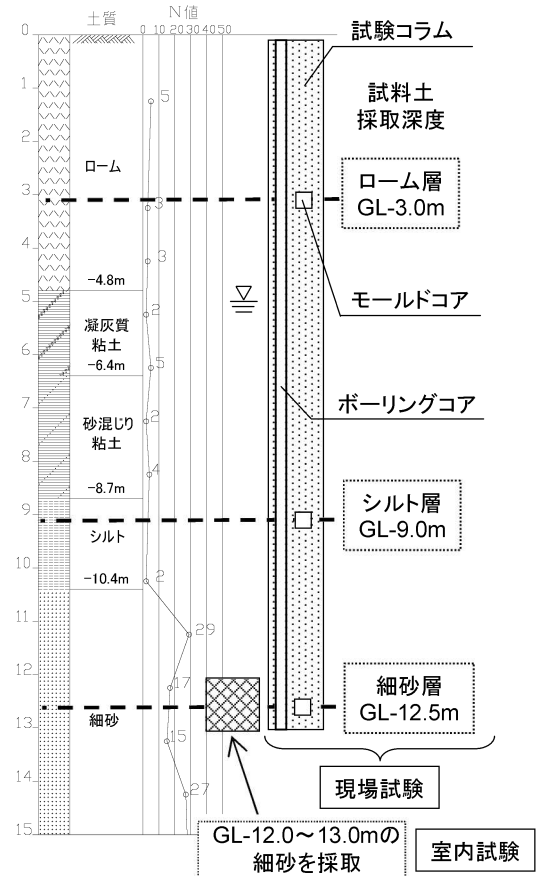


図-1 土質柱状図

表-1 室内土質試験結果

地盤材料の分類名		ローム	粘性土	細砂
採取深度 (GL-m)		2.0~2.9	9.0~9.9	12.0~13.0
一般	湿潤密度 (g/cm ³)	1.221	1.580	-
	土粒子の密度 (g/cm ³)	2.775	2.664	2.684
	自然含水比 (%)	142.8	69.9	34.1
粒度	礫分 (%)	0.0	0.0	0.1
	砂分 (%)	13.7	3.4	90.5
	シルト分 (%)	47.1	50.2	9.4
	粘土分 (%)	39.2	46.4	-
	均等係数	-	-	3.4

2. 試験方法

(1) 地盤条件

千葉県四街道市の試験サイトの土質柱状図を図-1 に、土質試験結果を表-1 に示す。当該地盤は、上位にロームおよび粘性土、その下位に N 値 15~29 の細砂層で構成されている。細砂は細粒分が 9.4% と少なく、均等係数が 3.4 と小さい均一粒径であることが特徴といえる。

(2) 室内試験

一般に、実現場で築造したコラムはソイルセメントの自重による圧密（密度の増加やこれに伴う排水、総水量の低下など）の要因で室内配合試験よりも強度発現が良好な環境下にあるといわれている^{3), 4), 5)}。特に、透水性の高い砂質土では、コラムの周囲地盤への排水が容易であるため、より強度が高くなるものと想定される。

今回の室内試験では、GL-12.0m~-13.0m で採取した細砂に着目した。ソイルセメントの自重を想定してモールドコアに加圧養生を行い、上記の要因の検証と加圧時間について検討した。併せて、セメントの水和反応の状況を把握するため、湿潤養生中（無加圧）のモールドコアに熱電対を埋め込み、連続的に温度測定を実施した。

室内試験の因子と水準を表-2 に示す。一軸圧縮試験用のモールドコア数は、21 個（加圧力度 3×加圧時間 7×モールドコア 1）とした。固化材添加量はコラム先端部での高強度化を実現するため、 900kg/m^3 とした。加圧養生は、図-2 に示すように三軸圧縮試験のセルに、下面に孔を空けた鋼製のサミットモールド（ $\phi 50\text{mm}$ 、 $h=100\text{mm}$ ）にソイルセメントを充填したモールドコアをセットした。モールドコア上部にはピストンを静置し、水圧を介して鉛直方向に加圧する方式とした。モールドコア下部にはろ紙およびポーラストーンを設置して排水する構造とした。この養生方法では「片面排水」状態で加圧養生を実施しており、実際のコラムの寸法や排水状態を必ずしも再現しているわけではないが、加圧時間を設定する上では、圧密に時間を要する片面排水を選定した。

GL-12.0m~-13.0m（細砂層）の有効土被り圧は $\sigma_z=105\text{kN/m}^2$ であり、これと前後して 3 ケースの加圧応力を設定した。また、加圧時間についての検討を行うため、加圧時間は、0.0h、0.5h、1.0h、3.0h、24.0h、72.0h、168.0h の 7 ケースとしたが、加圧時間 0.0h は無加圧である。密度測定および一軸圧縮試験の試験材齢は、加圧時間を含めて 28 日とした。

表-2 室内試験の因子と水準

因子	水準	仕様	
試料土	1	細砂	
配合条件	1	特殊土用固化材 W/C=80% 固化材添加量 900kg/m^3	
加圧養生	加圧力度 (kN/m^2)	3	50、150、250
	加圧時間 (h)	7	0、0.5、1.0、3.0、24.0、 72.0 (3 日)、168.0 (7 日)
	養生期間	1	28 日
温度測定	養生方法	1	無加圧
	測定位置	1	モールドコア上端から 7.5cm
	測定時間	1	48 時間

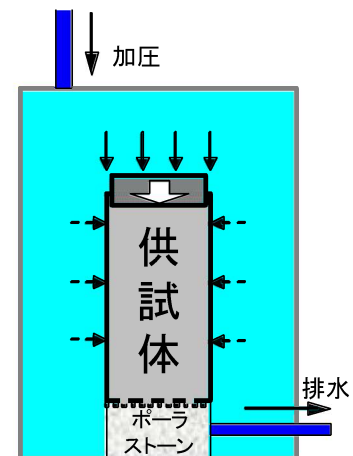


図-2 加圧養生方法

表-3 試験コラムの仕様

改良径 (mm)	空掘長 (m)	改良長 (m)	深度 (GL-m)	添加量 (kg/m^3)	W/C (%)
1000	1.0	12.0	1.0~12.0	300	80
			12.0~13.0	900	



写真-1 試験コラム築造状況

温度測定に用いたモールドは、直径 15cm、高さ 15cm の塩ビ管とし、厚さ 5cm の発砲材で覆ってから発砲スチロール容器に梱包した。熱電対は、モールドコア上端および表面から 7.5cm、離れた位置に埋め込んだ。

(3) 現場試験

① 試験コラムの概要

試験コラムの仕様を表-3 に示す。現場試験では、12t 級の施工機 (写真-1 参照) を用い、直径 ϕ 1000、掘削長 13.0m、改良長 12.0m の試験コラムを築造した。固化材添加量は、GL-1.0m ~ GL-12.0m が 300kg/m^3 、GL-12.0m ~ GL-13.0m が 900kg/m^3 とした。

② 試料土の採取方法

モールドコアは、コラム築造完了直後に攪拌混合装置を図-3 に示す試料土採取装置に付け替え、所定の深度で逆回転し採取窓を開放することで未固化試料を採取した。なお、モールドコアの採取深度は、GL-3.0m (ローム)、GL-9.0m (シルト)、GL-12.5m (細砂) とし、無加圧養生と加圧養生の 2 通りで養生した。また、ボーリングコアはコラムを築造してから 7 日後に、深度方向に全長にわたってコアを採取した。なお、モールドコアおよびボーリングコアは同一コラムから採取した。

③ モールドコアの加圧養生時間

試験コラムの築造から一軸圧縮試験を実施するまでの養生条件を図-4 に示す。モールドコア、ボーリングコアともに試験材齢は 28 日とし、モールドコアの加圧時間は、室内試験結果を参考にする。

④ モールドコアの加圧力度

深度毎のモールドコアの加圧力度を表-4 に示す。加圧力度 P は、地下水位 GL-5.0m を考慮し、地盤の有効土被り圧 $\sigma z'$ を上

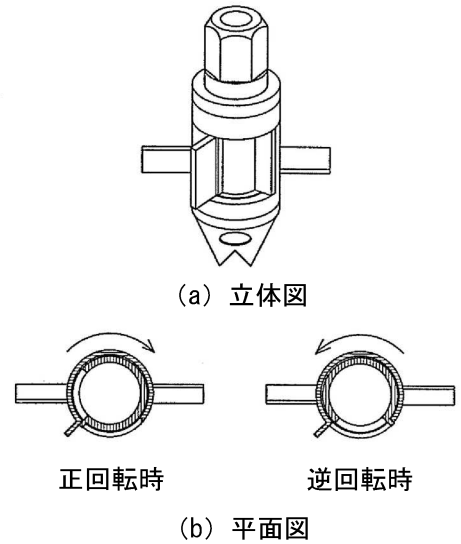


図-3 試料土採取装置

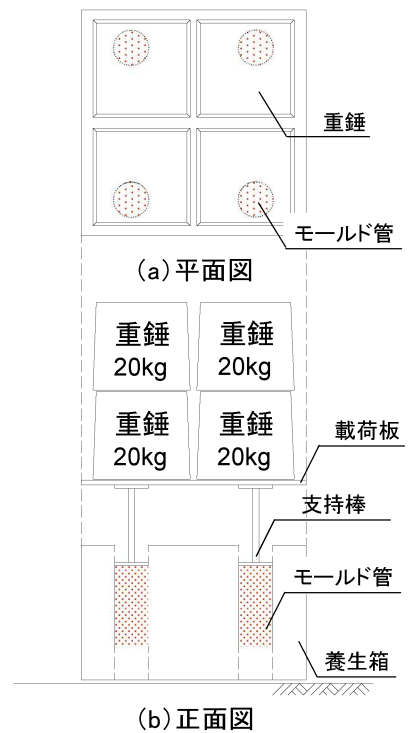


図-5 加圧養生装置

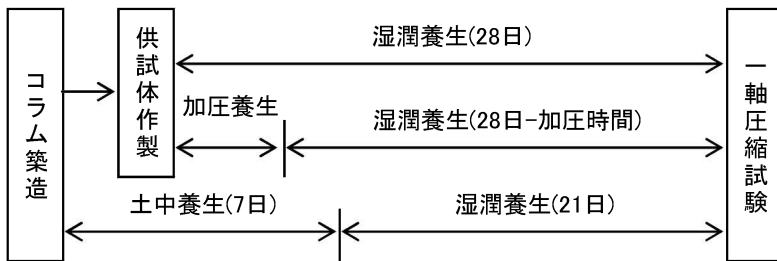


図-4 養生条件

表-4 加圧力度の算定

採取深度 (GL- m)	土質	全応力 σ (kN/m ²)	有効土被り圧 $\sigma z'$ (kN/m ²)	加圧力度 P (kN/m ²)	重錘 (個)
3.0	ローム	36	36	26	1
9.0	シルト	124	84	77	3
12.5	細砂	180	105	102	4



写真-2 考案したモールド管

回らないように設定した。

⑤ 加圧養生装置

モールドコアの加圧養生装置の模式図を図-5に示す。本装置は実現場で比較的容易に使用できることを前提に考案したもので、排水機能付き養生箱、転倒防止付き支持棒、載荷板、重錘、モールドコアから構成される。重錘には、施工設備のキャリブレーションに用いる20kgの重錘を複数使用した。加圧養生用として考案したモールド管を写真-2に示す。コラムの自重圧密を再現するため、モールドコア用の型枠上下端面には、複数の小孔を設けて排水を可能にした。また、圧密完了後に規定のモールドコア寸法(φ50×H=100mm)が確保できるように、モールド管の高さを通常より20mm高いH=120mmとした。

3. 試験結果

(1) 室内試験

図-6に、加圧時間と湿潤密度の関係を示す。加圧0h(無加圧)の湿潤密度(1.771g/cm³~1.816g/cm³)に対して、加圧0.5h~168.0hの湿潤密度は、1.904g/cm³~1.954g/cm³と増加した。また、加圧力度の増加に伴い、湿潤密度はわずかに大きくなっている。

図-7に、加圧時間と一軸圧縮強さの関係を示す。加圧0h(無加圧)の一軸圧縮強さ(7.32MN/m²~7.63MN/m²)に対して、加圧0.5h~168.0hの一軸圧縮強さは8.68MN/m²~11.30MN/m²と増加した。また、加圧養生した平均一軸圧縮強さ q_u と変動係数 V は、 $P=50\text{kN/m}^2$ で $q_u=8.85\text{MN/m}^2$ と $V=6.4\%$ 、 $P=150\text{kN/m}^2$ で $q_u=9.13\text{MN/m}^2$ と $V=4.5\%$ 、 $P=250\text{kN/m}^2$ で $q_u=10.14\text{MN/m}^2$ と $V=6.0\%$ であった。加圧力度の増加に伴い、一軸圧縮強さは増加傾向にあることが確認できた。また、加圧時間を0.5h以上にしても一軸圧縮強さが増加することはなく、一定値に収束することが確認できた。

図-8に、養生中のモールドコアの温度測定結果を示す。モールドコアの温度は作製直後から増加し、18h後に最大値35℃に達した後、緩やかに低下した。なお、室内気温は、15℃~18℃程度であり、明らかにモールドコアの温度と異なっている。

ここで、加圧養生中に温度上昇を経験していない0.5hと経験した24.0hの一軸圧縮強さを比較すると、両者に著しい差はなく、加圧中の温度上昇は一軸圧縮強さに大きな影響を及ぼさないと考える。

図-9に、加圧養生後の湿潤密度と一軸圧縮強さの関係を示す。加圧養生後のモールドコアでは、加圧力度

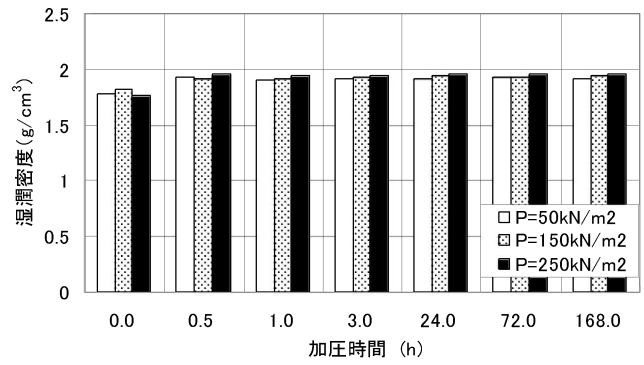


図-6 加圧時間と湿潤密度

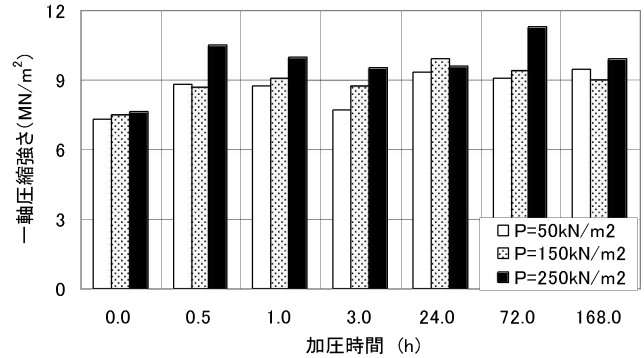


図-7 加圧時間と一軸圧縮強さ

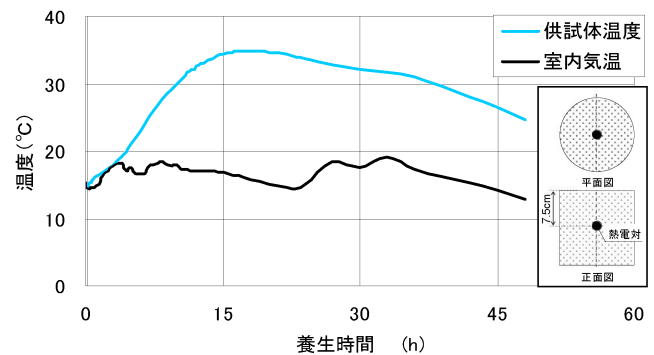


図-8 養生時間とモールドコア温度

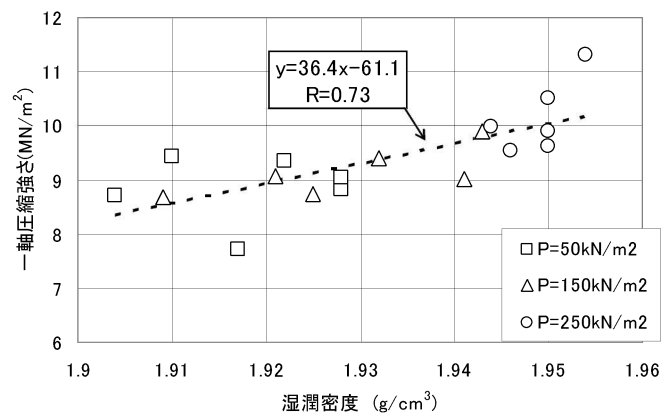


図-9 湿潤密度と一軸圧縮強さ

の増加に伴い湿潤密度と一軸圧縮強さが増加し、両者には一次の相関関係 ($R=0.73$) が見られた。したがって、加圧養生後の一軸圧縮強さは、ある程度湿潤密度に依存しており、湿潤密度が収束した後に加圧し続けても大きく強度は増加しないであろうと考察できる。

室内試験結果より、モールドコアの湿潤密度と一軸圧縮強さは 0.5h で一定値に収束し、加圧時間を長くしても変化しないことが確認できた。このことから、実現場における加圧時間は、作業性等を考慮して 1 時間と設定した。

(2) 現場試験

モールドコアおよびボーリングコアの一軸圧縮強さ、湿潤密度、含水比の深度分布を図-10、比較対象深度の各試験結果を表 5~7 に示す。

加圧養生されたモールドコアの一軸圧縮強さは、無加圧で養生されたモールドコアの一軸圧縮強さに比して概ね 1.1~1.2 倍であった。これは、湿潤密度の増加、含水比の低下から、モールドコアが圧密され、密実になったためである。

また、加圧養生したモールドコアの一軸圧縮強さは、ボーリングコアの一軸圧縮強さに比して 0.8~0.9 倍と若干小さい値となったため、本試験の加圧養生方法は安全側の結果となった。

以上より、加圧養生したモールドコアの一軸圧縮強さは、ボーリングコアの一軸圧縮強さに漸近することがわかった。これは、コラム自身の自重圧密を当加圧養生装置のモールドコアである程度再現できたことが大きな要因と考えられる。

4. 試験結果のまとめ

室内試験では、細砂を用いて加圧の有無と加圧時間が一軸圧縮強さと湿潤密度に与える影響を検討した。また、現場試験で加圧養生したモールドコアとボーリングコアの一軸圧縮強さ、湿潤密度、含水比を比較し、加圧養生方法（加圧時間、加圧力度）の妥当性を検証した。

- ① 室内試験では、加圧養生することでソイルセメント自重による圧密を再現できること、無加圧に比べ湿潤密度は 8%程度、一軸圧縮強さは 25%程度増加することが確認できた。また、加圧時間を 0.5h~168.0h まで実施したが、0.5h 以降顕著な密度増加、一軸圧縮強さの増加が確認できなかったため、現場試験における加圧時間を 1 時間と設定することができた。

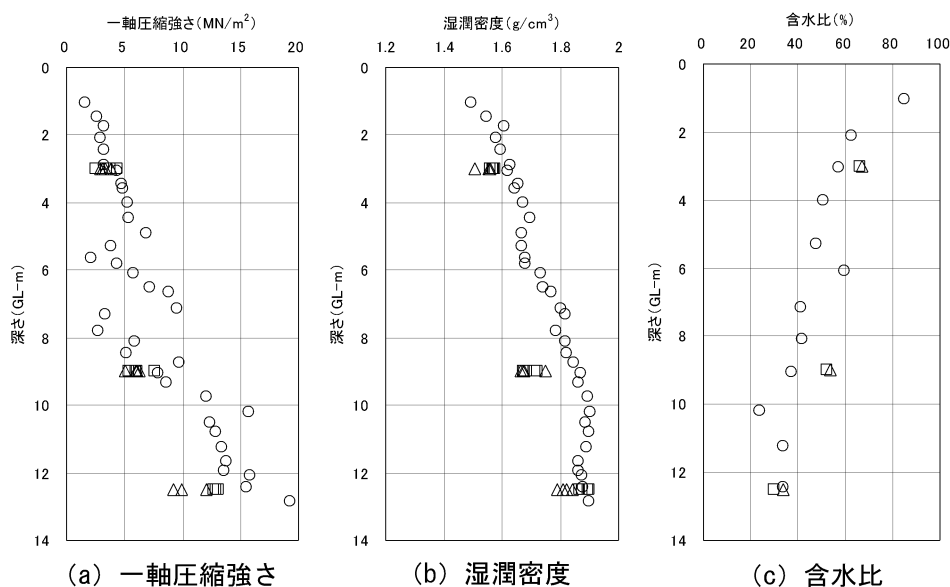


図-10 一軸圧縮強さ、湿潤密度、含水比の深度分布

表-5 試験結果 (ローム)

	一軸圧縮強さ (MN/m ²)	湿潤密度 (g/cm ³)	含水比 (%)
△ モールドコア (無加圧)	3.33	1.547	67.1
□ モールドコア (加圧)	3.52	1.568	66.3
○ ボーリングコア	4.40	1.619	57.1

表-6 試験結果 (シルト)

	一軸圧縮強さ (MN/m ²)	湿潤密度 (g/cm ³)	含水比 (%)
△ モールドコア (無加圧)	5.85	1.691	53.6
□ モールドコア (加圧)	6.26	1.697	52.2
○ ボーリングコア	7.92	1.817	37.1

表-7 試験結果 (細砂)

	一軸圧縮強さ (MN/m ²)	湿潤密度 (g/cm ³)	含水比 (%)
△ モールドコア (無加圧)	10.84	1.817	33.7
□ モールドコア (加圧)	12.90	1.884	29.8
○ ボーリングコア	15.50	1.877	33.8

- ② 現場試験では試験コラムから採取した加圧養生のモールドコアとボーリングコアの比較から、過剰な強度発現は認められず、概ね妥当な養生方法であると評価できる。
- ③ モールドコアを加圧養生することにより、コラムの自重圧密をある程度再現でき、ボーリングコアの一軸圧縮強度に近い値を得ることができた。このことから、加圧養生法は従来の大気圧下で養生したモールドコアよりも実際のコラムに近い応力状態と排水条件を再現することができた。また、実現場におけるモールドコアの加圧養生を簡易な装置で行えることが確認できた。

5. 今後の課題

- ① 実コラムとモールドコアの排水条件の相違（周辺地盤の透水性や、寸法による影響）について再現できていないが、現場の品質管理でこれを忠実に再現することは困難である。したがって、今回設定した加圧条件下での試験結果を蓄積し、過剰な強度発現とならないことを確認する必要がある。
- ② 今後は、予め加圧養生後の密度状態となるような配合としたケースと、本試験と同様に加圧養生したモールドコアを比較するなどの実験を行う予定である。そこで、湿潤密度増加に伴わず、長時間の加圧によって生じるセメントの水和反応による強度増加の有無を確認する必要がある。

（謝辞）

最後に、試験にご協力いただいた東邦地水鈴木弘剛氏、地質技研中川誠氏に感謝の意を表します。

（参考文献）

- 1)日本建築センター：改訂版建築物のための改良地盤の設計及び品質管理指針、2002
- 2)吉田・溝口・二木：建築基礎地盤としてのセメント系改良地盤に関する研究（その29）改良土の試験採取方法と一軸圧縮強度、1995年度日本建築学会大会学術講演梗概集、p871-872
- 3)望月・吉村・近・斉藤：砂質地盤の地盤改良のための配合試験における供試体作成方法、第43回地盤工学研究発表会、2008
- 4)山本・鈴木・岡林・藤野・田口・藤本 上載圧下で養生したセメント安定処理土の一軸圧縮強度特性、土木学会論文集 No.701/III-58、387-399、2002.3
- 5)大田・福田・上・加藤：深層混合処理工法による飽和砂地盤の改良強度について、第34回地盤工学研究発表会、1999