

ソイルセメント本設杭工法（TO-PSP 工法）の開発



金子 治*1

千葉 脩*1

中村 良雄*2

概 要

基礎工事の合理化、環境負荷の低減のため、原位置で攪拌混合して構築した高強度のソイルセメントに応力伝達材として芯材(形鋼)を挿入し、杭基礎や深層混合処理工法と同様の建築物を支持する本設の基礎構造物としての機能を確保する「ソイルセメント本設杭工法(TO-PSP 工法)」を開発した。本工法は、仮設山留め壁を構築するソイルセメント柱列壁(SMW)の施工機械で続けて本設の杭を築造できるため、大幅な工期の短縮、コストダウンが可能である。

本工法の開発にあたっては、以下に示す検討を実施して本設構造物として必要な構造性能が確保されていることを確認、設計施工指針を取りまとめた。

- 1)現場施工実験により、本工法の標準施工方法を用いることで、ソイルセメントが本設構造物に用いるのに十分な品質を確保していること、および施工精度、施工性が確保できていることを確認した。
- 2)構造実験、解析的検討により、芯材および頭付きスタッドとソイルセメント間、さらに芯材先端部のソイルセメントと地盤間の応力伝達機構を把握、設計式を設定した。
- 3)載荷試験により、鉛直支持力（先端支持力および周面摩擦力）、引き抜き抵抗力、水平抵抗について確認し、それぞれの設計式、設計手法を確立した。

DEVELOPMENT OF PERMANENT SOIL CEMENT MIXING PILES

Osamu KANEKO*1

Osamu CHIBA*1

Yoshio NAKAMURA*2

Permanent Soil Cement Mixing Piles(TO-PSP) which performed as permanent structures like pile foundations or deep mixing columns were developed. TO-PSP composed of soil-cement column and embedded H-shaped steel core were constructed by the same machines for temporary structures namely Soil Mixing Walls(SMW), and not only rationalization of construction works(cost down and reduction of execution time) but also mitigation of environmental loadings were obtained through execution employing TO-PSP.

A series of tests, in situ execution tests, structural experiments using model specimen and static axial and lateral load tests were carried , and the results were the followings.

- (1) Soil-cement columns high quality and high accuracy enough to accept as permanent structures.
- (2) Stress transfer mechanism among soil-cement column, steel core and ground were proved.
- (3) TO-PSP kept equal to or more bearing capacity than deep mixing methods.

*1 技術研究所 *2 東京支店建築工事技術部

*1 Technical Research Institute *2 Architectural Engineering Dept.

ソイルセメント本設杭工法 (T0-PSP 工法) の開発

金子 治*1
千葉 脩*1
中村 良雄*2

1. はじめに

基礎工事の合理化、環境負荷の低減のため、原位置で攪拌混合して構築した高強度のソイルセメントに応力伝達材として芯材(形鋼)を挿入し、杭基礎や深層混合処理工法と同様の建築物を支持する本設の基礎構造物としての機能を確保する「ソイルセメント本設杭工法(T0-PSP工法)」を開発した¹⁾。本工法はソイルセメント柱列壁²⁾(SMW)の一部または全体を支持層まで延長して本設の支持杭として用いる工法で、仮設山留め壁を構築したSMWの施工機械で続けて本設の杭を築造できるため、大幅な工期の短縮、コストダウンが可能である。

開発は平成13年より2年間にわたって行い、本設構造物としての品質および構造性能の確保、応力伝達機構の把握、支持性能の確認、等の課題に応じて、現場施工実験、構造実験、載荷試験を実施して、品質、構造性能確保に必要な事項を検討、把握した。最終的にこれらの成果を設計・施工指針に取りまとめ、平成15年3月4日付で(財)日本建築総合試験所の建築技術性能証明(第02-22号³⁾)を取得した。

2. 工法の特長および開発計画

T0-PSP工法の特長を以下に示す。

- ①本工法では支持層まで削孔してソイルセメント改良体を構築するために、仮設構造物用ではあるが大深度の施工に実績のあるSMWの施工機械を用いる。適用範囲は、施工径は350～1,100mm、最大施工深さは50m、施工単位(エレメント:EL)は3連または単孔である。
- ②支持性能確保のため、ソイルセメント先端部は富配合として目標一軸圧縮強度 $5\text{N}/\text{mm}^2$ を、その他一般部は $1\text{N}/\text{mm}^2$ を確保し、かつ深層混合処理工法並みのばらつきとなるよう十分な攪拌を行う。
- ③構造物の荷重をソイルセメントおよび地盤に伝達するための芯材(H形鋼、I形鋼)の挿入性確保のため、施工直後のソイルセメントの流動性、改良体の鉛直精度、施工径が確保できる施工水準とする。
- ④本工法の荷重伝達メカニズムは図-1に示すように、建物荷重をまず芯材へ、さらに芯材とソイルセメントの付着力および芯材先端部に設置したシアコネクタとソイルセメントの支圧あるいは芯材先端面とソイルセメントの支圧によりソイルセメントへ伝え、最後にソイルセメントから周面摩擦力および先端支持力により周辺地盤に伝達するというものである。

以上の特長を考慮して本設構造物としての品質および性能を確保できる設計、施工方法を確立するため以下の手順により開発を進めた。

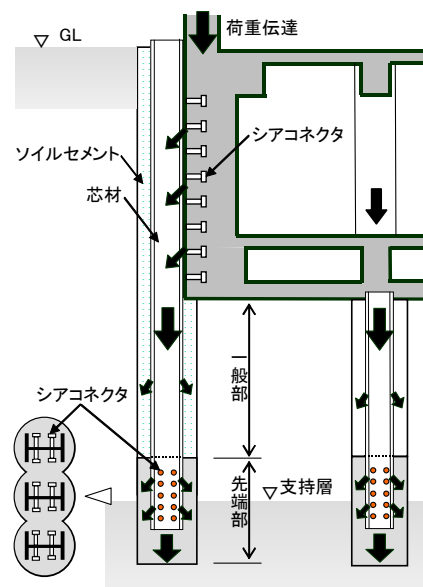


図-1 T0-PSP工法応力伝達メカニズム

- ①各種文献調査、試設計に基づくソイルセメント目標強度、必要品質の把握
- ②ソイルセメントの強度、流動性確認のための室内配合試験
- ③ソイルセメントの品質確認、施工精度、施工性確認のための現場施工(施工性確認)試験、
- ④応力伝達機構の解明と確認のための構造実験および解析的検討、
- ⑤支持性能確認のための載荷試験

以下、③～⑤の検討内容について報告する。

3. 施工性確認試験

(1)概要

本工法は仮設構造物の施工に用いるSMW施工機械をそのまま用いることで合理化をはかっており、本設構造として使用可能な品質および施工性、施工精度を確保することが重要な課題であった。そこで、室内配合試験およびSMWの施工実績を元に設定した施工水準を用いて現場において施工性確認試験を行い、品質の把握とその管理方法について検討することとした。試験の一覧を表-1に、試験場の地盤条件を図-2に示す。

(2)ソイルセメントの強度特性

最初に、室内配合試験およびSMWの施工実績に基づいて、性能確保に必要なと考えられるソイルセメントの配合および施工方法を表-2に示すように仮定して、これを基本ケース(a試験体)としてパラメータを設定し、深さ8m

*1 技術研究所 *2 東京支店建築工事技術部

表 - 1 現場施工試験の概要

試験場	No.	施工径×深さ×形状×試験体数	試験内容
1	a,b,c,d	φ 550× 8.0 m×3 軸・1EL×4 体	施工時、直後 : 注入液比重, 注入液注入量, オーガー電流値測定, 電気比抵抗調査, 芯材建込み難度試験 コア採取試料 : コア採取率, 一軸圧縮試験, 割裂試験, 一面せん断試験 未固ソイル掘出し調査 : 一軸圧縮試験, 流動性調査(シリンダーフロー試験) : 土塊混入率, ソイルセメントの施工径・鉛直精度, 芯材の鉛直精度調査
	e1	φ 550× 8.0 m×3 軸・3EL×1 体	
	g1,g2	φ 650×17.5m×3 軸・3EL×2 体	
	g3	φ 900×17.5m×3 軸・1EL×1 体	
2	i	φ 650×33.5m×3 軸・1EL×1 体	

表 - 2 標準施工方法

	目標強度	固化材配合量	水セメント比	攪拌回数
一般部	1 N/mm ²	353 kg/m ³	150%	38 回/m
先端部	5 N/mm ²	705 kg/m ³	80%	100 回/m*

*繰返し攪拌(ターニング)および孔底攪拌を行う

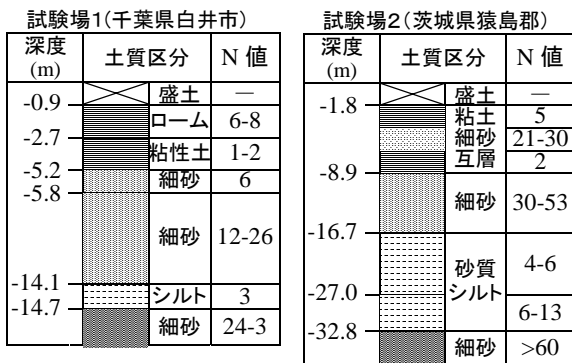


図 - 2 施工性確認試験を実施した地盤

(一般部5m + 先端部3m)、施工径 550 φ の施工試験を実施した。試験パラメータは先端部の配合および攪拌回数で、配合量を減らした場合、攪拌回数を減らした場合、ターニングを行わなかった場合との比較を行った。

施工後にa試験体から採取したコア試料の平均一軸圧縮強度(q_u 、材令 28 日) 変動係数(V)、設計基準強度³⁾ ($F_c = (1 - mV) q_u$)を表 - 3 に示す。係数 m は不良率 10% と仮定し 1.3 とした。算定にあたっては、強度が深さに比例する傾向が見られたことから、一般部を上下に分けている。a 試験体では $V=0.28 \sim 0.35$ と、強度のばらつきも小さく、 F_c は目標強度を上回ったが、他の試験体は $V>0.4$ となる箇所や、目標強度を下回る部分も見られ、最初に設定した水準が最適であることが確認された。そこで、表 - 2 に示す施工水準を標準施工方法としてその後の各種試験で採用することとした。

続いて、この標準施工方法により同じ試験場で施工深さ 17.5m(一般部 14.5m+ 先端部 3m) 施工径 650 φ、900 φ の施工試験を、さらに別の(載荷試験を行う)試験場で施工深さ 33.5m、施工径 650 φ の施工性確認試験を行った。

試験結果を表 - 3 および図 - 3 に示すが、すべての試験体で設計基準強度は目標強度を満足し、かつ強度のばらつきは変動係数で 0.44 以下であり深層混合処理工法と同程度の品質⁴⁾が確保されていることを確認した。また、その他の定数に関しては、変形係数: $F_{E50} = 180 \cdot F_c$ 、せん断強度 $F_{r,50} = 0.31 \cdot F_c$ 、引張強さ $F_{St} = 0.1 \cdot F_c$ (N/mm²)、内部摩擦角 $\phi_s = 28.9^\circ$ (砂)、 31.5° (シルト)と、深層混合改良と同等の評価式が得られた。

本工法の品質確認は、深層混合処理工法と同じくコア

表 - 3 コア採取試料の強度(材令 28 日)および変動係数

No.	施工深度	採取位置	供試体個数	平均強度 (N/mm ²)	変動係数	設計強度 (N/mm ²)
a	8.0 (m)	一般部上部	18	2.67	0.35	1.44
		一般部下部	9	6.44	0.28	4.12
		先端部	19	13.04	0.30	7.95
g1	17.5	一般部上部	39	6.90	0.43	3.01
		一般部下部	35	11.48	0.43	5.08
		先端部	41	15.80	0.37	8.27
g2	17.5	一般部上部	36	7.58	0.44	3.37
		一般部下部	36	12.92	0.43	5.78
		先端部	44	14.66	0.35	7.90
g3	17.5	一般部上部	39	3.90	0.31	2.32
		一般部下部	36	8.98	0.28	5.67
		先端部	44	9.76	0.37	5.12
i	33.5	一般部(砂)	18	7.00	0.27	4.25
		一般部(シルト)	15	3.55	0.35	1.94
		先端部	13	18.4	0.24	12.60

サンプリングを行うことを原則としたが、本工法では施工時にソイルセメントに芯材を挿入することから、これを利用して施工直後の固結前の試料(未固結ソイル)を原位置から採取することが可能であり、管理試験の合理化が可能である。そこで、各試験体の構築に際して専用の採取器を使って未固結ソイルの採取を行い、コアサンプリング試料との比較を行った結果、図-4 に示すようにコア強度と未固結ソイルの強度比は平均で 1.7、下限値でも 1.5 となった。現地土を用いた室内配合試験でも深層混合処理工法の一般的傾向とは異なり、常にコア試料の方が高い強度となっている。これは、今回試験を行った地盤は砂質土主体の地盤でかつ大深度施工であり、固化以前の養生初期段階で脱水圧密⁵⁾されたことで原位置での強度が高くなったものと考えられる。このことはコア供試体の密度は深さに比例して大きく、含水比は低くなっていたことから裏付けられる。この結果から、原位置における養生条件を十分に考慮すれば、未固結ソイルや室内配合



写真 - 1 施工性確認試験実施状況

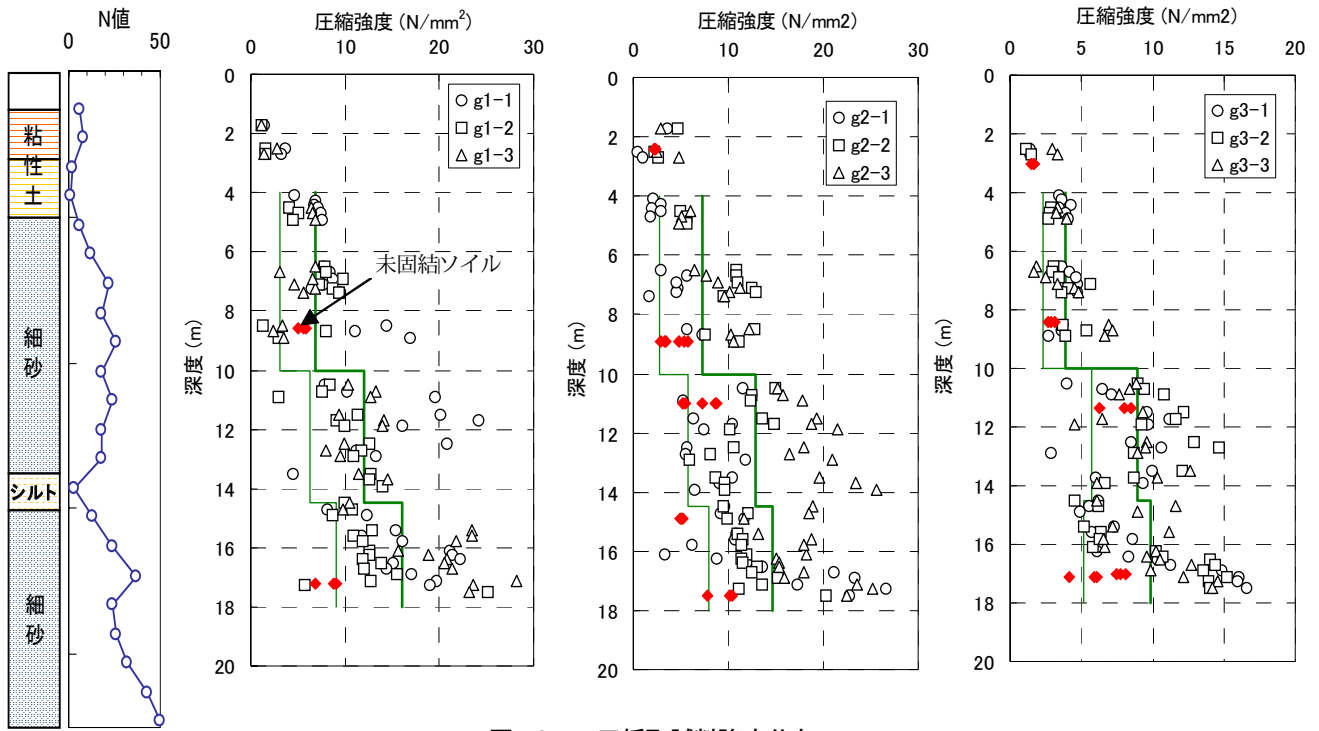


図 - 3 コア採取試料強度分布

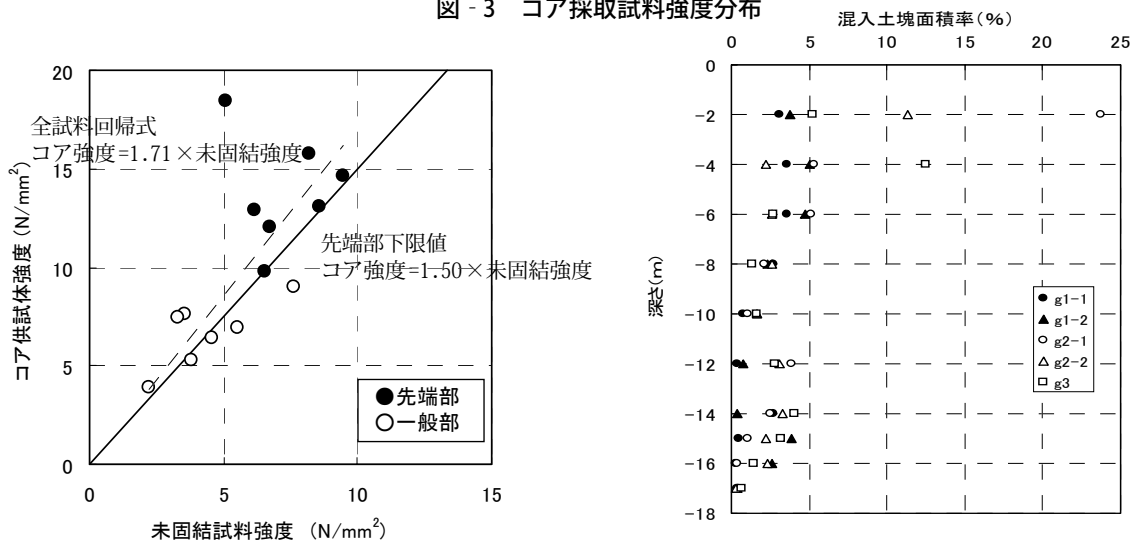


図 - 4 コア強度と未固結ソイル強度の関係

図 - 5 土塊混入率の分布

ルや室内配合試料を用いて品質管理を行うことができると判断し、本工法では、未固結ソイルにより品質管理を行えることとした。なお、コア強度と未固結ソイルの強度比は、砂質土が主体の地盤については試験結果の下限値である1.5、その他の地盤では当面は1.0とした。

(3)ソイルセメントの攪拌混合度の評価

ソイルセメントの強度のばらつきは攪拌混合度の影響が大きいと考えることから、コア採取率、土塊混入率、電気比抵抗^①を指標として試験体の品質を確認するとともに、定量的な評価法としての適用性について検討した。

コア採取は各試験体3ヶ所ずつ全長で行ったが、コア採取率（採取されたコアの全長 / 削孔長）は、すべての試験体で95%以上となり、この結果からも本試験体の実績値である変動係数0.44以下と対応する品質が確保されていると判断できる。

また、掘り出した試験体を水平方向に切断した断面全体に対して土塊混入率（断面中のフェノールフタレイン溶液に反応しなかった（土塊）面積の割合）を測定した結果を図-5に示すが、GL-4.0m程度までの浅い範囲を除けば5%以下と、品質の確保が確認された。

ただし、これら2つの指標は固結後に採取した試料を用いるため、実施工の品質管理に直接用いるのは時期的、コスト的に厳しいことから、実績は多くないものの、施工直後に未固結状態で実施できる電気比抵抗調査^②による品質評価を試みた。図-6に比抵抗値の変動係数と測定位置近傍で採取されたコアの採取率と比較した結果を示すが、比較した位置でのコア採取率は98%以上、これに対応する比抵抗値の変動係数は0.4以下となっており、電気比抵抗調査によりソイルセメントの品質＝攪拌混合度を評価可能であることが確認されたことから、本工法の品質管理手法の1つとして採用することとした。

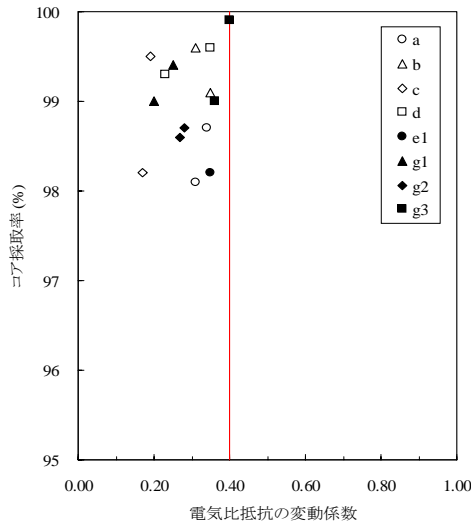


図-6 電気比抵抗とコア採取率との関係

(4) 芯材建込み調査およびソイルセメントの流動性試験

本工法では応力伝達材である芯材を支持層まで挿入することを基本としており、その施工性を確保するには、施工後一定時間までソイルセメントの流動性が保たれていなければならない。そこで、試験杭に対して一定の経過時間ごとに芯材の建込み調査を行い、経過時間と建込み性の関係を把握することを試みた。あわせて、未固結ソイルによるモニタリングの可能性について検討するため、未固結ソイルに対する流動性試験を実施し、建込み調査と比較検討した。

建込みは地組みして一本ものとした芯材をクレーンで吊り上げて建込み位置に移動し、下部を挿入用ガイドに合わせた後、直交する2方向からトランシットにより鉛直精度を確認し、自重により落とし込む、という手順で行った。その結果、本工法の施工水準によれば施工深さが40mを超えても、実施工での最大放置時間と推定される3時間以内であれば、所定の深さまでの挿入がほぼ可能であることがわかった。

さらに、施工直後に試験体内から採取した未固結ソイルの経過時間ごとの流動性をシリンダーフロー試験(JHS A313-1992)により測定した結果、フロー値は3時間後までは150mm以上で、その後急激に流動性が低下しており、建込みの傾向と対応していた。そこで、フロー値と建込み率(実際の挿入長さ/計画挿入長さ)の関係を求めると図-7のようになり、ここから未固結ソイルのシリンダーフロー値を指標として(管理値150mm)、芯材建込みの可能性をモニタリングできることがわかった。

(5) ソイルセメントの施工径・鉛直精度

本工法の施工水準により本設構造物として適切な施工精度が確保されていることを確認するため、試験体の掘出し調査を行った。測定は3次元写真測量の手法を用いており、まず基礎工法の施工と同様なケーシングを試験体周囲に設置して周辺地盤を掘削除去して試験体を露出させ、その表面に貼り付けたターゲットを撮影する。続いて、撮影した写真から各ターゲットの3次元座標値を求め、同一平面での座標値から施工径を算出するとともに、設計位置からのずれ量を求め、2方向成分に分割した

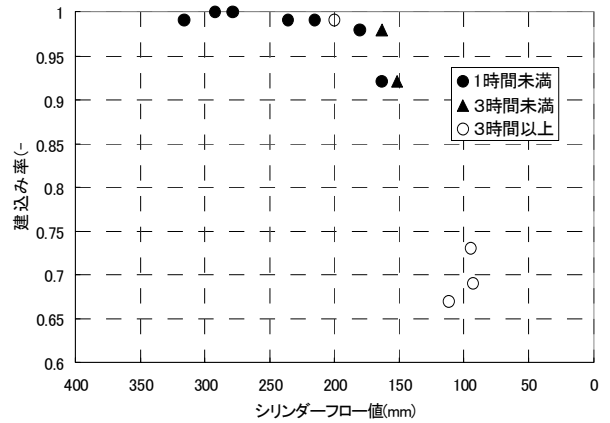


図-7 建込み率とシリンダーフロー値との関係

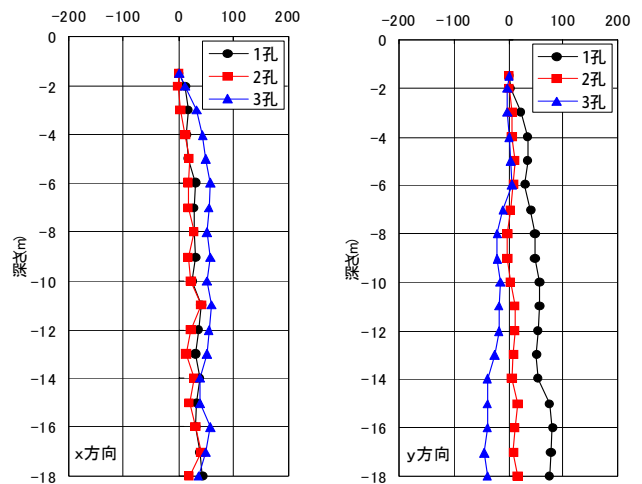


図-8 鉛直精度測定結果 (No. g2)

上で鉛直方向に結んで鉛直精度を算出した。

削孔径650φの試験体の鉛直精度の一例を図-8に示す。深度が深くなるにつれて時計回りにねじれるような相対変位が生じたものの鉛直精度として1/113 (155 mm / 17,500mm)の鉛直精度が得られた。900φの試験体では1/450の鉛直精度であった。

施工径はオーガー径650に対して655~700mmで全ての深度で設計径以上を満足していることを確認した。

(6) まとめ

本工法の標準施工水準により構築した杭の品質、施工性、施工精度について検討するため、現場において施工性確認試験を行い、以下の事項を確認した。

- ①ソイルセメントの設計基準強度は本工法の支持性能確保のために必要となる目標強度を満足できる。この時、強度のばらつきは深層混合処理工法と同程度以内となっている。
- ②ソイルセメントの品質管理としてコアサンプリング試料と同様に、未固結ソイルを用いることができるが、未固結ソイルの強度評価にあたっては原位置の養生条件を十分に考慮する必要がある。
- ③ソイルセメントの品質(攪拌混合度)をコア採取率、土塊混入率、電気比抵抗調査により確認できる。特に、電気比抵抗調査を用いれば施工直後のソイルセメントの品質を評価できる。

- ④施工後3時間程度までは芯材の建込みは可能であり、その可否は未固結ソイルの流動性(シリンダーフロー値)で管理可能である。
- ⑤鉛直精度は1/100以上、施工径は設計値以上、を確保することができる。

4. 構造実験および解析的検討

(1)概要

芯材からソイルセメントへの荷重伝達機構(付着、頭付きスタッドおよび芯材先端部の支圧)については原位置での調査が困難であることから、模型試験体に対する構造実験および有限要素法を用いた解析的検討を行って確認した。検討内容の一覧を表-4に示す。

(2)一般部付着力試験

芯材とソイルセメントの付着力の把握のため、図-9に示すソイルセメント(高さ550mm、直径550mm)に芯材(H-400x200x8x13、長さ600mm)を挿入した試験体を作成し、押抜き実験(芯材に荷重)を行った。なお、ソイルセメントは地盤の拘束を模擬して外周部を鋼管(0.6mm)で巻いている。パラメータはソイルセメント強度で、試験体は各3体で、加力は変位制御一方向漸増荷重である。

試験結果から得られた付着強度 τ_b と圧縮強度 q_u の関係を図10に示すが、ソイルセメントは最終的に芯材下部で45°方向に破壊したため、この部分の耐力(斜引張強度： $St=0.2 \cdot q_u$)を除いた値(×)から下の評価式(破線)を導いた。

(3)先端部付着・支圧試験

芯材に打設されたスタッドのソイルセメントに対する支圧(せん断)強度把握のため、芯材(H-400x200x8x13)および(鉄板 $t=3\text{mm}$)で囲んだ内側にソイルセメントを充填した試験体を用いて押抜き試験(ソイルセメントに荷重)を行った。パラメータはソイルセメント強度、スタッド径、付着の有無である。

試験結果ではいずれの試験体でも明かな降伏が見られなかったため、15mm相対ずれ時の荷重を終局支圧強度と仮定し付着のない試験体から下限回帰すると、スタッドの支圧(せん断)強度 q_{sc} とスタッド軸径 a 、ソイルセメントの強度 q_u について、 $q_{sc}=13.42 \cdot a \cdot q_u$ という関係式が得られた。また、付着のある試験体の付着強度を(1)式で評価すると、ここで評価した q_s と単純累加できることを確認した。

ただし、付着強度の最大値はごく小さい変形量での値であることから、相対ずれ量5mm時の q_s で再評価し、図11から下の評価式を導いた。

$$q_s = 8.0 \cdot a \cdot q_u \quad \text{式(2)}$$

また、長時間荷重(約170時間)によりクリープ変形がほとんどないことを確認した。

(4)先端支持力確認試験

先端部の支持機構を把握するために先端部の形状を想定して径550mm高さ2,600mmのソイルセメントに芯材(H-400x200x8x13)を上端より2,000mmまで埋込んだ試験体を用いて荷重試験(芯材に荷重)を行った。ソイルセメント外

表-4 構造実験の概要

試験内容	試験体数	
一般部付着力試験	実大 9体	
支圧・付着力試験	押抜き付着試験	実大 2体
	押抜きせん断試験	実大 10ケース・30体
	クリープ試験	実大 3体
先端部支持力試験	実大 3体	
室内水平荷重試験	1/2 模型 1体	

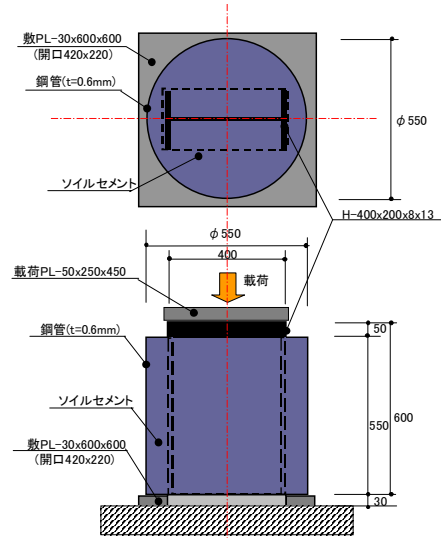


図-9 一般部付着力試験体

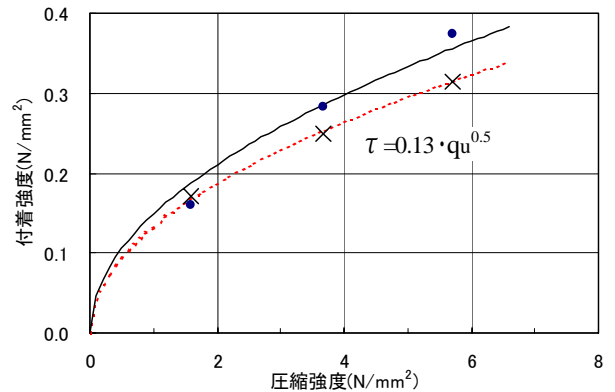


図-10 芯材とソイルセメントの付着強度

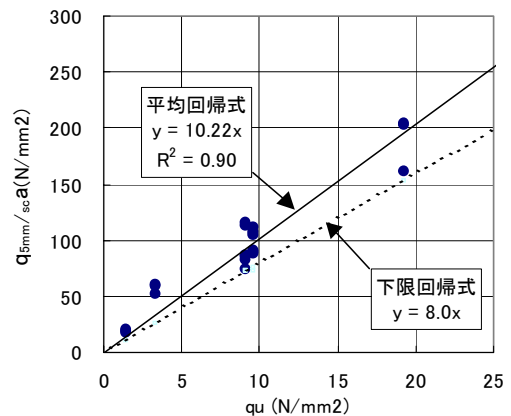


図-11 頭付きスタッドのせん断耐力

周には(2)と同様に厚さ0.6mmの鋼管を巻いている。パラメータは、ソイルセメント強度(実測値 4.5N/mm^2 、 0.78N/mm^2)と頭付きスタッド有無で、加力は変位制御一方向漸増荷重である。

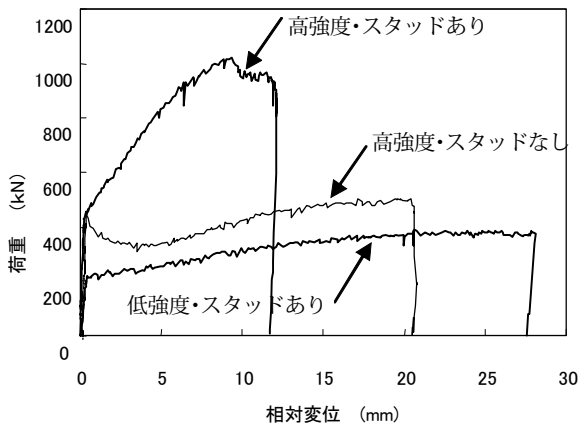


図 - 12 先端支持力確認試験結果

図 - 12 に荷重-変位関係を示すが、付着がきれる ($\delta = 0.3 \text{ mm}$) までは試験体による差はほとんどなかったが、頭付きスタッドがない試験体ではその後は荷重が低下し、鉛直変位 $\delta = 10 \text{ mm}$ 時におけるソイルセメント全断面の荷重度 P/As は、荷重面を芯材閉塞断面と考えると 1.8 N/mm^2 とソイルセメント圧縮強度以下で、割裂破壊の可能性も考えられる。一方、頭付きスタッドを打設した試験体は付着がきれた後も荷重は上昇し、高強度試験体では最大荷重時の P/As は 4.3 N/mm^2 、低強度試験体でも $\delta = 10 \text{ mm}$ 時の P/As は 1.3 N/mm^2 と、ソイルセメント圧縮強度程度の値であり、全断面一体で抵抗しているものと思われる。また、試験後にソイルセメントを解体して観察した結果、スタッド打設区間のソイルセメントが両フランジを結ぶ閉塞断面で割裂した跡が見られ、さらに頭付きスタッドは最下段のみが塑性変形していた。以上から、芯材先端部に頭付きスタッドが打設されていれば、芯材閉塞断面で直下のソイルセメントに荷重伝達するものと判断した。

(5) 解析的検討

(2)~(4)の実験について有限要素法によるシミュレーション解析を行い、耐力評価式および想定する破壊メカニズムの妥当性を確認するとともに、先端部においては頭付きスタッドの拘束効果により荷重が芯材の閉塞断面からソイルセメント全断面に伝達されることを確認した。

解析モデルは、本工法の構造要素であるソイルセメント、芯材、頭付きスタッド同士は、節点を共有させず、耐力式で荷重-変位関係をモデル化したばねでつないだもので、破壊が予想される芯材拘束断面位置のソイルセメントもばねを介してつながっているものとした。

さらに、根固め杭の先端部の破壊挙動に関する解析⁷⁾と同じ手法により、芯材先端以深のソイルセメントの破壊形式について検討した結果、ソイルセメント長さを芯材の幅 $B \times$ 高さ H の平方根の2倍以上確保すれば、芯材先端部のソイルセメントのパンチング破壊が避けられ、内部でのせん断滑り破壊となることを確認した。

以上の解析結果に基づいて、支持力に関する理論解(Prandtl解)を用いて芯材先端部のソイルセメントの極限支持力 R_a を算定した結果、式(3)で評価すれば安全側であることを確認した。

$$R_a = 3F_c \cdot B \cdot H \quad \text{式(3)}$$

表 - 5 载荷試験の概要

	断面形状	削孔長 芯材長(m)	芯材寸法	先端地盤・ 加力方向
1	φ 900×3 連	41.4(41.0)	H-428×407×20×35	砂礫
2	φ 900×3 連	29.5(27.3)	H-582×300×12×17	シルト
3	φ 650×単杭	34.5(32.9)	BH-300×300×22×32	細砂
4	φ 650×3 連	34.5(32.9)	BH-300×300×12×25	細砂
5	φ 650×単杭	19.8(18.0)	H-400×400×13×21	砂質シルト
6	φ 650×3 連	19.8(18.0)	H-390×300×10×16	砂質シルト
5'	φ 650×単杭	19.8(18.0)	H-400×400×13×21	(引抜き)
7	φ 650×単杭	16.5(15.0)	H-400×200×8×13	H型鋼弱軸
8	φ 650×単杭	16.5(15.0)	H-400×200×8×13	H型鋼強軸
9	φ 650×3 連	16.5(15.0)	H-400×200×8×13	H型鋼弱軸

5' は引抜き試験, 7, 8, 9 は水平载荷試験

(6) まとめ

- ① 構造実験により、ソイルセメントと芯材の付着強度(式(1))およびソイルセメントに対する頭付きスタッドのせん断強度式(式(2))を導いた。また、頭付きスタッドが打設されていれば芯材先端部では閉塞断面で荷重伝達することを確認した。
- ② 実験により導いた耐力式を用いて試験結果をシミュレート可能であることを確認した。
- ③ 芯材先端以深のソイルセメントの長さが $2 \times \sqrt{B \times H}$ 以上あれば、この部分の支持力は式(3)で評価できる。

5. 鉛直载荷試験

(1) 概要

本工法の支持力特性を把握するため、表 - 5 に示す鉛直载荷試験を実施した。試験は図 - 13 に示す2つの敷地で行い、杭先端地盤は、No.1 ではN値 60 の砂礫、No.3, 4 では細砂、No.2, 5, 6 ではN値 3-7 のシルト層である。施工径は施工深さが 40m を超える No.1 および No.2 は 900 φ、その他は 650 φ で、群杭効果を把握するため、No.1, 2, 4, 6 は3連杭、No.3, 5 は単杭とした。ひずみゲージ位置を図 - 13 に示すが、試験杭 No.1~4 では杭先端到達荷重を確保するために、フリクションカット材を塗布している。また、沈下量は杭先端および杭頭部で測定している。载荷方式は、地盤工学会「杭の鉛直载荷試験方法・同解説」⁸⁾ に準拠し、各計画最大荷重に対して9~12段階、5サイクルで载荷した。

杭の施工は標準施工水準により、ソイルセメントの目標強度は一般部 1 N/mm^2 、先端部 5 N/mm^2 としたが、試験場 2 でコアサンプリングした試料の一軸圧縮強度の平均値は 5.2 N/mm^2 、 18.4 N/mm^2 となり、本試験の評価は実測値を用いて行った。

(2) 先端支持力

試験結果のうち、各試験体の杭頭荷重-沈下関係を図 - 14 に、No.3, 5 の各測定区間の荷重-沈下量関係を代表例として図 - 15 に示す。予定荷重まで先端に到達せず極限に至っていない試験体もあるが、たとえば No.3 では第1限界抵抗力付近までの载荷であるものの、杭径を施工径(650mm)と考えれば、その 10% の沈下量には達しており、先端地盤が支持力の小さいシルト層である No.5 ではほぼ極限状態に至っており、10% 沈下量も超えている。

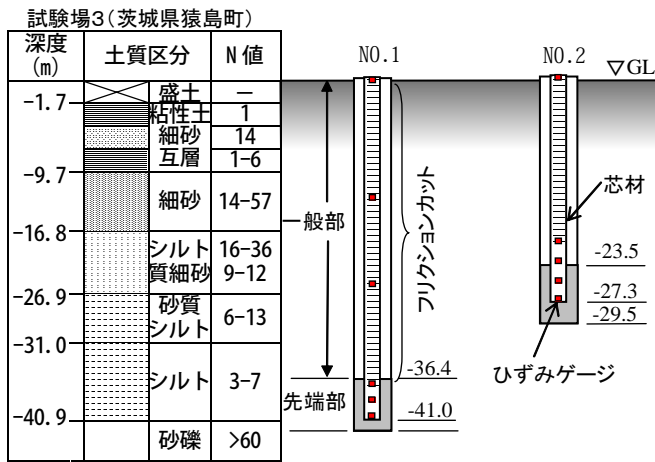


図 - 13 載荷試験を実施した地盤

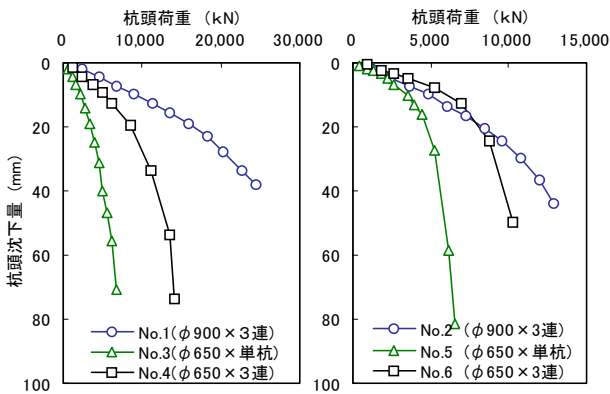
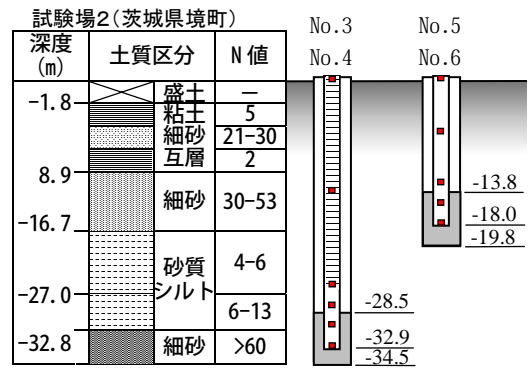


図 - 14 杭頭荷重－杭頭沈下量関係

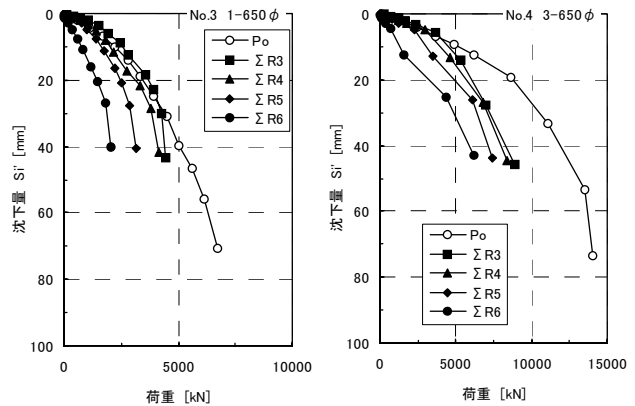


図 - 15 各測定区間の荷重－沈下量関係 (No. 3, No. 5)

表 - 6 に先端荷重に関する試験結果のまとめを示すが、降伏荷重(第1限界抵抗力)の判定は、杭頭、杭先端について $S \sim \log t$ 法を用いて、極限荷重は宇都らの方法⁹⁾を用いて推定した。沈下量が杭径の10%沈下量に達していない試験体の荷重－沈下関係も同方法によった。なお、第2限界抵抗力評価のための10%沈下量評価にあたっては、3連杭の場合も施工径を杭径とした。

ここで、本工法の先端支持力 R_p を式(4)で評価として、試験結果およびN値、粘着力の実測値から係数を算定すると、 $\alpha = 133-191$ 、 $\beta = 7.3-17.6$ となった。

$$\begin{aligned}
 R &= \alpha \cdot N \cdot A_s \text{ (砂質土)} \\
 &= \beta \cdot c \cdot A_s \text{ (粘性土)}
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

N: 杭先端付近のN値
 A_s : ソイルセメント断面積
c: 粘性土層の粘着力

そこで、係数としては文献⁹⁾に示された深層混合処理工法の値を用いて、式(5)を本工法の先端支持力 R_p の評価として採用し、安全側に評価することとした。図 - 16 および表 - 6 に試験結果と計算値の比較を示す。

$$\begin{aligned}
 R_p &= 75 \cdot N \cdot A_s \text{ (砂質土)} \\
 &= 6 \cdot c \cdot A_s \text{ (粘性土)}
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

また、式(3)による芯材先端のソイルセメントの支持力の計算値はすべて式(5)によって算定した先端支持力を上回っていた。

表 - 6 杭先端荷重試験結果一覧 (単位:kN)

	降伏荷重	極限荷重	10%沈下時	計算値
No.1	10,385	16,429	15,173	5,973
No.2	1,859	2,940	2,937	999
No.3	1,928	3,051	2,626	1,583
No.4	5,391	8,529	7,197	4,137
No.5	171	271	255	209
No.6	555	878	878	325

(3) 周面摩擦力

試験結果の代表例としてNo.3、No.5について、軸方向力分布およびそこから導いた周面摩擦力度 杭頭沈下量 S_0 関係を図 - 17 に示す。No.3では沈下量が大きくなるとフリクションカット部下端の区間(3-5)で測定値が乱れるが、これを除くと周面摩擦力は双曲線的な性状¹⁰⁾を示し、最終的にほぼ降伏に達していることがわかる。

周面摩擦力 R_f を深層混合改良工法と同じ式(6)で評価するものとして、試験区間ごとに試験結果と計算値を比較した結果を砂質土部分(第1項)と粘性土部分(第2項)に分けて図 - 18 に示す。

$$R_f = \phi \left(10/3 \cdot N_s \cdot L_s + 1/2 \cdot q_u \cdot L_c \right)
 \tag{6}$$

ϕ : ソイルセメントの周長(m)
 N_s : 砂質地盤の平均N値 (上限30)
 q_u : 粘土地盤の一軸圧縮強度の平均値 (上限200kN/m²)

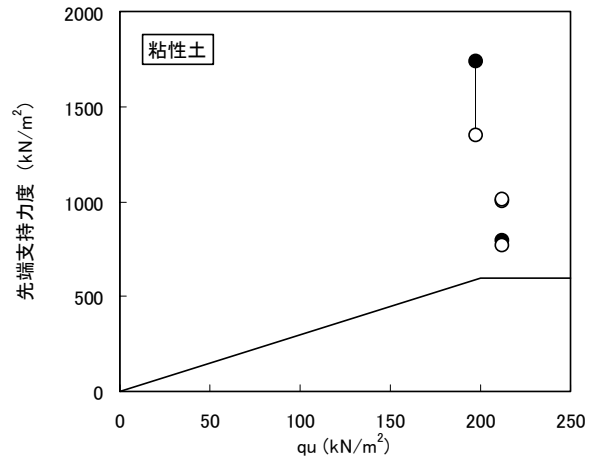
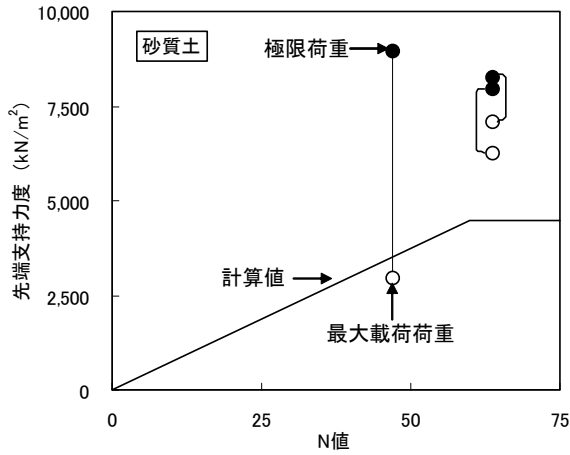


図 - 16 先端部支持力の試験結果と計算値との比較

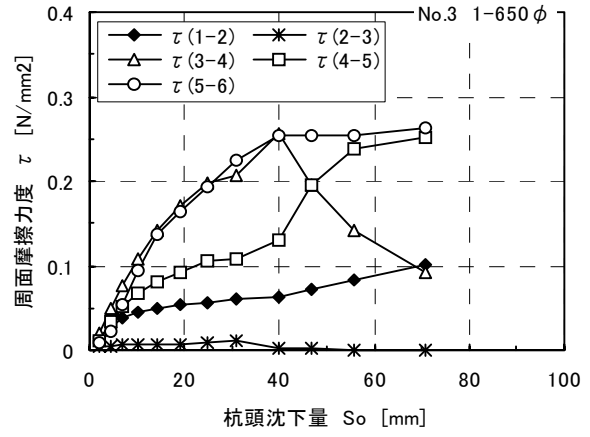
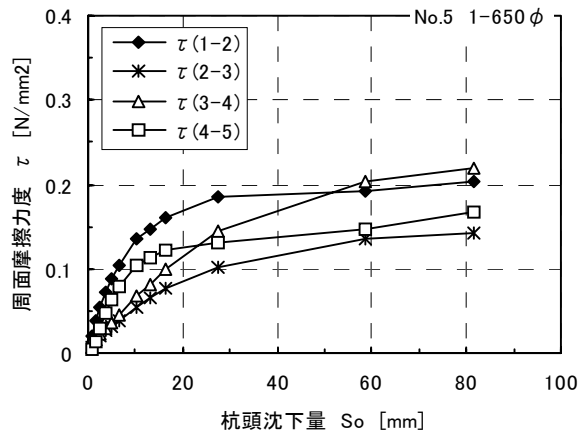


図 - 17 周面摩擦力度と沈下量の関係 (No. 3, No. 5)

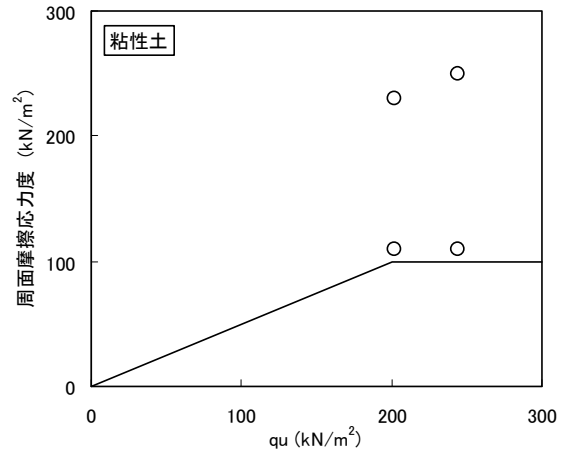
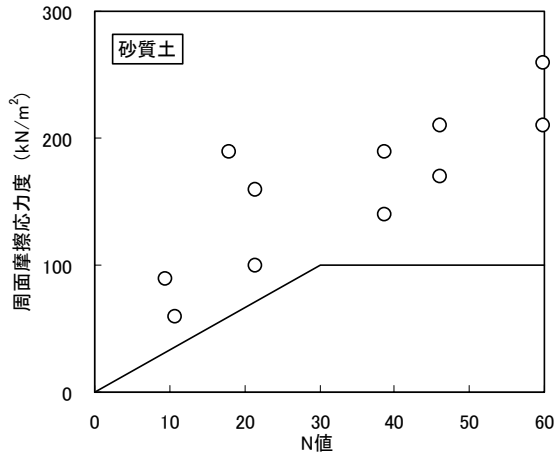


図 - 18 周面摩擦力の試験結果と計算値との比較

Ls : 砂地盤に接する長さの合計(m)

Lc : 粘土地盤に接する長さの合計(m)

試験結果は計算値をすべて上回っており、本工法において(6)式により周面摩擦力Rfを評価すれば安全側の評価となることが確認された。

以上から、本工法の鉛直支持力を式(5)または式(3)による先端支持力Rpと式(6)による周面摩擦力Rfの和とすることとした。ただし脆性的な破壊を防ぐ意味で、支持力Ra=Rp+Rfが式(1)(2)から求められる芯材とソイルセメントの付着と頭付きスタッドのせん断耐力の和を下回らないことを確認することとした。

また、3連杭で施工したNo.4、6と単杭のNo.3、5と比較した結果、これらの間では群杭効果は見られなかった。

(3)引抜試験

No.5に対する押込方向鉛直載荷試験から4日後に同じ試験杭を用いて引抜試験(No.5')を実施した。

その結果、国土交通省告示1113号に準拠して、引抜き抵抗力Rutを押込み時の周面摩擦力の4/5(式(7))とすると、試験結果はすべての測定区間で計算値を1.1~4.0倍上回っており、式(7)は安全側の評価となっていることを確認した。ただし、鉛直支持力と同様に芯材とソイルセメントの付着破壊が先行しないことを確認するものとした。

$$R_{ut} = \phi (4/5) (10/3 \cdot N_s \cdot L_s + 1/2 \cdot q_u \cdot L_c) \quad \text{式(7)}$$

(4)まとめ

①鉛直載荷試験の結果、本工法の鉛直支持力は深層混合処理工法の支持力式(5)、(6)を用いて安全側に評価できることを確認した。

②引抜き試験の結果、引抜き抵抗は式(7)により安全側に評価できることを確認した。

6. 水平載荷試験

(1)概要

本工法では芯材からソイルセメントを介して地盤に荷重を伝えるが、水平荷重が加わる場合はソイルセメントに曲げひび割れが発生することが避けられないことから、ソイルセメントに鉛直荷重時と同様な荷重伝達機能を期待することは難しい。そこで、ひび割れ状況が観察可能な室内水平載荷試験によりソイルセメントの挙動を確認した上で、原位置載荷試験により水平方向地盤反力の評価方法について検討し、あわせて本工法の特長である壁状に連続配置させた場合の群杭効果について検討した。

(2)室内水平載荷試験

試験体は縮尺1/2を想定し、芯材としてH-200x100x5.5x8(長さ2.0m)を0.225m間隔で11本配置した間にソイルセメント(1N/mm²)を充填したものである。載荷は変位制御(最大80mm)の正負交番載荷とした。

載荷により、初期はソイルセメントに斜めひび割れが生じ、その後上下端で曲げひび割れが増加するものの、他の部分ではあまり増えず、ソイルセメントと芯材が剥離して行った。一方、本試験ではソイルセメント打設前に芯材のみの状態でも載荷を行っているが、これと比べるとソイルセメントがある場合は、ひび割れや剥離の進んだ最終段階まで負担荷重の増加が確認された。

以上から、本工法では水平力が作用した初期段階からソイルセメントにひび割れが発生するものの、変形量が大きくなっても芯材間にあるソイルセメントは荷重負担が可能な状態を保っていることがわかった。

(3)原位置水平載荷試験

原位置水平載荷試験は表-5に示すように、加力方向を芯材の弱軸方向(No.7)と強軸方向(No.8)とした2体、および群杭効果の確認を目的とした3連杭(No.9)の3体に対して実施した。No.9の加力方向は芯材の並んでいる方向(芯材単独では弱軸方向)である。杭長は16.5m、施工径は650φ、ソイルセメントは全て一般部仕様である。試験地盤は図-13に示す試験場2である。載荷は補強した芯材頭部に一方向多サイクル載荷方式で加え、杭頭荷重、杭頭変位および杭体のひずみを計測した。

試験結果で得られた荷重-変位関係から、単杭のNo.7、8は杭頭自由の、3連杭のNo.9は杭頭固定の突出杭(突出長600mm)として、Chang式を用いて変位量10mmでの測定値を用いて水平方向地盤反力係数khを算出した。なお杭体の剛性は芯材のみを評価した。この値とN値および一軸圧縮強度の実測値から求めた変形係数を用いて、見付け幅を芯材寸法あるいはソイルセメント径として文献(11)に示された式($kh=80 \cdot E_o \cdot B^{3/4}$)で算出した水平方向地盤反力係数を比較した結果、表-7に示すように、試験結果から導いたkh値は変形係数の評価方法、見付け幅の取り方を

表-7 水平地盤反力係数の比較 (単位:MN/m³)

	見付幅	評価方法		
		実測値	$E_o \leftarrow qu$	$E_o \leftarrow N$ 値
No.7	芯材 B	24.4	8.45	7.19
	ソイル径	15.0	5.87	5.00
No.8	芯材 H	58.8	14.21	10.31
	ソイル径	18.1	5.87	4.26
No.9	芯材 B	47.9	8.45	7.60
	ソイル径	29.5	5.87	5.28

えたとすべてのケースの計算値を上回っていた。

また、3連杭(No.9)の芯材のそれぞれの曲げモーメントをNo.7と比較しても有意の差は認められなかった。

(4)まとめ

①芯材間のソイルセメントは水平荷重を受けた初期段階からひび割れが生じ、芯材から剥離して行くものの、繰り返し載荷による大変形後でも荷重負担可能な剛性を維持できる。

②水平地盤反力は、杭剛性として芯材のみを評価し、芯材の見付け幅を用いれば、安全側の評価となる。また、本工法の標準である芯材の弱軸方向の連続配置の場合、水平抵抗評価において群杭と見なす必要はない。

7. おわりに

原位置で攪拌混合して構築した高強度のソイルセメントに応力伝達材として芯材を挿入し、本設の杭として用いるソイルセメント本設杭工法(TO-PSP工法)の品質、応力伝達機構、支持性能に関する各種実験、検討を行い、設計・施工指針を作成、建築技術性能証明を取得した。

引き続き、これらの成果に基づいて実際の現場において本工法を適用し、実施工を通じて品質、施工性に関するデータを取得した。今後は、本工法の適用を通じて一層の基礎工事の合理化、環境負荷の低減をはかるとともに、工法の改良、高度化を目指して行く予定である。

本報告は戸田建設、西松建設、青木建設、浅沼組、安藤建設、大木建設、奥村組、鴻池組、五洋建設、住友建設(現三井住友建設)、銭高組、鉄建建設、松村組、三井建設(現三井住友建設)の14社による共同研究の成果をまとめたものである。

[参考文献]1)中村他、「ソイルセメント本設杭工法の開発(その1)~(その8)」、2003年度日本建築学会大会、2003(投稿中)、2)日本材料学会、「ソイルセメントミキシングウォール(SMW)設計施工指針」、2002、3)日本建築総合試験所、「建築技術性能証明評価概要報告書 PSP工法-芯材を有するソイルセメント杭工法-」、2003、4)日本建築センター「建築物のための改良地盤の設計及び品質管理指針」、2002、5)山本他、「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、PP387-399、2002、6)「国土交通省総合技術開発プロジェクト「建設事業の品質管理体系に関する技術開発」報告書 建築分野編、pp.5-141~149、2001、7)倉知他、「根固め杭の根固め先端部の破壊に及ぼす形状影響」、第28回土質工学研究発表会、1993、8)地盤工学会、「杭の鉛直載荷試験方法・同解説」、pp.147~155、2002、9)宇都他、「杭の載荷試験結果の整理方法」、基礎工、pp.21~30、1982、10)伊勢本他、「場所打ちコンクリート杭の支持力性能(その2)周面摩擦力-変位特性」、日本建築学会大会学術講演梗概集B-1、pp727-728、2000、11)日本建築センター、「地震力に対する建築物の基礎の設計指針」、1984