

# 建設発生土類を活用した軟弱地盤改良工法の開発

松尾 稔<sup>1</sup>・木村 稔<sup>2</sup>・西尾 良治<sup>3</sup>・安藤 裕<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 名古屋大学教授 地圏環境工学専攻 (〒464-01 名古屋市千種区不老町)

<sup>2</sup>正会員 工修 中部電力株式会社 土木建築部 主幹 (〒461-91 名古屋市東区東新町1番地)

<sup>3</sup>正会員 中部電力株式会社 土木建築部 副長 (〒461-91 名古屋市東区東新町1番地)

<sup>4</sup>正会員 工修 不動建設株式会社 ジョ・エンジニアリング事業本部 部長 (〒110 東京都台東区台東1-2-1)

建設発生土を地盤改良材(サンドコンパクションパイルなどの中詰め材)として再利用できれば、環境問題解決の有効策として期待できる。本研究では、建設発生土を用いた地盤改良杭に実際に施工し、杭間粘土において施工時に発生する過剰間隙水圧の消散、地表面沈下などの圧密現象と、その後の強度増加が盛土載荷によらず実際に起こりうることを実証した。また、施工後の杭の強度の評価方法、および施工方法についての検討を行い、建設発生土を杭の中詰め材料として用いる際の必要条件を明示した。

**Key Words** : soil improvement, waste soil, sand compaction pile, test embankment

## 1. はじめに

近年の社会の重要な技術課題のひとつにいわゆる環境エネルギー問題がある。地盤工学の分野でも、建築基礎(地下部分)・トンネルなどの建設時に出てくる建設発生土や、石炭火力発電所からの石炭灰の処理が大きな環境問題のひとつとなっている<sup>1)</sup>。一方、最近ではサンドコンパクションパイル(以下SCPと呼ぶ)やサンドドレーン(以下SDと呼ぶ)用の良質な砂材料を確保することが、環境上の様々な制約により次第に困難となることが予想されている。

そこで、著者らは建設発生土類の有効利用策として、従来のSCPやSDの中詰め材料に建設発生土類を利用し、力学的見地から本来の機能を落とすことなく地盤を改良する工法の開発を試みてきた<sup>2)</sup>。そこではSCPやSDの本来の機能を落とさないために以下のような新しい地盤改良の考え方を導入している。

- (1) 施工時に発生する過剰間隙水圧が消散することによる杭間粘性土の強度増加を考慮する<sup>3)・4)</sup>。
- (2) 砂杭の排水機能をプラスチックボードドレーン(PD)材で代替する。
- (3) 建設発生土の中でも砂質土材料については、中詰め材として用いた場合その強度を積極的に考慮する。

本研究は産学共同による工法開発研究プロジェクト

トである。このような研究プロジェクトでは、①まず到達すべき目標を明確に設定して参加メンバーの意識を統一し、②目標を達成するための技術課題を抽出して、③各課題ごとの具体的解決策を検討し、実施する、というプロセスをとることが重要となる。また研究のステップとしては、室内実験や数値解析を主体とした基礎研究レベルから、現場での実施工試験による効果の確認や設計法の開発などの応用研究に進むのが一般的である。本論文で扱われるのは後者の応用研究である。なお、前報<sup>2)</sup>では、本工法の基礎概念の解説および、前者の室内実験を主体とする基礎研究の成果について報告した。そこでは、上述した(1)～(3)の地盤改良の考え方について、それぞれに対応する3つの室内実験を行い、その効果と適用範囲を具体的に示した。これらの成果は、本文中にも必要に応じ随時述べていくようにする。

本論文ではまず工法の基礎概念について第2章で再度簡単にふれた後、上に述べた“(1)施工時に発生する過剰間隙水圧消散後の杭間粘性土の強度増加効果”および“(3)中詰め材料の強度”を確認するために実施した現場実験について、その結果を第3章に示す。また、そこでは建設発生土を用いた軟弱地盤改良工法の設計方法の提示と実験結果に基づくそれらの評価を行っている。第4章では建設発生土を用いた杭の実際の施工方法および施工機械を検討するための予備実験の結果報告を行っている。

## 2. 建設発生土類を利用した地盤改良工法の概要

### (1) 建設発生土類の分類と中詰め材としての利用

砂杭による地盤改良工法においては、SCPとSDの2つが主要な工法であり、それぞれ改良目的とその機能によって使い分けられている。SCPとSDの施工面での違いは図-1で説明できる。すなわち、SCP打設においては、図-1に示すようにケーシングを所定深度まで貫入した後(b)、砂を投入しながらケーシングを引抜いて砂杭を造成するのだが、地表面まで引抜いていく過程で一定間隔ごとにケーシングを再度打戻していく(d)ことにより強固な砂杭を造るのが特徴である。このとき、周辺の杭間粘性土は押し広げられ、ケーシング径よりも大きな径の砂杭が造成される。一方SDの施工では、図-1(d)の打ち戻し工程は含まず、その結果ケーシング径と同じ太さの砂杭が造成される。

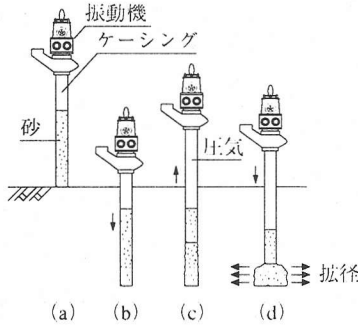


図-1 砂杭の施工過程

表-1 構造形式，材料その他による整理<sup>2)</sup>

	T Y P E - 0	T Y P E - 1	T Y P E - 2	T Y P E - 3
構造形式	<p>材料投入</p> <p>通常のSCP施工(パイプ口によるケーシング打込みと打戻しによる砂杭の拡径及び締固めを行なう)。</p>	<p>材料投入</p> <p>若干材料中の細粒分含有率が増えるが、通常のSCP施工が可能。ただし杭の排水性が悪化するので、場合によってPD(プラスティックドレーン)を併用する。</p>	<p>材料投入</p> <p>さらに細粒分含有率が增加するため、土中で杭の拡径ができなくなりSCP施工は不可能となる。通常のドレーン施工で、PD材付被覆材との一体打設とする。</p>	<p>材料投入</p> <p>施工法はTYPE-2と同等であるが、細粒分含有率が50%を超えるため、場合によって石灰などによる前処理が必要。PD材付被覆材との一体打設とする。</p>
材 料	砂、(一)種*	一、(二)種* 石炭灰(造粒)	二、(三)種* 石炭灰(土砂混合)	三、(四)種* 石炭灰(ブレンド)、泥土
区別基準	$0 \leq F_c < 15\%$	$15 \leq F_c < 25\%$ 程度	$25\text{程度} < F_c < 50\%$	$50 \leq F_c \leq 100\%$
期待する機能	①複合地盤機能による支持力増加 ②応力集中効果(沈下低減) ③高強度な砂杭 ④排水機能 ⑤杭間粘土の強度増加	①複合地盤機能による支持力増加 ③杭強度をある程度考慮可 ④排水機能 ⑤杭間粘土の強度増加	①粘土強度増加による支持力増加 ④排水機能 ⑤杭間粘土の強度増加	①粘土強度増加による支持力増加 ④排水機能 ⑤杭間粘土の強度増加

\* ) 第一種建設発生土: 砂、礫及びこれらに準ずるもの  
 第二種建設発生土: 砂質土、礫質土及びこれらに準ずるもの  
 第三種建設発生土: 通常の施工性が確保される粘性土及びこれらに準ずるもの  
 第四種建設発生土: 粘性土及びこれらに準ずるもの ( $q_c \geq 2\text{kgf/cm}^2$ )

建設発生土や石炭灰を中詰め材に用いようとする場合、SCPの代替かSDの代替とできるのかをまず判断しなければならない。そこで建設発生土材料の分類が必要となるが、ここで分類の基準として、材料に含まれる細粒分含有率(Fc: Fine Content)および材料の含水比を選んだ。これはもっぱら杭の施工性による。使用材料のFcの値によって構造形式(TYPE-0~TYPE-3)を変え、用途、機能による整理を行ったのが表-1である。これは前報<sup>2)</sup>に掲載した表に若干の修正を加えたもので、本論文の理解を助けるために再掲している。

TYPE-0は通常のSCPと同じ構造となる。ここで、材料の欄で(一)種とあるのは、建設省の分類<sup>5)</sup>における第一種建設発生土でも使用可という意味である。Fcが15%を越えてくると、後述するように材料の透水性が悪くなるので、排水機能を代替する目的でPD材を別途打設する(TYPE-1)。

また杭材料のFcが20~25%以上になってくると、粘性が大きくなり強度も小さいために、地盤内でケーシングを打ち戻しても周辺地盤を押しひろげることが難しくなると考えられる。そこで、TYPE-2,3は拡張しないで造るSD工法の代替となる。TYPE-2,3では、PD材を袋(直径500mm)に装着し、従来から開発実用化されている袋詰めドレーン工法と同等の施工を行うことによって、ケーシング内の材料の通過を容易にするとともに砂杭施工機1台ですべての施工を可能としている。

またTYPE-3材料の含水比wが上がってくる(w $\geq$ 25%)と、ホッパーから投入する材料がケーシング内を流下しにくくなり、施工性の低下を招く。このため生石灰などによる前処理が必要となってくる。

## (2)地盤改良の新しい考え方の要点

建設発生土を利用した軟弱地盤改良工法には、以下に示すように3つの新しい地盤改良の考え方を採用しようとしている。これにより、従来の砂杭工法と比較し、同等かそれ以上の改良効果が期待できるものである。

a) 施工時の過剰間隙水圧が消散することによる杭間粘性土の強度増加を考慮する<sup>3), 4)</sup>。

SCP(SDでも同じ)を打設した後の杭間粘性土の強度が、打設直後には乱されていったん低下するものの、時間経過後にはふたたび蘇り、最終的に原地盤以上に強度増加する現象<sup>9)</sup>に着目し、これを積極的に評価していこうとするものである。

このような原地盤以上の強度増加現象が起こるメカニズムについてはつぎのような仮説が立てられる。「砂杭打設時に必要な排土、すなわち粘性土地

盤中での円筒拡張のための力が、杭間粘性土地盤の破壊と過剰間隙水圧上昇を引起し、かつ圧密荷重として長く持続して杭間粘性土に作用し、その結果杭間粘性土は過剰水圧の消散による圧密に伴い強度を回復、元の地盤より大きなせん断強度を有する。」

最近になり、多くの実測事例や数値解析を通じて、この仮説が正しいことが実証されている<sup>2), 7), 8)</sup>。

従来のSCPの設計では、杭間粘性土の強度増加はあくまで盛土のような上載荷重によってもたらされるとされ、このような砂杭施工後の強度増加は、その力学的な検討が不十分であったこともあり、設計中の安全率の一部として扱われてきた。これに対し本文では、この強度増加を力学的かつ定量的に評価して、設計の中に積極的に取り入れていこうとするものである。

なお、前報<sup>2)</sup>の室内試験の結果によれば、上に述べた施工後の圧密による強度増加(以後 $\Delta c_2$ と呼ぶ)と、上載荷重による強度増加(以後 $\Delta c_1$ と呼ぶ)はそれぞれ独立に考慮することができる。

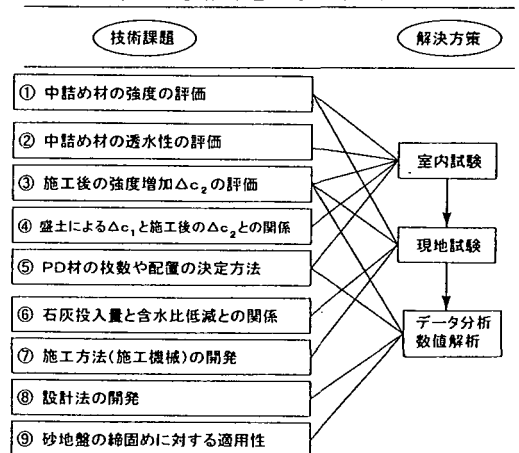
b) 砂杭の排水機能をプラスチックボードドレーン(PD)材で代替する。

一般に砂質土では細粒分が増えてくると、その透水性は低下してくる。そこで、砂杭の排水機能は、別途杭の周囲に打設したり、袋に装着するPD材の排水性で補う(TYPE-2,3)こととする。一般にPD材のような人工材料は、今後ますますその品質は向上し、逆にコストは低下していく傾向にある。

c) 建設発生土の中でも砂質土材料はその強度を積極的に考慮する。

TYPE-1材料(15 $\leq$ Fc<20%)は、室内実験<sup>2)</sup>の結果、その透水係数が $10^{-4}$ cm/sec前後であった。したがって設計上は、特に急速載荷でない限り、杭強度として排水強度を取り得ると考えられる。なお後述するよ

表-2 技術課題とその解決策



うに現場実験では、TYPE-1材料で10~25程度の杭芯のN値が得られている。

### (3) 技術課題の整理

工法開発にあたっての主要な技術課題とその解決方策を表-2にまとめる。また図-2には、技術課題解決の手順を示している。表-2のうち①~⑤については、前報に示した室内実験<sup>2)</sup>によって詳細な検討を行った。今回は、①、③、⑥、⑦、⑧、⑨について新たに実施した現場実験およびその解析によって、残された技術課題解決に取り組む。計画している現場実験

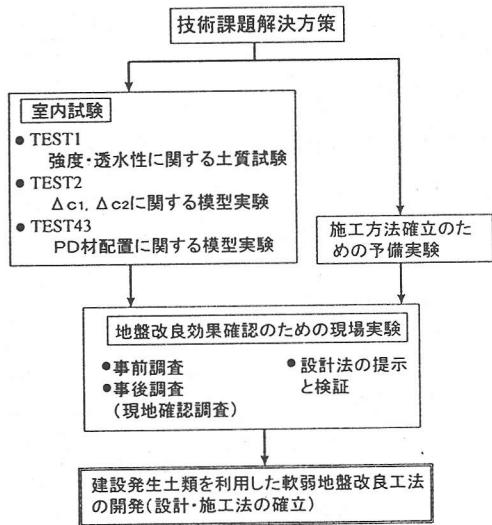


図-2 技術課題解決手順

は、図-2に示すように地盤改良効果確認のための実験と施工方法確立のための予備実験の2つである。

### 3. 建設発生土を利用した地盤改良工法の改良効果確認のための現場実験

#### (1) 実験の概要—技術課題と現場実験との関係

本実験の目的は、施工時の過剰間隙水圧上昇~消散、それによる強度増加 $\Delta c_2$ および地表面沈下などの力学現象を、現場実験で確認するとともに、強度増加 $\Delta c_2$ の設計方法確立のための基礎データを得ることである。さらに杭芯のN値および室内三軸試験による中詰め材の強度の評価も行う。

まず、表-2中の各技術課題と本実験との関連を整理しておく。本実験では、各建設発生土(TYPE-1, 2, 3)を中詰め材料として用いて、3ヵ所で7×7本の杭を実際に打設し、打設中、打設後の計測、調査、解析により、以下の技術課題を検討する。

- ① 中詰め材の強度の評価
- ③ 施工後の杭間粘性土の強度増加 $\Delta c_2$ の評価
- ⑧ 設計法の開発
- ⑨ 砂地盤の締め固めに対する適用性

現場実験は、名古屋港臨海部の埋立地において平成7年6月~平成8年3月の期間で実施された。図-3に施工状況および計器設置状況を示す。なお今回TYPE-1材料を用いた実験では、PD材は建設発生土の杭を打設し終わってから施工している。施工数量を表-3に、調査項目と目的については、表-4にまとめている。

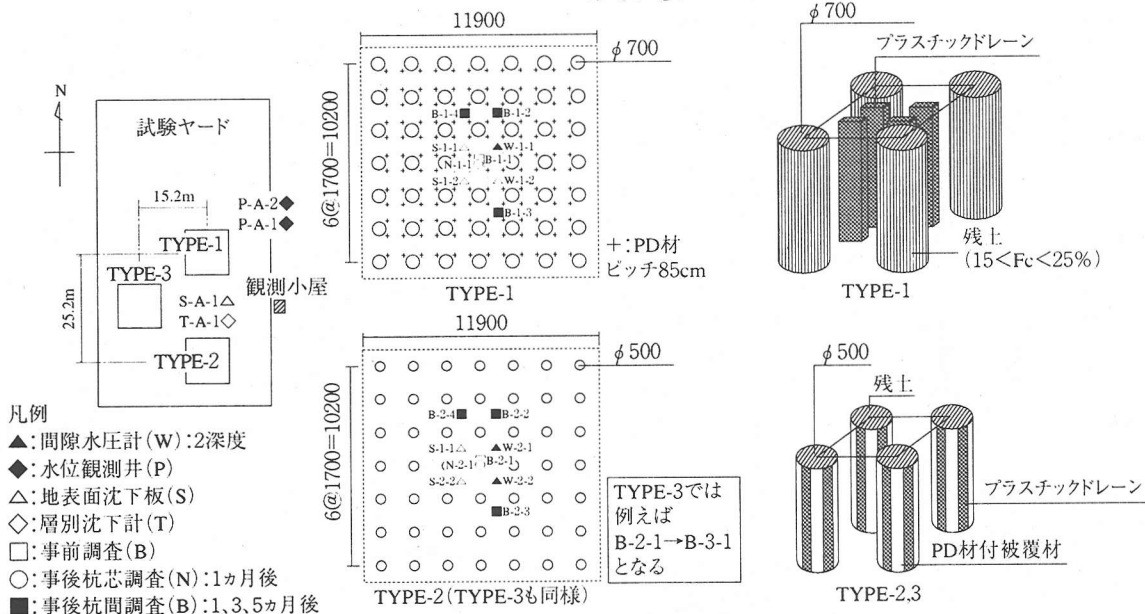


図-3 施工状況，計器設置状況（単位mm）

使用中詰め材料について、表-5および図-4にまとめている。なお、TYPE-3材料は後述する通り石灰処理によって含水比を約25%まで下げている。

表-3 施工数量

工種	内訳		
サンドマット工	下部層	砂	t=0.3m
	上部層	砕石	t=0.2m
地盤改良工	TYPE-1	$\phi$ 700 $\ell=15$ m	49本
		PD $\ell=13$ m	144本
	TYPE-2	$\phi$ 500 $\ell=15$ m	49本
	TYPE-3	$\phi$ 500 $\ell=15$ m	49本

表-4 調査項目と目的

	調査項目	目的
埋立粘性土	物理試験	埋立粘性土の物理特性の把握
	一軸圧縮試験	施工後の強度増加の確認 (事前ボーリング結果との比較)
	間隙水圧測定 地表面沈下測定	施工による過剰間隙水圧上昇と消散及びそれに伴う地表面沈下の確認
沖積砂層	物理試験 標準貫入試験	沖積砂の物理特性の把握 ↓ 施工による増加N値の確認 (事前ボーリング結果との比較)
中詰め材料	物理試験 標準貫入試験 三軸圧縮試験	材料の物理特性の把握 ↓ 打設杭材料の締めめ程度とN値及び強度の関係の把握 (中詰め材料試験結果との比較)

事前ボーリングの結果得られた原地盤の状況を図-5に示す。図からわかるように、TYPE-1の施工位置(B-1-1)は埋立て方法の影響で、砂・シルト分が他の場所と比べると全体的にやや多く含まれており、不均質な地盤となっている。

表-5 使用中詰め材料の特性

杭材料	TYPE-1	TYPE-2	TYPE-3 (生石灰50kg/m <sup>3</sup> )	備考	
土粒子の密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.602	2.617	2.594		
自然含水比 $W_n$ (%)	14.7	21.5	24.5	← 投入前(混合後) 投入時は52%	
細粒分含有率 $F_c$ (%)	24 (15~25)	36 (25~50)	72 (50~100)	← 投入時は92% ( )規定範囲	
液性限界 $W_L$ (%)	NP	31.4	46.1		
塑性限界 $W_P$ (%)	NP	19.4	26.7		
収縮限界 $W_s$ (%)	—	17.0	23.2		
塑性指数 $I_p$	—	12.0	19.4		
活性度 $A$	0	1.50	1.11		
M/C	15/9	1.67/9	15/9	1.32/9	シルト(%) 粘土(%)

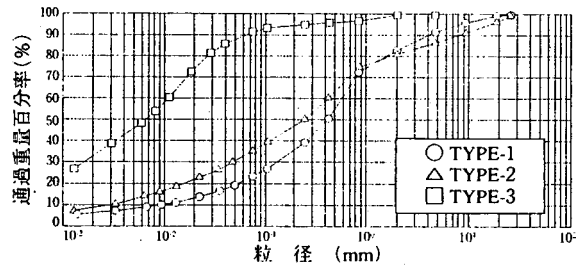


図-4 各材料の粒度分布

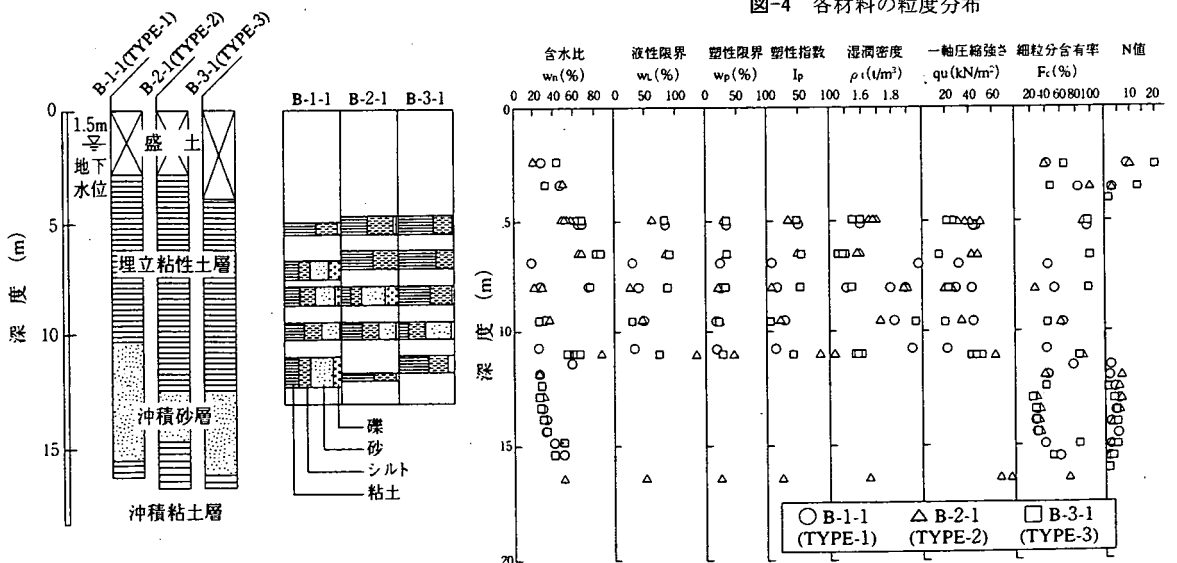


図-5 原地盤の事前調査結果

(2) 実験結果とその考察

a) 施工後の強度増加  $\Delta c_2$

図-6に杭間粘性土の深度方向の強度分布を示す。各TYPEともに全体的に強度の増加が顕著にみられる。特に地盤深部ほど強度増加が著しい。TYPE-3の場所は、埋立ての関係で全体的に粘土分が卓越しており原地盤強度も小さいが、強度増加は確実にみられている。図-7は、ある深度での杭間粘性土の強度と含水比の時系列変化である。選んだ深度は各時点のボーリングでそれぞれの土の粒度分布などが互いに似通っているものである。これによれば、数ヶ月経過後に1.5~2.0倍の強度増加および10~20%の含水比の低下がみられ、杭間粘性土の圧密が継続していることを裏付けている。

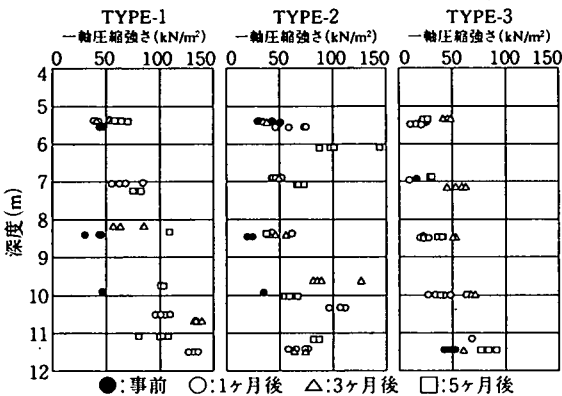


図-6 杭間粘性土の深度方向の強度分布

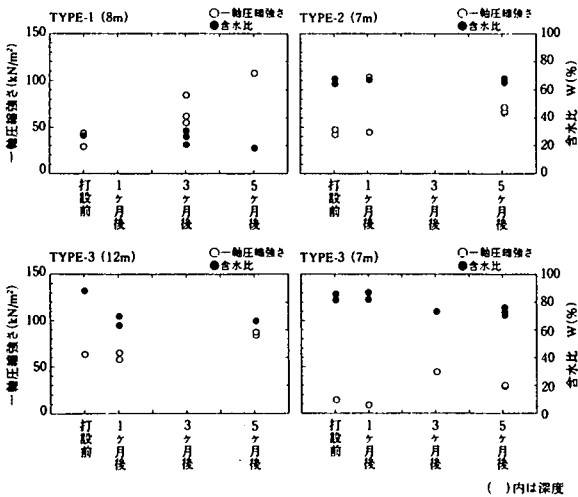


図-7 杭間粘性土の強度と含水比の時系列変化

b) 過剰間隙水圧

図-8は、深さGL-6m, -9mにおける杭間粘性土の打設中~打設後の間隙水圧の経時変化である。施工に伴って急増した過剰間隙水圧は、数ヶ月経過後に静水圧に戻っており、杭間粘性土の圧密による強度増加の推移と一致している。

なお、TYPE-2,3地点(W-2, W-3)では、発生する間隙水圧の絶対量はTYPE-1地点の水圧とほぼ同じであるものの、打設前の初期水圧がいずれも静水圧を上回っている。この理由について以下に考察する。図-9<sup>9)</sup>は打設からその後の圧密までの応力経路を模式的に示したものである。

通常は、原地盤のA点からSCP打設直後にはB

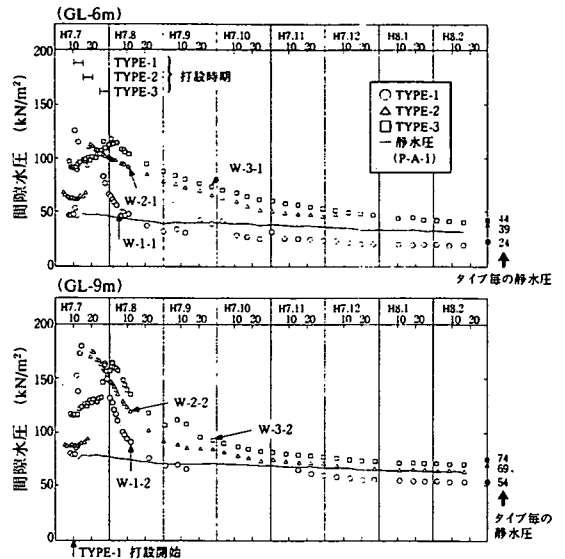


図-8 間隙水圧の経時変化

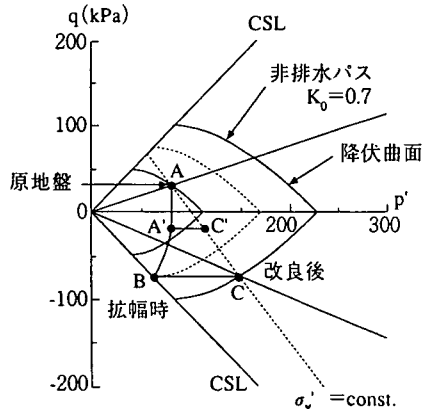


図-9 改良地盤の有効応力経路<sup>9)</sup>

点に達しており、その後の圧密でC点に達すると考えられる。すなわち過剰間隙水圧はこのとき $\overline{BC}$ であらわされる。今回の施工は、TYPE-1, 2, 3の場所順に行われており、TYPE-3地点の応力状態は、TYPE-1, 2の施工の影響を受け、A点から例えばA'点へすでに移動しており、過剰間隙水圧もすでに発生している( $\overline{A'C}$ )。これが初期水圧が高くなっている原因であるが、最終的に施工後にはB点に達するので発生する間隙水圧の絶対量は変わらないことになる。

### c) 地表面沈下

図-10は、杭間の埋立粘性土層の打設直後からの沈下である。埋立粘性土層の下端に設置した層別沈下計の値を地表面沈下から差し引いているので、純粹に埋立粘性土層のみの沈下となっている。過剰間隙水圧の消散に伴って、各地点とも30~40cm程度の沈下が盛土荷重なしに生じている。この沈下が杭間粘性土の圧密による体積圧縮の結果生じていることは疑う余地がない。最も沈下速度の遅いTYPE-3でも7ヵ月後には約90%の圧密度に達している。

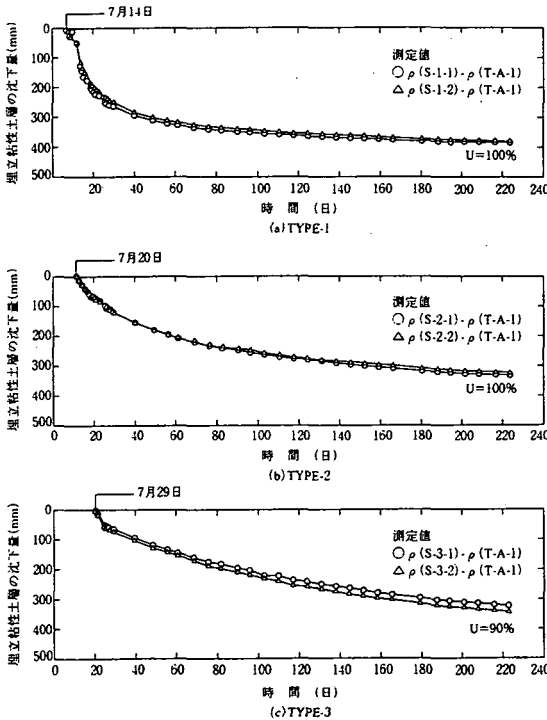


図-10 埋立粘性土層の沈下

### d) 中詰め材の強度の評価

図-11(a)は、TYPE-1の杭の杭芯N値の深度分布(1, 3ヵ月後)である。特に地盤深部で比較的大きなN値が得られている。図-11(b)には、細粒含有率を変

えて作った人工の室内作成混合材料の三軸CD試験結果( $\phi$ )<sup>2)</sup>に、今回の現場実験の杭から直接サンプリングした現地採取試料を用いた三軸CD試験結果をプロットしたものを示す。これらによれば、実際の砂杭( $Dr=75\%$ 程度、図中実線に注目)では、 $F_c=15\%$ で $\phi=40^\circ$ 程度を期待できるのに対し、 $F_c=25\%$ では $2^\circ$ ほど低下してくることがわかる。以上よりTYPE-1材料( $F_c=15\sim 25\%$ )は $\phi$ 材として扱う場合、せん断抵抗角として従来の砂杭の設計値から $2^\circ$ 程度低減したものを期待できることがわかる。

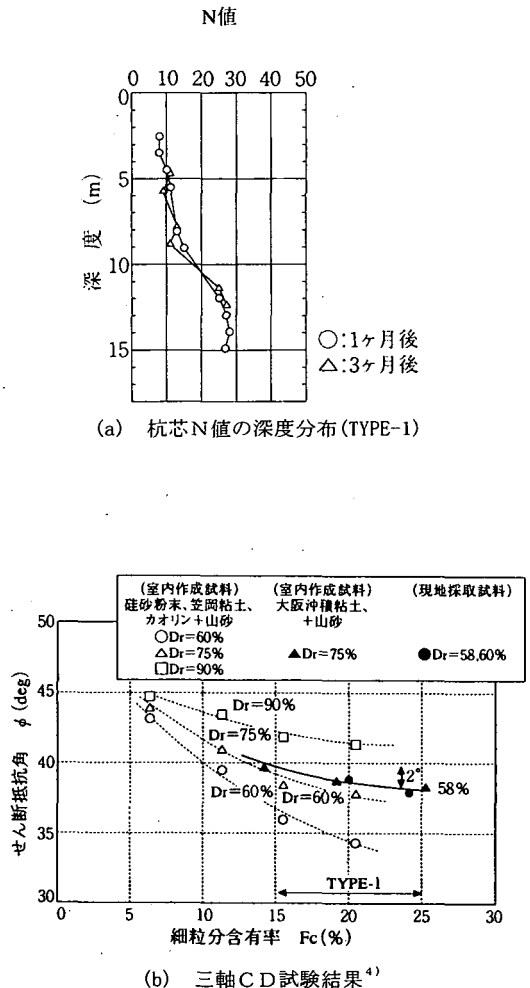


図-11 中詰め材の強度の評価 (TYPE-1)

### e) 砂地盤の締固め効果

図-12は、埋立土層の下に堆積している沖積砂層の杭間のN値の増加 (TYPE-1地点) である。検討の結果、従来のSCPにおける推定値とほぼ同等のN値増加がみられており、本工法が砂地盤の液化化対策としても十分効果的であることが示された。

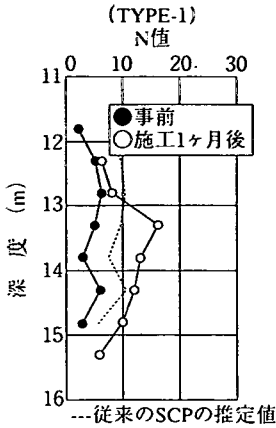


図-12 沖積砂層の杭間N値の増加

(3) 設計法の提示と現場実験結果による検証

ここではまず杭打設後の強度増加について2つの設計方法を提示し、先に示した現場実験結果を用いて設計法の検証を行う。

a) 数値解析援用設計法：有限要素解析による方法

この方法は、2(2)a)で述べた強度増加のメカニズムを忠実に再現しようとするもので、深さ方向に物性が異なる3次元状態の解析が可能である。計算方法は次のように大きく2段階に分かれている<sup>3)</sup>。

まず打設に伴う杭間粘性土の破壊時の変形や過剰間隙水圧分布は、杭打設を“円筒拡張の変位速度境界条件”に置き換えて、水-土骨格連成の剛塑性軸対称有限要素解析<sup>10)</sup>によって計算する。限界状態での構成関係は、非排水条件下でのカムクレイモデルにおけるものとする。こうして得られた過剰水圧分布を初期値に採って、つぎに“杭径が変化しないという変位拘束の境界条件”のもとで杭間粘性土の軸対称弾性圧密問題を解けば、杭打設後の過剰間隙水圧の消散および杭間粘性土の体積圧縮(沈下)  $\Delta v$  を得ることができる。また、体積圧縮  $\Delta v$  からそれに伴う非排水強度の時間的変化を、次式によって計算することができる。

$$\frac{q_u}{q_{u0}} = \exp\left[\frac{\Delta v}{\lambda}\right] \quad (1)$$

ここに、 $q_{u0}$ 、 $q_u$ : 杭間粘性土の原地盤強度および打設後の強度、 $\lambda$ : 圧縮指数である。

b) 簡易設計法：空洞拡張の考え方を応用した経験的方法

杭打設時のような無限体内の円筒空洞拡張(cylindrical cavity expansion)問題についてはVesicらの理論的研究<sup>11)</sup>がある。これは、軸中心に空洞がある2次元( $r-\theta$ )平面内での全応力のつりあい式と破

壊基準 ( $\phi=0^\circ$  のとき  $\sigma_r - \sigma_\theta = 0$ )、および弾性、塑性領域についての仮定などから問題が解かれている。ここでは、実用設計に用いることを前提に、多くの現場データへのあてはめから類推した次式によって強度増加を簡易に求めることとした。なお、室内実験結果<sup>2)</sup>から、強度増加は上載荷重によるもの ( $\Delta c_1$ ) と杭径によるもの ( $\Delta c_2$ ) の単純和であらわされることがすでにわかっている。

$$\begin{aligned} \Delta c &= \Delta c_1 + \Delta c_2 \\ &= \mu c \cdot \Delta p \cdot I_z \cdot (c/p) \cdot U_1 \\ &\quad + 4/3 c_0 \ln(R/r) \cdot (c/p) \cdot U_2 \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、 $c_0$ : 現地盤強度、 $R$ : 杭長とする(本来 $R$ は塑性域の大きさであるが、ここでは $R$ =杭長とした場合に最も実測値に近い強度が得られていることから実務上このようにおいている)、 $r$ : 砂杭中心から調査位置までの距離(m)、 $\mu c \cdot \Delta p \cdot I_z$ : 杭間粘性土にかかる鉛直応力、 $\mu c$ : 応力低減係数 ( $=1/(1+(m-1)a_s)$ )、 $m$ : 応力分担比(通常3)、 $c/p$ : 強度増加率、 $U_1, U_2$ : それぞれ上載荷重載荷後、および打設後の圧密度である。 $U_2$ は、多くの現場での実測強度をもとに式(2)から求めた圧密度と、その強度を調べた時刻との関係(図-13)から、次式によって得られるとした。

$$U_2 = 1 - \exp(-A \cdot c_v \cdot t / L^2) \quad (3)$$

ここに、 $c_v$ : 杭間粘性土の圧密係数、 $t$ : 経過時間、 $L$ : 調査位置から砂杭表面までの排水距離、 $A$ : 実測から決められる定数で、今回は安全側の値として  $A=0.1$  を採用する。

なお、本方法は前述の数値解析援用設計法よりも、容易に強度増加量を推定することが可能であるが、過去のデータからいわば帰納的に導かれており、適用範囲が限られていることに留意を要する。

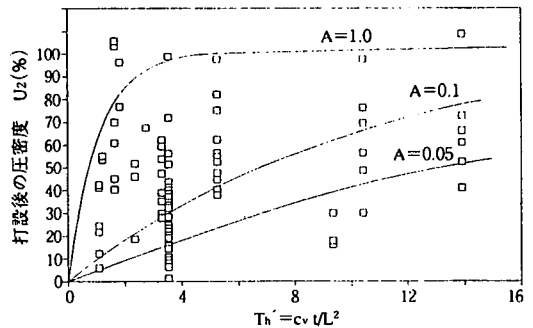


図-13  $U \sim T_h$  関係



以下では前述の現場実験結果（施工後の強度増加  $\Delta C_2$ 、過剰間隙水圧分布、地表面沈下）を用いて、2つの設計法（数値解析援用設計法、簡易設計法）の検証を行う。

a) 施工後の強度増加  $\Delta c_2$

先に提示した強度増加の設計法を現場実験結果に適用してみる。ここではTYPE-3地点での比較結果のみを紹介する。計算条件は以下の通りである。

まず数値解析援用設計法の拡張時の計算には、土質定数から算定した表-6のカムクレイパラメータを用いる。

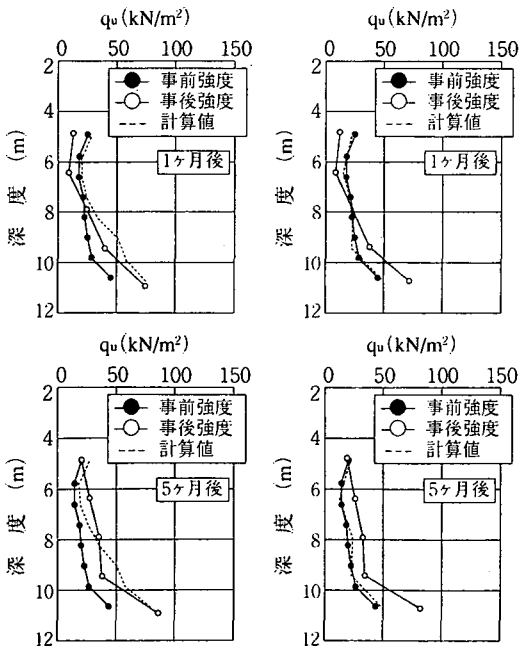
表-6 土質パラメータ (TYPE-3)

深度	$\lambda$	$\kappa$	M	$K_0$	k (cm/sec)	$e_0$
-3.6~ -6.2	0.34	0.12	1.10	0.63	$5 \times 10^{-7}$	1.8
-6.2~ -8.6	0.34	0.12	1.10	0.63	$3 \times 10^{-6}$	2.0
-8.6~ -10.2	0.14	0.02	1.60	0.44	$1 \times 10^{-5}$	0.7
-10.2~ -11.9	0.33	0.14	0.99	0.60	$5 \times 10^{-7}$	1.7

また圧密時の計算には、 $\nu=0.33$ 、 $\alpha=3$ 、 $m_v$ より  $E = \alpha \cdot (1+\nu) (1-2\nu) / (1-\nu) \cdot 1/m_v$  を用いている。

次に、簡易設計法の計算条件として、強度増加率  $c/p$  および  $c_v$  は、塑性指数や圧密試験結果から表-7のように求めた。

TYPE-3地点での強度増加（1、5ヶ月後）を各設計



(a) 数値解析援用設計法 (b) 簡易設計法 (A=0.1)

図-14 強度増加の実測と計算との比較 (TYPE-3)

表-7 簡易設計法の計算条件

深度	$c_0$ (kN/m <sup>2</sup> )	c/p	$c_v$ (kN/m <sup>2</sup> )	r (m)	L (m)
-3.6~ -6.2	19.1	0.3	60	0.96	0.71
-6.2~ -8.6	19.6	0.3	40	0.96	0.71
-8.6~ -10.2	24.5	0.3	510	0.96	0.71
-10.2~ -11.9	45.0	0.3	60	0.96	0.71

法ごとに算定し、実測と比較した結果を図-14に示す。数値解析援用設計法では概ね実測値をよく近似しているが、簡易設計法では特に5ヶ月後の結果においてやや強度増加を小さく（遅く）見積っている。今後さらにデータが蓄積されれば、式(3)におけるAの値(=0.1)を見直していくことも必要と考える。

b) 過剰間隙水圧分布

数値解析援用設計法では、この他に過剰間隙水圧や地表面沈下の推移も求めることができる。

図-15はTYPE-1地点での打設直後の過剰間隙水圧

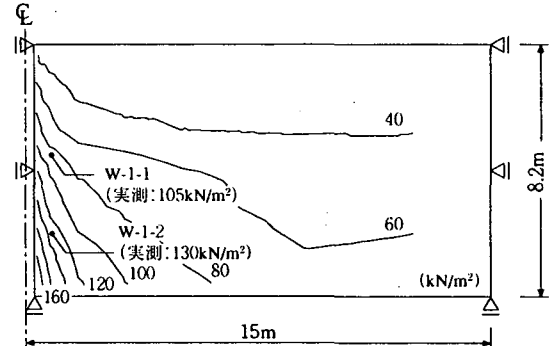


図-15 打設直後の過剰間隙水圧分布

分布の計算結果に、図-8に示した実測過剰間隙水圧値を併記したものであるが、よく計算結果と合致している。次に過剰間隙水圧の消散過程を比較してみる。解析は軸対称（杭1本施工時）で行っているため、実際の7×7=49本打設後とは過剰水圧発生量自体が異なる。そこで、圧密度Uを

$$U = 1 - \frac{\text{時刻 } t \text{ での残留過剰間隙水圧}}{\text{打設直後の最大過剰間隙水圧}}$$

と定義することによって、解析と実測とで水圧消散速度を比較してみる。結果を図-16に示すが、各TYPEとも解析値はよく実測値を近似している。特にTYPE E-2、3地点ではともに土層上部で粘土分が多く透水性が低いために、土層下部と比べると間隙水圧の消散が遅くなっている現象を、解析値はよく表わしている。

#### 4. 施工方法確立のための予備実験

##### (1) 実験の概要

この実験は本実験に先立って行ったもので、実験の目的は、建設発生土を中詰め材料として用いた場合の施工方法（施工機械）を検討し、施工可能性を確認することである。具体的には2つの検討に分けられる。1つは、粘性と水分の多い材料をケーシング内に投入し通過させる要素技術、およびPD付の袋の材質などのハード面の検討である。もう1つは、建設発生土の含水比をどの程度下げれば施工できるか、そのためには石灰の添加量をどの程度にするかというソフト面の検討である。

ここでは表-2中の以下の技術課題を検討する。

- ⑥生石灰投入量と建設発生土の含水比低減の関係
- ⑦施工方法（施工機械）の開発

##### (2) ハード面の検討

以下の2つの実験を行った。

###### a) 材料通過試験

図-18のバケット、ホッパー、ケーシング部での各建設発生土材料の投入落下状況の調査を行った。

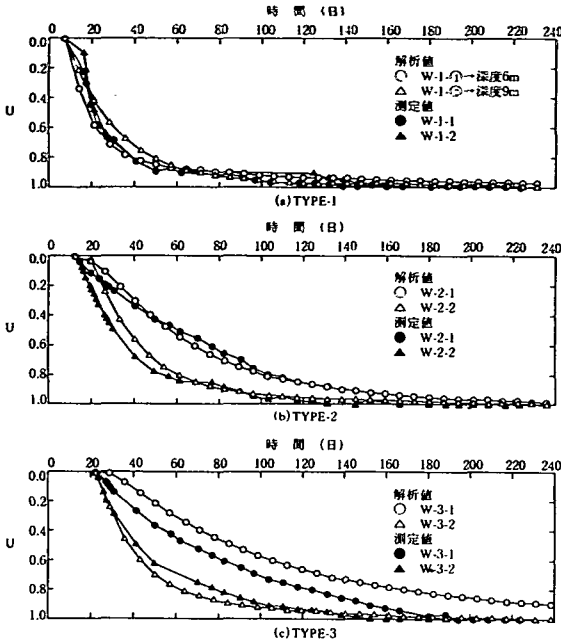


図-16 過剰間隙水圧消散速度の比較

##### c) 地表面沈下

図-17では、地表面沈下の実測値と解析値のやはり良い一致がみられる。

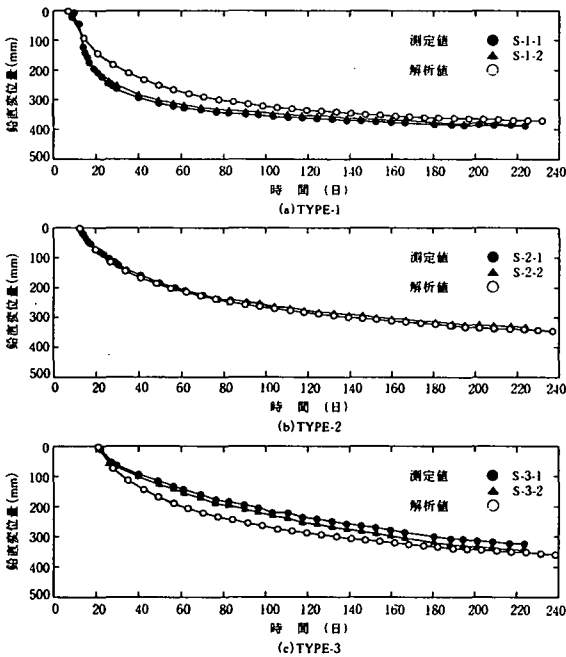


図-17 地表面沈下の実測値と解析値の比較

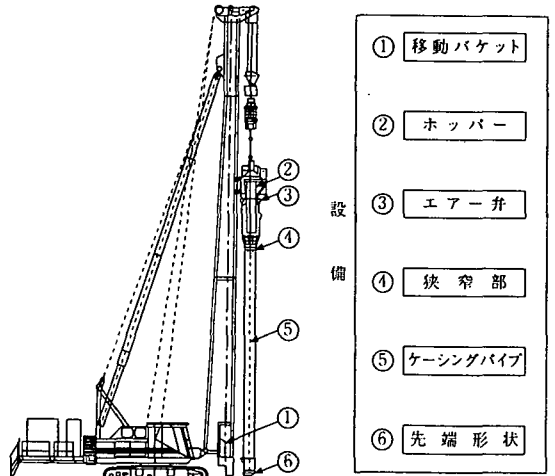


図-18 施工機械

バケット、ホッパーの傾斜角の増加、底板材料の変更など摩擦軽減、狭窄部の改善を可能な限り行った結果、今回のTYPE-3材料( $F_c=72\%$ )でも含水比を25%程度に下げれば、付着も少なく材料の通過が可能であった。以上より、材料の管理目標値として含水比25%を考慮していくこととする。

### b) PD材付被覆材の実施工験(TYPE-2,3)

TYPE-2,3の施工方法を図-19に示す。ここでは、PD付の袋の仕様(強度、伸び率など)やPD材の接着方法を決定する必要がある。

実際に施工し検討した結果、PD材と伸び率の合う不織布を用い、双方一体として装着固定する方法が最も確実であることがわかった。

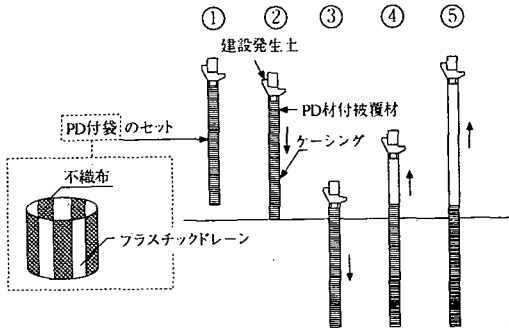


図-19 TYPE-2,3の施工方法

### (3) ソフト面の検討

上の検討で、建設発生土材料の管理目標値として“含水比25%以下”が設けられた。そこで、生石灰添加量による含水比低下の経時変化を調べることとした。用いたのは表-5に示すTYPE-3材料で、結果を図-20に示す。これによれば、配合1日後で生石灰添加量を $50\text{kg/m}^3$ とすれば、管理目標値(含水比25%以下)を満足できることがわかる。

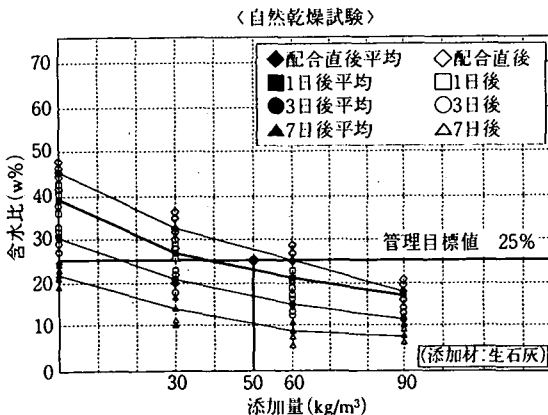


図-20 生石灰添加実験結果

## 5. おわりに

本研究で得られた結論を以下に述べる。

(1) 各TYPEともに杭施工による地盤の圧密によって全体的に杭間粘性土の強度増加が顕著にみられた。

特に地盤深部ほど強度増加が著しい。また、数ヶ月経過後に1.5~2.0倍の強度増加および10~20%の含水比の低下、過剰間隙水圧の消散、地表面沈下の終了が観測され、杭間粘性土の圧密現象が裏付けられた。

(2) 中詰め材の強度に関して、現地の杭体からサンプリングした試料を用いて三軸CD試験を行った結果、TYPE-1材料( $F_c=15\sim 25\%$ )は $\phi$ 材として扱う場合、ある程度のせん断抵抗角(従来の設計値  $30^\circ$  から  $2^\circ$  程度低減したもの)を期待できることがわかった。

(3) 沖積砂層の杭間の強度に関しては、従来のSCPと同等のN値増加がみられ、本工法が砂地盤の液化対策としても効果的であることが示された。

(4) 杭間粘性土の強度増加に関して、数値解析援用設計法では概ね実測値をよく近似しているが、簡易設計法ではやや強度増加を小さく(遅く)見積っている。今後さらにデータが蓄積されれば、設計のパラメータを見直していくことも必要と考える。また、数値解析援用設計法では、この他に過剰間隙水圧や地表面沈下の推移も求めることができ、これによると、実測値と解析値は大体良く一致している。

(5) 施工方法確立のための予備実験を行い、粘性と水分の多い材料をケーシング内に投入し通過させるための機械の改善を可能な限り行った結果、今回のTYPE-3材料( $F_c=72\%$ )でも含水比25%程度に下げれば、付着も少なく材料の通過が可能であることがわかった。以上より、材料の管理目標値として含水比25%を設けることとした。

(6) 生石灰添加量による含水比低下の経時変化を調べた結果、生石灰添加量を $50\text{kg/m}^3$ とすれば、配合1日後で管理目標値を満足できることがわかった。

(7) 特に同一現場内で建設発生土の処理と地盤改良が同時に必要な場合、本工法によると建設発生土処分費、砂の購入費などが大幅に削減されるため、採算性が格段に良くなる場合が出てくる。また、建設発生土の処分と砂の運搬に要するエネルギーも削減されるため、環境面でのプラス効果の大きい工法であり、今後の適用が期待される。

謝辞：本研究に関しては、名古屋大学内に設置された有志による地盤研究会(座長;松尾稔)での討論から多くの助言と示唆をいただいた。研究会の構成員各位に謝意を表す。

### 参考文献

- 1) 建設副産物リサイクル広報推進会議：総合的建設副産物対策, 平成7年度版。
- 2) 松尾 稔, 木村 稔, 西尾良治, 安藤裕：建設発生土

- を利用した軟弱地盤改良工法の開発に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No. 547/Ⅲ-36, pp. 199-210, 1996. 9.
- 3) Asaoka, A., Matsuo, M. and Kodaka, T.: Bearing capacity of clay improved with sand compaction piles, XIII ICSMFE, pp. 763-766, 1994.
- 4) 浅岡 顕, 松尾 稔, 野津光夫: SD, SCPにおける地盤改良原理の考察とその応用, 土と基礎, Vol. 42, No. 2, pp. 7-12, 1994. 2.
- 5) 建設省大臣官房技術調査室監修: 建設発生土利用技術マニュアル, (財)土木研究センター, 1994年7月.
- 6) 榎戸源則, 高橋 豊, 後藤貞雄, 前田勝司: 打込みコンクリート打設による粘性土地盤のかく乱時の強度回復について, 土と基礎, pp. 87-92, 1973. 6.
- 7) 浅岡 顕, 野田利弘: 限界状態近傍にある飽和土の弾塑性境界値問題の実験・解析とその応用, 土木学会構造工学論文集, Vol. 39A, pp. 361-374, 1993. 3.
- 8) 浅岡 顕, 中野正樹: 練り返し正規圧密粘性土の非排水せん断後の強度回復に関する三軸圧縮試験, 第27回土質工学研究発表会講演概要集, pp. 649-652., 1992.
- 9) 浅岡 顕, 小高猛司, 野津光夫: 砂杭打設による粘土地盤の沈下抑制効果について, 第50回土木学会年次学術講演会, pp. 444-445, 1995. 9.
- 10) 浅岡 顕: 支持力と有効応力, 土と基礎, Vol. 36, No. 6, pp. 43-49, 1988.
- 11) Vesic, A. S.: Expansion of cavity in infinite soil mass, *Journal of the soil mechanics and foundation division*, Proceedings of the ASCE., pp. 265-290, 1972.

(1996. 10. 17受付)

## DEVELOPMENT OF SOIL IMPROVEMENT METHOD USING CONSTRUCTION WASTE SOIL

Minoru MATSUO, Minoru KIMURA, Ryouji NISHIO and Yutaka ANDO

At present, the treatment of construction waste soil is becoming a large scale environmental issue. The soil improvement method which utilizes the construction waste soil instead of sand for sand compaction pile is expected to be one of the solutions for the above issue.

This paper reveals that the dissipation of pore water pressure, consolidation settlement, and the increase of shear strength on the clay surrounding sand compaction piles take place after above the piles are driven into the ground, without the load due to embankment.

The strength of piles made of construction waste soil as well as the installation method of the piles into the ground are also investigated.