

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

松尾 稔¹・木村 稔²・西尾 良治³・安藤 裕⁴

¹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)

²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)

³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)

⁴正会員 工修 不動建設株式会社 ジオ・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。本論文で示す基礎的研究では、建設発生土による地盤改良が施工された状況を想定して室内実験および数値解析を行い、施工時に発生する過剰間隙水圧消散後の強度増加が実際に起こること、またそれが盛土荷重による強度増加とは独立に生じることを示した。さらに、プラスチックボードドレーンを任意位置に配置した場合の計算方法について、模型実験と解析を通じて検討した。

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

1. はじめに

最近の我が国における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、トンネルなど地下構造物建設時の建設発生土の処理が大きな環境問題となっている。著者らは、これらの建設発生土類を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)の中詰め材料として、地盤改良の本来の機能を落とすことなく利用することができれば、環境問題の有効な解決策となりうると考えた。本論文の目的は、建設発生土類を有効利用する軟弱地盤改良の概念と具体化のための技術課題を示すとともに、技術課題解決のための基礎的研究の成果を提示することである。

本研究の社会的背景と動機は以下の2つである。

(1) 建設発生土類の処理と有効利用

平成5年の調査では、建設発生土は全国で年間43,700万 m^3 ¹⁾、また石炭火力発電所による石炭灰は640万 t ²⁾(平成5年)である(本研究では建設発生土以外にも石炭灰の利用も視野においている)。そのうち有効利用されているのは、建設発生土で大体15~35%、石炭灰では約40%でしかない。その他は捨て土として埋立てられているが、現在では埋立処理可能量にも限界が出てきているとともに、貴重な資源の浪費ともなっている。

(2) SCP, SD用良質砂の枯渇

近年では透水性の良い川砂については、環境上特に国土保全の点からほぼ利用できない状況であり、また海砂の利用も制限されるようになってきている。将来にわたって良質な砂材料を確保し続けることは、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、今後21世紀に向かい、砂を用いない地盤改良の必要性が一層高まっていくと考えられる。

本文に示す建設発生土を利用した地盤改良の概念には、新しい地盤改良の考え方をいくつか導入している。このうちのひとつ“砂杭施工により発生する過剰間隙水圧消散後の強度増加^{3), 4)}”についてまず以下に述べる。これは、従来は考慮されていなかったが今回新しく評価する機能である。その後実際の改良方法および技術課題を示し、技術課題解決のために実施した室内実験結果について詳述する。

なお現在、現場での実験も当初の目標通りに終了し鋭意解析中であり、その結果および具体的な設計・施工法などについては誌面をあらためて述べることにしたい。

2. 砂杭施工により発生する過剰間隙水圧消散後の強度増加とそのメカニズム

図-1は、横浜市根岸で測定されたSCP施工前後の杭間の一軸圧縮強さの分布である⁵⁾。現場の改良対象であるシルト質の埋立粘性土層は、SCP施工

の5年前に埋立完了しておりほぼ正規圧密状態と考えられる。LNGタンク基礎杭の横抵抗を増加させる目的で、砂杭径60cm、置換率12.9%の改良仕様のSCPが施工された。その後約3ヶ月にわたり上載荷重としては70cm厚のサンドマットのみの状態で放置されている。

図-1によれば、SCP施工直後は一旦強度低下するものの、45日経過後は原地盤強度の約2倍の強度増加がみられる。図中、実線は原地盤強度、点線はサンドマット荷重による圧密完了後の強度である。したがって、45日経過後の著しい強度増加は、サンドマット荷重によるもの以外にその原因を求めなければならない。

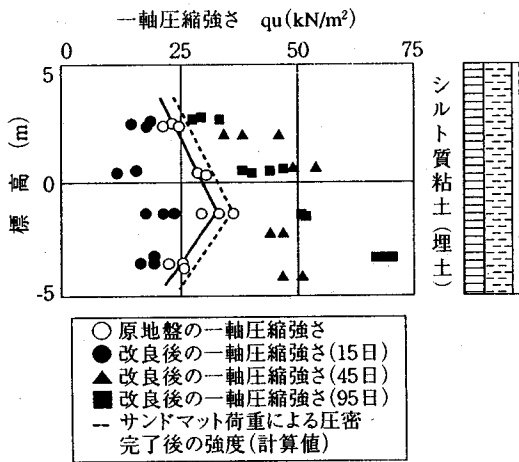


図-1 改良後の一軸圧縮強さ (根岸)

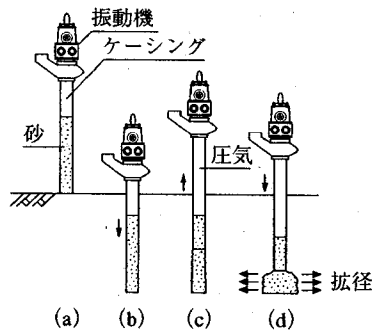


図-2 SCP施工過程

このような強度増加現象が起こるメカニズムについて地盤工学的に考察してみる。まずSCPの施工方法について整理する。図-2(a), (b)に示すようにケーシングを所定深度まで貫入した後、砂を投入しながらケーシングを引抜いていく (図中(c)の)が、この引抜く過程でケーシングを再度打戻すことにより強固な砂杭を造る (図中(d)の)がSCPの特徴である。このとき杭間粘土は押し広げられ (拡張)

ケーシング径よりも大きな径の砂杭が造られる。

以上より、強度増加のメカニズムについてつぎのような仮説がたてられる。「砂杭施工時に必要な排土、すなわち粘土地盤中での円筒拡張のための力が、杭間粘土地盤の破壊と過剰間隙水圧上昇^{5), 6)}を引起こし、かつ圧密荷重として長く持続して杭間粘土に作用し、その結果杭間粘土は過剰水圧の消散による圧密に伴い再び蘇り、元の粘土より大きなせん断強度を有する粘土となる。」この現象は基礎杭の領域では“Set-up”として古くから知られている⁷⁾。SCPを施工した地盤でも、最近になって、多くの実測事例や現象を正確に再現する数値解析を通じ、仮説が正しいことが確かめられた^{3), 4), 8)}。

またSDでは、図-2で(d)の工程 (拡張) は含まれず、通常置換率も低い(3~5%)のだが、実際に施工時に杭間粘土の過剰間隙水圧発生がみられることから、SDでも若干の強度増加はあるものと考えられる。このことから、SCPに限らず広い意味で、本現象を“砂杭施工により発生する過剰間隙水圧消散後の強度増加”と呼ぶことにする。

最近では、根岸の事例以外にも多くの現場で、上載荷重によらずに杭間粘土が原地盤強度以上に強度増加していることが認められてきている。根岸の事例も含めた6つの現場の事前・事後の強度の比較を図-3にまとめて示すが、図から、多少のばらつきはあるものの全体的に $\Delta q_u = 1 \sim 4 \text{ tf/m}^2$ (9.8~39kN/m²)の強度増加が起きていることが読みとれる。

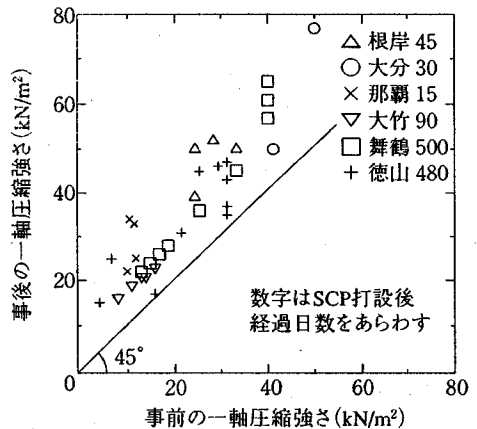


図-3 各現場の強度増加

従来のSCPの設計では、杭間粘土の強度増加はあくまで上載荷重によってもたらされるとされてきた。図-1のような砂杭施工後の強度増加は、これまでの設計では、力学的な検討が不十分であったこともあり、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。

3. 建設発生土を利用した地盤改良の概念

(1) 建設発生土の分類と中詰め材としての利用

SCP, SD, プラスチックボードドレーン(以下PDと呼ぶ)工法における従来の機能と、建設発生土を利用した地盤改良に含まれる機能を整理して図-4に示す。図のように、建設発生土を利用した地盤改良の場合、排水機能はPD材に代替させるなど、相互に機能を補間し合いながら全体の機能を維持している。ここで重要なことは、建設発生土を利用した地盤改良の場合でも、SCP, SDの持つ機能を十分に果たしているべきことである。

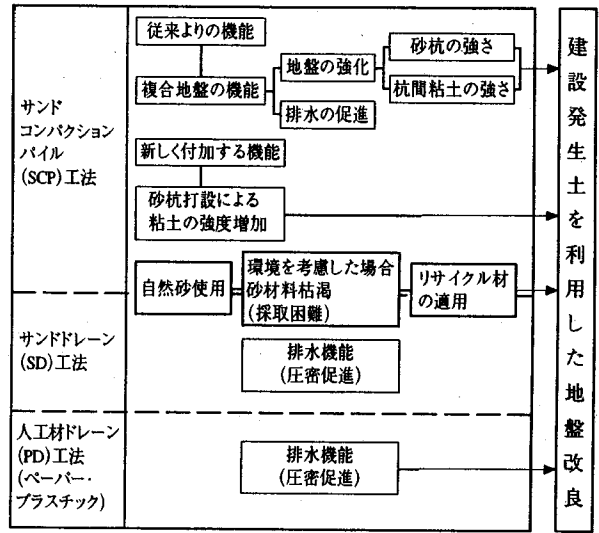


図-4 SCP, SD, PDの機能

表-1 構造形式,材料その他による整理

	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>パイロ投入</p> <p>●通常のSCP施工(パイロによるケーシング打込みと打戻しによる砂杭の拡張及び締固めを行なう)。</p>	<p>パイロ投入</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、場合によってはPD(プラスチックドレーン)を併用する。</p>	<p>パイロ投入</p> <p>●さらに細粒分含有率が増加するため、土中で杭の拡張ができなくなりSCP施工は不可能となる。通常のドレーン施工と同じで、PD材付被履材との一体打設とする。</p>	<p>パイロ投入</p> <p>●施工法はTYPE-2と同等であるが、細粒分含有率が50%を超えるため石灰などによる前処理が必要。PD材付被履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*
区別基準	$0 \leq F_c < 15\%$	$15 \leq F_c < 25\%$ 程度	$20 \sim 25\%$ 程度 $< F_c < 50\%$	$50 \leq F_c \leq 100\%$
用 途	地 盤 改 良	地 盤 改 良	地 盤 改 良	(地 盤 改 良) (低 品 質 土 の 収 容)
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 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 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 ④排水機能 ⑤杭間粘土の強度増加 ⑥スペース確保(低品質土の収容)

*) 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杭材に用いる場合、SCPの代替なのかSDの代替と考えるのかをまず判断しなければならない。そこで材料の分類が必要となるが、ここでは分類の基準として、材料に含まれる細粒分含有率(Fc: Fine content)を第一に選んだ。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。

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⁹⁾における第一種建設発生土でも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材が必要となってくる。このときPD材は杭のまわりに別に施工される(TYPE-1)。また、Fcが20~25%以上になってくると、地盤中でケーシングを打ち戻しても拡張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、従来からあ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、砂杭施工機1台ですべての施工が可能となる。TYPE-3で材料の含水比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。そ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地盤改良では、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土の強度増加を考慮する

2. で述べたように、施工時に発生する過剰間隙水圧が消散し圧密することによる杭間粘土の強度増加を定量的に評価する。これにより盛土荷重の軽減が可能となる。

なお、地盤深部ほど有効拘束圧の増加に伴い、発生する過剰間隙水圧も大きくなり体積減少も著しくなるため、この強度増加は特に地盤深部において顕著となる。したがって、地盤の掘削問題や主働土圧軽減問題などにこの強度増加を適用すれば、設計上特に有利になる。

ただし、強度増加が、盛土による強度増加(Δc_1)と施工時の過剰間隙水圧消散による強度増加(Δc_2)の単純な和であらわされるかどうかなどについては、今後の検討すべき技術課題である。

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、本研究が最終的に目指す工法では、砂杭の排水機能は、別途周囲に打設したり、袋に装着するPD材の排水性で補うこととする。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、逆にコストは低下する傾向にある。ここでは任意の位置に配置したPD材の排水計算の方法などが技術課題である。

c) 建設発生土の中でも低品質な材料はこれを改良し、その強度を積極的に評価する

建設発生土の中でも細粒分の多い低品質な材料では、原則として生石灰、セメント、(石炭灰)などによる処理を行い、含水比を下げ施工性を確保するが、このとき同時にポズラン反応による粘着力の増加が期待できる。したがって建設発生土自体の強度(c, ϕ)を考慮し、剛性のある杭として考えた場合の複合地盤効果を積極的に評価することが妥当と考えられる。

(3) 技術課題の整理

前節でも少しふれたが工法開発にあたっての主要な技術課題とその解決策を表-2にまとめる。

表-2 技術課題とその解決策


技術課題	解決策
① 施工後の強度増加 Δc_2 の評価	 数値解析 室内実験 現場実験
② 盛土による Δc_1 と Δc_2 との関係	
③ PD材の枚数や配置の決定方法	
④ 中詰め材の強度の評価	
⑤ 中詰め材の透水性の評価	
⑥ 生石灰投入量と強度の関係	
⑦ 施工方法(施工機械)の開発	
⑧ 設計法の開発	

表-2のうち①~⑤の技術課題を解決するために次に示す3つの室内実験を計画した。なお⑥~⑧など現場実験に関わる技術課題については、現在実験結果の解析中であるが、課題解決の十分な見通しを持っており後日公表したい。

4. 建設発生土を利用した地盤改良効果の室内実験による評価

(1) 技術課題と室内実験との関係

計画している3つの室内実験と、それにより解決

しうる表-2中の技術課題との関連を整理しておく。

a) 砂杭施工を模擬したロッド貫入実験 (TEST1)

本実験は、拘束圧をかけたモールド内に、砂杭施工を模擬したロッド貫入を行い、以下の技術課題を検討する。

- ① 砂杭施工後の強度増加 Δc_2 の評価
- ② 盛土による強度増加 Δc_1 と Δc_2 との関係

b) PD材設置を模擬した圧密実験 (TEST2)

本実験は、PD材を模擬した幅25mmの排水材をモールド内に配置し、载荷重による圧密速度を観測して、任意の位置に配置したPD材の排水計算の方法などを評価する。対応する技術課題は、

- ③ PD材の枚数や配置の決定方法
- である。

c) 建設発生土の材料 (強度, 透水性) 実験 (TEST3)

本実験は、杭の中詰め材として用いる建設発生土の強度と透水性を評価するための室内実験である。対応する技術課題は、

- ④ 中詰め材の強度の評価
 - ⑤ 中詰め材の透水性の評価
- である。

(2) 砂杭施工を模擬したロッド貫入実験 (TEST1)

実験の目的は、砂杭施工時の過剰間隙水圧上昇～消散やそれによる強度増加 Δc_2 などの力学現象を室内実験レベルで再現するとともに、定量的評価を行い、上载荷重による強度増加 Δc_1 との相互関係についても分析を加えることにある。

a) 実験方法

以下に示す方法で杭施工後の圧密による強度増加を確認する (図-5参照)。

1) 用いた材料は岐阜県産の木節粘土で、0.425mm で

ふるい分けし、含水比83%に調整したものである。このスラリーを図-5①に示すパイプレータを用いて脱気させながら、新規に作成したモールド (φ15cm) 内へ注入し、载荷パターン9.8, 19.6, 39.2, 68.6 kN/m²で少なくとも一次圧密終了まで予備圧密する (図-5②)。実験装置を図-6に示す。

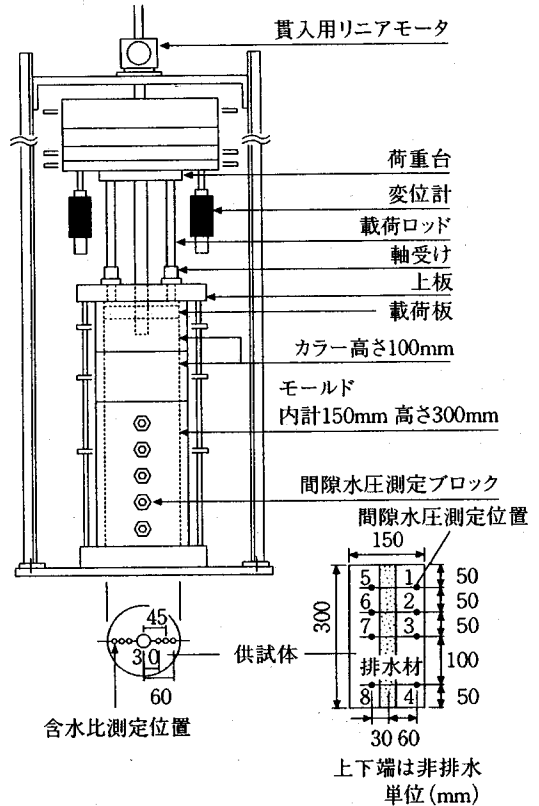


図-6 実験装置

2) 供試体の中央に、砂杭施工を模擬して、ポーラスな透水性のロッド (図-7) を静的に貫入させ、貫入中およびそれ以降の供試体内の過剰間隙水圧の上昇と消散の過程を、図-6中右下図の1～8の点に挿入された間隙水圧計 (図-8) から読みとる。また荷重台に取り付けた変位計により、貫入時の隆起と沈下の経時変化を記録する。貫入はリニアモータによって、一定の速度 (1cm/sec) で行う (図-5③)。

3) その後、盛土による荷重を模擬して、上载荷重を載荷し、2)で行ったのと同様の計測を実施する。

4) 実験後に供試体の含水比を測定し、圧密に伴う強度増加を調べる。試料をモールドから取り出し、中心から30, 45, 60mmの位置における深さ方向8点の含水比分布を測定する。さらに、別途行った三軸圧縮実験から得られる含水比と強度の関係により、各々非排水せん断強度に換算した。

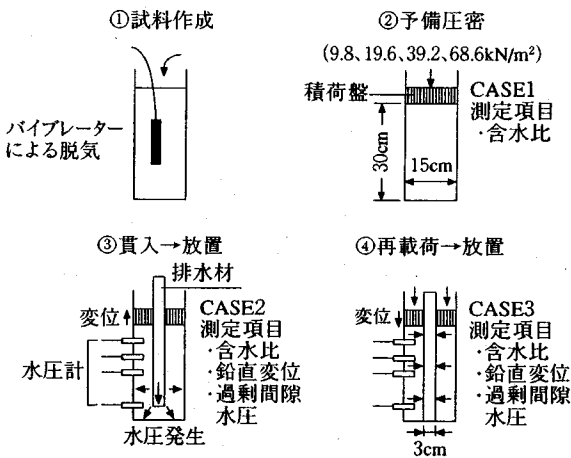


図-5 実験の手順

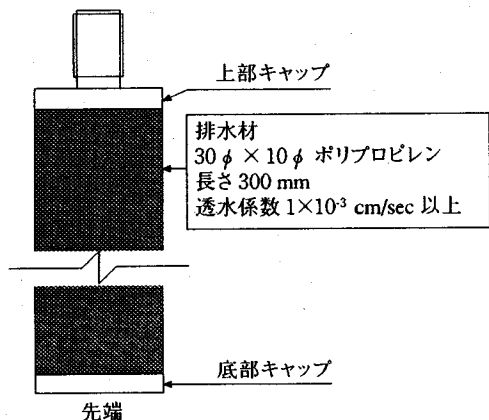


図-7 貫入棒

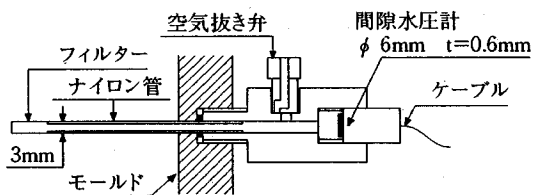


図-8 間隙水圧測定装置

実際には3つの供試体を作成し、図-5に示すように以下の3ケースで強度や水圧などを調べた。

- CASE1：予備圧密後の初期の状態（貫入前）において含水比（強度）を測定する。
- CASE2：ロッドを貫入し、発生した過剰水圧が消散した後（5日後）、モールドから試料を取り出し、含水比を測定する。この時点以後“貫入後”と呼ぶ。またロッド貫入開始から過剰間隙水圧および鉛直変位を測定する。
- CASE3：貫入後に盛土を模擬した上載圧（ $\Delta p=157 \text{ kN/m}^2$ ）をかけて圧密させた後（載荷から10日後）、含水比を測定する。この時点以後“載荷後”と呼ぶ。またCASE1と同様に過剰間隙水圧および鉛直変位（沈下）の経時変化を測定する。

b) 実験結果とその考察

実験結果の検討に入る前に、杭施工後の過剰間隙水圧や強度増加などを評価する解析方法³⁾について述べる。

有限要素解析による方法は、2. で述べた強度増加のメカニズムを最も忠実に再現するもので、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。

以下に示す2つの境界条件のもとで解析を進める。

1) 円筒拡幅の変位速度境界条件

まず破壊時の変形や過剰間隙水圧分布は、砂杭施工を円筒拡幅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¹⁰⁾によって求める。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。

2) 砂杭径が変化しないという変位拘束の境界条件

得られた過剰間隙水圧分布を初期値に取って、つぎに砂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土の軸対称弾性圧密問題を解けば、砂杭打設後の杭間粘土の体積変化や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。ただし Δv は比体積変化、 $\lambda=0.434C_c$ (C_c は圧縮指数)である。

$$q_v/q_{v0} = \exp(\Delta v/\lambda) \quad (1)$$

上記2つの境界条件が現象近似のための仮説であるが、1)は計算の便宜のため、2)は砂杭は十分固い、いいかえると砂杭径は変化しないため、粘土地盤中での「円筒拡幅」のための力が圧密荷重として長く持続する、として計算を行う。

今回行った計算条件は以下のとおりである。

まず上記1)の円筒拡幅の計算では、木節粘土の土質定数から算定した以下のカムクレイパラメータを用いる。

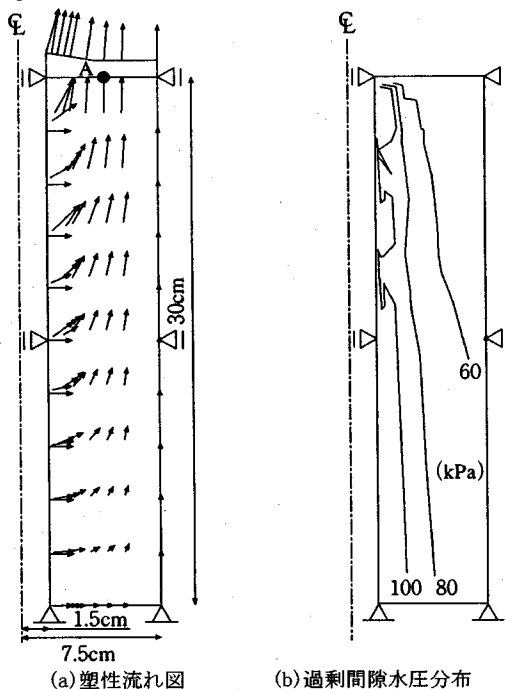


図-9 計算結果

表-3 木節粘土の土質パラメータ

λ	κ	M	K_0	k (cm/sec)	e_0
0.256	0.128	1.121	0.5	10^{-7}	1.315

また2)の圧密計算においては、 $m_v=0.2\text{cm}^2/\text{kgf}$ 、 $E=\alpha \cdot (1+\nu)(1-2\nu)/(1-\nu) \cdot 1/m_v$ 、 $\nu=0.33$ 、 $\alpha=3^3$ より $E=990\text{kN/m}^2$ を用いた。

まず図-9(a)は、計算結果によるロッド貫入実験後の塑性流れ図、また図-9(b)は、過剰間隙水圧分布である。計算での境界条件のうち供試体上端は、実験では載荷板で拘束されており、計算条件とやや異なっている。図-10(a)のロッド貫入後の鉛直変位(解析では図-9A点)をみると、貫入直後はほぼロッドの体積の分だけ載荷板が浮き上がるが、その後の上載荷重一定の条件下での過剰間隙水圧消散に伴う圧密により、載荷板は沈下し、体積が減少していることが、実験および計算を通じて確認できた。

また図-10(b)は、ロッド貫入による圧密終了後、

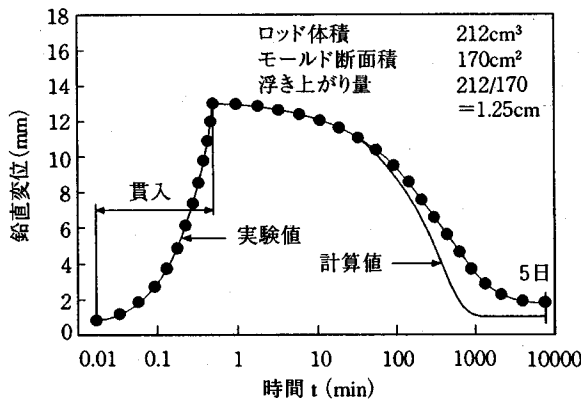


図-10(a) 鉛直変位～時間関係 (貫入後)

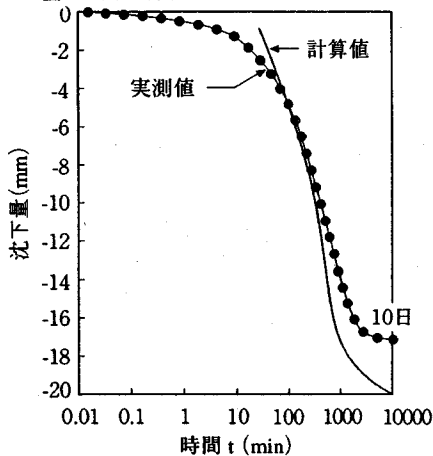


図-10(b) 鉛直変位～時間関係 (載荷後)

盛土を模擬して上載荷重をかけた場合(CASE3)の沈下～時間関係である。図-11は供試体の上端から5cmの位置において発生した過剰間隙水圧の消散過程における実測値と解析値の比較である。実際には、貫入中(30秒間)にも排水されており、実測の水圧のピークに時間遅れがみられるが、概ね解析結果は実測値を良く表現しているといえる。

図-12にモールド中央から3cm離れた位置での貫入前、貫入後5日および載荷後10日時点での含水比分布を示す。これによると、貫入後、載荷後ともに含水比の減少がみられ、圧密による強度増加がうかがえる。そこで、 $e-\ln p'$ 関係と $c/p'=\text{constant}$ から、

$$w = A - B \cdot \ln c \quad (2)$$

を設定し、室内三軸実験結果から、パラメータA、Bを求める。ここに、 w :含水比、 p' :平均有効応力、 c :せん断強度である。図-13より $A=74.8$ 、 $B=8.55$ が得られ、同図から w より貫入前(CASE1)、貫入後(CASE2)と載荷後(CASE3)のせん断強度 c を求めると、図-14が得られる。

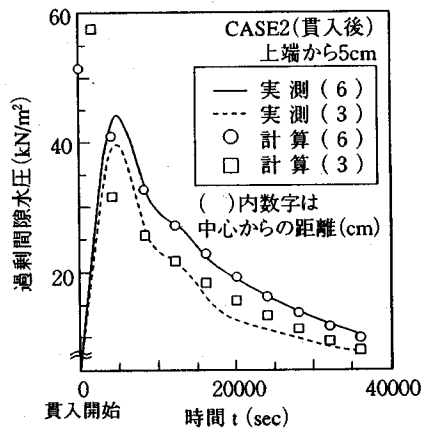


図-11(a) 過剰間隙水圧～時間関係

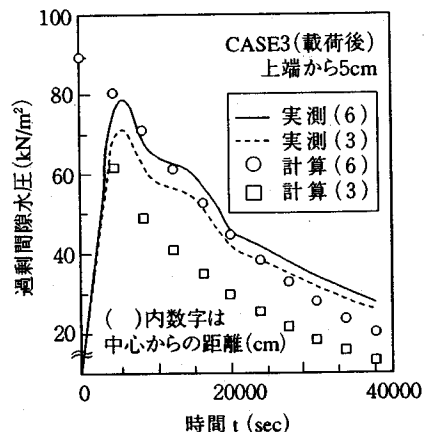


図-11(b) 過剰間隙水圧～時間関係

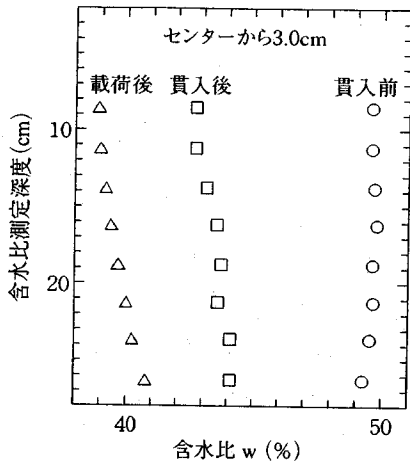


図-12 含水比の分布

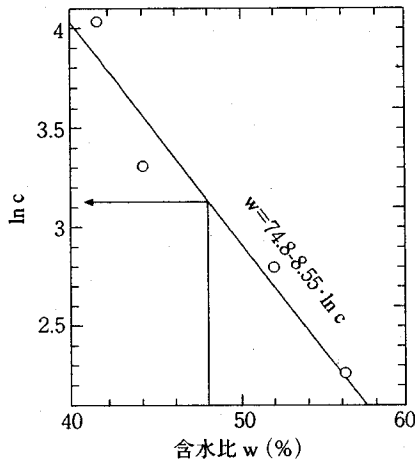


図-13 $w \sim \ln c$ の関係

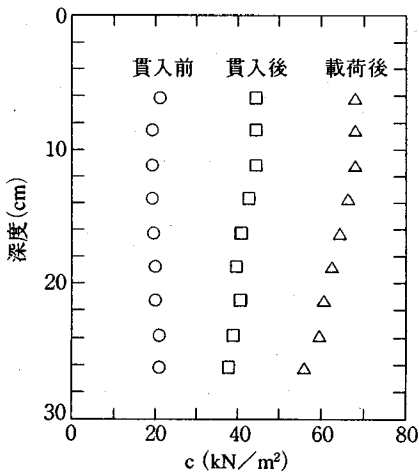


図-14 推定された強度分布

図-15は、図-14に計算結果を入れたものである。また、強度増加の比を深さ方向に平均しモールド中心からの距離で整理したのが図-16である。ここで載荷後(CASE3)の強度増加の計算については、上載荷重を加えて同様の弾性圧密解析を行い比体積変化 Δv を求め、前掲(1)式によって強度を計算し、得られた Δc_1 を貫入後の強度増加 Δc_2 に加えて求めた。この結果、上端部拘束条件の違いの影響を受けない供試体下部においては、どちらのCASEも(Δc_2 も $\Delta c_1 + \Delta c_2$ も)実測値をよく説明する。このことから、全体の強度増加について $\Delta c = \Delta c_1 + \Delta c_2$ がほぼ成立しているものといえる。

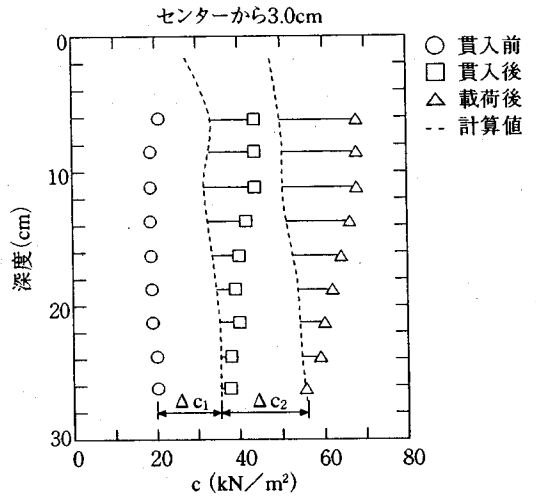


図-15 強度の実測値と解析の比較

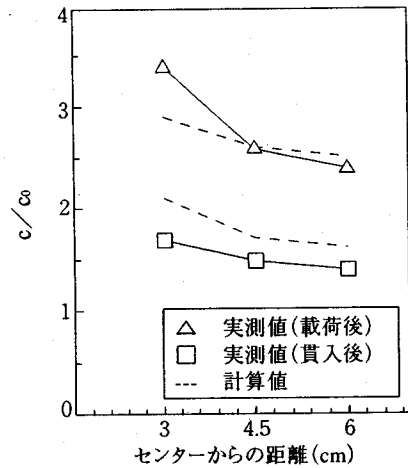


図-16 強度比の半径方向の分布

(3) PD材設置を模擬した圧密実験 (TEST2)

本実験は、モールド内にPD材を模擬した排水材を設置し圧密速度を調べることによって、PD材の配置と数による圧密特性の相違を調べ、併せて数値解析による評価を行うものである。

a) 実験方法

図-17の実験装置を用い、以下の方法で実験を行う。

1) PD材を模擬した排水材 (幅25mm, 不織布をナイロンメッシュで覆ったもの) を用意する。排水材以外から排水しないよう底板を止水フィルムで覆う。上端部も同様の処置をする。

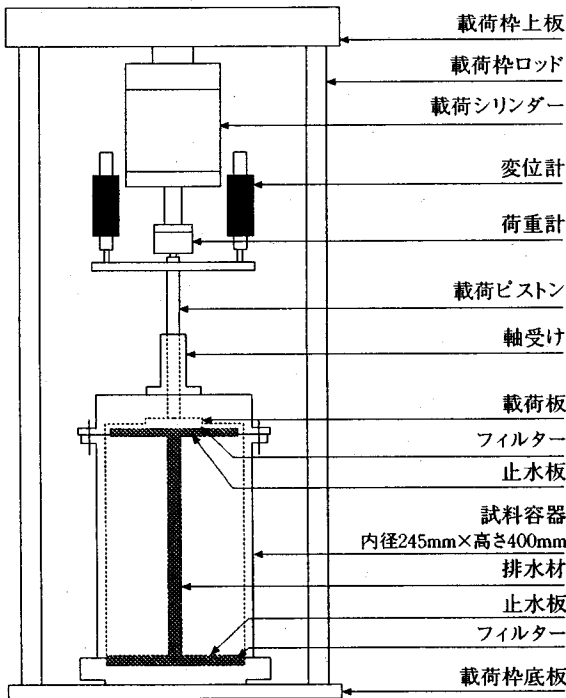


図-17 実験装置

2) モールド (φ24.5cm, h=40cm) 内に、排水材を図-18に示す3ケース (CASE4: 排水材1本, CASE5: 同2本, CASE6: 同8本) それぞれに設置し、TEST1と同様のスラリー状の試料を高さ35cmまで注入する。

3) 載荷パターンは、9.8, 19.6, 39.2, 68.6, 157kN/m²の各荷重段階で一次圧密終了を確認する。

b) 実験結果とその考察

図-19に実験で得られた荷重段階157kN/m²の場合の3ケースの圧密度 (沈下量) ~ 時間関係を示す。同図より、やはり排水材の本数が多い方が圧密沈下が速くなっている。

また同図には解析結果も実線および破線で付記している。PD材を任意の位置に配置した場合の圧密挙動の解析には多次元線形弾性圧密解析を行った。PD材を打設した地盤の場合には、巨視的に見て水が水平方向に流れるのに対して、地盤の変形は水平

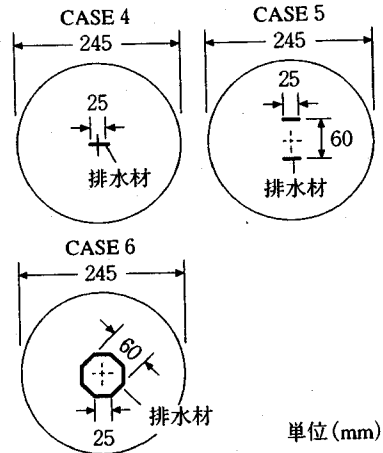


図-18 排水材の配置

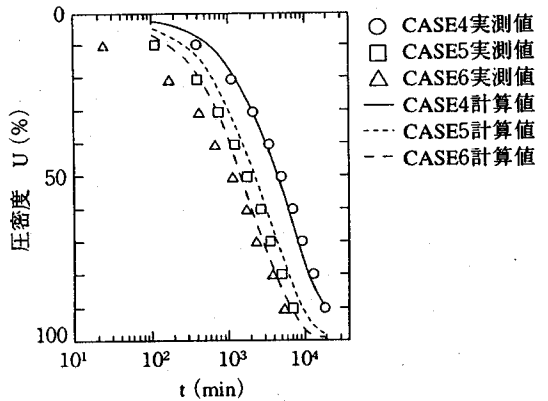


図-19 圧密度~時間関係

方向には生ぜず鉛直方向にのみ生ずる。この点を地盤挙動の制約条件として定式化する点が本解析の特徴である。有限要素法を用いると、以下の連立方程式に帰着する。

$$\text{つり合い式} : \mathbf{K} \mathbf{d} + \mathbf{L} \mathbf{u} = \mathbf{F} \quad (3)$$

$$\text{連続式} : \mathbf{L}^T \mathbf{d} + \mathbf{C} \mathbf{u} = \mathbf{0} \quad (4)$$

ここに、

\mathbf{K} : 全体剛性マトリックス, \mathbf{d} : 排水に伴う地盤の変形 (鉛直変位のみ), \mathbf{L} : 過剰水圧~等価節点力マトリックス, \mathbf{F} : 荷重ベクトル, \mathbf{C} : 過剰水圧~体積ひずみ速度マトリックス

である。(3),(4)式を初期条件 $d=0, F=F_0$ at $t=0$ のもとで解く。

計算条件は、以下のとおりである。まず境界条件を図-20に示す。用いた要素は9節点のアイソパラメトリック要素で、水圧は4節点で計算している。土質定数は、土質実験結果から $c_v=37\text{cm}^2/\text{day}$, $m_v=0.36$ cm^2/kg , $k=9 \times 10^{-6}\text{cm}/\text{min}$, $E=167\text{kN}/\text{m}^2$ とした。

図-19をもう一度みると、圧密の後半部分では大体良く実験結果を近似できてきているといえる。排水材が増えたときに圧密の前半部分で合わない理由は、解析における単純化やその精度などが原因として考えられるが、いずれにせよ、設計では圧密度80%以上が問題であり、工学的にはこの解析で十分であるといえる。また実際の設計にあたっては、例えば図-21のようなノモグラフ(排水材8本で c_v を変えたもの)をピッチを変えてあらかじめ作っておくと、簡単に圧密度~時間関係を得ることができる。

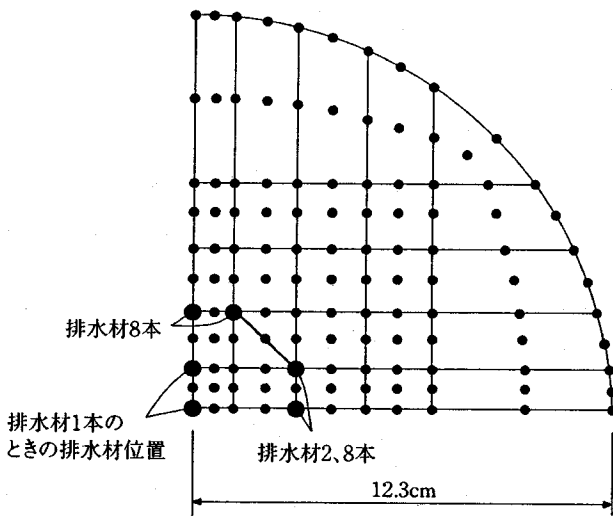


図-20 メッシュ図

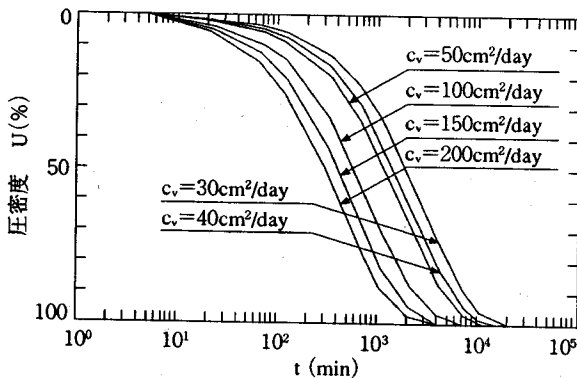


図-21 ノモグラフ例(排水材8本)

(4)建設発生土の材料(強度,透水性)実験(TEST3)

実験の目的は、細粒分含有率 F_c の増加に伴う排水せん断強度 ϕ_a および透水係数 k の推移を把握し、杭材料の強度、透水性を評価することである。

a)実験方法

まず材料であるが、珪砂・笠岡粘土・カオリンを混ぜたもの、および大阪湾の沖積粘土を粉末状態に粉碎し山砂(愛媛県産)と混ぜたものの2種類を用意し、所定の細粒分含有率 ($F_c=5\sim 25\%$) になるよう調整した。

強度実験については、JSF T-520, T-524(1990)の基準に従い三軸CD実験を行った。供試体は、 $\phi 50 \times h 100\text{mm}$ のモールド内に、所定の相対密度 D_r になるように締め固め作成した後、モールドから取り出し三軸セル内にセットする。その後背圧により飽和度を上げて、せん断速度 $1.0\%/ \text{min}$ でせん断した。また、透水実験は、まず供試体寸法 $\phi 100 \times h 127\text{mm}$ モールドに所定の密度に締め固めた後、定水位 JSF T-311で行った。

b)実験結果とその考察

図-22によれば F_c の増加に伴う ϕ_a の低下がみられ、その傾向は D_r が小さいほど著しい。

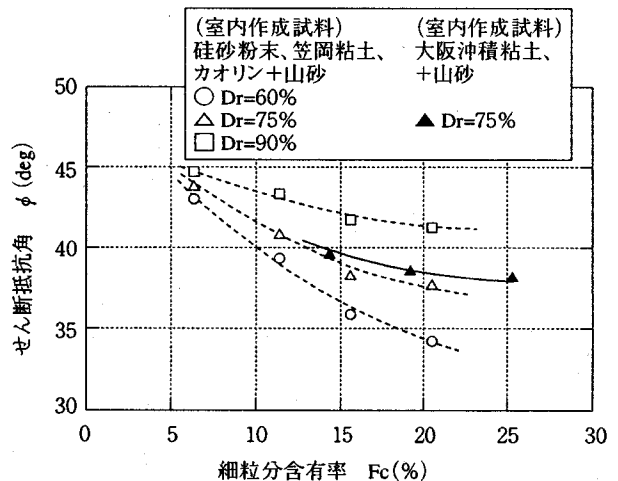


図-22 $\phi_a \sim F_c$ 関係

また図-23は、同じ試料における D_r, F_c に対する k の変化である。これによると、 F_c が 15% を越えると透水性が急激に低下し、 $10^{-4}\text{cm}/\text{sec}$ 程度に落ちることがわかる。このことから建設発生土を利用する地盤改良においては杭の排水機能はあまり期待できず、その代替(PD)材は必要不可欠といえる。

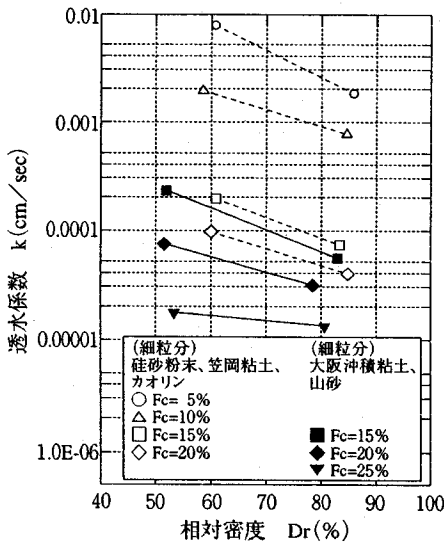


図-23 k ~ Fc ~ Dr 関係

5. おわりに

本研究で得られた結論を以下に述べる。

- (1) 砂杭施工により発生する過剰間隙水圧消散後の強度増加 Δc_2 を積極的に評価するために実施したロード貫入実験において、貫入直後に生じた鉛直変位(浮き上がり量)は時間とともに徐々に低下し、圧密による体積減少がみとめられた。また、過剰間隙水圧の低下傾向や実験後の含水比の測定からも圧密の進行と強度増加がみられた。沈下と水圧についての解析結果は、実測値とよく整合している。
- (2) ロード貫入後および盛土荷重を模擬した載荷後の含水比から強度を求め、解析との比較を行った結果、全体の強度増加は、貫入後の圧密による強度増加と載荷後の強度増加の和であらわされることが示された。
- (3) PD材の設置を模擬した圧密実験の結果、PD材の数が多いほど圧密が速いこと、また数値解析による方法が任意位置でのPD材の排水計算に有効であることがわかった。
- (4) 建設発生土の材料実験の結果、設計において杭芯の強度や透水性を期待する場合、図-22, 23を参考にFcやDrに応じて強度や透水性をそれぞれ低減させる必要があるといえる。

建設発生土を利用した地盤改良を採用する場合のメリットについて整理してみると、①自然環境の保全、②盛土荷重の軽減、③経済性が挙げられる。特に、同一現場内で発生した土を砂杭の代替材として用いれば、経済的メリットは大きくなる。また、こ

の建設発生土を利用した地盤改良は、その対象を粘性土地盤に限ることはしない。砂質地盤の液状化対策などにも有効である。

なお実際の設計法については、現在進めている現場実験の解析成果と合わせて誌面をあらためて提示する予定である。

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) 石炭利用総合センター：石炭灰の有効利用とリサイクル、大量処理技術開発、講習会テキスト、1995年2月。
- 3) 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.
- 4) Asaoka, A., Matsuo, M. and Kodaka, T.: Bearing capacity of clay improved with sand compaction piles, XIII ICSMFE, pp. 763-766, 1994.
- 5) 榎戸源則, 高橋豊, 後藤貞雄, 前田勝司: 砂コンパクション工法打設による粘性土地盤のカク乱時の強度回復について, 土と基礎, pp. 87-92, 1973. 6.
- 6) 赤木俊允: 排除型砂杭の打設に伴う間隙水圧と地表面の変動, 第15回土質工学会研究発表会, pp. 1633-1636, 1980.
- 7) H. G. Poulos and E. H. Davis: *Pile Foundation Analysis and Design*, Robert E. Krieger Publishing Company, pp. 6-10, 1990.
- 8) 浅岡 顕, 中野正樹: 繰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回土質工学会研究発表会講演概要集, pp. 649-652., 1992.
- 9) 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。
- 10) 浅岡 顕: 支持力と有効応力, 土と基礎, Vol. 36, No. 6, pp. 43-49, 1988.

(1995. 12. 20受付)

STUDY ON 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 problem. The soil improvement method of using the construction waste soil instead of sand for sand compaction pile is expected to encounter above situation.

This paper reveals that the increase of shear strength on the surrounding clay takes place both when sand pile is driving and embankment load is applying independently, by model tests and numerical analyses. Based upon the experimental results, it is also investigated to apply the plastic board drain for drainage.