

名古屋大学 浅岡顕・中野正樹
 不動建設(株) 野津光夫
 名古屋大学 フェルナンド, G. S. K.

1. はじめに

飽和粘土地盤に盛土を載荷した時、粘土地盤の沈下挙動は、①地盤に代表的な透水係数（マス・パーミアビリティ）と、②地盤の初期非排水支持力で評価した盛土荷重の大きさとの2つの影響を受ける。また地盤の沈下特性もこれら2つのパラメータによりほぼ統一的に説明することができる。これによると、原地盤のマス・パーミアビリティが $10^{-7} \sim 10^{-4} \text{cm/sec}$ の限られた範囲にあるときにサンドドレーンなどの地盤改良工法は沈下や支持力について著しい改善効果を表す。またこの透水係数の範囲は大荷重が載荷されるほど、低い範囲へと移動する（詳細は文献1)および本報告の2章で述べる）。

本報告の目的は、載荷した盛土荷重や原地盤のマス・パーミアビリティの異なる2つの現場の事例解析を行って、それぞれの地盤に対するサンドドレーン（SD）の有効性を評価することにある。ひとつはSDをすでに打設した地盤で、大きな盛土荷重が載荷されている。沈下観測データより求められたSD処理前のマス・パーミアビリティは 10^{-7}cm/sec で、SD打設によりマス・パーミアビリティは約90倍上昇し、残留沈下抑制に有効であったことを示す。もう1つは沖縄の港湾地域に分布するサンゴ礫混じり粘土地盤で、透水係数は一般の粘土地盤に比べて大きい、地盤の非排水支持力も大きく盛土荷重は相対的に小荷重となっている。そのため、盛土盛立て後の残留沈下が大きく、透水係数が大きいこの地盤に対しても依然SDは残留沈下抑制に有効であることを示す。

3章ではマス・パーミアビリティの上昇とSDの砂杭配置（直径・ピッチ・長さ）との関係を明らかにするため、関口らのマクロエレメント法²⁾を用いた有限要素計算を行う。4、5章では2つの現場の事例解析をそれぞれ示す。

2. マス・パーミアビリティと盛土荷重とが地盤の沈下挙動に及ぼす影響

2.1 解析条件

地盤の沈下挙動を表わす弾塑性構成モデルにはCam clayモデルを用いる。土質パラメータを表1に、地盤の有限要素メッシュを図1に示す。図1中には荷重条件・境界条件・排水条件も合わせて示している。さらに地盤の初期応力状態を図2に示す。なお変形は平面ひずみ条件を仮定している。この地盤に盛土を一定の載

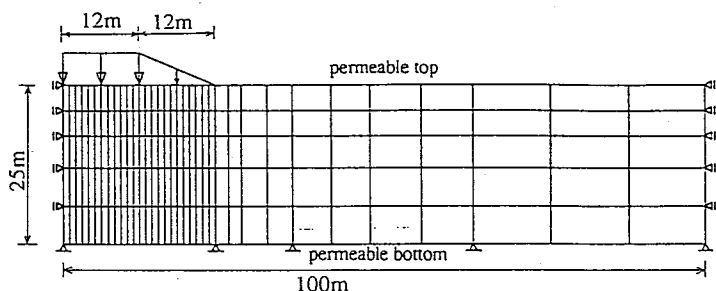


図1 荷重条件と有限要素メッシュ

表1 地盤の弾塑性パラメータ

λ	0.25
κ	0.13
M	1.20
ν	0.2
ν_0	2.645
K_0	0.7

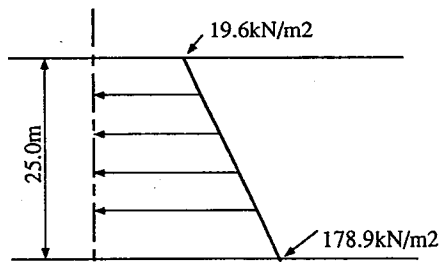


図2 地盤の初期応力状態

荷速度 \dot{q} 1.2 kN/m²/day で載荷し、設定荷重で放置する。図3に示すように盛立て終了時の沈下量を ρ_0 、最終沈下量を ρ_f とする。なお図中には地盤の非排水支持力の経時変化も示している。

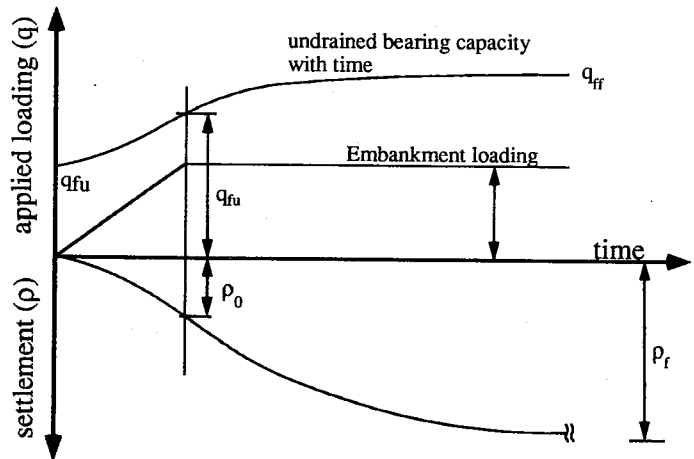


図3 載荷履歴と地盤の部分排水挙動

盛土荷重の大きさを4種類設定し、各荷重に対しマス・パーミアビリティ k を $10^{-9} \sim 10^{-3}$ cm/sec 変化させて弾塑性変形解析を行い、これら2つの要因が地盤の沈下挙動にどう影響するのかを調べる。ここで盛土荷重の“大きさ”を測る尺度に非排水支持力 q_{fu} (図3) に対する「荷重安全率 F_s 」を用いる。すなわち

$$F_s = q_{fu}/q \quad \dots \dots \dots (1)$$

F_s を荷重の大きさの尺度に使うのだから、盛土荷重が同じでも地盤の非排水支持力 q_{fu} が大きければ、 F_s は大きくなり、その荷重は「小荷重」となるので注意する。

多次元弾塑性圧密の沈下特性を決めるものとして、非排水支持力と「マス・パーミアビリティ」を取りあげる理由を以下に述べる。地盤の非排水支持力 q_{fu} の計算には、その地盤の弾塑性パラメータと境界条件、荷重条件など透水係数および排水条件を除く全ての解析条件が必要である。これら諸条件を代表するものとして非排水支持力 q_{fu} を用いる。一方、地盤の透水性と排水条件については、排水条件を決めた上で、透水係数の不均質性や異方性を丸めたものとしてその地盤にひとつの「マス・パーミアビリティ k 」を定義する。

つぎに多次元弾塑性圧密の沈下特性を、変形履歴を代表する最も単純なパラメータ沈下比 ρ_0/ρ_f を用いて表す。弾塑性変形は応力履歴に依存して決まるが、荷重経路が同じ時有効応力の履歴は透水係数で決まり、それに応じて変形経路が決まる。だから逆に、変形経路（この場合沈下比 ρ_0/ρ_f ）がわかると、弾塑性パラメータ（この場合 q_{fu} ）と荷重履歴が決まっていれば、透水係数がわかるという論理になっている。

2.2 解析結果

図1、2と表1の地盤に対し非排水支持力 q_{fu} を計算したところ、 $q_{fu} = 105 \text{ kN/m}^2$ であった。ここでは表2に示す4種類の盛土荷重を載荷した。図4に k に対する ρ_0/ρ_f の変化を示す。 k が $10^{-7} \sim 10^{-3}$ cm/sec の範囲で ρ_0/ρ_f は急変し、範囲外では ρ_0/ρ_f は k の影響を受けない。 $k < 10^{-7}$ cm/sec では、盛土を載荷している間地盤は非排水的に挙動している。一方 $k > 10^{-3}$ cm/sec では、排水的挙動をして ρ_0 が ρ_f とほとんど等しく、 ρ_0/ρ_f がほぼ1になっている。したがって ρ_0/ρ_f が急変する $10^{-7} < k < 10^{-3}$ cm/sec で部分排水効果が著しく変化することがわかる。これを表す図4の曲線のことを本論文では単にS字型曲線とだけ呼ぶので注意。 ρ_0/ρ_f が急激に変化する k の範囲は、盛土荷重の大きさによって変化する。図4において $F_s = 1.0$ の「大荷重」が載荷された地盤のS字型曲線 k の範囲は $10^{-7} \sim 10^{-4}$ cm/sec で、一方、 $F_s = 5.0$ の「小荷重」では $10^{-6} \sim 10^{-3}$ cm/sec となる。

表2 荷重安全率 F_s

F_s	$q_{fu}/F_s(\text{kN/m}^2)$
1.0	105
1.25	84
2.5	42
5.0	21

「 ρ_0/ρ_f が大きい」とは「盛土盛立て後の沈下が小さい」ことを意味する。さてもし、サンドドレーン工法がマス・パーミアビリティ k を大きくすることとほぼ等価な工法であることが証明できれば、

図4はSDが沈下対策上有効に機能する地盤もあればそうでない地盤もあること、SDが有効な荷重の大きさもあればそうでない荷重の大きさもあることが見て取れる。 k の小さい地盤では大荷重のときSDは有効で、 k が大きい地盤では小荷重のときにだけSDはなお必要、などである。次章では上記下線部を検討し、4章では k の小さい地盤の、5章では k の大きな地盤の事例解析を行う。

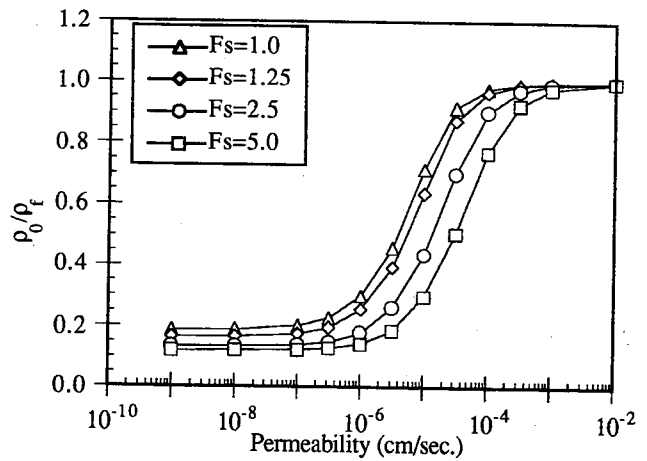


図4 $\rho_0/\rho_f \sim k$ 曲線

3. マス・パーミアビリティの上昇とSDの砂杭配置（直径・ピッチ・長さ）との関係

本章では、SDの砂杭の配置（直径・ピッチ・長さ）によって ρ_0/ρ_f がどう変化するかを調べ、またマス・パーミアビリティで表現した地盤と砂杭の配置との関係を示す。

3.1 解析条件

弾塑性構成モデルは2章と同じCam clayモデルで、有限要素メッシュは図1と同じである。打設した砂杭の周辺地盤、すなわち元の無処理地盤の透水係数は 10^{-7} cm/sec とし、その土質パラメータは表1に等しい。ここでは直径0.2m、ピッチ2.0mの砂杭をSDの標準形とする。 $F_s=1.0, 1.25, 2.5, 5.0$ の4種類の盛土荷重を載荷する。

3.2 砂杭直径が沈下挙動に及ぼす影響

砂杭間のピッチを2.0mと固定して、砂杭直径を0.2、0.4、0.6mとした時の ρ_0/ρ_f の変化を図5に示す。直径が大きくなると ρ_0/ρ_f も大きくなり、また F_s の小さい「大荷重」を載荷するほど、 ρ_0/ρ_f は大きくなる。さらに砂杭打設によってどのくらいマス・パーミアビリティが上昇するのかを調べるために、 $F_s=$

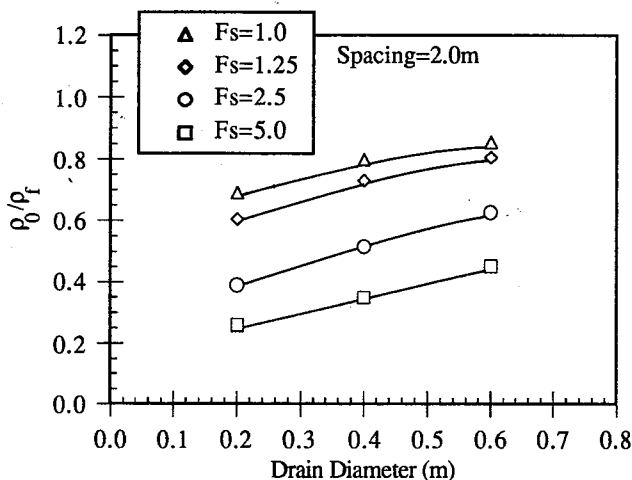


図5 砂杭直径の ρ_0/ρ_f への影響

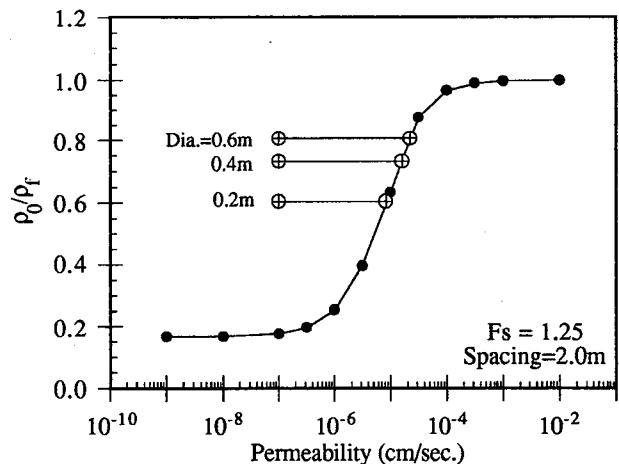


図6 砂杭直径によるマス・パーミアビリティの改良効果

1.25の荷重に対するS字型曲線と砂杭直径による ρ_0/ρ_f の上昇との関係を図6に示した。本章で行った解析（マクロエレメント法）で砂杭のない特別がない場合は、すべてのメッシュにおける透水係数が 10^{-7} cm/secとなり、 10^{-7} cm/secのマス・パーミアビリティで表した地盤と解析条件が等しくなる。そのときの ρ_0/ρ_f は約0.2であるが、砂杭直径を0.2、0.4、0.6mと大きくすると、 ρ_0/ρ_f は0.61、0.73、0.81と大きくなる。ここで図6のS字型曲線より、砂杭直径0.4mにおける ρ_0/ρ_f と等しいマス・パーミアビリティは、 2.0×10^{-5} cm/secとなる。

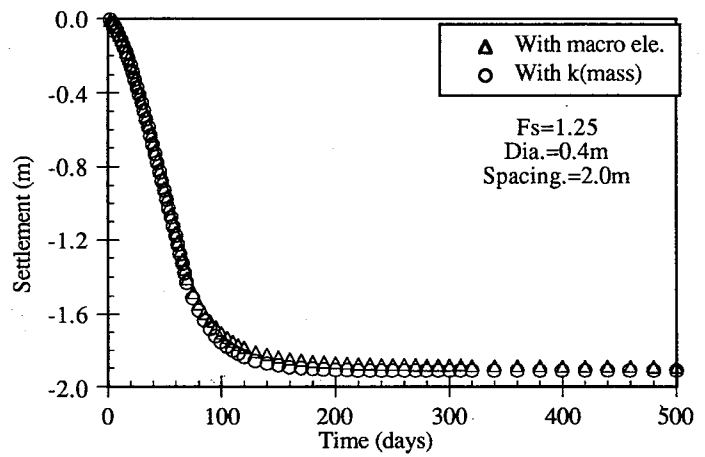


図7 砂杭打設地盤とマス・パーミアビリティで表した地盤の沈下曲線の比較

図7で砂杭直径が0.4mの地盤とマス・パーミアビリティが 1.6×10^{-5} cm/secの地盤との沈下曲線を比較すると、2つの曲線は良い一致を示した。この結果は以下の2つのことを意味する。ひとつは、砂杭などで改良した複雑な透水性を有する地盤の沈下～時間挙動は、マス・パーミアビリティで表された均質地盤の挙動として説明できることである。このマス・パーミアビリティは、沈下観測で得られた ρ_0/ρ_f に対するkとして、S字型曲線から得ることができる。もう1つは、砂杭打設とマス・パーミアビリティの上昇との関係が示されることである。砂杭直径0.4mの打設によって、マス・パーミアビリティは 10^{-7} cm/secから 2.0×10^{-5} cm/secまでの、約160倍上昇する。同様に直径0.2mでは約80倍、0.6mでは約220倍上昇する。

3.3 砂杭間のピッチが沈下挙動に及ぼす影響

砂杭直径を0.2mと固定して、砂杭間のピッチを1.0～4.0mと変化させた時の ρ_0/ρ_f の変化を図8に示す。ピッチが大きくなると ρ_0/ρ_f は小さくなり、またFsの小さい「大荷重」を載荷すると ρ_0/ρ_f は大きくなる。図9に示すように、Fs=1.25の荷重に対しピッチを4.0mから1.0mに小さくすると、マス・パーミアビリティは約36から260倍まで上昇する。

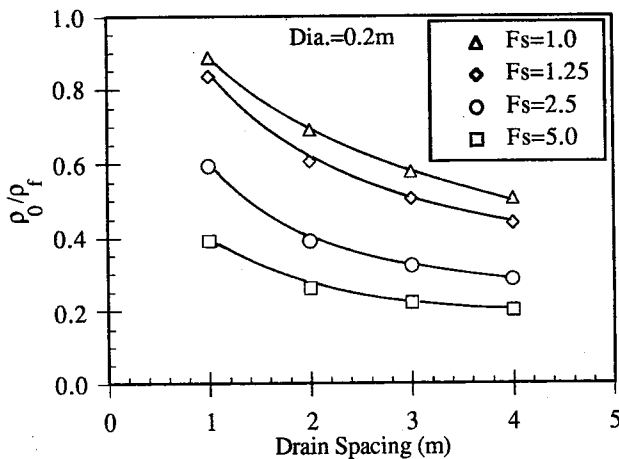


図8 砂杭間ピッチの ρ_0/ρ_f への影響

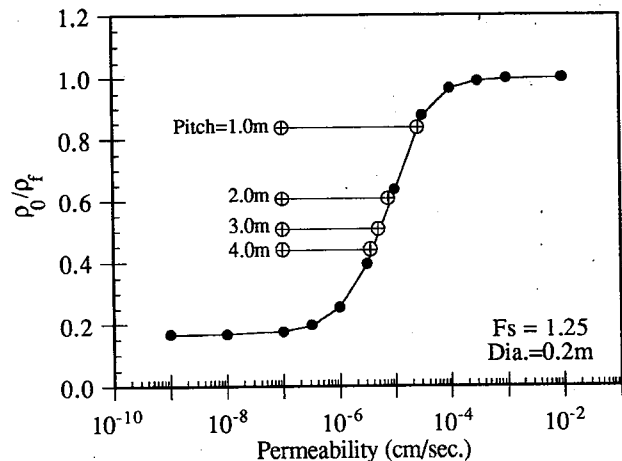


図9 砂杭間ピッチによるマス・パーミアビリティの改良効果

砂杭直径を0.2mで、また盛土荷重をFs=1.25で一定として、地盤上端から下端まで砂杭を貫通させるもの（Drain Length=100%）から上端から途中まで砂杭を挿入するもの（Drain Length=32%）までの ρ_0/ρ_f への影響を図10に示す。砂杭のピッチが小さい場合（Pitch=1.0m）は、砂杭長さの ρ_0/ρ_f に及ぼす影響は大きいですが、ピッチが大きくなる（粗くなる）につれ影響は小さくなる。図11に示すように、Fs=1.25の荷

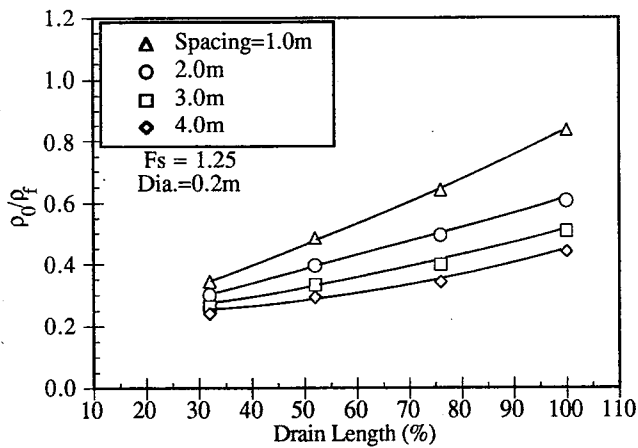


図10 砂杭長さの ρ_0/ρ_f への影響

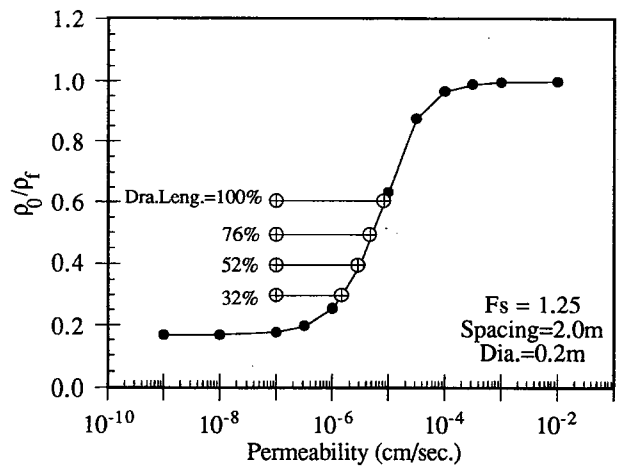


図11 砂杭長さによるマス・パーミアビリティの改良効果

重に対し砂杭長さとしてDrain Length=32%とすると、ほとんど改良効果は無く、マス・パーミアビリティも約14倍程度の上昇に留まる。

3.4 原地盤の透水係数が沈下挙動に及ぼす影響

今までは、原地盤の透水係数を 10^{-7} cm/secで固定して解析していたが、本節ではこの透水係数が 10^{-9} から 10^{-4} cm/secまでの地盤に対して、砂杭間のピッチが ρ_0/ρ_f に及ぼす影響を調べる。図12にその解析結果を示す。Fs=1.25の荷重に対し砂杭直径を0.2mとして砂杭間のピッチを変化させた。破線はFs=1.25に対するS字型曲線である。透水係数が 10^{-9} cm/secの粘土地盤では砂杭間のピッチを1.0mにしても ρ_0/ρ_f はほとんど上昇しない。一方 10^{-5} cm/secの地盤では4.0mのピッチでも ρ_0/ρ_f を上昇させ、その値はほとんど1になった。 10^{-9} ~ 10^{-5} cm/secの範囲では、ピッチの違いで ρ_0/ρ_f の値も異なる。すなわちSDなどで処理した地盤の沈下挙動は、砂杭の配置(直径・ピッチ・長さ)や地盤に載荷される荷重の大きさ(Fs)だけでなく、SDを打設する前の原地盤の透水係数の影響も受ける。

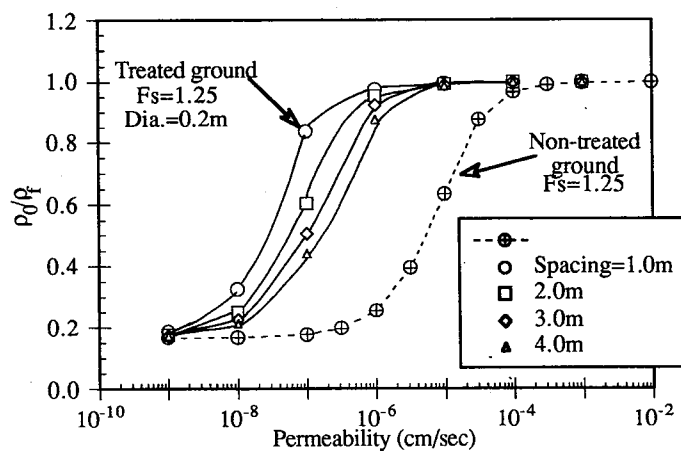


図12 砂杭打設前の原地盤のマス・パーミアビリティの ρ_0/ρ_f への影響

4. 事例解析その1~SD処理地盤に対するSDの有効性評価について

本章では、すでにSDで処理された地盤に「大きな」盛土荷重を載荷した現場の事例解析を行う。沈下観測データから、SD施工前の無処理地盤のマス・パーミアビリティを逆算し、SDの施工が地盤の残留沈下抑制に有効であったことを示す。

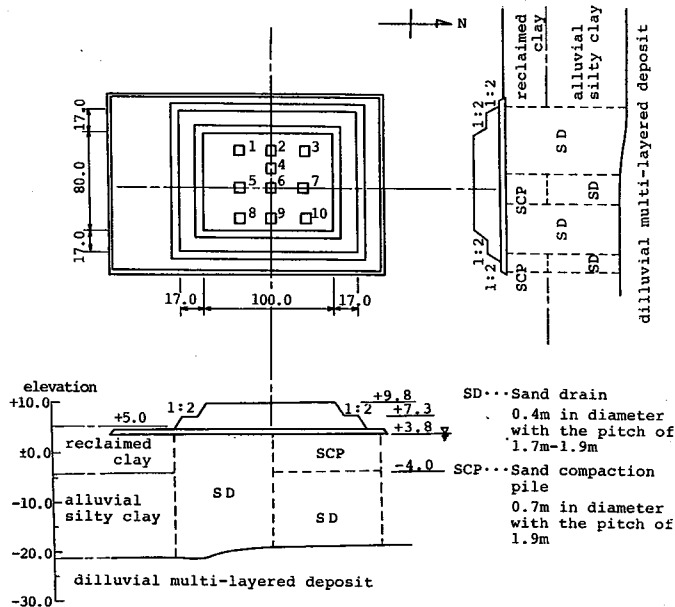


図13 碧南試験盛土の概要

表3 得られた弾塑性パラメータ

λ	0.3
κ	0.106
M	1.01
ν	0.346
ν_0	2.346
K_0	0.53

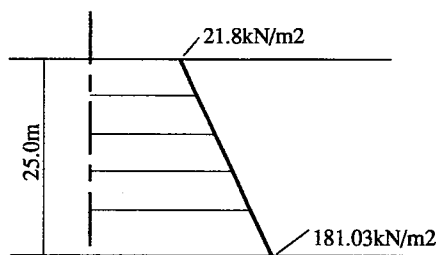


図14 地盤の初期応力状態

図13に中部電力碧南試験盛土の概要を示す。地盤はSDやSCP（サンドコンパクションパイル工法）で処理されている。図中の沈下板No.5の沈下データから ρ_0/ρ_f は0.58であり、この値を解析に用いる。この地盤を表す弾塑性構成モデルはCam clayモデルとした。事前の土質調査により土質パラメータは表3のように、地盤の初期応力状態は図14のようになった。地盤の変形条件は平面ひずみ条件としている。以上解析条件が整ったので、まず始めに地盤の初期非排水支持力 q_{fu} を求めると、 123kN/m^2 となった。試験盛土は約 $1.39\text{kN/m}^2/\text{day}$ の荷重速度で 121kN/m^2 まで荷重されたが、 F_s は1.02であり「大きな盛土荷重」である。図15に示すように、 $F_s=1.02$ のS字型曲線を描き、 $\rho_0/\rho_f=0.58$ から求められたSD処理地盤のマス・パーミアビリティは $8.3 \times 10^{-6}\text{cm/sec}$ であった。なお図15には、この現場と同じ砂杭配置、すなわち砂杭直径0.4m、ピッチ1.8mのSDを施した解析結果も示している。そこでは原地盤の透水係数を変えた時の ρ_0/ρ_f の上昇も示している。この曲線からSD処理前の原地盤の透水係数は $9.3 \times 10^{-8}\text{cm/sec}$ であることがわかった。このことから①SD処理地盤のマス・パーミアビリティは、SD処理前の約90倍になったこと、②その結果 ρ_0/ρ_f は0.05から0.58まで上昇し、盛土盛立て後の沈下抑制にはSDが有効であったこと、の2点が結論づけられた。なお図16には、観測された沈下曲線および $8.3 \times 10^{-6}\text{cm/sec}$ のマス・パーミアビリティで表し

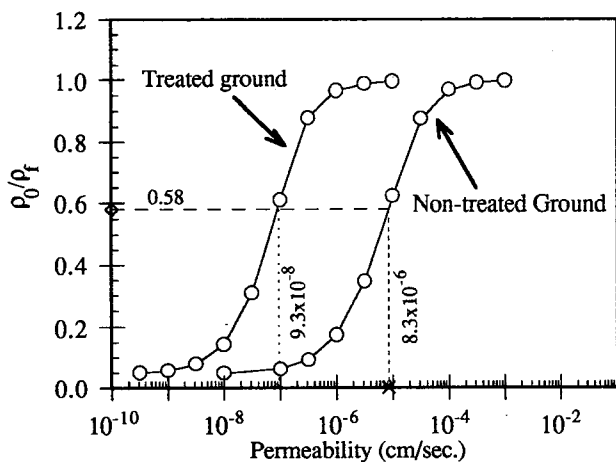


図15 SDによるマス・パーミアビリティの改良効果

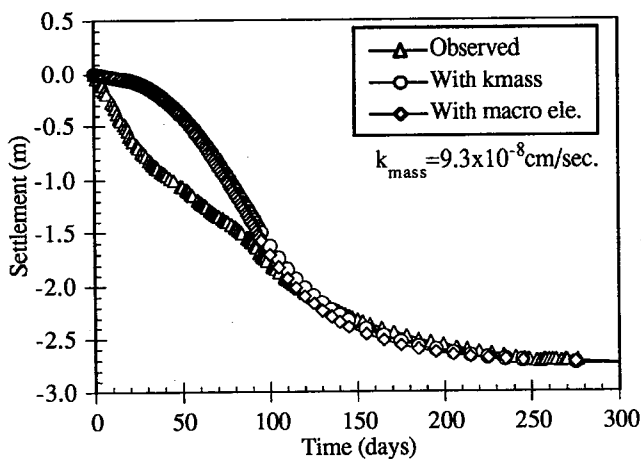


図16 実測値と解析値の沈下曲線の比較

た地盤と、SDを施した地盤との解析で得られた沈下曲線を比較している。3つの曲線とも盛土盛立て後は、良い一致を示している。

5. 事例解析その2～無処理地盤に対するSDの有効性について

本章では、沖縄の港湾地域に広く分布するサンゴ礫混じり粘土地盤の解析を行う。この地盤にはフィンガーコーラルと呼ばれる枝サンゴの破砕片が混入しており、透水係数は大きく、また地盤の支持力も大きい。しかしこの地盤に盛土を載荷すると、沈下が長期にわたり、最終沈下量は盛立て終了時の約2倍にも達する。この理由は、たとえ地盤の透水係数が大きくても、非排水支持力が大きすぎて盛土が「小荷重」になっていることに尽きるのだが、本章では、たとえ透水係数が大きくても「小荷重」のときには、なおSDによる透水性の改良が残留沈下抑制に有効であることを、事例を挙げて示す。

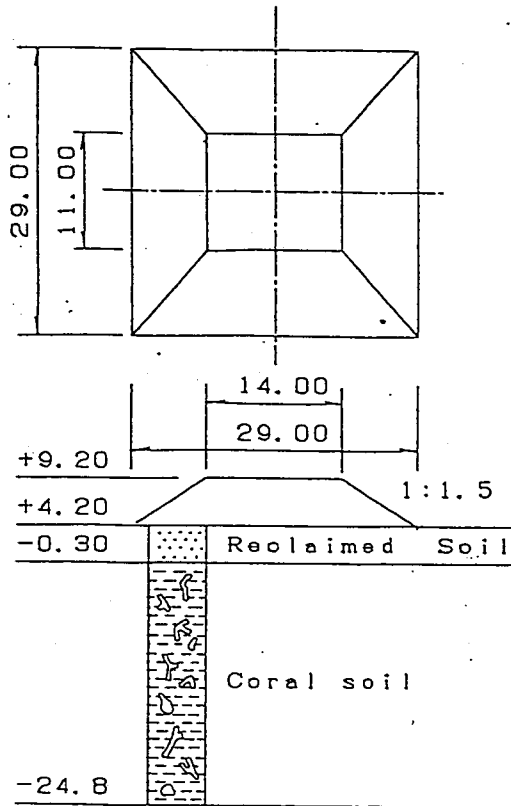


図17 沖縄那覇港試験盛土の概要 (文献4, 5)より

表4 得られた弾塑性パラメータ

λ	0.087
κ	0.051
M	1.64
ν	0.33
ν_0	2.0
K_0	0.50

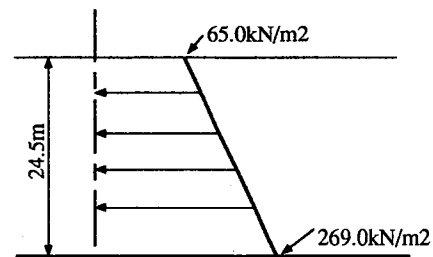


図18 地盤の初期応力状態

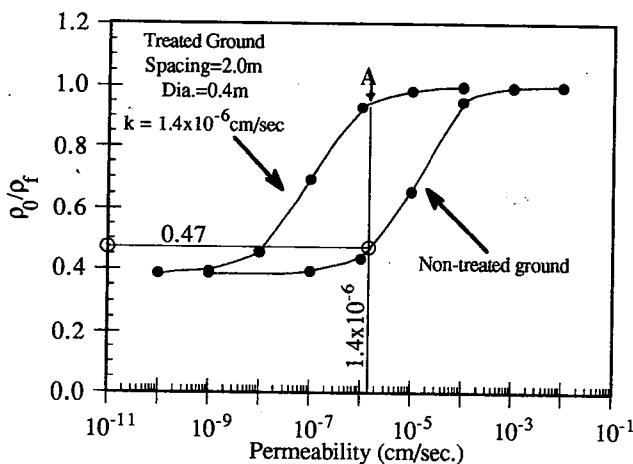


図19 SDによるマス・パーミアビリティーの改良効果

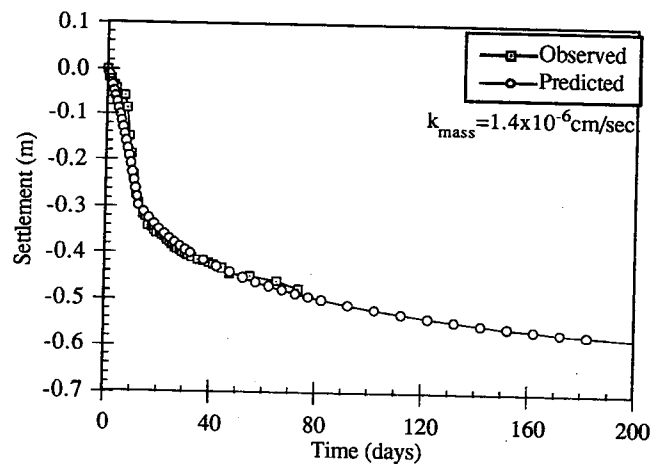


図20 実測値と解析値の沈下曲線の比較

図17に沖縄那覇港試験盛土の概要を示す⁴⁾。これは昭和50～51年度に沖縄開発庁沖縄総合事務所が那覇港において実施したものである⁵⁾。土質調査により得られた地盤の土質パラメータおよび地盤の初期応力状態を表4、図18に示す。まず試験盛土の荷重安全率 F_s を求めるため、地盤の非排水支持力 q_{fu} を計算すると 270kN/m^2 となった。盛土荷重 q が 98kN/m^2 であるから F_s は2.76となり、載荷した試験盛土は「小荷重」であることが明らかになった。 $F_s=2.76$ のS字型曲線を図19に示す(図中のNon-treated rgroundの曲線)。「小荷重」であるため、 k が $10^{-6}\sim 10^{-3}\text{cm/sec}$ の範囲で ρ_0/ρ_f が変化している。沈下観測データより $\rho_0/\rho_f=0.47$ に対する k を求めると、 k はかなり大きく $1.4\times 10^{-6}\text{cm/sec}$ となる。しかし F_s が大きいと、図19からもわかるように ρ_0/ρ_f が小さく、したがって盛土盛立後も沈下が長く続くのである。図20に実測値と $k=1.4\times 10^{-6}\text{cm/sec}$ のマス・パーミアビリティで表した地盤の沈下曲線を示す。解析値は実測値を良く表現している。

この地盤の残留沈下を抑制するにはSDが有効であるかを調べるため、砂杭直径0.4m、ピッチ2.0mのSD処理地盤の解析をおこなった。図19には、そのときの原地盤の k を変化させたことによる ρ_0/ρ_f の変化を示している(図中のTreated groundのS字型曲線)。粘土地盤の k が上記の $1.4\times 10^{-6}\text{cm/sec}$ であるとき、 ρ_0/ρ_f はほとんど1を示し、SDはこの地盤の残留沈下抑制に対し有効であることがわかった。

6. 謝辞

沖縄開発庁沖縄総合事務局から貴重なデータを提供して頂きました。厚く感謝致します。

7. 参考文献

- 1) Asaoka, A., Nakano, M. and Matsuo, M. : Prediction of the Partially Drained Behavior of Soft Clays under Embankment Loading, Soils and Foundations, vol. 32, No. 1, pp. 45-58, 1992.
- 2) 関口秀雄, 柴田徹, 三村衛, 角倉克治: 大水深護岸の変形解析, 京都大学防災研究所年報, 1988.
- 3) 赤木俊允・石田哲朗: 軟弱地盤の沈下とその透水性に関する実用的考察, 土と基礎, Vol. 37, No. 6, pp. 41-47, 1989.
- 4) 土質工学会: ジオテクノート2 中間土, 1992.
- 5) 小沢栄・稲垣紘史・荘司喜博: 沖縄におけるサンゴレキ混じり土の地盤改良試験工事, 土と基礎, 1978