

海底地盤におけるサンドドレーン地盤改良効果の評価

—原位置掘削調査と改良メカニズムの検証—

高橋 真一 鳥井原 誠
平間 邦興

Evaluation of Sand-drain Method in Submarine Ground

— In-site Tests in Excavated Vertical Shaft and Study of Drain Consolidation Mechanism —

Shinichi Takahashi Makoto Toriihara
Kunioki Hiramama

Abstract

Although many soil stability works using sand-drain methods have been carried out, in-site tests after soil stabilization were rarely done. We conducted in-site tests in a excavated vertical shaft to estimate the effect of sand-drain consolidation at Osaka Maishima Island that was improved about 20 years ago. The tests showed that near the sand-drain water content was lower, strength and consolidation yield stress were bigger than far away from the sand-drain. To estimate these characteristics, we conducted model tests and FEM simulations, and clarified the drain consolidation mechanism..

概要

サンドドレーンによる地盤改良工事実績は非常に多いものの、長期間を経て安定化した改良面を使って原位置調査により改良効果を検証する機会は皆無に近い。大阪港埋立地の一画でシールド発進立坑掘削工事（内径11m、深さ約60m）を利用して、約20年前にサンドドレーンを用いて地盤改良された旧海底沖積粘土層の原位置調査を行い、上記の地盤改良パラメータの総合評価を進めた。その結果、サンドドレーンに近いほど土被り荷重で予想される以上の含水比低下、地盤強度増加、圧密降伏応力増加が大きいことがわかった。そしてこの特性の要因が排水方向と変形方向が異なるドレーン圧密メカニズムに起因することを模型実験と数値解析によって検証した。

1. はじめに

サンドドレーンを用いた軟弱粘性土地盤の圧密促進工法の実績は非常に多く、その有用性も周知の事実である。これまでにサンドドレーンの効果が多いに議論された1970～1980年代には、埋立て造成のような面的な地盤改良における改良効果は大いに発揮されるが、道路盛土のように細長い土構造物に対しては改良効果は疑問視された時期もあった。しかし、議論の根拠となったものは主として表面沈下のみによる沈下特性の分析であり、その後、FDMやFEM等の手法を適用した地盤全体の变形解析技術が大幅に向上する中で、その改良効果に関して、より詳細で多角的な視点から検証されてきたといえる。

しかし、サンドドレーン工法における軟弱地盤の变形特性に影響を与える要因は多く、そのすべてが解明評価されたわけではない。影響が大きいと考えられる主要な要因としては、

- 1) 粘土層とサンドドレーンの剛性が異なることによる複合地盤挙動の影響
- 2) サンドドレーン打設時の攪乱の影響
- 3) サンドドレーン打設時のマンドレル貫入に伴って発

生じる過剰間隙水圧の影響

- 4) 粘性土からサンドドレーンへ排水するために最小限必要な水頭差の影響
- 5) 排水方向と変形方向の相違によるサンドドレーン付近の粘性土への応力集中

などが挙げられる。従来、改良効果の検証方法としては、改良後に行うチェックボーリングが一般的で、サンドドレーンとの位置関係を明確にした原位置調査で検証した例はほとんどない。

この報告は、シールド発進立坑の掘削工事の機会を利用してサンドドレーンで改良された旧海底地盤沖積粘土層の原位置掘削調査¹⁾を行い、サンドドレーンからの水平距離の違いによる地盤改良効果を検証した結果をまとめたものである。

2. 調査位置と調査方法

2.1 調査地点と地盤構成

調査位置はFig. 1に示すとおり大阪港埋立地（舞洲）の一画である。調査対象層は旧海底地盤であった沖積粘土層で、サンドドレーン地盤改良（砂杭の直径40 cm、

正方形配置の2mピッチの打設)が1975年に行われた後、1987年頃に埋立てがほぼ完了²⁾している。

Fig. 2には原位置調査時の土質柱状図を示す。旧海底地盤である沖積粘土層は、DL-12.8m~34.6mに分布し上層の粘土層と下層のシルト層の大きく土性が分かれる大阪港沖積粘土層の特徴を示している。サンドドレーンによる地盤改良は上層13.8m部分の粘土層に施されている。埋立て層の厚さは、原位置調査前に施工された浚渫粘土埋立て層地盤改良用の載荷盛土施工時が最大で、その時の地盤高さDL+12.2m、埋立層厚は24.9m、埋立荷重は32.1tf/m²である。図中には原位置調査深さも付記した。現位置調査深さは、DL-17.1m、DL-21.5m、DL-24.3mの3ヶ所である。

2.2 調査方法

Photo 1は、原位置調査状況である。連続地中壁で囲まれた立坑(直径11m、最終深さ約63m)の掘削が上記の各調査深度に達する毎に、掘削確認されたサンドドレーン周辺で原位置ベーンせん断試験、含水比試験用の試料採取、および不攪乱試料の採取を行った。サンドドレーンの中心間隔は、1.5m~2.3mと少しばらつきはあるが、当時の地盤改良仕様である中心間隔2.0m、正方形配置のサンドドレーンがほぼ確認できた。

原位置ベーン試験は、直径15mm、高さ30mmのベーンを使用した。ベーンは地表面から14cmの深さまで挿入し、挿入後直ちに6°/minの回転速度でベーンを回転させた。また、ベーンシャフトと地盤との摩擦を補正するため、一連の試験を終了した後、シャフトだけ地盤に挿入し、トルクを計測し、補正した。

不攪乱試料は、サンドドレーン隣接部から長さ54cm×幅20cm×高さ25cmのブロックを人力で採取して、物理試験(含水比、コンシステンシー特性、土粒子密度)、圧密試験、一軸圧縮試験、三軸圧縮試験などの室内土質試験を行った。

3. 調査結果

3.1 サンドドレーンの観察結果

Photo 2は、掘り出したサンドドレーンの断面である。ドレーン形状は短辺40cm、長辺45cmのやや楕円形を示し、短辺方向の一部には碇型の部分が観察された。碇型の部分は、サンドドレーン貫入時にマンドレル先端を閉塞するためのふたがマンドレル引抜き時に通過した跡にできたすきまにサンドドレーン材が回り込んだ結果と考えられる。サンドドレーンの掘削面を観察すると若干粘土に接する部分に黒い変色域が見られたが、サンドドレーン内部への細粒分流入や目詰まり状況はなく、排水機能を十分維持していることが確認できた。また各深度で観測されたサンドドレーンの位置は、鉛直方向に2°程度の傾斜があったものの、蛇行や断絶の状況はなく、施工後ほぼ同様の形状を維持していることが確認できた。



Fig. 1 調査位置図
Investigative Place

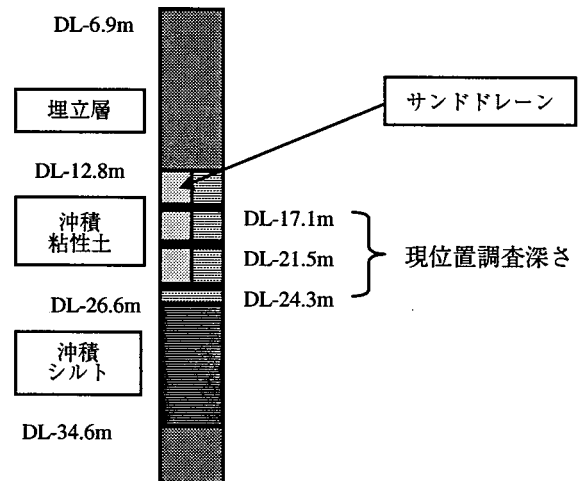


Fig.2 土質柱状図
Geological Columnar Section



Photo 1 現位置調査状況
In-site Tests View in the Vertical Shaft

Fig. 3は、高さ100mm、φ88mmのシンウォール管をサンドドレーンに押し込む方法で調査した原位置密度試験の結果である。図中には同試料を用いた最大、最小密度試験結果を付記した。サンドドレーン打設時には、サンドドレーンが締固められないことから緩い状態となっていることが予想されるが、周辺粘土層の圧密沈下後もゆるい密度であることがわかる。

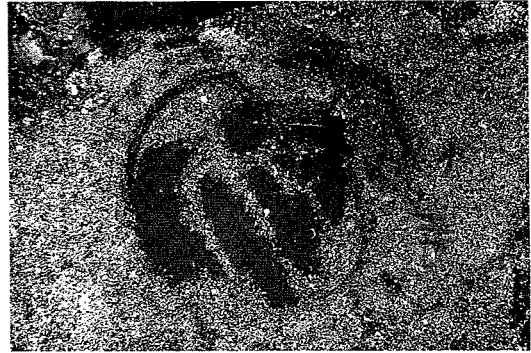


Photo 2 掘り出されたサンドドレーン
Sand-drain

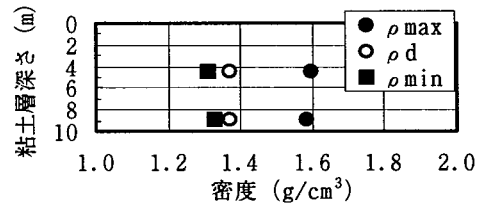


Fig. 3 サンドドレーンの密度
Density of Sand-drain

3.2 含水比の水平分布特性

Fig. 4にはDL-21.5mにおける含水比分布調査結果を示す。横軸はサンドドレーンからの距離を示す。粘土内に貝殻片が含まれていた影響を受け調査結果に少しばらつきは見られるが、どの側線においてもサンドドレーンに近い部分では58%程度、サンドドレーンから遠い部分では63%程度の含水比を示し、サンドドレーン近傍ほど含水比が小さな傾向を示す。含水比が低下する傾向はサンドドレーンから50cm程度の範囲内で顕著である。地盤改良前の含水比約90%と比較すると位置に関わらず地盤改良によって含水比は十分低下しているが、その水平分布は含水比で7%、約12%の差異となり比較的大きな分布状況を示している。他の深度の調査結果においても含水比分布の傾向は同様に認められた。

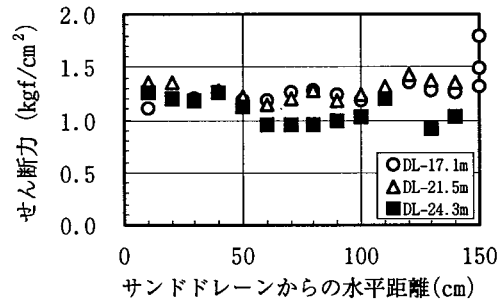


Fig. 5 原位置ベーンせん断試験結果
Vane Shear Tests

3.3 強度特性の水平分布特性

Fig. 5に各深度における原位置ベーンせん断試験結果を示す。横軸は砂杭からの距離を示し、両端の測定点はサンドドレーンの側面を意味している。いずれの深度においても砂杭に近づくにつれて強度は増加し、深度が大きくなるにつれ顕著である傾向がある。

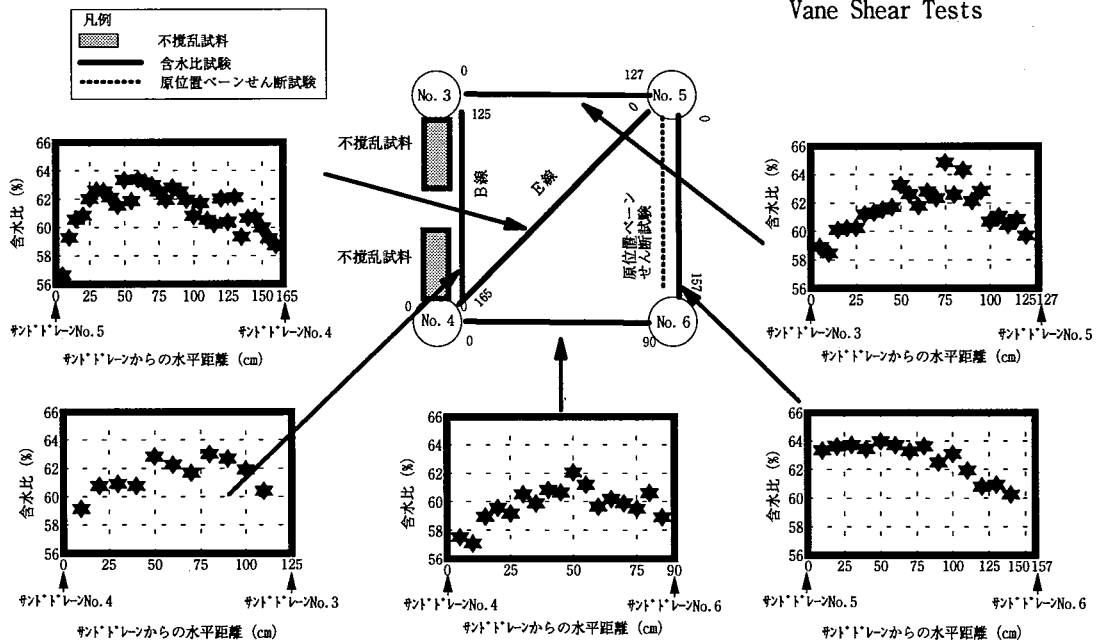


Fig.4 サンドドレーン周辺の含水比分布 (DL-21.5m)
Water Contents Distribution at DL-21.5m

Fig. 6は、不攪乱ブロック試料を用いた小型供試体(ϕ 2cm, h4cm)一軸圧縮試験結果である。対象とした試料は土被りが大きく、拘束圧をかけない一軸圧縮試験の適用は応力緩和が強度に与える影響が問題点となるが、サンドドレーンからの距離に応じた強度特性分布の評価に対しては一軸試験結果でも定性的な特性を表していると考えられる。実際、同試料を用いて拘束圧をかけた三軸圧縮U試験を行った結果ではベーンせん断試験結果と同程度の強度を示したが、一軸圧縮試験では原位置ベーンせん断試験の約半分程度の強度しか示していない。しかし、図に示すようにサンドドレーンから離れると強度は低下する傾向は明らかに認められ、サンドドレーンから50cm離れた位置ではサンドドレーン側面部分に比べ10~15%の強度低下を示している。

3.4 圧密特性の水平分布

原位置調査で得られた含水比や強度の差を圧密特性の観点から検討するため、不攪乱試料を用いて圧密試験を行った。試験方法は圧密降伏応力が明確に検討しやすい定ひずみ速度圧密試験で行った。

Fig. 7は、DL-21.5m採取試料の $e - \log P$ 曲線である。サンドドレーンからの水平距離に関わらず、ほぼ同様の曲線を示すとともに、圧密降伏応力 P_c は比較的明確に現れている。

Fig. 8は、圧密降伏応力 P_c と供試体中心におけるサンドドレーンからの水平距離の関係である。図中には載荷盛土時の最大土被り P_{max} ($=3.84\text{kgf/cm}^2$)を付記している。 P_c はサンドドレーンからの位置に関わらず P_{max} に比べ大きく、サンドドレーンから遠くなるに伴い P_{max} に漸近するように減少している。サンドドレーン隣接部分の P_c を図より外挿すると $P_c=5.75\text{kgf/cm}^2$ 程度、過圧密比 $OCR=1.5$ 程度の過圧密状態を示している。埋立前の地盤状態が正規圧密状態($P_{c0}=0.63\text{kgf/cm}^2$)であったと仮定すると、 P_c の増加量は土被り圧の増分の対して1.8倍程度生じ、より大きな圧密降伏応力増加効果が得られていることになる。この差異は先に示した含水比や強度の差に比べて大きな差となっている。

Fig. 9には、圧縮指数 C_c の分布を示した。試料の位置に関わらず圧縮指数に大きな差異は見られない。一般的に乱れを受けた粘土試料は乱れの影響のない試料に比べ、圧縮指数が小さく圧密降伏応力が不明確になる傾向を示すが、図に示した圧密試験結果ではそのようなはっきりした傾向は認められず、サンドドレーンからの距離の差による乱れの影響はほぼないと考えられる。

Fig. 10には透水係数の水平分布を示した。透水係数は圧密荷重の増加に伴って減少するため、圧密荷重が P_c の時の鉛直方向透水係数 k の値で整理した。 k は、サンドドレーンに近いほど小さい傾向を示す。この差は前述の含水比(間隙比)の違いから考えられる透水係数の差異にほぼ対応し、鉛直方向の透水係数にスミアの影響がほとんど残っていないと考えられる。

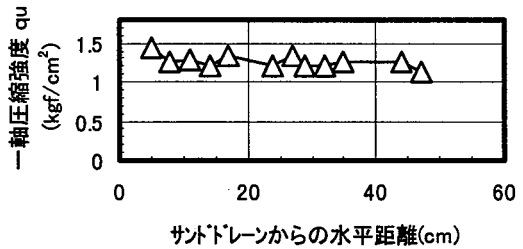


Fig. 6 一軸圧縮強度
Unconfined Compressive Strength

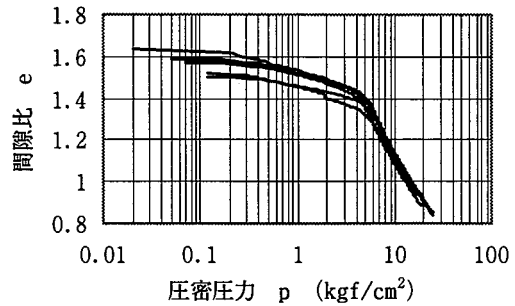


Fig. 7 $e - \log p$ 曲線
 $e - \log p$ Curve

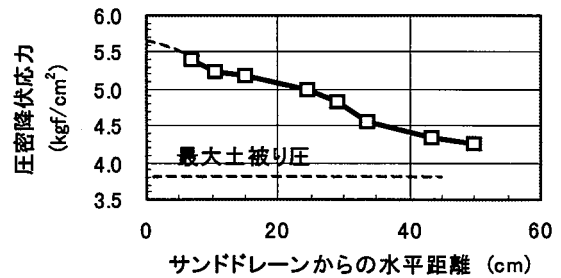


Fig. 8 圧密降伏応力 P_c の水平分布
 P_c Distribution

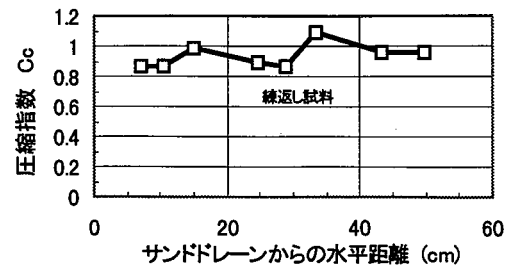


Fig. 9 圧縮指数 C_c の水平分布
 C_c Distribution

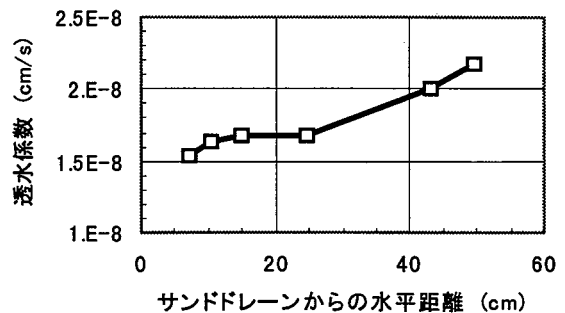


Fig. 10 透水係数 k の水平分布
 k Distribution

4. サンドドレーン模型実験

4.1 模型実験試料と模型実験方法

原位置で得られたサンドドレーン周辺の含水比分布や強度分布特性について乱れの影響をできるだけ排した条件下で検討するため、以下に示す室内模型実験を行った。実験に用いた試料は、沖積粘土の0.2mmふるい通過分である。Table 1に粘土試料の主な土質特性を示す。

Fig. 1 1に実験装置を示す。模型地盤は、初期含水比152%に含水比調整した試料を、φ250mm、高さ300mmの圧密容器で上下面排水境界のもと0.5kgf/cm²の予備圧密を行って作製した。予備圧密終了後、一度上部載荷板を取り外し、外径44mm、肉厚1mmのシンウォールを用いて、周辺粘土に乱れの影響ができるだけ無いよう模型地盤中央部の粘土を抜くとともに海砂を落とし込んでサンドドレーンとした。模型地盤の初期高さは約150mmである。ドレーン圧密実験中は粘土層上下面にゴム膜を設け、ドレーンのみの排水境界とした。ドレーンの設置後の圧密荷重は、Table 2に示す3種類行い、圧密終了後に含水比試験、一軸圧縮試験を行った。

Fig. 1 2は0.5kgf/cm²予備圧密試料の定ひずみ速度圧密試験結果である。模型実験では、モールド内に試料を入れた状態のままドレーン圧密に移行したため、圧密試験試料に比応力解放の影響が少ないと考えられることから、図中には初期含水比、圧密荷重を通り、同じ圧縮指数Ccを有する圧縮曲線を修正線として付記した。

4.2 模型実験結果

Fig. 1 3は、含水比の水平分布である。どのケースともドレーンに近いほど含水比の低い傾向を示す。含水比の変化量は、5~8%程度で、圧密荷重が小さいほどその差異は若干大きくなる傾向が認められる。図中には、Fig. 1 2で示した修正圧縮曲線を用い算出した圧密終了後の含水比を付記した。計算結果はどの実験結果とも土槽外周付近の含水比とよく一致する傾向を示し、粘土層全範囲で上載荷重による一次元圧密状態よりも小さな含水比分布となっていることがわかる。

Fig. 1 4, サンドドレーンからの距離をドレーン半径で除して無次元化した値と、最大含水比との差(Δw)を最大含水比(w_{max})で除して正規化した値の関係を示す。図中には既往^{1) 2)}の原位置調査結果も付記した。実験結果、原位置調査結果ともその傾向はよく一致し、サンドドレーンの近傍約0.5r_w(ここにr_wはサンドドレーンの半径)の範囲で含水比の低下量が大きいことがわかる。

Fig. 1 5は、一軸圧縮試験結果(φ35mm, h70mm供試体)である。ドレーンに近いほど大きな強度を示す傾向を示し、含水比分布の傾向と対応する。強度の増加傾向は、圧密荷重が大きいほど大きくなる傾向を示すが、強度差異の割合で示すとCase 2を除き13%程度となりほぼ同程度の差となっている。

Table 1 粘土試料の主な性質

Characteristics of Clay		
液性限界	塑性限界	土粒子密度
70.0%	25.0%	2.673g/cm ³

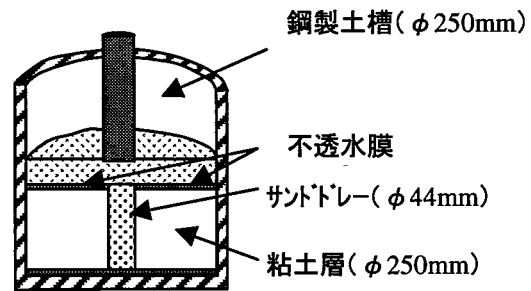


Fig. 1 1 サンドドレーン圧密実験装置
Facility of Sand-drain Model Tests

Table 2 実験条件

Test Condition		
実験名	予備圧密荷重	ドレーン圧密荷重
Case 1	0.5kg/cm ²	1.0kg/cm ²
Case 2	0.5kg/cm ²	1.5kg/cm ²
Case 3	0.5kg/cm ²	3.0kg/cm ²

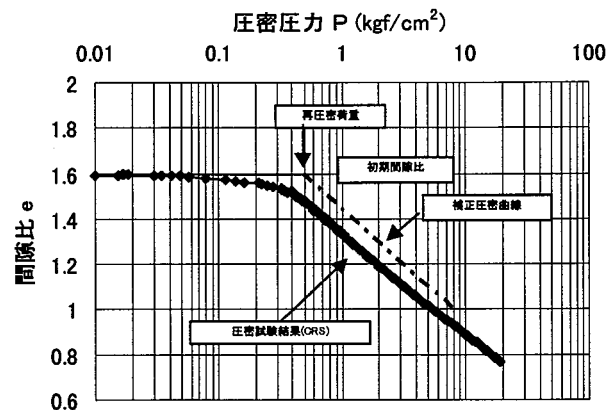


Fig. 1 2 模型粘土地盤のe-log p 関係
e-log p line of Model Clay

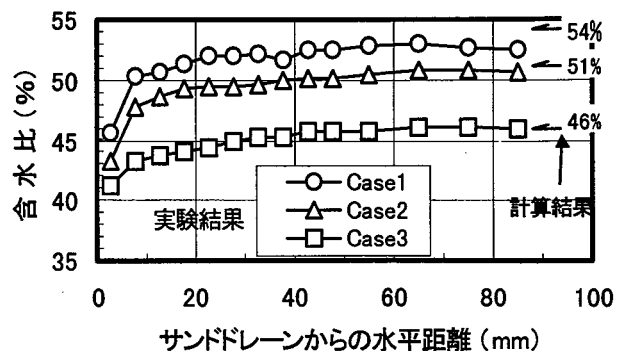


Fig. 1 3 模型地盤内の含水比分布
Water Contents Distribution of Model Test

4.3 模型実験結果のシミュレーション

修正カムクレイモデルを用いて粘性土をモデル化して含水比分布のシミュレーション解析を行った。

Fig. 16に解析モデルを示す。載荷板と粘土層、サンドドレーン層の境界には接触要素を設け、ずれが生じる設定としている。

Fig. 17はCase2の解析結果である。解析結果は、ドレーン近傍部での大きな含水比低下は表せていないが、ドレーンに近いほど含水比が小さくなる実験結果を概ね表している。

5. まとめ

サンドドレーン周辺の現位置調査と室内土質試験、室内模型実験とその解析を行った結果以下ことがわかった。

- 1) サンドドレーンとの位置関係に関わらず、土被り圧相当以上の含水比低下、地盤強度増加など地盤改良効果が得られている。
- 2) 同じ深さにおける含水比は、サンドドレーンとの位置関係によって分布し、サンドドレーンに近いほど含水比が低い傾向を示す。
- 3) 含水比の水平分布傾向と同様にせん断強度、圧密降伏応力もサンドドレーンに近いほど大きく、過圧密状態を示す。
- 4) 鉛直方向透水係数kはサンドドレーンに近いほど減少する傾向が認められたが、その変化量はほぼ間隙比の差異に対応し、スミアーの影響は認められなかった。
- 5) 乱れがない状態の模型実験、数値解析結果からも、上記現位置調査結果の傾向が認められ、中心に排水し、鉛直に圧密変形するドレーン圧密の特性であることが確認できた。

謝辞

この論文で記述した原位置調査は、大阪市港湾局木山正明部長、運輸省港湾技術研究所田中洋行室長、田中政典主任、清水建設(株)技術研究所尾上篤生主席、そして昨年お亡くなりになった元横浜国立大学 プラダグ テージB.S.助教授、と共同で進めた成果の一部をまとめたものである。

原位置調査に際しては、大阪ガス(株)殿、ならびに工事関係者各位には多大なるご協力を戴きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 田中, 田中, 木山, 武田, 西林, 高橋, 尾上: サンドドレーンで改良された地盤の調査結果, 土木学会第51回年次学術講演会, (1996)
- 2) 地盤工学会: 海底地盤, (1995)

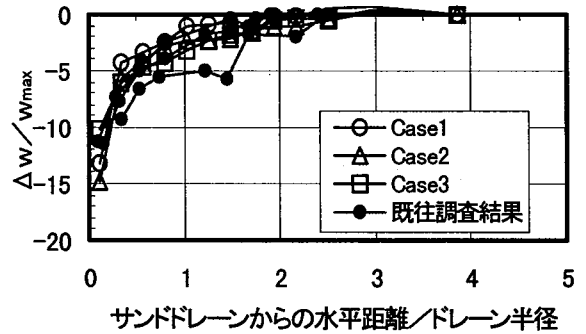


Fig. 14 無次元化した含水比分布
Normalized Water Contents Distribution

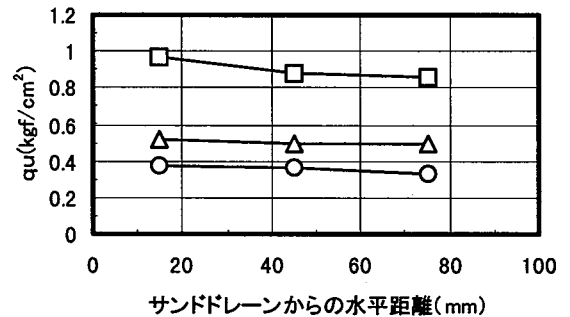


Fig. 15 模型実験におけるquの分布
qu Distribution of Model Test

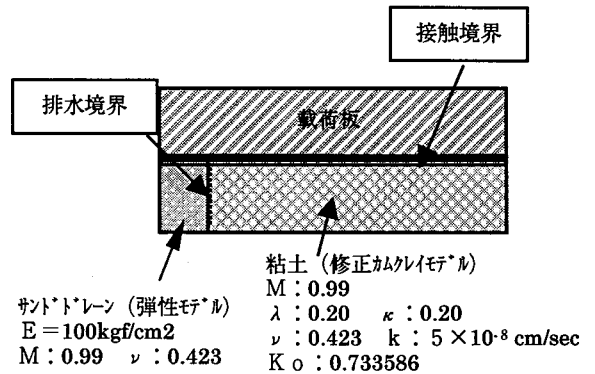


Fig. 16 解析条件
Analysis Conditions

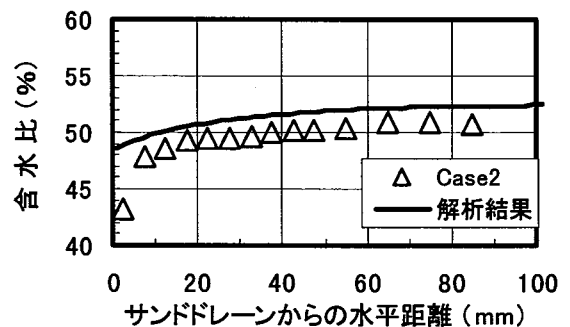


Fig. 17 解析結果
Results of Calculation