

鋼管を利用した真空圧密工法に関する研究

松村 季俊*・深田 久**・塩井 幸武***

Study on Vacuum Consolidation Method with Strainer of Steel Pipe Pile

Hidetoshi MATSUMURA*, Hisashi FUKADA** and Yukitake SHIOI***

Abstract

A new soil improvement method using steel pipe strainer and vacuum pump (called as vacuum consolidation method) is devised to consolidate rapidly and economically deep soft ground distributed widely in Japan. This method makes not only dewatering ground water level but also pressing soft ground due to atmosphere pressure by suction through strainer. A series of suction tests in small tanks and a large box made clear the influence factors, process of consolidation and effects of the method. Furthermore, it became that the effect of intermediate sandy layer is excellent.

Key words: Soft ground, Soil improvement, Consolidation, Vacuum consolidation method, Suction pressure, Strainer

1. はじめに

最近の日本では社会基盤施設の整備を進めていく上で、設置箇所として有効に使える地盤が少なくなり、これまでなかなか使われることのなかった軟弱地盤地帯を利用せざるおえなくなっている。また、市街化が広範囲に渡ってきたことから従来の盛土による圧密工法の適用が難しく、真空圧による圧密促進法が盛んに行われている。

既存の真空圧密工法は、気密シート、サンドマット、集水管および水平ドレーン等の設備が必要で、多くの鉛直ドレーンを必要とします。この工法は、シートにより気密性を確保し、载荷効率を向上させることが重要になります。よって気密シートや排水材を綿密に設置する必要があります。高価となります。

既存の真空圧密工法をより簡易的に深層まで改良する工法として、ストレーナー付きの鋼管杭などを打設し、内部を真空吸引することで周辺地盤の沈下促進・強度増加を図る工法を考案した。この鋼管杭を用いた真空吸引工法は、サンドマットなどを組み合わせることで地下水位低下工法と大気圧载荷工法（サンドマット＋気密シートによる広範囲の载荷工法）の機能を併せ持つ。この工法の地盤中の挙動を把握するために2種類の土槽を用いて模型実験を行った。

2. 実験概要

(1) 実験装置とモデル地盤

a) 円形土槽

模型土槽は直径1 m、深さ1.2 mの円形土槽を使用し、粘性土には八戸ロームを使用した。実験では支持層(砂層)を作成後、模擬鋼管杭中心部に設置し含水比75%程度に調整した八戸ロームを支持層から80 cm投入した。

b) 大型土槽

模型土槽は縦横1.2 m×2.4 m、深さ1.2 mの大型土槽を使用し、粘性土には八戸ロームを使用した。実験では支持層(砂層)を作成後、模擬鋼管杭4本を設置し、含水比75%程度に調整した八戸ロームを支持層から80 cm投入した。

実験に用いた装置は模擬鋼管杭・水圧計・真空ポンプ・アクリル水槽・二重管コーンペネトロメーター等で、用いたロームは八戸工業大学西方の道路工事現場から採取したものである。八戸ロームの採取状況を写真-1に、ロームの特性を表-1に示す。

(2) 実験ケース

a) 円形土槽

ケース0からケース9の全10ケースを実施した。模擬鋼管杭は $\phi 20$ mmと $\phi 60$ mmをそれぞれ土槽中心部に設置し、杭径、载荷方法等の影響を把握した。

b) 大型土槽

土槽半分に模擬鋼管杭 $\phi 60$ mmを4本設置し、改良部と無改良部の挙動を把握した。

模擬鋼管杭として塩化ビニールパイプ使用し、直径4 mmの集水孔を5 cm間隔に開け、その周りを目詰まり防止のために不織布を巻いたものを使用した。真空载荷

平成18年1月6日受理

* 博士課程前期在学中

** 不動建設(株)、博士課程後期在学中

*** 異分野融合科学研究所・教授



写真-1 ローム採取

表-1 八戸ロームの特性

項目	試料1	試料2
土粒子密度 ρ_s	2.687	2.657
液性限界 $wL(\%)$	62.5	63.7
塑性限界 $wP(\%)$	38.7	42.7
塑性指数 I_p	23.8	21.0
礫分含有率 (%)	0	1
砂分含有率 (%)	16	18
シルト分含有率 (%)	28	32
粘土分含有率 (%)	56	49
最大粒径 (mm)	4.75	4.75

表-2 円形土槽の実験内容

ケース	実験内容	荷重速度
0	盛土荷重 (10 kPa) 一次元圧密状態	
1	真空圧密, 杭径 $\phi 20$ mm	緩速荷重
2	真空圧密, 杭径 $\phi 20$ mm	急速荷重
3	真空圧密, 杭径 $\phi 60$ mm	急速荷重
4	真空圧密, 杭径 $\phi 20$ mm, 上部サンドマット+気密シート	急速荷重
5	真空圧密, 杭径 $\phi 20$ mm, 上下部サンドマット+気密シート	急速荷重
6	真空圧密, 杭径 $\phi 60$ mm	急速荷重
7	真空圧密, 杭径 $\phi 20$ mm, 中間砂層	急速荷重
8	盛土荷重 (10 kPa)+真空圧密 (杭径 $\phi 60$ mm)	急速荷重
9	真空圧密, 杭径 $\phi 60$ mm (塩ビ $\phi 20$ mm+外周砂)	急速荷重

各ケースの土槽モデル図

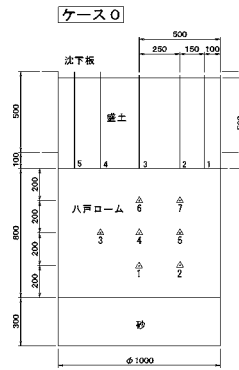


図-1-1 ケース0

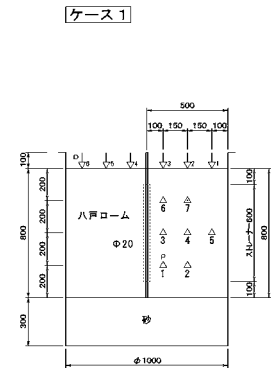


図-1-2 ケース1

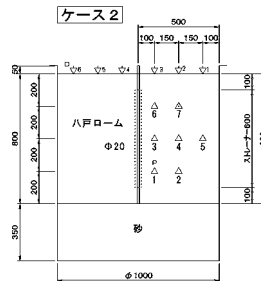


図-1-3 ケース2

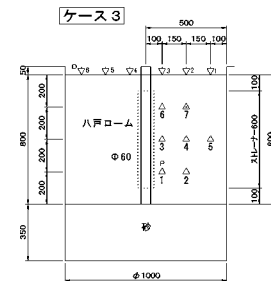


図-1-4 ケース3

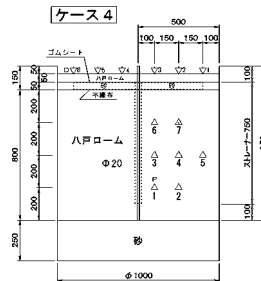


図-1-5 ケース4

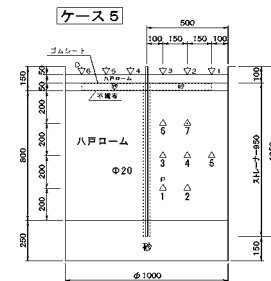


図-1-6 ケース5

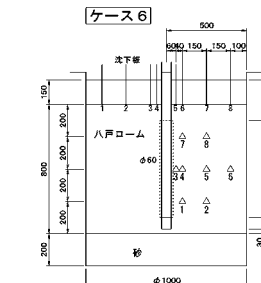


図-1-7 ケース6

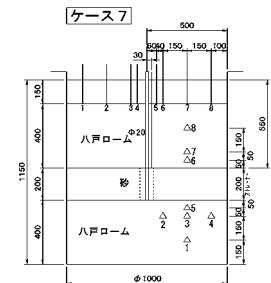


図-1-8 ケース7

の速度は緩速荷重と急速荷重の2種類とし、模擬鋼管杭の上部からビニールホースを、アクリル水槽に接続して上部から真空ポンプで真空吸引して揚排水した。実験における計測項目は、沈下量、排水量、地中の間隙水圧、実験前後の含水比およびコーン貫入抵抗である。コーン貫

入抵抗の測定には二重管コーンペネトロメーターを使用した。円形土槽の実験内容を表-2に、土槽詳細図を図-1-1~1-11に示す。

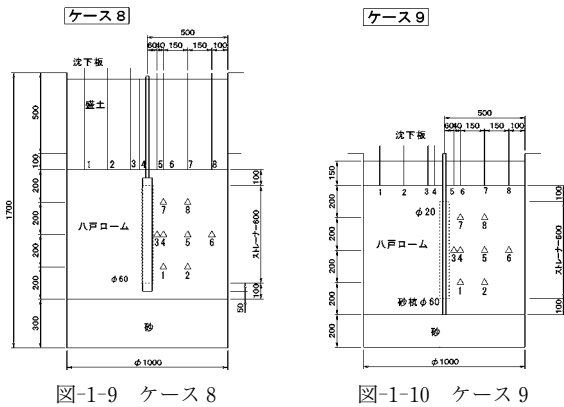


図-1-9 ケース 8

図-1-10 ケース 9

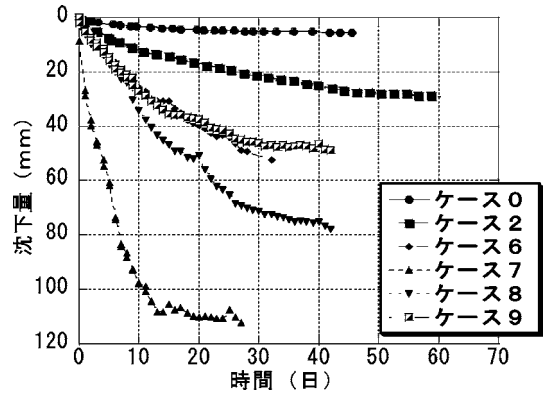
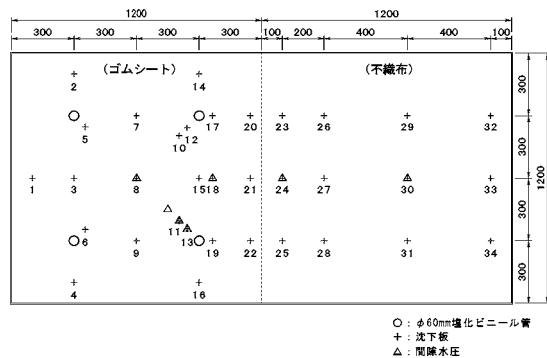


図-2 沈下経時曲線



○: φ60mm塩化ビニル管
+ : 沈下板
△: 間隙水圧

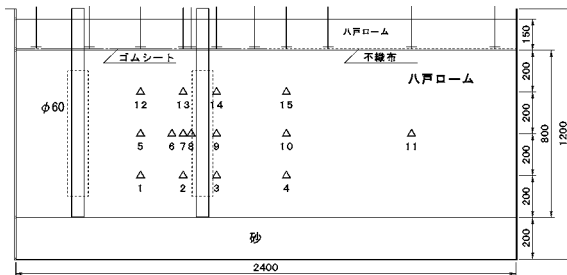


図-1-11 大型土槽モデル図

シートを撤去し、コーン貫入試験を実施する。その後、ロームを層厚 10 cm ごとに所定の位置にて含水比を測定する。

3. 実験結果

(1) 円形土槽

ここでは、各条件によるケース間の含水比、間隙水圧、コーン貫入抵抗の分布を比較する。ケース 0 と 8 の比較、ケース 2 と 6 と 9 の比較、ケース 7 は深さ方向の比較の結果を以下に示す。ケース 0, 2, 6, 8, 9 は深度 40 cm での値である。

a) 沈下量

各ケースの沈下量経時曲線を図-2 に示す。ケース 0 と 8 は盛土載荷に真空吸引を加え差を比較したものである。ケース 0 は一般的な盛土載荷時に見られる双曲線を示し、ケース 8 は盛土載荷と真空吸引を併用したことにより直線的な傾向を示した沈下量は 40 日間で約 5 mm と約 80 mm の差となった。

ケース 2 と 6 は模擬鋼管杭径の違いの差を比較したものである。ケース 2 は鋼管杭径が φ20 mm であるために、緩やかな曲線を示し、ケース 6 は鋼管杭径が φ60 mm と大きいので急な曲線を示し、沈下量も 30 日間で約 20 mm と約 50 mm という結果となった。ケース 6 と 9 はケース 6 の模擬鋼管杭径 φ60 mm に対し、φ60 mm の砂杭の中に φ20 mm の模擬鋼管杭を設置して差を比較したものである。ケース 6 と同程度の砂杭を用いた結果、ケース 9 はケース 6 と同程度の経時変化を示した。

中間砂層を設置し、そこから真空吸引をしたケース 7 では急な直線となり、約 15 日ほどで約 110 mm 沈下して落ち着く結果となった。

b) 含水比の平面分布

各ケースの含水比の平面分布を図-3-1~3-2 に示す。ケース 0 と 8 では、盛土載荷を行ったケース 0 は土槽内の含水比が平均で 69.6% となった。盛土載荷に真空吸引を併用したケース 8 では、平均で 54.1% となった。真空

(3) 実験方法

模型地盤の作成手順を以下に示す。

- ① 支持層として 20 cm の砂層を設置し不織布を敷き、所定の位置に模擬鋼管杭を設置する。
- ② ロームの含水比を 75% 程度に調整し、土槽内に投入する。
- ③ 20 cm ごとに間隙水圧計を設置し、② の手順を繰り返す。
- ④ ローム投入完了後にコーン貫入試験を実施する。
- ⑤ 遮水シートを敷設し、所定の位置に沈下板設置する。その後にロームを遮水シートの上部に 15 cm 投入する。
- ⑥ 真空ポンプの配管、所定速度での真空載荷の開始する。
- ⑦ 実験終了後に上部のロームと沈下板および遮水

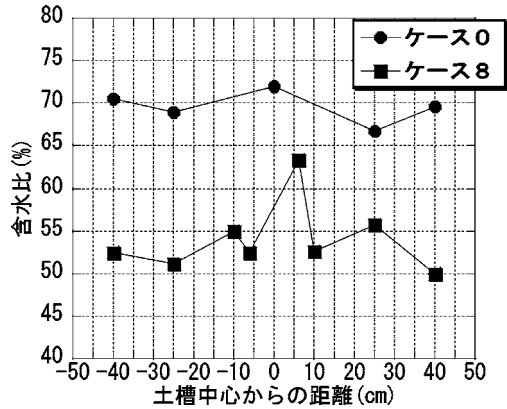


図-3-1 含水比平面分布

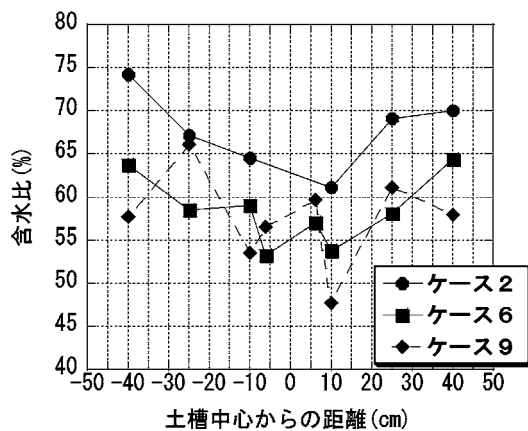


図-3-2 含水比平面分布

ケース 7

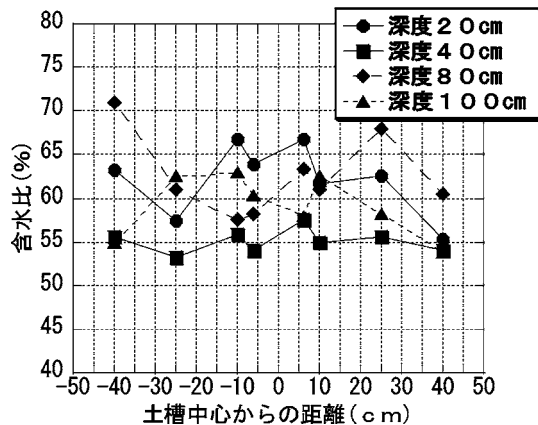


図-3-3 含水比平面分布

吸引を用いたことにより含水比が約 15% 減少した。

ケース 2 と 6 では、ケース 2 では平均で 67.7% となり、ケース 6 では平均で 58.5% となり、模擬鋼管杭径の違いから約 10% の差が見られた。また、両ケースとも模擬鋼管杭の周辺で含水比の減少が最も大きかった。ケー

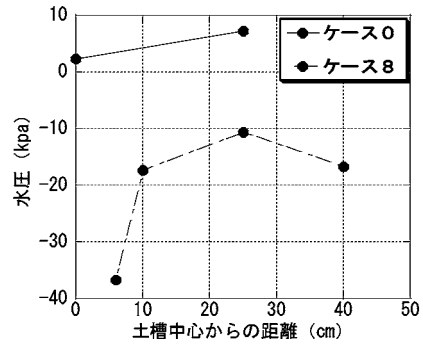


図-4-1 間隙水圧平面分布

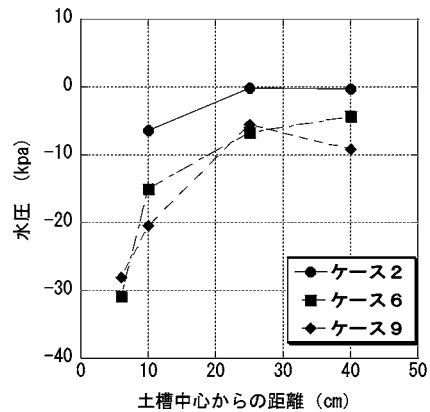


図-4-2 間隙水圧平面分布

ス 6 と 9 では、砂杭を用いたケース 9 では平均で 57.6% とほぼケース 6 と同程度の含水比の減少となりました。ケース 2, 6, 9 は、土槽中心部に模擬鋼管杭を設置したので中心部で含水比が小さく、中心から離れるにつれて含水比が大きくなる傾向を示した。

ケース 7 については、中間砂層からの真空吸引により、全体では平均で 61.3% となり中間砂層付近では平均で 55.1% となる結果を示した。

c) 間隙水圧

各ケースの間隙水圧低下量の平面分布を図-4-1, 4-2 に、ケース 7 の深度分布を図-5 に示す。ケース 0 と 8 では、盛土載荷のケース 0 での低下量に対し、真空吸引を併用したケース 8 では大きな低下量を示した。

ケース 2 と 6 では、 $\phi 20$ mm と $\phi 60$ mm の模擬鋼管杭径の違いにより低下量に 1.5 倍の差は見られたが、相似した形状を示した。ケース 9 の $\phi 60$ mm の砂杭で真空吸引したものとケース 6 の $\phi 60$ mm の模擬鋼管杭を用いたものとは同様の低下量を示した。また、ケース 2, 6, 8, 9 では模擬鋼管杭直近で最も大きな低下量を示した。

ケース 7 では、中間に層厚 20 cm の砂層を設置し真空吸引したことにより、中間砂層に近いほど低下量が大きくなった。また、下部層の方が上部層より大きな低下量を示した。これは、真空圧効果の他に、上部層が有効載

ケース 7

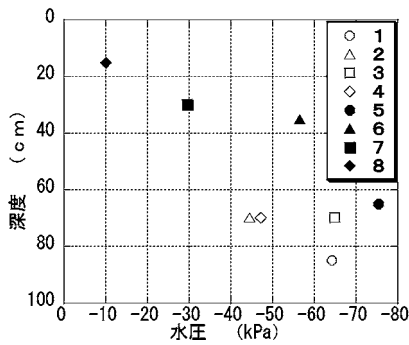


図-5 間隙水圧深度分布

ケース 7

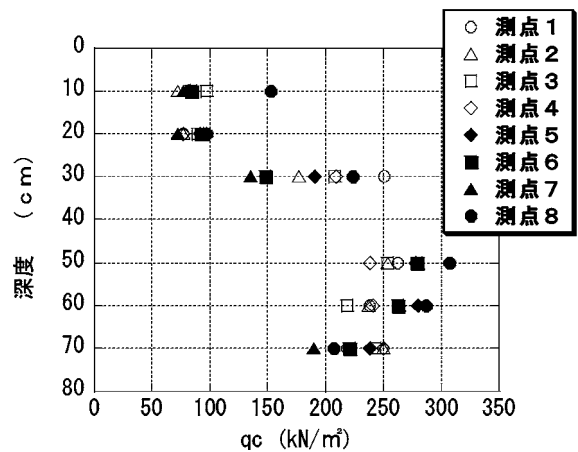


図-7 コーン貫入抵抗深度分布

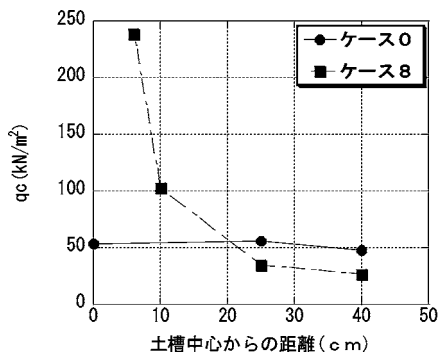


図-6-1 コーン貫入抵抗平面分布

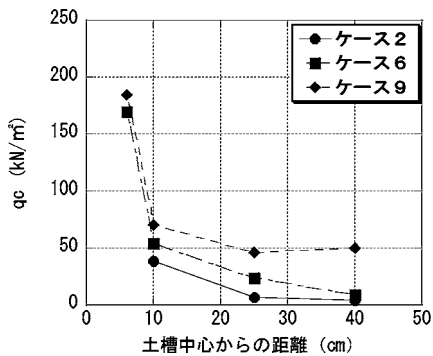


図-6-2 コーン貫入抵抗平面分布

荷荷重として作用したためと考えられる。

d) コーン貫入抵抗

各ケースの平面分布を図-6-1, 6-2 に、ケース 7 の深度分布を図-7 に示す。ケース 0 は盛土載荷を行ったので、ほぼ均等な地盤強度を示し、ケース 8 は真空吸引を併用することにより強度が上がる結果となった。

ケース 2 と 6 では、模擬鋼管杭径 $\phi 20$ mm と $\phi 60$ mm の違いから、強度に差が見られた。ケース 6 と 9 では、同等径の砂杭を用いても同様の強度を示した。全体的に模擬鋼管杭を設置することで、杭付近では強度が高く、離れるにつれ小さくなる結果となった。

ケース 7 では、中間に砂層があることで、砂層を境に離れるにつれ、コーン貫入抵抗が小さくなった。ただし、下部層においては上部層に比べコーン貫入抵抗の低下は小さかった。

e) 考察

これら円形土槽の実験において、沈下量は模擬鋼管杭近傍で小さく、離れるにつれ大きくなる。それに伴い、間隙水圧低下量およびコーン貫入抵抗は、沈下量とは反対に模擬鋼管杭近傍で大きく、離れるにつれ小さくなっている。

中間に砂層があると、そこから真空吸引した場合の沈下量は上部層より下部層の方が大きくなった。また、間隙水圧低下量およびコーン貫入抵抗は、砂層付近で大きく、離れるにつれ小さくなっている。しかし、下部層は上部層に比べ大きくなっている。これは、土槽という外部から遮断された状態で真空吸引したため、下部層が密に圧密されたと考えられる。含水比においては、真空吸引を行うことで全ケースで約 20% の減少が見られた。

(2) 大型土槽

大型土槽では模擬鋼管杭を 4 本と沈下板を 34 個、水圧計を 11 個設置した(図-1-11 参照)。また、それぞれの計測項目を測線ごとに計測した。測線は沈下板ごとに横 3 列にし、測線 1 は沈下板 7, 17, 20, 23, 26, 29, 32 で構成した。測線 2 は沈下板 1, 3, 8, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 33 で構成した。測線 3 は沈下板 9, 19, 22, 25, 28, 31, 34 で構成した。

a) 沈下量

測線 1, 2, 3 の沈下量経時曲線を図-8-1~8-3 に、各測線の最終沈下量平面分布を図-9 に示す。測線 1 の沈下量は 40~60 mm であり、沈下板 20, 23 の沈下量が大きい。測線 2 の沈下量は 50~80 mm となり、4 本の模擬鋼管杭の中央を通るために測線 1 と比べて大きい。測線 3 の沈下量は 40~80 mm となり、測線 1 に比べるとばらつき

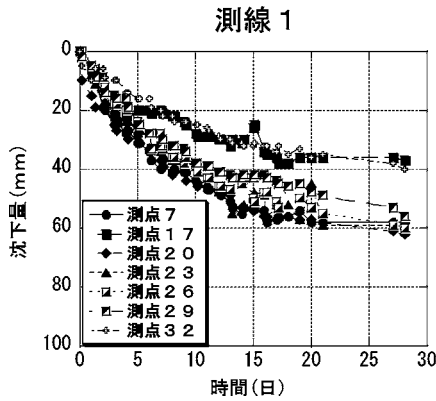


図-8-1 沈下量経時曲線

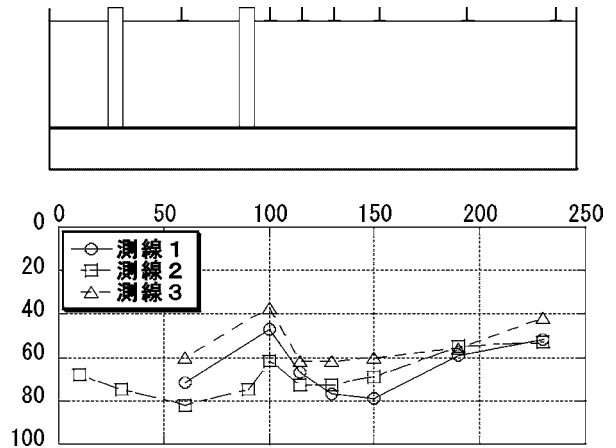


図-9 最終沈下量平面分布

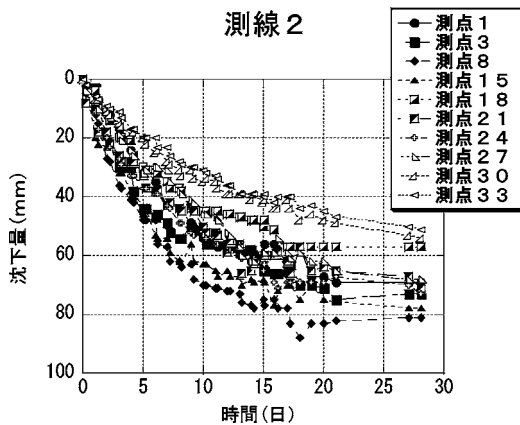


図-8-2 沈下量経時曲線

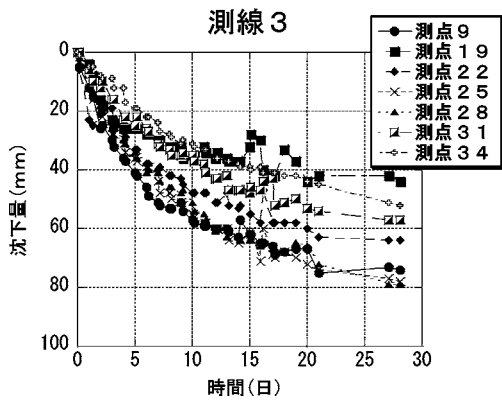


図-8-3 沈下量経時曲線

がある。沈下は約15日程まで急激に進行したが、それ以降は緩やかに進行している。

次に各測線の最終沈下量の縦断方向の平面分布(図-9)を見てみると、測線2の改良部側で沈下量大きいことが分かる。また、未改良部の沈下量は土槽左端から190 cm(模擬鋼管杭から100 cm)を超えると沈下量は60 mm以下となっている。

b) 地表面の水平変位

各測線の水平変位の経時曲線を図-10-1~10-3に示

す。測線1,3の水平変位は0~30 mm, 測線2は0~40 mmと測線1,3より比較的大きい。水平変位は土槽の左側に変位する方向をマイナスとしているので、いずれも模擬鋼管杭に向かって変位している。これは真空圧密特有の現象であり、今回の実験でも確認された。

c) 含水比

各測線の深度40 cmにおける含水比の平面分布を図-11示す。土槽左端から150 cmまでは含水比の減少が見られたが、150 cmを超えると含水比がほぼ一定となる。

d) 間隙水圧

地盤中の間隙水圧経時曲線を図-12-1, 12-2に示す。改良部の間隙水圧計の内、模擬鋼管杭に近接する水圧計8で-35 kPa, 水圧計7で-15 kPaが最大値である。また、4本の模擬鋼管杭の中央部に位置する水圧計5の最大値は-10 kPa以下で、未改良部も含め全体的に水圧低下量は小さかった。

e) コーン貫入抵抗

各測線の深度40 cmにおけるコーン貫入抵抗平面分布を図-13に示す。土槽左端から150 cmまではコーン貫入抵抗の変化が見られたが、150 cmを超えるとほぼ一定となる。

f) 考察

今回の大型土槽の実験において、沈下量, コーン貫入抵抗, 含水比, 間隙水圧は円形土槽での実験結果と同様の傾向を示した。地表面の水平変位は、模擬鋼管杭に向かって変位している。土槽左端から150 cmまでは、含水比とコーン貫入抵抗ともに変化が見られたが、150 cmを超えるとほぼ一定となっている。当実験条件において、φ60 mmの模擬鋼管杭の有効範囲は60 cm程度といえる。

4. まとめ

円形土槽を用いた模型実験では、模擬鋼管杭を設置し

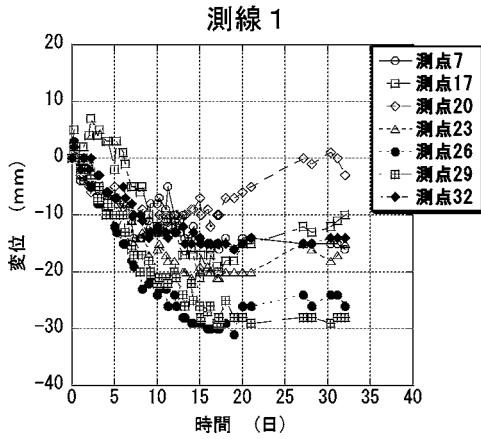


図-10-1 水平変位経時曲線

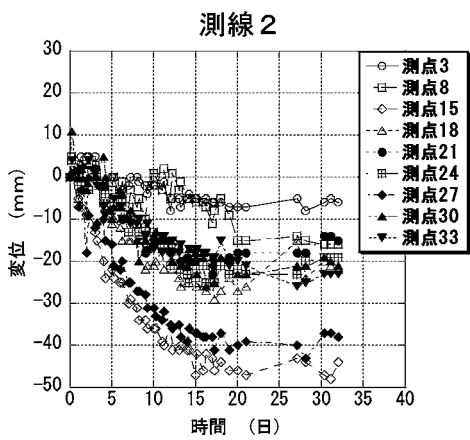


図-10-2 水平変位経時曲線

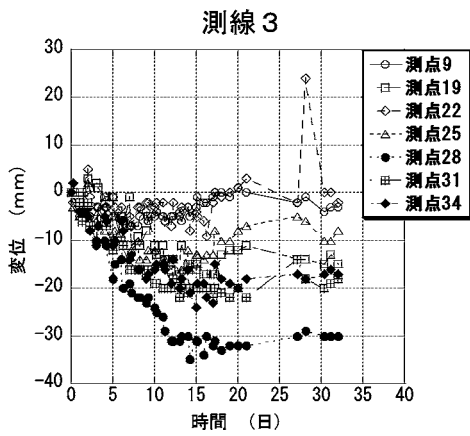


図-10-3 水平変位経時曲線

た粘性土地盤の沈下，間隙水圧コーン貫入抵抗値等を計測した。実験では鋼管径や砂層の有無などの要因を変化させた。

- ・沈下量は模擬鋼管杭近傍で小さく，模擬鋼管杭から離れるにつれ大きくなることが確認された。
- ・模擬鋼管杭近傍では水圧低下量は比較的大きく，含水比の低下および地盤の強度増加が確認された。
- ・当工法において中間砂層がある場合は，水圧低下が大

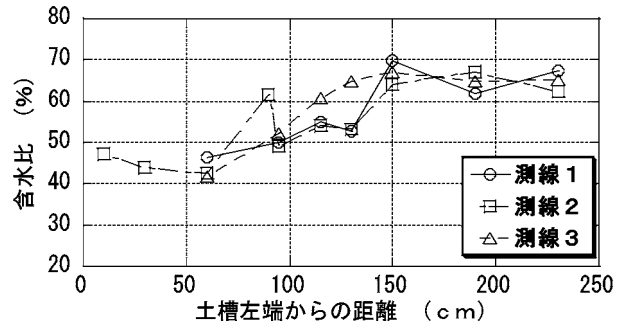


図-11 含水比平面分布

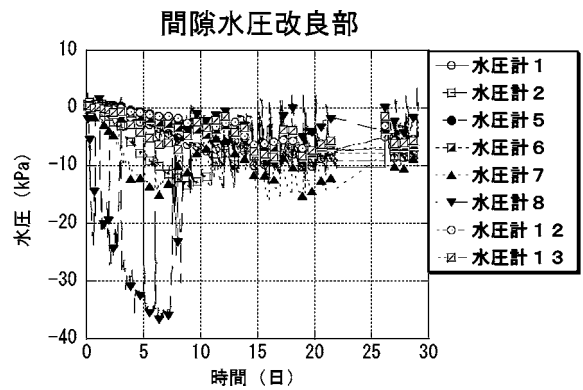


図-12-1 間隙水圧経時曲線

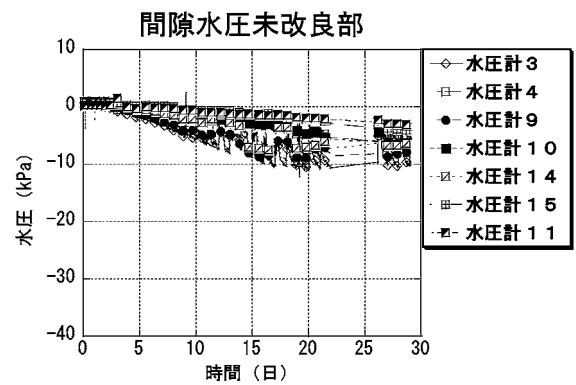


図-12-2 間隙水圧経時曲線

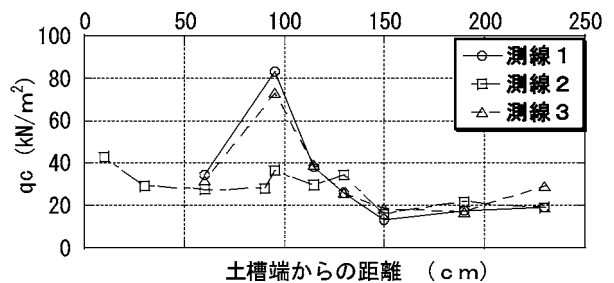


図-13 コーン貫入抵抗平面分布

きく真空圧密の効果が最も高まること確認された。次に大型土槽を用いた模型実験において，地盤中に模擬鋼管杭4本を設置して真空圧密を実施し，改良部と未

改良部の挙動について把握した。計測項目は円形土槽の時と同様である。

- ・模擬鋼管杭近傍での沈下量, 含水比, 水圧低下量, コーン貫入抵抗値は円形土槽における実験と同様の傾向を示した。
- ・沈下量は模擬鋼管杭4本の中央部に位置する測線で大きく, 模擬鋼管杭の相乗効果が見られた。
- ・未改良部の水平変位は模擬鋼管杭の方向に引き込まれるように発生し, 真空圧密工法特有の現象を確認した。
- ・改良部と未改良部における含水比, コーン貫入抵抗値に明確な差が見られた。
- ・当実験条件における真空圧密の有効範囲は, 模擬鋼管杭から60 cm程度であった。

以上のことから, 当工法は急速な圧密沈下と強度増加を図れるものの改良効果が鋼管杭を中心に不均一となる

ことが判明した。今後は, 今回の問題点を生かし, さらに研究していく必要がある。

参考文献

- 1) 今井五郎:「真空圧密工法」のさらなる発展に向けて—真空圧を利用した地盤改良の原理とその適用—(土木学会論文集 No. 798/VI-68, 1-16, 2005.9)
- 2) 深田 久: 軟弱地盤および構造物の補強に関する研究(その1)
- 3) 深田 久, 塩井幸武: 鋼管フィルターを用いた真空圧による急速圧密工法の実験的研究(第39回地盤工学研究発表会)
- 4) 松村季俊, 深田 久, 塩井幸武: 鋼管フィルターを用いた真空圧による急速圧密工法の実験的研究(その2)(第40回地盤工学研究発表会)