

ペーパードレーン（ボードレーンソニカ）による 埋立て地の自重圧密促進の効果

よね 米	くら 倉	りよう 亮	ぞう 三*
はつ 初	み 見	たかし 孝*	
おお 大	とも 友	たか 孝	ゆき 之*

1. ま え が き

昭和 40 年 8 月からモービル石油株式会社の好意により尼崎市地先埋立て地の大阪油槽所建設工事敷地内において、ブルドーザー工事（株）で開発した New Jec 式超軟弱地盤用ペーパードレーン打設機（PDW-100 型）の現場打設試験をかね、ペーパードレーン（ペーパーはボードレーンソニカを使用）の改良効果について調査実験を行なった。ここではとくに自重圧密を促進する意味でペーパードレーンを施工した例として報告するものである。

ドレーン用のペーパーは土中にあって十分長時間排水を維持し、また腐敗せずその強さが十分高いものでなければならぬので、スウェーデンでは 20～30 年にわたって各種の薬品添加に関する研究を行なってきた。わが国ではこの高いスウェーデンの技術を導入し、この技術

の上にセニをフィビリル化することによって地中における経時変化をなくすとともに、排水の効果を増大させるような新技術を試みたものがボードレーンソニカである。

2. 試験地の状況

本試験地は地表から約 8.5 m の間はシュンセツ粘土により埋立てられたきわめて軟弱なる粘土層からなり、その下部は旧海底を構成するシルト混じり細砂が約 2.0 m の厚さに存在し、さらにその下部には 17 m の厚さにわたってチュウ積粘土の存在が認められ、それ以深は支持層と考えられ得る緊硬なる砂レキ層となっている。また試験の対象とした埋立て層は昭和 35 年に O.P+1.0 m まで吹揚げ（旧海底 EL≒O.P-4.0 m）さらに昭和 39 年に O.P+5.0 m まで吹揚げを行ない、試験実施の昭和 40 年 8 月には O.P+3.5 m まで沈下した状態であり、

表面は 20～30 cm 乾燥して、かろうじて人間が歩ける程度の状態にあった。柱状図を示すと図-1 のようになる。

3. 試験の概要

図-2 に示すとおり 10 × 10 m の面積で A, B および C の 3 種類のゾーンを設け、A および C ゾーンについては 1.0 m 正方形間隔で深さ 5.0 m まで、ボードレーンソニカを打設し、中間の B ゾーンは非改良区域とした。

地盤の状況ならびに改良効果を確認するため各種の

測定は図-2 の測定位置図に準じて行なったが、土質試

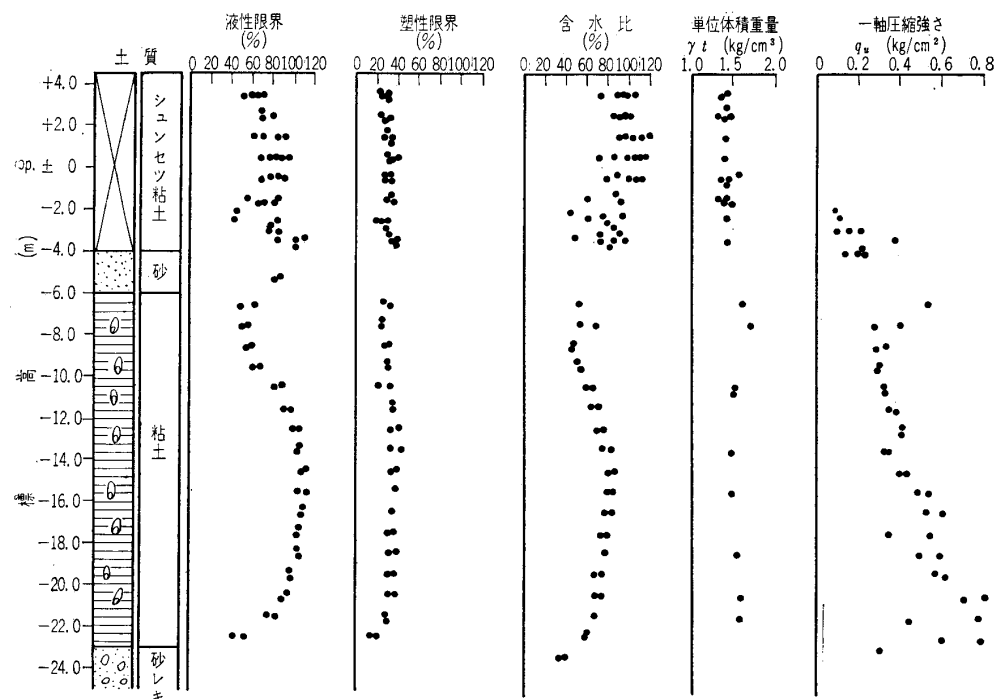


図-1 土質柱状図

* ブルドーザー工事株式会社

験のための乱さない試料採取，地盤の原位置試験（コーンペネトロメーターテスト，ベーンテスト）については，改良前は深部型沈下板を設置した5点において実施し，改良後においては各ゾーンの中心部3点において実施した。以下それらの試験内容について概説する。

3.1 乱さない試料採取および土質試験

乱さない試料採取はシンウォールサンプラーにより連続的に地表面から7.0 mまでサンプリングを行なった。改良前の土質試験は，圧密試験，非排水直接せん断試験および物理試験（粒度，含水量，単位体積重量，液性限界，塑性限界および比重の各試験）を行ない，改良後の土質試験は圧密試験，一軸圧縮試験および物理試験を行

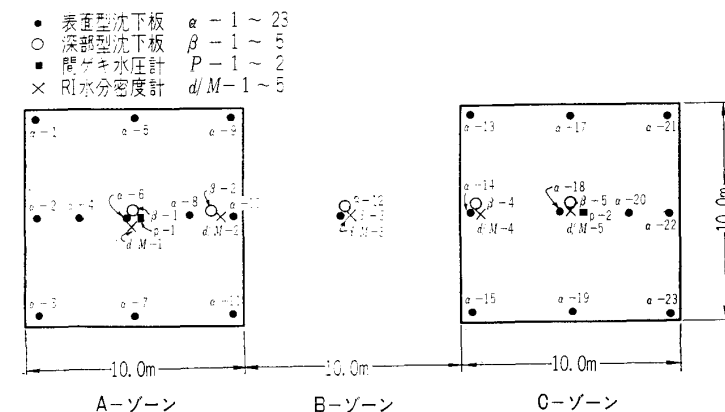


図-2 試験位置および計器埋設位置図

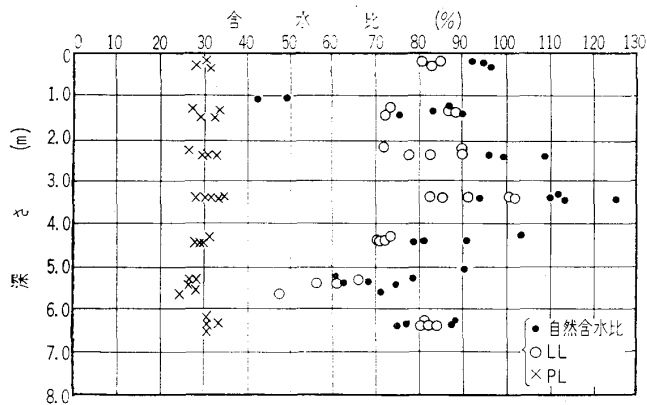


図-3 w_n , w_L , w_F と深さとの関係

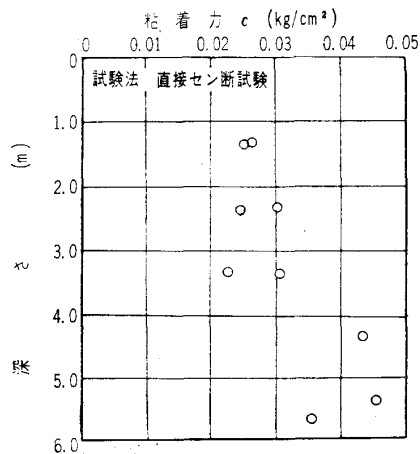


図-4 粘着力と深さの関係

なった。改良前の試験結果を図-3～図-9に示す。

3.2 原位置試験

(1) コーンペネトロメーターテスト

コーンの大きさは直径 5 cm，先端角 60° とし，10 cm ごとにコーン指数を測定した。

(2) ベーンテスト

ベーンの大きさは高さ 20 cm，幅 10 cm のものを使用し，深さ 50 cm ごとに測定した。ベーンテストは改良前のみ実施した。

(3) ラジオアイソトープによる水分，密度の測定

ラジオアイソトープによる水分計 (Nuclear-Chicago Model P-19) および密度計 (Nuclear-Chicago Model

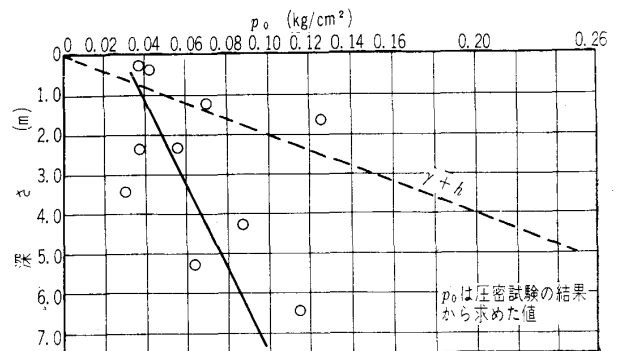


図-5 p_0 と深さの関係

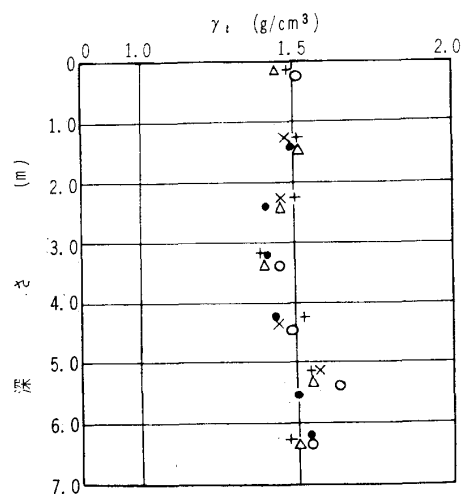


図-6 γ_s と深さの関係

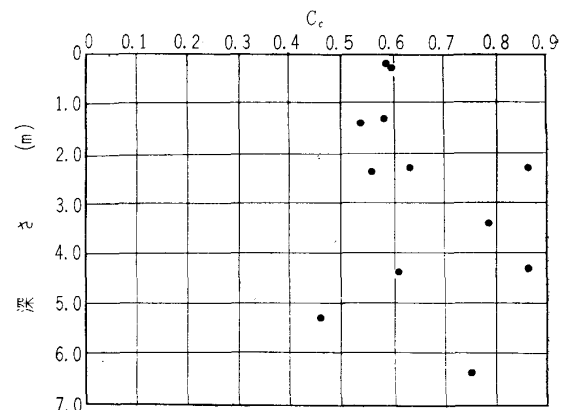
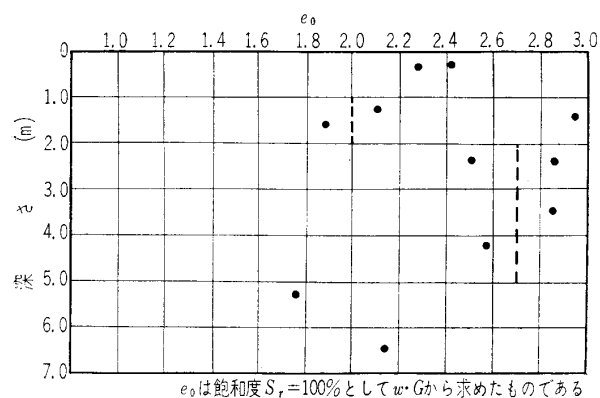
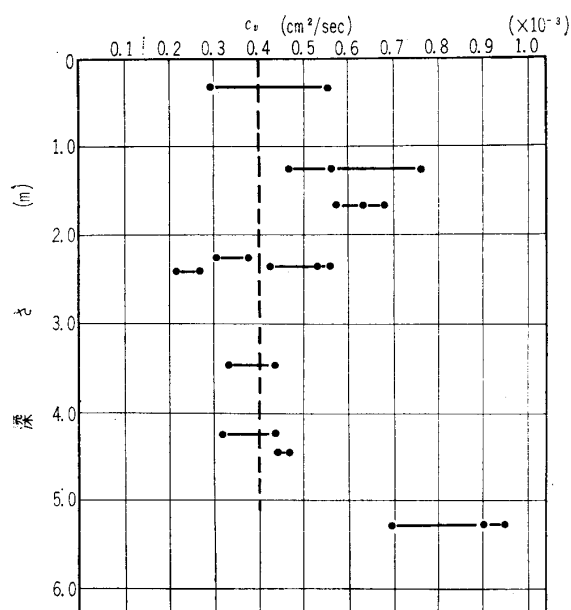


図-7 C_c と深さの関係

図-8 e_0 と深さの関係図-9 c_v と深さの関係

P-20) によって圧密過程を追跡する目的で深さ方向に連続的に一定期間ごとに含水量, 単位体積重量の変化を測定した。

3.3 埋設計器およびその測定

(1) 間ゲキ水圧計

坂田電機製差動トランス型間ゲキ水圧計を地表から 2.5 m の深さ (ペーパードレーンの打設中間深さ) に埋設した。

(2) 深部型沈下板

ペーパードレーン打設深さより下部の粘土層の沈下を測定する目的でボーリングを行ない, 地表から 5.0 m の地点にスクリー型の沈下板を埋設した。

(3) 表面型沈下板

地表面に木グイを打設して, レベリングによって沈下の測定を行なった。

試験地および計器埋設の状態を写真-1 に示す。

4. 打設機械

打設機械は種々あるがシュンセツ粘土の軟弱地盤上に直接機械がのり, 打設できる超軽量ペーパードレーン打



写真-1 試験地の状況

表-1 PDW-100 型の主要諸元

項	目	
総重	量	2.0 ton
全長		3,700 mm
全幅		1,235 mm
全高		6,400 mm
打設深さ		10~15 m
打設速度		30 cm/sec
打込力		1.6 ton

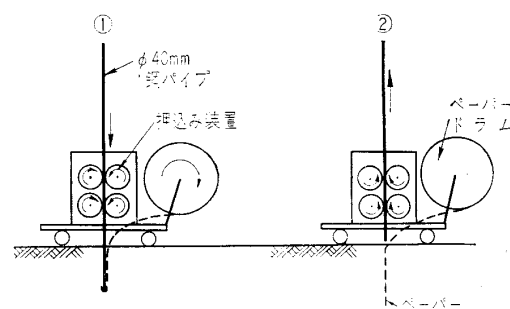


図-10 ペーパードレーン打設方法

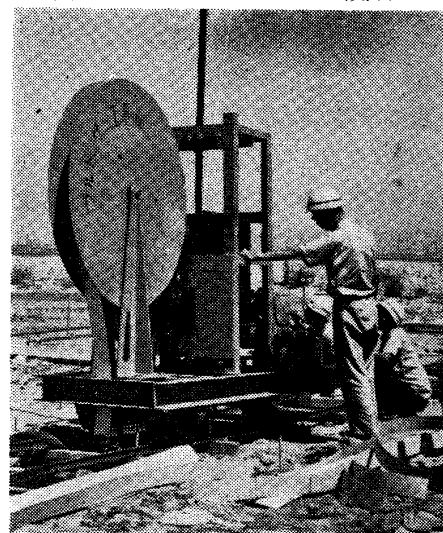


写真-2 PDW-100 型打設機

設機として, ブルドーザー工事機で開発した PDW-100 型の打設機を使用した。この PDW-100 型についてその主要諸元を示すと表-1 のようになる。また打設機の打設方法を示すと 図-10 のようになる。

写真-2 は, PDW-100 型打設機を示す。

5. 自重圧密による沈下の検討

5.1 圧密計算条件の決定

改良前に行なった土質調査、試験結果にもとづき圧密計算に必要な諸数値を次のように決めた。

(1) 地下水位

調査結果にもとづき、地下水面は地表面に一致するものとした。

(2) 圧密先行荷重

圧密先行荷重は図-5 に示すように考えられ、ペーパードレーンの対象とする埋立て粘土層は圧密進行中の状態にあるものと判断される。

(3) 単位体積重量

図-6 に示すように改良深さ 5.0 m までは $\gamma_t = 1.5$ ton/m³ と考えることとした。

(4) 圧縮指数

図-7 に示すとおりであり、平均をとり圧縮指数を 0.6 であると考えた。

(5) 初期間ゲキ比

初期間ゲキ比と深さとの関係は図-8 に示したとおりであるが、ここに示した e_0 は含水量、比重から飽和度 $S_r = 100\%$ とし、計算によって求めた値を採用した。この結果からわかるように -2 m 付近で大きな変化が認められるため、1.0~2.0 m の間を $e_0 = 2.0$ 、2.0~5.0 m の間を $e_0 = 2.7$ と考えた。

(6) 圧密係数

図-9 に $c_{v(v)}$ - 深さの関係を示したが埋立て層の状態から判断して、 $c_{v(v)} = c_{v(h)}$ および $1.5 c_{v(v)} = c_{v(h)}$ の二通りの場合について計算することとした。

(ただし $c_{v(v)}$ 縦方向圧密係数 $c_{v(h)}$ 水平方向圧密係数)

5.2 圧密沈下量の計算

圧密沈下量は自重圧密進行中の地盤であるので、改良前に試験した圧密試験の結果得られた先行荷重から安定後の上載有効応力までの間の沈下が起こるものと考え、次式によって計算を行なった。

$$S = \frac{C_c \times h_0}{1 + e_0} \log \frac{P_0 + \Delta \sigma_z}{P_0}$$

S : 圧密沈下量

C_c : 圧縮指数

e_0 : 初期間ゲキ比

P_0 : 圧密先行荷重

h_0 : 層厚

$\Delta \sigma_z$: 増加鉛直応力

上式によって、最終沈下量の計算を行なうとペーパードレーンによる改良範囲においては沈下量 S は 24.8 cm となる。

5.3 圧密時間の計算

圧密度の計算はバロン (Barron) の計算図表により求めることができるが、ペーパードレーンの開発発祥地であるスウェーデンにおけるケルマン (Kjellman) および

カルステニアス (Kallstenius) の計算方法¹⁾ によって計算する。この方法によると圧密度 U は次のとおりとなる。

$$U = 1 - e^{-\frac{2c_v t}{L^2 \left(\log \frac{L}{r \sqrt{\pi}} - \frac{3}{4} \right)}}$$

$$U = 1 - e^{-c_v t / m} = 1 - e^{-t / g}$$

ここで

$$m = \frac{L^2}{2\pi} \left(\log \frac{L}{r \sqrt{\pi}} - \frac{3}{4} \right)$$

$$g = \frac{m}{c_v}$$

r : ドレーンの半径 (cm)

L : 正方形配置のドレーンの間隔 (cm)

c_v : 圧密係数 (cm²/sec)

K : 透水係数 (cm⁴/kg・sec)

t : 載荷後の時間 (sec)

なお、 r はサンドパイプへの換算径であり、ボードレーンソニカ (ペーパードレーン) の寸法 (幅 10 cm, 厚さ 3 mm) から直径 5 cm のサンドパイプと同等の効果となり、したがって $r = 2.5$ cm となる。

上記の圧密度の式から $c_{v(v)} = c_{v(h)}$ と考え $c_{v(h)} = 4 \times 10^{-4}$ cm²/sec および $1.5 c_{v(v)} = c_{v(h)}$ と考え $c_{v(h)} = 6 \times 10^{-4}$ cm²/sec とし、圧密度を求め圧密沈下曲線を求めると図-11 のようになる。

6. ペーパードレーンによる改良効果について

さきにも記したように、改良効果を確認するために表面および非改良土層の沈下を一定時間ごと測定するとともに改良前 (1965 年 8 月) および改良後 (1966 年 4 月 ~ 6 月) に現地盤のボーリング調査試験を行なった。その結果をまとめると次のようになる。

6.1 沈下

実測沈下については、ペーパードレーンを打設する直前を 0 として、その後のペーパードレーン打設層 5.0 m 厚さの累計沈下を示すと図-11 のとおりになる。ここで実測値と理論値を対比して見ると、 $1.5 c_{v(v)} = c_{v(h)}$ とした理論沈下曲線によく一致していることがわかる。またラジオアイソトープで測定した含水量の変化から計算した沈下量もほぼこれに一致し、上記の沈下測定値はほとんど圧密による脱水変形にもとづく沈下であることが裏付けされている。また一般に $c_{v(v)} < c_{v(h)}$ であるといわれているが、サンドドレーンの場合はその打設によって地盤が乱されるのでほとんど $c_{v(v)} = c_{v(h)}$ と考えて実測値を説明してきたが、ペーパードレーンにおいてとくに PDW-100 型打設機では地盤をほとんど乱すことがないので、 $c_{v(h)} = 1.5 c_{v(v)}$ と考えることが実際をよく説明できることがわかった。

6.2 強さの増加

強さの増加については、改良前はコーンペネトロメータテスト、ベーンテストおよびシンウォールサンプリ

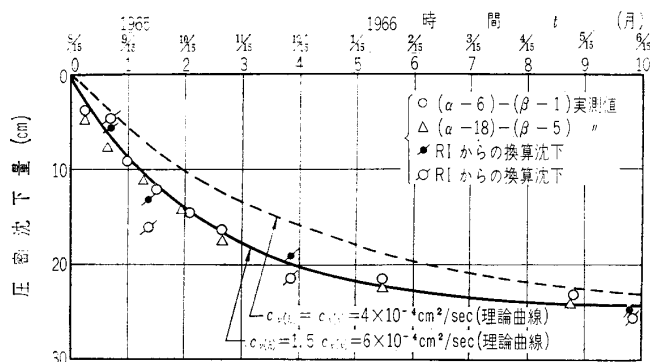


図-11 実測沈下量と理論沈下曲線

ング試料による一軸圧縮試験ならびに三笠式直接せん断試験機²⁾による直接せん断試験を行なった。この結果を図に示すと、図-12、図-13 のとおりになる。また上記の試験機による圧密非排水等容積直接せん断試験の結果を示すと 図-14 のような結果が得られ、 $\tau_f = 0.3 \sigma_z$ で示され、図-12 に示すように自重圧密完了後の強さは、ほぼこの関係に近い値を示している。

6.3 圧密先行荷重

改良前および改良後のシンウォールサンプリングによる試料について圧密試験を行ない先行荷重を求めると図-15 のようになる。したがって沈下量を計算する時に仮定した値がほぼ正しいことを裏付けている。

7. あとがき

以上、埋立て粘土の自重圧密促進工法としてのペーパードレーン（使用ペーパーはボードレーンソニカ）工法による試験工事の結果について述べてきたが、当試験地から約 5 m はなれた地区において実施したサンドドレーン（ $\phi 40$ cm, $l=30$ m）による改良工事の結果と比較すると、とくに気づいたこととしては、サンドドレーン工法においては圧密係数 $c_v(v) = c_v(h)$ でよく理論値に一致していたのに対して、ペーパードレーン工法においては $1.5 c_v(v) = c_v(h)$ の関係が認められたことがあげられる。

このことは前述したように、PDW-100 型打設機による地盤の乱れが非常に少ないことを意味しているものと思われる。最後にこの試験工事施工にあたって、試験場提供の便を与えていただいたモービル石油、児島氏および相原氏に深く感謝するとともに、打設機的设计、開発を担当された高岡、陳内の両氏および工事施工、解析に協力してくださった志賀、西井、鍋島の各氏に対して敬意を表す次第である。

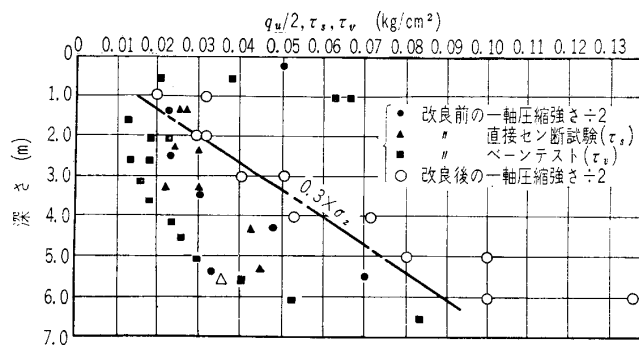
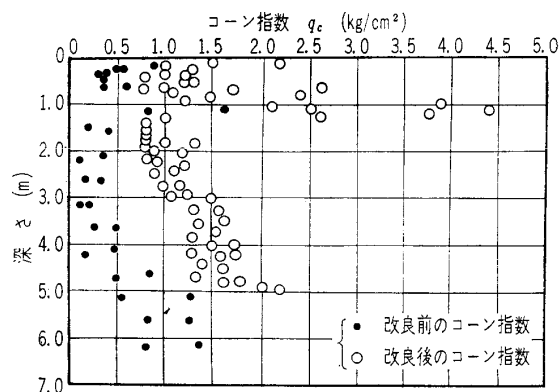
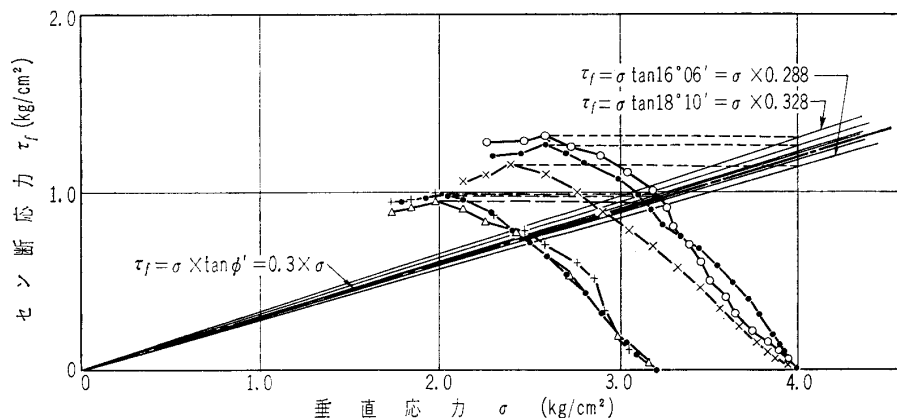
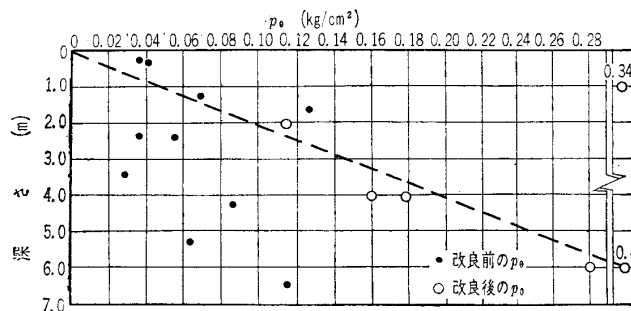
図-12 $q_u/2, \tau_s, \tau_v$ と深さの関係図-13 q_c と深さの関係

図-14 圧密非排水直接せん断試験結果

図-15 p_0 と深さの関係

参考文献

- 1) 米倉亮三：スウェーデンにおけるペーパードレーンの設計図表，土と基礎 No. 90, 1965
- 2) 三笠正人：粘土の強度の考え方について，土と基礎 No. 61, 1962

(原稿受付 1966. 8. 12)