

# 水田の地盤支持力に関する研究

## I 地下水位の変動が地盤支持力におよぼす影響

千野 敦 義

信州大学農学部 農業土木学研究室

### I 緒 論

現地における支持力を調査する方法として貫入試験がある。このうちコーンペネトロメーターによる方法は、比較的簡単な器具を使用して広い地域の支持力を短時間に求めることができる方法であるが、玉石や転石が散在する地盤においては、いかなる型式のコーンペネトロメーターも使用できないし、玉石等が混入していない場合でも、コーンペネトロメーターの型式の選定を誤ると、まちがった結論を出す危険性がある。

粘性土については、コーンの貫入抵抗値から基盤の強度即ち支持力を推定する調査研究が進められているが<sup>1,2)</sup>、有機質含有土については、その関係がはっきりされていない<sup>3,4)</sup>。しかし実際の問題として水田などのような有機質を含む土の支持力を知る必要が生じてきた。地下水位の高低により、土質基礎の強度がどのような応答を示すかを知ることは、作業機械の水田への導入にあたり重要なことであるので、本論文では、地下水位の低下に伴うコーン支持力値の変化および一軸圧縮強さの変化を測定し、これらの間の関係を見だし、さらに地下水位に関する理論を適用して、排水路の間隔や深さを支持力の面から簡単に決定する方法を見いだすべく検討を行なっている。

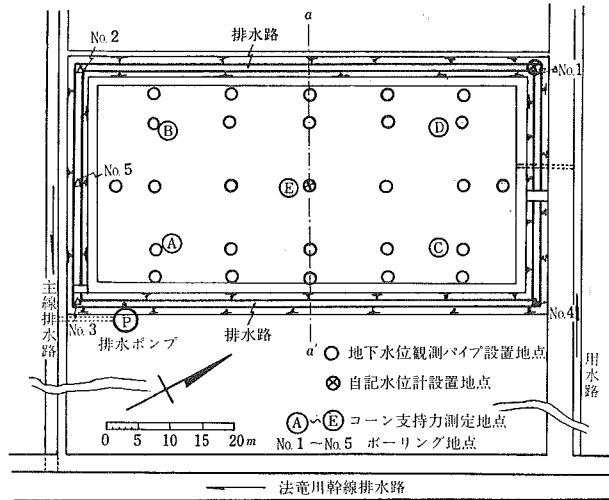
### II 試験の概要

試験地は琵琶湖東南湖岸の滋賀県守山町に設定され、図一に示すような試験田において、地下水位を低下させながら、①～⑥点においてコーンペネトロメーターによる貫入試験を行ない、同時に同地点のサンプリングを行ない、実験室において一軸圧縮試験を行なった。

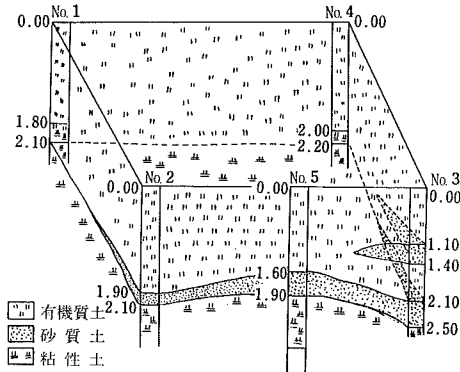
試験田の土質断面図は、図二に示すとおりであり、上部の有機質土については表一に示すような土質試験結果を得た。

表一 土質試験結果

試料名	G	L. L.	P. L.	S. L.	P. I.	粒度組成分 (%)				シャク熱減量
						レキ	砂	シルト	粘土	
有機質粘土	2.56	86.3%	60.5%	51.7%	25.8%	0	28.3	52.0	19.7	21.8%



図一1 試験田平面図



図一2 地質断面図

### III 試験方法と結果

#### 3・1 貫入抵抗値の測定

貫入抵抗値は携帯用コーンペネトロメーター (W. E. S. 式の標準型で、コーンの先端角は $30^\circ$ 、底部断面積は $6.45 \text{ cm}^2$ のものである) を使用して、図一1に示すA~E点において実測した。測定では、地表面からコーン底が没した時を  $0 \text{ cm}$  として、以下連続的に所定の深さごとに抵抗値を読み取った。この時のコーンの挿入速度はほぼ  $1 \text{ cm/sec}$  になるようにした。E点の測定結果のみを示せば、図一3のようである。

#### 3・2 一軸圧縮試験

コーン測定地点の土をサンプラーで注意深く採土し、密封して実験室に持ち帰り、ただち

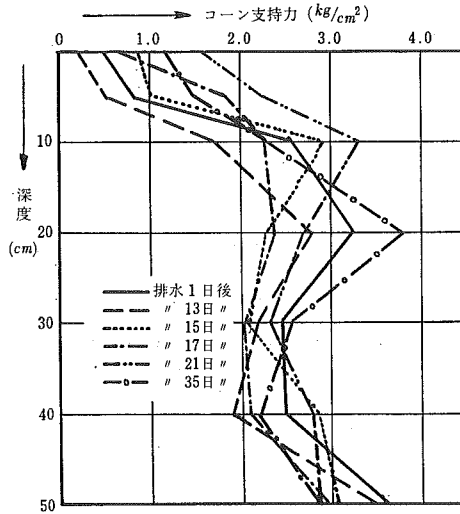


図-3 コーン支持力調査結果 (測点E)

に試験を行なった。また含水比は、コーン支持力測定地点の現場土に対して測定したが、さらに念のため一軸圧縮試験終了後の試料についても測定した。なおサンプラーはシンチュウ製の円筒で内径6cm、高さ15cmで一端にエッジが切つてあるものを使用した。

3・3 各試験値間の関係

(1) コーン支持力と自然含水比

地表面(0cm)のコーン支持力 $q_c$  ( $kg/cm^2$ )とその含水比 $w$  (%)の間に図-4のような関係が得られた。すなわち含水比の増加にともなってコーン支持力がほぼ直線的に減少し、次式で示されることがわかった。

$$q_c = -0.03w + 2.12 \quad \dots\dots\dots(1)$$

(2) コーン支持力と一軸圧縮強さ

コーン支持力 $q_c$  ( $kg/cm^2$ )と一軸圧縮強さ $q_u$  ( $kg/cm^2$ )との関係は図-5のようになっ

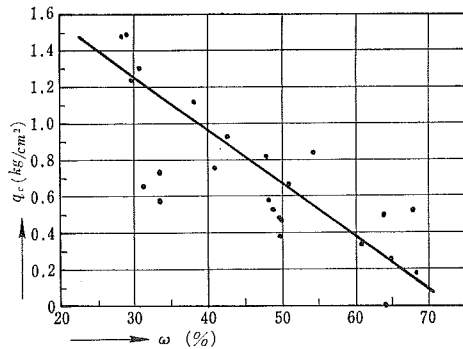


図-4 コーン支持力と含水比との関係

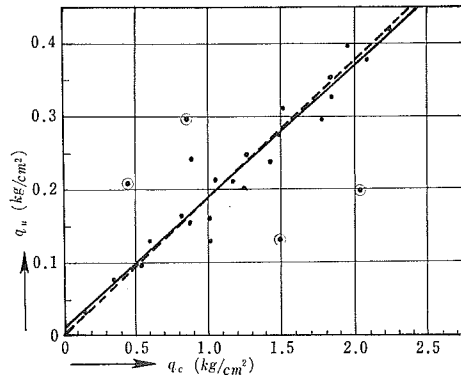


図-5 一軸圧縮強さとコーン支持力との関係

たが、●印を除くと非常に相関がよく、直線関係であることを示している。●印を除いた各測定値について、最小2乗法を用い次式を得た。(図-5の実線)

$$q_c = 5.63q_u - 0.07 \quad \dots\dots\dots(2)$$

(2)式においては  $q_u = 0$  のとき  $q_c \neq 0$  となるが、実際の場合は、 $q_u = 0$  のとき  $q_c = 0$  のはずであるから(2)式を修正して原点を通る一次式とした方が良いと考え、次式を得た。(図-5の点線)

$$q_c = 5.36q_u \quad \dots\dots\dots(3)$$

### Ⅳ 排水路の水位低下に伴う水田内地下水位変化

#### 4・1 試験方法と結果

試験田内に地下水位測定用パイプを図-1のように設置し、排水路の水位を図-6の鎖線の如く低下させ、パイプの水位を測定した。試験田内中央パイプ(自記水位計設置地点)の水位は図-6の点線のようにであった。

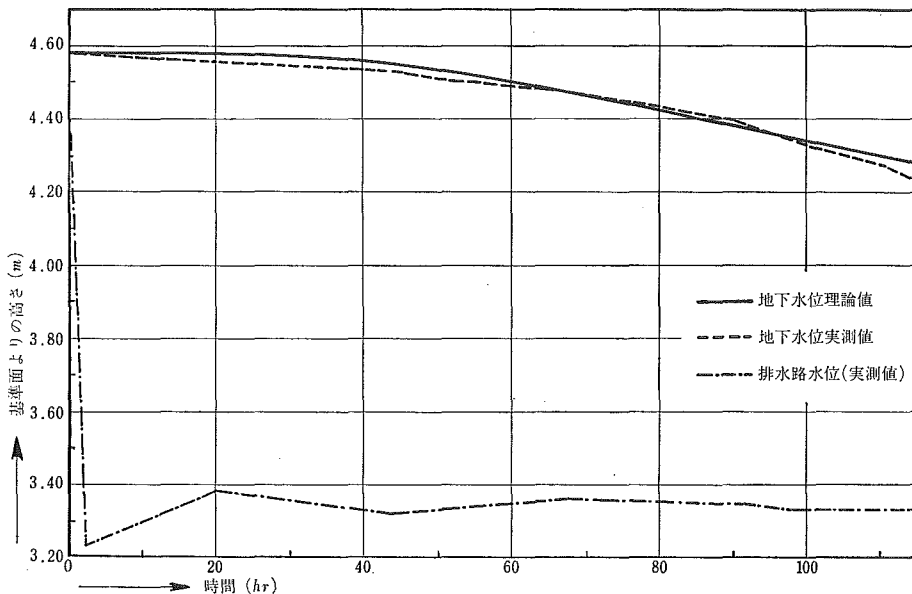


図-6 地下水位低下曲線

#### 4・2 理論解析

図-1に示すごとく、当試験田のように短辺と長辺との差が比較的大きい場合、長辺の中央断面において地下水の流れを解析する場合には、一般に短辺方向の流れだけを考慮して解いても、妥当性は十分あると考えて良い。また排水路の水位変化(図-6の鎖線)の降下に要する時間が、地下水位を測定した時間に比べ非常に短かいので、排水路水位は  $h = h_0$  (初期の水位) から  $h=0$  まで瞬間に降下すると考え、DUPUIT-FORCHEIMERの理論を適用す

る5~7)。図-7のような場において次式が成り立つものとする。

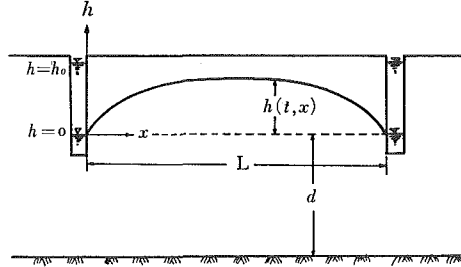


図-7

$$\lambda \frac{\partial h}{\partial t} = k \frac{\partial}{\partial x} \left( h \frac{\partial h}{\partial x} \right) \dots\dots\dots(4)$$

- $\lambda$ ; 有効間隙率 (%)
- $k$ ; 透水係数 (cm/day)
- $t$ ; 時間 (day)

ここで平均地下水深  $D_a$  を次のように定義して、(4)式を線形化すると次式を得る。

$$D_a = d + \frac{h_0}{2} \left( \text{ただし } d \gg \frac{h_0}{2} \right)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{k \cdot D_a}{\lambda} \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \dots\dots\dots(5)$$

さらに次の条件を入れて(5)式を解けば、

- 初期条件;  $h = h_0$  のとき  
 $0 \leq x \leq L, t = 0$
- 境界条件;  $h = 0$  のとき  
 $x = 0, x = L, t > 0$

$$h = h_0 \frac{4}{\pi} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{n} \exp. \left( -\frac{\alpha \cdot n^2 \cdot \pi^2 \cdot t}{L^2} \right) \sin \frac{n\pi}{L} x \dots\dots\dots(6)$$

$$\text{ここで } \alpha = \frac{k \cdot D_a}{\lambda}$$

(6)式は収束が早く、第一項のみを取ってもよいと思われるため次式のようなになる。

$$h = h_0 \frac{4}{\pi} \exp. \left( -\frac{\alpha \cdot \pi^2 \cdot t}{L^2} \right) \sin \frac{\pi}{L} x \dots\dots\dots(7)$$

(7)式に  $L = 36.0 \text{ m}$ ,  $k = 3.48 \times 10^{-4} \text{ cm/sec} \approx 30 \text{ cm/day}$ ,  $\lambda = 0.0317$ ,  $h_0 = 1.26 \text{ m}$ ,  $d = 0.84 \text{ m}$  を代入して、 $x = L/2$  の点、即ち地下水位を測定した中央パイプ設置点についてのみ解析した結果を示すと、図-6の実線のようになり、測定した結果と比較的よく一致した。

## V 試験結果の適用

### 5・1 コーン支持力と許容地耐力の関係

(3)式よりコーン支持力  $q_c$  と一軸圧縮強さ  $q_u$  との関係は、

$$q_c = 5.36 q_u \quad \dots\dots\dots(3)$$

となるが、本試験におけるような有機質土の場合には、一軸圧縮強さ  $q_u$  と粘着力  $c$  との間には、 $q_u = 2c$  なる関係が成り立つと考えられるので、(3)式は次式のようになる。

$$q_c = 10.72 c \quad \dots\dots\dots(8)$$

(8)式を次に示す TERZAGHI の支持力公式に代入することにより、地耐力を推定することができる。

$$q_d = \alpha c N_c + \beta \gamma_1 B N_r + \gamma_2 D_f N_q \quad \dots\dots\dots(9)$$

ここで  $q_d$ ; 極限支持力 ( $t/m^2$ )

$c$ ; 基礎荷重面下にある地盤の粘着力 ( $t/m^2$ )

$\gamma_1, \gamma_2$ ; 基礎荷重面より下方および上方にある地盤の単位体積重さ ( $t/m^3$ )

$\alpha, \beta$ ; 基礎の形状係数

$N_c, N_r, N_q$ ; 支持力係数

$D_f$ ; 基礎の根入れ深さ ( $m$ )

$B$ ; 基礎荷重面の最小幅 ( $m$ )

(9)式において載荷を地表面載荷と考えると、 $D_f = 0$  となり右辺第三項は 0 となる。又当試験田のような有機質土では、内部摩擦角  $\phi$  は 0 とみなしてさしつかえないから、 $N_r = 0$  となり右辺第二項も 0 となる。さらに輪荷重を独立基礎とみなすと、 $\alpha = 1.3$  となり、 $\phi = 0$  のとき  $N_c = 5.7$  となる<sup>8)</sup>。また当地盤のように、やわらかい粘土では、局部せん断破壊を起こすものと考えて支持力公式中の土の粘着力に 2/3 倍したものをを用いれば、(9)式は次式のように簡単化できる。

$$\begin{aligned} q_d &= \frac{2}{3} \alpha \cdot c \cdot N_c \\ &= \frac{2}{3} \times 1.3 \times 5.7 c \\ &= 4.94 c \quad \dots\dots\dots(10) \end{aligned}$$

(10)式に(8)式を代入すると、

$$q_d = 0.46 q_c \quad \dots\dots\dots(11)$$

となるが、実際の地盤を考えた場合、せん断破壊に対する安全率  $F$  は少なくとも 3 が必要であるから、これを考慮に入れ、この時の支持力を許容地耐力  $q_a$  とすると次式が得られる。

$$q_a = \frac{0.46}{F} \cdot q_c = 0.15 q_c \quad \dots\dots\dots(12)$$

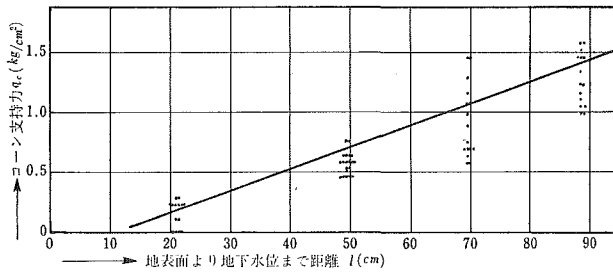
即ちコーン支持力と許容地耐力との間には直線関係が成り立ち、コーン支持力を調べることにより容易に許容地耐力を推定することができる。

## 5・2 適用例

例えば、この水田に  $0.15 \text{ kg/cm}^2$  の接地圧を有する農用機械を導入しようとする場合、(12)式よりコーン支持力が  $1.0 \text{ kg/cm}^2$  となる。また、コーン支持力測定値  $q_c$  ( $\text{kg/cm}^2$ ) とその時の地表面より地下水面までの距離  $l$  ( $\text{cm}$ ,  $l = h_0 - h$ ) の間に図一8に示すような関係が得られた。これらの関係が直線的に増加するものとする、次式のようになった。

$$l = 55.6 q_c + 11.1 \quad \dots\dots\dots(13)$$

(13)式においてコーン支持力が  $1.0 \text{ kg/cm}^2$  のときの  $l$  即ち地下水位の低下量は約  $67 \text{ cm}$  と



図一八 地下水位低下量とコーン支持力の関係

なる。そこでこの水田において、 $0.15 \text{ kg/cm}^2$  の接地圧を有する農用機械が導入可能な地盤強度が得られるように排水を行なう場合の排水路間隔、深さを決定するためには、次のような計算を行なえばよい。

排水路間隔  $L$  は(7)式より次のように与えられる。

$$L = \pi \sqrt{\frac{k \cdot D_a \cdot t}{\lambda \log_e(4/\pi \cdot h_o/h)}} \quad \dots\dots\dots(14)$$

(14)式において地下水位を  $0.67\text{m} \approx 0.7\text{m}$  低下させる場合の排水路間隔と時間の関係は、

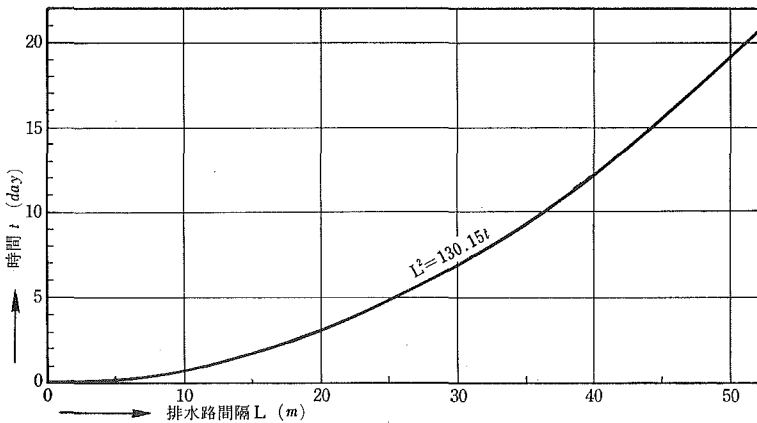
$$L^2 = 130.15 t \quad \dots\dots\dots(15)$$

となり、図一9に示すようになる。

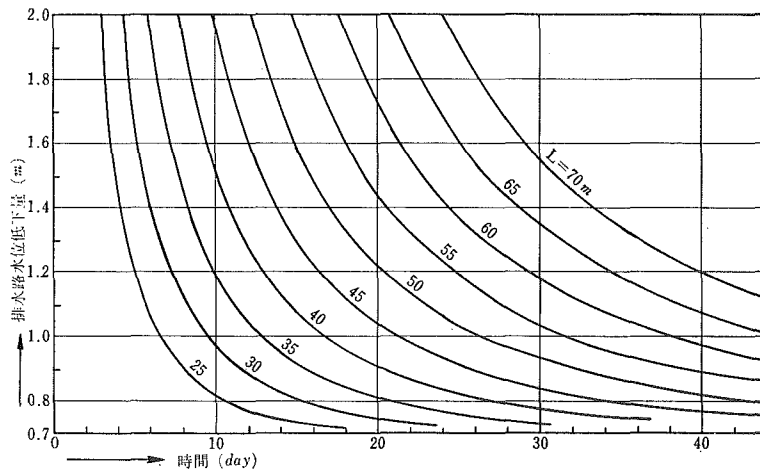
また排水路間隔を変えた時の地下水位を  $0.7\text{m}$  低下させるに必要な排水路水位低下量と時間の関係は(14)式より、

$$t = 0.00728 L^2 \left\{ 0.24137 + \log_e \left( \frac{h_o}{h_o - 0.7} \right) \right\} \quad \dots\dots\dots(16)$$

となり、排水路間隔を  $25\text{m}$ ,  $30\text{m}$ ,  $\dots\dots\dots 70\text{m}$  とした時のグラフは図一10のようになる。



図一九 排水路間隔と時間の関係  
(地下水位を70cm低下させる場合)



図一10 排水路水位低下量～時間～排水路間隔 関係曲線

## VI 考 察

本論文は地下水位の低下による支持力の増加を、コーンペネトロメーターを使用して、調査研究した結果を述べたものであるが、有機質を含む粘性土については、測点を多数とり、統計的な処理をすることにより、粘性土と同様支持力を調査することが十分可能であることがわかった。室町氏の粘性土に対するこれと同様な試験では、 $q_c = 4.87 q_u$ なる関係式が得られているが<sup>1)</sup>、著者の有機質土に対する試験では、 $q_c = 5.36 q_u$  (3式)と係数がやや大きく出ている。これは有機質による粘着力の変化が一つの原因となっているためと思われる。

また排水路の間隔、深さを決定するのに地下水不定流の理論を適用し、地下水位の時間的変化を求めることが可能であり、一方地下水位の低下に対する田面における支持力の増加が求められるので、所用作業機械を導入するのに必要な支持力を得るための日数や排水路の間隔、深さを決定することが可能となる。

図一10に示したように排水路水位低下量即ち最低必要な排水路深さと水田の中央において地下水位を0.7 m低下させるに必要な時間との関係を見た場合、例えば、 $0.15 \text{ kg/cm}^2$ の接地圧を有する作業機械を排水12日後に導入しようとする場合は、排水路間隔を40 mにして、排水路の深さを1.1 mにすると排水効果上からよいと考える。

以上の解析は、水分移動の機構および亀裂などによる蒸発散の問題には触れずに解いたものである。またコーンの貫入機構や支持力公式の適用問題等についても今後更に検討を加えなければならないと考えている。

なお、本研究は著者が内地研究員として京都大学に在留中行なったものである。本研究を遂行するにあたり、御懇切な御指導を賜った京都大学沢田敏男教授ならび御校閲を賜った本学酒井信一助教授に対し感謝の意を表す。



## 引用文献

1. 室町忠彦；粘性土におけるコーンの貫入抵抗と一軸圧縮強度との関係，土木学会誌，42—10，P 7～12（1958）
2. 沢田，根本；ブルドーザの走行，土木研究所報告，128，P53～66（1966）
3. 木下，洞田，谷山；琵琶湖有機質土の工学的特性，土と基礎，8—4，P 4～10，（1960）
4. 内田，松本；筑豊地帯飯塚地区の軟弱地盤とそのコーン penetrometer による調査について，土と基礎，8—1 P19～26，（1960）
5. 土質工学会編；土質工学ハンドブック，技報堂，P85～86，（1966）
6. 物部長穂；水理学，岩波書店，P466～468，（1933）
7. 赤井，宇野；土中の準一次元非定常浸透流に関する研究，土木学会論文集，127，P 14～22，（1966）
8. 前出，5）P 263
9. 酒井，千野；土質調査および試験報告書—伊那西部地区開田事業—，（1968）

## Investigation of Bearing Capacity in Paddy Field Foundation

### I Effect of the Fluctuations of Groundwater Table on the Bearing Balue of Paddy Field Foundation

By Atsuyoshi CHINO

Laboratory of Agricultural Engineering, Fac. Agri., Shinshu Univ.

#### Summary

The cheapest and most expedient procedures for making a penetration test are the method by means of cone penetrometer.

We tried to investigate the fluctuations of cone index with groundwater lowering in the paddy field foundation. On the other hand, we examined the unconfined compression strength of the undisturbed sample. We discussed with th method to decide the space and depth of drainage canal from the results of these experiment.

Cone penetrometer used in this experiment are W. E. S. standard type of a 30° cone with an maximum area of 6.45  $cm^2$  cross section.

The results of our investigation of bearing capacity in paddy field foundation are as follows,

1. Cone index are proportional to unconfined compression strength for the paddy field foundation with organic soil.
2. Allowable soil pressure ( $q_a$ ) can be caluculated with the application of the relation between cone index ( $q_c$ ) and unconfined compression strength ( $q_u$ ) to TERZAGHI's formula.

The experimental results which were obtained in the way described above are as follows,

$$q_c = 5.36 q_u \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

$$q_a = 0.15 q_c \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

3. The measured values of groundwater table agree approximately with analytical results of DUPUIT-FORCHEIMER's theory.
4. The space and depth of drainage canal can be caluculated with the application of this theory.