

示される。

(3) 以上のように正規化された変量相互間の相関係数を(3)式から計算し、さらに、他の変量の影響を除去した2次偏相関係数を計算すると、3.に示したようになる。

(4) 母偏相関係数の検定を行うと、 v_m/v_s と粗度及び v_m/v_s と水深との相関係数はいずれも有意でない。水深と β との相関係数は危険率5%で辛うじて有意性が認められる程度である。粗度と β 及び v_m/v_s と β との相関係数はいずれも有意である。

(5) 水面勾配と粗度とは互いに全く独立なものではなく、粗度の中に水面勾配を含ませて考える方が実情に即している。このことは、物部、安芸両博士の平衡勾配に関する公式からも類推されるが、資料におけるFroude数と β との相関係数が小さくなることからわかる。

(6) 以上のことから、 $1/k=v_m/v_s$ は粗度、水面勾配、水深に無関係となり、この値を左右するおもな因子は風向及び風速であると考えられる。この分布の中心が $1/k=0.86(k=1.15)$ であることより、この付近の値は無風時のものであり、 k の値は順風のときにその速さにしたがって1.2より1.5まで順次変動し、逆風のときにその速さにしたがって1.1より0.9まで順次変動すると考えられる。

(7) 従来、水深の増大によつて α の値が増大すると考えられていたのは、実は、水深そのものによる影響ではなく、水深の大きいところでは粗度が小さいから、この粗度の減少によるものである。

(8) β 及び α の値に最も大きく影響するものは $1/k=v_s/v_m$ すなわち風向及び風速である。強い順風が吹くほど β, α の値は小さくなり、強い逆風が吹くほどこれらの値は大きくなる。

前論文同様、この論文を草するに当り、工学博士中央大学教授林泰造氏より種々有益な御忠言を載いた。紙上を借りて厚く御礼を申し述べる次第である。

参考文献

- 1) 春日屋伸昌：開水路の垂直流速曲線における平均流速の位置の分布性について，土木学会誌，第40巻，第5号
- 2) 安芸皎一：河相論，p. 58
- 3) W.P. Elderton：Frequency-curves and correlation, 1906, p. 125~p. 130
渡辺義勝：最小自乗法及統計，p. 465~p. 469
- 4) 統計科学研究会：新編統計数値表，表一p. 44~p. 52
- 5) 同上 表一p. 44~p. 52
- 6) 同上 表一p. 94
- 7) 物部長穂：水理学，p. 261
- 8) 安芸皎一：河相論，p. 83
- 9) 宮本武之輔：治水工学，p. 85

(昭.30.3.18)

粘土の含水量変化にともなう沖積層強度の推移について

正員 赤 井 浩 一*
准員 柴 田 徹**

ON THE STRENGTH CHANGE OF AN ALLUVIAL CLAY WITH THE MOISTURE DECREASE

(JSCE Oct. 1955)

Kōichi Akai, C.E. Member, Tōru Shibata, C.E. Assoc. Member

Synopsis In order to research the effect of the moisture content on the strength characteristic of undisturbed saturated clay, a large number of tests such as U-test, vane test and triaxial compression test has been performed. As the result, it is shown that the compressive strength of saturated clay has a linear relation to the moisture content on the semi-logarithmic paper, and that the above linear plot is parallel to the virgin compression curve of the consolidation test. Introducing the concept of soil water bond appeared in the stretched membrane theory, to the unconfined compressive strength of clay under the air-drying process, it is found that the strength of clay can be determined uniquely from the moisture content, in spite of the type or kind of tests. And besides, some investigations are tried to the effect of the lateral drainage in the triaxial consolidation test.

* 京都大学助教授 工学部土木工学教室

** 京都大学大学院工学研究科学生

要旨 不攪乱飽和粘土の含水量を変化させた場合、その強度特性がいかに推移するかを見るために、多数の単軸圧縮試験、ヴェインセン断試験及び三軸圧縮試験を行い、粘土の圧縮強度と含水比との関係が半対数紙上で直線となり、またこれは圧縮試験の処女圧縮曲線に平行となることを確かめた。気乾燥過程における粘土の単軸圧縮強度に対し土壌水吸引力の概念を導入した結果、粘土の強度が試験の種類や方法のいかんにかかわらず、含水量のみによつて一義的に決まることを見出した。なお三軸圧縮試験における側方排水の効果についても若干の考察を試みた。

1. 緒言

この2, 3年間、大阪地盤の土質構成を知るための研究の一環として市内各地で土質調査を行つてきたが、たまたま不攪乱粘土の単軸圧縮強度と自然含水比との間に明瞭な相関のあることに着目し、この関係を究めてみた。

一例として図-1にかかげたのは大阪市北区梅田、阪急南駅ビル建設予定地の土質柱状図であつて、地表以下13~24mの間に現われる第1粘土層(通常地質史上では梅田沖積層と称せられる)についてその自然含水比、間隙比と実験室内で行つた単軸圧縮試験(U-test)及びヴェインセン断試験(vane test)の結果とを対照させてみると、含水比や間隙比は自然地層中で深さ方向に変動が多いが、粘土の不攪乱強度もこれにともなつて変化していること、その変化の様子は自然含水比、従つて間隙比の大きいところで強度が小

さく、逆にこれらの小さい箇所でも強く出ていることは、粘土の圧縮強度に及ぼす含水量の効果がいかにかいじめるしいかを如実に示している。

過去の文献にも含水量に対し圧縮強度(対数目盛)をプロットすると直線ないしは近似的な直線関係が得られることが見えているが^{1), 2), 3)}、同一物性の不攪乱粘土試料を大量に入手することが困難なためか、その関係が相当の幅を持つて必ずしも明瞭とはいえず、なかには直線関係から全くかけ離れたものもある⁴⁾。

著者らは不攪乱粘土の強度特性に及ぼす含水量の効果が土中間隙水の有する結合力(soil water bond)の形で表わされるものと考えて、この問題に関連する各種の実験を行い、その結果に対して若干の理論的考察を試みた。

2. 不攪乱粘土の強度試験

粘土の強度は単軸、三軸圧縮試験及びヴェインセン断試験より求めて比較した。ヴェインセン断試験は粘土に対してかなりの信頼性を持つており、ことにサンブラーから抽出が困難なほど軟弱なものに対しては唯一の武器とされているので、著者らの実験室では前二者についてその効用を発揮しているものである。さきに示した図-1の柱状図の右端欄を見てもわかるように、同一試料に対する単軸圧縮強度 q_u とヴェインセン断試験より求めた粘着力 C との間には、ほとんど正確に $q_u = 2C$ なる関係が存在する。

さて今回の一連の実験に用いた試料は大阪市此花区北港において固定ピストン型薄肉サンプラー(内径

73mm, 肉厚約1mm, 試料長760mm)により採取した不攪乱飽和粘土であり、鋭敏度はTerzaghi表示で約3.0の通常粘土(ordinary clay)に属する。採取深度は地表以下14~18mであつて、物理試験の結果は比重2.64, L.L.=80%, P.L.=30%, 自然含水比76%, 間隙比2.01, 飽和度100%, その粘度組成を図-2に示した。

単軸圧縮試験はすべて底辺2.5×2.5cm, 高さ6cmの角柱形試料について行い、載荷速度は毎分高さの1%でstrain controlとした。なお試料を徐々に気乾燥して含水量を自然含水比から35%前後まで減らし、その範囲内で32個の単軸圧縮試験を行つた。ヴェインセン断試験

図-1 阪急南駅ビル建設予定地土質柱状図

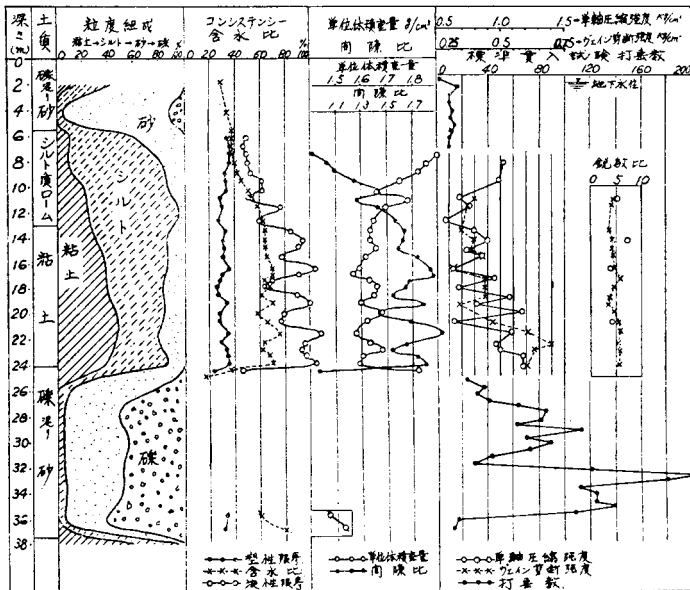
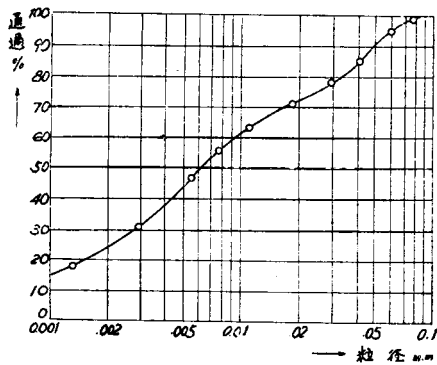


図-2 北港粘土粒径加積曲線

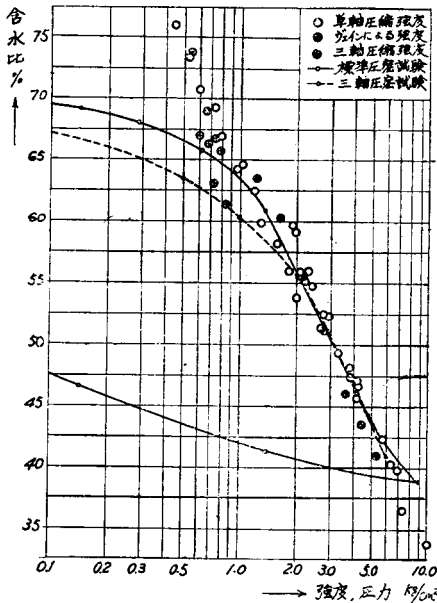


機*は室内試験用のもの(4枚羽根, 高さ3.6 cm, 径2.0 cm)を用い, 毎分60°の回転速度とした。また三軸圧縮試験ではすべて圧密急速試験(Q_c-test)によつたが, 装置の都合上側圧3 kg/cm²以下のものは直径3.5 cm, 高さ8.0 cm, 3 kg/cm²以上では直径5.0 cm, 高さ12.0 cmの円筒形試料について, 100%圧密終了を待つて単軸圧縮試験と同じ条件で載荷した。この際, 側方排水を加速するために paper drain を行つたが, この詳細については後述する。

3. 含水量と強度の関係

(1) 図-3に示すように, 含水量に対し強度(対数目盛)をプロットすると若干の散らばりはあるが, 試験の種類にかかわらず直線となることは明瞭であ

図-3 含水比-圧縮強度の関係



*その測定機構の改良は京大村山明郎教授及び昌昭治郎講師の考案になるものである。

る。なおこの図で三軸圧縮強度としては軸差応力(deviator stress)を採り, ヴェインセン断試験では求められた粘着力Cの2倍を以て圧縮強度とした。単軸圧縮試験とヴェインセン断試験における測定値の散らばりは, 気乾燥過程において試料内部に亀裂が発生すること(外部に亀裂の生じた試料は実験から除外した), 及び貝殻片の混入したものがあつたことに起因するものと思われる。これはヴェインセン断試験において特にその影響がいちじるしく, 含水量の減少とともに実際より低い強度を与える傾向がある。いま実験結果をもとにして含水比と強度の関係を式に表わすと,

$$w = B(\log_{10} A - \log_{10} p) \dots\dots\dots (1)$$

ここに w: 含水比, p: 圧縮強度, A, B: 常数
が得られるが, この式(1)を変形すると,

$$p = Ae^{-\frac{2.303w}{B}} \quad (e: \text{自然対数の底}) \dots\dots\dots (2)$$

となつて粘土の強度は e^{-Kw} に比例することになる。

ここで Salas ら⁵⁾が粘土の圧縮性を説明する際に用いた仮定, すなわち「圧縮力を受けて平衡している粘土の圧縮力 p は, Debye の説によつて d なる相互距離に置かれた2粒子間の帯電による斥力(repulsion)に等しく e^{-K'd} に比例する」という仮定を用い, かつ飽和粘土の間隙比, 従つて含水比 w が粒子間隔 d に比例するとすれば, セン断破壊時の含水比 w とそのときの圧縮力 p との関係は

$$p = A'e^{-K'w} \dots\dots\dots (3)$$

となつて式(2)と同形になり, 粘土の強度と含水比が半対数紙上で直線関係にあることを説明する手がかりが得られる。

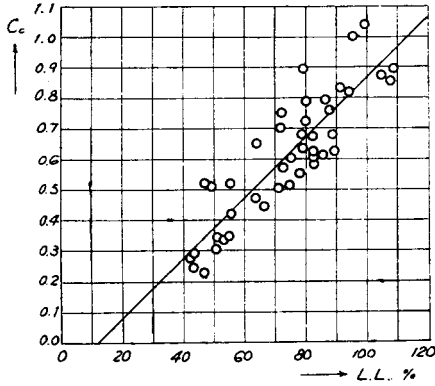
(2) 図-3にはまた標準圧密試験及び三軸圧密試験の結果を合せ記入したが, 両者は処女曲線(virgin compression curve)の部分に入つて一致することがわかる。しかも強度と含水比の関係を表わす直線が標準圧密試験の処女曲線に平行になるといわれていることは, 三軸圧密試験のそれについても実証された*。この事実より式(1), (2)の常数 B は圧縮係数 C_c に等しくなることがわかる。

一方, 大阪粘土の不攪乱試料について多数の圧密試験を行つて, 圧縮係数と液性限界(L.L.)の関係を調べた結果は図-4に見るごとくほぼ次式が成立している**。

* Vargas⁶⁾の実験では三軸圧密曲線は単に pre-compression curve の部分だけにとどまつている。

**Skempton のこね返した試料に対する実験によると, C_c = 1.30, C_c' = 0.009(L.L. - 10%) が与えられている⁷⁾。

図-4 圧縮係数-液性限界の関係



$$C_c \approx 0.01(L.L. - 12\%) \dots\dots\dots(4)$$

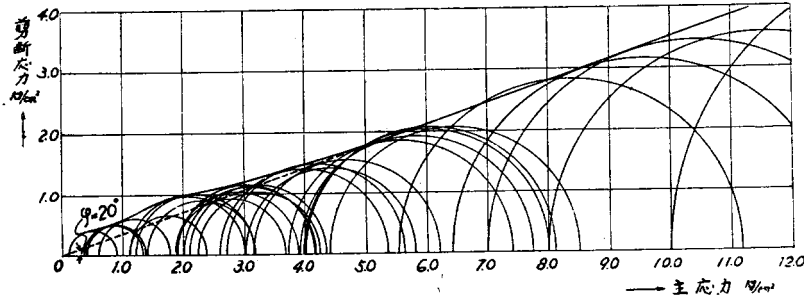
すなわち上述したように粘土の圧縮強度は $e^{-K\sigma}$ に比例するが、係数 K は液性限界より決まることになるので、含水量による粘土の強度変化の主要因子として液性限界に注目するのは意味の深いことと考えられる。

(3) 三軸圧縮試験と単軸圧縮試験を比較すると、最小主応力(側圧)の有無によつて、試料に加えられる応力状態が相異なるにもかかわらず、粘土の圧縮強度が含水量によつて一義的に決定できるという実験結果は一見矛盾するようにみえるが、この問題を解決するための鍵として、著者らは土壤水吸引力に着眼し

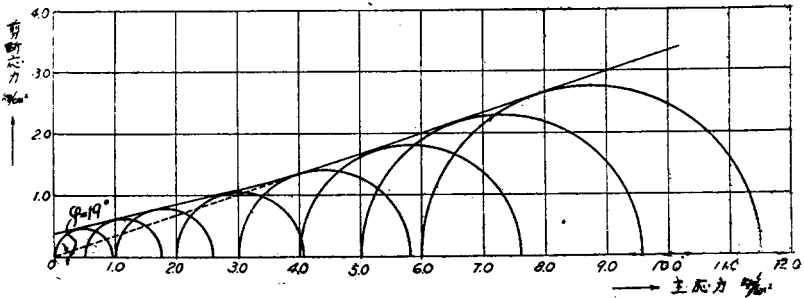
た。つまり土試料内の水は表面張力と吸着力によつて保持されているが、この力は負圧 (suction or reduced pressure) となつて土粒子を吸引する作用を有している。いま飽和粘土について考えると、試料の表面は空気と接しているためにメニスカスが生じ、これが表面張力を持つて負圧となるのであるが、含水量の減少にともなつて表面のメニスカスが粘土試料内に後退し、その曲率半径が小さくなつて表面張力が増すために土壤吸引力が増加すると考えることができる。かくて単軸圧縮試験において負圧として作用する表面張力は、あたかも三軸圧縮試験における側圧に相当するものと考えられ、しかも計画的に含水量を変えるために試料を気乾燥した過程は、三軸的な圧密に類似すると推定できるので、表面張力の大きさは三軸圧密曲線より求めることができる。すなわち図-3において、ある単軸圧縮強度における表面張力によつて生じている仮想側圧は、それと同一含水比の場合の三軸圧密曲線上の点で与えられる圧力として得られるので、これを最小主応力とし、単軸圧縮強度を軸差応力として Mohr の応力円を画くことが可能である。このようにして求めた Mohr の破壊包絡線 (a) を三軸圧密急速セン断試験より得られたもの (b) と対照させて図-5 に示した。

すでに (2) において述べたように、標準圧密曲線と三軸圧密曲線は処女曲線部分では一致を見ることがわ

図-5 (a) 単軸圧縮試験による破壊包絡線



(b) 三軸圧縮試験による破壊包絡線



かつたので、最大先行圧縮荷重 (max. pre-consolidation load) 以上になると、単軸圧縮試験と標準圧密試験のデータから三軸圧密急速セン断試験に相当する Mohr の破壊包絡線を画き、粘土のセン断強度を求めることができる。なおこれよりさらに一步を進めて、セン断中の排水による含水量変化を考慮に入れれば、緩速試験 (S-test) では圧密急速試験 (Q-test) におけるよりもセン断時の含水量が減少し、図-3 の含水比-圧縮強度直線に沿つて強度が増すことが矛盾なく理解されるであろう。

4. 三軸圧密試験

三軸圧密急速セン断試験において、セン断に先立つて行う三軸圧密現象について考察した。以下に述べる一軸、三軸圧密なる語はすべて一軸、三軸方向の排水という意味に用い、荷重は液圧によつて試料の全表面にかゝっている場合について取扱う。

圧密の基礎方程式は円筒座標 (r, z) を用い、時間 t による試料中の間隙圧 u の変化を表わすと、それぞれの場合について次式で与えられる⁹⁾。

一軸圧密; $\frac{\partial u}{\partial t} = c \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$ (5)

二軸圧密; $\frac{\partial u}{\partial t} = c \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right)$ (6)

三軸圧密; $\frac{\partial u}{\partial t} = c \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)$ (7)

これらの式を解いて圧密度 U と time factor T の関係を求めるとつぎのようになる。

一軸圧密; $U_v = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(1+2n)^2} e^{-(1+2n)^2 \frac{\pi^2}{4} T_v}$ (8)

二軸圧密; $U_r \omega_n^2 = 1 - 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\omega_n^2} e^{-T_r \omega_n^2}$ (9)

ここに $T_v = ct/H^2$, $T_r = ct/R^2$; H, R は円筒形試料の高さ及び直径のそれぞれ $1/2$, ω_n は Bessel 函数 $J_0(\omega) = 0$ の n 次根である^{9), 10)}。

三軸圧密の場合の圧密度は

$U_{v+r} = 1 - (1 - U_v)(1 - U_r)$ (10)

で与えられる¹¹⁾。また式 (8), (9) より time factor T と圧密度 U の関係はレラクゼーション法を用いた数値解法により、 $H/R=2$ の場合についてすでに解かれている¹²⁾。

本実験に使用した試料 ($2H/2R=8.0/3.5=2.29$ 及び $12.0/5.0=2.40$) についても同様の解法を試みて U と T との関係を図-6 に示し、 $U=50\%$ の time factor T_{50} を併記した。

三軸圧密試験に当つて paper drain を行つたが、これは濾過紙に縦格子状の溝を切つて円筒形試料の側面に巻きつけ、側方排水を促すものである。この paper drain を行つたものと、そうでないもの(一軸圧密)との圧密速度を比較するために、試料より排水量と時間(対数)の関係より 50% 圧密に要する時間を求めると、前者は後者の約 $1/5$ に短縮されることがわかつた。一例として側圧 3.0 kg/cm^2 の場合を図-7

図-6 圧密度-time-factor 曲線

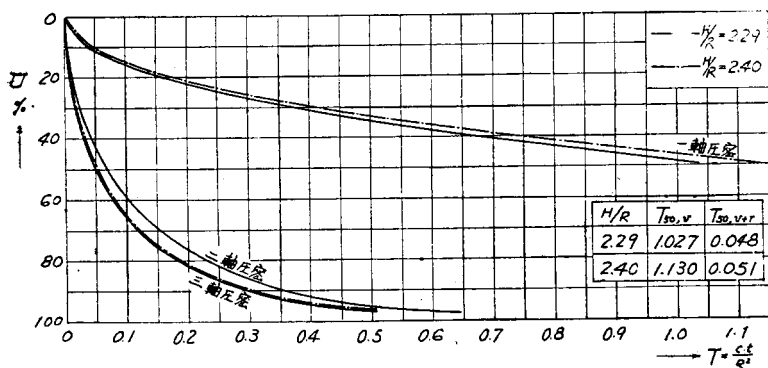
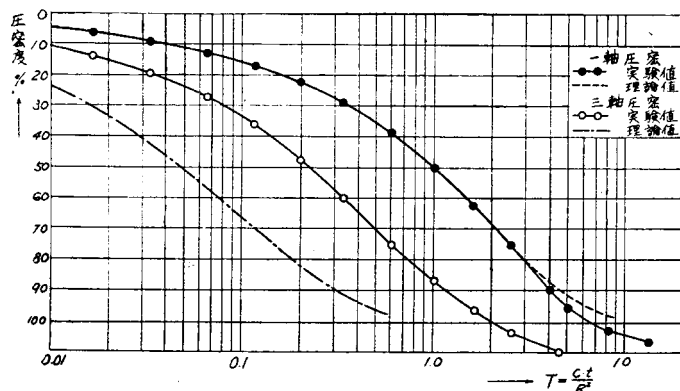


図-7 圧密度-time-factor (対数) 曲線 ($\sigma_3 = 3.0 \text{ kg/cm}^2$)



に示す。この図には図-6より移した理論曲線と実験曲線が画いてある。一軸圧密曲線は理論値によく一致しており、paper drain の効果については完全な三軸圧密の状態まではとても望めないにしても、かなりの圧密加速となることがわかる*。もし側方排水が完全であれば、 $H/R=2.29$ の場合には一軸圧密にくらべて約 $1/20$ の時間で 50% 圧密に到達することになる。

5. 結 論

本文では不攪乱飽和粘土の強度特性に及ぼす含水量の効果について一連の実験を行つた結果について述べたが、以

* この実験で 100% の 1 次圧密完了までに要した時間は、paper drain を行つた場合とそうでない場合についてそれぞれ 100 分及び 330 分であつた。

上の実験結果よりつぎのことが結論づけられる。

(1) 不攪乱飽和粘土の強度と含水比の関係は半対数紙上で直線となり、これは圧密曲線の処女圧密曲線に平行となる。

(2) 単軸圧縮、ヴェインセン断、三軸圧縮試験などの試験の種類及び急速、圧密急速、緩速試験などの試験法のいかんにかかわらず(1)の関係が成立し、クリープにおいて見られるごとき時間効果を除外すれば、粘土の強度は含水量より一義的に決まり、 e^{-Kv} に比例する。

(3) 標準圧密曲線と三軸圧密曲線は処女圧縮曲線において一致を見る。

(4) 含水量による粘土の強度変化の主要因子として液性限界を探ることができる。

(5) 含水量を自然含水比から徐々に減少させて行つた単軸圧縮試験の場合に、土壌水吸引力による表面張力増加の考えを導入して、三軸圧密急速試験の場合と同様に Mohr の破壊包絡線を画くことができる。

(6) 三軸圧密は一軸圧密に較べて $H/R \approx 2.3$ に対し、50%の圧密度において約 20 倍の圧密速度を有している。また側方排水を促す paper drain の使用は試験時間を短縮する上にかなり有効である。

なお、上記の結論は自然含水比より乾燥側に粘土の含水量を変化させたいわゆる乾燥過程 (drying process) における実験結果から得られたものであつて、この逆の場合すなわち湿潤過程 (wetting process) においては粘土粒子の構造変化などの影響も考えられるので、今後の研究にまたねばならない。

おわりに京大教授村山朔郎博士の御指導に対し深謝の意を表するとともに、「大阪地盤の土質構成とそれに対する基礎工法に関する研究」として科学試験研究費、及び「粘土質地盤の進行性破壊に関する研究」として科学研究費の交付を受けていることを付記して謝意を述べたい。

参 考 文 献

1) P. C. Rutledge: Relation of Undisturbed

Sampling to Laboratory Testing, Trans. A.S.C.E., Vol. 109, 1944, pp. 1155-1181.

2) P.C. Rutledge: "Strength of Natural Clays", presented at the Oct., 1948, meeting of A.S.C.E.

3) J. O. Osterberg: Testing Equipment and Research Activities of the Soil Mechanics Laboratory, Northwestern Univ., Proc. 2nd Int. Conf. Soil Mech. and Found. Eng., Vol. 6, 1948, pp. 233-241.

4) Discussion by A. E. Cummings of "Earth Pressure on Tunnels", by W.S. Housel, Trans. A.S.C.E., Vol. 108, 1943, pp. 1067-1072.

5) J.A.J. Salas & J.M. Serratos: Compressibility of Clays, Proc. 3rd Int. Conf. Soil Mech. and Found. Eng., Vol. 1, 1953, pp. 192-198.

6) M. Vargas: Correlation between Angle of Internal Friction and Angle of Shearing Resistance in Consolidated-quick Triaxial Compression Test on Residual Clays, Proc. 3rd Int. Conf. Soil Mech. and Found. Eng., Vol. 1, 1953, pp. 72-75.

7) K. Terzaghi & R.B. Peck: Soil Mechanics in Engineering Practice, 1948, pp. 61-67

8) K. Terzaghi: Theoretical Soil Mechanics, 1943, pp. 290-296.

9) H.S. Carslaw & J.C. Jaeger: Conduction of Heat in Solids, Oxford Univ. Press, 1947.

10) I. da Silveira: Consolidation of a Cylindrical Clay Sample with External Radial Flow of Water, Proc. 3rd Int. Conf. Soil Mech. and Found. Eng., Vol. 1, 1953, pp. 55-56.

11) N. Carrillo: Simple Two- and Three-Dimensional Cases in the Theory of Consolidation of Soils, J. Math. and Phys., Vol. 21, 1942, pp. 1-5.

12) R.E. Gibson & P. Lumb: Numerical Solution of Some Problems in the Consolidation of Clay, Proc. Inst. C.E., Pt. 1, Vol. 2, 1953, pp. 182-195.

(昭.30.3.23)

元東京都建設局長 早大教授 石川栄耀博士 は、去る9月25日、肝臓萎縮症のため急逝されました。享年62才。

九州大学各誉教授 本学会名誉員 君島八郎博士 は10月14日、脳細動脈血セン症および脳軟化症のため逝去されました。享年80才。

本会はここに会員を代表して、両博士の御冥福を心からお祈り申し上げます。