

標準締固め土のせん断特性の異方性と水浸の影響

鳥 山 眺 司*

Koushi TORIYAMA

The Influence of Anisotropy and Soaking on Shearing Properties of Standard Compacted Soils

1. まえがき

土の標準締固めはモールドに試料土を3層に分けて突き固める。このため、最適含水比の乾燥側では、締固め土が突き固め境界面で簡単に分離する。このことは締固め土が層を成しており、異方性をもつ可能性のあることを示している。

沖積粘土は一次元圧密を受けているため、粘土粒子が水平方向に配向しているものが多く、このため、せん断特性や透水性に異方性があることが示されている。Bishop¹⁾はやや過圧密な粘土では鉛直方向の供試体の方が水平方向の供試体より圧密強度が大きく、非常に過圧密された粘土では水平方向の供試体の方が圧縮強度が大きいこと、Duncan and Seed²⁾は飽和粘土のせん断強さが供試体の方向によって20%程度変化することを示している。また、内田・他³⁾は有明粘土のCU試験より鉛直供試体の方が q_u が大きいこと、透水試験および圧密試験で求めた透水係数 k は水平方向の方が大きいことを示している。これに対して、風間・他⁴⁾は一次元圧密した2種の粘土で鉛直と水平方向の k を測定し、鉛直方向の k の方が大きいことを示している。

締固め土の異方性について西・他⁵⁾は水平方向の供試体の q_u の方が鉛直方向より大きいこと、村山・瀬戸尾⁶⁾は突き固めたシルト質ロームの透水係数 k は水平方向の方が大きいこと、等体積一面せん断試験より ϕ' に異方性は認められないが、全応力での ϕ_{cu} ⁷⁾は鉛直方向で最大となること、鬼塚・吉武⁸⁾は3種の試料土の一面せん断試験で強度の異方性のあること、さらに鬼塚・他⁸⁾は強度の異方性は非排水状態では認められるが、水浸するとはほとんど異方性が認められなくなることを示している。

飽和粘土や締固め粘性土の異方性は以上の様に研究者によって異なった結果を示している。盛土の安定解析に

主として必要な値は有効応力に関する強度定数 c' 、 ϕ' である。そこで、本論文では三軸装置を用い、非水浸と水浸供試体のせん断特性と c' 、 ϕ' への供試体の方向角の影響を求め、さらに水浸供試体の破壊時の体積ひずみ Δe_{vf} と間隙圧の変化量 Δu_f の関係を示す。

2. 実験方法

実験に用いた試料土は広島県庄原市の勝光山工業所製の工学用粘土2種である。これらの物理的性質を表-1に、締固め曲線を図-1に示す。T-clayは製紙用の粘土ではほぼ純粋なカオリン粘土であり、N-clayはシルト粒子が主である。

実験に用いた含水比はT-clayは最適含水比を、N-clayは最適含水比の乾燥側と湿潤側に各1種である。試料土を所定の含水比となる様に調整後、1週間以上置いた後に実験に使用した。

三軸試験に用いる供試体直径は5.0cmであるため、高さは10cm以上を必要とする。このため、直径15cmのモールドで試料土を締固め、これより2本の供試体を切り出した。供試体の方向角 θ は図-2に示すように締固め水平面と供試体の軸のなす角で表わすことにする。故に水平な供試体は $\theta=0^\circ$ 、鉛直供試体は $\theta=90^\circ$ となる。T-clayは $\theta=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ の7方向、N-clayは $\theta=0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ, 90^\circ$ の5方向とした。供試体はかなりのばらつきを生じたが、供試体諸元の平均値を表-2に示す。

供試体は三軸セルにセットし、非水浸の場合はそのまま約22時間圧密した。水浸の場合は供試体をセット後、2~3時間、約1.0kg/cm²の圧力差で供試体に透水して間隙空気を排除し、その後、T-clayは背圧 $u_0=1.0\text{kg/cm}^2$ をN-clayは $u_0=2.0\text{kg/cm}^2$ を加えた状態で約20時間圧密した。圧密終了後、ひずみ速度 $\dot{\epsilon}=0.1\%/min$ で非排水せん断した。表-2の実験後の飽

* 農業施設工学研究室

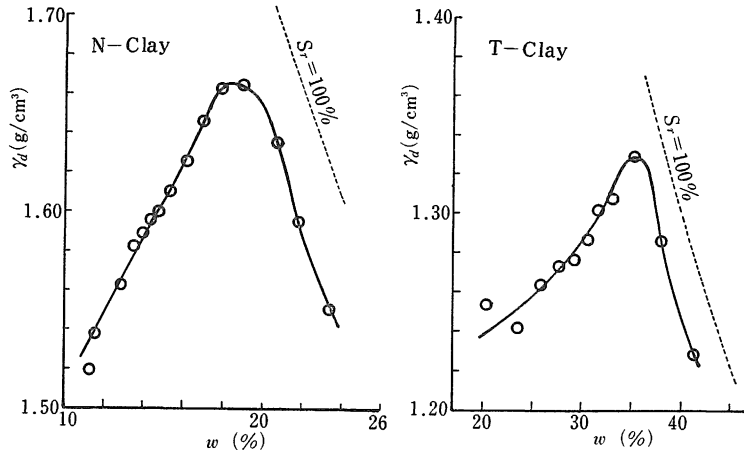


図1 試料土の締りめ曲線

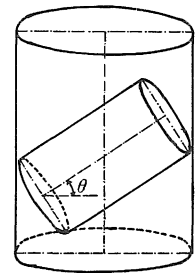


図2 供試体方向角 θ

和度 S_r は実験前の間隙比に対して求めた値である。圧密によって間隙比は減少しているはずであるから、実際には T と ND はほぼ飽和していると考えられる。こ

表-1 試料土の物理的性質

試料土	T	N
液性限界 (%)	59.4	29.7
塑性限界 (%)	42.3	28.8
シルト分 (%)	14	84
粘土分 (%)	86	16
最適含水比 (%)	34.0	18.5
最大乾燥密度 (g/cm³)	1.325	1.665

表-2 供試体平均諸元

試料名		T	ND	NW
実験前	含水比 (%)	32.4	15.0	20.5
	乾燥密度 (g/cm³)	1.328	1.525	1.590
	間隙比	1.046	0.714	0.646
実験後	飽和度 (%)	88.8	55.0	83.7
	非水浸	w (%) 34.7 S_r (%) 90.0	15.8 58.0	20.6 83.4
水浸	w (%)	37.5	26.7	22.2
	S_r (%)	97.5	97.8	89.9

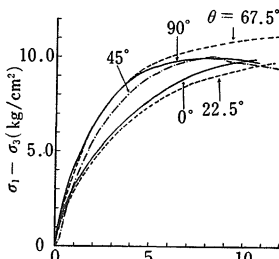


図3(a) 軸ひずみ—偏差応力の関係

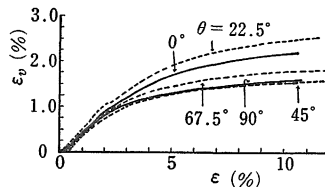


図3(b) 軸ひずみ—体積ひずみの関係

れに対して NW は不飽和の状態にあると考えられる。最適含水比 w_{opt} ないしその乾燥側では間隙空気は連通しており、透水により容易に水に置換され、飽和度が上昇する。しかし w_{opt} の湿潤側では間隙空気は孤立気泡の状態のため、透水によっても飽和度はあまり高くならなかったものと考えられる。

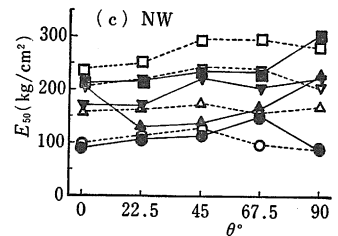
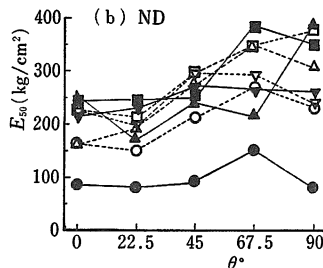
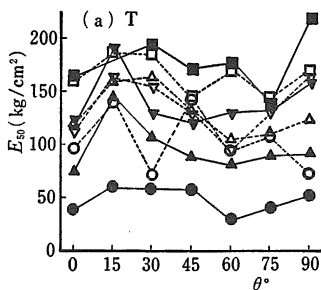


図4 供試体方向角と E_{50} の関係

(σ'_{3c} (kg/cm²) 1.0 2.0 3.0 4.0)
 非水浸 ○ ●
 水浸 △ ▲
 ▼ □

3. 実験結果とその考察

応力一軸ひずみ一体積ひずみの関係への供試体方向角 θ の影響の一例を図-3に示す。3層突き固めにより締固め、試料に水平な層ができ、層方向のせん断面が弱面になると仮定すれば、供試体内のこの層面がせん断面と一致した供試体で、せん断応力は最小になるはずである。せん断面は最大主応力面と角 $45^\circ + \phi'/2$ 、即ち、最大主応力方向（供試体の軸方向）と角 $45^\circ - \phi'/2$ をなすから、方向角 $\theta = 45^\circ - \phi'/2$ となる供試体でせん断応力は最小となるはずである。締固め土の $\phi' = 30^\circ$ であるから、 $\theta = 30^\circ$ の供試体のせん断応力あるいは50%応力での変形係数 E_{50} が最小になるはずである。図-3にはNDの非水浸での $\varepsilon \sim (\sigma_1 - \sigma_3)$ の関係を示す。この図では $\theta = 22.5^\circ$ の供試体の $(\sigma_1 - \sigma_3)$ が最も小さく、ほぼ上の様になっている。この様にND試料土ではほぼ $\theta = 22.5^\circ$ の供試体が最小の $(\sigma_1 - \sigma_3)$ を生じているが、NWとT試料土ではこの様な傾向は認められなかった。これは図-4に示す E_{50} と θ の関係から

も明らかである。NDの E_{50} は $\theta = 22.5^\circ$ で最小値をとっているが、NWでは E_{50} は θ によってあまり変化していない。これはND試料では含水比が w_{opt} のかなり乾燥側のため、締固めにより供試体に締固めによる層が形成されるが、NWの含水比は w_{opt} の湿潤側のため、突き固め時に上下層の境界面が混合されて、締固め層面がほとんど形成されなかったためと考えられる。T試料の E_{50} と θ の関係はばらつきが大きい。これは供試体の含水比 w や乾燥密度 γ_d にばらつきが生じたためと考えられる。

最適含水比の乾燥側のND試料は非水浸状態では飽和度が低いため、せん断中の間隙圧の変化は $\pm 0.1 \text{ kg/cm}^2$ 以下であり、体積ひずみのみが生じる。圧密応力 $\sigma'_{3c} = 1.0, 2.0 \text{ kg/cm}^2$ の場合はせん断中に体積圧縮後、膨張に転じるが、 $\sigma'_{3c} = 3.0, 4.0 \text{ kg/cm}^2$ では、せん断中に体積圧縮のみが生じる。NW、T試料も非水浸状態での間隙圧の変化は小さい。水浸供試体の飽和度は90%以上あり、間隙空気は孤立気泡となっているため、せん断中に体積変化と間隙圧の変化が同時に生じる。せん断

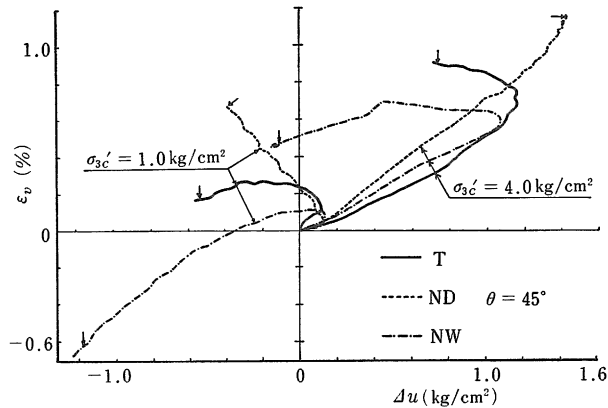


図5 $\Delta u \sim \varepsilon_v$ 関係への圧密応力の影響

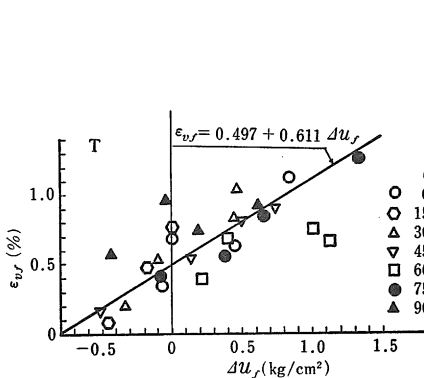


図6(a) T試料の Δu_f と ε_{vf} の関係

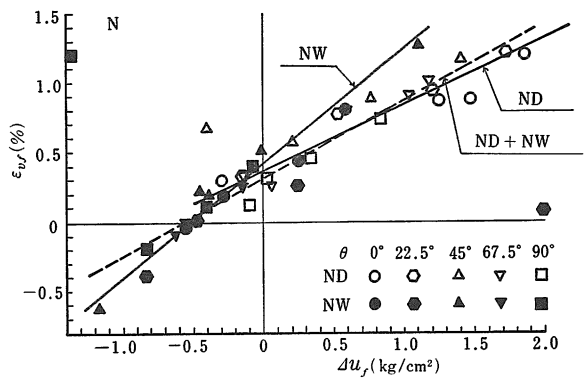


図6(b) N試料の Δu_f と ε_{vf} の関係

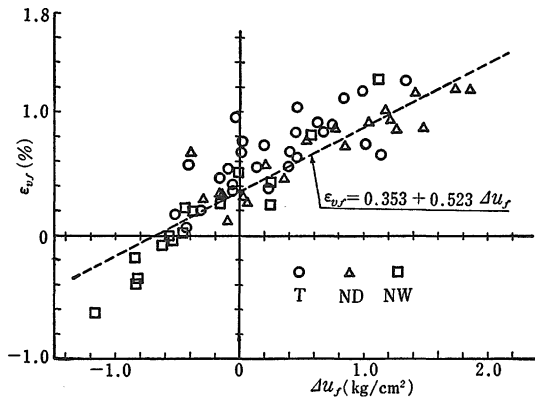


図7 全試料の Δu_f と ε_{vf} の関係

となり、水浸供試体の破壊時の Δu_f と ε_{vf} は試料土、締固め含水比に無関係に1本の直線で近似される。しかし、この Δu_f と ε_{vf} の関係にも供試体の方向角 θ の影響はほとんど認められない。

圧縮強さ $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ と方向角 θ の関係を図-8に示す。最適含水比 w_{opt} に近い T および w_{opt} の湿潤側の ND では非水浸供試体の強度が水浸供試体の強度に比べてかなり大きい。NW 供試体では非水浸と水浸供試体の強度はほぼ等しい。 w_{opt} ないしその乾燥側において非水浸供試体に比べて水浸供試体の強度が低下するのは水浸による空隙水のサクシジョンの消失による有効応力の減少が原因と考えられる。不飽和土のせん断強度に対する有効応力式は Skempton¹⁰⁾ により

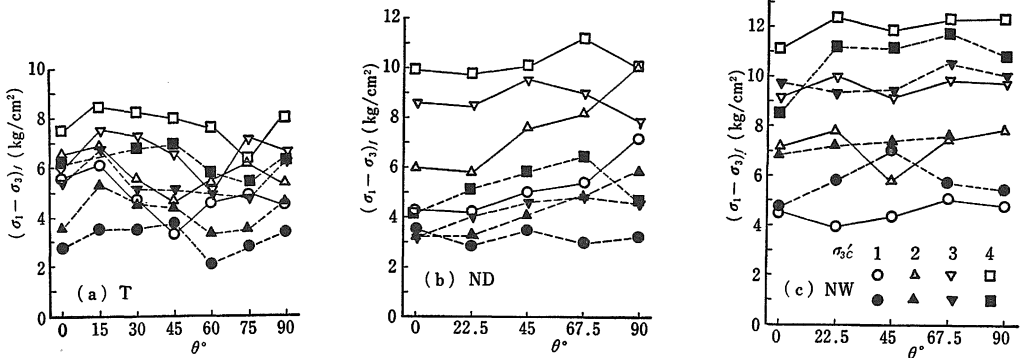


図8 圧縮強さと方向角の関係

中の $\Delta u \sim \varepsilon_v$ 関係の一例を図-5に示す。いずれの場合もせん断初期には Δu と ε_v はほぼ直線的に増加し、その後の Δu と ε_v の関係は試料土と乾燥密度によって変化する。図-5中の矢印は破壊点を示す。この図より、供試体方向角 θ の $\Delta u_f \sim \varepsilon_{vf}$ 関係への影響は認められない。破壊点はほぼ一直線上にある。図-6に破壊点の体積ひずみ ε_{vf} と空隙圧 Δu_f の関係を示す。T 試料の関係はばらつきがやや大きい。T, NW, ND はいずれも $\Delta u_f \sim \varepsilon_{vf}$ 関係は直線で近似できる。即ち、

$$T: \varepsilon_{vf} = 0.497 + 0.611 \Delta u_f$$

$$ND: \varepsilon_{vf} = 0.365 + 0.468 \Delta u_f$$

$$NW: \varepsilon_{vf} = 0.421 + 0.825 \Delta u_f$$

さらに NW と ND はばらつきがや大きくなるが、まとめて1本の直線(図-6(b)の点線)で近似できる。

$$ND + NW: \varepsilon_{vf} = 0.310 + 0.552 \Delta u_f$$

T, ND, NW の全体をプロットすると図-7となり、これを1本の直線で近似すれば

$$T + ND + NW: \varepsilon_{vf} = 0.353 + 0.523 \Delta u_f$$

$$\sigma' = \sigma - u_a + X(u_w - u_a) \dots \dots \dots (1)$$

有効応力に関するモール・クーロン式

$$\tau = c' + \sigma' \tan \phi'$$

を主応力 σ'_1, σ'_3 を用いて書き直すと

$$\frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_3)_f = c' \cos \phi' + \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_3)_f \sin \phi'$$

これに(1)式を代入すると

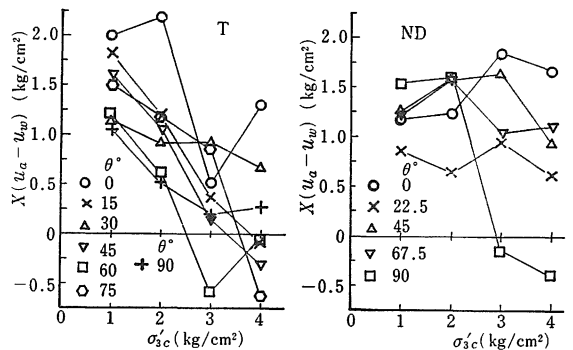


図9 w_{opt} の乾燥側供試体のサクシジョンによる有効応力成分

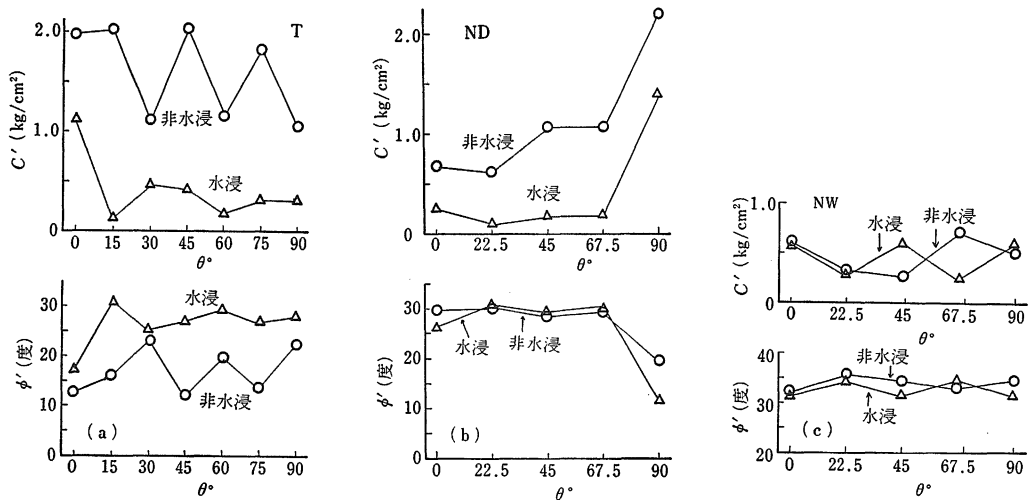


図10 強度定数と供試体方向角の関係

$$\frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_3)_f = c' \cos \phi' + \left\{ \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) \right. \\ \left. - u_a + X(u_a - u_w) \right\} \sin \phi'$$

間隙水のサクシヨンのせん断強度への影響は $X(u_a - u_w)$ で表わされるから、上式より

$$X(u_a - u_w) = \frac{(\sigma'_1 - \sigma'_3)_f - 2c' \cos \phi'}{2 \sin \phi'} \\ - \left\{ \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)_f - u_a \right\} \dots \dots \dots (2)$$

となる。(2)式が間隙水のサクシヨンによるせん断強度に影響する有効応力成分である。 w_{opt} ないし w_{opt} の乾燥側で測った間隙圧は間隙空気圧 u_a に等しい。故に(2)式の $\frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)_f - u_a$ は実験で得られた有効応力 $\frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)_f - \Delta u_f$ に等しい。図-9にNDとT試料の $X(u_a - u_w)$ と圧密応力 σ'_{3c} の関係を示す。最適含水比のかなり乾燥側のNDでは、ND 90°を除いて、 σ'_{3c} に無関係に $X(u_a - u_w)$ は1~2kg/cm²の範囲にある。これに対してT試料では σ'_3 の増加とともに $X(u_a - u_w)$ は減少している。ND試料では飽和度が低いため、圧密応力が4kg/cm²程度では圧密による飽和度の増加の影響が小さく、このため $X(u_a - u_w)$ はほぼ一定値を保つ。しかし、 w_{opt} 近くのT試料では圧密応力の増加とともに飽和度が大きくなり、間隙水のサクシヨンの効果が減少し、したがって、 $X(u_a - u_w)$ も σ'_{3c} の増加とともに減少したものと考えられる。

測定した間隙圧 u を用いて、有効応力 $\sigma' = \sigma - u$ とした場合の有効応力に関する強度定数 c' 、 ϕ' と供試体方向角 θ の関係を図-10に示す。実験結果にばらつきがあるが、方向角 θ による c' 、 ϕ' の変化は認められない。しかし、T試料およびND試料では水浸による粘着力 c' の減少が大きく生じている。これは前述の間隙

水のサクシヨンによるみかけの有効応力成分 $X(u_a - u_w)$ による強度 $X(u_a - u_w) \tan \phi'$ が水浸によって消失するためである。さらに、T試料では非水浸試料に比べて水浸試料の ϕ' の方が大きい。これは図-9に示したように $X(u_a - u_w)$ が σ'_{3c} の増加とともに減少するため、 σ'_{3c} の増加とともに $X(u_a - u_w)$ による強度増加量が小さくなり、したがって、破壊包絡線のこう配が緩くなったためである。これに対して、ND試料では σ'_{3c} による $X(u_a - u_w)$ の差がないため、 ϕ' は水浸試料と非水浸試料ではほぼ等しい値となっている。

4. あとがき

標準締固め土のせん断特性の異方性と水浸のせん断特性への影響について実験した。この結果、次のことが明らかとなった。

(1) 締固め面と平行から垂直までの種々の方向角の供試体において、応力・ひずみ関係、50%応力での変形係数、強度定数 c' 、 ϕ' のいずれもはっきりした差を生じない。したがって、せん断特性に関しては標準締固め土は等方性とみなすことができる。

(2) 水浸供試体では締固め含水比、方向角に無関係にせん断破壊時の体積ひずみ e_{vf} と間隙圧 Δu_f はほぼ直線関係が成り立つ。

(3) 最適含水比 w_{opt} の乾燥側では水浸による強度低下が大きい。これは間隙水のサクシヨンによる有効応力成分 $X(u_a - u_w)$ の消失が原因と考えられる。T試料では、この大きさは圧密応力 σ'_{3c} の増加とともに減少し、2~0kg/cm²程度、 w_{opt} の乾燥側のND試料で

は $X(u_a - u_w)$ は $1 \sim 2 \text{ kg/cm}^2$ で σ'_{sc} に無関係にほぼ一定値である。

(4) w_{opt} の乾燥側供試体は水浸により粘着力 c' が大きく減少し、 ϕ' はやや増加ないし一定値を保つ。

なお、本実験をおこなうにあたりましては昭和54、55年度の農業施設工学研究室専攻生の岡市久生君、出口正幸君、森典君、横井伸明君、嘉本久治君、三好孝之君に多大のご協力を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

1. BISHOP, A. W. : Geotechnique **16** : 91-128, 1966.
2. DUNCAN, J. M. and H. B. SEED : Proc. ASCE, Jour. Geoth. Eng. **92-5** : 21-50, 1966.
3. 内田一郎・林重徳・李昌基・山田淳一 : 第11回土質工学研究発表会講演集, 109-112, 1976.
4. 風間秀彦・黒崎秀・小川正治 : 第15回土質工学研究発表会講演集, 193-196, 1980.
5. 西 勝・野田耕・坂東幸一郎 : 昭和44年度土木学会関西支部年次学術講演会概要, III-30-1~2.
6. 村上幸利・瀬戸尾勝 : 第12回土質工学研究発表会講演集, 493-496, 1977.
7. 鬼塚克忠・吉武茂樹 : 第14回土質工学研究発表会講演集, 469-472, 1979.
8. 鬼塚克忠・林重徳・吉武茂樹・大石英隆 : 土質学会論文報告集, **19-3** : 113-123, 1979.
9. SCHUURMAN, I. E. : Geotechnique **16** : 269-281, 1966.
10. SKEMPTON, A. W. : Pore Pressure and Suction in Soils, 4-16, 1960 (Butterworths).

Summary

The standard compacted soils have three layers, so the specimen cut from that are quite within the bounds of possibility of anisotropy. The shearing tests are performed for the specimen cut from the standard compacted soils which axis are inclined with compacted horizontal layer. In these tests, the influence of soaking on the shearing properties of soils are experimented and the effect of soil water suction on the shearing strength is also calculated from the shearing tests on soaked and unsoaked specimen.

From these experiments, the anisotropy of standard compacted soils are not recognized for their shearing properties. By soaking of specimen, the cohesion c' is decreased and angle of internal friction ϕ' is increased or nearly constant. The decrease of c' is induced by the disappearance of the component of effective stress $X(u_a - u_w)$ caused by suction of partly saturated soils. The magnitude of $X(u_a - u_w)$ are within the range of $0 \sim 2.0 \text{ kg/cm}^2$.