

III-13 粘性土の異方性がせん断特性に及ぼす影響

東京都土木技術研究所 正員 ○ 草野 郁
正員 佐々木俊平

1. はじめに

偏平な粘土粒子は圧密過程において、圧密時の最大主応力面に配向する性質がある。したがって、沖積層軟弱地盤の粘性土は最大主応力である土かぶり圧によって、粘土粒子は水平面に配向する傾向にあると考えられる。このように粘土粒子の配向性のある骨格構造をもった粘性土は、配向面ととなす傾きの方向によって異なった力学的挙動を示すと考えられる。本報告では、不攪乱試料から軸方向の異なる供試体を作成し、一軸および圧密非排水三軸試験を行い、粘性度の骨格構造の異方性がせん断特性に及ぼす影響について調べた。なお、ここでは、生成過程の違う沖積層軟弱地盤の自然堆積粘性土と埋立地盤の浚渫土砂による堆積粘土の二種類の土について実験を行い、この両者を対比させて検討した。また、現地盤中での非排水せん断特性を考慮して、粘性土の骨格構造の異方性、現地盤の非排水せん断強さに及ぼす影響について検討を加えた。

2. 実験方法および実験試料

掘削工事現場からブロック状に不攪乱試料を採取し、軸方向の異なる鉛直 ($\beta=90^\circ$)、傾斜 ($\beta=60^\circ, 45^\circ, 0^\circ$)、水平 ($\beta=0^\circ$) の供試体を作り、各々について一軸と圧密非排水三軸せん断試験を行った。供試体寸法は直径 5.5 cm 、高さ 8.75 cm である。一軸試験のせん断速度は $1\%/分$ である。三軸試験については、供試体飽和時間15時間、圧密時間は沖積粘性土で3時間、埋立粘土で3時間30分とし、バック・プレッシャーは 0.5 kg/cm^2 かけて沖積粘性土で1時間、埋立粘土で1時間30分安定させた。せん断速度は $0.076\%/分$ とした。なお、応力条件としては、等方圧密状態から側圧一定、軸圧増加による圧縮せん断試験を行った。

沖積粘性土は江戸川と東小松川の中川堤防開削工事現場から採取した土で、シルト分 74% 、粘土分 26% 、 $w_L=61.2\%$ 、 $w_p=31.0\%$ 、 $w=57.5\%$ 、 $P_g=2.25\text{ kg/cm}^2$ の土である。埋立粘土は江東区13号埋立地の道路建設現場から採取した土で、シルト分 52% 、粘土分 48% 、 $w_L=104.0\%$ 、 $w_p=37.4\%$ 、 $w=99.0\%$ 、 $P_g=0.68\text{ kg/cm}^2$ の土である。一軸試験は、その他に、東小松川と西小松川の中川開削工事現場から採取した沖積層の浅い箇所、粘性土と、墨田区の木下川排水機所建設現場のケーソン坑から採取した沖積層の深い箇所の粘性土についても行った。

3. 一軸圧縮せん断特性

各軸方向の供試体について行なった一軸圧縮試験結果について、供試体軸方向による一軸圧縮せん断強さ q_u の変化と $\beta=90^\circ$ の q_u の比によって表わしたものが図-1である。これによると、沖積粘性土では供試体軸が水平に近づくにしたがい q_u は小さくなり、 $\beta=0^\circ$ での q_u は $\beta=90^\circ$ のときの $70\sim80\%$ 程度である。一方、埋立粘土ではせん断面が水平面 ($\beta=30^\circ$) に近いところで q_u は小さくなり、

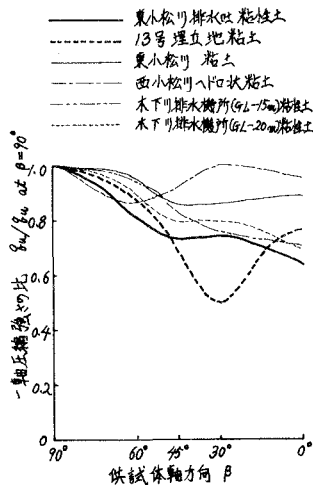
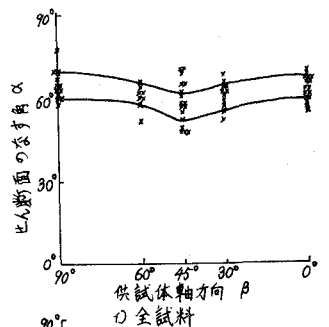
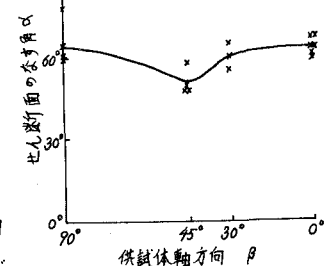


図-1 供試体軸方向の違いによる一軸圧縮強さの変化



① 全試料



② 埋立地盤の粘土

図-2 せん断面のなす角と供試体軸方向 β との関係

$\beta = 30^\circ$ での g_u は $\beta = 90^\circ$ のときの50%程度になる。また、沖積粘性土では応力 $\sim$ ひずみ曲線は $\beta = 90^\circ$ のときピークが明確に表われるが、 β が小さくなるにしたがってピークの発生が不明瞭となり、その発生時のひずみも大きくなっている。埋立粘土では、 $\beta = 45^\circ$ において、ピーク発生以前にせん断面が表われて破壊している。

図-2にみられるように、供試体に生じるせん断面の方向は最大主応力方向に対し、沖積粘性土では $\beta = 90^\circ, 0^\circ$ のとき60より若干大きい値になり、 $\beta = 45^\circ$ では $\beta = 90^\circ$ に対し5-7程度小さくなっている。一方、埋立粘土では $\beta = 45^\circ$ のときせん断面の方向はおおよそ60である。このことは、埋立粘土の g_u が $\beta = 30^\circ$ で非常に小さいことと考えあわせ、埋立粘土は沖積粘性土に比べ綿毛化構造があまり発達せず配向性が高い骨格構造を成していると考えられる。そして、配向面に沿ってすべり破壊が生じやすいことになる。

4. 圧密非排水三軸圧縮せん断特性
非排水せん断強さを決定するのは有効応力による粘着力 C' とせん断抵抗角 ϕ' および有効応力の变化、いいかえれば間げき水圧の挙動である。(1)に於て、粘土粒子の配向による骨格構造の異方性を非排水せん断強さの異方性に関連させるためには、1) C', ϕ' が配向面と供試体軸のなす角 β によっていかなる異方性を示すか、2) 間げき圧係数 A_f が β によっていかなる異方性を示すか、以上の二点を量的に決めることである。

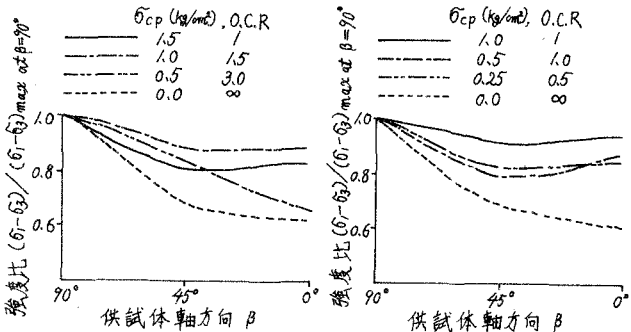


図-3 供試体軸方向 β の違いによる非排水せん断強さの変化
a) 沖積層地盤の粘性土 b) 埋立地盤の粘土

図-3には供試体軸方向の違いによる三軸圧縮試験による非排水せん断強さの変化を示してある。これによると、沖積粘性土については、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ は $\beta = 90^\circ$ に対し $\beta = 45^\circ$ では70~80%、 $\beta = 0^\circ$ では65%になり、 β が小さくなるにしたがって減少している。過圧密比が小さく正規圧密状態に近づくに(1)に於て、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ は、 $\beta = 45^\circ$ と 0° の差は小さくなり、 $\beta = 90^\circ$ に対し80~83%になっている。一方、埋立粘土は $\beta = 45^\circ$ で最小となる傾向を示している。沖積粘性土についての実験結果は図-4(a)に示すように、全応力表示で示すと $\beta = 45^\circ, 0^\circ$ の供試体の実験値はほぼ一直線上に来り、 $\beta = 90^\circ$ の供試体の実験値による直線の下になり、両直線はほぼ平行になる。有効応力表示で表わすと、 $\beta = 90^\circ, 45^\circ, 0^\circ$ の供試体の実験値は一直線上に来る。 C', ϕ' を求めると、 $\beta = 90^\circ$ で $C' = 0.07 \text{ kg/cm}^2$ 、 $\phi' = 38.0^\circ$ 、 $\beta = 45^\circ$ で $C' = 0.08 \text{ kg/cm}^2$ 、 $\phi' = 36.5^\circ$ 、 $\beta = 0^\circ$ で $C' = 0.08 \text{ kg/cm}^2$ 、 $\phi' = 36.5^\circ$ となり、供試体の軸方向によらず、 $C' = 0.07 \sim 0.08 \text{ kg/cm}^2$ 、 $\phi' = 36.5 \sim 38.0^\circ$ となり、 C', ϕ' はほぼ一定の値を示す。図-5(a)

は供試体軸方向とせん断破壊時の間げき圧係数 A_f の関係を示したものである。 A_f は過圧密比が大きくなるにしたがい小さくなる。また、過圧密比が大きいときの A_f は β が小さくなるにしたがって減する傾向にある。正規圧密のときの A_f は $\beta = 90^\circ$ で $A_f = 0.55$ 、 $\beta = 45^\circ$ で $A_f = 0.738$ 、 $\beta = 0^\circ$ で $A_f = 0.718$ となり、 $\beta = 90^\circ$ のときの A_f は $\beta = 45^\circ$ および 0° に比べてかなり小さな値となる。

埋立粘土についての実験結果は、

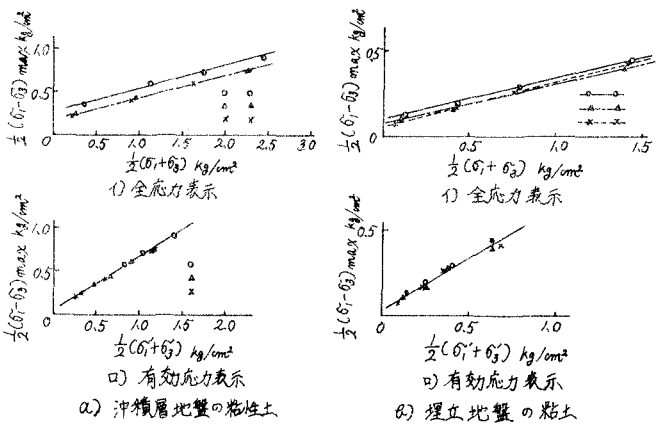


図-4 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ をせん断破壊とするときの全応力表示と有効応力表示
a) 沖積層地盤の粘性土 b) 埋立地盤の粘土

図-4(b)に示すように、全応力表示すると β の方向によって直線の傾きが若干変化している。また、有効応力表示すると一直線上に集りにくい。 C', ϕ を求めると、 $\beta = 90^\circ$ のとき $C' = 0.05 \text{ kg/cm}^2, \phi = 36.0^\circ$ 、 $\beta = 45^\circ$ のとき、 $C' = 0.07 \text{ kg/cm}^2, \phi = 31.0^\circ$ 、 $\beta = 0^\circ$ のとき $C' = 0.04 \text{ kg/cm}^2, \phi = 37.0^\circ$ となり、 $\beta = 45^\circ$ の中の値が $\beta = 90^\circ$ および $\beta = 0^\circ$ に対しかなり小さな値を示している。図-5(b)によると、正規圧密状態での A_f は $\beta = 90^\circ$ のとき $A_f = 0.676$ 、 $\beta = 45^\circ$ で $A_f = 0.718$ 、 $\beta = 0^\circ$ で $A_f = 0.799$ となり、 β が小さくなるにつれて A_f は増加する傾向が沖積粘性土に比べ強いが、 $\beta = 90^\circ$ のときに A_f は、 $\beta = 45^\circ$ および 0° に比べてかなり小さな値となる。

以上から、図-3にみられる供試体軸方向による非排水せん断強さの違いは、沖積粘性土の場合、 C', ϕ によらず、せん断破壊時に発生する間げき水圧の違い、すなわち供試体軸方向による A_f の違いによるものであると結論づけられる。このことは、DuncanとSeedの研究¹⁾、およびBishopの研究結果²⁾と一致する。一方、埋立粘土の場合についても、 A_f による影響が支配的であることにはかわりがないが、埋立粘土は沖積粘性土に比べ、綿毛化構造があまり発達せず、粘土粒子の配向性が強いと考えられるので、せん断面が配向面に近くなる場合、 ϕ は小さな値となり、 A_f は β が小さくなるのに比べて減する傾向がある。

5. 現地盤中における非排水せん断特性

円弧すべり面とすべり面に沿った最大主応力の働く方向を示した図が図-6である。これによると、現地盤中ですべり破壊が生じた場合、すべり面に沿って最大主応力の働く方向は初期の応力状態の最大主応力の方向とは違っている。飽和状態の土の非排水せん断中に発生する間げき水圧は、Skempton式

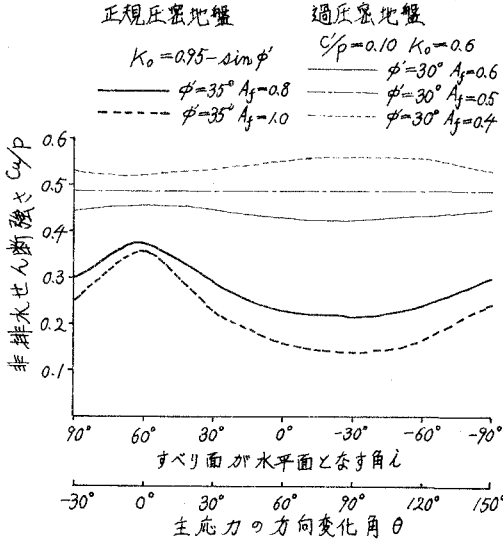


図-7 主応力の方向変化と非排水せん断強さ C_u/p の関係

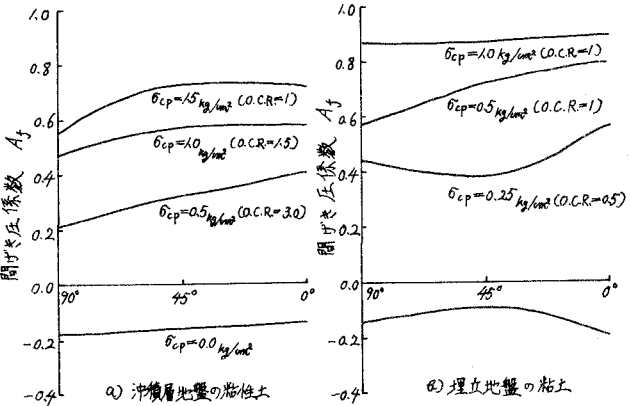


図-5 供試体軸方向の違いによる間げき圧係数 A_f の変化

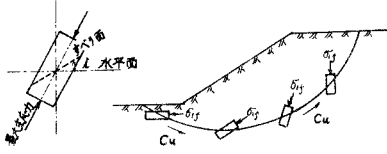


図-6 すべり面と破壊時に働く最大主応力の方向

$$\Delta u = \Delta \sigma_3 + A (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3) \quad (1)$$
 によって表わされる。式-1の $\Delta \sigma_1, \Delta \sigma_3$ は破壊時の最終応力状態と初期応力状態の主応力差によって表わされるのではなく、破壊に至るまでに作用する応力変化のその主応力成分を表わしている。したがって、主応力の方向変化($0 \sim 90^\circ$ の間で)が大きければ、発生する間げき水圧は大きくなり、非排水せん断強さは小さくなる。

現地盤中におけるすべり面の方向と非排水せん断強さ C_u の関係は、Hansen, J. B.とR. E. Gibsonによって平面ひずみの条件を考慮して求められている³⁾。その式に、Skemptonの入一理論による平面ひずみ条件における間げき圧係数 A_f と入の関係

$$A_f = 1 / (1 + \lambda) \quad (2)$$

を代入して、 C', ϕ 表示法で表わすと、現地盤中における非排水せん断強さは、次式によって表わされる。

$$\frac{C_u}{P} = \frac{C'}{P} \cos \phi + \frac{1}{2} (1 + K_0) \sin \phi' - \sin \phi' (2A_f - 1) \left\{ \left(\frac{C_u}{P} \right)^2 \frac{C_u}{P} (1 - K_0) \cos 2 \left(45 + \frac{\phi'}{2} - i \right) + \left(\frac{1 - K_0}{2} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

粘性土の正規圧密状態の場合に静止土圧係数 K_0 は *Brooker* の関係式 ($K_0 = 0.95 - \sin \phi'$) が適切である。したがって、沖積層軟弱地盤のような正規圧密状態での非排水せん断強さを求める場合、 $C' = 0$ と *Brooker* の式を式-3 に代入すればよい。正規圧密地盤と過圧密地盤について、すべり面の方向と C_u/P の関係を表わしたものが図-7 である。これによると、正規圧密粘土のように A_f が大きな値のとき、 C_u/P は主応力の方向変化が大きい場合小さくなる。一方、 A_f の値が小さくとき、主応力の方向変化が C_u/P に及ぼす影響は小さい。このように、主応力の方向変化による現地盤中の非排水せん断強さの低下は、正規圧密状態にある沖積層の軟弱な粘性土地盤の場合に考慮する必要があり、過圧密地盤につ

いては考える必要がない。図-8 は正規圧密地盤における C_u/P と ϕ' の関係。同様に、図-9 は C_u/P と A_f の関係を求めたものである。これによると、 ϕ' が C_u/P に及ぼす影響は小さく、 A_f は非常に大きいことがわかる。

以上から、現地盤における非排水せん断強さを決定するのは間引き水圧の挙動であると云える。したがって、 A_f の特性を正確に把握する必要がある。特に粘性土からなる沖積地盤では、 A_f が0.9に近い大きな値を取るため、すべり面に沿った現地盤中における非排水せん断強さを決定する場合、すべり面が水平に近いところでの強度低下は無視できないものと思われる。

6. おわりに

C' 、 ϕ' および A_f が土の骨格構造の異方性によって影響を受けず等方的であり、かつ、せん断破壊に至る応力経路の違いによって変化しないと仮定しても、沖積層軟弱地盤中における非排水せん断強さは、すべり面に沿って主応力が方向変化し、それによって低下をきたす。なお、強度低下に対し A_f の影響は著しく大きい。一方、実験結果から粘性土の骨格構造の異方性、非排水せん断特性に与える影響を検討すると、沖積層地盤の粘性土は供試体が水平面に近づくにつれて非排水せん断強さは低下し、配向性の強い場合には、すべり面が配向面に近くなるにしたがい低下する傾向がある。また、沖積粘性土の非排水せん断特性は、供試体軸方向によって C' 、 ϕ' は変化せず A_f のみが変化し、供試体軸が水平面に近いところで A_f は大きい。このことは、現地盤中での非排水せん断強さを考える場合、すべり面が水平面に近いところでは、主応力の方向変化による強度低下の傾向と、骨格構造の異方性による強度低下とが相乗されることになる。したがって、沖積層地盤において、基底破壊を起すようなすべり破壊に対する問題を検討する場合、すべり面が水平面に近いところでの非排水せん断強さの低下を考える必要がある場合も考えられる。

- 参考文献 1) James M. Duncan, H. Bolton Seed (1966): Anisotropy and Stress Reorientation in clay, ASCE, Vol. 92, No. SM5, pp. 21~50
2) A.W. Bishop, D.L. Webb, P.I. Lewis (1965): Undisturbed Samples of London Clay from the Ashford Common Soft: *Soils and Effective Stress Relationships*, Geotechnique, Vol. 15, pp. 1~31
3) J. B. Hansen, R.E. Gibson (1949): Undrained Shear Strength of Anisotropically Consolidated Clays, Geotechnique, Vol. 1, No. 3, pp. 149~204