

粘土の非排水せん断強度に及ぼす圧密時間の影響

EFFECT OF CONSOLIDATION PERIOD ON UNDRAINED SHEAR STRENGTH OF CLAY

上 俊二* (Shunji UE)

安原一哉** (Kazuya YASUHARA)

藤原東雄*** (Haruo FUJIWARA)

粘性土は様々な応力履歴 (Stress history) や時間履歴 (Time history) を受けることによって、その力学的性質が異なる。それゆえ、これらの異なった履歴を受けた地盤の挙動が相互にどのような関係にあるかを明らかにすることは土質工学上重要で興味ある問題である。本文では、特に粘土のせん断強度に及ぼす圧密時間の影響に着目し、三軸圧縮試験機により先行圧密時間を変化させた非排水せん断試験を行い、既知の正規圧密状態と過圧密状態のせん断強度をもとに未圧密状態から二次圧密状態に至る広範な時間履歴を受けた粘土のせん断強度を予測する方法を提案し、その妥当性を実験結果より明らかにする試みを行った。

キーワード：粘性土、圧密非排水せん断、応力履歴、二次圧密、せん断強さ、時間効果 D5/D6

1. まえがき

海洋および沿岸開発の発展にともない粘性土からなる海洋構造物の基礎地盤の力学的性質を明らかにすることが重要な問題とされている。このような海床土は粘性土が地質的年代にわたり堆積したものと考えられ、掘削や侵食あるいは地下水位の上昇による有効応力の解放などの複雑な地質学的履歴を受けるため、しばしば過圧密状態にあることが多いといわれている。¹⁾²⁾

これとは別に、一定の土かぶり圧で長時間圧密 (遅延圧密、または二次圧密) された地盤では正規圧密状態にもかかわらず、続成作用や膠結作用によって見かけ上過圧密土のような挙動を示すことが知られている。このような原因で引き起こされた過圧密土は通常の過圧密土と区別するために "見かけの過圧密土" あるいは、"擬似過圧密土" と呼ばれることがある。³⁾⁴⁾⁵⁾

一方、埋立地の軟弱地盤のように粘性土が急速に堆積し、一次圧密の進行が継続しているような地盤では圧密途中 (未圧密) と見なされ、圧密にともなう過剰間隙水圧が十分消散してないため有効応力が十分増加しておらず、強度や支持力が圧密が終了した土に比べて不十分になることが知られている。⁶⁾⁷⁾

このように粘性土は様々な応力履歴 (Stress history) や時間履歴 (Time history) を受けることによって、その力学的性質が異なる。それゆえ、これらの異なった履歴を受けた地盤の挙動が相互にどのような関係にあるかを明らかにすることは土質工学上重要で興味ある問題である。

本文では、特に粘土のせん断強度に及ぼす圧密時間の影響に着目し、既知の正規圧密土と過圧密土のせん断強度をもとに未圧密状態から二次圧密状態に至る広範な時間履歴を受けた粘土の圧密非排水せん断試験を行い、粘土の非排水せん断強度に及ぼす圧密時間の影響を明らかにする試みを行った。

* 徳山工業高等専門学校 土木建築工学科 助教授

** 茨城大学 工学部 都市システム工学科 教授

*** 徳山工業高等専門学校 土木建築工学科 教授

2. 異なる時間履歴を受けた粘土のせん断挙動に関する考察

2. 1 未圧密粘土のせん断強度特性

図-1は未圧密状態(圧密途中)における粘土の間隙比-圧密圧力(正規圧密状態での間隙比-圧密圧力の関係は直線と近似)、非排水せん断強度-圧密圧力の関係を示す模式図である。初期有効応力 p_o' より、載荷応力 Δp を載荷した後、一次圧密領域において排水を阻止すると Δu なる間隙水圧が残留する。このように圧密度が U_σ で間隙水圧が Δu だけ残留している要素の非排水強度 c_{ut} は次式で表される。

$$\begin{aligned} c_{ut} &= c_{uo} + (c_u/p) \cdot \Delta p \cdot U_\sigma \\ &= c_{uo} + m \cdot \Delta p \cdot U_\sigma \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、

- c_{uo} : 載荷前の非排水せん断強度
- (c_u/p) : 一次圧密終了時の強度増加率 (= m)
- Δp : 載荷応力
- U_σ : 応力に関する圧密度
- $U_\sigma = (\Delta p - \Delta u) / \Delta p$

また、三笠⁹⁾¹⁰⁾の研究によると、 $e - \log p$ 曲線に直線関係が存在する場合、 U_σ は次式で与えられる。

$$U_\sigma = \frac{[(p_n' / p_o')^{U_\varepsilon} - 1]}{[(p_n' / p_o') - 1]} \quad (2)$$

ここで、

- p_n' : 圧密応力
- $p_n' = p_o' + \Delta p$
- p_o' : 初期有効応力
- U_ε : ひずみに関する圧密度
- $U_\varepsilon = (e_o - e_t) / (e_o - e_n)$
- e_o : 初期間隙比
- e_t : 載荷 t 時間後の間隙比
- e_n : 一次圧密終了時の間隙比

三笠はさらに、未圧密状態(圧密途中)の U_σ は U_ε より遅れ、その遅れの程度は p_n' / p_o' に依存していることを指摘し、 $U_\sigma = U_\varepsilon = 100\%$ となる時、一次圧密が終了し、二次圧密状態に移行することを示している。正規圧密土の強度増加率は一次圧密終了時の有効応力と強度の比で表されているため、未圧密状態(圧密途中)における強度増加率も式(1)より次式で表される。

$$\left(\frac{c_u}{p}\right)_t = \frac{c_{ut} - c_{uo}}{\Delta p - \Delta u} = \left(\frac{\Delta c_u}{\Delta p}\right) = m \quad (3)$$

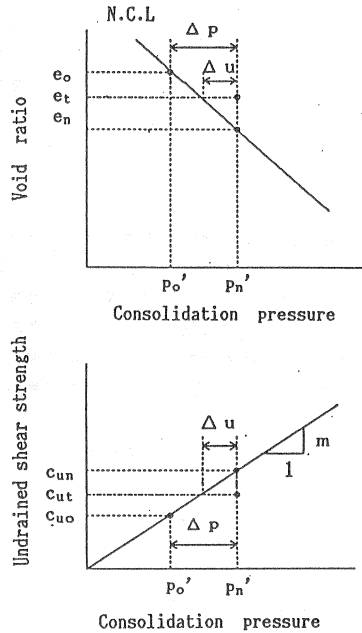


図-1. 圧密圧力-間隙比-非排水せん断強度の関係(未圧密状態)

すなわち、式(3)は圧密途中の強度増加率は有効応力で整理すると一次圧密終了時の強度増加率に等しいことを表している。

高山⁶⁾は、 U_e 、 U_σ と同様に、一次圧密中のせん断強度の増加割合(U_τ)を定義し、 U_σ と U_τ には相関関係があることを示し、式(1)の代わりに次式を提案している。

$$c_{ut} = c_{u0} + m \cdot \Delta p \cdot U_\tau \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{ここで、} U_\tau &= (c_{ut} - c_{u0}) / (c_{un} - c_{u0}) \\ &= 1 - (1 - U_\sigma)^{1/k} \quad (4 \cdot a) \end{aligned}$$

U_τ は、粘土の種類、その状態、圧密圧力 p と圧密降伏応力 p_c' の比(p/p_c')などに関係し、式中の実験定数 k は塑性の高い乱さない粘土では(p/p_c')の大きさにより $k=2\sim6$ の値をとり、繰り返した粘土では $k=1$ となることを示している。

以上のことから、未圧密土(圧密途中)の非排水せん断強度は圧密途中の圧密度を正確に予測できれば、一次圧密終了時の非排水せん断強度より予測できる。

2. 2 二次圧密をされた粘土のせん断強度特性

図-2は一次圧密が終了後、二次圧密された粘土の間隙比-圧密圧力、非排水せん断強度-圧密圧力の関係を示す模式図である。この図に示すように、一定の土被り圧 p_n' で堆積後、長時間圧密を受けると降伏応力はもはや p_n' ではなく、それよりも大きな p_c' なる降伏応力を有する⁴⁾。このように、長時間圧密された粘土は正規圧密状態にもかかわらず、過圧密土に類似した挙動を示すことが知られている³⁾。Bjerrum¹¹⁾はこの種の粘土を“正規圧密時令粘土(Normally-consolidated aged clay)”とよび、この場合の擬似過圧密比は堆積時間と塑性指数に依存することを明かにした。

応力除去にともなう過圧密土の研究は多くの研究者によってなされてきた¹²⁾¹³⁾。三田地ら¹⁴⁾やMayne¹⁵⁾らは、過圧密粘土と正規圧密粘土の非排水強さの比として次式を提案している。

$$\frac{\left(\frac{c_u}{p}\right)_{(OC)}}{\left(\frac{c_u}{p}\right)_{(NC)}} = n^{\Lambda_0} \quad (5-a)$$

ここで、添字(NC)は正規圧密粘土を、(OC)は過圧密粘土を意味している。また、 n は過圧密比、 Λ_0 は実験定数である。図-2によると、 p_c' より p_n' まで除荷された過圧密土の非排水せん断強度は c_{uc} から c_{u0} まで低下するものと考え、式(5-a)は次式のように書き換えられる。

$$\frac{\left(\frac{c_{u0}}{p_n'}\right)_{(OC)}}{\left(\frac{c_{uc}}{p_c'}\right)_{(NC)}} = n^{\Lambda_0} \quad (5-b)$$

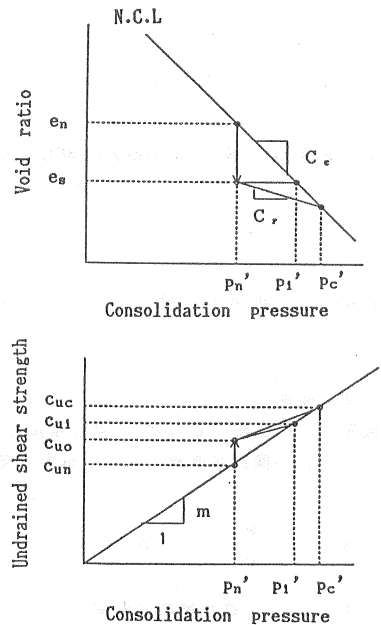


図-2. 圧密圧力-間隙比-非排水せん断強度の関係(二次圧密状態)

図-2のように圧密圧力 p_n' における過圧密粘土の c_{uo} を既知の正規圧密粘土の c_{un} から予測する場合、式(5-b)は次式のように書き換えられる。

$$\frac{\left(\frac{c_{uo}}{p_n'}\right)_{(OC)}}{\left(\frac{c_{un}}{p_n'}\right)_{(NC)}} = n^{\lambda_0} \quad (6-a)$$

すなわち、

$$\frac{c_{uo}}{c_{un}} = n^{\lambda_0} \quad (6-b)$$

を得る。いま、正規圧密土の強度増加率を m とすると、圧密圧力 p_n' における正規圧密土の非排水せん断強さは次式で表される。

$$\begin{aligned} c_{un} &= m \cdot p_n' \\ &= \frac{c_{uc}}{p_c'} p_n' = c_{uc} \left(\frac{1}{n}\right) \end{aligned} \quad (7)$$

また、式(6-b)と式(7)より次式が得られる。^{5) 20)}

$$\frac{c_{uo}}{c_{uc}} = \frac{c_{uo}}{c_{un}} \cdot \frac{1}{n} = n^{\lambda_0 - 1} \quad (8)$$

したがって、式(6-b)、式(7)より次式を得る。

$$c_{uo} = m \cdot p_n' \cdot n^{\lambda_0} \quad (9)$$

いま、除荷に伴って c_{uc} から低下した過圧密土の非排水せん断強度 c_{uo} は p_n' なる圧力で時間 t_1 ほど長時間圧密(二次圧密)され c_{un} より増加した擬似過圧密土の非排水せん断強度 c_{uo} と等価であり、二次圧密中の $e - \log t$ 関係が直線になると仮定する^{5) 21)}と、擬似過圧密比 n_a は理論的には、

$$n_a = \left(\frac{p_c'}{p_n'}\right) = \beta \left(\frac{t_1}{t_0}\right)^{\lambda / (1 - \lambda)} \quad (10)$$

ここで、 t_0 : 一次圧密終了時間

t_1 : 圧密時間

$R = C_\alpha / C_c$

(C_c : 圧縮指数、 C_α : 二次圧密係数)

$\lambda = Cr / C_c$ (Cr : 再圧縮指数)

β : エージング効果の程度を示す実験定数

となるのが村上¹⁶⁾およびMesri¹⁷⁾によって提案されている。上式で β は 1.0~1.1 くらいの値をとるらしいことが村上の実験によって指摘されている。おそらくこの値は、土の物性にも依存するものと考えられる。なお、ここで近似的に $Cr / C_c = C_s / C_c$ (C_s : 膨潤指数)と仮定する。

さて、前述したように応力除荷による過圧密比 n と二次圧密による擬似過圧密比 n_a が等価と仮定すると、式(10)を式(6-b)へ代入して、次式を得る。

$$\frac{c_{u0}}{c_{un}} = \beta^{\Lambda_0} \left(\frac{t_1}{t_0} \right)^{R \cdot \Lambda_0 / (1-\lambda)} \quad (11)$$

よって、二次圧密された粘土の非排水せん断強度は次式で表される。

$$c_{u0} = m \cdot p_n \cdot \beta^{\Lambda_0} \left(\frac{t_1}{t_0} \right)^{R \cdot \Lambda_0 / (1-\lambda)} \quad (12)$$

上式で重要なことは式中のパラメータ Λ_0 、 R 、 λ を決定することである。このうち Λ_0 を決める方法として、以下のような式が提案されている。

$$\Lambda_0 = 1 - C_s / C_c \quad (\text{Hayne}^{15):1980} \quad (13)$$

(山下ら^{10):1981)}

$$\Lambda_0 = 0.805 \left(1 - C_s / C_c \right) + 0.0305 \quad (\text{Hayne}^{15):1980} \quad (14)$$

$$\Lambda_0 = \frac{1}{n} \ln \left(\frac{M}{2m} \right) \quad (\text{北郷ら}^{19):1980} \quad (15)$$

$$\Lambda_0 = \frac{1}{1+n} \ln \left(\frac{M}{2m} \right) \quad (\text{北郷ら}^{19):1980} \quad (16)$$

ここで、 M : 限界状態における有効応力比
 m : 正規圧密土の非排水せん断強度増加比

式(15)、(16)はカムクレイモデル、修正カムクレイモデルより求められたものである。

次に実験定数 $R (=C_\alpha / C_c)$ を決定するために、他の研究者^{21) 22) 23) 24) 25) 26)} によって行われた実験データより、 R と塑性指数 I_p の関係を図-3 に示す。この図に示すように R と I_p の関係には多少のばらつきがあるものの塑性指数 I_p の増加により R は増加する傾向がある。

また、実験定数 $\lambda (=C_s / C_c)$ についても、Hayne¹⁵⁾ のデータより λ と塑性指数 I_p の関係について整理すると図-4 を得る。 λ についても多少のばらつきがあるものの I_p と相関性があることがわかる。

Hayne¹⁵⁾ のデータをさらに、 $\Lambda_0 / (1-\lambda)$ と塑性指数 I_p の関係に整理しなおして図-5 を得た。これも同様のばらつきがみられるものの I_p の増加にともなって $\Lambda_0 / (1-\lambda)$ の値が低下しているのがみられる。以上の

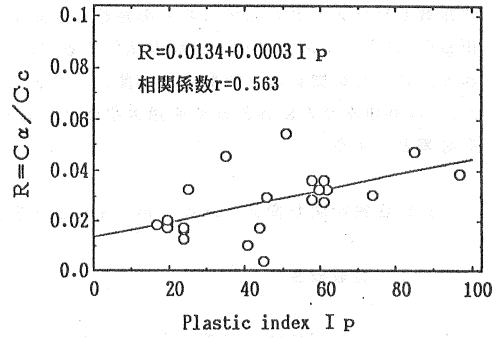


図-3. R と塑性指数 I_p の関係

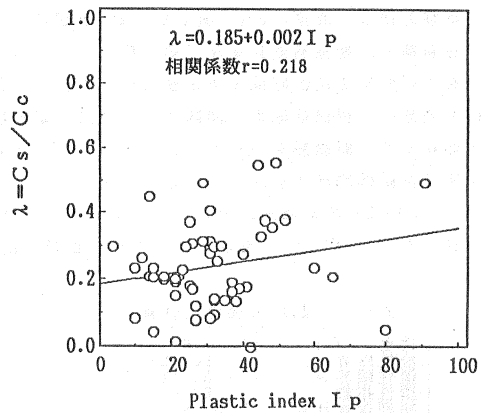


図-4. $(1-\lambda)$ と塑性指数 I_p の関係

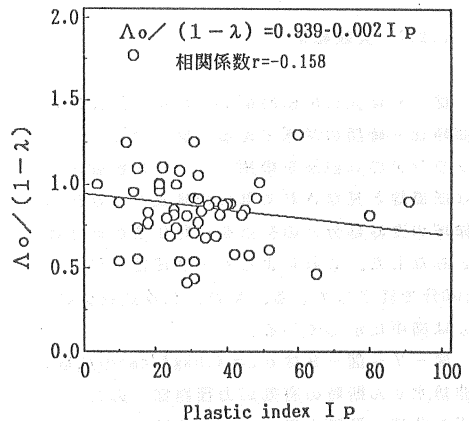


図-5. $\Lambda_0 / (1-\lambda)$ と塑性指数 I_p の関係

結果より、式(12)中の実験定数 Δo 、 R 、 λ については、塑性指数 I_p と相関性があることがわかり、簡便的に塑性指数をパラメータとしてこれらの定数を決定できる可能性があることがわかる。このような考え方は飯塚、太田ら²⁷⁾によるシステマチックな方法があるが、ここで提案された方法はそれに比べ、簡便であるところが特徴である。これらの図には、実験式(相関式)を記入している。ただ後述する計算結果によれば、これによって求めた Δo は非排水せん断強度がやや過大な値となるため、いずれにしてもこの Δo の選定については今後一層の調査を必要としよう。

3. 先行圧密時間を変えた繰返し再圧密粘土の非排水三軸圧縮試験

3. 1 実験概要

実験に用いた試料は福岡県苅田港より採取した沖積粘土である。試料は液性限界以上の含水比($w=150\%$)でよく繰返した後、大型圧密容器のゴムスリーブ(直径30cm、高さ40cm、厚み4mm)内に試料を詰め、 0.6kgf/cm^2 の拘束圧で3週間等方応力状態で予圧密を行った。用いた試料の物理的性質を表-1に示している。

実験方法は、直径3.5cm、高さ8.5cmの供試体を三軸室にセットし、圧密段階より 1kgf/cm^2 のバックプレッシャーを負荷し、初期有効拘束圧(等方圧) $\sigma_c=0.6\text{kgf/cm}^2$ で3時間等方圧密を行った後、所定の有効拘束圧まで圧力を上げ所定の圧密時間まで圧密を行った。その後所定の圧密時間になると排水バルブを閉じて一定時間(3時間)放置し、供試体底部の間隙水圧の増加が定常状態になったのを確認した後、一定のひずみ速度($0.08\%/min$)で非排水せん断試験を行った。排水はペーバードレーンを供試体周囲に巻き、周囲方向の排水のみを行った。間隙水圧は供試体底部で測定した。また、メンブレンからの透水がないように、セル内を脱気水で満たし、実験はすべて、 $20\pm 2^\circ\text{C}$ の恒温室内で行った。実験条件を表-2に示す。これとは別に前述の非排水強さの予測に必要なパラメータ C_c 、 C_s と Δo を決定するために標準圧密試験、応力除去による過圧密粘土の三軸圧縮試験を実施した。

表-1. 試料の物理的性質

比重	Gs	2.67
液性限界	WL	90 (%)
塑性限界	WP	30 (%)
塑性指数	Ip	60
初期含水比	w	78~82 (%)
土質分類	CH	

表-2. 試験条件

圧密圧力 σ_c (kgf/cm ²)	先行圧密時間 t	
2.0	15min	90min
3.0	30min	1day
4.0	60min	30day

3. 2 実験結果と考察

3.2.1 実験結果

図-6は先行圧密時間30日の等方圧密時の間隙比-時間の関係である。図中ではキャサグランデのlogt法を準用し、一次圧密領域のほぼ直線と見なされる部分の延長と二次圧密領域の直線部分との交点を一時圧密の終了時とみなした。これによると一次圧密は90~100分で終了している。また、二次圧密係数 C_α は図中に示している。

図-7~図-9は $\sigma_c=4.0\text{kgf/cm}^2$ の試験の非排水せん断時の有効応力径路図、応力~ひずみ曲線、間隙水圧~ひずみ曲線を示したものである。これらの図より先行圧密時間が長

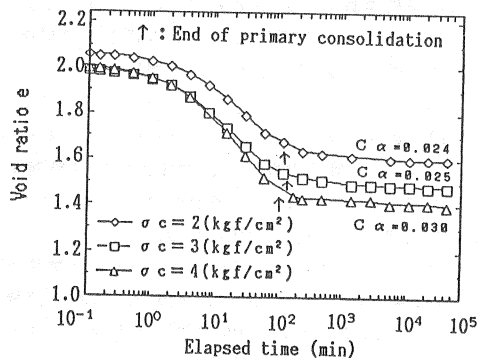


図-6. 等方圧密時の間隙比と時間の関係

くなる程せん断強度が増加していることが明かである。また、先行圧密時間が30日の長時間圧密された供試体ではせん断初期における間隙水圧の発生量が少なく、応力ひずみ曲線の立ち上がり急になり、土構造が硬化していることがわかる。図-7において、破壊時〔 $(\sigma_1/\sigma_3)_{max}$ 〕の応力状態は有効応力で整理すると先行圧密時間の短いものでは破壊線よりやや上側に位置する。これは三軸供試体の排水バルブを閉じたとき、供試体内の間隙水圧分布が平均化されるため外周部では過圧密状態となったものと考えられる。

図-10は非排水せん断時の間隙水圧係数 A_r と先行圧密時間の関係を示したものである。先行圧密時間が短い（一次圧密終了時までの）試験では間隙水圧係数 A_r はほぼ一定の値を示すが、二次圧密状態に移行し、先行圧密時間が長くなると A_r は減少する傾向にあることがわかる。

図-11は非排水せん断時の非排水せん断強度（拘束圧 p で正規化）と先行圧密時間の関係を示したものである。非排水せん断強度は先行圧密時間とともに増加しているが、ある時間（一次圧密終了時）を境にその増加率が変化していることがわかる。

図-12は全応力で整理した圧密圧力と非排水せん断強度の関係である。今回使用した供試体の予圧密時の拘束圧($p_0 = 0.6 \text{ kgf/cm}^2$)における非排水せん断強度を原点として、先行圧密時間毎に非排水せん断強度と圧密圧力には直線的な比例関係があることが明かである。先行圧密時間が一次圧密終了時付近に相当する90分の試験では原点を通る直線となり、正規圧密土の強度増加比 $m = 0.4$ を得る。

図-13は破壊時〔 $(\sigma_1/\sigma_3)_{max}$ 〕の非排水せん断強度と平均有効主応力の関係である。有効応力で整理する限り、先行圧密時間の長短にかかわらず、破壊時の応力状態はほぼ同一の破壊線上に集合することが明かである。この直線の勾配より圧密時間に依存しない強度定数 $\phi' = 27^\circ$ を得た。

以上の実験結果より、粘土の非排水せん断強度特性は一次圧密終了時を境に変化することが明かである。本文では一次圧密終了時 ($t_{100} = 90 \text{ min}$) より短い先行圧密時間

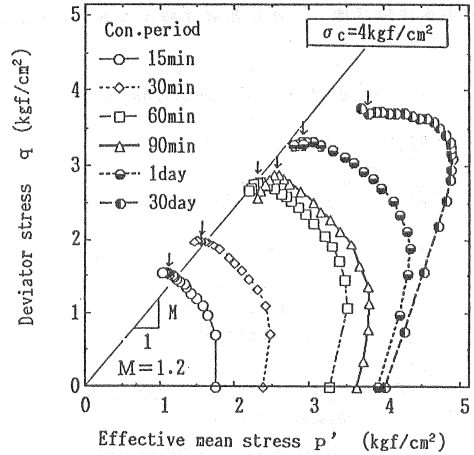


図-7. 非排水せん断時の有効応力経路

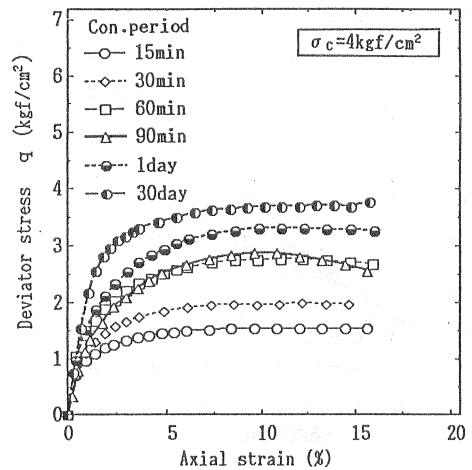


図-8. 非排水せん断時の軸ひずみと偏差応力の関係

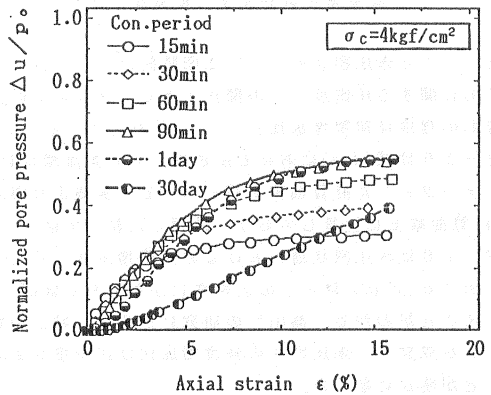


図-9. 非排水せん断時の軸ひずみと間隙水圧の関係

の試験を未圧密状態、一次圧密終了時より長い先行圧密時間の試験を二次圧密状態として取り扱うことにする。

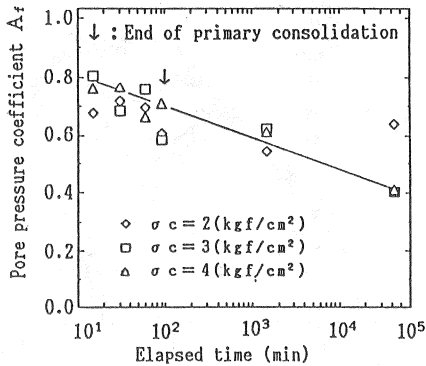


図-10. 先行圧密時間と間隙水圧係数 A_f の関係

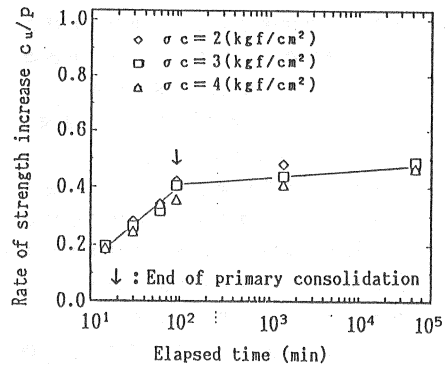


図-11. 先行圧密時間と非排水せん断強度の関係

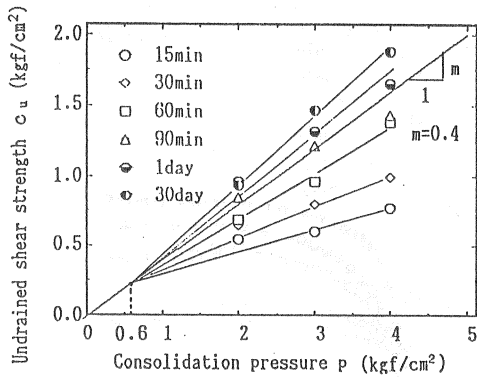


図-12. 圧密圧力(全応力)と非排水せん断強度の関係

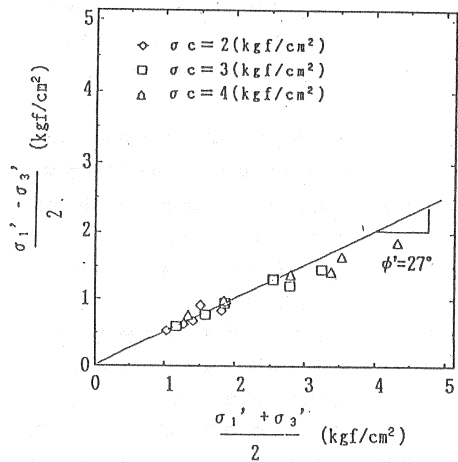


図-13. 破綻時の平均有効主応力と非排水せん断強度の関係

3.2.2 未圧密状態の非排水せん断強度の予測

図-14は未圧密状態(先行圧密時間15分、30分、60分)における式(2)におけるひずみに関する圧密度 U_ε と応力に関する圧密度 U_σ の関係である。図中には計算曲線を一緒に載せているが、 U_σ は U_ε より遅れ、その遅れの程度は荷重増加比 p/p_0 に依存していることがわかる。

図-15は式(4.a)における圧密度 U_σ と強度増加に関する圧密度 U_τ の関係である。図中には、実験定数 k をパラメータとした計算曲線を載せている。実験より得られた両者は多少のばらつきはあるもののほぼ実験定数 $k=1$ の計算曲線上に位置しており、繰返した粘土では $U_\sigma = U_\tau$ が成立することがわかる。

図-16は未圧密状態における強度増加比 (c_u/p') と U_σ の関係である。両者には多少のばらつきはあるものの (c_u/p') は U_σ の大きさにかかわらずほぼ一定の値を示し、一次圧密終了時の強度増加比 $m=0.4$ と一致することがわかる。高山⁶⁾の研究によると、粘土の骨格構造の影響を考慮にしないでよい繰返し粘土では $U_\tau = U_\sigma$ が成立し、未圧密時の強度増加比は圧密度によらず一定となることを示しているが、今回の実験でも同様なことが明らかになった。

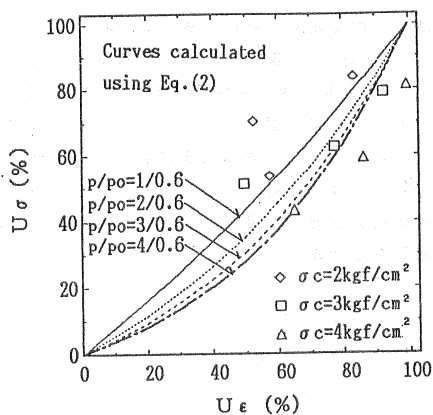


図-14. 圧密度 $U\epsilon$ と圧密度 $U\sigma$ の関係

以上の結果より、練返し粘土の未圧密状態における非排水せん断強度を式(1)用いて計算を行った。図-17は実験より求められた非排水せん断強度と計算により求められた非排水せん断強度を比較したものである。両者はほぼ同一の直線上にあり、練返し粘土の未圧密状態におけるせん断強度は一次圧密終了時の非排水せん断強度と応力に関する圧密度がわかれば式(1)を用いて推定できることが明かになった。

3.2.3 二次圧密状態の非排水せん断強度の予測

二次圧密状態での非排水せん断強度を予測に必要な式(12)に含まれる実験定数 λ 、 R 、 $\Delta\sigma$ を決定するために、標準圧密試験より得られた $e - \log p'$ 曲線を図-18に示す。また、初期圧密圧力 $\sigma_c = 2.0 \text{ kgf/cm}^2$ で圧密された後、応力除去による過圧密状態で行われた三軸圧縮試験による非排水強度比と過圧密比の関係を図-19に示す。これらの図中には、実験より得られた実験定数の値をそれぞれ記入している。

また、前述した実験定数 $\Delta\sigma$ については各研究者の提案している推定式、式(13)、(14)、(15)、(16)より得られた値と実験値との比較を表-3に示しているが、Modified Cam-clayモデルによる式(16)より得られた値が最も実験値に近いことがわかる。この点は、今後さらに検討が必要である。

表-3. 実験定数 $\Delta\sigma$ の比較

$\Delta\sigma$ (Experiment)		0.580
$\Delta\sigma = 1 - C_s/C_c$ (13)		0.865
$\Delta\sigma = 0.805(1 - C_s/C_c) + 0.0305$ (14)		0.724
$\Delta\sigma = \ln(H/2m)$ (15)		0.405
$\Delta\sigma = 1/\ln 2 \cdot \ln(H/2m)$ (16)		0.585

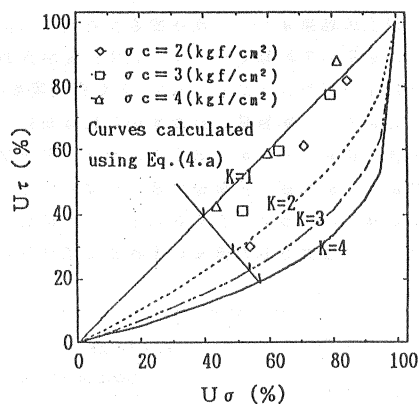


図-15. 圧密度 $U\sigma$ と圧密度 $U\tau$ の関係

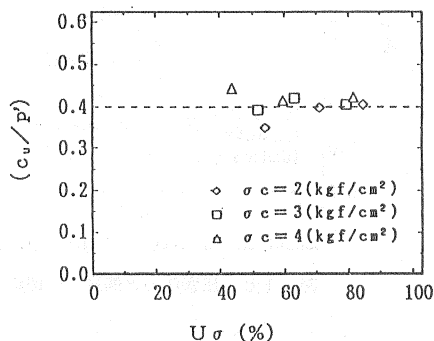


図-16. 圧密度 $U\sigma$ と強度増加比 $(c_u/p)'$ の関係

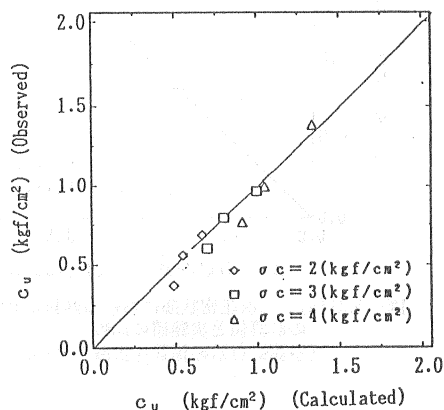


図-17. 未圧密状態における非排水せん断強度の計算値と実験値との比較

以上の結果より、二次圧密された粘土の非排水せん断強度を一次圧密終了時の非排水せん断強度をもとに式(12)を用いて計算を行った。式中の実験定数 $\beta=1$ として、図-20(a)は実験より求められた非排水せん断強度と式中のパラメータ R 、 Λ_0 、 λ を直接実験より求め、計算による非排水せん断強度とを比較したものである。これによると、実験値と計算値の対応は良好であることがわかる。さらに、図-20(b)は式(12)中のパラメータを簡便に決定するために式中のパラメータを図-3および図-5より求めた計算値と実験値との対応を示したものである。計算値と実験値は多少のばらつきはあるが、両者の対応はほぼ良好である。これらのことから、推定式には多くのパラメータを含んでいるものの、そのパラメータの値を正確かつ簡便に推定できる方法が提案されればここで提案された強度の予測法は工学的により一層有意義となるであろう。

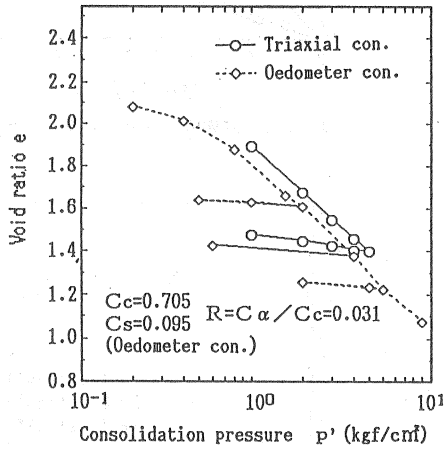


図-18. 圧密圧力と間隙比の関係

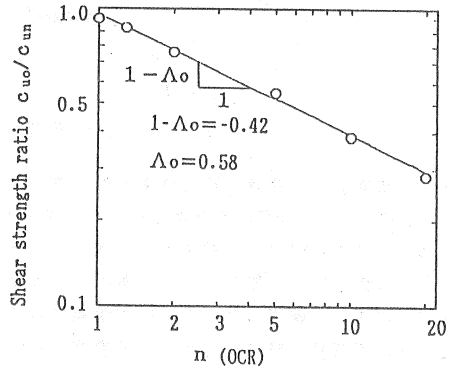


図-19. 過圧密比と非排水せん断強度の関係

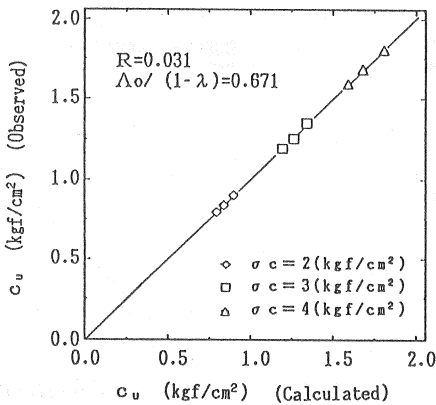


図-20(a). 二次圧密状態における非排水せん断強度の計算値と実験値の比較 (予測式(12)の係数を実験より決定)

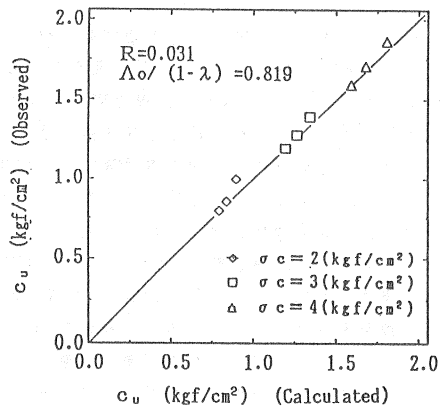


図-20(b). 二次圧密状態における非排水せん断強度の計算値と実験値の比較 (予測式(12)の係数を I_p をパラメータとして決定)

4. あとがき

本文では、粘土の非排水せん断強度に及ぼす圧密時間の影響を調べるために、先行圧密時間を変化させた非排

水三軸圧縮試験を行い、試験結果を全応力および有効応力の立場から考察した。また、先行圧密時間の異なる粘土の非排水せん断強度（未圧密状態と二次圧密状態での非排水せん断強度）を予測する方法を紹介し、その妥当性を実験結果と比較することにより確かめた。その結果、次のような結論が得られた。

- 1) 粘土の非排水せん断強度は先行圧密時間が長くなると二次圧密が進行し増加する。また、一次圧密終了時を境にその強度増加率が変化する傾向がある。
- 2) 有効応力で整理した強度定数 ϕ' は先行圧密時間、応力履歴などの影響を受けず、一定の値を示す。
- 3) 一次圧密中に排水を阻止した粘土（未圧密状態）の非排水せん断強度は一次圧密終了時のせん断強度をもとに予測できる。
- 4) 長時間圧密され、見かけ上過圧密状態になった粘土（二次圧密状態）の非排水せん断強度は応力除去による過圧密粘土の強度を評価する実験式を基本とした予測式(12)で予測でき、この予測式に含まれる実験定数 $\Delta\sigma$ 、 R 、 λ は塑性指数 I_p をパラメータとして決定できる可能性がある。

参考文献

- 1) Wroth, C.P. and Parry, R.H.G (1977): Chapter 4 "Shear stress-strain properties". *Soft Clay Engineering* (edited by E.W. Brand and R.P. Brenner), pp.309-364, Elsevier Scientific Pub. Co. LTD.
- 2) 中瀬明男(1984): 土木学会編 新体系土木工学 海洋土質, 技報堂出版.
- 3) Leonards, G.A and R.M. Ramiah (1959): Time effects in the consolidation of clay, ASTM, STP, No.254, pp.116-130.
- 4) Bjerrum, L.(1967) : Engineering geology of Norwegian normally-consolidated marine clays as related to settlements of buildings, *Geotechnique*, Vol.17, No.2, pp.81-118.
- 5) 安原一哉、平尾和年、藤原東雄、上 俊二 (1985): 擬似過圧密粘土のせん断特性, 土と基礎, Vol.33, No.3, pp29-35.
- 6) 高山昌照(1983): 圧密途中における粘土の強度増加, 農業土木学会論文集, 第109号, pp.61-69.
- 7) Ikuo Towhata and Kim Seung Ryull (1990) : Undrained strength of underconsolidated clays and its application to stability analysis of submarine slopes under rapid sedimentation, *Soils and Foundations* Vol.30, No.1, pp.100-114.
- 8) 三笠正人(1963): 軟弱粘土の圧密—新圧密理論とその応用—, 鹿島出版会.
- 9) 三笠正人、木下哲生(1970): 粘性土の圧密時間とせん断強さについて、第25回土木学会年次講演会講演概要集, pp.159-162.
- 10) 三笠正人、木下哲生、高田直俊(1971): 粘性土の圧密時間とせん断強さについて (第2報), 第6回土質工学研究 発表会講演集, pp.137-140.
- 11) Bjerrum, L. and Lo, K, Y (1963): Effect of aging on the shear strength properties of normally-consolidated clay, *Geotechnique*, Vol.8, No.2, pp.83-118.
- 12) 中瀬明男、小林正樹、勝野克(1969): 圧密および膨潤による飽和粘土のせん断強度の変化, 港湾技術研究所報告, Vol.8, No.4, pp.104-143.
- 13) Nakase, A. and Kobayashi, M.(1971) : Change in undrained shear strength of saturated clay due to rebound, Proc. 4th Asian Reg. Conf. SMFE, Vol.2, pp.147-150.
- 14) Mitachi, T. and Kitago, S.(1976): Change in undrained shear strength characteristics of saturated remolded clay due to swelling, *Soils and Foundations*, Vol.16, No.1, pp.45-58.
- 15) Mayne, P.W. (1980): Cam-clay predictions of undrained strength, Proc. ASCE, Vol.106, GT.11, pp.1219-1242.
- 16) Murakami, Y.(1979): Excess pore-water pressure and preconsolidation effect developed in normally consolidated clay with some age, *Soils and Foundations*, Vol.19, No.4, pp.17-29.
- 17) Mesri, G. and Y. K. Choi (1979) : Excess pore water pressure during consolidation, Proc. 6th

- Asian Reg. Conf. SMFE, Vol.1, pp.151-154.
- 18) 山下ほか (1981): 飽和粘性土の非排水せん断強度に関する考察, 第16回土質工学研究発表会講演集, pp.321-324.
- 19) 北郷繁, 三田地利之, 小野丘 (1982): 過圧密粘性土の非排水せん断強度, 第17回土質工学研究発表会講演集, pp.365-368.
- 20) Yasuhara, K. and Ue, S.(1983): Increase in undrained shear strength due to secondary compression, Soils and Foundations, Vol.23, No.3, pp.50-64.
- 21) Kamei, T. , Ogawa, S. and Tanaka, N. (1987): The variation in undrained shear characteristics during consolidation process, Soils and Foundations, Vol.27, No.3, pp. 91-98.
- 22) 小田美明、三田地利之、木藤勇人(1989): 粘性土の非排水せん断挙動に及ぼす圧密時間の影響, 土木学会論文集第412号, pp.117-126.
- 23) Yasuhara, K. and Ue, S.(1984): Increase in undrained shear strength due to secondary compression (closure), Soils and Foundations, Vol.24, No.3, pp.115-119.
- 24) 安原一哉、平尾和年(1985): 繰返し荷重を受けた飽和粘土の非排水せん断特性, 土木学会論文集, 第364号, pp.113-122.
- 25) Yasuhara, K. et al.(1988): Effects of long-term K_0 -consolidation on undrained strength of clay, Proc. Intn'l. Conf. Rheology and Soil Mechanics, pp.273-287.
- 26) 山田洋右(1986): 粘土の二次圧密特性に関する研究, 土木学会論文集, 第370号, pp.251-260.
- 27) Iizuka, A. and Ohta, H. (1987): A determination procedure of input parameters in elasto-viscoplastic finite element analysis, Soils and Foundations, Vol.27, No.3, pp.71-87.