九州大学学術情報リポジトリ Kyushu University Institutional Repository

圧密に伴う粘土の強度増加に関する研究

梅崎,健夫

https://doi.org/10.11501/3081243

出版情報:九州大学, 1994, 博士(工学), 論文博士 バージョン: 権利関係:

第5章 圧密に伴う粘土の強度増加の 評価法¹⁾

5.1 序 説

粘土の圧密と非排水強度に関する研究は、圧密とせん断における時間効果、例えば、二次圧密の評価や非排水強度に及ぼす圧密時間およびせん断速度の影響などのように、今な お解明すべき課題を抱えている.

本章は、これら課題のうち、一次圧密から二次圧密までの全ての圧密過程において圧密 時間の異なる粘土の非排水強度の増加を評価するための手法^{1).2)}を提案するものである. このことは、実務設計においては、軟弱粘土地盤上の埋立や盛土施工における基礎地盤の 安定問題、プレローディングおよびバーチカルドレーン工法などの強度増加を目的とした 地盤改良の照査などに関わる日常的で重要な課題でもある.

問題を簡略化するために、Fig. 5.1(a)に示すような飽和軟弱粘土地盤が半無限の等分布 荷重(△p)を受けた場合の安定問題を考える. 一様な正規圧密状態にある軟弱粘土地盤の すべり破壊においては, 地盤の透水性が極めて低いために, 通常せん断強度は非排水強度 として捉えられる. しかしながら, 軟弱粘土地盤の非排水強度は圧密の進行とともに増加 するのでその増加量を的確に予測する必要がある. Fig. 5.1(b)~(d)は, 一次圧密過程にお ける間隙水圧の減少量(△u), 間隙比の減少量(△e)および非排水強度の増加量(△Cu) の場所的時間的変化を模式的に示したものである. 第2章において論じたように, 排水而 からの距離に応じて地盤内の有効応力や間隙比(含水比)が異なるので, 一次正密過程に おける非排水強度の増加量は地盤内においてすべて一定ではなく場所的時間的に異なる. さらに, 軟弱粘土地盤においては間隙水圧消散後も二次圧密が長期間にわたり継続して生 じるので, 非排水強度はその分だけさらに増加する. したがって, 全応力法による軟弱粘



Fig. 5.1 Undrained shear strength of soft clay ground during consolidation

土地盤の支持力(qm.x)は、図中のaおよびb点のような潜在すべり面上の非排水強度 (Cu)を加え合わせた値として算定されるので、圧密時間に依存するだけでなく、そのと きのすべり面の位置や大きさによって異なる。以上のことより、軟弱粘土地盤の安定問題 においては、地盤全体の平均的な強度増加量ではなく、Fig. 5.1(b')~(d')に示すような地 盤内の任意の分割層ごとの非排水強度を圧密の進行に応じて的確に評価することが重要で ある。

変形のひずみ速度依存性を考慮した一次元圧密理論に関するLowe³, Leroueilら⁴,および今井ら⁵の最近の研究は, Fig. 5.2(a)に示すように,二次圧密を含む全ての圧密過程に おける間隙比(e)の変化が,鉛直有効応力(p')とひずみ速度(e=-de/dt)の関数とし て次式のように表されることを理論的・実験的に示している.

 $e = f_{1}(\hat{e}, p')$ (5.1)

(5.1)式はFig. 5.1(b')~(d')に示したような軟弱粘土地盤の各分割層ごとに成り立ち⁵⁾, この圧密理論によれば、圧密過程における有効応力と間隙比の関係は、Fig. 5.2(a)に示す ように、二次圧密を含む全ての圧密過程を通じて正規圧密線から逸脱した経路を辿り、ま た、各分割層ごとの間隙比の経時変化はFig. 5.2(b)のように表される. このように、変形 のひずみ速度依存性を考慮した一次元圧密理論は、二次圧密を含めた全ての圧密過程にお ける地盤内の任意の分割層ごとの圧密の進行を評価するための有効な手法である. しかし ながら、(5.1)式は、Fig. 5.2(a)に示すように、従来より広く認識されてきた圧密過程にお ける有効応力と間隙比の一義性を否定するものであり、また、(5.1)式を適用する場合には、





従来の圧密度に代わって圧密の進行の程度を評価するための新たなパラメータを定義する 必要がある.

飽和粘土の非排水強度(Cu)は次式のように定義される.

$$Cu = (\sigma_{1} - \sigma_{3})_{max} / 2$$
 (5.2)

ここで, σ₁, σ_sはそれぞれ最大, 最小主応力である.

第4章に論じたように, 圧密時間の異なるK₀圧密・平面ひずみ三軸圧縮試験の結果から 練返し粘土の間隙比(e)と非排水強度(Cu)の間には二次圧密を含む全ての圧密過程にお いてe-log Cuの直線関係が成り立つことを示した⁶⁾(Fig. 5.3).また一方で, 三笠⁷⁾は 土のせん断強度(τ_i)は次式の影響因子により決定されるとしている.

T i = f 2 (土の種類, 密度, 含水比,

骨組構造,有効応力) (5.3)

これらのことから, 圧密過程における粘土の非排水強度に関してより一般的に表現するな



Fig. 5.3 Relation between void ratio and undrained shear strength during consolidation

らば、次式で示されるように、間隙比の減少量(△e)と非排水強度の増加量(△cu)の 間に一義的関係が成り立つものと考えられる.

$$\triangle Cu = f_3 (\triangle e)$$

(5.4)

以上のことより,二次圧密過程を含む全ての圧密過程における粘土の非排水強度の増加 を評価するためには,変形のひずみ速度依存性を考慮した一次元圧密理論と圧密過程にお ける間隙比の減少量と非排水強度の増加量の一義性の経験則を合理的に結び付けることが 重要である.

5.2 換算圧密応力に基づく強度増加の 評価法

変形のひずみ速度依存性を考慮した一次元圧密理論と圧密過程における間隙比の減少量 と非排水強度の増加量の一義性の経験則を合理的に結び付けることにより、一次圧密から 二次圧密までの全ての圧密過程における飽和粘土の非排水強度を評価するための簡便な手 法を提案する^{1).2)}.

5.2.1 圧密応力の評価 一換算圧密応力ー

一次元圧密過程における供試体内の任意の分割要素(実地盤内の任意の分割層に相当す る)の鉛直有効応力(p')と間隙比(e)および非排水強度(Cu)の関係をそれぞれ Fig. 5.4(a), (b)に示す.鉛直有効応力poで正規圧密された粘土(Fig. 5.4(a)のA点)が鉛直応力 p_1 で圧密される過程 $(A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E)$ を考える.変形のひずみ速度依存性を考慮した一次 元圧密理論に依れば、A点の粘土が載荷を受けると、正規圧密線(Fig. 5.4 (a)のN.C.L)か ら逸脱した経路(A→B→C)を辿り、間隙水圧が消散した後に正規圧密線上のC点に達する. さらに、圧密時間が長くなると有効応力一定のもとで間隙比は減少しC→D→Eの経路を辿る。 一方, 圧密過程における粘土の非排水強度を考えると, 間隙水圧が消散した後の二次圧 密過程(C→D→E)においては、非排水強度は有効応力一定のもとで増加し、D、E点にある 粘土の非排水強度はそれぞれFig. 5.4(b)のD', E'点で表される. E点と同じ間隙比をもち, かつ正規圧密線上にあるK点の非排水強度について考える. K'点で表される非排水強度をも つ粘土は、鉛直有効応力p2の下でA,C点の粘土と同じ時間の圧密を受けたものであり、間隙 水圧が完全に消散している. E点とK点の粘土は、それぞれ圧密応力はp1, p2と異なってい るが,間隙比の減少量(△e = eo - e2)は等しい.したがって, (5.4)式で示した間隙比 の減少量と非排水強度の増加量の一義性の経験則より両者の非排水強度(Cu₂)は等しく, それぞれFig.5.4(b)のE', K'点で表される.以上のような考え方に基づき圧密過程の非排 水強度を評価するためには強度増加に影響を及ぼす圧密応力を新たに評価することが重要 である



Fig. 5.4 Key sketch for evaluating undrained shear strength during consolidation

異なる圧密応力で一定時間圧密され一次圧密が終了した粘土の間隙比(e)と鉛直有効応 カ(p')の関係を連ねた線を基準線(正規圧密線)とする.e-p'面上において,圧密過程 (A→B→C→D→E)の任意の状態を間隙比一定として基準線上に投影し,対応する圧密応力 を "換算圧密応力(p*:conversion stress)"と定義する.例えば、一次圧密過程のB点 における粘土の換算圧密応力はF点で表され,同様に、二次圧密過程のD点における換算圧 密応力はG点で表される.すなわち,換算圧密応力を用いることにより全ての圧密過程にお ける間隙比の減少量を正規圧密線上で統一的に評価するものである.また、Fig.5.4(b)に 示すように、正規圧密線上の粘土(A,F,C,G,K点)においては非排水強度が圧密応力に 比例して増加するので、非排水強度と換算圧密応力の間には圧密時間に無関係に比例関係 が成立すると考えられる.したがって、換算圧密応力を用いることにより全ての圧密過程

以上のことより,まず,換算圧密応力の定式化を行う.Fig.5.4(a)に示すe-p'面上の正 規圧密線は,有効応力を対数表示すると直線になるため,次式で表される.

 $e = e_N - \lambda \cdot \ln p$

(5.5)

(5.6)

ここで, e_Nはp=1における間隙比, λ=0.434C。(C_e:圧縮指数)である. 換算圧密応力(p₁*)は(5.5)式から間隙比の関数として次式ように表される.

 $p_t^* = p_0 \cdot \exp\{(e_0 - e_t)/\lambda\}$

ここで、eoおよびpoはそれぞれ応力増加前の間隙比および圧密応力, e₁およびp₁*はそれ ぞれ任意の圧密時間tにおける間隙比および換算圧密応力, λ=0.434C。(C_e: 圧縮指数) である.

5.2.2 圧密の進行の評価
 一圧密進行係数一

換算圧密応力を定義したことにより一次圧密から二次圧密までの全ての圧密過程における圧密の進行程度も評価することができる.ここで,従来の圧密度に代わる新たなパラメ

ータとして"圧密進行係数(Cp*: coefficient of consolidation process)"を次式のように定義する.

$$Cp^{*} = \frac{\Delta p^{*}}{\Delta p} = \frac{p_{1}^{*} - p_{0}}{p_{1} - p_{0}}$$
$$= \frac{exp \{(e_{0} - e_{1})/\lambda\} - 1}{exp \{(e_{0} - e_{ret})/\lambda\} - 1}$$
(5.7)

ここで、 Δp (= p_1 - p_0) および Δp^* (= p_1^* - p_0) はそれぞれ載荷応力および換算圧 密応力の増分、 e_0 および p_0 はそれぞれ応力増加前の間隙比および圧密応力、 e_1 および p_1^* は それぞれ任意の圧密時間tにおける間隙比および換算圧密応力、 $\lambda = 0.434C_{\circ}$ ($C_{\circ}: 圧縮指数$) であり、 e_{r+1} は載荷応力 (p_1) で基準時間圧密されたときの間隙比 (Fig. 5.4(a)において は $e_{r+1} = e_1$) であり基準線(正規圧密線)上にある.

圧密進行係数(Cp*)は、(5.7)式から分かるように、間隙比の減少量のみの関数として表 され、一次圧密過程においては0≤Cp*≤1であり、二次圧密過程においてはCp*>1の値とな る.

5.2.3 換算圧密応力に基づく強度増加 の評価式

全ての圧密過程における間隙比の減少量を正規圧密線上で統一的に評価するために換算 圧密応力を定義した.正規圧密線上の粘土においては非排水強度が圧密応力に比例して増 加するので,非排水強度と換算圧密応力との間には圧密時間に無関係に比例関係が成立す ると考えられる.したがって,換算圧密応力に基づく強度増加率(Cu₁/p₁*)は,Fig.5.4 (b)に示すように,圧密応力の大きさや圧密時間に無関係に全ての圧密過程において一定で あるという仮定が成り立つと考えられる.

 $(Cu_t/p_t^*) = (Cu/p)_{r \in f_t}$ $= (\Delta Cu_t/\Delta p_t^*) = \text{const.}$ (5.8)

ここで、(Cu/p) rer. は一次圧密終了後の基準時間における強度増加率である. (5.8)式が成り立つと仮定すると、(5.7)式から二次圧密を含む全ての圧密過程における任意の圧密時間tにおける非排水強度の増加量(△Cu₁)の評価式は次式のように誘導される.

 $\triangle Cu_{\iota} = Cu_{\iota} - Cu_{0}$ $= (Cu/p)_{ref.} \cdot \triangle p \cdot Cp^{*}$

(5.9)

(5.9)式は, 第1章において論じた強度増加率と圧密度に関する既往の評価法^{8)~14)}((1.4)式)と同じ形式である.

また, Fig. 5.4(b)に示すように, (Cu/p) -線が原点を通る場合((Cu/p) ref.=(Cuo/po))においては, (5.9)式は次式のように書き換えられる.

 $Cu_t = Cu_0 \cdot exp \{(e_0 - e_t)/\lambda\}$ (5.10)

ここで、Cu₁およびe₁はそれぞれ新たな載荷応力の下での任意の圧密時間tにおける非排 水強度および間隙比、Cu₀およびe₀はそれぞれ応力増加前の非排水強度および間隙比、λ= 0.434C_e(C_e:圧縮指数)である.

(5.10)式は, 第1章で概説したように, Schofieldら¹⁵)が与えた(1.3)式と同等であり, 二次圧密過程において安原ら¹⁴)が与えた(1.8)式と一致する.

任意の圧密時間tにおける非排水強度(Cu,)が圧密過程における間隙比の減少量(e,) のみの関数として表された.以上のことをまとめるとFig. 5.5のようになる.



Fig. 5.5 Concept of a proposed method for evaluating undrained shear strength during consolidation

5.3 検証のための強度試験

5.3.1 試験の概要

Fig. 5.1で示したような軟弱粘土地盤内の分割層の圧密に伴う強度増加特性を検討し評価 法の検証を行うためには、原位置試験や模型実験を実施して、コーン貫入試験やベーンせ ん断試験などのサウンディングから地盤内の強度を測定し、同一層からサンプリングした 試料の含水比や間隙比と対応させることが直接的な方法である.この方法による評価法の 検証は第6章において論じている.一方、応力・変形条件や圧密条件の設定が容易である ことから、既往の研究においても室内土質試験が実施されることが多い.ただし、室内土 質試験においてはFig. 5.1(b')~(d')に示すような一次圧密過程における分割層の非排水強 度を厳密に再現することは困難である.そこで通常の試験においては、次の(1),(2) に示すような工夫をして近似的にその非排水強度を求めている.さらに、(3)は間隙水 圧制御装置(P.C.D.)を用いて圧密過程における地盤内の一つの分割層を再現した三軸圧 縮試験である.詳しくは第3章の3.1を参照されたい.

(1) Ko圧密・平面ひずみ三軸圧縮試験⁶⁾

新たに開発・作製した試験装置により、一次圧密から二次圧密までの全ての圧密過程に おける圧密時間の異なるKo圧密・平面ひずみ三軸圧縮試験(KoPUC)を実施した. 試料は 練返した有明粘土である. その物理特性および試験条件はTable 5.1 (表記のAriake 3)お よびTable 5.2に示す. 一次圧密過程(圧密時間10~120 min.)においては、平面ひずみ圧 縮試験を行う前に非排水状態を約1時間保つことにより、供試体内の間隙水圧の均一化を図 り、圧密度をできるだけ均一化した後の非排水強度を測定している^{9).16)}. 試験の詳細は 第4章を参照されたい.

(2) 定体積一面せん断試験

高山¹¹)は、円筒容器内で一次圧密過程にある試料を切り出して、その後直ちに非圧密定 体積一面せん断試験を実施している.一方、圧密定体積一面せん断試験も実施されている. この場合には、鉛直応力を所定の圧密時間まで載荷した後、定体積状態を保つように鉛直 応力を制御することで供試体の圧密度を均一化し、引き続き定体積せん断を実施する.こ の圧密定体積一面せん断試験が既往の研究^{11)~13).17).18)}において最も多く行われている.

~		Soil properties		Test conditions				Evaluation parameters				
Sample Name		Gs	W L (%)	Ip	e o	р _о (kPa)	Cu ₀ (kPa)	р 1 (kPa)	Cc	e ref.	(Cut/pt*) ref.	t ref. (min.)
	Nankou 17)	2.607	83.2	44.3	1.432	107.8	36.0	294.0	0.512*	1.223	0.333	180
	17) Yokosuka	2.660	94.0	50.7	1.852	107.8	36.0	294.0	0.588*	1.572	0.360	150
ay	Souka 12)	2.670	82.6	61.8	1.524	39.2	11.0	117.6, 352.8	0.508*	1.269	0.281	1440
ed cl	Ariake 1 13)	2.650	115.0	58.0	2.066	58.8	11.0	107.8, 215.6	0.735•	2.155	0.356	120
Re olde	Ariake 2 ¹¹⁾	2.641	49.7	88.2	2.223	0	0.4	294.0	0.895*	1.796	0.332	63
	Ariake 3 ⁶⁾	2.63	105	70.0	2.263	78.4	34.3	156.8	0.803	2.105	0.400	1440
	Kaolin 21)	2759	75.7	39.4	1.588	156.8	31.5	313.6	0.650	1,386	0.200	480
	Kaolin 21)	2759	75.7	39.4	1.711	117.6	24.2	294.0	0.650	1.422	0.200	600
clay	Izumikita ¹⁷⁾	2.660	88.0	55.4	1.969	882.0	283.6	980.0	0.702**	1.267	0.322	240
Undis, bed o	Ariake 4 ¹¹⁾	2.626	124.9	70.1	3.007	27.4	8.2	294.0	2.260	1.929	0.300	63
	Ariake 5 ¹¹⁾	2.605	131.0	82.2	3.429	27.4	7.4	294.0	2.290	2.336	0.357	63
	Ariake 6	2.53	110.0	70.0	3.210	29.4	11.6	49.0-98.0	1.500	2.53	0.355	180

Table 5.1 Soil properties, test conditions and evaluation parameters on laboratory tests

*Cc=0.007(wL-10), **Cc=0.009(wL-10) (Terzaghi & Peck)

Table 5.2	Test cases	$(K_0 PUC)$
addie o in	reor eases	

Test cases	Consolidation time	Initial void ratio**	Void ratio***	Symbols
No.1 *		2.341		\bigcirc
No.2	10 min.	2.290	2.200	
No.3	20 min.	2.288	2.171	\triangle
No.4	40 min.	2.308	2.158	Δ
No.5	90 min.	2.230	2.090	
No.6	120 min.	2.292	2.122	
No.7	1 day	2.326	2.101	\bigcirc
No.8	2 days	2.314	2.093	
No.9	20 days	2.284	2.042	
No.10	70 days	2.255	1.999	\bigtriangledown

* Test case on a condition on 1 day consolidation under p=78.4 kPa

** Void ratio on 1 day consolidation under p=78.4 kPa

*** Void ratio at any consolidation time under p=156.8 kPa

Table 5.1に試料の物理特性および試験条件を示す.

(3) P.C.D.を用いた三軸圧縮試験²¹⁾

セラミックディスクを用いた間隙水圧制御装置(P.C.D.)を供試体の周面からの排水経路 中に挿入することにより、一次圧密過程における供試体を要素(応力とひずみが均一)と して評価することができる等方圧密軸対称三軸圧縮試験(CU with P.C.D.)を実施した. 試料は、低塑性のカオリンである.その物理特性および試験条件はTable 5.1 (表記の Kaolin)に示す.試験条件の詳細は第3章のTable 3.2を参照されたい.

5.3.2 評価法のパラメータの決定

検証に用いた室内土質試験^{6).11)~13).17).18).21)}における評価法のパラメータの一覧 をTable 5.1に示す.

①圧縮指数(C_e):標準圧密試験より決定されるが、その値が不明な既往の試験に対しては、欄外に示したTerzaghi & Peck¹⁹の推定式より算定した.

②基準間隙比(eref.): 圧密応力piの下で基準圧密時間(tref.)だけ圧密されたときの間隙比である.ただし、基準圧密時間は、一次圧密が完全に終了する時間以上の圧密時間とし、実際には3t法などの試験基準を参考にして決定する.

③強度増加率((Cu/p) r.r.): (Cu/p) r.r.=(Cu1 - Cu0)/(p1 - p0)として求める.

ここで、poとCuoはそれぞれ初期の圧密応力と非排水強度であり、Cuiteronに対応する非排水強度である.

以上の3つのパラメータを計算定数として、各試験の任意の圧密時間tにおいて実測された 間隙比(e₁)を(5.7),(5.9)式に代入することにより、非排水強度の計算値を算定した.

5. 4 室内土質試験に基づく提案法の検証

5.4.1 換算圧密応力の検証

まず提案した評価法の基本となる換算圧密応力をKo圧密・平面ひずみ三軸圧縮試験(KoPUC)により検証する.

(1) 換算圧密応力に基づく強度増加率

実際の鉛直有効応力(p')と換算圧密応力(p*)の違いを定量的に比較するために,一次圧密から二次圧密までの全ての圧密過程における両者の関係をFig.5.6に示す.ただし, 供試体の圧密は周面排水で行い,供試体底面中心の間隙水圧(u)を測定している.供試体 の有効応力は,間隙水圧消散時における間隙水圧の放物線分布を仮定して,p'=p-(2/3)uと して算定した²⁰⁾.換算圧密応力は,一次圧密過程において有効応力よりも遅れて増加し, 間隙水圧が消散して有効応力が一定となる二次圧密過程においても間隙比の減少とともに 増加する.

第4章において, 圧密過程における非排水強度は有効応力に比例するのではなく, 強度 増加率(Cu/p)は圧密時間に大きく依存して異なることを示している. Fig. 5.7は, 換算圧 密応力(p*)と非排水強度(Cu)の関係を示したものである. 全ての圧密過程において非 排水強度は換算圧密応力と比例関係にあることを示している. すなわち, 換算圧密応力を 用いることにより強度増加率を有効応力の大きさや圧密時間に無関係に一定として取り扱 うことができるものと考える.

(2) 圧密進行係数

換算圧密応力に基づいて算定される圧密進行係数(Cp*)と有効応力およびひずみに関する圧密度(Up=(p,'-po)/(p₁ - po)および U ε =(eo - e₁)/(eo - e₁,.))の関係をそれ ぞれFig. 5.8とFig. 5.9に示す.Upに用いた有効応力は,Fig. 5.6と同様に,p'=p-(2/3)uと して算定したものである. 圧密進行係数と有効応力に関する圧密度の関係はFig. 5.6におけ る換算圧密応力と有効応力の関係と同様である.一方,ひずみに関する圧密度と圧密進行 係数はいずれも二次圧密過程においても間隙比の減少とともに増加し全ての圧密過程にお ける圧密の進行程度を表示することができる. 圧密進行係数は,Fig. 5.9に示すように,一 次圧密過程においてはひずみに関する圧密度より遅れて進行し,長期の二次圧密過程にお



Fig. 5.6 Relation between effective stress and conversion stress



Fig. 5.7 Relation between undrained shear strength and conversion stress



Fig. 5.8 Relation between degree of consolidation in terms of effective stress and coefficient of consolidation process



Fig. 5.9 Relation between degree of consolidation in terms of vertical strain and coefficient of consolidation process

いては幾らか速く進行する.

Fig. 5. 10は,全ての圧密過程における非排水強度の増加量(△Cu)と圧密進行係数(Cp*)の関係を示したものである.非排水強度の増加量と圧密進行係数は圧密時間に無関係 に比例関係にあることを示している.したがって,Fig. 5.7とFig. 5.10の結果から,一次圧 密から二次圧密までの全ての圧密過程における非排水強度の増加量が換算圧密応力を用い ることにより合理的に評価できることが示された.



Fig. 5.10 Relation between increase in undrained shear strength and coefficient of consolidation process

5.4.2 計算結果と試験結果の比較

K₀圧密・平面ひずみ三軸圧縮試験(K₀PUC)とP.C.D.を用いた三軸圧縮試験(CU with P.C.D)を含む既往の室内土質試験の結果^{6)、11)~13)、17)、18)、21)と(5.9)式による計算結 果を直接比較することにより評価法の適合性の検証を行う.}

(1) 練返し粘土に対する適合性

Fig. 5. 11およびFig. 5. 12 (a) (b) は, それぞれK₀圧密・平面ひずみ三軸圧縮試験 (K₀PUC) とP.C.D.を用いた三軸圧縮試験 (CU with P.C.D) における評価法の適合性を示したもので ある. 一次圧密から二次圧密におけるいずれの場合に対しても評価法の適合性はかなり良 好である.





Fig. 5. 13は, Table 5. 1のうちカオリンを除いた全ての練返し粘土の試験に対する評価法 の適合性を示したものである.一連の試験における一次圧密過程と二次圧密過程の状態の 違いをそれぞれ図中の白抜きおよび黒塗りの記号で区別して示した.適合性の低い結果も 幾らか見られるが,基準圧密時間の設定や圧縮指数を推定していることを考慮すれば評価 法の適合性の結果は一次圧密から二次圧密まで概ね良好であると考える.

(2) 不攪乱粘土に対する適合性

Fig. 5.14は不攪乱粘土に対する評価法の適合性を示したものである.粘土粒子の骨組構 造が発達した不攪乱鋭敏粘土においては,三笠⁷⁾や高山¹¹⁾が指摘するように,非排水強度 は骨格構造の影響を無視し得ない.不攪乱鋭敏粘土の圧密過程においては圧密応力による 初期の骨格構造の破壊と密度増加および骨格構造の再構成が生じると考えられる.提案し た評価法は骨格構造の影響を考慮していないがFig. 5.14に示した適合性の結果は比較的良 好のようである.ただし,5.3.2で述べたように,対象とする応力範囲(p₀→p₁)に おける圧密応力の増分(△p)に対する非排水強度の増加(△Cu)の割合(△Cu/△p)を強 度増加率((Cu/p)_{ref})として用いている.また,圧縮指数はそれぞれ一定値を用いて ^{いるが,}不攪乱鋭敏粘土の圧縮指数は応力範囲により異なることが知られている.したが って,応力範囲に応じた強度増加率と圧縮指数を用いることが重要であると考えられる.



Fig.5.12 Comparison of measured and calculated values of undrained shear strength during consolidation (CU with P.C.D)



Fig. 5.13 Comparison of measured and calculated values of undrained shear strength during consolidation (Remolded sample)



Fig. 5.14 Comparison of measured and calculated values of undrained shear strength during consolidation (Undisturbed sample)

5.5 結論

変形のひずみ速度依存性を考慮した一次元圧密理論と圧密過程における間隙比(含水比) の減少量と非排水強度の増加量の一義性の経験則を結び付けることにより、一次圧密から 二次圧密までの全ての圧密過程における飽和粘土の非排水強度の増加を評価する手法を提 案した.計算結果と既往の試験結果を含む各種の試験結果を比較することにより評価法の 検証を行った.主な結論は以下のようである.

- (1) 変形のひずみ速度依存性を考慮した一次元圧密理論と圧密過程の強度増加特性を結び 付けるためには強度増加に影響を及ぼす圧密応力を新たに評価することが重要である.
- (2) 新たな圧密応力パラメータとして"換算圧密応力(p*: conversion stress)"を定 義した.換算圧密応力は、圧密過程における間隙比の減少量のみで算定されるものであ り、間隙水圧の有無に無関係に全ての圧密過程において定義される.
- (3) 圧密過程を評価するための新たなパラメータとして"圧密進行係数(Cp*:coefficient of consolidation process)"を定義した. 圧密進行係数は、従来の圧密度に代わるものであり、換算圧密応力に基づいて算定されるので二次圧密を含む全ての圧密過程における圧密進行の程度を表すことができる.
- (4) 換算圧密応力は一次圧密過程において実際の有効応力よりも遅れて進行する. 練返し 粘土の非排水強度は、有効応力に比例するのではなく、換算圧密応力と比例関係にある ことを示した. すなわち、換算圧密応力を用いることにより強度増加率を間隙水圧の有 無に無関係に全ての圧密過程を通して一定として取り扱うことができる.
- (5) 圧密進行係数は応力およびひずみに関する圧密度のいずれよりも遅れて進行する. 練返し粘土の非排水強度の増加量は、圧密度に比例するのではなく、圧密進行係数と比例 関係にある.
- (6) 以上の考察により、二次圧密を含む全ての圧密過程における飽和粘土の非排水強度の 評価式を圧密進行係数と強度増加率を用いて誘導した.換算圧密応力に基づいて誘導さ れた評価式は、圧縮指数および基準時間における間隙比と強度増加率を計算定数として、 間隙比の減少量のみの関数として表される.
- (7) 練返し粘土に対する本評価法の適合性は、室内土質試験(三軸試験および一面せん断 試験)において概ね良好であった.

(8) さらに、不攪乱粘土に対する適合性を室内土質試験において検討した.その結果も比較的良好であった.この場合、対象とする応力範囲に応じた強度増加率と圧縮指数を用いることが重要であると考えられる.

参考文献

- 1) 梅崎健夫・落合英俊: 圧密過程における粘土の非排水強度の評価法, 土木学会論文集 No.505/Ⅲ-29, pp.307-317, 1994.
- 2) Takeo Umezaki, Hidetoshi Ochiai and Shigenori Hayashi : Undrained shear strength of clay during consolidation, 11th Southeast Asian Geotechnical Conference, pp. 269-274, 1993.
- Lowe, III, J. : New concepts in cnsolidation and settlement analysis, Journal of Geotechnical Engineering. Division, A. S. C. E., Vol. 100, No. GT6, pp. 574-611, 1974.
- Leroueil, S., Kabbaj, M., Tavenas, F. and Bouchard, R : Stress strain strain rate relation for the compressibility of sensitive natural clays, Geotchnique, Vol.35, No. 2, pp. 159-180, 1985.
- 5) Goro Imai : A unified theory of one-dimensional consolidation with creep, Proc. 12th I.C.S.M.F.E., Vol. 1, pp. 57-60, 1989.
- 6) 梅崎健夫・落合英俊・林重徳:K₀圧密・平面ひずみ状態における粘土の非排水強度
 特性,土木学会論文集No.505/Ⅲ-29, pp.257-265, 1994.
- 7) 三笠正人:土質試験法(第2回改訂版),土質工学会編, p.6-1-5, 1979.
- 8) 土質工学会編:軟弱地盤の調査・設計・施工法,土質工学会, p. 202, 1966.
- 9) Ikuo Towhata and Kim Seung Ryull : 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, 1990.
- 10) Toyotoshi Yamanouchi, Norihiko Miura, Noboru Matsubayashi and Naozou
 Fukuda : Soil improvement with quicklime and filter fabric, A.S.C.E, Vol. 108,
 No. GT7, pp. 953-965, 1982.
- 11) 高山昌照: 圧密途中における粘土の強度増加-有明粘土の土質工学的性質について
 (Ⅳ) -, 農業土木学会論文集, Vol. 109, pp. 61-69, 1984.
- 12) 外崎明・似内政康・赤石勝・稲田倍穂:一次元圧密における圧密度と強度増加の関係,

七と基礎, Vol. 34, No. 12, pp. 5-9, 1986.

- 13) Kazuya Yasuhara and Syunji Ue : Increase in undrained shear strength due to secondary compression, Soils and Foundations, Vol. 23, No. 3, pp. 50-64, 1983.
- 14) 安原一哉・平尾和年・藤原東雄・上俊二:擬似過圧密粘土のせん断特性,土と基礎,
 Vol. 33, No. 3, pp. 29-35, 1985.
- 15) Schofield, A. N. and Wroth, C. P. : Critical state soil mechanics, McGraw-Hill, London, 1968.
- 16) Kazutoshi Hirao and Kazuya Yasuhara : Cyclic strength of underconsolidated clay, soils and Foundations Vol. 31, No. 4, pp. 180-186, 1991.
- 17) 三笠正人・木下哲生・高田直俊: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概要集, pp. 137-140, 1971.
- 18) 梅崎健夫・落合英俊・林重徳:不攪乱粘土の圧密による強度増加,土木学会第48回年 次学術講演会 Ⅲ, pp.964-965,1993.
- 19) 星埜訳: Terzaghi and Peck 新版土質力学基礎編, 丸善.
- 20) 特殊圧密試験方法に関する研究委員会:委員会報告 1,特殊圧密試験に関するシンポジウム発表論文集,土質工学会, pp. 27-84, 1988.
- 21) 第3章 一次圧密過程における粘土の強度増加特性, pp.54-88.