

## 先行圧縮効果を有する粘性土の強度特性

### Pre-compression Effects on Strength of Cohesive Soils

李 啓 春・大 根 義 男・成 田 国 朝・奥 村 哲 夫  
Gye Chun LEE, Yoshio OHNE, Kunitomo NARITA, and Tetsuo OKUMURA

ABSTRACT: Pre-compression effects on strength properties and slope stability of cohesive soils were investigated in this paper. Several element tests were carried out on strength of compacted soils, to examine relationships of pre-compression stress  $p_c$  with compaction conditions, fine content of materials, and other mechanical parameters. Strength reduction of unsaturated compacted soils due to wetting were then studied to know appropriate strength parameters for use in short and long-term stability analyses. Also noted were strength reduction properties of cemented soils of natural slope due to initial stress release by cutting and cyclic change of effective stresses caused by up-down movement of water level. Some stability analyses were finally done by use of FEM, by introducing the results obtained above, to investigate the effect of stress history on stability of slopes.

#### 1. はじめに

盛土や自然斜面等、我々の身の回りには色々な形で土質構造物が存在しているが、それを形成している材料の力学的性質を正確に把握して、安全性の高い構造物を合理的に設計することは、土木技術者に課せられた重要な役割である。

締め固めた土や自然斜面などで見られる固結した土は、共に、土粒子間の骨格構造の形成によって高い強度を保持することが一般に知られている。しかし、この種の土の力学特性を詳細に調べた研究はあまりなく、設計・施工時に解明すべき多くの問題を抱えているのが現状である。

例えば、締め固め土の場合、転圧時の先行圧縮効果によって過圧密粘土に類似した力学特性を示すことが知られているが、それがどの程度のもので実際の設計にどう反映させれば良いのかについては未だ十分に議論されていない。特に先行圧縮応力前後で力学特性がかなり異なる傾向が認められ、大規模な盛土

土構造物ではこの影響によって斜面の表層と内部で強度・変形特性が異なり、堤体の安定性評価に対して複雑な問題が存在している。また、フィルダム等の水利構造物では貯水後飽和することになるが、これによる堤体材料の強度変化（低下）特性についても不明な部分が残されている。

一方、地質的年代を経た土は、長期間に亘る堆積（agingやセメンテーション効果）によって固結した堅固な状態にある。しかし、この種の土は掘削や地下水位の変動によって過圧密な状態に移行したり、風化によって固結の程度が変化すると考えられるが、それらの特性等も十分明らかにされていない。

本研究は、締め固め土および固結土に共通した擬似過圧密下の強度特性を定体積一面せん断試験によって調べたものである。締め固め土に関しては、先行圧縮応力前後の強度特性および浸水飽和による強度低下の特性、固結土に関しては応力変動に伴う強度低下特性について考察を加えた。また、締め固め土の実験で得られた強度特性を取り入れて盛土の非線形FEM解析を行い、斜面の安定性と強度特性との関

係を議論した。なお、本研究は第1筆者が修士論文として行った成果を取りまとめたものである。

2. 締め固め土の先行圧縮応力( $p_c$ )の特性

2.1 試料及び実験

実験に用いた試料は表-1に示す試料I~IVの4種類である、試料Iは学内から採取したシルト質砂、試料IIおよび試料IIIは、試料Iに破碎した泥岩とカオリンの混合土(重量比 5:5)を重量比で30%および50%混入したもの、試料IVは破碎した泥岩だけのものである。図-1に各試料の粒径加積曲線を、また図-2には締め固め曲線( $E_c:100\%$ )と試験点の関係を示している。実験には $\phi 60\text{mm} \times h 20\text{mm}$ のせん断箱を有する改良型一面せん断試験装置を使用した。供試体は図-2の各試験点での締め固め状態に対応するようにせん断箱内で圧縮機を用いて静的に締め固めて作製した。

2.2 実験結果及び考察

図-3は、実験結果の一例として、各試料のc点(締め固めD値95%、最適含水比)の供試体に対する垂直応力( $\sigma_c$ )と定体積せん断強度( $c_u$ )の関係を示

したものである。図を見ると $\sigma_c = 2.75\text{kgf/cm}^2$ (試料I)、 $3.5\text{kgf/cm}^2$ (試料II)、 $6.5\text{kgf/cm}^2$ (試料III)、 $8.0\text{kgf/cm}^2$ (試料IV)付近でそれぞれ $c_u \sim \sigma_c$ 関係に折れ曲り点が見られ、締め固め時の先行圧縮による影響が認められる。本研究では、この折れ曲り点に対応する垂直応力 $\sigma_c$ を先行圧縮応力( $p_c$ )と定義し、 $p_c$ 以上の応力範囲を正規圧縮領域、 $p_c$ 以下を過圧縮領域と呼んで区別する<sup>1)</sup>。

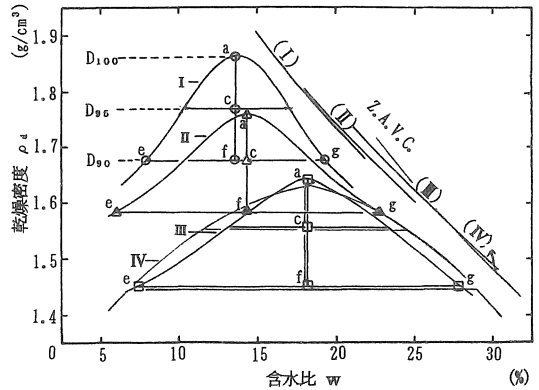


図-2 締め固め曲線と試験点

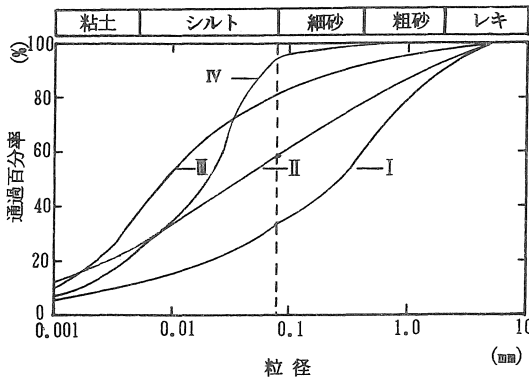


図-1 試料の粒径加積曲線

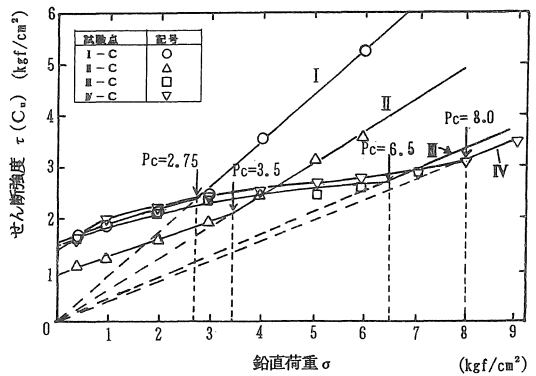


図-3  $\tau \sim \sigma$ 関係

表-1 実験に用いた試料の性質

試料	土粒子の密度 $\rho_s$ ( $\text{g/cm}^3$ )	最大乾燥密度 $\rho_{dmax}$ ( $\text{g/cm}^3$ )	最適含水比 $w_{opt}$ (%)	粒度組成 (%)				均等係数 Uc	不均等係数 FC (%)	液性限界 wl (%)	塑性限界 wp (%)	塑性指数 Ip
				1/4分	砂分	シル分	粘土分					
I	2.659	1.861	13.5	12.0	53.7	22.1	12.2	14.5	34.3	31.3	18.2	13.1
II	2.667	1.759	14.3	7.1	33.0	37.4	22.5	44.4	59.9	39.3	21.6	17.7
III	2.723	1.636	18.2	1.7	17.2	45.1	36.0	106.0	81.1	41.4	22.4	19.0
IV	2.695	1.633	18.0	0.0	6.4	73.5	21.0	44.0	93.0	37.8	26.7	11.1
V	2.755	1.648	23.1	22.3	43.8	14.4	19.5	900	33.9	59.5	20.1	39.4
VI	2.674	1.668	20.9	0.0	44.6	27.1	28.3	88.7	55.4	32.0	21.9	10.1

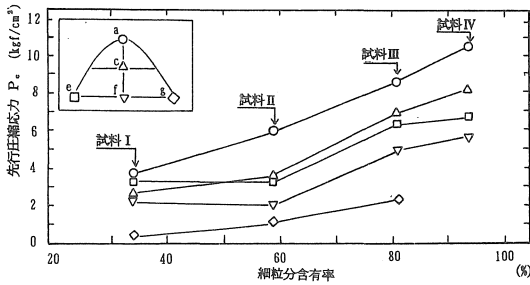


図-4  $p_c \sim FC$ 関係

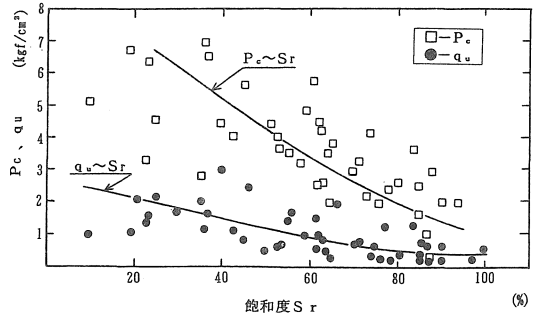


図-5  $p_c, q_u \sim$ 飽和度関係

1) 締固め状態と  $p_c$  値との関係

図-4は  $p_c$  値と細粒分含有率の関係調べたものであり、細粒分が多いほど  $p_c$  値が大きくなる傾向が認められる。また、 $p_c$  値は密度 (D 値) にも大きく影響され、さらに試験点 e, f, g を比べると飽和度が低い乾燥側ほど  $p_c$  値が高くなる事が分かる。

2)  $p_c$  値と他の力学量との関係

図-5は4試料(細粒分含有率26%から93%)について、 $p_c$  値および一軸圧縮強度  $q_u$  と供試体初期飽和度  $S_r$  との関係を示したものである。図によると、 $p_c$  値と  $q_u$  値はともに飽和度の増加に伴って低下する傾向が見られ、浸水飽和によって粒子間の構造強度が低下し、締固めによる先行圧縮の効果が失われることが分かる。

図-6は、同一締固め条件 ( $E_c=100\%$ ) の供試体に対して求めた  $p_c$  値と  $q_u$  値の関係を整理したものである。個々の試料ごとに  $p_c \sim q_u$  関係の直線性が認められるが、全体的には図中の平均線 ( $p_c = 4 \cdot q_u^{0.68}$ ) を代表値とみなすことができ、この関係を用いて一軸圧縮強度から  $p_c$  値を概略推定できることが知れる。

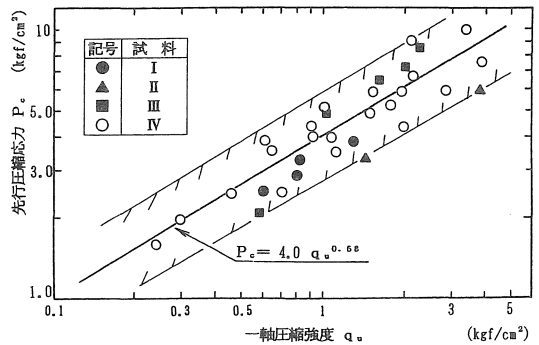


図-6  $p_c \sim q_u$  関係

3) 過圧縮領域下の強度特性

$p_c$  以下の過圧縮領域の強度については、飽和粘土の非排水強度に対して提案された次式<sup>3)</sup>との対応を考えた。

$$(c_u / \sigma_v')_{oc} = (c_u / \sigma_v')_{nc} (OCR)^{\lambda}$$

図-7は、各試料のD値95%,  $w_{o,1}$  試験点(試料 I, II, III, IV の点 c) における実験結果を過圧縮比 OCR に相当する  $p_c / \sigma$  と、過圧縮領域の強度増加率  $c_u / \sigma$  の関係を両対数紙上で整理したものである。

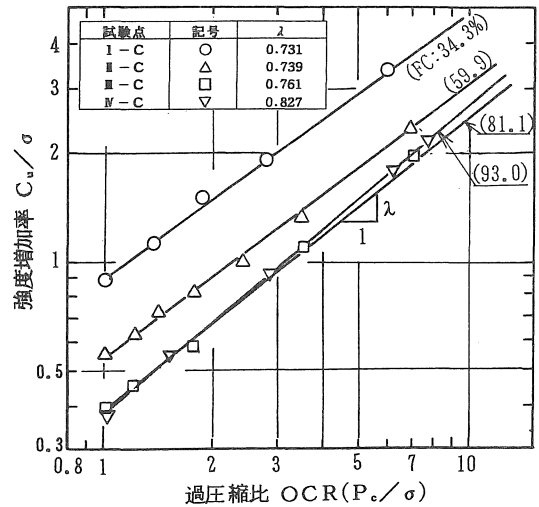


図-7  $c_u / \sigma \sim OCR$ 関係

なお、実験値を直線で近似したときの勾配が上式の  $\lambda$  値を、 $p_c / \sigma = 1$  の切片値が正規圧縮領域における強度増加率  $(c_u / \sigma)_{nc}$  を与える。図によると

粒分が多くなるほど  $(c_u/\sigma)_{Nc}$  の値は低くなるが、 $\lambda$  値は若干増加傾向を示すようである。 $\lambda$  値と細粒分含有率の関係を他の試験点も含めて同様の整理を行うと図-8 が得られる。図より、細粒分含有率が70~80%付近で $\lambda$  値が急増加する傾向が見られる ( $\lambda$  値が0.1増加すると強度は約10%増加する)。しかし、細粒分含有率が30~60%の範囲における $\lambda$  値は、若干の増加傾向が認められるもののほぼ一定の値 ( $0.72 \pm 0.03$ ) を示すことが分かる。つまり、過圧縮領域の強度線が正規圧縮強度線と離れる度合は、一般の盛土材料の種類や締固め状態によらずほぼ一定になると考えられる。

### 3. 浸水飽和による強度低下特性

前項で述べたように、フィルダムなどの盛土材料は転圧時の先行圧縮効果によって堅固な土粒子構造を保持し、一般に正規圧縮状態の強度に比べて高い強度を示す。一方、この種の水利構造物では貯水時の堤体の飽和化に起因するサクシオン効果の消滅、これに伴う土粒子の構造強度の劣化によって盛土材料の強度は低下すると考えられる。したがって、現行の設計においては、一般に、この強度低下を考慮してより安全側の正規圧縮強度が用いられる場合が多い。しかしながら飽和度の増加に伴ってサクシオン効果が完全に消滅することは考え難く、飽和後もある程度の構造強度を保持すると考えられる<sup>4)</sup>。したがって正規圧縮強度を設計強度としてそのまま用いることには検討の余地があり、より厳密な設計を目指すためには強度低下の特性を精密に追求する必要がある。

#### 3.1 試料および実験

実験に用いた試料は、表-1 に示した試料Vである。本試料は実際の盛土現場 (岐阜県高盛土現場) から採取したもので、実験には最大粒径が4.75mmとなるように粒度調整した試料を用いた。

供試体の作製は、図-9 に示す締固め曲線 ( $E_c=100\%$ ) に対して、密度および含水比が異なる a~g の7種類の状態に調整した試料をせん断箱の中に3層に分けて投入し、規定の高さまで静的に圧縮して行った。

実験は、不飽和供試体に対する非圧密非排水せん断試験 (U U試験)、供試体下部から通水して (水

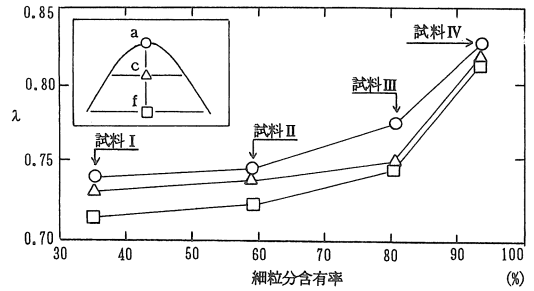


図-8  $\lambda$  ~ 細粒分含有率関係

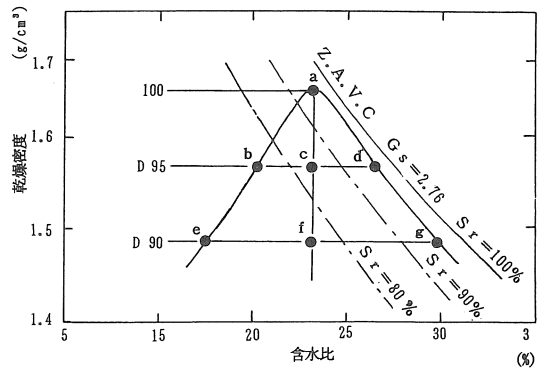


図-9 締固め曲線と試験点

頭差約 1 m、通水時間約 24 時間) 飽和させた供試体に対する圧密排水試験 (C D 試験)、および正規圧密強度を求めるための飽和試料に対する圧密非排水せん断 (C U 試験) の 3 種類について行った。

#### 3.2 実験結果および考察

図-10 は供試体作製点 a~g の U U 試験の結果である。なお、図中の原点を通る直線は正規圧密供試体の C U 試験の結果であり、 $c' = 0$ 、 $\phi' = 39.4$  度である。図をみると、締固め D 値 100% の点 a より D 値 90% の点 e の強度が大きく、また同一含水比の点 a, c, f の供試体間の強度差と同一密度の点 e, f, g の強度差を比較すると、後者の強度差が大きいことが分かる。このことから、非排水強度は密度より含水比や飽和度の影響が大きいと考えられる。

また、拘束圧の低い範囲のせん断強度はいずれの供試体においても正規圧密強度より大きく、供試体作製時の先行圧縮の影響やサクシオン効果ははっきりと現れていることが分かる。

図-11はCD試験（飽和）の結果である。a) 図は同一含水比、b) 図はD値95%および、c) 図はD値90%の結果であり、図には比較のために不飽和状態のUU試験の結果も実線で示している。図で明らかなように、拘束圧の低い過圧縮領域（ $p_c$ 以下）の強度は浸水飽和することによって破線で示すように低下している。特に密度が低い場合はほぼ正規圧

密強度線まで強度が低下し（c 図）、先行圧縮効果やサクシオン効果の消滅が認められる。しかし、締固めD値95%以上では飽和化によって強度低下が生じるもののある程度の強度は保持している。従って、土の強度をより正確に反映した安定解析（長期安定）を行うためには、正規圧密強度よりもCD試験の強度を用いた方が適切であるように考えられる。

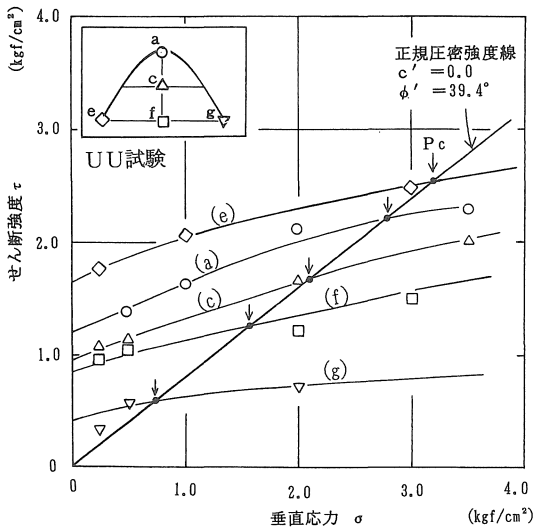


図-10 不飽和土のせん断強度（全応力表示）

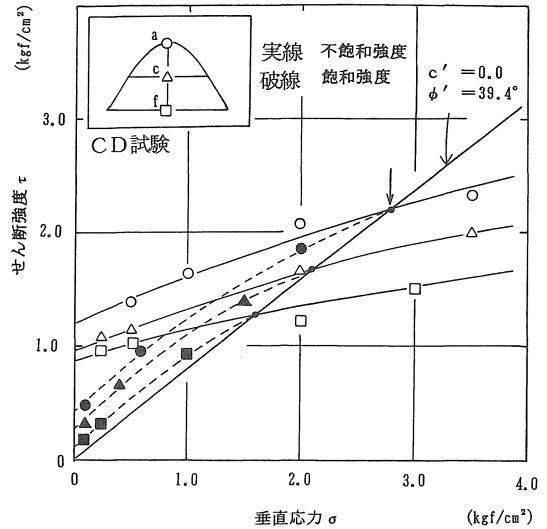


図-11(a) 不飽和・飽和の強度試験点(点 a c f)

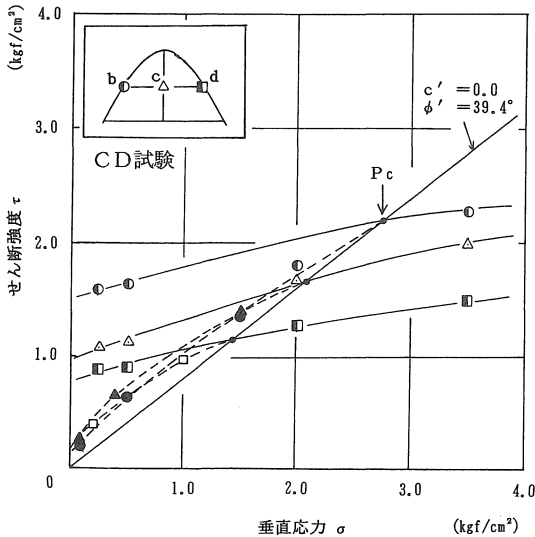


図-11(b) 不飽和・飽和の強度 試験点(点 b c d)

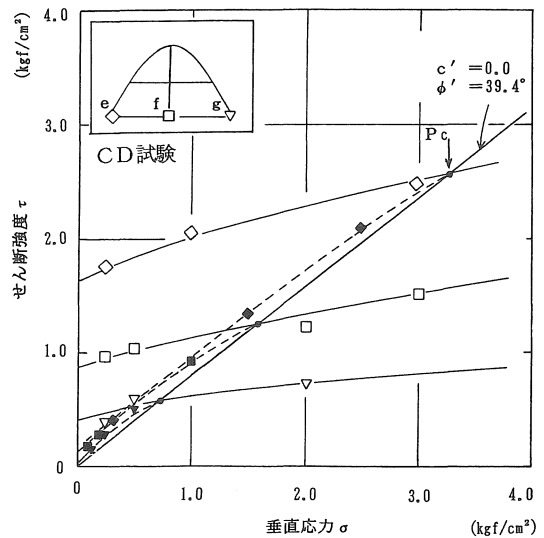


図-11(c) 不飽和・飽和の強度 試験点(点 e f g)

図-12は横軸に初期飽和度を、縦軸に不飽和 (U) と飽和後 (CD) の強度 (粘着力:  $c$ 、 $c'$ ) をとり、浸水飽和による強度低下の度合いを密度 (D 値) ごとに区別して示したものである。図から分かるように、強度低下は密度が低いほど、また飽和度が85%以下で著しく現れ、 $c'$  がほぼ 0 に近づいていることが分かる。初期飽和度が約85%より高い供試体においても強度低下は起こるが、その度合いは飽和度が低い供試体と比較してそれほど大きくないようである。

4. 応力解放に伴う固結土の強度低下

長期間圧密された固結土からなる自然斜面を掘削した場合、長期間放置した後に斜面崩壊がしばしば起きている。これは掘削による応力解放によって斜面内の土が膨張し、また地下水位変動による有効応力の増減に伴って強度低下が生じるためと考えられている。その原因を詳細に検討するため、掘削によって実際に破壊事故が起きた現場の攪乱および不攪乱試料を採取し、応力解放や応力履歴が固結土の強度低下に及ぼす影響を実験的に確かめた。

4.1 試料および実験

実験の対象にしたのは、岐阜県の道路建設現場の溶結凝灰岩であり、その物理的性質は表-1に示すとおりである (試料VI)。

実験は現場の事故事例を再現する形で行った。すなわち、現場では道路建設のため掘削した斜面が約1年半後に崩落した。地山の掘削を想定した場合、図-13に示すように地山の自重を受けていた点B付近では、掘削によりA→Bへ応力が除荷される。また、地下水位の上昇、下降を考えた場合、有効応力の増減は地下水位が上昇したときが減少し、逆に地下水位が下降すると有効応力は増加し点Cのような応力変化が考えられる。これを再現するために等体積一面せん断試験機を用いて有効鉛直応力を種々変化させた実験を行い、この応力履歴が強度に与える影響を調べた。

4.2 実験結果および考察

まず、応力が解放される前 (掘削前) の応力状態を把握するために、5つの不攪乱供試体について標準圧密試験を行った。その結果、圧密降伏応力は  $p_r = 5.0 \text{ kgf/cm}^2$  程度であることがわかった。

図-14は膨張圧測定試験の結果である。図より  $p = 0.6 \text{ kgf/cm}^2$  以下の場合、浸水飽和に伴う膨張が発生して強度低下を招くことがわかった。すなわち、掘削面に  $6.0 \text{ tf/m}^2$  以上の荷重を与える対策を施せば、浸水飽和が起きても土粒子間に間隙変化が発生せず掘削斜面は安定であることが予想される。

図-13に示すstep 1からStep 4までの応力履歴を与えせん断試験の破壊線を図-15に示す。図には正規圧密強度 ( $c' = 0, \phi' = 43.0$ 度) も示している。図から判断されるように、Step 1では明らかに過圧

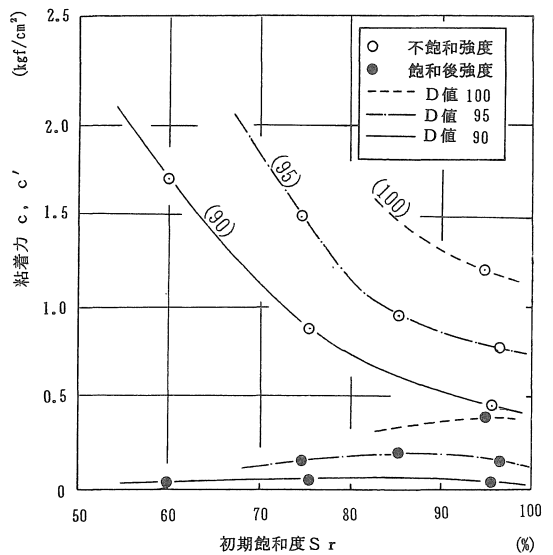


図-12 粘着力と供試体初期飽和度

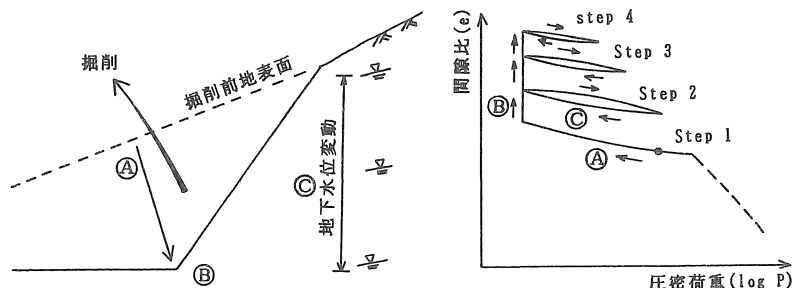


図-13 強度低下の要因

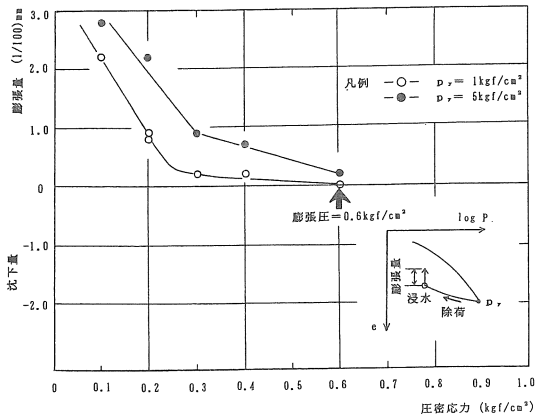


図-14 膨張・沈下量と圧密圧力の関係

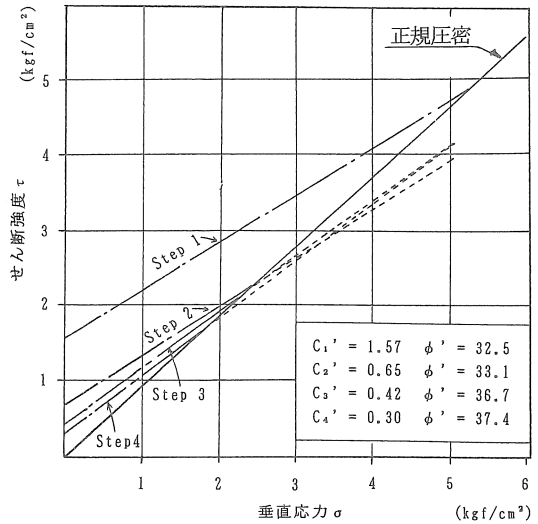


図-15 応力履歴による強度変化

密粘土特有の粘着力成分が卓越し、摩擦成分が低下する強度特性を示している。そしてStep 2～4に至っては応力履歴が繰り返されることにより、粘着力成分は減少し、ついには正規圧密強度に収束していく様子が見えてくる。

図-16は、1例として繰り返し応力による間隙比の変化を示した結果である (Step 4)。図から  $e \sim \log p$  関係にほとんど差は認められず、応力履歴に伴う間隙比の変化は僅かであることが分かる。したがって間隙比によって強度の低下を判断することはできない。しかし、実験結果では着実に強度低下が生じており、間隙比の変化 (膨張) だけではなく、間隙比以外の要因も存在しているのではないかと予想される。他の要因としては拘束応力の反復によってサクシオン効果やセメンテーション効果が失われると推察することもできる。

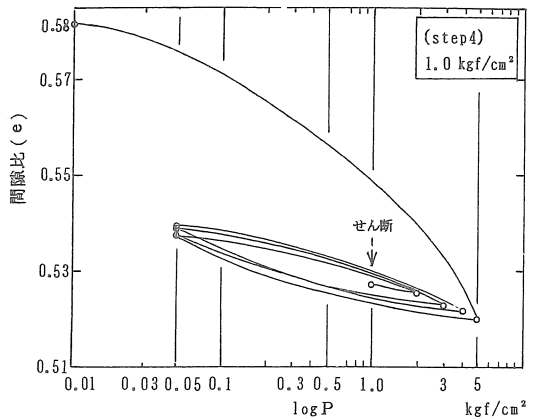


図-16 応力履歴による間隙比変化 (step4)

ここで各Stepの  $c'$  と  $\phi'$  を用いて掘削斜面の安定性を検討してみる。まず斜面が破壊した時点の現場の状態は、図-17に示すように、斜面勾配  $45^\circ$  ですべり面の深さは約  $1.5\text{m}$  の無限斜面の破壊形状であった。従って、この崩壊斜面の安全率  $F_s$  を次式によって求めると (地下水は地表面に一致)、表-2および図-18に示す結果となる。

$$F_s = \frac{c' L + W' \tan \phi'}{W \sin \theta}$$

$$= \frac{c' L + (B h \gamma_{\text{sub}} \cos \theta) \tan \phi'}{B h \gamma_{\text{sat}} \sin \theta}$$

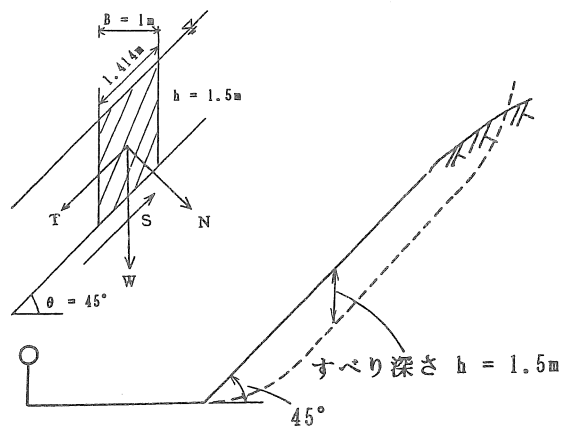


図-17 すべり形態

表-2 ステップ数と安全率

Step	$c'$	$\phi'$	$F_s$
1	1.57	32.5	1.84
2	0.65	33.1	1.23
3	0.42	36.7	1.08
4	0.30	37.4	1.06
正規圧密強度	0	43	0.86

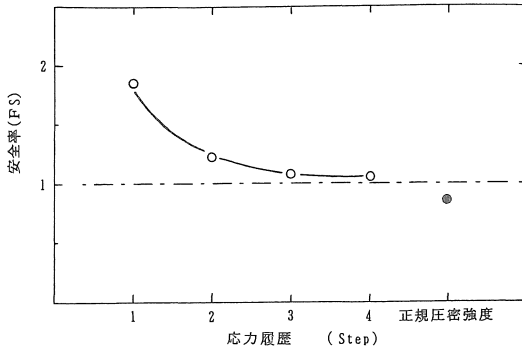


図-18 応力履歴による安全率の変化

図よりStep数が増えるほど、すなわち応力履歴が繰り返されるほど安全率は低下し、最終的に強度が正規圧密強度近くまで低下した時点で破壊が起こったと考えることができる。

### 5. 先行圧縮効果を考慮した盛土斜面の FEM 安定解析

締固め土の先行圧縮効果によって盛土表層部に生じる疑似過圧縮領域が盛土斜面の安定性に与える影響を FEM 非線形応力解析を行って調べた。

#### 5.1 解析内容

解析に使用した物性値は、試料Ⅱの最適含水比状態で締固めD値が95%および90%の2種類の供試体に対する三軸圧縮試験結果から求めた(表-3)。図-19は解析を行ったモデルのメッシュを示している。盛土のすべり安全率は、各要素の局所安全率(任意点の最大せん断応力と同一地点で発揮される破壊時の最大せん断応力の比)を円弧すべり線上で平均化して定めた。

#### 5.2 解析結果と考察

図-20は、D値95%の解析結果に基づいて、盛土内の鉛直応力と強度試験で求めた先行圧縮応力 $p_c$ を比較して、正規圧縮(NC)と過圧縮(OC)の領域分布を調べたものである。図には斜面勾配を1:1、1:2および2:1に変化させた時の領域境界線を描いているが、境界の形状は斜面勾配によらず類似した傾向を示している。

図-21および図-22は盛土内の局所安全率の分布を調べたものであり、図-21は先行圧縮効果を考慮しない正規圧縮強度を用いた場合、図-22は先行圧縮効果を考慮し、かつ斜面勾配を変えた場合の計算結果を示す。まず図-22から、斜面勾配が急になるほど盛土内の局所安全率の値が低下し、安全率の低い領域が全体的に拡大する傾向にあることが知れる。図-21および図-22(a)については、斜面の全体的すべりに対する安全性を検討するために円弧すべり面上で局所安全率の重み付き平均値を求め、これを全体安全率と考えて考察に加えた。この結果、全体

表-3 解析に用いたパラメータ

材料(試料)	$P_c$	$\gamma$	$C_{oc}$	$C_{nc}$	$\phi_{oc}$	$\phi_{nc}$	$k$	$n$	$R_f$
Ⅱ-c (D95)	3.5	1.910	1.0	0	16.26	30.0	79.43	0.1195	0.742
Ⅱ-f (D90)	1.7	1.809	0.34	0	20.27	29.65	61.66	0.0989	0.664

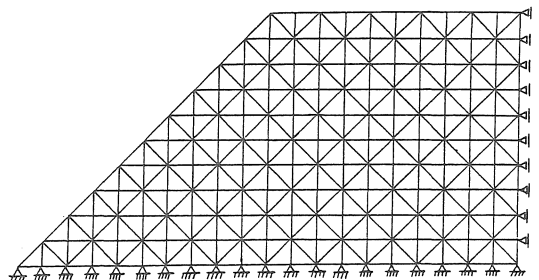


図-19 解析モデル

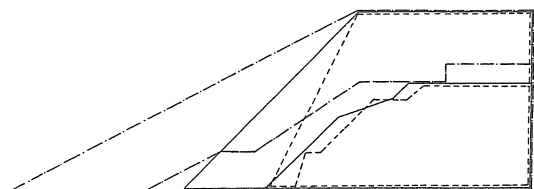


図-20 斜面勾配とOC,NC領域(D値95%)



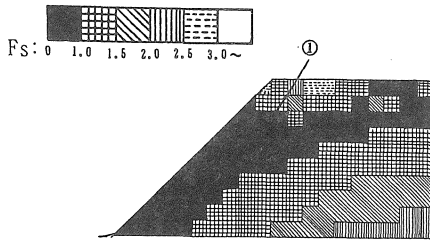


図-21 局所安全率分布  
(正規圧縮強度, 勾配 1 : 1)

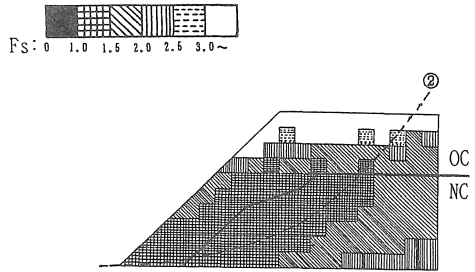


図-22(a) 先行圧縮効果を取入れた  
局所安全率分布 (勾配 1:1)

安全率が最小となる最危険すべり面は両ケースに対して図中の①、②の円のようになり、対応する安全率の値は表-4で与えられる。参考のために、表-4には2つの円①、②に対する両ケースの計算結果を示しており、最危険円でない方の安全率はカッコ内に記入した。これらの結果から、1)正規圧縮強度を用いた計算では、せん断抵抗は ( $c=0$ で) 摩擦成分だけであるから、最危険円が①のように斜面表層部に現れること、2)先行圧縮効果を考慮した計算では、局所安全率の低い領域が盛土内部に拡大するため、最危険円はOC,NC領域の境界付近の斜面内の深い位置に現れること、3)全体安全率の値については、正規圧縮強度の最危険安全率が先行圧縮効果を考慮した時の値の半分以下と低いことや、同じ②の円に対して先行圧縮効果を考慮した場合の(最危険)安全率より正規圧縮強度の安全率の方が低いことから、斜面の安定性評価に当たって先行圧縮効果を考慮することの重要性が指摘されること、などが判明した。

図-23および表-5は、締固め度合いが安全率および破壊形態に及ぼす影響を調べるために、D値95%およびD90%に対応する物性値を用いた計算結果を比較したものである。上と同様に全体安全率が最小となる最危険すべり面を両ケースについて図-23に円②、③として示し(円②は図-22(a)と同じ)、対応する安全率の値を表-5に整理した。これによると、D値90%の計算では斜面表層部に最危険円が現れ、上の正規圧縮強度の計算とほぼ対応する性質がみられる。

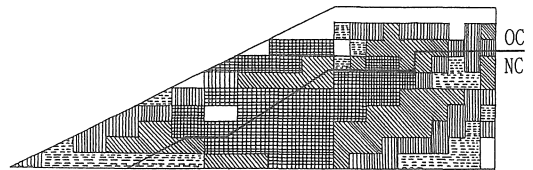


図-22(b) (勾配 1:2)

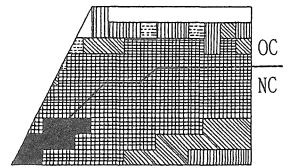


図-22(c) (勾配 2:1)

表-4 先行圧縮効果と安全率

D. 効果	最危険円	①面でのFs	②面でのFs
D. 効果を考慮する場合	②	(2.257)	1.658
D. 効果を考慮しない場合	①	0.763	(1.139)

表-5 締固め度合いと安全率

締固め度D値	最危険円	③面でのFs	②面でのFs
D95	②	2.019	1.658
D90	③	1.030	1.237

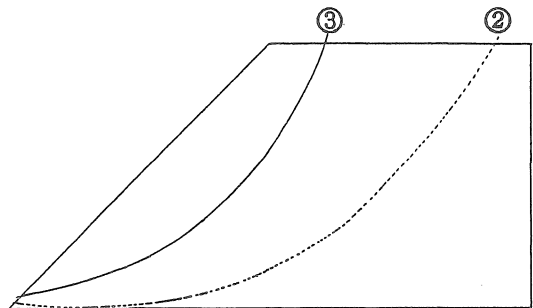


図-23 締固め度とすべり面

## 6. 結論

以上の結果をまとめると次の通りである。

- 1) 先行圧縮効果は締固め材料の粒度、密度および飽和度の影響を受ける。
- 2) 一軸圧縮強度から実験式  $p_c = 4 q_u^{0.58}$  を用いて先行圧縮応力  $p_c$  を簡便に推定することができる。
- 3) 締固め度D95%以上の密度では、浸水飽和しても正規圧縮強度より高い強度を保つ。しかし、D値90%以下では先行圧縮効果やサクシジョンの消滅によって正規圧縮強度にほぼ等しくなる。従って、盛土構造物の施工に対してはD値95以上になるように締固めを行うことが望ましい。
- 4) 固結土の強度は、斜面掘削による応力解放、浸水飽和による膨張、地下水変動に伴う応力履歴等により、正規圧縮強度まで低下する。
- 5) 局所安全率は先行圧縮効果を考慮した場合の方が考慮しない場合よりも高い。
- 6) 先行圧縮効果を考慮した場合、OC、NC領域の境界

線付近で低い安全率が分布し、この付近ですべりが起こり易い。

- 7) 締固め度が高い程、すべり面は深い位置に現れる。

### 〈参考文献〉

- 1) 太田秀樹, 伊藤雅夫, 石黒健, 米谷敏: 締固められた粘性土の先行圧縮応力と強度の推定, 土木学会論文報告集, No.436/III-16, 27-36, 1991.
- 2) 李啓春, 奥村哲夫, 成田国朝: 締固め土の先行圧縮効果と強度特性について, 土木学会第48回年次学術講演会講演概要集, III-462, 978-979, 1993.
- 3) 三田地利之: 粘性土の三軸圧縮試験における応力履歴の影響について, 第20回土質工学シンポジウム, 71-78, 1976.
- 4) 大根義男: フィルダム設計上の問題点とその考察, ダム技術, No. 77, 4~13, 1993.
- 5) 李啓春, 奥村哲夫, 大根義男, 成田国朝: 締固めた土の先行圧縮特性に関する実験, 土木学会中部支部平成5年度研究発表会講演概要集, 421-422, 1993.

(受理 平成 6年 3月20日)