試料の準備方法の違いが粘性土のせん断特性に及ぼす影響

Influence of Preparation Methods on Shear Characteristics of Cohesive Soils

亀井健史* 佐野博昭**
Takeshi KAMEI Hiroaki SANO

Abstract

In order to investigate the influence of preparation methods on shear characteristics of cohesive soils, direct shear tests have been performed on undisturbed and remoulded cohesive soils from Tokyo Bay.

The test result that the shearing strength of undisturbed samples turned out to be larger than that of remoulded samples. This difference may be attributed to the fact that the undisturbed samples have a natural soil structure of the soil remained unchanged. Engineering implication of the test results was turned out in making stability analysis of ground.

キーワード: 粘性土, 圧密非排水せん断, 直接せん断試験, 安定解析, せん断強さ, 試験方法

1. まえがき

海底地盤に生じる斜面崩壊としては、港湾工事における掘削や載荷等の人工的な要因による崩壊と地震や重力等に起因する崩壊が挙げられる¹⁾。これらの斜面崩壊に対して、適切な防止対策工法の選択およびその評価を行うためには斜面の安定性を定量的に把握する必要がある。

現在、一般的に用いられている斜面の安定解析手法としては Bishop 一法、Janbu 一法および Morgenstern 一法等が挙げられるが、これらの手法で得られる安全率は、解析上必要となる土のせん断強さによって大きく変動する。

原位置における土のせん断強さを室内で評価する場合、一般に、原位置より採取した乱さない試料あるいは同試料の練返し再圧密試料に対して、一軸圧縮試験、三軸圧縮試験および一面せん断試験等の各種室内試験が行われている。

しかしながら、乱さない試料と練返し再圧密試料の強度・変形特性は、通常、試験方法の違いによらず異なることが指摘されている²⁾。この原因として、原位置における土要素が二次圧密やセメンテーション等の年代効果の影響を受けていることが指摘されている³⁾。

年代効果を受けた粘土のせん断強さを決定する方法として、Bjerrum⁴⁾は、原位置での応力状態を再現することが有効であると報告している。また、半沢⁵⁾は、Bjerrum の手法をさらに拡張した修正 Bjerrum 法を提案している。

これに対し、Ladd and Foott⁶⁾は、高位の構造を有するクイッククレイや自然に固結した粘土を除き、これら

の手法を一般に用いるべきではないと指摘しており、この点については、Bjerrum、半沢の研究例とは必ずしも一致しておらず、不明な点が多い。このことは、乱さない試料を用いる場合、試料の総量が不足していたり不均一であったりするために、年代効果を受けた地盤の強度・変形特性が十分に解明されるに至っていないためと考えられる。

このため、原位置における土要素が過去に受けた年代効果の影響を練返し再圧密試料を用いて、室内で再現することが可能となるならば、原位置における土の強度・変形特性に関する評価を容易に行うことができるようになるものと考えられる。

一方、土田⁷⁾は、上記に示した既往の研究成果をふまえて、乱さない試料と練返し再圧密試料に対して行った標準圧密試験の結果より、正規圧密領域における試料の圧縮性の変化を示す圧縮指数比が年代効果の影響を定量的に表わす指標として有効であることを報告している。

従来、年代効果の影響を室内で再現する場合、長期間圧密⁸⁾および化学的添加物の混合^{9),10)}等の方法が用いられてきた。また、近年では、スラリー状の試料を高温で再圧密する方法が頻繁に用いられている^{11),12)}。

このうち、長期間圧密による方法は、年代効果の影響を室内で再現する最も直接的な方法であるが、圧密に非常に長期間を要する等の問題点が考えられる。また、化学的添加物の混合や高温再圧密等の方法は、練返し再圧密試料に対して比較的容易に年代効果を与えることが可能であるが、練返し再圧密試料と原位置における土要素の強度・変形特性に関する定量的な関係については、不明な点が多く、また、添加物の種類や温度等の実験方法についても明確に規定されていないものと考えられる。

* 基礎地盤コンサルタンツ㈱ 地盤物性室

** 石川工業高等専門学校 土木工学科

Table 1. Index properties of soil samples.

Soil	Depth (m)	ρ_s (kN/m^3)	w_n (%)	w_L (%)	w_p (%)	I_p	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)
M-1	7~8	26.7	71.6	55.3	29.1	26.2	30.8	40.3	28.9
M-2	13~14	26.4	66.3	61.1	30.8	30.3	9.8	51.8	38.4
M-3	14~15	26.3	64.0	56.9	28.8	28.1	10.0	48.0	42.0
M-4	16~17	26.7	59.5	57.0	30.2	26.8	14.9	48.2	36.9
M-5	32~33	26.3	40.5	45.2	26.3	18.9	3.1	59.7	37.2
M-6	33~34	26.3	39.7	43.1	26.1	17.0	11.2	56.8	32.0
M-7	35~36	26.0	40.9	49.9	29.9	20.0	0.0	37.3	62.7

このことより、原位置における土のせん断強さを室内で評価する場合、乱さない試料を用いる以外には有効な方法が見当たらないのが現状であると考えられる。

一方、試料の含水比に着目すると、原位置での有効土被り圧を考慮した練返し再圧密試料の含水比が乱さない試料の含水比より小さな値を示すにもかかわらず、乱さない試料の一軸圧縮強さは、練返し再圧密試料の一軸圧縮強さより大きくなるのが報告されている¹³⁾。

また、土のせん断強さや力学的挙動を調べる目的では、一般に、一軸圧縮試験や三軸圧縮試験等が行われており、一面せん断試験を行う例は、比較的少ない。これは、在来型一面せん断試験機がその構造上、非排水条件でのせん断が困難であり、また、過剰間隙水圧の変化の測定が不可能である等の理由によるものと考えられる。

三笠ら¹⁴⁾は、これらの問題点を解決するために、改良型一面せん断試験機を考案し、この試験機を用いて行った圧密定体積一面せん断試験と等方圧密および K_0 圧密三軸圧縮試験の結果より、強度増加率 c_u/p 値の試験方法の違いによる差は、小さいと報告している。また、鈴木・吉田¹⁵⁾は、粘土地盤の安定解析に用いるせん断強さの決定方法を検討するために、 K_0 圧密三軸圧縮および伸張試験、圧密定体積一面せん断試験を行い、一面せん断試験の有効性を指摘している。

このことは、良質でかつ均一な供試体を容易に準備することが可能な一面せん断試験が、土のせん断強さを評価する上において有効な試験方法のひとつであることを示しているものと考えられる¹⁶⁾。

本研究は、上記の点に着目し、乱さない試料と同試料の練返し再圧密試料に対して圧密定体積一面せん断試験を行い、乱さない試料と練返し再圧密試料のせん断特性を定量的に把握することを試みた。さらに、上記の試験から得られたせん断強さを用いて安定解析を行い、試料の準備方法の違いが安全率の値に及ぼす影響についても比較・検討を行った。

2. 試料および実験方法

実験には、東京湾において①深度 7 m~17 m より採取した塑性指数 I_p が 26~30 と比較的 I_p の高い 4 種類の乱さない試料、②深度 32 m~36 m より採取した I_p が 17~20 と比較的 I_p の低い 3 種類の乱さない試料および③乱さない試料をそれぞれ練返し再圧密した試料を用いた。試料の物理的特性、粒径加積曲線を Table 1, Fig. 1 に示す。

表より、 I_p の比較的高い乱さない試料の含水比 w_n 値は、液性限界 w_L 値より大きな値を示していることがわかる。また、Fig. 2 に示す塑性図において全試料とも A 線上にほぼ位置している。

乱さない試料は、採取後パラフィンワックスにより密封保存したものを用いた。乱さない試料が原位置において受けたと考えられる応力履歴を考慮した場合、東京湾の地質学的堆積環境より判断して、土被り圧が除去された可能性は少なく³⁾、このため、今回の実験に用いた 7 種類の乱さない試料は、正規圧密 aged 粘土⁴⁾に分類されるものと考えられる。

また、練返し再圧密試料の作成は、乱さない試料に液性限界の 1.3 倍程度の含水比になるように脱気蒸留水を

Fig. 1 Grain size distribution curves of samples.

Fig. 2 Consistency characteristics of samples on plasticity chart.

加え、ミキサー内で1時間程度十分に練返してスラリー状にした後、直径10 cm、高さ12.5 cmの予備圧密モールドに入れて一次的に行った。予備圧密時の圧密圧力は、原位置において土要素が受けていた有効土被り圧とその自然含水比を考慮して、以下に示す2種類を用いた。なお、予備圧密時の圧密時間は、試料の一次圧密終了時間を考慮して約1週間とした。

- ① 原位置での有効土被り圧 p_0 と同じ圧密圧力
- ② 練返し再圧密試料の含水比が乱さない試料の含水比 w_n とほぼ同じとなる圧密圧力

なお、本文では、①により作成した練返し再圧密試料を原位置での有効土被り圧考慮、②により作成した練返し再圧密試料を自然含水比考慮とそれぞれ区別する。

得られた乱さない試料と練返し再圧密試料の含水比の比較をTable 2に示す。表より、各試料とも原位置での有効土被り圧を考慮した練返し再圧密試料の含水比 w_{rp} 値は、乱さない試料の含水比 w_n 値より小さな値を示し、その差は、 I_p の高い試料では10%~20%、 I_p の低い試料では5%~10%となり、 I_p の高い試料ほどその差が大きくなっている。また、自然含水比を考慮した練返し再圧密試料の含水比 w_m 値は、 w_n 値とほぼ同程度である。なお、 I_p が高い試料 (M-1~M-4) においては、前述したように w_n 値が w_L 値より大きな値となっているため、自然含水比を考慮した練返し再圧密試料の供試体の作成が不可能であった。実験に用いた供試体の形状は、直径6 cm、高さ2 cmである。

試験機は、改良型一面せん断試験機を用い、せん断中に供試体の体積を一定に保つ圧密定体積一面せん断試験 (一面CU試験) を行った。

年代効果の影響を受けた粘土は、通常、正規圧密地盤において圧密降伏応力 p_c が原位置での有効土被り圧 p_0 より大きな値を示す擬似過圧密状態となっていると言われている。今回の実験に用いた乱さない試料に対して行った標準圧密試験の結果より、 I_p の高い試料 (M-

Table 2. Summary of water content obtained by different preparation methods.

Soil	Depth (m)	I_p	w_n (%)	w_{rp} (%)	w_{rn} (%)
M-1	7~8	26.2	71.6	56.3	—
M-2	13~14	30.3	66.3	50.6	—
M-3	14~15	28.1	64.0	45.4	—
M-4	16~17	26.8	59.5	49.0	—
M-5	32~33	18.9	40.5	35.3	36.8
M-6	33~34	17.0	39.7	29.0	38.0
M-7	35~36	20.0	40.9	36.1	39.7

w_n : Water content of undisturbed sample

w_{rp} : Water content of remoulded sample considered p_0

w_{rn} : Water content of remoulded sample considered w_n

1~M-4) の p_c 値は、130 kPa~180 kPa、 I_p の低い試料 (M-5~M-7) の p_c 値は、420 kPa~480 kPa となり、原位置での有効土被り圧 p_0 値の1.5倍~2倍となった。この点を考慮して、圧密圧力 σ_{nc}' は、 I_p の高い試料の場合、196 kPa および 392 kPa、 I_p の低い試料の場合、490 kPa および 686 kPa のそれぞれ2種類とし、24時間圧密を行った。また、せん断速度は、土質試験法¹⁶⁾を参考にして、0.5 mm/minとした。

3. 実験結果および考察

得られた実験結果より、 I_p の高い試料 (M-1~M-4) および I_p の低い試料 (M-5~M-7) のせん断特性は、それぞれほぼ同様の挙動を示すことが認められた。このため、以下では、高塑性土の場合、M-3試料、低塑性土の場合、M-7試料の代表的な結果について述べる。

Fig. 3は、M-3 ($I_p = 28.1$) の試料を用いた場合、Fig. 4は、M-7 ($I_p = 20.0$) の試料を用いた場合の乱さない試料と原位置での有効土被り圧および自然含水比を考慮した練返し再圧密試料のせん断応力 τ とせん断変位 D の関係をそれぞれ比較している。なお、M-3の試料においては、自然含水比を考慮した練返し再圧密試料の供試体の作成が不可能であった。

一方、再圧密終了時の含水比に着目すると、練返し再圧密試料においては、各条件ともほぼ同一の含水比を示したが、乱さない試料では、練返し再圧密試料より5%~10%大きな値を示した。

図より、M-3、M-7両試料ともせん断開始後、せん断変位 D の増加とともに τ は増加し、 τ が最大となるせん断変位 D_f は、2 mm以内となった。通常、一軸圧縮試験および三軸圧縮試験等を行った場合、乱さない試料と練返し再圧密試料の破壊時の軸ひずみ $(\epsilon_a)_f$ 値を比較すると、両者の値は大きく異なり、練返し再圧密試料の

Fig. 3 Typical τ - D behaviour of M-3: undisturbed and remoulded samples.

Fig. 4 Typical τ - D behaviour of M-7: undisturbed and remoulded samples.

(ε_a)_f 値は、乱さない試料のそれより大きくなることが報告されている⁷⁾。しかしながら、今回行った一面せん断試験ではそのような傾向は認められなかった。

一方、M-3 および M-7 の乱さない試料と原位置での有効土被り圧を考慮した練返し再圧密試料の最大せん断強さ τ_f 値を比較すると、M-3 の試料の場合、 w_{rp} 値が w_n 値より 20% 程度、M-7 の試料の場合 5% 程度それぞれ小さいにもかかわらず、乱さない試料の τ_f 値が練返し再圧密試料の τ_f 値より 10% 程度大きな値を示している。

亀井ら¹³⁾ は、試料の準備方法の違いが粘性土の一軸圧縮試験結果に及ぼす影響を検討するために、東京湾より採取した海成粘性土 ($I_p \approx 30$) に対して一軸圧縮試験を行った結果、予備圧密時において原位置での有効土被り圧を考慮した練返し再圧密試料の含水比が乱さない試料の含水比より 5% 程度小さいにもかかわらず、乱さない試料の一軸圧縮強さ q_u 値が練返し再圧密試料の q_u 値より 13%~20% 大きくなったと報告している。

一軸圧縮試験と一面せん断試験のように試験方法に違いはあるものの、今回行った一面せん断試験においてもほぼ同様の傾向が得られた。

以上のことから、乱さない試料は、原位置での有効土

被り圧により、二次圧密やセメンテーション等の年代効果の影響を受けているため、その土構造を破壊された練返し再圧密試料の含水比が乱さない試料の含水比より小さいにもかかわらず、乱さない試料が練返し再圧密試料より大きなせん断強さを示したのと考えられる。

さらに、M-7 の乱さない試料と自然含水比を考慮した練返し再圧密試料の τ_f 値を比較すると、乱さない試料の τ_f 値が練返し再圧密試料の τ_f 値より 15% 程度大きくなり、両試料の τ_f 値の差は、乱さない試料と原位置での有効土被り圧を考慮した練返し再圧密試料の場合と比較して、さらに大きな値となった。

このことは、乱さない試料と自然含水比を考慮した練返し再圧密試料の供試体の含水比がほぼ同程度であることから判断して、両試料の τ_f 値の差は、二次圧密やセメンテーション等の年代効果の影響を示しているものと考えられる。

また、 τ が最大値を示した後、せん断変位 D の増加による τ の低下割合は、 I_p の大きさによらず、乱さない試料が練返し再圧密試料より大きく、 τ は、せん断変位 D が 4 mm 程度で両試料ともほぼ一定値に達している。

Fig. 5, 6 は、M-3 および M-7 の試料を用いた場合の代表的な有効応力経路を示したものである。図より、

Fig. 5 Typical effective stress paths of M-3: undisturbed and remoulded samples.

Fig. 6 Typical effective stress paths of M-7: undisturbed and remoulded samples.

M-3, M-7 両試料ともせん断開始後, 有効垂直応力 σ' の減少に伴いせん断応力 τ は, 増加するが, τ が最大値を示した後, τ は, σ' の減少に伴って減少し, 最終的にはある一定の包絡線上にそれぞれ漸近していることがわかる。

ここで, 有効応力経路の形状を比較すると, 両試料とも圧密圧力 σ_{nc}' の大ききによらず, ほぼ相似形の挙動を示していることがわかる。また, M-7 の試料において, 原位置での有効土被り圧を考慮した練返し再圧密試料と自然含水比を考慮した練返し再圧密試料の有効応力経路の形状を比較すると, $\sigma_{nc}' = 490 \text{ kPa}$ の場合, 予備圧密時における圧密圧力の大きさの影響は僅かであるが, $\sigma_{nc}' = 686 \text{ kPa}$ においてはその影響が認められる。このことは, 予備圧密時において原位置での有効土被り圧を考慮した練返し再圧密試料が, 自然含水比を考慮した練返し再圧密試料より再圧密時の二次圧密時間が長くなり, その結果, 粘土粒子によって構成されている骨格構造がより安定した状態になるためと考えられる。

M-3 および M-7 の試料を用いた場合の最大せん断強さ τ_f と垂直応力 σ' の関係を示したのが Fig. 7, 8 であり, 乱さない試料と原位置での有効土被り圧および自然含水比を考慮した練返し再圧密試料の強度増加率 c_u/p 値の比較を行ったものである。また, Table 3 は, 今回

Table 3. Summary of c_u/p value obtained by different preparation methods.

Soil	Depth (m)	I_p	$(c_u/p)_u$	$(c_u/p)_{rp}$	$(c_u/p)_{rn}$
M-1	7~8	26.2	0.367	0.392	—
M-2	13~14	30.3	0.371	0.354	—
M-3	14~15	28.1	0.368	0.336	—
M-4	16~17	26.8	0.373	0.366	—
M-5	32~33	18.9	0.350	0.313	0.309
M-6	33~34	17.0	0.387	0.363	0.340
M-7	35~36	20.0	0.396	0.371	0.337

$(c_u/p)_u$: c_u/p value obtained using undisturbed sample
 $(c_u/p)_{rp}$: c_u/p value obtained using remoulded sample considered p_o
 $(c_u/p)_{rn}$: c_u/p value obtained using remoulded sample considered w_n

の実験に用いた 7 種類の試料に対する乱さない試料の強度増加率 $(c_u/p)_u$ 値, 原位置での有効土被り圧を考慮した練返し再圧密試料の強度増加率 $(c_u/p)_{rp}$ 値および自然含水比を考慮した練返し再圧密試料の強度増加率 $(c_u/p)_{rn}$ 値をそれぞれ示している。

表より, 深度 13 m~17 m より採取した比較的 I_p が高い試料 (M-1~M-4) の c_u/p 値に着目すると, $(c_u/p)_u$ 値が $(c_u/p)_{rp}$ 値より 5%~10% 大きな値を示していることがわかる。しかしながら, 深度 7 m~8 m と比較的浅い深度より採取した M-1 の試料では逆の傾向となっている。このことは, M-1 の試料が 31% の砂分を含んでいることから, 試料採取に伴う機械的な乱れや応力解放を他の試料と比較してかなり受けていることおよび土要素が未圧密の状態であること等が考えられる。よって, 砂分の多い粘性土は, 試料採取に伴う乱れの影響を受け易いため, 高品質な乱さない試料を採取するためには十分に注意する必要があるものと考えられる。

一方, 深度 32 m~36 m より採取した I_p が比較的低い試料 (M-5~M-7) の強度増加率 c_u/p 値に着目すると, $(c_u/p)_u$ 値が $(c_u/p)_{rp}$ 値より 5%~10%, $(c_u/p)_{rn}$ 値より 10%~15% 大きな値を示している。

半沢⁵⁾ は, 乱さない試料を原位置での有効土被り圧 p_o 以上の圧密圧力で圧密した場合, 間隙比の減少は年代効果によって形成された土構造を破壊するため, せん断強さの増加には寄与せず, 圧密圧力が圧密降伏応力 p_c に達した時点で年代効果により形成されたせん断強さは, 完全に消失し, 正規圧密 young 粘土⁴⁾ となると報告している。

しかしながら, 嘉門・長尾⁹⁾ は, 人工的にセメンテーションを与えた粘土の三軸圧縮試験結果より, 非排水せん断強さは, 過圧密領域においても圧密圧力の増加に伴

Fig. 7 Relationship between τ_f and σ' of M-3: undisturbed and remoulded samples.

Fig. 8 Relationship between τ_f and σ' of M-7: undisturbed and remoulded samples.

う間隙比の減少により増大していることを示し、半沢の結果とは異なる結果を報告している。また、圧密降伏応力 p_c の1倍～3倍の圧密圧力を用いた本研究においては、圧密圧力の大きさによらず、乱さない試料のせん断強さは、練返し再圧密試料のせん断強さより大きな値を示している。このことは、圧密降伏応力以上の圧密圧力で圧密された乱さない試料においても、年代効果により形成された土構造は、ある程度維持されているものと考えられ、既往の研究例⁵⁾とは異なる結果が得られた。いずれにしても、原位置における土のせん断強さを室内で評価することは、工学的に重要な問題であることを示唆している。

以上のことより、原位置での有効土被り圧を考慮した練返し再圧密試料より得られたせん断強さを実地盤に適用することは、実地盤のせん断強さを過小評価している可能性があることおよび自然含水比を考慮した練返し再圧密試料のせん断強さは、原位置での有効土被り圧を考慮した練返し再圧密試料のせん断強さよりさらに小さくなることが明らかとなった。このことから、乱さない試料と自然含水比を考慮した練返し再圧密試料のせん断強さの差が年代効果の影響を示しているものと考えられる。

上記の実験から得られたせん断強さの工学的解釈として、得られた結果を用いて安定解析を行い、安全率 F_s が試料の準備方法の違いによりどの程度変化するかを検討する。ここでは、Fig. 9に示すような等分布荷重を受ける連続基礎 ($B/L = 0$) の断面^{17), 18)}を安定解析対象断面とし、今回の実験から得られたせん断強さを用い、中瀬¹⁷⁾により提案された方法で安定解析を行った。なお、地下水位は、地表面に一致しているものとする。また、支持地盤の非排水せん断強さ c_u は、深さに対して直線的に増加するものと仮定し、 $c_u = c_0 + k \cdot z$ 、($\phi = 0$)により表わす。ここで、 c_0 は地表面での非排水せん断強さ ($c_0 = 10$ kPa と仮定)、 k は土の非排水せん断強さの深さに対する増加割合を示すものであり、 k は土の水中単位体積重量 γ' と強度増加率 c_u/p 値の積に等しい。

Table 4は、実験に用いた7種類の試料に対し、試料の準備方法の違いにより得られたせん断強さを用いて安定解析を行った場合の安全率 F_s の値をまとめたものである。なお、 $(F_s)_u$ 値は乱さない試料、 $(F_s)_{rp}$ 値は原位置での有効土被り圧を考慮した練返し再圧密試料および $(F_s)_m$ 値は自然含水比を考慮した練返し再圧密試料のせん断強さをそれぞれ用いることにより得られた安全率の値を示している。

表より、 $(F_s)_u$ 値は、 $(F_s)_{rp}$ 値より5%程度、 $(F_s)_m$ 値より10%程度大きくなるという結果が得られた。このことは、練返し再圧密試料から得られたせん断強さを用いて実地盤の安定解析を行うことは、実地盤の安定性を過

Fig. 9 The case considered in the present analysis^{17), 18)}.

Table 4. The minimum factor of safety for continuous footing obtained by the slip circle method.

Soil	Depth(m)	I_p	$(F_s)_u$	$(F_s)_{rp}$	$(F_s)_{rn}$
M-1	7~8	26.2	1.27	1.31	—
M-2	13~14	30.3	1.28	1.25	—
M-3	14~15	28.1	1.27	1.22	—
M-4	16~17	26.8	1.28	1.27	—
M-5	32~33	18.9	1.24	1.18	1.18
M-6	33~34	17.0	1.30	1.27	1.23
M-7	35~36	20.0	1.32	1.28	1.22

$(F_s)_u$: Factor of safety obtained using undisturbed sample

$(F_s)_{rp}$: Factor of safety obtained using remoulded sample considered p

$(F_s)_{rn}$: Factor of safety obtained using remoulded sample considered w_n

小評価している可能性があることを示唆している。また、年代効果が実地盤の安全率に及ぼす影響は、10%程度となる。

4. 結 論

本研究では、乱さない試料と練返し再圧密試料のせん断特性を定量的に把握するために、 I_p の異なる7種類の乱さない試料および乱さない試料を2種類の予備圧密圧力により、練返し再圧密した試料に対して圧密定体積一面せん断試験を行った。

以下に、本研究により得られた主要な結果を列挙する。

(1) 予備圧密時において原位置での有効土被り圧を考慮した練返し再圧密試料の含水比 w_{rp} 値は、乱さない試料の含水比 w_n 値と比較して、5%～20%小さいにもかかわらず、最大せん断強さ τ_f 値は、乱さない試料が原位置での有効土被り圧を考慮した練返し再圧密試料より5%～10%大きな値となる。

(2) 乱さない試料と予備圧密時において自然含水比を考慮した練返し再圧密試料の最大せん断強さ τ_f 値は、両

試料の供試体の含水比がほぼ同じであるにもかかわらず、乱さない試料が自然含水比を考慮した練返し再圧密試料より10%~15%大きな値となる。

(3) 乱さない試料と練返し再圧密試料の最大せん断強さ τ_f 値は、乱さない試料が練返し再圧密試料より5%~15%大きな値を示すことが明らかとなった。このことより、乱さない試料が有していると考えられる年代効果の影響をせん断特性の面からある程度定量的に示した。

(4) 予備圧密時において原位置での有効土被り圧を考慮した練返し再圧密試料と自然含水比を考慮した練返し再圧密試料を比較すると、予備圧密時における圧密圧力の大きさの違いは、再圧密終了時のせん断特性に僅かに影響を及ぼす。

(5) 乱さない試料の最大せん断強さ τ_f 値は、練返し再圧密試料より大きな値を示し、圧密降伏応力 p_c 以上の圧密圧力 σ_{nc} 下で圧密された試料においても、年代効果により形成された土構造は、ある程度維持されているものと考えられる。

(6) 乱さない試料から得られたせん断強さを用いて安定解析を行うと、練返し再圧密試料のせん断強さを用いた場合と比較して安全率 F_s 値は、5%~10%大きな値となる。このことは、練返し再圧密試料から得られたせん断強さを実地盤に適用すると、実地盤の安定性を過小評価している可能性があることを示唆している。また、年代効果が実地盤の安全率 F_s 値に及ぼす影響は、10%程度であるといえる。

以上のことより、原位置において土要素が受けたと考えられる年代効果の影響を定量的に把握することは、実地盤の安定性を評価する際の重要な要素であるといえる。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、実験および結果の整理にご協力いただいた石川工業高等専門学校卒業生東出洋和(現, NTT (株))、與坂聡(現, 山口大学)両君に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 中瀬明男: 海洋土質, 技報堂, pp. 157~162, 1984
- 2) Graham, J. and Li, E. C. C.: Comparison of Natural and Remolded Plastic Clay, Proc. ASCE, Vol. 111, No. GT 7, pp. 865~881, 1985
- 3) 中瀬明男, 亀井健史: 日本近海における海底沖積粘土地盤の工学的特性, 土木学会論文報告集, No. 338, pp. 217~224, 1983
- 4) Bjerrum, L.: Problems of Soil Mechanics and Construction on Soft Clays and Structurally Unstable Soils (Collapsible, Expansive and Others), Proc. 8th ICSMFE, Vol. 3, pp. 111~159, 1973
- 5) Hanzawa, H.: Undrained Strength Characteristics of an Alluvial Marine Clay in the Tokyo Bay, Soils and Foundations, Vol. 19, No. 4, pp. 69~84, 1979
- 6) Ladd, C. C. and Foott, R.: New Design Procedure for Stability of Soft Clays, Proc. ASCE, Vol. 100, No. GT 7, pp. 763~786, 1974
- 7) 土田 孝: 三軸試験による自然粘性土地盤の強度決定法に関する研究, 運輸省港湾技研資料, No. 688, pp. 85~115, 1990
- 8) Mitachi, T. and Fujiwara, Y.: Undrained Shear Behavior of Clays Undergoing Long-term Anisotropic Consolidation, Soils and Foundations, Vol. 27, No. 4, pp. 45~61, 1987
- 9) 嘉門雅史, 長尾 毅: 人工的にセメンテーション効果を与えた粘性土の土質工学的特性について, 第21回土質工学研究発表会講演集, pp. 389~390, 1986
- 10) 嘉門雅史, 佐野郁雄, 陶 秀珍: 人工的に粒子間にセメンテーションを与えたカオリン粘土の物理化学的特性, 土木学会第42回年次学術講演会講演概要集, pp. 302~303, 1987
- 11) 土田 孝, 水上純一, 小林正樹, 平良 聡: 高温で再圧密した海成粘土の力学特性, 第23回土質工学研究発表会講演集, pp. 515~516, 1988
- 12) 土田 孝, 小林正樹, 水上純一, 田中政典: 高温再圧密による海成粘土の年代効果の再現, 運輸省港湾技術研究所報告, Vol. 28, No. 1, pp. 121~147, 1989
- 13) 亀井健史, 中村嘉博, 常田亮: 不攪乱試料と練返し試料における供試体の寸法効果, 第18回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, pp. 160~161, 1991
- 14) 三笠正人, 西垣好彦, 岡島洋一: 各種試験方法による c_u/p 値の比較, 第13回土質工学研究発表会講演集, pp. 325~328, 1978
- 15) 鈴木耕司, 吉田信行: 三軸および一面せん断試験による地盤の力学特性の評価, 三軸試験方法に関するシンポジウム発表論文集, 土質工学会, pp. 231~236, 1991
- 16) 土質工学会編: 土質試験法 [第2回改訂版], 1979
- 17) 中瀬明男: 粘性土地盤の支持力, 運輸省港湾技術研究所報告, Vol. 5, No. 12, 58 p, 1966
- 18) Kamei, T.: Effects of Undrained Shear Strength Anisotropy on Bearing Capacity Factor of Cohesive Soil Stratum, Tech. Rep. TUN., Vol. 8, pp. 207~215, 1986

(原稿受理日 平成4年7月15日)

高速リングせん断試験機による土砂の運動時の内部摩擦角の測定

「地すべり」Vol. 29, No. 4 (通巻第 112 号) pp. 1~8, 1993 年 (平成 5 年) 3 月

佐々 恭二, 福岡 浩

地すべり運動時に発揮される内部摩擦角は、通常のせん断試験で得られる内部摩擦角とは必ずしも同じではないと思われる。そこで実際の地すべりの運動に対応する速度でせん断抵抗を計測することを目的として、表層崩壊などを研究対象とした低圧用 (39 kpa) の高速リングせん断試験機と地すべりを研究対象とした高圧用 (390 kpa) の高速リングせん断試験機を開発した。最初、低圧用高速リングせん断試験機を用いて、直径 1 mm のガラスビーズについて予備試験を行い、間隙流体の粘性抵抗は、表層崩壊に対応する (10~40 kpa 程度) 低い垂直応力のもとでも摩擦抵抗に比べて無視し得ることを確認した。ついで、高速高圧リングせん断試験機を用いて御岳大崩壊や地附山地すべりの土など種々の土について 0.01 cm/sec~100 cm/sec のせん断速度で試験を行った。その結果、得られた内部摩擦角は土によって挙動が異なり、せん断速度の増大により内部摩擦角が増大するもの、逆に減少するもの、ほとんど変化しないものがあった。しかしその変化は-3.2 度から+3.7 度までの範囲にあり、それほど大きなものではなかった。これらの内部摩擦角の変化の原因としては、せん断中の粒子の破砕による粒度分布と粒子形状の変化が考えられ、また、比較的粒径がそろっている材料では、粒子がせん断方向に配列する影響があると思われる。

地すべり粘性土の一面せん断試験における破壊の伝播過程

「地すべり」Vol. 29, No. 4 (通巻第 112 号) pp. 9~17, 1993 年 (平成 5 年) 3 月

釜井 俊孝, 宮田雄一郎

地すべり粘土の定体積一面せん断試験を行い、供試体内部における破壊面の発達過程について、特に破壊の伝播速度の観点から検討を加えた。試料には福島県与内畑地すべりから採取された粘土、カリオン HA、ペントナイトを用意し、直径 6 cm、高さ 2 cm の円盤状供試体に導電性塗料を塗布した 6 本の素麺マーカーをせん断方向に対して縦列に配置し、せん断した。せん断に先だってこれらの電極に 5 V の電圧を加え、供試体の変形とせん断によって電圧が逐次的に低下する状況を記録した。軟 X 線写真による観察から、これらの電極の切断プロセスは、供試体内部における破壊面の発達過程を的確に表現していることが明らかにされ、この電極の開発によって破壊の伝播速度を議論することが可能になった。

モデル化された切土斜面の 3 次元安定解析と留意点

「地すべり」Vol. 29, No. 4 (通巻第 112 号) pp. 18~24, 1993 年 (平成 5 年) 3 月

鶴飼 恵三, 萩原 敏行, 井田 寿朗

モデル化された切土斜面に対して簡便分割法と弾塑性 FEM を用いた 3 次元安定解析を行い分割法を適用する際の留意点を示し、現実に近いすべり面形状の予測には弾塑性 FEM を用いることが有効であることを指摘した。

試料の準備方法の違いが粘性土のせん断特性に及ぼす影響

「地すべり」Vol. 29, No. 4 (通巻第 112 号) pp. 25~31, 1993 年 (平成 5 年) 3 月

亀井 健史, 佐野 博昭

本研究では、試料の準備方法の違いが粘性土のせん断特性に及ぼす影響を解明するために、乱さない試料と練返し再圧密試料に対して圧密定体積一面せん断試験を行った。

その結果、乱さない試料と練返し再圧密試料の強度・変形特性は、大きく異なることが定量的に示された。このことより、練返し再圧密試料より得られたせん断強さを実地盤に適用した場合、得られた解析結果は、実地盤の安定性を過小評価している可能性があることを示唆した。

地すべり地における表面歪の分布と変化

「地すべり」Vol. 29, No. 4 (通巻第 112 号) pp. 32~36, 1993 年 (平成 5 年) 3 月

川邊 洋, 芝野 博文

小規模な地すべり地に、2~4 m 間隔でほぼ格子状に配置した多数の測点の移動を、光波セオドライトを用いて繰り返し測量した。そのデータに二次元有限均一歪理論を適用して、地表面の水平歪の分布と経時変化を求めた。その結果、この方法は地すべりの局所的な変動の検出や予測のためのデータの取得に非常に有効であることが明らかになった。

地震とマスムーブメント

「地すべり」Vol. 29, No. 4 (通巻第 112 号) pp. 37~44, 1993 年 (平成 5 年) 3 月

中山 康

斜面の地震災害には、岩石斜面の崩落と土砂斜面の滑動がある。前者は大きな加速度 (すなわち力) で、後者は大きな仕事 work で発生する。斜面における加速度は震度 (最大加速度) で表現される。斜面滑動に関与する仕事は、震源のマグニチュード・震央距離で定まる到達エネルギーのうち波形に基づく何割かが転化したものである (波形が人工的な正弦曲線の場合、この割合は 0 となる)。

このため、地震災害のハザードマップは 2 種類必要となり、「最大加速度」ならびに「マグニチュードと震央距離」についての確率を知ることになる。