

海成粘性土の一軸圧縮試験結果に及ぼす寸法効果の影響

The Scale Effects on Unconfined Compression Test Results of Marine Clays

亀井 健史 (かめい たけし)

基礎地盤コンサルタンツ(株)地盤物性研究室 室長

常田 亮 (ときだ まこと)

長野工業高等専門学校講師 土木工学科

1. はじめに

一軸圧縮試験は、粘性土地盤の安定問題を評価する場合に、最も一般的に実施されている力学試験の一つである。

しかしながら、現場における試料採取に着目すると、実際に採取したいいわゆる不攪乱試料にはクラックが存在していることもあり¹⁾、不均質である場合や試料の総量が不足している場合も少なくない。このような場合、土質試験法²⁾で定められた標準寸法の供試体を用いて試験を行うことが不可能となり、規格外の寸法の供試体を用いた試験を実施せざるを得なくなる。また、極小供試体の試験結果が工学的な観点から有意性を持つならば、サンプリング長の短縮などにより、サンプリング時間およびサンプリングコストの低減が図られる。したがって、極小供試体に関する試験結果を定量的に評価できることは、工学的に重要な意味を持つことが容易に想定される。さらに、サンプリング時に乱れを受けた試料が乱さない試料とほぼ同様の評価が可能となれば、その評価手法の工学的有意性は、大きいものと考えられる。

既往の研究例³⁾によれば、節理やクラックが存在している岩盤および粘性土地盤のせん断強さは、供試体の断面積比の増加に伴って低下することが明らかとなっている。また、亀井・常田⁴⁾は、塑性指数が異なる2種類の練返し陸成粘性土を用いて、直径および高さとの比を変化させた円柱供試体に対して一軸圧縮試験を行い、一軸圧縮強さ(q_u)と変形係数(E_{50})が供試体寸法の低下に伴って増大することを明らかにするとともに、一軸圧縮強さおよび変形係数の寸法効果に関する工学的評価手法を提案している。

一方、自然地盤から採取した粘性土の強度・変形

特性は、室内で調整した練返し粘性土の強度・変形特性とは異なることが指摘されている⁵⁾。亀井・佐野⁶⁾は、不攪乱および練返し海成粘性土に対して一面せん断試験を行い、練返し試料の含水比が不攪乱試料よりもわずかに低くなったにもかかわらず、不攪乱試料の最大せん断強さが練返し試料よりも大きくなることを明らかにし、その差を定量的に示している。

上記のような点に着目して、本研究では、不攪乱および練返し海成粘性土を用いて、極小供試体から通常寸法²⁾の供試体まで、種々の寸法を有する円柱供試体に対して一軸圧縮試験を行い、試料の準備方法および供試体寸法が一軸圧縮強さ・変形特性に及ぼす影響について検討した。また、土要素が受けていた有効土被り圧が、極小供試体の寸法効果に及ぼす影響についても検討を行った。

2. 試料および実験方法

実験に使用した試料は、東京湾の海成沖積粘性土地盤から採取した不攪乱および練返し海成粘性土(東京湾土:比較的鋭敏な粘土)と名古屋で採取した不攪乱海成粘性土(名古屋土)である。東京湾土の採取深さは29.0~31.8mであり、有効土被り圧は全試料ほぼ同程度(2.0 kgf/cm²)であると考えられた。また、名古屋土の採取深さは5.00~5.85mであり、有効土被り圧は0.25~0.30 kgf/cm²であった。

練返し東京湾土は、不攪乱試料が受けていた有効土被り圧と予備圧密圧力を一致させ、スラリー状にした試料に対して一次圧密終了期間などを考慮して約1週間予備圧密を行い作成した。その結果、練返し試料の含水比(w_R)は、自然含水比よりも5%程度低くなった。代表的な不攪乱試料の物理的特性を表-1に示す。

表-1 代表的な試料の物理的特性

試料	G_s	w_n (%)	w_R (%)	w_L (%)	w_p (%)	I_p	砂分 (%)	シルト分 (%)	粘土分 (%)	ρ_{dn} (g/cm ³)	ρ_{dR} (g/cm ³)
東京湾土	2.686	53.6	46.3	62.2	34.1	28.1	3.0	45.0	52.0	1.095	1.184
名古屋土	2.675	97.3	—	89.2	28.1	61.1	2.1	38.8	59.1	0.754	—

w_R : 練返し試料の予備圧密終了時の含水比(%) ρ_{dn} : 不攪乱試料の乾燥密度(g/cm³) ρ_{dR} : 練返し試料の乾燥密度(g/cm³)

供試体の形状は円柱形²⁾であり、直径を5.0cm, 3.5cm, 2.0cm, 1.0cmの4種類とし、高さとの比(H/D比)が2.0, 1.5, 1.0となるように成形した。直径が5.0cmと3.5cmの供試体は、ワイヤーソーとトリマーで円柱形とした後、マイターボックスを用いて所定のH/D比となるように成形した。一方、直径が2.0cmと1.0cmの供試体は、試料の乱れを極力少なくするために、先端部を0.1mmに加工したステンレス製サンプリング装置(内径:2.0cm, 1.0cm, 高さ:10cm)を用いて、所定のH/D比(H/D=2.0, 1.5, 1.0)となるようにあらかじめ高さを調整した試料からサンプリングし成形した。

一軸圧縮試験はひずみ制御方式で行い、せん断時のひずみ速度は1.0%/minとした²⁾。また、強度・変形特性に及ぼす端面摩擦の影響を軽減するために、一軸圧縮試験装置の上下拘束板にシリコングリースとシリコンオイルを混合したものを塗布した。さらに、供試体作成後の含水比の変化を避けるため、トリミング後ただちに実験を開始した。

3. 実験結果および考察

3.1 強度・変形特性に関する寸法効果

図-1は、直径を3.5cm, H/D比を2.0および1.0とした場合の不攪乱および練返し試料の応力-ひずみ関係を示したものである。

直径が3.5cmの場合、不攪乱試料の応力-ひずみ曲線にはH/D比によらず明りょうなピークが認められ、変形特性は若干異なるものの、軸ひずみが5%程度に達すると破壊に至っている。これに対して、練返し試料の場合には明りょうなピークが認められず、軸ひずみが6~8%に達すると圧縮応力はほぼ一定値を示している。また、応力-ひずみ曲線の初期勾配は、H/D比によらず不攪乱試料が練返し試料よりも大きくなっており、不攪乱試料のせん断剛性が練返し試料よりも大きいことがわかる。

一方、一軸圧縮強さは、H/D比によらず不攪乱

試料が練返し試料よりも約20%も大きな値を示している。このことより、有効土被り圧と同等の圧力で予備圧密を行った場合には、練返し試料の含水比が不攪乱試料よりも低くなったにもかかわらず、練返し試料の一軸圧縮強さが不攪乱試料よりも著しく低下していることがわかる。上記の試験結果は、既往の研究例⁶⁾とも一致しており、一軸圧縮強さは試料の準備方法の違いによる影響を顕著に受けていることが明らかである。また、一軸圧縮強さは、両試料ともH/D比が1.0の場合が2.0の場合よりも大きな値を示しており、寸法効果の影響が明りょうに認められる。

次に、H/D比を2.0および1.0とした場合の不

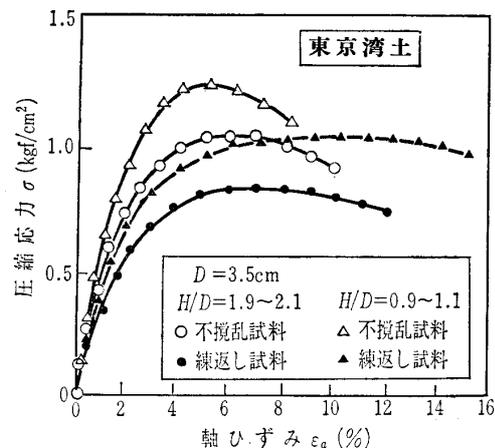


図-1 代表的な応力-ひずみ関係: 不攪乱および練返し試料

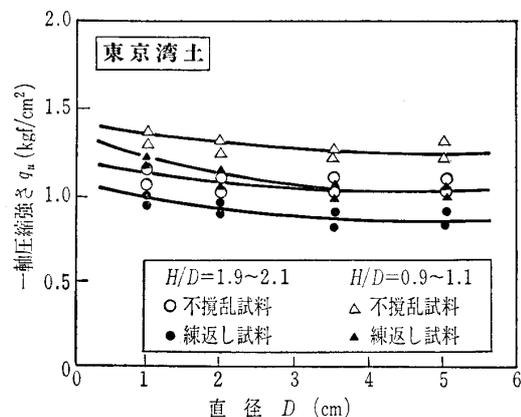


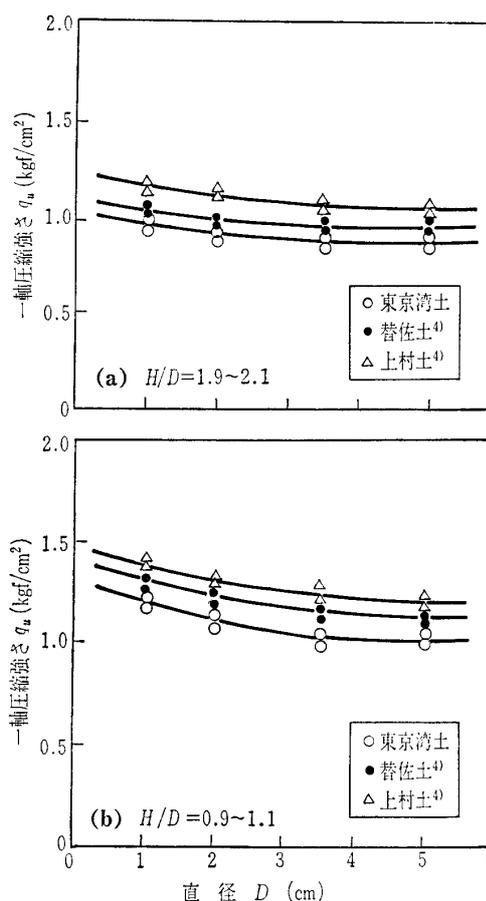
図-2 一軸圧縮強さと直径の関係: 不攪乱および練返し試料

攪乱および練返し試料の一軸圧縮強さと直径の関係を図—2に示す。

一軸圧縮強さは、表—1に示すように、練返し試料の含水比が不攪乱試料よりも5%程度低くなったにもかかわらず、直径および H/D 比によらず不攪乱試料が練返し試料よりも約15~20%も大きな値を示している。したがって、両試料が同含水比の条件の場合では、練返し試料の一軸圧縮強さがさらに低下し、両試料の一軸圧縮強さの差はより大きくなるものと考えられる。これは、従来から指摘されているように⁵⁾、不攪乱試料は海底において長期間にわたりゆっくりと粘土粒子が堆積して形成されるために、セメンテーションや二次圧密などの時間効果の影響によって土粒子構造が発達しており、その結果として、一軸圧縮強さが増大していることを示唆している。これに対して、練返し試料の場合には、土粒子構造が再構成されているために、時間効果の影響が失われているものと考えられる。一軸圧縮強さは、両試料とも直径および H/D 比の低下に伴って増大する傾向を示しており、一軸圧縮強さに関する寸法効果の変化傾向は、不攪乱および練返しの影響をほとんど受けないことが明らかとなった。さらに、直径の低下に伴う一軸圧縮強さの増大傾向は、練返し試料が不攪乱試料よりもわずかに顕著であり、両試料の一軸圧縮強さの差は、直径が3.5cmの場合には約20%であり、直径が1.0cmになると13%程度となっている。

図—3(a), (b)は、試料の生成過程の違いが一軸圧縮強さに関する寸法効果に及ぼす影響を検討するために、 H/D 比が2.0および1.0の場合の練返し海成粘性土と練返し陸成粘性土⁴⁾の一軸圧縮強さと直径の関係を示したものである。なお、各試料の予備圧密は、同一の予備圧密圧力(2.0 kgf/cm²)で行っている。また、練返し陸成粘性土⁴⁾の物理的特性を表—2に示す。

図—3より、一軸圧縮強さは、各試料とも直径お



図—3 一軸圧縮強さと直径の関係：練返し試料

び H/D 比の低下に伴って増大しており、一軸圧縮強さは異なるものの、寸法効果の変化傾向には試料による相違が認められない。また、直径の低下に伴う一軸圧縮強さの増大傾向は、各試料とも H/D 比が1.0の場合が2.0の場合よりも顕著であることがわかる。さらに、一軸圧縮強さは、供試体寸法によらず陸成粘性土が海成粘性土よりも大きくなっており、粒度組成、乾燥密度および試料の物理化学的性質などの違いによる影響が表れているものと考えられる。

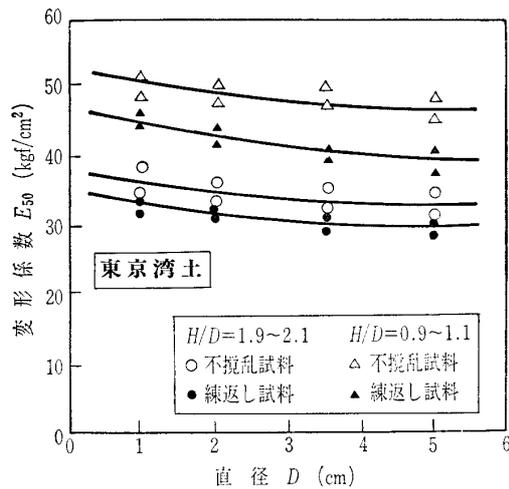
以上のことより、一軸圧縮強さは、直径および H/D 比の低下に伴って端面拘束の影響が大きくなるために、過大な値を示すものと考えられる。したがって、極小供試体を用いた場合には、寸法効果に関する補正を行わなければ、一軸圧縮強さを過大評

表—2 試料の物理的特性⁴⁾

試料	G_s	w_R (%)	w_L (%)	w_p (%)	I_p	砂分 (%)	シルト分 (%)	粘土分 (%)	ρ_{dR} (g/cm ³)
替佐土	2.707	32.1	54.8	18.7	36.1	44.8	31.3	23.9	1.349
上村土	2.612	30.6	49.4	35.9	13.5	20.1	38.3	41.6	1.380

w_R : 練返し試料の予備圧密終了時の含水比(%)

ρ_{dR} : 練返し試料の乾燥密度(g/cm³)



図—4 変形係数と直径の関係：不攪乱および練返し試料

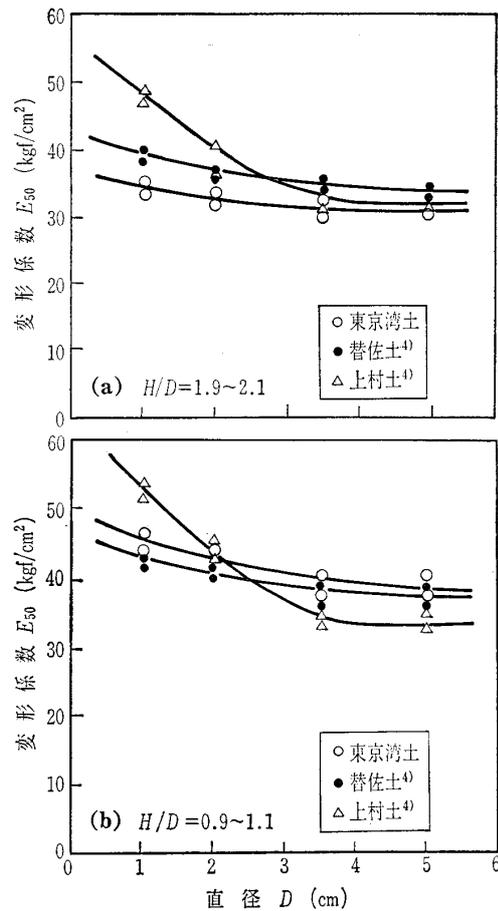
価する可能性がある。また、練返し試料を用いた場合には、その実験値に対して不攪乱と練返しに関する補正を行わなければ、実地盤の一軸圧縮強さを過小評価することになる。さらに、一軸圧縮強さに関する寸法効果の変化傾向は、試料の生成過程によらずほぼ類似した傾向を示すことが明らかとなった。

図—4は、不攪乱および練返し試料の変形係数と直径の関係を示したものである。

変形係数は、不攪乱試料の乾燥密度が練返し試料よりも小さくなっているにもかかわらず、各供試体寸法条件において不攪乱試料が練返し試料よりも大きくなっている。このことは、不攪乱試料の土粒子構造が時間効果の影響によって練返し試料よりも発達したものになっているために、せん断剛性が增大していることを示している。また、両試料の変形係数の差は、 H/D 比が2.0の場合には10%程度であったものが、 H/D 比が1.0になると約15~20%となっている。このように、 H/D 比が1.0になると両試料の変形係数の差が増大するのは、不攪乱試料と練返し試料の一軸圧縮強さの差が大きくなることに起因しているものと考えられる。さらに、変形係数は、両試料とも直径および H/D 比の低下に伴って増大する傾向を示している。

次に、 H/D 比が2.0および1.0の場合の練返し海成粘性土と練返し陸成粘性土⁴⁾の変形係数と直径の関係を図—5(a)、(b)に示す。

変形係数は、各試料とも直径および H/D 比の低下に伴って増大しており、変形係数に関する寸法効

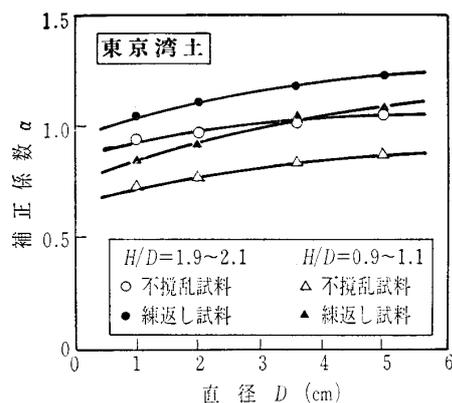


図—5 変形係数と直径の関係：練返し試料

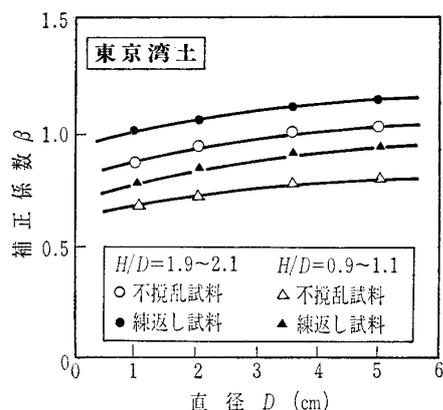
果の変化傾向には、試料の生成過程の違いによる相違が認められない。しかし、塑性指数が小さい上村土の場合、変形係数は直径の低下に伴って著しい増大傾向を示しているのに対して、塑性指数が30程度の東京湾土と35程度の替佐土の場合には、ほぼ類似した増大傾向を示している。したがって、変形係数が塑性指数に依存することを考慮すると⁷⁾、直径の低下に伴う変形係数の増大傾向は、塑性指数の影響を受ける可能性があるものと考えられる。

以上のことより、変形係数は、供試体の直径および H/D 比の低下に伴って増大するので、極小供試体の試験結果を用いる場合には、寸法効果に関する補正を行う必要がある。また、練返し試料の試験結果を用いる場合には、その実験値に対して不攪乱と練返しに関する補正を行い、変形係数を評価する必要があるものと考えられる。

上記の試験結果に基づいて、本研究では、極小供試体の試験結果から学会基準の寸法²⁾を有する供試体の一軸圧縮強さおよび変形係数を評価する場合の補正係数 α および β の検討を行った。なお、補正係



図一六 一軸圧縮強さに関する補正係数と直径の関係：不攪乱および練返し試料



図一七 変形係数に関する補正係数と直径の関係：不攪乱および練返し試料

準寸法の供試体の試験結果よりも大きいことを示しており、実験値から標準寸法の供試体の一軸圧縮強さと変形係数を評価する場合には、補正係数を乗ずることによりその実験値を低減しなければならないことを示唆している。

補正係数 α および β は、供試体寸法によらず練返し試料が不攪乱試料よりも大きくなっており、練返し試料の試験結果から実地盤の一軸圧縮強さと変形係数を評価した場合には、不攪乱と練返しに関する補正を行わなければ、実地盤の一軸圧縮強さと変形係数を過小評価する可能性のあることがわかる。また、補正係数 α および β は、両試料とも直径および H/D 比の低下に伴って小さくなっており、極小供試体を用いた場合には、寸法効果に関する補正を行わなければ、標準寸法の供試体の一軸圧縮強さと変形係数を過大評価することになるものと考えられる。

以上のことより、標準寸法の供試体の一軸圧縮強さおよび変形係数は、各寸法条件の供試体から得られた実験値に対して補正係数 α および β を乗ずることにより、ある程度評価することが可能となるものと考えられる。また、補正係数 α および β を粒度組成やコンシステンシーなどから一義的に決定できる関係を示すことが可能となれば、その評価手法の工学的有意性は、さらに大きくなるのが容易に想定される。

3.2 浅層部より採取した不攪乱試料の強度・変形特性に関する寸法効果

図一八は、 H/D 比を変化させた場合の名古屋土の一軸圧縮強さと直径の関係を示したものである。

浅層部より採取した名古屋土の場合、一軸圧縮強さは、供試体の直径が 3.5 cm 以下であればほぼ一定値であり、直径が 5.0 cm の場合のみわずかに小さな値を示している。また、各寸法条件の供試体より得られた一軸圧縮強さは、図一九に示すように、0.2~0.3 kgf/cm² 程度の値を示しており、 H/D 比によらずほぼ一定値であるものと考えられる。

次に、 H/D 比を変化させた場合の名古屋土の変形係数と直径の関係を図一十に示す。

変形係数は、直径が 3.5 cm 以下の場合、ほぼ一定値となっており、直径が 5.0 cm の場合のみわずかに小さな値を示している。また、図一十一より、変形係数は、各寸法条件において約 15~20 kgf/cm²

数 α および β は、式(1)と式(2)で定義した。

$$\alpha = q_{u0} / q_u \dots\dots\dots(1)$$

α : 一軸圧縮強さに関する補正係数

q_{u0} : 標準寸法の一軸圧縮強さ (kgf/cm²)
($D=3.5$ cm, $H/D \cong 2.0$)

q_u : 標準寸法以外の一軸圧縮強さ (kgf/cm²)

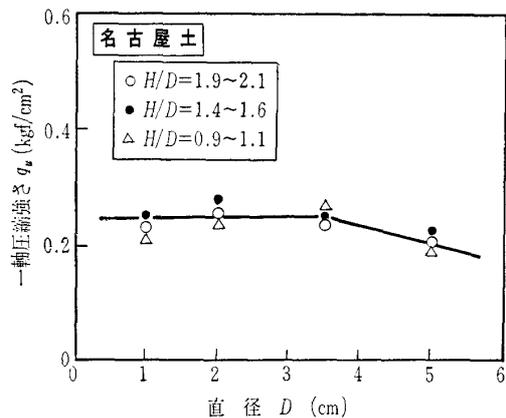
$$\beta = (E_{50})_0 / E_{50} \dots\dots\dots(2)$$

β : 変形係数に関する補正係数

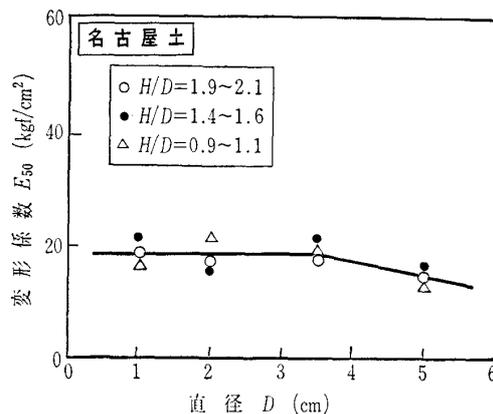
$(E_{50})_0$: 標準寸法の変形係数 (kgf/cm²)
($D=3.5$ cm, $H/D \cong 2.0$)

E_{50} : 標準寸法以外の変形係数 (kgf/cm²)

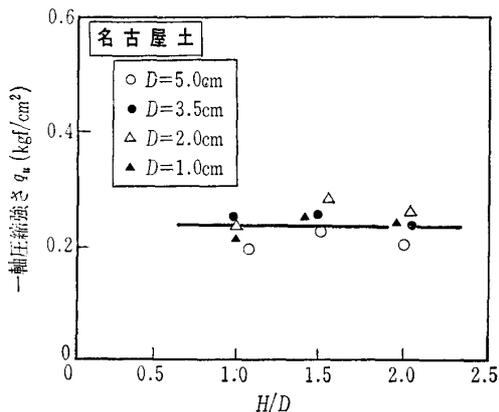
図一六および図一七は、 H/D 比を 2.0 と 1.0 とした場合の一軸圧縮強さに関する補正係数 α および変形係数に関する補正係数 β と直径の関係を示したものである。ここで、補正係数 α と β は、不攪乱試料の標準寸法の供試体の一軸圧縮強さと変形係数をそれぞれ q_{u0} および $(E_{50})_0$ として算出し、図中の 1 点は同一条件の供試体より得られた補正係数の平均値を示している。また、同図において補正係数 α および β が 1.0 よりも小さくなることは、実験値が標



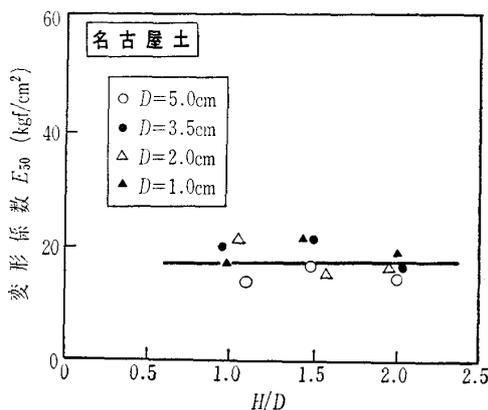
図—8 一軸圧縮強さと直径の関係：不攪乱試料



図—10 変形係数と直径の関係：不攪乱試料



図—9 一軸圧縮強さと H/D 比の関係：不攪乱試料



図—11 変形係数と H/D 比の関係：不攪乱試料

の値を示しており、 H/D 比によらずほぼ一定値となっていることがわかる。

以上のように、浅層部より採取した試料の場合には、一軸圧縮強さおよび変形係数に関する寸法効果の影響は明りょうに表れなかった。このことより、20m以深の海底地盤から採取した試料の試験結果と比較すると、浅層部より採取した試料の場合には、極小供試体と標準寸法²⁾の供試体の試験結果は、ほぼ同等に評価できる可能性があるものと考えられる。

4. まとめ

海成粘性土の一軸圧縮試験結果に及ぼす寸法効果の影響を解明するために、種々の寸法を有する不攪乱および練返し海成粘性土に対して一軸圧縮試験を実施した。その結果、不攪乱試料と練返し試料との一軸圧縮強さ・変形特性に関する寸法効果の影響を定量的に明らかにした。また、標準寸法の供試体と極小供試体との試験結果を対比し、一軸圧縮強さおよび変形係数に関する補正係数を提案することにより、極小供試体の有用性を工学的観点から示唆した。

さらに、寸法効果に及ぼす有効土被り圧の影響に関しても考察を加えた。

参考文献

- 1) 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，運輸省港湾技術研究所資料，No. 688，pp. 199，1990。
- 2) 土質工学会編：土質試験法（第2回改訂版），1979。
- 3) 土質工学会編：土質調査試験結果の解釈と適用例（第1回改訂版），土質基礎工学ライブラリー，No. 4，pp. 208，1984。
- 4) 亀井健史・常田 亮：一軸圧縮強度・変形特性に及ぼす供試体寸法の影響，土木学会論文集，No. 436/III-16，pp. 131~134，1991。
- 5) Graham, J. and Li, E.C.C.: Comparison of natural and remolded clay, JGED, ASCE, Vol. 111, No. GT7, pp. 865~881, 1985.
- 6) 亀井健史・佐野博昭：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, pp. 25~31, 1993.
- 7) Nakase, A. and Kamei, T.: Influence of anisotropy of deformation modulus on effective stress path, Soils and Foundations, Vol. 24, No. 2, pp. 106~110, 1984.

(原稿受理 1992. 12. 10)