

極小供試体による一軸圧縮試験結果の 経済的評価手法*

常田 亮**・亀井健史***

ECONOMIC EVALUATION OF UNCONFINED COMPRESSION TEST RESULTS USING A VERY SMALL SPECIMEN

Makoto TOKIDA and Takeshi KAMEI

Scale effects on unconfined compressive strength-deformation characteristics of marine clay have been investigated experimentally using unconfined compression tests.

The test result that the unconfined compressive strength of undisturbed samples turned out to be larger than that of remoulded samples may be explained by the fact that the grain skeleton of the undisturbed samples offers greater resistance to compression than the destroyed grain skeleton of the prepared samples. Based on the experimental findings described in the present paper, we proposed the correction factors for the scale effects on the unconfined compressive strength and the secant modulus. The test results obtained by small size specimens are found to be reasonable and encouraging for the use of the small size specimens in engineering practice.

1. はじめに

一軸圧縮試験は、粘性土地盤のせん断強さを求める試験として最も簡便なものであることが知られており、数多く実施することが容易であることから、最も一般的に普及している力学試験の一つである。わが国では、昭和30年代から今日まで粘性土地盤の強度決定にあたって実地盤から採取した不攪乱試料を用いて一軸圧縮試験を行い、一軸圧縮強さ q_u の $1/2$ の平均値をもって実地盤のせん断強さとする方法が広く用いられてきた¹⁾。

しかしながら、現場における試料採取に着目すると、実際に採取した不攪乱試料にはクラックが存在していることもあり²⁾、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³⁾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て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、サンプリング時間及びサンプリングコストの低減が図られる。したがって、極

* 第26回土質工学研究発表会において一部発表

** 土木工学科講師

*** 基礎地盤コンサルタンツ(株) 地盤物性室室長

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、工学的に重要な問題である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に対して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。

既存の研究例によれば³⁾⁴⁾、節理やクラックが存在している岩盤及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⁵⁾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、供試体の直径及び高さとの比 (H/D 比) を変化させた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、一軸圧縮強さ及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、室内で調整され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おり⁶⁾、佐野・亀井⁷⁾は、不攪乱及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僅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するとともに、その差を定量的に示している。

以上の点に着目し、本研究では、不攪乱及び練返し海成粘性土を用いて供試体の直径及び H/D 比を変化させた一軸圧縮試験を行い、試料の準備方法及び供試体寸法の違いが、粘性土の強度・変形特性に及ぼす影響について検討を行った。また、上記の試験結果に基づいて、極小供試体の試験結果から学会基準の寸法を有する供試体の一軸圧縮強さ及び変形係数を推定する場合の簡便な評価手法を提案している。

2. 試料及び実験方法

2-1 試料

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塑性指数 I_p が30程度の不攪乱及び練返し海成粘性土である。不攪乱試料の採取深さは29.0m~31.8mであり、有効土かぶり圧はほぼ同程度であると考えられた。また、練返し試料は、不攪乱試料が受けていた有効土かぶ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約1週間圧密を行い作成した。その結果、練返し試料の含水比は、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 Table 1 に示す。

供試体の形状は、土質試験法²⁾を参考にして円柱形とした。また、供試体の直径は、5.0 cm, 3.5 cm, 2.0 cm, 1.0 cm 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5.0 cm と3.5 cm 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、

Table 1. Index properties of soil sample.

Soil Sample	Gs	w_n (%)	w_r (%)	w_l (%)	w_p (%)	I_p	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)
Tokyo Bay Soil	2.686	53.6	46.3	62.2	34.1	28.1	3.0	45.0	52.0

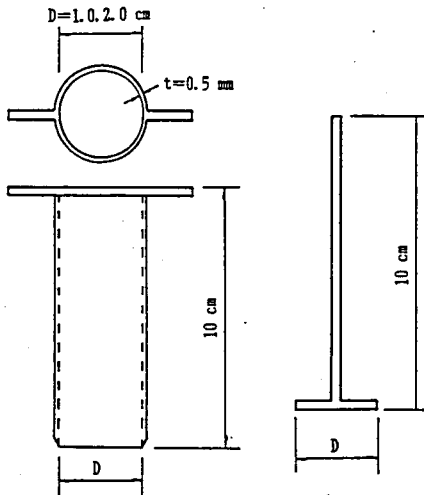


Fig. 1 Sampling tube used in the present study

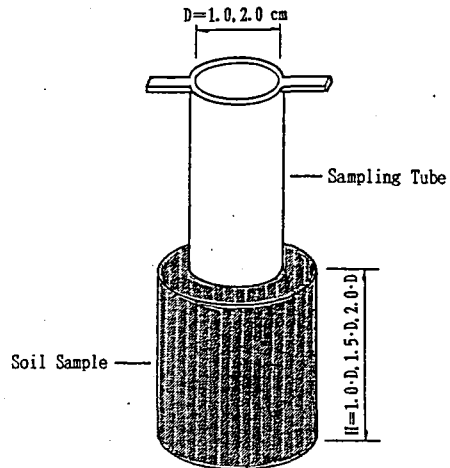


Fig. 2 Specimen preparation method for very small specimens

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 (Fig. 1) を用いて、Fig. 2に示すように、所定の H/D 比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。

2-2 実験方法

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⁾。なお、実験は、データのばらつきを考慮して、同一条件の供試体に対して2本以上行った。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、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. 実験結果及び考察

3-1 応力と軸ひずみの関係

Fig. 3(a), (b)は、直径を3.5cmとして H/D 比を1.0及び2.0とした場合の不攪乱及び練返し試料の代表的な応力-ひずみ関係を

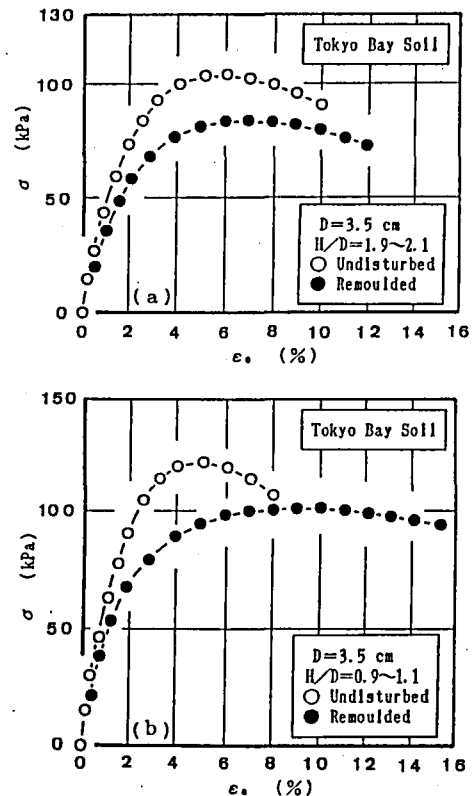


Fig. 3 Typical stress-axial strain behaviour: undisturbed and remoulded samples.

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 比によらず明瞭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瞭なピークが認められず、軸ひずみが6%~8%程度に達すると圧縮応力はほぼ一定値を示し、破壊時の軸ひずみは H/D 比の低下に伴って大きくなっている。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20%程度大きな値を示している。このことより、有効土かぶ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ているにもかかわらず、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⁷⁾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 比の低下に伴って増大しており、寸法効果の影響が明瞭に認められる。

3-2 一軸圧縮強さと直径の関係

H/D 比を変化させた場合の不攪乱及び練返し試料の一軸圧縮強さと直径の関係を、Fig. 4 (a)~(c)に示す。

一軸圧縮強さは、Table 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%程度低くなっているにもかかわらず、直径及び H/D 比によらず不攪乱試料が練返し試料よりも15%~20%程度大きくなっている。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^{6),8)}、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

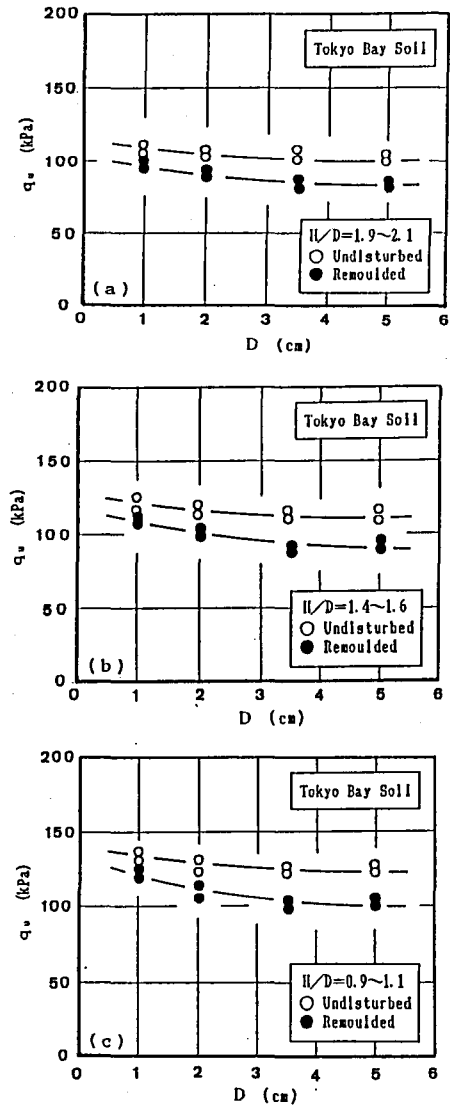


Fig. 4 Relationship between unconfined compressive strength and diameter: undisturbed and remoulded samples.

Table 2. Index properties of soil samples.⁵⁾

Soil Sample	G _s	w _L (%)	w _p (%)	I _p	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)
Kaesa Soil	2.707	54.8	18.7	36.1	44.8	31.3	23.9
Kamimura Soil	2.612	49.4	35.9	13.5	20.1	38.3	41.6

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、一軸圧縮強さが大きくなっていることを示唆している。一方、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。また、一軸圧縮強さは、両試料とも直径及びH/D比の低下に伴って増大する傾向を示しており、一軸圧縮強さの寸法効果に関する変化傾向は、不攪乱及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僅かに顕著であり、両試料の一軸圧縮強さの差は、直径が3.5cmの場合20%程度であったものが、直径が1.0cmになると13%程度と減少している。

Fig. 5 (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、練返し海成粘性土と練返し陸成粘性土⁵⁾の一軸圧縮強さと直径の関係を示したものである。各試料の予備圧密は、同一の圧密圧力(200kPa)で行っている。なお、ここでは、H/D比が2.0及び1.0の場合について検討している。また、練返し陸成粘性土⁵⁾の物理的特性をTable 2に示す。

図より、一軸圧縮強さは、各試料とも直径及び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、粒度組成の違いによる影響が認められる。

以上のことより、一軸圧縮強さは、直径及びH/D比の低下に伴って端面拘束の影響が大き

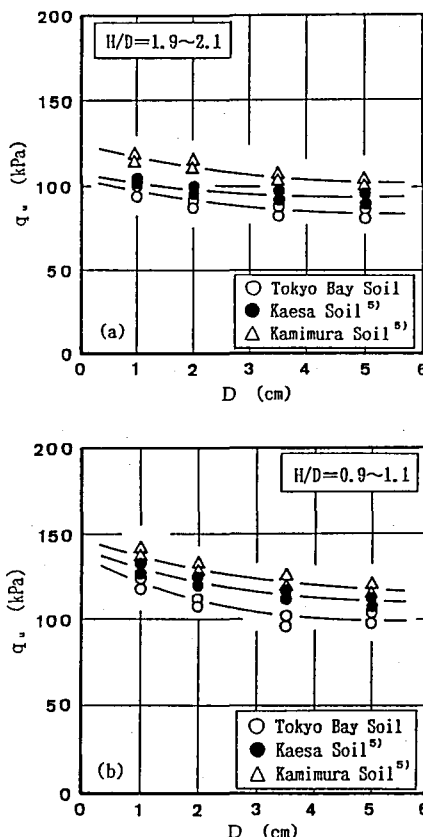


Fig. 5 Typical relationship between unconfined compressive strength and diameter : remoulded samples.

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、測定値を低減するような補正を行わなければ、一軸圧縮強さを過大評価する可能性がある。また、練返し試料を用いた場合には、一軸圧縮強さは不攪乱試料を用いた場合よりも低い値を示すので、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、練返し海成粘性土と練返し陸成粘性土の試験結果から判断して、一軸圧縮強さに関する寸法効果は、試料の生成過程によらずある程度対応性を有しているものと考えられる。

3-3 変形係数と直径の関係

Fig. 6(a)~(c)は、不攪乱及び練返し試料の変形係数 E_{50} と直径の関係を示したものである。変形係数は、直径及び 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、せん断剛性が増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程度の場合には10%程度であったものが、 H/D 比が1.5以下になると15%~20%程度と大きくなっている。このように、 H/D 比が1.5以下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結果から生じているものと考えられる。さらに、変形係数は、両試料とも直径及び H/D 比の低下に伴って増大しており、試料の準備方法による相違が認められない。

次に、 H/D 比が2.0及び1.0の場合の練返し海成粘性土と練返し陸成粘性土⁵⁾の変形係数と直径の関係を Fig. 7(a), (b)に示す。

図より、変形係数は、各試料とも直径及び 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果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、直径の低下に伴う変形係

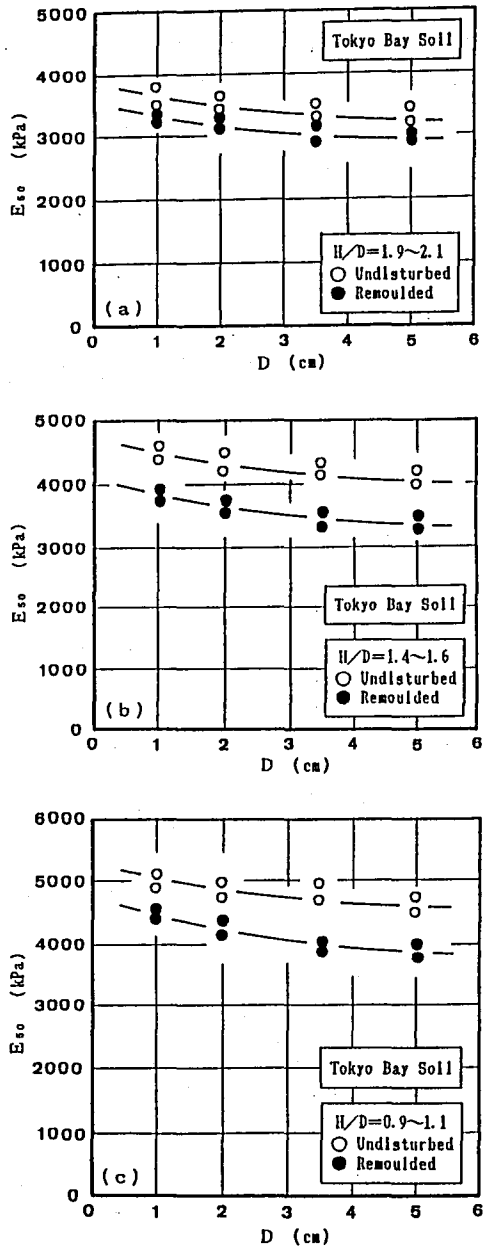


Fig. 6 Relationship between deformation modulus (E_{50}) and diameter : undisturbed and remoulded samples.

数の増大傾向は塑性指数に依存し、塑性指数が低い試料の場合には、変形係数の増大傾向が著しくなるものと考えられる。

以上のことより、変形係数は、供試体寸法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、変形係数を低減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。

3-4 強度・変形特性に関する補正係数 (α , β)

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を有する供試体の一軸圧縮強さ及び変形係数を評価する場合の補正係数 α 及び β の検討を行った。なお、補正係数 α 及び β は、式(1)及び式(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 (kPa)
($D=3.5\text{cm}$, $H/D \approx 2.0$)

q_u : 標準寸法以外の一軸圧縮強さ (kPa)

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

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 (kPa)
($D=3.5\text{cm}$, $H/D \approx 2.0$)

E_{50} : 標準寸法以外の変形係数 (kPa)

Fig. 8 (a)~(c)は、一軸圧縮強さに関する補正係数 α と直径の関係を示したものである。ここで、補正係数 α は、不攪乱試料の標準寸法の供試体の一軸圧縮強さを q_{u0} 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 α の平均値を示している。また、同図において補正係数 α が1.0よりも小さくなることは、測定値が標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、測定値から標準寸法の一軸圧縮強さを評価する場合には、補正係数を乗ずることにより一軸圧縮強さ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 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を評価した場合には、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可能性のあることがわかる。また、補正係数 α は、

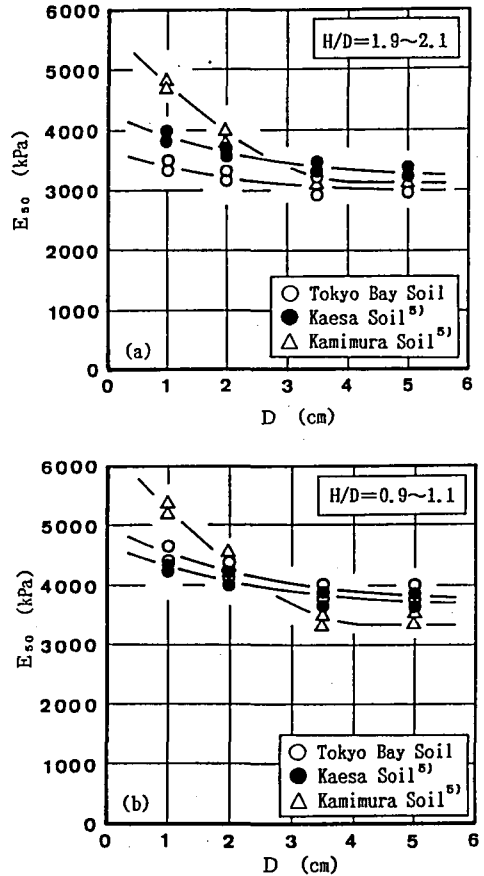


Fig. 7 Typical relationship between deformation modulus (E_{50}) and diameter: remoulded samples.

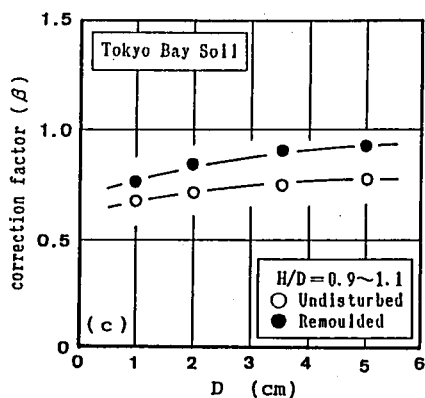
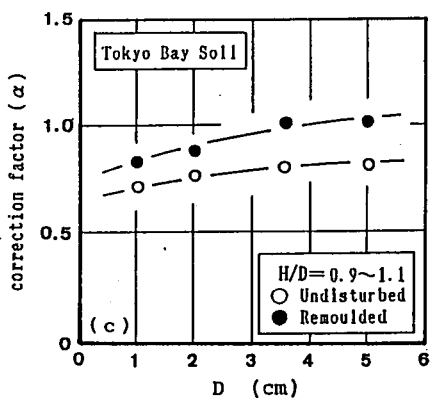
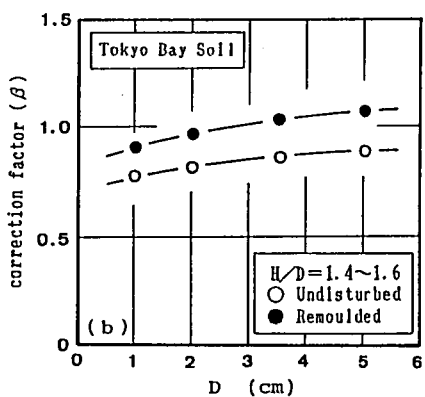
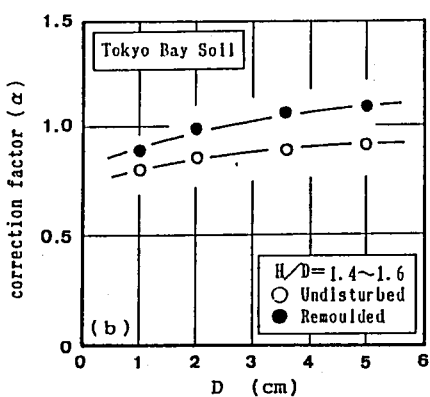
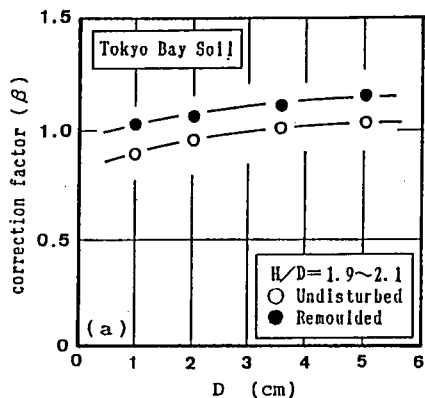
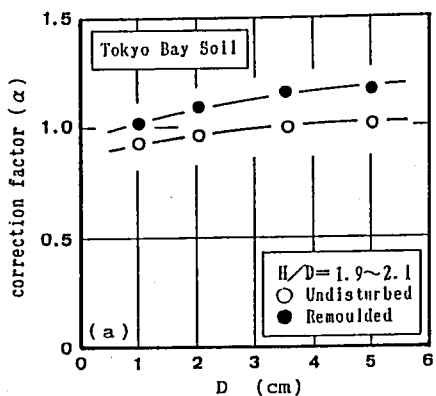


Fig. 8 Relationship between correction factor for specimen size in unconfined compressive strength and diameter: undisturbed and remoulded samples.

Fig. 9 Relationship between correction factor for specimen size in deformation modulus and diameter: undisturbed and remoulded samples.

両試料とも直径及びH/D比の低下に伴って減少しており、極小供試体を用いた場合には、強度に関する定数を低減しなければ標準寸法の供試体の一軸圧縮強さを過小評価することになる。

Table 3は、各寸法条件において算出した補正係数 α をとりまとめたものである。標準寸法の供試体の一軸圧縮強さは、Table 3に示した補正係数 α を各供試体寸法の試験結果に適用することによって、ある程度評価することが可能であると考えられる。

ここで、不攪乱試料を例にとると、直径が1.0cm、H/D=1.0の供試体を用いた場合には、測定値を28%程度低減することによって、標準寸法の供試体の一軸圧縮強さをある程度評価できることがわかる。

次に、変形係数に関する補正係数 β と直径の関係をFig. 9(a)~(c)に示す。ここで、補正係数 β は、不攪乱試料の標準寸法の供試体の変形係数を(E_{50})₀として算出した。また、図中の1点は、同一条件の供試体より算出した補正係数 β の平均値を示している。

補正係数 β は、両試料とも直径及びH/D比の低下に伴って減少しており、極小供試体の試験結果から標準寸法の供試体の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測定値を低減する必要があることがわかる。また、補正係数 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、練返し試料を用いた場合には、実地盤

Table 3. Correction factors for the scale effects on the unconfined compressive strength

Soil Sample	Undisturbed			Remoulded		
	H/D			H/D		
	2.0	1.5	1.0	2.0	1.5	1.0
D(cm)						
5.0	1.00	0.89	0.82	1.19	1.07	1.02
3.5	1.00	0.88	0.81	1.17	1.05	1.02
2.0	0.97	0.85	0.77	1.10	0.99	0.89
1.0	0.95	0.81	0.72	1.03	0.88	0.83

(注) 不攪乱試料の標準寸法の一軸圧縮強さを基準値として算出した。

Table 4. Correction factors for the scale effects on the deformation modulus

Soil Sample	Undisturbed			Remoulded		
	H/D			H/D		
	2.0	1.5	1.0	2.0	1.5	1.0
D(cm)						
5.0	1.06	0.88	0.76	1.15	1.06	0.90
3.5	1.00	0.81	0.73	1.13	1.02	0.88
2.0	0.95	0.80	0.70	1.06	0.97	0.83
1.0	0.90	0.78	0.69	1.03	0.90	0.76

(注) 不攪乱試料の標準寸法の変形係数を基準値として算出した。

の変形係数を過小評価する可能性があることを示唆している。

Table 4 は、各供試体寸法における補正係数 β をとりまとめたものである。標準寸法の供試体の変形係数は、Table 4 に示した補正係数 β を各寸法条件の供試体の試験結果に乗ずることにより、ある程度評価できるものと考えられる。

ここで、不攪乱試料を例にとると、直径が3.5cm、 $H/D \approx 1.0$ の供試体を用いた場合には、測定値を27%程度低減することによって、標準寸法の供試体の変形係数をある程度評価することが可能である。

4. 結 論

本研究では、不攪乱及び練返し海成粘性土を用いて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、試料の準備方法及び供試体寸法の違いが粘性土の強度・変形特性に及ぼす影響について検討を行った。今回の実験により得られた主要な結果を列記すると、以下のようになる。

- (1) 不攪乱及び練返し試料の強度・変形特性を比較・検討した結果、有効土かぶり圧と同等の圧密圧力で予備圧密を行った場合、不攪乱試料の含水比は練返し試料よりも5%程度高くなったにもかかわらず、各寸法条件において一軸圧縮強さは15%~20%程度、変形係数は10%~20%程度不攪乱試料が練返し試料よりも大きな値を示すことが明らかとなった。
- (2) 一軸圧縮強さ及び変形係数は、試料の準備方法によらず供試体の直径及び高さで直径の比 (H/D 比) の低下に伴って増大する傾向が認められた。よって、極小供試体の試験結果から実地盤の強度・変形特性を評価した場合には、実地盤の強度・変形特性を過大評価している可能性がある。
- (3) 本試験結果に基づいて提案した一軸圧縮強さと変形係数に関する補正係数 (α , β) を極小供試体の試験結果に適用することによって、標準寸法 ($D=3.5\text{cm}$, $H/D \approx 2.0$) の供試体の一軸圧縮強さと変形係数をある程度評価することが可能となることを示唆した。
- (4) 粘性土供試体の寸法効果には試料の生成過程による違いは認められず、海成及び陸成粘性土とも同様の傾向を示すことが明らかとなった。

謝 辞

本研究を行うにあたり、広島大学日下部 治教授には有益なご助言とご指導をいただきました。ここに、記して感謝の意を表する次第です。

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. 688，1990年12月，199p.
- 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) 吉中龍之進：岩石質地盤の強度に関する寸法効果，施工技術，Vol. 9，No. 8. pp. 58~60，1976.

- 5) 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.
- 6) Graham, J. and Li, E. C. C.: Comparison of natural and remolded clay, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 111, No. 7, pp. 865～881, 1985.
- 7) 佐野博昭・亀井健史：試料の準備方法の違いが一面せん断試験結果に及ぼす影響，平成2年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集，pp. 304～305，1991.
- 8) 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.