

サンプリングによる応力解放を考慮した圧密試験

金 宰永¹・高田 直俊²

¹学生会員 工修 大阪市立大学大学院 土木工学専攻 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本町 3-3-138)

²正会員 工博 大阪市立大学教授 工学部 土木工学科 (同上)

飽和粘土を不攪乱試料として地盤中から取り出すと、土被り圧の解放によって、内部に発生する負の間隙水圧が等方的な拘束圧として働くが、この圧力は鉛直土被り圧より小さいので試料は鉛直方向に伸び、水平土被り圧よりも大きいために水平方向に収縮する。通常の圧密試験は、このように変形した試料を圧密リングにぴったり納めるので、現位置の応力状態が再現されてない。この論文では現位置の土被り圧相当の圧密荷重を与えて供試体を非排水変形させたとき、圧密リング内径に等しくなる供試体を用いた圧密試験を現位置の圧密挙動を室内で再現する圧密試験と位置付け、室内再圧密粘土試料を用いた一連の圧密試験から、この考え方の妥当性を実験的に確かめ、また標準圧密試験結果の位置付けを明らかにした。

Key Words : clay, sampling, stress release, expansion, consolidation test

1. 研究目的

自然堆積状態にある粘土層の多くは一次元圧密状態にあり、地盤内の応力状態は土被り圧 σ_1 に対して水平圧力 $\sigma_3 (= \sigma_2) = K_0 \cdot \sigma_1$ (K_0 : 静止土圧係数 < 1) を受けている。この状態にある飽和粘土がサンプリングによって地上に取り出されて土被り圧が解放されると、内部に負の間隙水圧が発生する。この間隙水圧は地盤中における平均応力 σ_m に等しく、これが正の有効応力として粘土の拘束圧となり、粘土の体積変化を妨げる。この有効応力 σ_m は地盤中にあるときの σ_1 よりも小さいために試料は鉛直方向に伸び、また σ_3 よりも大きいために水平方向に収縮する(図-1)。

通常の圧密試験供試体はこの変形状態を維持して圧密リングにぴったり納められるので、圧密荷重を受けたときの応力状態は地盤中と明らかに異なり、水平土圧が大きく、したがって、平均主応力が大きくなって、圧縮量は増えるので、供試体は原地盤の圧密挙動を表していないことになる。すなわち、圧密試験で得られる図-2の $f-\log p$ 関係は、原地盤の $f-\log p$ 関係よりも必ず下方に位置する。

圧密試験で得られる $f-\log p$ (または $e-\log p$) が実際よりも下方に位置しているという見方は、これまでもあったが、この原因は供試体の乱れに起

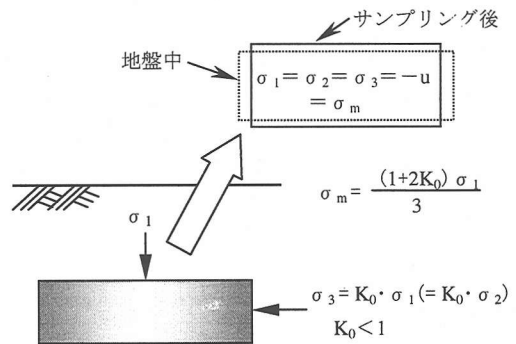


図-1 応力解放による試料の異方的変形

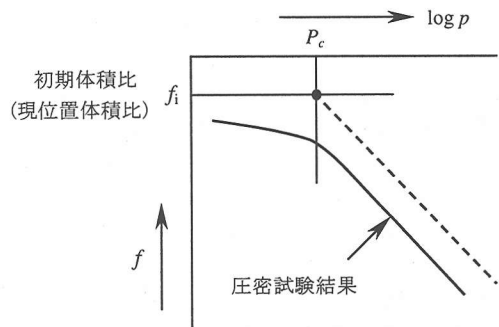


図-2 $f-\log p$ 関係の解釈

因すると考えるのが一般的な見方であった¹⁾。

建築学会発行の建築基礎構造設計指針²⁾では、正規圧密粘土の場合は図-2の破線のように、圧密試験結果の正規圧密線を、初期体積比 f_i と圧密降伏応力 p_c を通るように上方にずらせて用いる割り切った補正法がとられている。この補正法は後述のように、結果的には妥当な選択である。

圧密試験供試体の初期の応力状態が、前述のように地盤中の応力状態を再現していない点が原理的な圧密試験の問題点といえる。地盤中の圧密挙動を示す f - $\log p$ 関係を求めるためには、地盤中にあるときの有効土被り圧が加わったときに非排水変形によって直径がちょうど 6 cm になって、供試体周面が圧密リング内壁に密着するような直径を有する供試体を用いた圧密試験を行う必要がある。そして、この考え方によれば、正規圧密粘土の圧密試験から得られる、いわゆる過圧密部の f - $\log p$ 関係は、意味を持たないことになる。

筆者の 1 人は、上述の考えのもとに、サンプリングによる応力解放の影響を考慮した圧密試験法を試みてきた³⁾。ここでは、同様の手法を用いて塑性の異なる 3 種類の粘土試料に対する圧密試験を行った。すなわち、スラリーから圧密した粘土ブロックを切り出して直径 10 cm の供試体を段階的荷重によってある圧力まで圧密したのち、① 直径 10 cm のまま引き続き圧密する場合、② 直径 6 cm に再成形して通常の圧密試験に移行する場合、③ 先行圧密圧力を加えたときに直径が 6 cm に変形する供試体に再成形した応力解放の影響を考慮した場合の試験を行う。これらの結果の相互比較から、提案する応力解放の影響を考慮した圧密試験法の妥当性を検証するとともに、通常の圧密試験法によって得られる f - $\log p$ 関係の位置付けを行った。

2. 応力解放を考慮した圧密試験

(1) 供試体

サンプリング後の応力解放を考慮する圧密試験は、図-3に示す圧密リング内で有効土被り圧が加わったときに圧密リング内径とぴったりになる非排水変形をする供試体を用いた。このことから、直径 60 mm × 高さ 20 mm の標準圧密試験の供試体と体積を同じにして、直径を小さく、高さの高い供試体を用いた。供試体の直径と高さは、後述の圧密圧力解放後の粘土試料の変形測定結果を考慮して幅を持たせて表-1に示す寸法に選んだ。供試体の成形は表

表-1 再圧縮供試体の寸法

直径 (mm)	59.8	59.6	59.4
高さ (mm)	20.14	20.27	20.41

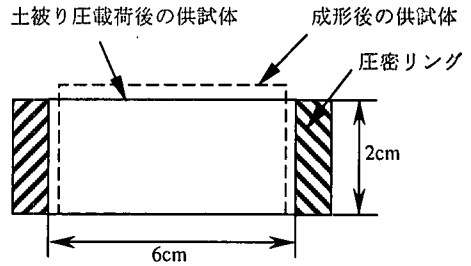


図-3 原地盤の挙動を再現するための圧密試験供試体

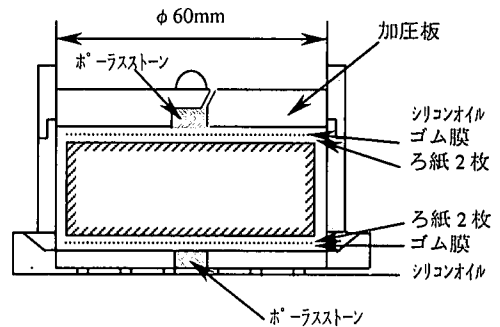


図-4 圧密試験機の構成

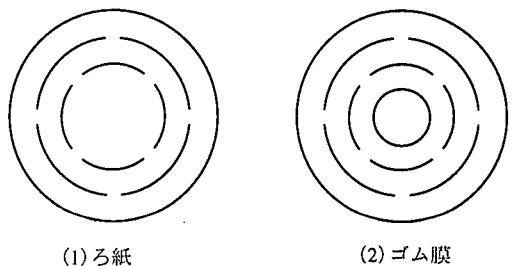


図-5 ろ紙とゴム膜の形状

-1の寸法を有するカッターリングを用いて行った。これらの供試体を再圧縮供試体と呼ぶことにする。

これらの供試体は先行圧密圧力荷重によって非排水状態で直径 60 mm に押し上げられるが、端面まさつの影響を受けないように変形させるために、図-4のようにゴム膜・グリスで端面のまさつを切った荷重板で圧密する。圧密中に供試体から出る間隙水は、ろ紙を通して荷重板外周部、および中央の直径 10 mm のポラスストーンに排出する。

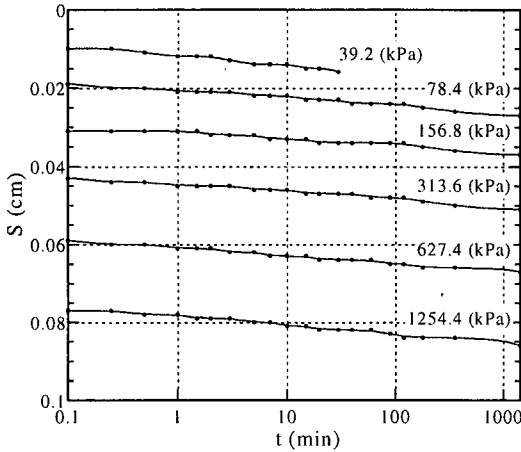


図-6 ろ紙とゴム膜の圧縮量-時間関係

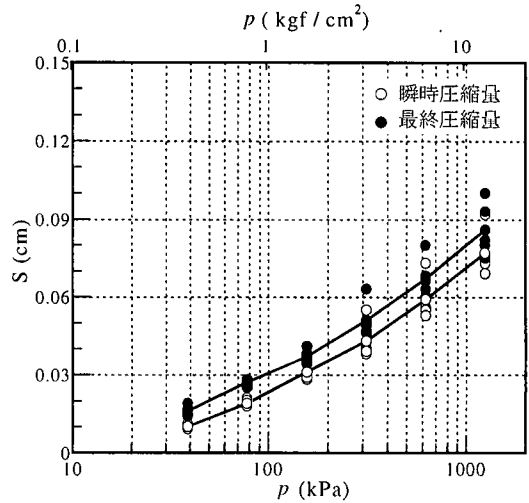


図-7 ろ紙とゴム膜の圧縮量-圧力関係

(2) ろ紙とゴム膜の圧縮性

ゴム膜（ラテックス）は厚さ 0.25 mm で中心部に直径 10 mm の孔と図-5 のように 10 mm 間隔に切れ目を有する。加圧板との接触面にはシリコングリスを塗布している。ろ紙（乾燥状態で厚さ 0.22 mm を 2 枚）も同図のように切れ目を入れて供試体の押し抜け変形を妨げないようにした。

圧密圧力によりゴムとろ紙は圧縮する。供試体の圧密量にはこれが含まれるので、これを補正するために圧密試験機を用いてゴム膜とろ紙の時間-圧縮量を圧密圧力ごとに求めた。その方法は、水を吸わせたろ紙 4 枚、ゴム膜 2 枚を重ねて圧密リングの中に収め、圧密試験の荷重段階と同じに、荷重段階 39.2 kPa (0.4 kgf/cm²) では 30 分、次の段階から荷重増分比 1 で 1255.3 kPa (12.8 kgf/cm²) まで各段階 24 時間圧密を行った。荷重とともに圧縮は瞬時に生じ、そのあと図-6 のように時間の対数に対してほぼ直線的なクリープ圧縮を示す。図-7 は瞬間圧縮量とその後のクリープ圧縮を含む最終圧縮量と圧力の関係を示す。再圧縮供試体を用いた圧密試験で得られた時間-圧縮量関係には、図-6 と同じゴム膜とろ紙の圧縮量が含まれていると考えて、同じ圧力段階の同じ時刻における図-6 の圧縮量を差引いた。

3. 圧密試験

(1) 粘土試料

大阪南港から採取した高塑性粘土と大阪北港から

表-2 試料の液性限界・塑性限界

試料名	w _L (%)	w _p (%)
N105 (南港粘土)	105	35
H77 (北港粘土)	77	33
HK57 (北港粘土+カオリン)	57	32

採取した中塑性の粘土を水道水を加えて 0.425 mm ふるいを通して異物を除いた 2 種類の粘土、および北港粘土と市販のカオリン粘土を乾燥重量比 1 : 1 で混合した低塑性粘土を用いた。これら 3 種の粘土の液性・塑性限界を表-2 に示す。これらを液性限界に因んでそれぞれ N105, H77, HK57 と呼ぶことにする。

(2) 試験条件

液性限界の 2 倍程度の含水比で練り返した粘土を内径 300 mm のステンレス鋼製円筒に厚さ 150 mm に流し込み段階的に圧力を増し、3 日目に最終圧力 39.2 kPa (0.4 kgf/cm²) の圧力で圧密する。圧密終了は 3 t 法で判定した。この粘土ブロックから直径 100 mm、高さ 45 mm の 5 つの供試体を整形する。これを内径 100 mm の圧密リングで圧力 39.2 kPa (0.4 kgf/cm²) から始めて 156.9 kPa (1.6 kgf/cm²) まで荷重増分比 1 で段階圧密する。その後も荷重増分比 1 で 1255.3 kPa (12.8 kgf/cm²) まで圧密するが、5 つの内の 4 供試体を再成形する。すなわち、

・現場の圧密に相当するものとして、ひとつはその

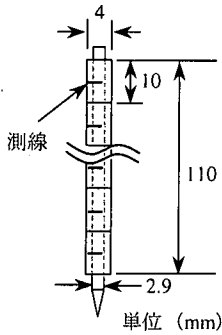


図-8 伸張パイプ型変位計

まま圧密する。【現場】供試体と呼ぶ。

- ・直径 60 mm，高さ 20 mm に再成形して，通常の圧密試験に供する。【標準圧密】供試体と呼ぶ。
- ・表-1 の大きさに再成形し，応力解放の影響を考慮した圧密試験に供する。【再圧縮】供試体と呼ぶ。

4. 応力解放時の試料の変形測定

直径 100 mm×高さ 45 mm の供試体を 156.9 kPa (1.6 kgf/cm²) まで圧密して標準圧密供試体と再圧縮供試体に再成形するとき，内径 100 mm の圧密リングから供試体を抜き出すが，このとき供試体は前述の図-1 の変形を生じる。変形後の供試体の直径を読み取り顕微鏡で測定し (精度 0.01 mm)，非排水変形を仮定して鉛直方向への伸張量を求めた。

さらに，この方法とは別に，直径 150 mm のステンレス鋼製圧密円筒内で，上記の粘土ブロックを作ったのと同じ初期含水比から段階的に 156.9 kPa (1.6 kgf/cm²) まで圧密した粘土に，図-8 に示す直径 2.9 mm のピアノ線に通した多数の内径 3 mm，外径 4 mm，長さ 10 mm のパイプからなる伸張パイプ型変位計を除荷前の粘土の 3 箇所に加圧板にあけた孔から挿入し，粘土ブロックを縦割りして，パイプを露出して図の測線間の長さの伸びから粘土の鉛直方向への伸張量を求めた。この測定法は現場での不攪乱試料採取時の伸張量測定に用いた方法⁴⁾を小型化したものである。2 通りの測定方法による伸張ひずみを表-3 に示す。伸張ひずみは伸張量をそのときの粘土層厚で割った値である。なお，モールドから抜き出したのちの供試体の変形は 1 時間ほどでほぼ落ち着く。

いずれの粘土試料も鉛直方向への伸張ひずみは 1.8 % 程度であるが，伸張パイプ型の変位測定方法によると少し大き目の値が得られている。伸張ひず

表-3 伸張量測定結果

粘土試料	伸張ひずみ (%)		測定方法	
	範囲	平均値		
N105	000519	1.77~1.80	1.79	直径変化
	000531	1.79~1.81	1.80	"
	000616	1.79~1.80	1.80	"
H77	991211	1.63~1.86	1.75	直径変化
	991227	1.63~1.74	1.70	"
	001007	1.62~1.66	1.64	"
	990114	1.84~1.86	1.85	伸張パイプ型
	990121	1.79~1.99	1.88	"
	990128	1.86~1.88	1.87	"
HK57	990205	1.85~1.91	1.87	"
	991203	1.51~2.01	1.78	直径変化
	000119	1.76~1.86	1.81	"
	000131	1.77~1.79	1.78	"
	991125	2.08~2.11	2.09	伸張パイプ型

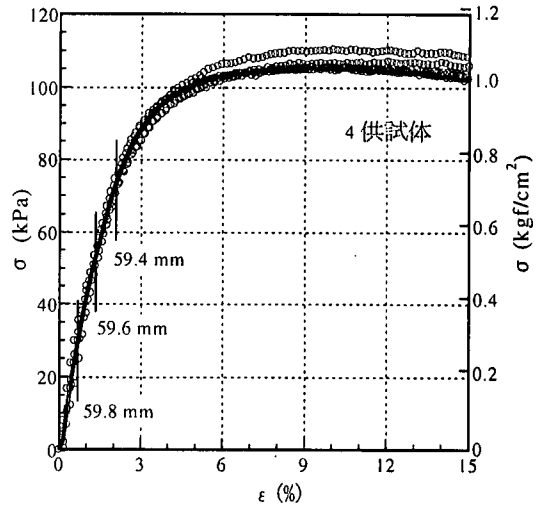


図-9 一軸圧縮試験結果 (H77 試料)

み 1.6, 1.8, 2.0 % に対応する応力解放を考慮する圧密試験の供試体直径×高さは，それぞれ 20.32 mm×59.53 mm，20.36×59.47，20.40×59.41 である。表-1 の供試体の大きさは，これらを含む範囲として決めている。なお，文献 4) には大阪市西南部の沖積粘土層で測定したサンプリング後の伸張量が約 1 % であったことを示している。

再圧縮供試体は一軸圧縮状態で直径 60 mm に押し上げられるので，H77 試料に対して 156.9 kPa (1.6 kgf/cm²) まで圧密した試料を用いた一軸圧縮試験を行った。図-9 は応力-ひずみ関係で，直径

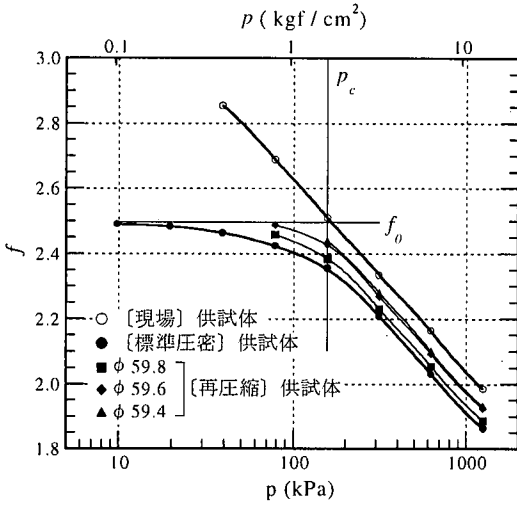


図-10 N105 試料の f - $\log p$ 関係

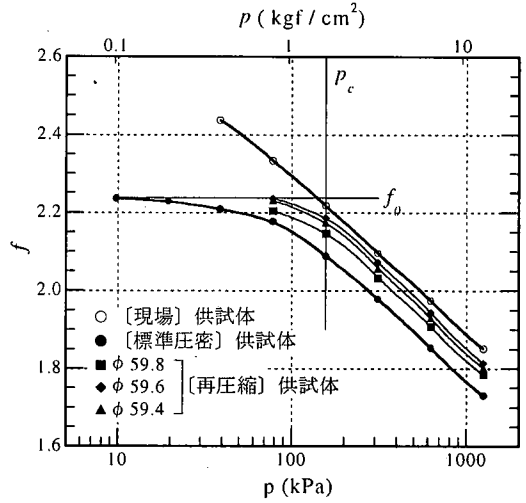


図-11 H77 試料の f - $\log p$ 関係

59.8~59.4 mm の供試体が直径 60 mm になる非排水状態で押し広げられるときに相当する軸方向ひずみを示している。いずれも弾性域であるので再圧縮による供試体の乱れは少ないと考える。

図の一軸試験は直径 35 mm、高さ 80 mm の供試体を用い、上下端面にはゴム膜とシリコングリスによるまさつ軽減を、さらにゴム膜の圧縮量を補正している。

5. 圧密試験結果の比較

図-10~12 に 3 通りの圧密試験で得た f - $\log p$ 関係を比較した。標準圧密試験供試体と再圧縮供試体は初期含水比にばらつきがある（含水比で 1% 以内）ので、それらの平均値をもって共通の初期含水比として体積比 f を算出している。

図によると、いずれも標準圧密試験による f - $\log p$ 関係は、現場挙動を表す [現場] 供試体のものよりも大きく下方にずれている。そして、[再圧縮] 供試体がそれらの間に位置している。

再圧縮供試体の f - $\log p$ 関係を詳細にみると、直径 59.8 mm の供試体よりも直径 59.6 mm と 59.4 mm の供試体が上方に位置している。これは試料の応力解放時のひずみが 1.8% であったことと整合している。試料の再成形と再圧縮による乱れの影響は避けられないので、これによる圧縮性の増加から現場試料よりも f - $\log p$ 関係が下方を占めることになるが、ここで提案している圧密試験法による結果が、現場の圧密挙動に近いことを表している。

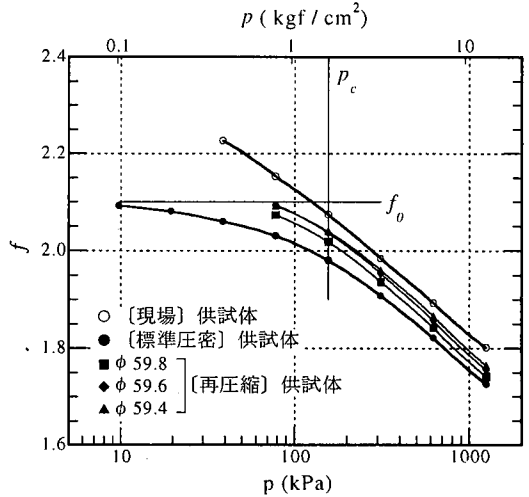


図-12 HK57 試料の f - $\log p$ 関係

3 種の粘土の標準圧密試験から得る f - $\log p$ 関係は、いずれも圧密降伏が明確に求まる形をしていないが、図に記した応力解放時の有効応力 (156.9 kPa \approx 圧密降伏応力) と初期体積比の交点は、[現場] 供試体の f - $\log p$ 関係線にごく近いので、標準圧密試験による f - $\log p$ 関係の補正法として、前述図-2 の建築基礎構造設計指針の方法が有効と考えられる。

6. 結論

現位置の圧密挙動を再現するために、圧密リング

内径よりも直径の小さい供試体を用いる圧密試験法を提案し、再圧密粘土試料を用いた室内圧密試験で、その妥当性を調べ、また標準圧密試験結果とも比較した。主な結論は次のとおりである。

- (1) 圧密リング内径よりも小さい供試体を、応力解放前の上載圧で非排水変形させて圧密リング内径に供試体を密着させる方法によって得られる $f-\log p$ 関係は、現位置圧密相当の $f-\log p$ 関係に近い。
- (2) その際、応力解放時に計測した試料のひずみ量相当の供試体直径を与えた供試体による $f-\log p$ 関係が現位置相当の供試体の $f-\log p$ 関係により近いものとなった。
- (3) 標準圧密による $f-\log p$ 関係は、現位置相当の $f-\log p$ 関係よりも大幅に下方に位置し、供試体直径を圧密リング内径に合わせる通常の圧密試験法は、現位置の圧密挙動を再現しているとはいえない。
- (4) 標準圧密試験による $f-\log p$ 関係の正規圧密域は、現位置相当の $f-\log p$ と平行しており、これを有効土被り圧（あるいは圧密降伏応力）と初期体積比の交点まで引き上げる補正法は、現位置相当の $f-\log p$ 関係を近似できる。

参考文献

- 1) John H. Schmertmann : The undisturbed consolidation behavior of clay, Paper No. 2775, TRANSACTIONS OF ASCE, Vol.120, pp.1208-1216, 1953.
- 2) 建築基礎構造設計指針, pp.137-138, 日本建築学会, 1988.
- 3) 高田直俊, 藤田照久: サンプリングによる応力解放を考慮した圧密試験, 第 27 回土質工学研究発表会, pp.144-145, 1992.
- 4) 高田直俊, 浜田武: サンプリング後の応力解放による粘土の変形の計測, 第 48 回土木工学会学術講演会, III-456, 1993.
- 5) 地盤調査・土質試験結果の解釈と適用例, pp.229-233, 地盤工学会, 1998.

(2000. 10. 25 受付)

CONSOLIDATION TEST TO REFLECT UPON STRESS RELEASE FOR SAMPLING

Jae Young KIM and Naotoshi TAKADA

When a saturated clay is sampled in an undisturbed manner, an effective confining stress due to the negative pore pressure induced by stress release restricts the volume expansion. The vertical and horizontal stresses to which the clay was subjected in the ground are smaller and larger than this isotropically confining stress equivalent to the mean principal stress in the ground, respectively. Thus the clay sample expands vertically and shrinks horizontally under undrained conditions.

The consolidation test developed herein employs a specimen with a smaller diameter than the inner diameter of the ring that expands to the inner diameter of the ring under undrained conditions when the in-situ overburden pressure is applied. In this paper, using three kinds of clay samples with different plasticities consolidated from slurry, applicability of this proposed test procedure was verified; results from the conventional consolidation test procedure are also discussed.