

圧密による粘土の強度増加量について

柴 田 徹・田 河 勝 一

THE c/p -RATIO OF NORMALLY-CONSOLIDATED CLAYS

By Toru SHIBATA and Shoichi TAGAWA

Synopsis

The c/p -ratios of various types of normally-consolidated clays are determined by the triaxial-vane, triaxial compression and unconfined compression tests. The results obtained by the K_0 -consolidated triaxial-vane tests showed a good agreement with the Skempton-Bjerrum correlation of increasing c/p -ratio with increasing PI , Fig. 3. However, the scattering of the test results on the isotropically-consolidated triaxial-vane, triaxial compression and unconfined compression tests are great, Figs. 4 and 7. The meaning of c/p ratio calculated by using ϕ' and the pore water pressure coefficient at failure A_f , Eq. (2), are discussed.

1. ま え が き

軟弱な粘土地盤上に構造物を築造しようとする場合、地盤支持力が不足しておれば、地盤の圧密による強度増加を期待する工法がとられる。そのとき基礎設計に必要な値は、圧密圧力 p に対する強度増加量 c であって、普通は c/p 値と称している。この c/p 値に関しての問題点は、せん断試験の方法によって同一の粘土でもその値が異なることである。すなわち原位置ベーン試験結果によれば、塑性指数 PI がふえるほど c/p 値は大きくなるが、三軸圧縮試験によればその傾向が全く逆になるといわれている。たまたまわが国の粘土に多い $PI=30\sim80\%$ の範囲では、ベーンと三軸圧縮による $c/p\sim PI$ 曲線が交叉しているために、大きな疑問もなく 0.3 程度の値が採用されているが、試験方法によって変る値では困るのである。

この報文では c/p 値に関する従来の研究を概観したのち、主としてベーン試験による c/p 値を対象にして、原位置の状態と比較しうるために K_0 -圧密三軸ベーン試験を行なう。ついで等方圧密試料のベーンや三軸圧縮強度、さらに一軸圧縮試験から求まる c/p 値の問題点についても触れることにする。

2. c/p 値に関する従来の研究

正規圧密粘土の圧密による強度増加率、すなわち c/p 値と土の物理的性質との間にある種の関係があることを最初に提案したのは Skempton¹⁾ である。すなわち物性の異なる 5 種類の海成粘土について、原位置ベーン試験による粘着力 c と有効上載圧力 p より c/p 値を求め、これと LL との関係を見出した。その後この関係は LL よりも PI との対応のほうがよいことを報告した²⁾。つづいてノルウェーの多数の海成粘土について、Bjerrum³⁾ は同様な方法で c/p と PI の関係を求め、Skempton によって示された傾向と全く一致することを見た。この c/p と PI の関係をあらわす曲線は Fig. 1 に示すようであり、Skempton-Bjerrum line とよんでいる。

いっぽう三軸圧縮試験を行なうと、任意の応力で圧密することができるので容易に c/p 値がえられるはずである。そこで Skempton ら⁴⁾ は Mohr の応力円を用いることによって、正規圧密粘土の三軸圧縮試験

による c/p 値は次式で計算されることを示した。

$$\frac{c}{p} = \frac{[K + (1-K)A_f] \sin \varphi'}{1 + (2A_f - 1) \sin \varphi'} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに φ' ; 主応力差最大値 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ に対する有効応力表示の内部摩擦角, A_f ; $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ 時の間げき水圧係数, K ; 水平・鉛直圧密圧力の比である。さらに Bishop⁹⁾ は粘土に対して Jákey の経験式 $K = 1 - \sin \varphi'$ が適用されることを実験的に明らかにし, これを式 (1) に代入すると,

$$\frac{c}{p} = \frac{(1 - \sin \varphi' + A_f \sin \varphi') \sin \varphi'}{1 + (2A_f - 1) \sin \varphi'} \quad \dots\dots\dots (2)$$

となることを示した。

Bjerrum と Simons⁶⁾ はスカンジナビア諸国, その他の粘土に対する φ' と PI の関係を調べ, 式 (2) を用いて三軸試験による $c/p \sim PI$ 関係をえた。これは Fig. 1 の斜線部分で示される。そして図から明らかのように, ペーン試験から求めた Skempton-Bjerrum line と, 三軸圧縮試験結果の範囲は $PI < 30\%$ で大きく異なっている。Bjerrum⁷⁾ はこの原因として, i) $PI < 30\%$ のペーン試験は進行性破壊の影響がある。ii) 三軸圧縮試験はせん断に先立って試料を再圧密するために, 試料の高密度化が生じる。iii) ペーンによる値は実測値であるのに反して, 圧縮試験の範囲は計算によるものであり, 式 (2) の適用が正しいという保証はない。以上の3点を挙げている。

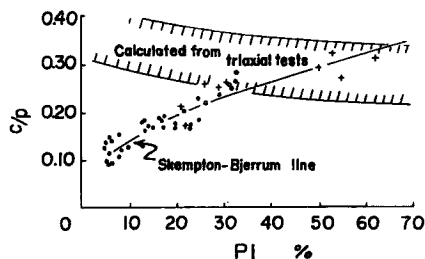


Fig. 1 Relationship between c/p and plasticity index PI

この問題は多くの研究者によって取り扱われており, Skempton-Bjerrum line はカナダの海成粘土についても成立することが判明している。しかし Karlsson and Viberg⁸⁾ によれば, 鋭敏比の高いスウェーデンの正規圧密粘土の原位置ペーン試験結果では, ほとんどの実測値が Skempton-Bjerrum line よりも大きくでている。また大阪の沖積・洪積粘土にたいして三笠^{9), 10)} は一軸, 三軸, 一面せん断等の室内試験で c/p 値と PI の関係を調べたが, 両者の間には明確な関係がないと述べている。その理由として i) ただ1つの物理指数では土の力学的尺度となりえないこと, ii) 物理指数と強度を求めるときの土の状態の相違, を挙げている。

3. ペーン試験による c/p 値

3.1 試料と実験方法

使用した試料はその物性を Table 1 に示すような6種類の粘土である。試料は最初液性限界以上の含水比でミキサーを用いて十分に練り返したのち, 試料作製の大型圧密リングを使用し 0.5 kg/cm^2 で圧密したものである。これらの試料のうち No.1~No.3 は沖積粘土, No.4 と No.5 は洪積粘土を粉末にしたものである。また No.6 はカオリンとベントナイトを重量比で2対1に混合したものである。試料は試験時までの間に含水比が変化しないこと, および含水比の均一化を目的としてパラフィンで包装し, オイル中で養生した。なお種々の PI を持つ粘土試料を選ぶために乱さない尼崎粘土を用いたが, この物性は Table 1 にはのせていない。

供試体は直径 5.05 cm (底面積 20 cm^2), 高さ 10 cm (特別な場合は $6 \sim 8 \text{ cm}$) になるように成形した

Table 1 Index properties

Sample No.	LL %	PL %	PI %	<2 μ %	Activity	c_v cm ² /s
1	36.0	25.6	10.4	23.0	0.45	2.6×10^{-8}
2	63.5	27.4	36.1	18.5	1.95	3.5×10^{-4}
3	52.5	23.6	28.9	18.0	1.61	
4	47.0	27.9	19.1	8.0	2.38	
5	107.0	30.6	76.4	9.5	8.04	
6	82.6	24.5	58.1	27.0	2.15	1.7×10^{-5}

のち、三軸ベーンセル中にセットし通常の三軸試験と同様な操作で異方・等方応力状態で圧密を行なった。ただし異方向圧密は K_0 -状態を対象としている。圧密に際しては供試体側面に filter paper strips を巻き底部のポーラス・ストーンから排水を行なった。100%圧密完了までに要する時間は試料 No.6 を除き等方圧密の場合は8時間程度であった。 K_0 -圧密は試料の断面積が圧密過程を通じて不変に保たれるように圧密応力比 $K = \sigma_{3c}/\sigma_{1c}$ (それぞれ最小・最大圧密主応力) を調節し、 K_0 -線に沿うように心掛けた。圧密完了までの荷重段階は5～13で、要した時間は4～19日であった。圧密が完了すると、ベーンを供試体底部から中央部まで貫入し、ただちにせん断を行なった。ベーンの寸法は直径、高さが $D \times H$; 8×16 mm の標準ベーンを使用し、せん断時のベーン回転速度は 10.8 deg/min とした。なお c/p 値は、正規と過圧密状態で全く異なった大きさを示すので、乱さない尼崎粘土の場合は特に先行荷重を調べると同時に、三軸圧密非排水試験によるベクトル・カーブを用いて正規状態であることを確かめた。試験終了後に供試体を切り、せん断面付近に貝殻が存在しないもののみを結果として利用した。

ベーン試験結果の解析原理を紹介しておく、ベーン試験で測定されるトルクの最大値 M と粘土のせん断強度とはつぎの Cadling の式で関係付けられる ((Fig. 2 参照)。

$$M = \frac{\pi}{2} \cdot H \cdot D^2 \cdot \tau_v + \frac{\pi}{2} \cdot D^3 \cdot \alpha \cdot \tau_H \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに H と D ; ベーンの高さと直径、 τ_v と τ_H ; ベーンの側面と上下両端面上のせん断強度、 α ; ベーン端面上のせん断応力分布係数であり、長方形分布 $\rightarrow \frac{1}{3}$, 円形分布 $\rightarrow 0.3$, 三角形分布 $\rightarrow \frac{1}{4}$ である。式 (3) において、側面と端面上のせん断強度が等しいとして $\tau_v = \tau_H = c$, かつ $\alpha = \frac{1}{3}$ とすれば

$$c = \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{D}{H}\right)} \cdot \frac{2M}{\pi D^2 H} \quad \dots\dots\dots (4)$$

がえられ、これはベーン試験より c 値を算定するために慣用されているものである。

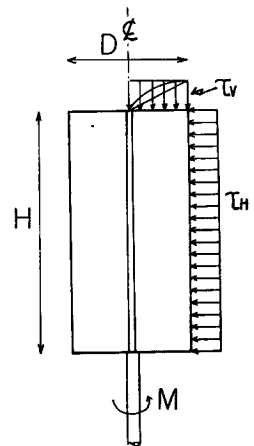


Fig. 2 Interpretation of stress condition in vane test

3.2 試験結果と考察

Fig. 3 は K_0 -圧密ベーン試験より求めた c/p 値を PI に対してプロットしたものである。図中の●印は試料 No.1, 2, 3, ○印は乱さない尼崎粘土, ×印は試料 No.4, 5, ◎印は試料 No.6 に相当する。

この試験結果と Skempton-Bjerrum line を比較すると、 c/p 値の実験データは低塑性土では大きく、高塑性粘土では小さくあらわれる傾向があるようにみられる。その理由としては i) Skempton-Bjerrum line は原位置ベーン試験によってえられたものであるから、低塑性土の構造はほとんど自然のままとみなされるのに対し、三軸ベーン試験における試料は作成粘土と乱さない粘土を再圧密したものであるから、高密度化効果があらわれている。ii) Skempton-Bjerrum line を描くために用いられた p 値は有効上載圧力をとっているのに対し、三軸ベーンの場合は圧密圧力を用いている。すなわち自然地盤は地質学的な年代を

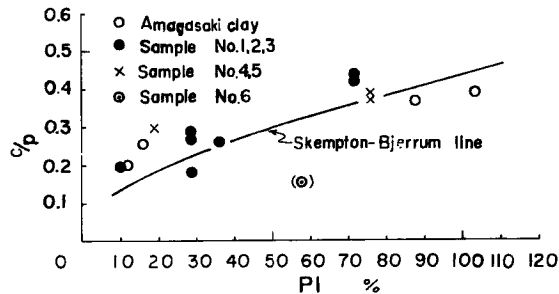


Fig. 3 Relationship between c/p and PI (K_0 -consolidated vane-triaxial test)

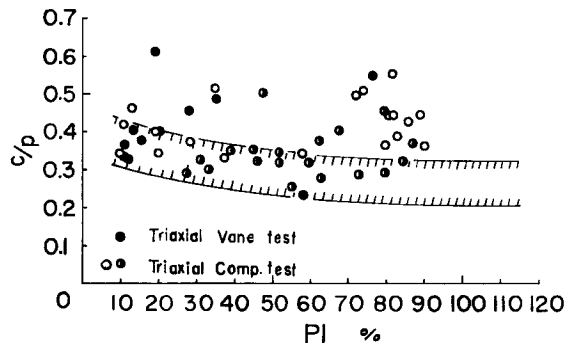


Fig. 4 Relationship between c/p and PI (isotropically-consolidated samples)

へて荷重を受けており、いわゆる diagenetic bond などの生成によって高塑性粘土では有効上載圧力と圧密試験より求まる先行圧力が一致しない場合が多いことが考えられる。

つぎに Fig. 4 は等方圧密試料にたいして、圧縮試験とベーン試験によってえられた c/p 値と PI の関係をプロットしたものである。●印はベーン試験による値、○印は三軸圧密非排水試験による値、⊙印は他の文献⁽¹⁾より引用した三軸圧密非排水試験による値である。これらを総合すると等方圧密の場合には c/p と PI の間に明確な関係を見出すことが困難のように思われる。このことについて若干の考察を加えてみよう。図中、斜線で示した範囲は前述したように式(2)を用いて計算したものであり、これによると c/p 値は $PI \approx 40\%$ までは減少し、それ以後はほとんど不変である。ところで式(2)中に含まれる ϕ' は Bjerrum と Simons による ϕ' と PI の関係も、また Jákey の経験式に含まれる値もいずれも有効主応力比最大 $(\sigma'_1/\sigma'_3)_{max}$ におけるものである。したがって式(2)を用いた c/p の値は $(\sigma'_1/\sigma'_3)_{max}$ に対応していることになる。ところが Fig. 4 にプロットした実測値は $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ に対応しているので、両方の破壊規準によってモビライズされる ϕ'_{m0} に差が生じる低塑性土では、結果の解釈に注意しなければならない。とくに鋭敏性の高い $PI < 10\%$ の粘土では $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ 時にモビライズする ϕ'_{m0} は ϕ'_{max} の 60% 以下であるといわれているので、いま仮りに $\phi'_{m0} = 0.6\phi'_{max}$ として c/p 値を計算すると約 30% 減少することになる。

いっぽうベーン試験による c/p 値は実験値が少なく、まだ一定の傾向をうるまでに至っていないが、 $PI = 10 \sim 20\%$ に対する値は圧縮試験結果と同じ傾向を示している。そして Fig. 3 と比較すれば、低塑性土では等方圧密試料の c/p 値は K_0 -圧密試料にくらべて 1.5~2 倍の大きさを示すことが明らかとなる。標準寸法のベーンでは、鉛直せん断面上の強度が代表されることになるので、同じ圧密圧力 p に対しても K_0 -

状態ではせん断面上の有効直応力が $K_0 p$ となり、等方圧密よりも減少することがおこな原因の一つと考えられる^{12), 13)}。

3.3 ベーンのせん断条件

c/p 値は圧密非排水状態を対象としているので、ベーン試験が排水、非排水いずれの条件に対応しているかを知ることは重要である。文献14) においてはベーン試験における排水条件は飽和度、透水係数、圧密係数等によって左右され、排水・非排水の両ケースを観察することができた。

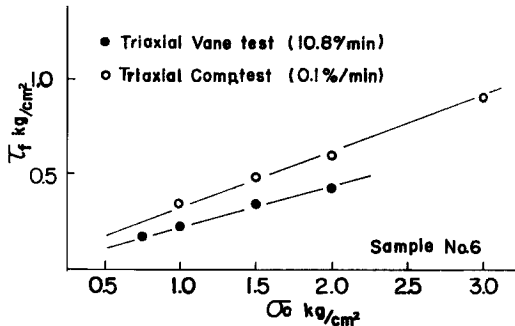


Fig. 5 Comparison of vane and triaxial compression tests

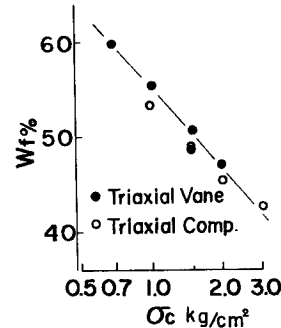


Fig. 6 Relationship between water content at failure w_f and ambient consolidation pressure σ_c

Fig. 5 は試料 No. 6 について行なった等方圧密ベーン試験と三軸圧縮試験結果を比較したものであって、せん断強度 τ_f と圧密圧力 σ_c の関係を示している。また Fig. 6 は両試験における試験終了後の含水比 w_f を調べた結果である。図によると両試験の試験終了後の含水比はほぼ等しいにかかわらず、ベーン試験は圧縮試験による τ_f にくらべてかなり小さい。その原因としては、両試験におけるせん断機構の相違もあるが、つぎのような現象も考えられるであろう。すなわちベーン試験においては全せん断面が供試体内部に生じるため、正規圧密粘土の場合、発生した過剰間隙水圧がベーンの周辺に向かって消散しようとするれば、周辺土が吸水膨張し、その結果、ベーンせん断面のまわりにアーチ作用を誘発してせん断面上の有効直応力を減少させようとする。いっぽう三軸圧縮試験においては、このような試料内部におけるアーチ作用が有効直応力を減じることは想像できない。

試料 No. 6 は Table 1 にも示したように、他の試料に比較すると圧密係数 c_0 が小さいのが特徴であるが、このような粘土では、ベーンと圧縮試験から求めた c/p 値に大きな差があらわれることのほかに、Fig. 3 中の () で記入したように、ベーン強度そのものが極端に低下するようであり、詳細な検討の余地が残されている。

4. 一軸圧縮試験による c/p 値

自然地盤の強度を求める方法はいろいろあるが、わが国の現状では試験の方法が簡単、特別な技術を要しない、時間がかからない、経験的に一軸強度の $1/2$ が原地盤の強度と一致する、という理由でもっぱら一軸圧縮試験が利用されている。しかし一軸試験に提供される試料は、地中で受けた応力解放を避けられず、その影響が測定値にも反映されている。例えば数多くの一軸圧縮試験結果を深度に対してプロットすると、強度の散らばりが激しいために、その上限・下限あるいは平均値のいずれを設計に採用すべきかは常に問題になる点である。

Fig. 7 は乱さない試料の一軸圧縮試験からえられた c/p 値を PI に対してプロットしたものの例である。ただし p は標準圧密試験から求めた圧力を用いている。図より判明するように、 c/p 値は非常に広い範

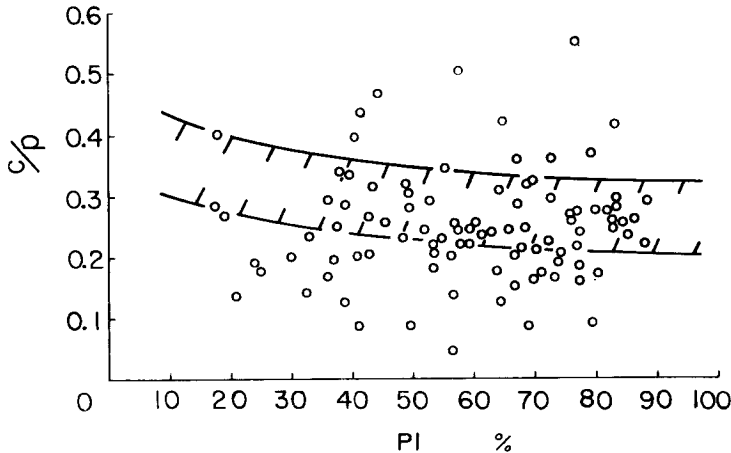


Fig. 7 Relationship between c/p and PI (unconfined compression test)

図に散らばっており、一定の傾向は把握できない。したがって一軸試験に重点がおかれているわが国の現状では、調査の対象となる地盤の一軸試験をできるだけ多数実施して、それらの平均値としての c/p 値を採用する以外に方法はないように思われる。

5. む す び

圧密による強度増加率を適確に推定する手法が工学上、強く要望されている。ここでは主としてベーン試験による c/p 値を対象にして、原位置の状態と比較しうるために K_0 -圧密三軸ベーン試験を行なった。また等方圧密試料のベーンや三軸圧縮強度、さらに一軸圧縮強度にも触れている。そしてえられたおもな結論を要約すればつぎのようである。

(1) 原位置ベーン試験からえられた c/p 値と PI の関係を示した Skempton-Bjerrum line は、 K_0 -圧密の三軸ベーン試験結果ともほぼ一致した。すなわちベーン試験による c/p 値は高塑性粘土ほど大きくなることをみた。ただし Skempton-Bjerrum の関係から推定される c/p 値に比較すると、実測値は低塑性土で大きく、高塑性土で小さくあらわれる傾向がみられた。

(2) K_0 状態のベーンによる c/p 値で、試料によっては極端に低くあらわれるものがあった。他の試料との顕著な相違は圧密係数 c_0 が小さいことであるが、原因が c_0 値や透水係数の大小に関係しているか否かは不明である。またこの試料は、等方圧密ベーン試験と三軸圧縮試験結果にも大きな差がみられている。

(3) 等方圧密した試料の c/p 値は、ベーン、三軸圧縮試験ともに PI に対して特徴ある傾向は見出せない。むしろ c/p 値は土の種類に関係なく不変であると結論したほうがよい。また三軸試験結果から計算した c/p 値と PI の関係 (式 (2)) がよく引用されるが、その計算過程を検討してみると、有効応力表示の内部摩擦角 ϕ' は ϕ'_{max} がとられているので、その c/p はせん断応力最大の τ_{max} には対応しないことに注意したい。 ϕ'_{max} の c/p を τ_{max} 時の値になおすと、鋭敏な低塑性土では約30%低下することがわかった。

(4) わが国で通常行なわれるように、一軸圧縮試験から c/p 値を求める方法は、ばらつきの範囲が非常に広いので結果の解釈に問題がある。今後はおそらくベーンなどの原位置試験が一軸試験にとってかわると思われる。

参 考 文 献

- 1) Skempton, A. W.: Vane tests in the alluvial plane of the river for the near Grangemouth, *Géotechnique*, Vol. 1, 1948, pp. 111—145.
- 2) Skempton, A. W. and D. J. Henkel: The post-glacial clays of the Thames estuary at Tilbury and Shellhaven, *Proc. 3rd. Int. Conf. on S.M.F.E.*, Vol. 1, 1953, pp. 302—308.
- 3) Bjerrum, L.: Géotechnical properties of Norwegian marine clays, *Géotechnique*, Vol. 4, 1954, pp. 49—69.
- 4) Skempton, A. W.: and A. W. Bishop: Building materials, their elasticity and inelasticity, Chapt. 10, New York, Interscience Publishers, 1954.
- 5) Bishop, A. W.: Test requirements for measuring the coefficient of earth pressure at rest, *Proc. Brussel Conf. 58. on earth pressure problems.* 1, 1958, pp. 2—14.
- 6) Bjerrum, L. and N. E. Simons: Comparison of shear strength characteristics of normally consolidated clays, *Proc. Research Conf. on shear strength of cohesive soils*, A. S. C. E., 1960, pp. 711—725.
- 7) Bjerrum, L.: The effective shear strength parameters of sensitive clays, *Proc. 5th. Int. Conf. on S.M.F.E.*, Vol. 1, 1961, pp. 23—28.
- 8) Karlsson, R. and L. Viberg: Ratio c/p' in relation to liquid and plasticity index with special reference to Swedish clays, *Proc. Géotechnical Conf. Oslo*. Vol. 1, 1967, pp. 43—47.
- 9) 三笠正人；土質調査の表示法について，第11回土質工学シンポジウム論文集，昭41，pp. 7—11.
- 10) 三笠正人，柳 大夏，木下哲生；大阪付近丘陵地帯の洪積粘土の力学的特性について，第2回土質工学研究発表会講演集，昭42，pp. 111—116.
- 11) たとえば，Skempton, A. W. and V. A. Sowa；The behaviour of saturated clays during sampling and testing, *Géotechnique*, Vol. 13, No. 4, 1963, pp. 269—290.
- 12) 柴田 徹；原位置ベーンセン断試験の意味，第11回土質工学シンポジウム論文集，昭41，pp. 105—110.
- 13) 柴田 徹；粘土のベーンセン断強度に関する研究，土木学会論文集，138号，昭42，pp. 39—48.
- 14) 柴田 徹，田河勝一；粘土のベーンセン断強度に関する2，3の考察，京都大学防災研究所年報，第11号B，昭43，pp. 537—548.