

1. はじめに

海底の粘性土地盤の強度はサンプリングした土試料から一軸圧縮強度 q_u を求め、その平均値として決定されるのが一般的である。 q_u の平均値を用いる方法（以下に q_u 法と呼ぶ）は、港湾工事など多くの沿岸域での建設工事に実績をもっており、すべり破壊が起こった事例を解析した結果からもその妥当性は確認されている⁽¹⁾。しかし、その後の研究によって一軸圧縮強度の問題点も明らかになり、現在は q_u の平均値が地盤の強度を代表するのは、地盤の強度に影響をおよぼす種々の要因（試料の乱れ、時間効果、強度の異方性など）がバランスしているためであると理解されている。一方、近年海洋開発のプロジェクトが大型化し、大深度あるいは大水深の土の強度が問題となる場合が増えている。 q_u 法の実績はほぼ深度が25～30mまでであり、大深度、大水深の地盤の強度が q_u の平均値によって正しく代表されているかは大きな問題である。龍岡は東京湾海底地盤の大深度の粘土試料について q_u と有効土被り圧で等方圧密した後に三軸圧縮したときの強度を比較した結果を報告している。これによると、採取深度が20m以内の場合は q_u は三軸圧縮強度の0.5～0.8であるが、深度が20～60mの洪積粘土の場合は試料採取時の乱れによって q_u が三軸圧縮強度の0.2まで小さくなる場合があるとしている⁽²⁾。このことから龍岡は、試料の採取深度が大きい場合に q_u 法をささえているバランスが成立せず、 q_u の平均値では地盤強度を過小に評価するとして、必要に応じて各種の圧密非排水試験を実施すべきであるとしている。本報告は、大深度の海底粘性土地盤の強度の決定法を検討するために、深度30～45mの深度から採取された洪積粘土を用いて一連の三軸試験を行い、一軸圧縮試験結果と比較したものである。

表-1 物理定数

試料名	深さ(m)	w_L (%)	w_o (%)	I_c
東京湾洪積粘土	37.5～45.9	53.4～92.2	28.5～46.0	24.9～46.2
大阪湾沖積粘土	8.6～13.4	90.0～101.7	36.5～41.5	52.4～61.7
大阪湾洪積粘土	37.5～51.6	102.3～109.5	40.7～44.0	58.3～73.1

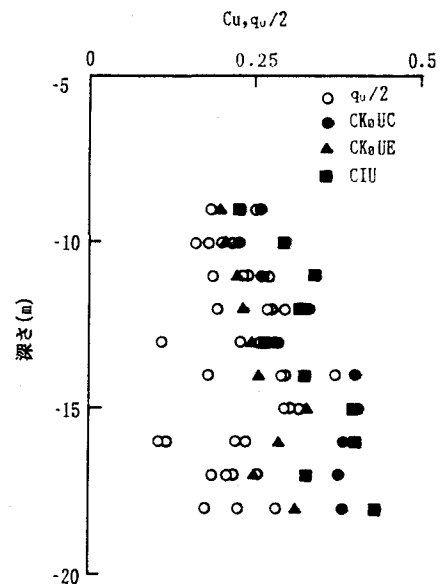


図-1(a) 一軸試験と三軸試験の強度比較
(大阪湾沖積粘土)

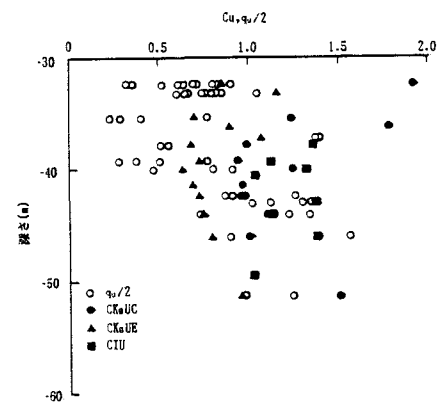


図-1(b) 一軸試験と三軸試験の強度比較
(大阪湾洪積粘土)

Undrained Strength of Marine Clays Obtained by Triaxial Tests

Takashi TSUCHIDA, Junichi MIZUKAMI (Port and Harbour Research Institute)

Satoshi TAIRA (Okinawa Gizyutu Consultant Co.)

2. 試料

試験に用いた試料は大阪湾泉南沖から採取した沖積粘土と洪積粘土、および東京湾羽田地区の洪積粘土である。試料の採取深度と主な物理定数を表1に示す。表に示すように、今回用いた大阪湾および東京湾の洪積粘土は過圧密比が小さく1.1~1.5程度であった。試料は大阪湾沖積粘土と東京湾沖積粘土の場合は固定ピストン式シンウオールサンプラーで、大阪湾洪積粘土についてはデニソンサンプラーで採取されている。東京湾洪積粘土は標高5mの埋立地から、大阪湾粘土は水深20mの海底からの深度である。

3. 三軸試験による海底粘性土地盤の強度決定法

粘性土の非排水強度を三軸試験によって決定する方法は、1972年の国際土質工学会でNGIのベラムらによって提案された。これは現地盤の K_0 値を原位置試験あるいは室内試験より求め、三軸試験によって試料の原位置での有効応力状態を再現するように圧密し、その後圧縮および伸張して強度を求めるものである。この後、半沢はベラムの方法を修正した修正ベラム法を提唱し、わが国および海外の多くの海底地盤に適用して良好な結果を得たとして報告した⁽³⁾。半沢の方法では、まず地盤の地質学的な履歴によって、土被り圧よりも大きな圧密降伏応力を持つ海底地盤を過圧密young粘土と正規圧密aged粘土とに分類する。ここで正規圧密aged粘土とは、年代効果によってみかけの過圧密を示すような地盤であり、半沢によればベラムの方法は正規圧密aged粘土に対してのみ有効であり、また多くの自然海底地盤が正規圧密aged粘土であるとされている。ここでは半沢の方法にしたがって、乱さない粘土試料を原位置の土被り圧力まで K_0 圧密し、その後圧縮した強度(CK_0UC 強度)と、伸張した強度(CK_0UE 強度)を測定し、その平均を地盤のせん断強度として求めた。また、龍岡が q_u と等方圧密三軸圧縮強度との比較を行っていることにヒントを得て、原位置での試料の平均土被り圧力で等方圧密後圧縮した強度($CIUC$ 強度)も求めている。

三軸試験で強度を求める場合は圧密時間とせん断速度に注意する必要がある。これは粘性土のせん断強度が時間効果の影響をうけるためである。修正ベラム法では圧密時間としては一次圧密終了に要する時間、せん断速度については0.01%/min程度となっている。今回は試料を120分で所定の土かぶり圧まで K_0 圧密し、また、せん断速度は0.1%/minで行った。せん断速度の違いの影響については補正によって考慮することにしてはいる。圧密の方法は、試料を有効土被り圧の1/6で等方圧密した後、軸圧が有効土被り圧に達するまで自動 K_0 圧密試験装置⁽⁴⁾によって圧密した。

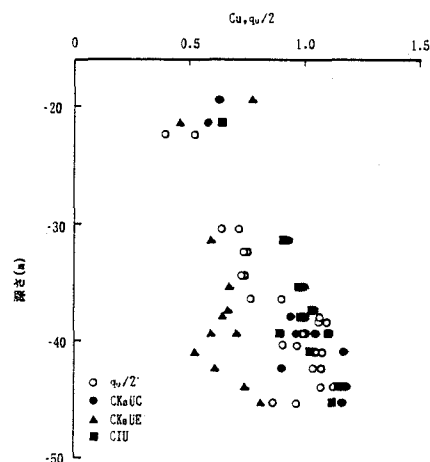


図-1(c) 一軸試験と三軸試験の強度比較
(東京湾洪積粘土)

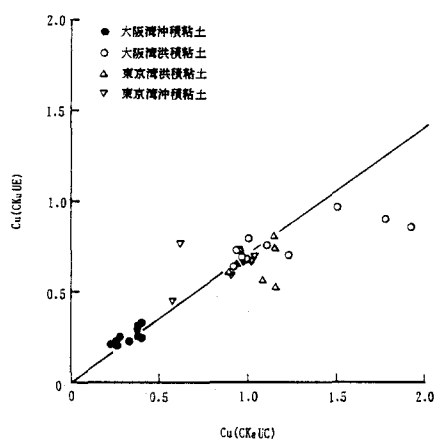


図-2 K_0 圧密圧縮試験と
伸張試験の強度比較

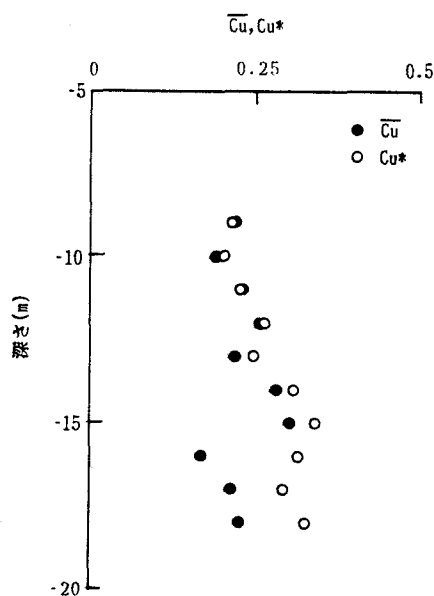


図-3(a) Cu と Cu^* の比較
(大阪湾沖積粘土)

4. 実験結果と考察

図1(a),(b),(c)はそれぞれ大阪湾沖積粘土、大阪湾洪積粘土、東京湾洪積粘土の $c_u = q_u/2$ と、最大軸差応力の2分の1として定義したCK₀UC強度 c_{uac} 、CK₀UE強度 c_{uae} 、CIUCの強度 c_{uic} の各強度の比較を示したものである。図のように q_u に比べて三軸試験によって求められる各強度はばらつきが小さいことがわかる。図2は圧縮強度 c_{uac} と伸張強度 c_{uae} を比較したものである。図のように伸張強度は圧縮強度のほぼ70%であり、沖積粘土と洪積粘土の違いはみられない。

修正パーラム法の強度 c_{u*} は c_{uac} と c_{uae} の平均として求められるが、今回の場合はせん断速度が0.1%/minと10倍程度速いのでせん断速度が強度に及ぼす影響を補正して次式で計算した。

$$c_{u*} = 0.94 \left((c_{uac} + c_{uae}) / 2 \right)$$

図3(a),(b),(c)は、それぞれ大阪湾沖積粘土、大阪湾洪積粘土、東京湾洪積粘土の $c_u = q_u/2$ の平均値 $\bar{c}_u$ と c_{u*} の比較を示したものである。図をみると大阪湾沖積粘土の場合深度8~15mで $\bar{c}_u$ と c_{u*} はほぼ一致しているが深度15~20mでは $\bar{c}_u$ が c_{u*} に比べ25%低下している。大阪湾洪積粘土の場合は深度35mから37mの範囲で $\bar{c}_u$ の低下が目立ち、この範囲以外では $\bar{c}_u$ が c_{u*} よりも約15%大きい。また、東京湾洪積粘土においては深度30~40mでは $\bar{c}_u$ と c_{u*} はほぼ一致し深度40m以深で $\bar{c}_u$ は c_{u*} よりも15%程度大きい。これらをまとめると次のようになる。

大阪湾沖積粘土 (深度10m~15m)

$$c_u = c_{u*} \quad (1)$$

大阪湾沖積粘土 (深度15m~20m)

$$c_u = (0.7 \sim 0.80) c_{u*} \quad (2)$$

大阪湾洪積粘土 (深度35m~37m)

$$c_u = (0.6 \sim 0.8) c_{u*} \quad (3)$$

大阪湾洪積粘土 (深度30m~35m、37m~40m)

$$c_u = (1.1 \sim 1.3) c_{u*} \quad (4)$$

東京湾洪積粘土 (深度30m~40m)

$$c_u = c_{u*} \quad (5)$$

東京湾洪積粘土 (深度40m~45m)

$$c_u = (1.1 \sim 1.4) c_{u*} \quad (6)$$

以上のように、深度の小さい沖積粘土の場合 $q_u/2$ の平均値は三軸試験によって求めた修正パーラム法の強度 c_{u*} と比較的よく一致しているが、2つの洪積粘土においては、深度が34m~45mと大きいにもかかわらず $q_u/2$ は c_{u*} よりもむしろ大きくなる場合が多いことがわかる。大阪湾洪積粘土の深度35~37m付近には q_u の値が著しく低下している部分がみられたが、これは試料に亀裂が多くみられた部分であった。これらは、大深度からサンプリングされた試料においてもその品質が良好であれば、 q_u 法がこれらの深度でも適用性を持つことを示すものである。

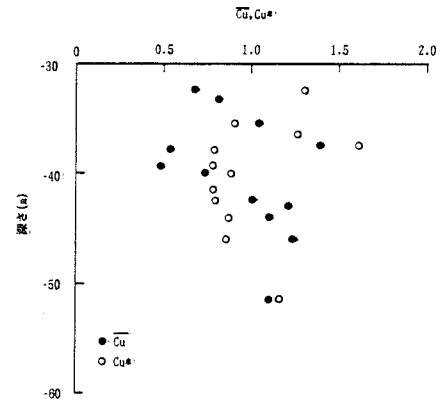


図-3(b) C_u と C_{u*} の比較
(大阪湾洪積粘土)

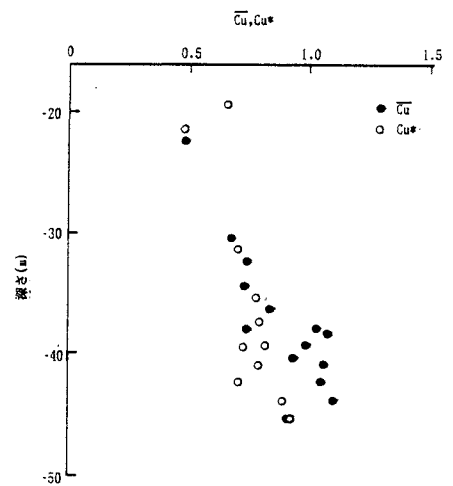


図-3(c) C_u と C_{u*} の比較
(東京湾洪積粘土)

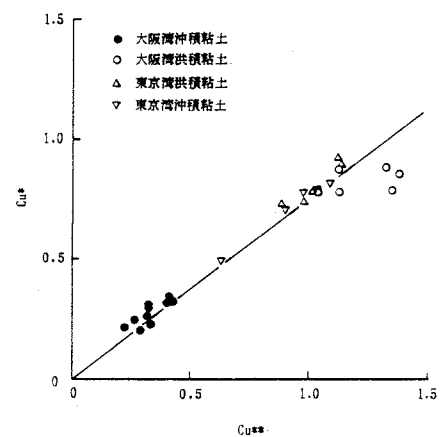


図-4 C_{u*} と C_{u**} の比較

また、図3をみると、 q_u は試料の品質に影響を受けやすいのに対して、三軸試験によって得られる強度は各深度で比較的安定しているといえる。

図4は、修正ペーラム法の強度 c_u^* とC I U C強度 c_u^{**} の関係を求めたものである。図のように c_u^* と c_u^{**} とはほぼ一定の関係があり次式で表される。

$$c_u^* = 0.75 c_u^{**} \quad (7)$$

図5は c_u と c_u^{**} の関係を比較したものである。式(1)～(4)と同様にまとめる次のようになる。

大阪湾沖積粘土（深度8m～15m）

$$c_u = (0.7 \sim 0.9) c_u^{**} \quad (8)$$

大阪湾沖積粘土（深度15m～20m）

$$c_u = (0.4 \sim 0.6) c_u^{**} \quad (9)$$

大阪湾洪積粘土（深度35m～37m）

$$c_u = (0.4 \sim 0.6) c_u^{**} \quad (10)$$

大阪湾洪積粘土（深度30m～35m、37m～40m）

$$c_u = 0.9 c_u^{**} \quad (11)$$

東京湾洪積粘土（深度30m～40m）

$$c_u = 0.8 c_u^{**} \quad (12)$$

(6)式の関係は龍岡が東京湾の深度20mまでの沖積粘土について報告している関係とほぼ一致している。しかし、今回の場合は深度が大きくなっても乱れが大きいと考えられる範囲以外では c_u / c_u^{**} は小さくならずむしろ深度の浅い土よりも大きくなっていることが注目される。

以上の結果から、試料採取時の乱れが大きい場合は q_u 法は深度50m程度の洪積地盤に対してもほぼ適用できると考えられる。しかし、試料の乱れの程度を評価できないことが q_u 法の問題点であり、大阪湾洪積粘土の深度35m～37mの範囲のように乱れが大きい場合は強度に顕著な影響が現れる。したがって必要に応じて三軸試験によって求められる強度との比較を行い乱れの影響の程度を確認することが望ましいと考えられる。この場合、三軸 K_u 圧密を行う必要がある修正ペーラム法の強度を求めるよりも、三軸C I U C試験による強度と式(7)の関係を用了方がはるかに簡便である。ただし、式(7)の適用性についてはさらに多くの地盤について検討する必要がある。

さて、これまでの検討はすべて深度が40mまでであった。大阪湾では深度400mまで乱さない粘土試料の採取が行われ一軸圧縮強度と三軸C I U C強度が求められている。図6はこれらの c_u と c_u^{**} とを比較したものである。図中には深度と式

$$c_u = 0.75 c_u^{**} \quad (13)$$

を比較のため示してある。図のように深度が大きくなると共に c_u / c_u^{**} は小さくなる傾向がある。しかし、深度が300mまでは式(13)の関係がおおむね成立することから、大阪湾の洪積粘土については q_u 法が深度300mまではほぼ適用できると考えられる。

*参考文献：(1) Nakase, A (1967) : The $\phi=0$ analysis of stability and unconfined compression strength, Soils and Foundations, Vol. 7, No. 2 (2) 龍岡文夫(1985) : わかりやすい土質工学原論, pp. 34～40, 土質工学会 (3) 半沢秀郎(1982) : 非排水強度が安全率に及ぼす影響, 土と基礎, 30巻9号 (4) 菊池喜昭・土田孝・小林正樹(1987) : 三軸試験装置による静止土圧係数の測定

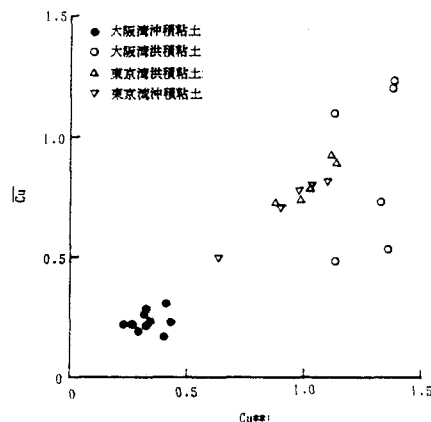


図-5 c_u と c_u^{**} の比較

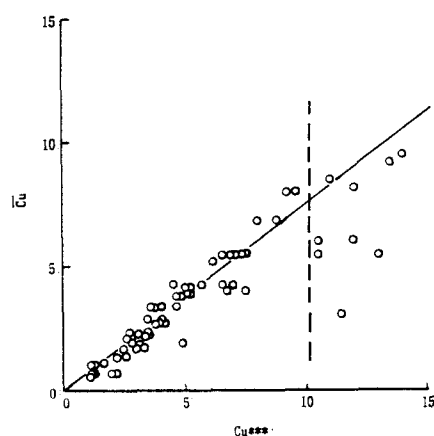


図-6 c_u と c_u^{**} の比較
(400mボーリング)