

一軸圧縮強度と三軸 CIU 試験による境港における中間土地盤の強度評価

広島大学大学院工学研究院 正会員 土田孝
中国地方整備局広島港湾空港技術調査事務所 保利 修

1. 境港外港地区の地質及び土質特性

境港外港地区(写真-1)は、弓ヶ浜半島の米子側から北西方向に延び、美保湾と中海とを分かち、長さ約 18km・幅約 4km の長大な湾口砂州の先端外海側(美保湾側)に位置している。この地区は埠頭・工用地として発展し、人工の埋立地や港湾施設が海上に延びている。

弓ヶ浜砂州は沖積世(完新世)の堆積物で、主として花崗岩質の砂からなり形成年代は縄文海進以降(8 千年前～)であり、現在の外海側の海岸線を構成する外浜は 900 年前以降に日野川の土砂供給の増大により急速に発達したものと考えられている。砂州堆積物の下には、洪積世(中期～後期更新世)の堆積物が厚く(50m 程度)分布している。洪積世末の最終氷河期には海面が大きく低下し(100m 以上)、弓ヶ浜北部に向かって深い河谷が形成されていたようであり、この付近では沖積～洪積の境界は起伏に富んだ不整合関係を示す。境港市付近では洪積世末期以後の地殻変動による沈降が激しく 30m 以上におよぶ厚い粘性土層(Lc)が分布している。Lc 層は 1～2 万年前の堆積層であり、沖積・洪積の境界を 1 万年前とする場合は洪積層、2 万年前とする場合は沖積層に区分される。

写真-1 の赤字で示した位置に長さ 300m の防波堤を新設するため、海底地盤の調査を行った。図-1 に防波堤立地地点の海底地盤の概要を示すが、水深はほぼ-10m であり、表層から上部沖積粘土層、下部沖積粘土層、沖積砂質土層、洪積粘土層、洪積砂質土層が堆積している。防波堤の設計上問題となるのは沖積粘土層であった。写真-1 に示す既設の防波堤の建設においては沖積粘土層のせん断強度が不足したため、サンドコンパクションパイル工法による地盤改良が行われている。

本防波堤の設計においては、海底地盤の設計強度の設定において一軸圧縮強度と三軸 CU 強度を併用した強度設定法を採用した。また、平成 19 年度に改訂された港湾の施設の技術上の基準で採用されている、設計定数のばらつきを考慮した地盤強度の設定を行った。この結果、砂分を多く含む低塑性である上部粘土層の強度評価を三軸 CU 強度を用いて決定し、従来のように一軸圧縮強度を用いた場合に比べ、建設コストを削減することができた。

2. 一軸圧縮強度と三軸 CU 試験を併用した強度決定法

わが国では、粘土地盤の設計強度を求める方法として、一軸圧縮強度法(q_u 法)が広く実務で用いられてきた。一軸圧縮強度法は、固定ピストン付きシンウォールサンプラーにより粘性土の不攪乱試料を採取し、一軸圧縮試験を行って一軸圧縮強度 q_u を求め、その平均値より、設計せん断強度 $s_u = q_u/2$ として設計強度を決定する方法である。この方法は、不攪乱試料の品質が適正であり、試料が過度に攪乱されていない場合は妥当な設計強度であることが確認されている。しかし、サンプリング時の乱れが大きい場合や、



写真-1 境港湾内の現況 (H18.5 撮影)

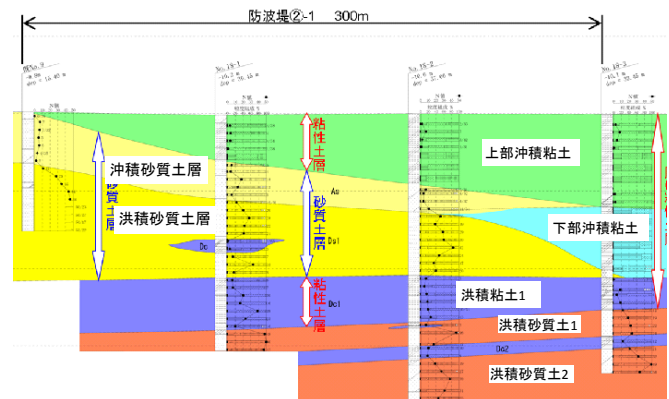


図-1 防波堤立地地点における土質の概要

粘土の土性によって攪乱の影響を受けやすい場合、一軸圧縮強度法は本来の地盤の強度を過小に評価する可能性がある。このため、一軸圧縮強度と三軸 CU 強度を併用した強度決定法が港湾の施設の技術上の基準に採用されている。

三軸 CU 強度を併用した強度決定法では、以下のような手順で実施する「簡易 CU 試験」により強度を求める。

- ① 不攪乱試料を三軸試験器にセットし、原位置における有効拘束圧の平均 $\{\sigma_v \cdot (1+2K_0)/3\}$ で 120 分間等方圧密する。わが国の粘土で過圧密比が 2 以下の場合 K_0 値は 0.5 とする。
- ② 0.01%/min のせん断速度で圧縮し、最大軸差応力の 2 分の 1 として得られる非排水強度 $s_{u(SCU)}$ を簡易 CU 強度と呼ぶ。設計非排水強度として、 $0.75 s_{u(SCU)}$ を用いる。ここで $s_{u(SCU)}$ に用いる係数 0.75 は、わが国の海成粘土に関するせん断速度効果と強度異方性を考慮して求めたものである。

図-2 は q_u 法の強度 $s_{u(q_u)}$ と簡易 CU 強度 $s_{u(SCU)}$ の比較と試料の品質の関係を示している。試料の乱れの程度によって両者の関係は次のようにまとめられる。

- I 品質がよい(乱れが小さい) $s_{u(q_u)} > 0.80 s_{u(SCU)}$
- II 品質が適度(乱れが適度) $0.70 s_{u(SCU)} < s_{u(q_u)} \leq 0.80 s_{u(SCU)}$
- III 品質が悪い(乱れが大きい) $0.60 s_{u(SCU)} < s_{u(q_u)} < 0.70 s_{u(SCU)}$
- IV 品質が非常に悪い(乱れが非常に大きい) $s_{u(q_u)} \leq 0.60 s_{u(SCU)}$

このような関係が成り立つのは、一軸圧縮強度が試料の乱れによって敏感に変化するのに対して、再圧縮法の強度である簡易 CU 強度は、乱れの影響を受けにくいためである。この関係を用いて、港湾の施設の技術上の基準では一軸圧縮強度と簡易 CU 強度の関係から、試料の品質を評価する次のような方法が採用されている。

各シンウォールチューブについて 3 個の一軸圧縮試験と 1 個の簡易 CU 試験を実施する。 $q_u/2$ の平均値 $s_{u(q_u)}$ と簡易 CU 強度 $s_{u(SCU)}$ の関係を求め以下の基準で試料の乱れの程度を判定し、設計強度を決定する。

- (I) $s_{u(q_u)} > 0.80 s_{u(SCU)}$ の場合
試料の乱れは小さい。設計強度として $s_{u(q_u)}$ は大きすぎる可能性があり $0.75 s_{u(SCU)}$ を用いる。
- (II) $0.80 s_{u(SCU)} \geq s_{u(q_u)} > 0.70 s_{u(SCU)}$ の場合
試料の乱れは、 q_u 法に関して適度のレベルである。 $s_{u(q_u)}$ と $0.75 s_{u(SCU)}$ のどちらを用いてもよい。
- (III) $0.70 s_{u(SCU)} \geq s_{u(q_u)} > 0.60 s_{u(SCU)}$ の場合
試料の乱れがやや大きい。設計強度としては $0.75 s_{u(SCU)}$ を用いる。
- (IV) $s_{u(q_u)} \leq 0.60 s_{u(SCU)}$ の場合
試料の乱れが非常に大きい。乱れが練返し型の場合は $0.65 s_{u(SCU)}$ を用い、クラック型の場合は $0.75 s_{u(SCU)}$ を用いる。

以上の強度決定法を図-3 に示した。図では試料の乱れを「クラック型」と「練返し型」に分けて判断することになっている。クラック型と練返し型の乱れの違いを一軸圧縮試験における応力ひずみ関係で表すと、図-4 のようになる。深度 20m 以深から採取したような場合、試料の乱れは「クラック型」が多くなるがこの場合、図-3 の IV のゾーンで採用される強度は $0.75 s_{u(SCU)}$ である。

平成 19 年に改訂された港湾の技術上の基準では、信頼性設計法が導入されている。図-5 は地盤腹メータの設計用値の設定方法である。一軸圧縮試験や三軸試験による個々の試験結果は計測値、その平均値を地層区分ごとに求めた値は推定値に相当す

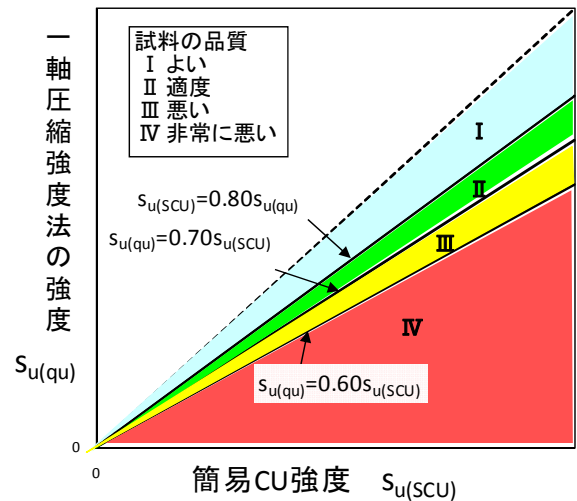


図-2 一軸圧縮強度と簡易 CU 強度の関係による試料の品質の評価

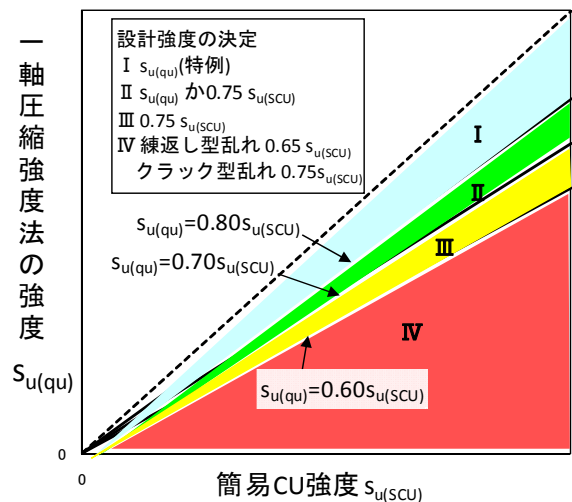


図-3 一軸圧縮強度と簡易 CU 強度を併用した設計強度の決定法

る。従来は推定値を設計値といていたが、新基準では定数のばらつきを考慮して次式により、地盤パラメータの代表値(特性値)を求める。

特性値＝推定値× b_1
 b_1 は土質定数のばらつきに関する補正係数であり、表-1 で与えられる。

3. 境港の海底地盤の強度特性

図-6 に境港防波堤建設予定地の含水比におけるコンシステンシー限界と自然含水比を示す。図のように、標高-22m 付近より液性限界が 40%以下の上部粘土層と液性限界が 40 以上で震度とともに急増する下部粘土層に分けることができる。図-7 は上部、下部粘土層の液性限界と砂分含有率の関係である。図のように砂分含有率が大きいほど液性限界は低下しており、上部、下部粘土層の違いは堆積過程における砂分の混入が主たる原因と考えられる。砂分を 50%以上含む粘性土は砂と粘土の中間的な性質を示す中間土に分類されるが、本事例の上部粘土層は図-7からわかるように砂分が40%未満の土もかなりあり、砂分含有量だけでは「中間土」と明確に判断できない。

図-8 は圧縮指数 C_c と液性限界 w_L の関係である。上部、下部粘土層とも、 C_c と w_L の相関はきわめて良好であった。

図-9 は $q_u/2$ と簡易 CU 強度の 75%である $0.75s_u(SCU)$ を標高の関係で示している。図のように、塑性の低い上部粘土層では $0.75s_u(SCU)$ と $q_u/2$ は明かな差があるが、下部粘土層では両者の差は小さい。図-10 は一軸圧縮強度と簡易 CU 強度の比較により、図-2、図-3 から不攪乱試料の品質を評価し、設計強

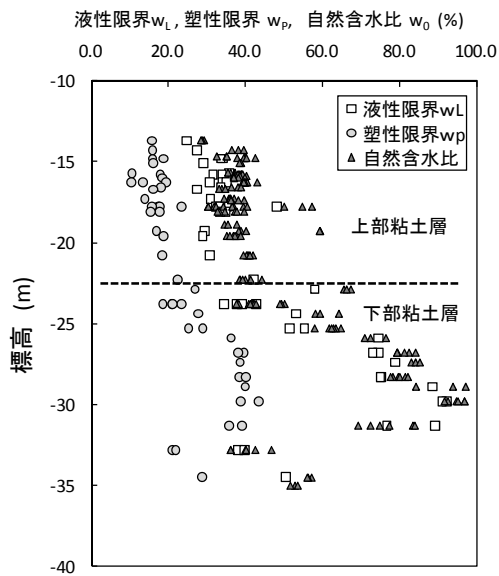


図-6 海底地盤のコンシステンシー限界と含水比

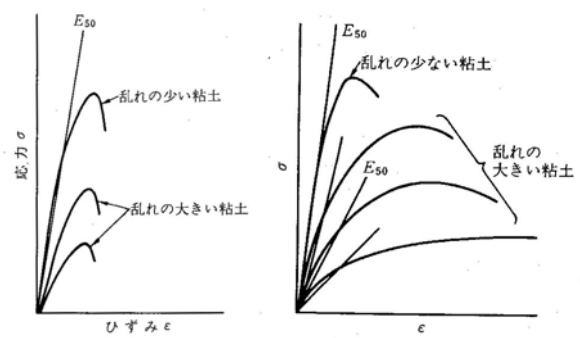


図-4 クラック形の乱れと繰返し型乱れの応力ひずみ曲線

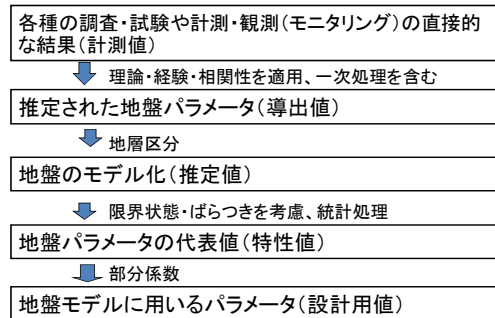


図-5 地盤パラメータの設計用値の設定方法

表-1 土質パラメータの変動係数と補正係数

土質パラメータの 変動係数	補正係数 b_1	
	耐力側のパラメータ	作用側のパラメータ
0.1 未満	1.00	1.00
0.1 以上 0.15 未満	0.95	1.05
0.15 以上 0.25 未満	0.90	1.10
0.25 以上 0.40 未満	0.85	1.15
0.40 以上 0.60 未満	0.75	1.25
0.60 以上	結果の解釈やモデルの再検討	

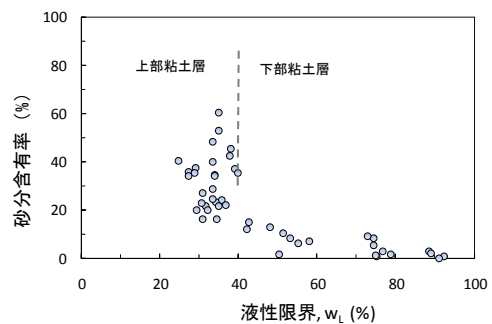


図-7 液性限界と砂分含有率

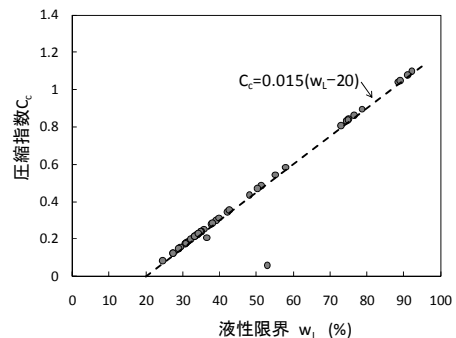


図-8 液性限界と圧縮指数の関係

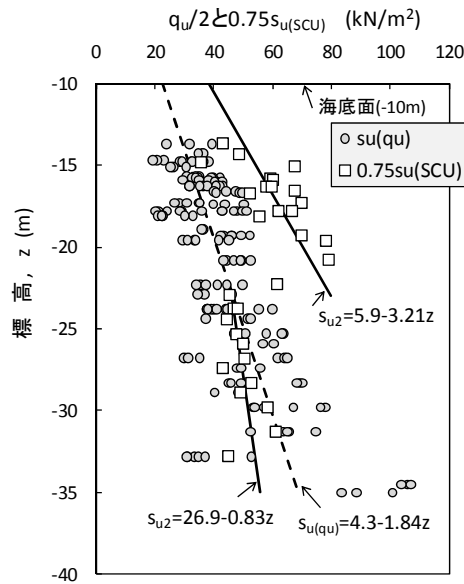


図-9 $q_u/2$ と簡易CU強度 $s_u(SCU)$ の75%

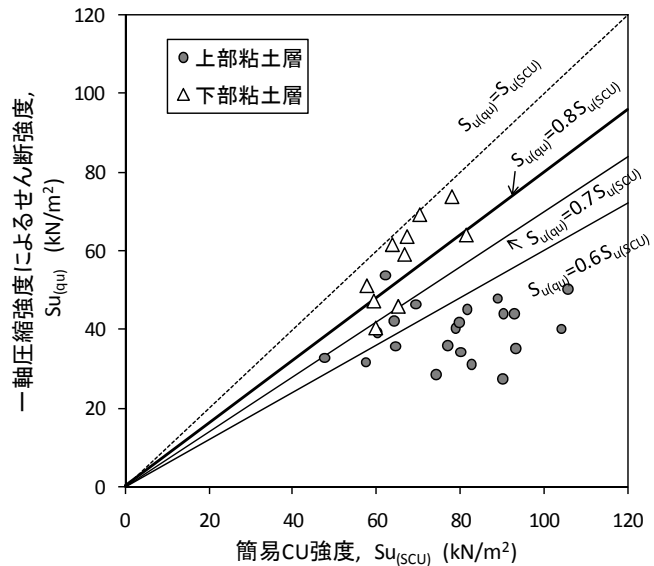


図-10 一軸圧縮強度と簡易CU強度の比較

度を検討したものである。図のように、塑性の低い上部粘土層は品質Ⅳ(非常に悪い)に相当しており、一軸圧縮強度は地盤強度を過小に評価していると判断される。一方、塑性の高い下部粘土層では多くのデータが品質Ⅰ(良好)に分類されている。この結果より、上部粘土層の品質が悪い原因はサンプリング方法によるものではなく、試料が砂分を多く含むために、試料採取による応力解放によって有効応力を保持しにくいためであると考えられる。以上のような上部粘土層と下部粘土層の明瞭な違いを考えると、上部粘土層は一軸圧縮強度による強度評価が適さないという意味で中間土に分類されるべき土と考えられる。

図-10を用いた判定結果から、上部粘土層は $0.75s_u(SCU)$ によって強度を決定し、下部粘土層については $q_u/2$ と $0.75s_u(SCU)$ による方法の2通りで設計用値を検討した。図-11にその結果を示す。上部粘土層の簡易CU強度は変動係数が0.14であったので補正係数 $b_1=0.95$ 、 $q_u/2$ については変動係数が0.23であったので $b_1=0.90$ 、下部粘土層の簡易CU強度については変動係数が0.09であったので $b_1=1.00$ を用いている。図-11からわかるように、上部粘土層については $0.75s_u(SCU)$ を用いることにより、 $q_u/2$ を用いた場合に比べ、70~80%大きい設計値となっている。一方、下部粘土層の場合は、いずれの強度を用いてもほとんど差はないという結果になった。

図-12は防波堤の設計断面であるが、波圧時の偏心傾斜加重に対する安全率(設計定数に部分係数を用いた解析)は $0.75s_u(SCU)$ による強度を用いることで1.135となり、図-11の $q_u/2$ を用いた場合は0.733であった。したがって、 $q_u/2$ を用いた場合は地盤改良など何らかの対策が必要になったと考えられ、三軸CU強度を併用した強度決定により建設コストが削減されたことは明かである。

参考文献

- 1) Tsuchida, T. : Evaluation of undrained shear strength of soft clay with consideration of sample quality, Soils and Foundations, Vol.40, No.3, pp.29-42, 2000.6.
- 2) 土田孝, 水上純一, 森好生, 及川研: 一軸圧縮試験と三軸試験を併用した新しい粘性土地盤の強度決定法, 港湾技術研究所報告, Vol.28, No.3, pp.81-145, 1989年9月.

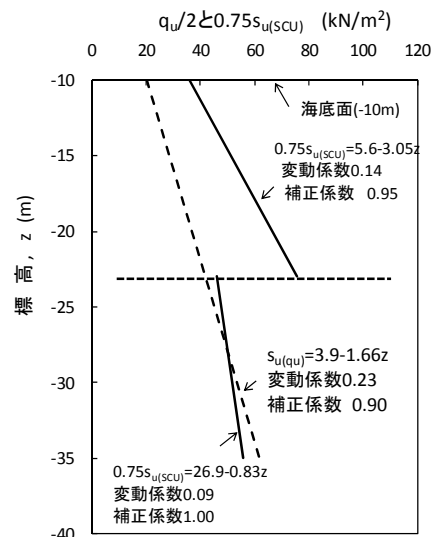


図-11 境港における地盤強度の設計用値

