

盛土地盤の安定解析のための非排水条件の強度定数 c_{CU} , ϕ_{CU} の提案

土地盤工学研究所・広島大学 正会員 ○土田 孝
応用地質株式会社 正会員 畠山正則・持田文弘

1. はじめに - c_{CU} , ϕ_{CU} の問題点 -

盛土の安定解析では、三軸 CU 試験から求められる c_{cu} と ϕ_{cu} を非排水条件での強度定数とし、せん断力 τ をモール・クーロンの破壊規準により、次式で計算する方法が採用されている。

$$\tau = c_{cu}/F + \sigma (\tan \phi_{cu})/F$$

ここに σ はすべり面上の直応力、 F は安全率である。

一方、式(1)の強度定数である c_{cu} と ϕ_{cu} について、地盤工学会の地盤材料試験の方法と解説¹⁾には、以下のように記述されている。

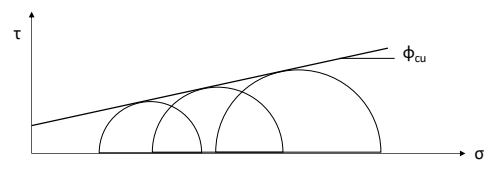
「全応力表示に基づく CU 三軸試験の強度定数 (c_{cu} , ϕ_{cu}) の物理的意味は『任意の圧密圧力で圧密された土が持つ非排水せん断強さを求めるための強度定数』ということである。(中略) 従来は、モール・クーロンの破壊規準を適用し、図 1(a) に示すような強度定数 ϕ_{cu} を求めてきたが、全応力表示のモール円に破壊包絡線を引くことはなんら物理的な意味を持たず、実用上からも正規圧密粘土では安全側すぎる。そこで、本基準では CU 三軸試験からは、その物理的な意味の不明確さから、図 1(a) に示す方法で ϕ_{cu} を求めることはしないことにしている。(中略) CU 三軸試験結果から物理的に意味のある ϕ_{cu} を求める方法として、図 1(b) に示す 3 つの方法が考えられる (以下略)。」

上記で重要な点は c_{cu} , ϕ_{cu} が「非排水せん断強さを求めるための強度定数」であり、モール・クーロンの破壊規準を適用した強度定数ではないこと、すなわち、 c_{cu} , ϕ_{cu} は c_d と ϕ_d , c_u と ϕ_u と違って安定解析に使うことはできない、ということである。最近も田中²⁾が以下のように指摘している。「本稿では ϕ_{cu} 法の検討に、混乱を避けるために従来使われている ϕ_{cu} , c_{cu} の記号を用いてきた。しかし、(中略) この記号が大きな混乱を招いてきたと筆者は考える。 ϕ と c は伝統的に破壊規準を示す記号として用いられてきた。これを説明すると三軸試験を例にとれば、 σ_3 を一定にして σ_1 を増加させるとそのモールの応力円は徐々に大きくなり、破壊規準に接する。このときに供試体は破壊する。ところが赤本で推奨する方法で求めた ϕ_{cu} と c_{cu} で規定される線 (図 1(b) の②、筆者注) ではこの現象を説明することはできない。すなわち式(1)は破壊規準ではない。」しかしながら、盛土構造物の設計においては非排水条件での安定解析に c_{cu} , ϕ_{cu} と式(1)が用いられる場合が多く、 c_{cu} , ϕ_{cu} の求め方は図 1(a) の破壊包絡線を用いる方法による値、あるいは図 1(b) の②の方法による値が設計者の判断により採用されている³⁾。

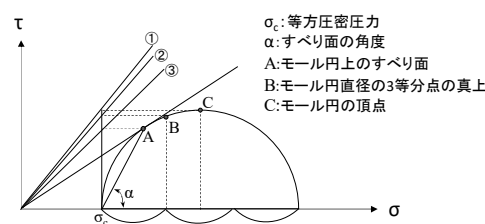
c_{cu} , ϕ_{cu} が安定解析に使用できないとすると、非排水強度を用いた安定解析に用いる c と ϕ は本来どのように求めるべきであろうか？ 通常、地盤は原位置の応力状態での圧密が終了しており、CU 三軸試験における圧密の意味は原地盤の応力状態を再現することにある (実際には K_0 圧密 (原地盤) と等方圧密 (試験) の違いはあるが)。非排水条件における全応力解析の強度定数 c , ϕ を求めるには、圧密終了後に UU 三軸試験を行って UU 条件で c と ϕ を求めることがもっとも妥当であると考えられる。本研究では本試験を CUU 三軸試験と呼ぶことにする。

2. CUU 三軸試験 (圧密後の UU 三軸試験) と CUU 三軸試験から求められる強度定数 c_{CUU} , ϕ_{CUU}

盛土材を想定した試料の CU 三軸試験を行って c_{cu} と ϕ_{cu} を求め、同じ試料で CUU 三軸試験を行って、非排水条件の強度定数 c_{CUU} , ϕ_{CUU} を求めた。使用した試料は礫混り粘土質シルトであり、1 E_c で締固めを行って作製した。CU 三軸圧縮試験では等方圧密圧力を 50, 100, 200 kN/m^2 とした。CUU 三軸圧縮試験は 100 kN/m^2 で等方圧密した試料を

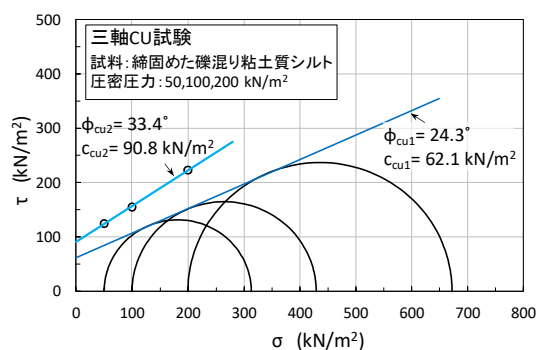
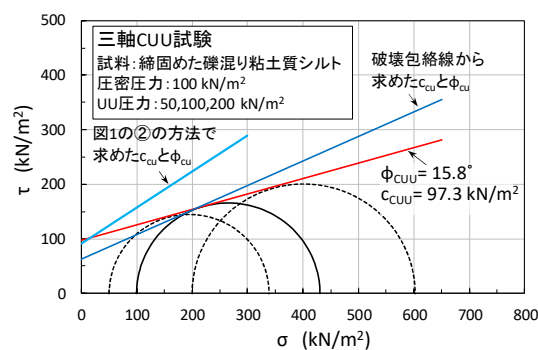


(a) 従来の整理方法



(b) 物理的に意味がある整理方法

図 1 CU 三軸圧縮試験結果の強度定数に関する整理方法 1) に加筆)

図2 CU三軸圧縮試験から求めた2通りの ϕ_{cu} と c_{cu} 図3 CUU三軸圧縮試験から求めた ϕ_{cUU} と c_{cUU}

圧密終了後に非排水でセル圧を 50 kN/m^2 に減少および 200 kN/m^2 に増加して圧縮試験を行った。せん断速度は $0.1\%/\text{min}$ である。

図2はCU三軸圧縮試験の結果である。図より破壊包絡線から求めた c_{cu1} と ϕ_{cu1} は 62.1 kN/m^2 と 24.3° 、図1(b)の②の方法で求めた c_{cu2} と ϕ_{cu2} は 90.8 kN/m^2 、 33.4° であった。

図3はCUU三軸圧縮試験の結果である。図のように 100 kN/m^2 で圧密後にUU条件で圧縮した結果 $c_{cUU}=97.3 \text{ kN/m}^2$ 、 $\phi_{cUU}=15.8^\circ$ が得られた。飽和粘土の場合 ϕ_{cUU} はほぼ0になるが($\phi_u=0$ 法)、本試料は不飽和状態の締め固め土であったためUU条件でも $\phi>0$ となった。CUU三軸試験では各圧密圧力において c_{cUU} と ϕ_{cUU} を求める必要があるが、今回は圧密圧力 50 kN/m^2 、 200 kN/m^2 の条件でCUU試験を行わなかったため、試料の圧密圧力によって ϕ_{cUU} の値は大きく違わないと仮定し、 $\phi_{cUU}=15.8^\circ$ として圧密圧力 50 kN/m^2 、 200 kN/m^2 のときの c_{cUU} を求めた。図5は求めた c_{cUU} と圧密圧力 σ_c の関係であり、

$$c_{cUU} = 72.7 + 0.246 \sigma_c \quad (1)$$

という良好な直線関係が得られた。 $\phi_{cUU}=15.8^\circ$ と式(1)を用いると c_{cUU} と ϕ_{cUU} を用いた安定解析が可能となる。

3. 強度定数 c_{cUU} 、 ϕ_{cUU} が盛土の安全率に及ぼす影響

強度定数が盛土の安全率に及ぼす影響を調べるため、図6に示す盛土断面で安定解析(修正フェレニウス法円弧すべり)を行った。盛土は高さ16mで斜面勾配を1:1.5とした。 c_{cUU} と ϕ_{cUU} を用いた計算では c_{cUU} が圧密圧力($K_0 \approx 1.0$ とすると原位置の有効土被り圧)によって変化するので、図6の下図のように与えた。表1は用いたパラメータと最小安全率である。表より安全率は $(c_{cu1} \text{ と } \phi_{cu1}) < (c_{cUU} \text{ と } \phi_{cUU}) < (c_{cu2} \text{ と } \phi_{cu2})$ となった。 $(c_{cUU} \text{ と } \phi_{cUU})$ を正とすれば、破壊包絡線から求めた c_{cu1} と ϕ_{cu1} を用いると安全率を過小評価、図1(b)の②の方法で求めた c_{cu2} と ϕ_{cu2} を用いると過大評価するといえる。

参考文献：1) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説[第1回改訂版]，第7編第3章土の三軸試験，3.3等方応力を加えた土の三軸試験，3.3.6基準の解説，pp.634-636，2020。2) 田中洋行：全応力解析による円弧滑りと c, ϕ ，基礎工，Vol. 50, No.7, pp. 2-7。3) 松方健治，浜崎智洋，土田孝：供用中の高速道路盛土から採取した土試料の三軸試験結果から求めた強度定数，地盤と建設，Vol.34, No.1, pp.117-125，2017。

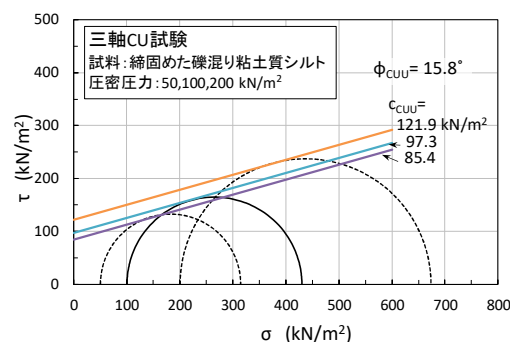
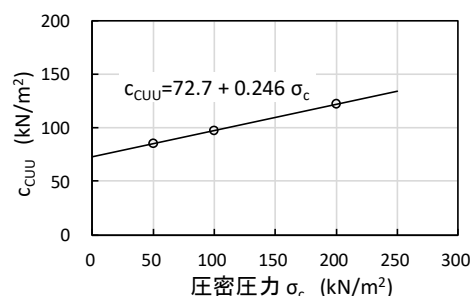
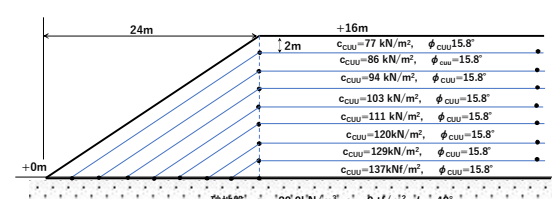
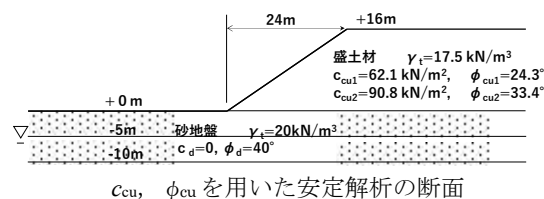
図4 $\phi_{cUU}=15.8^\circ$ として求めた各圧密圧力の c_{cUU} 図5 圧密圧力と c_{cUU} の関係

図6 盛土の安定解析の計算条件

表1 用いた c, ϕ と盛土安全率の比較

用いた c と ϕ	常時	地震時($k=0.20$)
c_{cu1} と ϕ_{cu1}	2.089	1.597
c_{cu2} と ϕ_{cu2}	2.638	1.981
c_{cUU} と ϕ_{cUU}	2.447	1.845