

砂質地山トンネルの切羽安定に関係する 不飽和砂質土の粘着力について

APPARENT COHESION INTERCEPT OF UNSATURATED SAND
IN FACE STABILITY PROBLEM OF SHALLOW TUNNEL IN SANDY GROUND

福島 伸二*

Shinji FUKUSHIMA

The apparent cohesion intercept is one of most important factors to evaluate the face stability of a shallow tunnel in a unsaturated sandy ground. In this study, a series of triaxial compression tests at low pressures was performed on unsaturated and undisturbed sand samples to investigate the apparent cohesion intercept using the Mohr-Coulomb failure criterion for unsaturated sand. It was found the following from the test results.

- 1) The apparent intercept of unsaturated sand is due to the normal force at each grain contact point developed by suction force.
- 2) It is necessary to carry out the triaxial compression test at low pressure level in order to obtain the apparent cohesion intercept of unsaturated sand precisely.

Keywords: face stability, unsaturated sand, suction, apparent cohesion intercept, shallow tunnel,

1. まえがき

都市部の土被りの浅い未固結な砂質地山中にNATMでトンネルを掘削する事例が増加しているが、これは地山が未固結な砂質土であっても地下水位を低下させ不飽和状態として自立性を持たせることができるからである。この砂の自立性は不飽和化による砂粒子間の水に生じるサクションにより砂粒子間に圧縮力が発生し見掛けの粘着力が砂に付加されるからである。一般に砂質土ではサクションが強度に影響を及ぼす例は少ないが、土被りの浅い砂質地山トンネルの掘削問題はこの事例の一つであろう。掘削時の切羽の安定性は地山の強度パラメータ(c , ϕ)を用いてトンネル切羽部を2次元的に理想化した円弧すべり法(分割法)などによる安定計算により確認される¹⁾²⁾。施工の効率を高めるには可能な限り大きな掘削断面にして機械施工とすることが望ましく、このためには信頼性の高い切羽の安定性評価が重要である。

切羽内の地山要素の圧力レベルは掘削による応力開放により低くなるが、これは特に土被りの浅い場合ほど著しい。このような圧力レベルの低い切羽の安定性には地山の内部摩擦角よりも粘着力のほうがより重要な役割をするので、切羽の安定性を合理的に評価するためには、低応力レベルで不飽和状態にある地山の見掛けの粘着力を求める必要がある。本報告では切羽の安定解析に必要な低拘束圧領域における砂の不飽和時の強度パラメータを求めるためのサクションを制御した三軸圧縮試験法と、これを用いた掘削中のトンネル

* 正会員 工博 (株)フジタ 技術研究所土木研究部

の切羽部から採取した不攪乱・不飽和砂質土の試験結果のうち、特に見掛けの粘着力について報告したい。

2. サクションを制御した三軸圧縮試験システム

使用した不飽和供試体の試験用の三軸圧縮試験システムを図-1に示してある。このシステムは特に低拘束圧レベルで精度の高い試験が可能のように、飽和供試体の試験システム³⁾と同様にキャップ・载荷ロッドなどの自重が供試体に作用しないようにカウンターバランスでこれをキャンセルし、供試体を包むゴムスリーブも供試体の拘束が小さい肉厚0.1mmのものを使用した。さらにセル圧やサクションのための空圧制御は容量は小さいが微小圧力まで制御できる精密レギュレータを、また軸荷重や各種圧力の測定には感度の高いロードセルあるいは圧力変換器を使用した。供試体の標準寸法は直径 $d=7.5\text{cm}$ 、高さ $h=15\text{cm}$ である。供試体上端面のキャップは空気は通すが水は通さない四フツ化エチレン樹脂多孔質フィルターを接着させ、また下端面のベダスタルには水は通すが空気は通さないセラミックディスク（ニッカトー社製：電解隔膜F-C1（ $\phi 67\text{mm} \times 4\text{mm}$, $\text{AEV} \approx 2\text{kgf/cm}^2$ ））を取り付けてある。供試体の体積変化はアクリルパイプを用いて2重セル型にし、载荷ロッド部分の水位変化を差圧計（DT-VT）により測定して算定する。

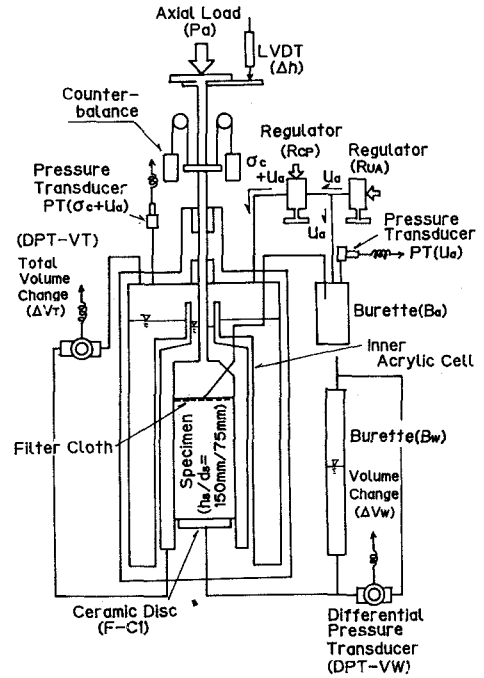


図-1 不飽和三軸圧縮試験システム

不飽和砂の試験条件は排気・排水条件（サクション $(u_a - u_w) = \text{一定}$ ）で行ったが、一定のサクションを有する供試体は以下のように準備した。先ず原位置から採取してきた不攪乱供試体をそのまま加算型レギュレータ（ R_{cp} ）により所定の拘束圧（ $\sigma_a = \sigma_r$ ）で等方圧密する。圧密終了後、レギュレータ（ R_{ua} ）によりピュレット（ B_a ）内にサクションに相当する空気圧（ $u_a > 0$ ）を加え、供試体内の間隙水をセラミックディスクを通してピュレット（ B_w ）に平衡状態（間隙水の圧力は大気圧と同じにする（ $u_w = 0$ ））になるまで排水させる。この供試体内部へのサクション負荷中には有効拘束圧（ σ_r ）が変化しないように加算型レギュレータ（ R_{cp} ）により供試体外部へもサクション圧（ u_a ）と同じセル圧が自動的に加わる（ $\sigma_c = \sigma_r + u_a$ ）。この時の排水量は差圧計（DT-VW）により測定する。せん断はセル圧、サクション圧を一定に保ちながら、変位制御（ひずみ速度 $\epsilon_a = 0.01\%/min$ ）で軸荷重を加えて行った。

3. 試験結果

試料は2種類使用し、一つは成田砂層からなる地山中に掘削したトンネル切羽から、ライナーサンプラー（内径75mm、肉厚3mmのステンレスパイプ製の二つ割りモールドにカッターとカラーを取りつけたもの）を地盤中に貫入させて不攪乱状態で採取した。もう一つは地表面から底掘りした砂質土（A砂）の地山面から上述したライナーサンプラーで採取した。図-2にこ

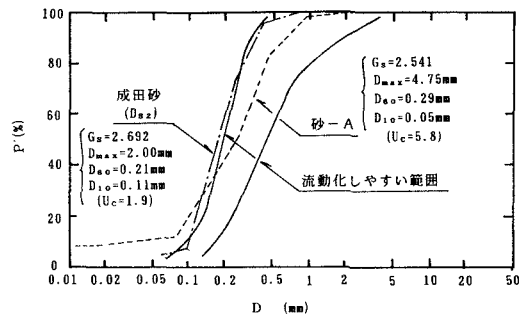


図-2 粒度曲線

の試験試料の粒度試験結果を示してある。

図-3には『土のpF試験法：JIS T151-1990』に従って三軸セルを加圧チャンバーとした加圧法により求めた各試料の水分保持特性を示してある。図中の□印、○印はそれぞれ脱水過程、黒塗りの■印、●印は吸水過程のものである。水分保持曲線は細粒分含有量に大きく影響を受けるようで、細粒分の多い砂Aの方がpFの変化に大して緩やかに変化するが、成田砂はこれよりも急激に変化する。また砂Aの方が不飽和状態では高いサクション下におかれることがわかる。成田砂の+印は掘削中の切羽部で負圧マノメータにより測定した原位置のサクション値であるが、このサクション値は脱水・吸水過程の水分保持曲線の間であり大体 $(u_a - u_w)_r \approx 0.06 \text{ kgf/cm}^2$ であることがわかる。またA砂は原位置での自然含水比が $W_n = 26.5 \sim 29.7\%$ であり、この含水状態におけるサクションは水分保持曲線の脱水・吸水過程の間でとると $(u_a - u_w)_r \approx 0.16 \text{ kgf/cm}^2$

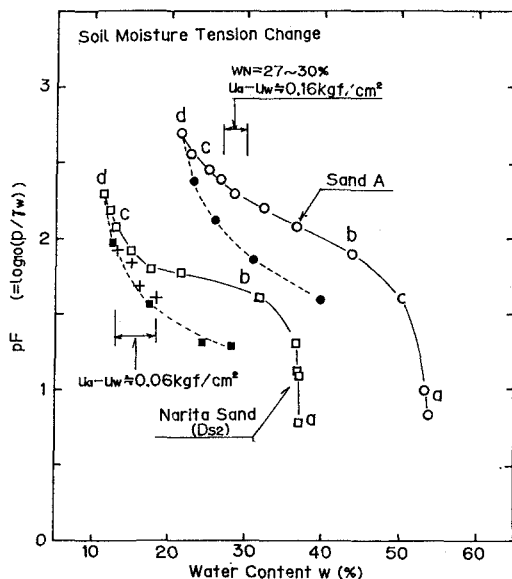


図-3 水分保持特性

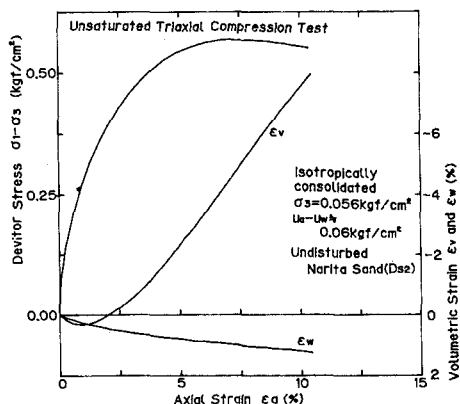


図-4 (a) 不飽和砂の応力-ひずみ関係
(成田砂、 $\sigma_3 = 0.05 \text{ kgf/cm}^2$)

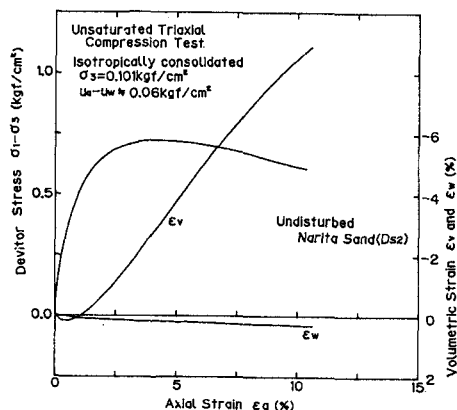


図-4 (b) 不飽和砂の応力-ひずみ関係
(成田砂、 $\sigma_3 = 0.10 \text{ kgf/cm}^2$)

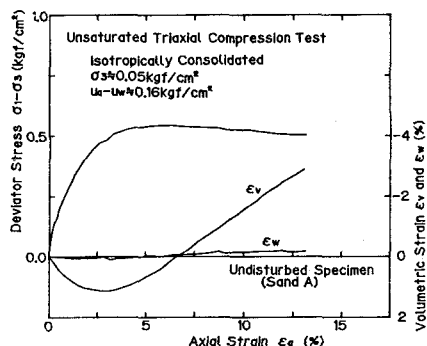


図-5 (a) 不飽和砂の応力-ひずみ関係
(A砂、 $\sigma_3 = 0.05 \text{ kgf/cm}^2$)

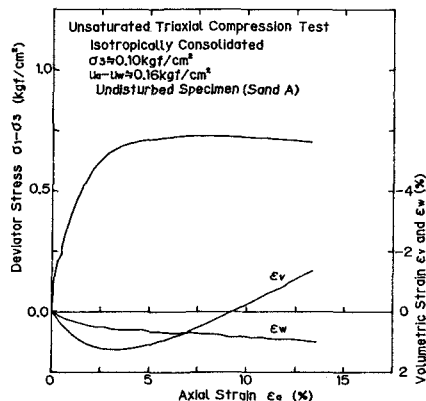


図-5 (b) 不飽和砂の応力-ひずみ関係
(A砂、 $\sigma_3 = 0.10 \text{ kgf/cm}^2$)

程度である。従って不飽和供試体の試験時のサクシオンはこれら原位置におけるそれぞれの値を採用した。

図-4 (a) (b)に成田砂（サクシオン値： $u_a-u_w \approx 0.06 \text{ kgf/cm}^2$ ）と図-5 (a) (b)にA砂（サクシオン値： $u_a-u_w \approx 0.16 \text{ kgf/cm}^2$ ）のそれぞれ拘束圧 $\sigma_r=0.05, 0.10 \text{ kgf/cm}^2$ におけるサクシオン一定の排気・排水三軸圧縮試験から得られた応力-ひずみ関係を示してある。体積変化のうち ε_v は供試体全体の体積変化を、 ε_w は供試体内からの排水量をそれぞれ示している。せん断中の供試体の体積変化をみると供試体全体の体積変化傾向と排水変化傾向は異なっており、全体が収縮から膨張に変化しても間隙水は常に排水傾向にあることがわかる。図-6 (a)（成田砂）、(b)（A砂）には試験を実施した各拘束圧レベルにおける応力-ひずみ関係を比較してある。次に図-7には比較のために実施した飽和供試体の低拘束圧領域における排水三軸圧縮試験（ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_s=0.2\%/min$ ）による応力-ひずみ関係を示してある。不飽和時の応力-ひずみ関係は飽和時のそれより同一軸ひずみにおいてより大きな偏差応力となっていること、この傾向は低拘束圧レベルほど顕著であることがわかる。また不飽和状態の方が体積変化特性の拘束圧依存性がやや強いようである。

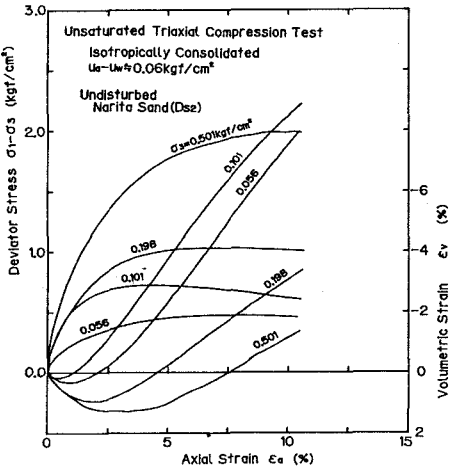


図-6 (a) 不飽和砂の応力-ひずみ関係
(成田砂、 $\sigma_3=0.05\sim0.50 \text{ kgf/cm}^2$)

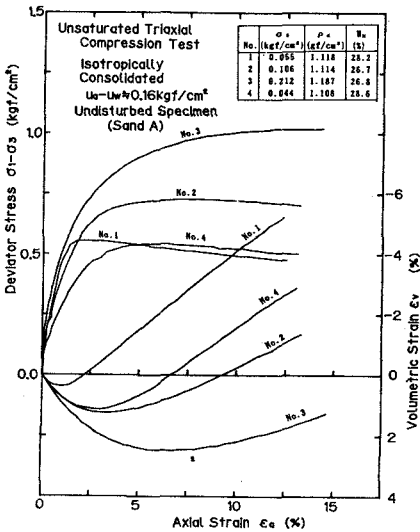


図-6 (b) 不飽和砂の応力-ひずみ関係
(A砂、 $\sigma_3=0.05\sim0.20 \text{ kgf/cm}^2$)

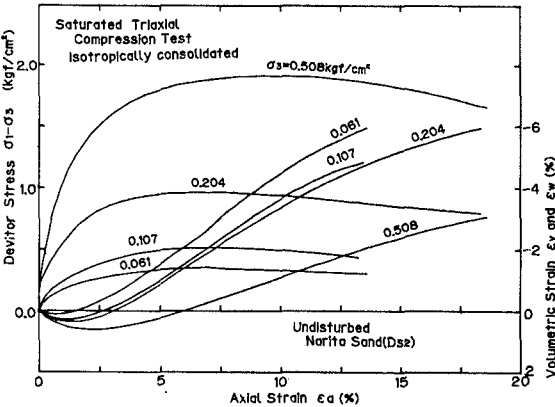


図-7 (a) 飽和砂の応力-ひずみ関係
(成田砂、 $\sigma_3=0.05\sim0.50 \text{ kgf/cm}^2$)

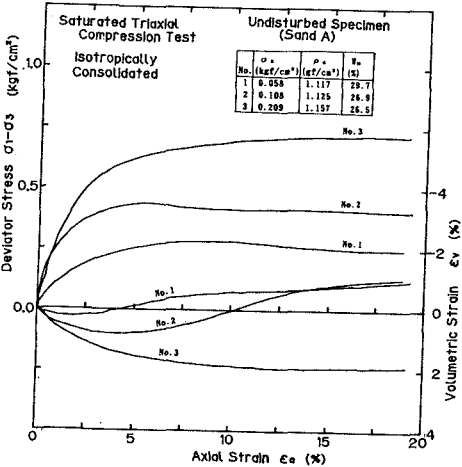


図-7 (b) 飽和砂の応力-ひずみ関係
(A砂、 $\sigma_3=0.05\sim0.20 \text{ kgf/cm}^2$)

4. 砂質土の粘着力について

図-8 (a) (b) には $\sigma_3=0.05\sim0.50\text{kgf/cm}^2$ の拘束圧領域における成田砂の不飽和・飽和状態での応力-ひずみ曲線の最大偏差応力 $(\sigma_1-\sigma_3)_{\max}$ より求めたMohrの応力円と、これらを直線近似して求めた強度パラメータを示してある。また図-9 (a) (b) には $\sigma_3=0.05\sim0.20\text{kgf/cm}^2$ の拘束圧領域におけるA砂の同様の関係を示してある。強度パラメータ c_{us} 、 c_s の添字US,Sはそれぞれ不飽和状態(Unsaturated)、飽和状態(Saturated) での値を示すものとする。これらの図からMohrの応力円から求めた強度パラメータのうち内部摩擦角は同じ拘束圧レベルであれば不飽和時・飽和時に関係なくほぼ同じと見て良いが ($\phi_{us}\approx\phi_s$: 低拘束圧レベルにある切羽付近では不飽和・飽和時の内部摩擦角の差があったとしても切羽の安定性にはほとんど関係なく無視できよう)、粘着力は不飽和時の方が飽和時よりかなり大きくなるのが分かる。この差は粒子間に作用するサクションによる圧縮力によるものであろう。不攪乱砂質土の粘着力は図-10に概念的に示すように二つの成分に分けられよう。

(1) 粒子の堆積構造や粒子間の固結作用による粘着成分 (Δc_{ce})

砂がある構造で堆積した後の長時間圧密(応力履歴効果)やこう結作用により粒子間が糊付けされて付加されたもので、砂が不攪乱状態で有している粘着力。

(2) サクションによる粘着力成分 (Δc_{suc})

不飽和状態時に粒子間に作用するサクションにより付加される粘着力成分で飽和時に消失する。

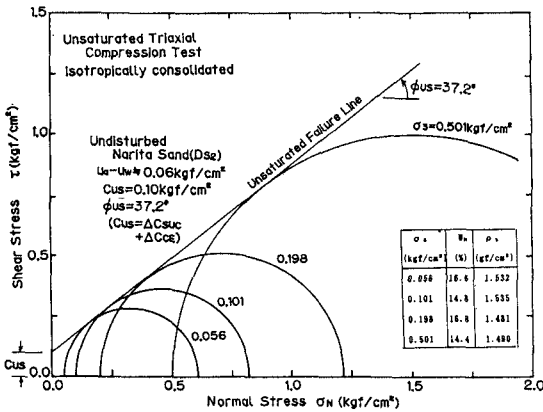


図-8 (a) Mohrの応力円 (不飽和成田砂)

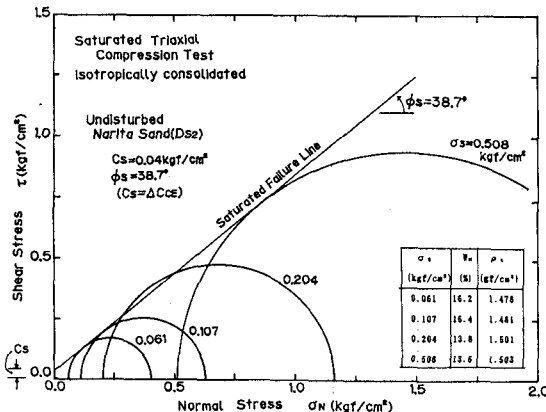


図-8 (b) Mohrの応力円 (飽和成田砂)

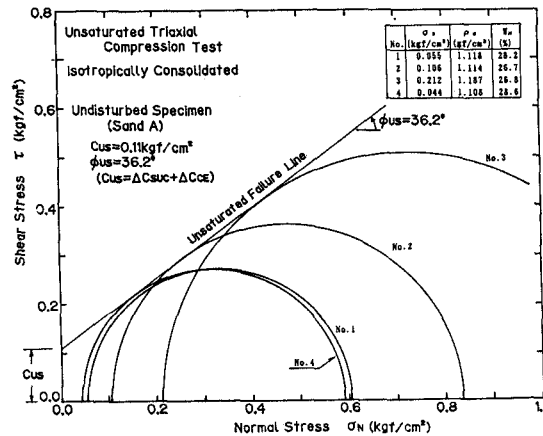


図-9 (a) Mohrの応力円 (不飽和A砂)

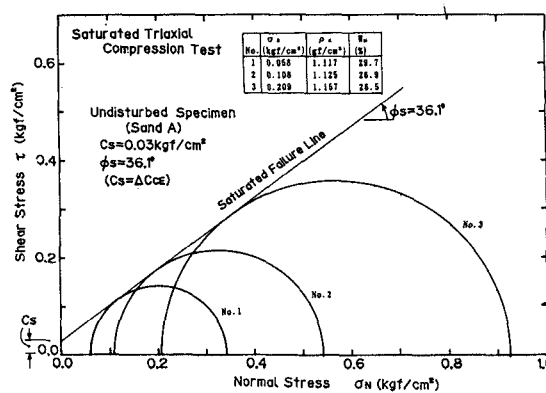


図-9 (b) Mohrの応力円 (飽和A砂)

これより飽和試験で得られる粘着力は

$$c_s = \Delta c_{ce}$$

であり、不飽和試験で得られる粘着力は

$$c_{us} = \Delta c_{ce} + \Delta c_{suc}$$

である。これらの図からわかるように不攪乱・不飽和砂質地山の粘着力は一般に小さく、ここで試験をした砂では $c_{us} \approx 0.1 \text{ kgf/cm}^2$ 程度である。またサクシジョンによる粘着力 Δc_{suc} はサクシジョンの大きいA砂の方が大きい、必ずしもサクシジョンに比例しているわけではなく粒径、粒子形状、細粒分含有量などに関係し

て決まるものと考えられる。いずれにせよ粘着力は非常に小さいものであるが、拘束圧レベルの低い切羽付近の安定性はこの粘着力が重要な役割をするので正確に評価することが重要である。原位置で対象となる拘束圧レベルより高いレベルの試験から得られたMohrの応力円の直線近似から粘着力を求めると内部摩擦角の拘束圧依存性により本来の粘着力を過大評価してしまう危険性があるので、試験時の拘束圧の設定にはより慎重な姿勢が要求されよう。

ここで注意が必要なのは現在の不攪乱試料の採取技術では採取時に粒子の堆積構造や粒子間の糊付け強度を部分的に破壊してしまうことは避けられず、試験を慎重に実施したとしてもその砂質土本来の Δc_{ce} を求めるのは難しく過小評価の可能性があるのである。

5. あとがき

砂質土の場合には不飽和時のサクシジョンが強度に大きな影響を及ぼす例は少ないが、本報告で扱った砂質地山トンネルの切羽の安定性の問題はこの1例である。特にこの例では対象とする拘束圧レベルが非常に低くかつもと小さい砂質土の粘着力を求めるために、低拘束圧レベルでの不飽和土の精度の高い試験法の確立が必要である。ここで実施した試験の拘束圧レベルは $\sigma_3 \approx 0.05 \text{ kgf/cm}^2$ までであるが、これ以下の拘束圧では供試体の自重、セル水位やゴムスリーブの拘束（補正しているものの確実なものではない）などによる供試体の応力分布の非一様性の影響が大きくなるようである。

参考文献

- 1) 福島伸二・川畑則雄・熊谷光雄・増田幸三：土被りの浅い軟弱地山トンネルにおける切羽安定化のための薬液注入の効果、土と基礎、Vol. 38, No. 12, pp47-52, 1990.
- 2) 福島伸二・香川和夫：砂質地山トンネルの切羽の安定解析法、トンネル工学研究発表会論文・報告集、第1巻、pp195-200, 1991.
- 3) Fukushima, S. and Tatsuoka, F.: Strength and Deformation Characteristics of Saturated Sand at Extremely Low Pressure, Soils and Foundations, Vol. 24, No. 4, pp30-48, 1984.

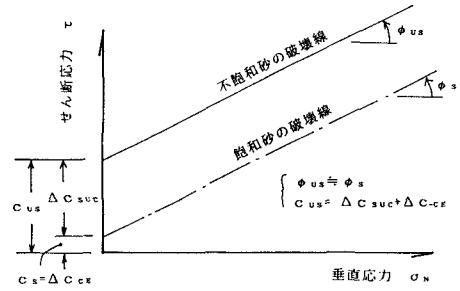


図-10 不攪乱砂の粘着力（概念図）