

砂質土における含水状態の変化に伴う 剪断強度の変化について

丸 井 英 明・小 橋 澄 治

On the variation of shear strength with the
variation of water content for sandy soil

Hideaki MARUI, Sumiji KOBASHI

要 旨

斜面の安定問題を考える場合、特に表層崩壊においては、土層が不飽和の状態から、降雨によって多量に水を含んだ状態、とりわけ飽和状態に達した時に、その剪断強度が、低下することが重要な問題点であると考えられる。そのような観点から、土の剪断強度が土中の含水状態によってどのように異なるのかを調べるために幾つかの基礎的な実験を行ってきた。本報においては以下の諸点について考察を行った結果を述べる。

- (1) 砂質土のモデルとしてガラス・ビーズを用いて剪断試験を行ない、含水状態の変化に伴う剪断強度の変化の定性的な傾向を明らかにした。
- (2) 表層崩壊を想定した低い垂直応力の下で標準砂の剪断試験を行ない、低い垂直応力の下では、不飽和の状態から飽和の状態に変化することにより剪断強度（主として見掛けの粘着力成分）は顕著な低下を示すことを検証した。
- (3) 発生頻度の高い、表層崩壊を想定して、適当なすべり面を仮定し、土の剪断強度を何段階か変えて安全率の試算を行った。その結果は、土層が不飽和から飽和の状態に変化することにより、(2)で検証された見掛けの粘着力成分の低下が安全率の低下に大きく効いていることを示している。

は じ め に

前報においては、土が不飽和から飽和の状態に変化することによる剪断強度の変化を正確に調べるために、標準砂を用いて単純剪断試験機により繰り返し剪断試験を行った結果を述べた。試験結果から、同一の粒子配列で弾性状態にある砂において、不飽和の状態から注水によって飽和の状態に変化することによる剪断強度の低下を検証した。このような場合に、土中水分が土の剪断強度に影響を及ぼすのは、不飽和の状態で土粒子の接点に付着している毛管水が、その表面張力に起因する凝集力によって土粒子相互を引きつける働きをしており、それは一種の拘束圧であって剪断に際しては垂直応力と同じ働きをするためであることを述べた。そのような力のことを

水因垂直応力と称したわけであるが、ここではより一般的な、土質力学において使用されている用語を用いることとし、第1節において若干の用語の説明を行った。

本報では、さらに幾つかの実験に基づき、砂質土を対象として含水量の変化に伴う剪断強度の変化について考察を行っている。第2節においては、砂質土のモデルとしてのガラス・ビーズの剪断試験結果の考察を行ない、第3節では低い垂直応力の下での標準砂の剪断試験結果の考察を行っている。また、第4節においては、表層崩壊を想定した斜面の安定に関して、土層が不飽和から飽和の状態に変化することによる剪断強度の低下量が、どの程度安全率の低下に効いてくるかについて試算を行っている。

1. 毛管水の表面張力に関連した幾つかの用語について

前報で水因垂直応力と称した力に相当する、土が不飽和の状態にある時に有効応力を増加させるような力に関して、1960年に開催された英国土質工学会の間隙水圧とサクションに関する会議においては次のような用語が提案されている。²⁾

Pressure deficiency in the pore water (間隙水における圧力の欠損) —— 不飽和土における(土中の空気圧に対する)間隙水の圧力の欠損。 $P^* - U_a = U_w$ と表わされる。

Soil Moisture Tension (土中水分張力) —— Pressure deficiency と平衡状態にある自由水柱の高さ $h = P^*/r_w = (u_a - u_w)/r_w$ と表わされ、 $pF = \log_{10} h$ (h はcm)という用語が有用である。

Suction (吸引力) —— 様々な意味を持っているが土質力学においては特定の定義でのみ使用されるべきであるとされ、 P^* 或は $u_a - u_w$ と等価である。

AICHISON の論文では、^{3), 4)}土-水系に適用される suction という用語は土中水のある部分における pressure deficiency 或は moisture tension の存在を意味するとされ、pressure deficiency in the soil water が少なくとも定性的には negative pore-water pressure (負の間隙水圧)と同じものを表わしており、両者共に土に作用する有効応力に対して正の貢献をすると述べている。また、pressure deficiency (or suction or soil moisture tension) と pore pressure との間の重要な差異について、pore pressure は土の断面の全面積に対して作用する応力であり、pressure deficiency は間隙水の占める面積の部分にだけ作用するものであることを述べている。

本報においては水因垂直応力に代えて negative pore-water pressure という用語を用いることにする。以後特に注釈をつけずに「負の間隙水圧」と書いた場合、それは不飽和の状態での土粒子接点に付着した毛管水の表面張力に起因する凝集力であって、有効応力を増加させるような力を意味している。

2. ガラス・ビーズの剪断

含水状態を変えて剪断強度を測定する際に、粒子形状の不規則性の影響を除くためと、粒径を適宜に変えて粒径の大小の及ぼす影響を見ることを意図して(今回の実験条件の下では差は見られなかった)、砂質土の理想化したモデルとしてガラス・ビーズを用いた。その粒径加積曲線は図1に示すものであり、標準砂の粒径の前後の大, 中, 小3種類のものを使用した。

実験条件としては、試験機の構造上の制約から、垂直応力は $0.3\text{kg/cm}^2 \sim 1.5\text{kg/cm}^2$ の範囲と

し、試料の密度はその様な垂直応力の下では或る程度高くせざるを得ないことと、又高密度である方が実験値のパラッキが少ないという理由で相対密度が0.9ないしは0.8のかなり高い密度とした。

含水状態の変化に伴う剪断強度の変化を調べるために、含水量を何段階か変えた試料で剪断試験を行った。図2は単純剪断試験機を用いて垂直応力 σ が 1.5kg/cm^2 、試料の相対密度0.9の条件下で試験した時の剪断強度 τ と飽和度 S_r との関係を示したものである。剪断強度は絶乾で最小

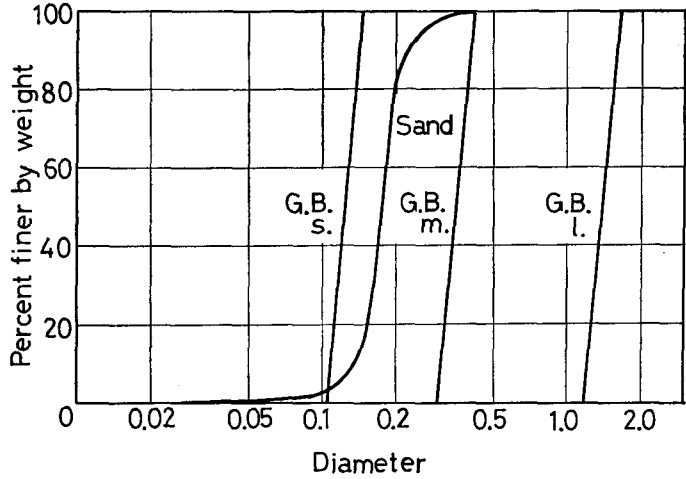


Fig. 1. Particle size distribution curve for Toyoura standard sand and glass ballotini

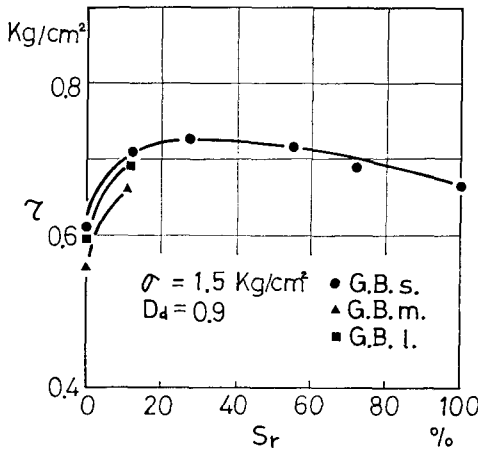


Fig. 2. The variation of shear strength with the variation of water content for glass ballotini (by simple shear test)

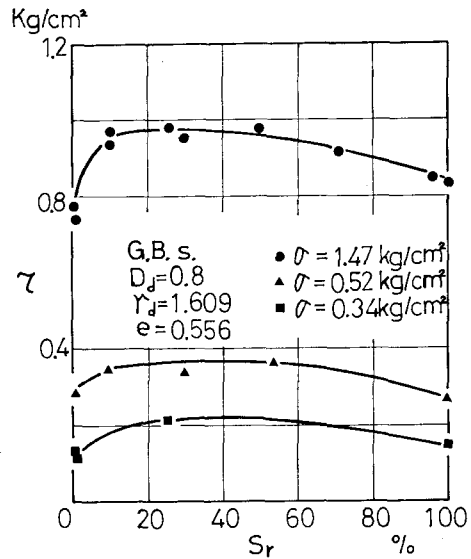


Fig. 3. The variation of shear strength with the variation of water content for glass ballotini (by direct shear test)

で、少し含水量が増えると徐々に下って行くのだらかな上に凸な曲線状の分布となっている。小粒径のガラス・ビーズについては絶乾から飽和までの種々の含水状態について試験しているが、中粒径、大粒径のものでは幾ら水を供給しても、接点に水を保持し得ない限界の含水量が存在する。しかし、乾燥状態から飽和度 $S_r=10\%$ 程度までの剪断強度の増加は、粒径の大小にかかわらずほぼ同程度であり、この実験条件の下では粒径の大小による影響を見ることは出来なかった。図3は改良型一面剪断試験機(三笠式)を用いて小粒径のガラス・ビーズを剪断した結果であり、試料の相対密度は0.8とし、3段階の垂直応力 $\sigma=1.74\text{kg/cm}^2$ 、 $\sigma=0.62\text{kg/cm}^2$ 、 $\sigma=0.34\text{kg/cm}^2$ の下での剪断強度と飽和度 S_r の関係を示したものである。図2と比較すると剪断強度の絶

対値はかなり高く出ているが、含水量の変化に伴う剪断強度の変化の分布形状は単純剪断の場合と同様であり、試験機の差異による影響は傾向的なものについてはないようである。又、垂直応力を3段階に変えているが、このような範囲では垂直応力の大小によらず、変化の傾向は同じようである。いずれにせよこのような比較的高い垂直応力の下では、含水量の変化に伴う最大強度と最小強度の差はわづかであって、実用上はほとんど問題とはならない。

図4は小粒径のガラス・ビーズについて、密度一定（相対密度0.9）の状態にて絶乾、飽和度 $S_r = 11.7\%$ 、飽和の3段階の水分条件の下での剪断強度を比較したものである。

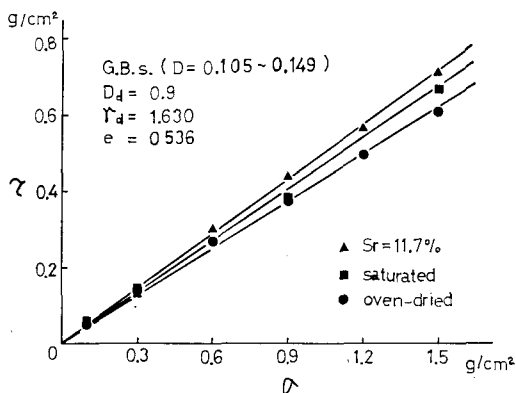


Fig. 4. Results of simple shear tests on small glass ballotini

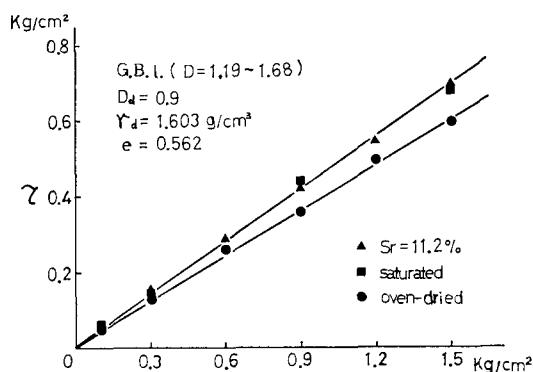


Fig. 5. Results of simple shear tests on large glass ballotini

このような垂直応力の範囲の下での試験では、どのような水分条件の下でも、やはり見掛けの粘着力成分 C はほとんど零であり、含水状態の相違によって内部摩擦角 ϕ が変化しているが、その変化量は極くわづかであり、ガラス・ビーズの場合よりも不明瞭な結果となっている。

ところで、前報で記した繰り返し剪断試験の結果では、同程度の垂直応力の範囲の下で、不飽和の時と飽和の時とでは、粒子間摩擦角 ϕ の変化も若干出ているが、負の間隙水圧による有効応力の増加分が減少した事による見掛けの粘着力成分 C の落ちが明瞭に出ている。この原因としては、繰り返しをしない通常の剪断試験においては水が土粒子集団の中で極めて不均質に偏在し、局部的に多く付着したり、又ほとんど付着していない部分が出来たりするため、全体として發揮される負の間隙水圧が小さく、それに対して繰り返し剪断の場合は、何度も剪断を繰り返すことによって水が粒子接点に均等に付着するようになるために全体的に負の間隙水圧がかなり効いてく

$= 11.7\%$ 、飽和の3段階の水分条件の下での剪断強度を比較したものである。水分条件の如何にかかわらず見掛けの粘着力成分 C は零であり、含水状態の変化に伴う強度の変化は若干の内部摩擦角 ϕ の変化 ($2 \sim 3^\circ$) として現われており、絶乾時が小さく、飽和度 11.7% の時が大きく、飽和の時はその間に来ている。図5は大粒径のガラス・ビーズについての同様の試験結果である。この場合は飽和度 $S_r = 11.2\%$ の時と飽和の時と同程度の内部摩擦角 ϕ であり、絶乾の時は小さくなっている。先の小粒径のガラス・ビーズの場合と同様、この場合も不飽和状態であっても見掛けの粘着力成分 C は出でず内部摩擦角 ϕ がわづかに変化しているだけである。この様に比較的高い垂直応力の下では、負の間隙水圧による有効応力の増加というものが実際問題としてほとんど効いてこないようである。又、そのような内部摩擦角 ϕ の変化は水が粒子接点に付着した事によって接点での粒子間摩擦の性状が変化したためであると考えられる。

標準砂における剪断試験結果でも、

ることによると考えられるが決定的な事は不明である。

3. 低垂直応力下における標準砂の剪断試験

前節に述べたように、通常剪断試験を行なう際の比較的高い垂直応力の下では、不飽和の状態での負の間隙水圧による有効応力の増加は剪断強度にほとんど影響を及ぼさず、含水状態の変化に判う剪断強度の変化はわずかであり、実際の斜面の安定問題にはほとんど効いてこないと思われる。これに反して、表層崩壊を考えた場合には、その深度は数十cmから1m程度の事が多く、その場合の土被り圧に見合う垂直応力としては数十gから百数十g程度の低い範囲となる。そのような低い垂直応力の下では、不飽和の状態では負の間隙水圧による有効応力の増加が相当程度効いてくるであろうと考えられる。一方土の密度については、崩壊が多発しているような斜面の表層での密度は緩いことが多い。そこで、数十g程度の低い垂直応力の下で、出来るだけ緩い密度で、標準砂の剪断試験を行った。この試験には、サンプラー径が30cmの大きさの試作した中型一面剪断試験機を用いている。

図6は何段階かの垂直応力の下での剪断強度 τ と飽和度 S_r との関係を示したものである。剪断強度は乾燥時と飽和時で小さく飽和度 $S_r=40\%$ 付近で最大値を取る上に凸な曲線状の分布となっている。このような低い垂直応力の下では含水状態の変化に伴う剪断強度の変化量は相対的に大きい。

図7は乾燥密度 $\gamma_d=1.46\text{ g/cm}^3$ で、 80 g/cm^2 程度の範囲までの垂直応力の下での試験結果であり、気乾時(飽和度 $S_r=0.6\%$)と、最も剪断強度の高い付近である飽和度 $S_r=42.7\%$ の時と、飽和時の三段階の水分条件の下での剪断強度を比較したものである。飽和度 42.7% の時と、乾燥時或は飽和時とでは顕著な強度の低下を示している。内部摩擦角 ϕ は乾燥時の場合はわずかに低くなっているが、飽和度 42.7% の時と飽和の場合とでは ϕ はほとんど変化していない。この場合飽和による剪断強度の顕著な低下はほとんど見掛けの粘着力成分Cがなくなることによっている。飽和の時については、図中には全応力で考えた場合と、静水圧分の間隙水圧を考慮した場合との両方の場合を表示してあるが、静水圧分の間隙水圧を考慮しても、なお大きく見掛けの粘着力成分Cが低下しており、その分が負の間隙水圧による有効応力の増加分であると考えられる。

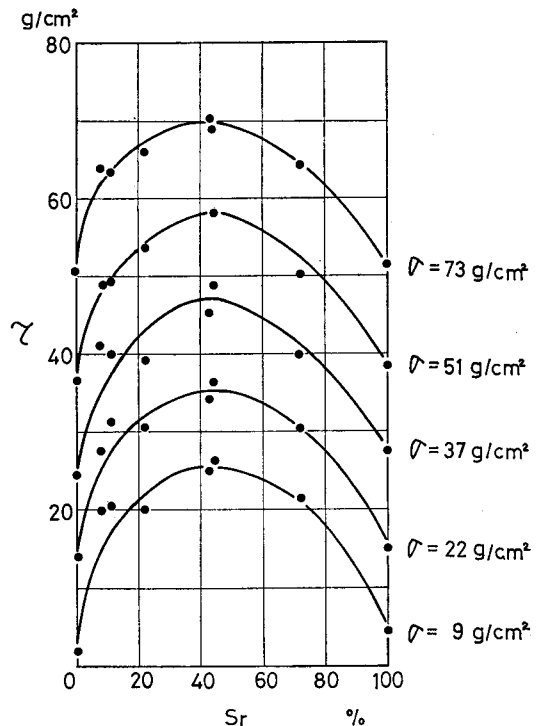


Fig. 6. The variation of shear strength with the variation of water content for Toyoura standard sand.

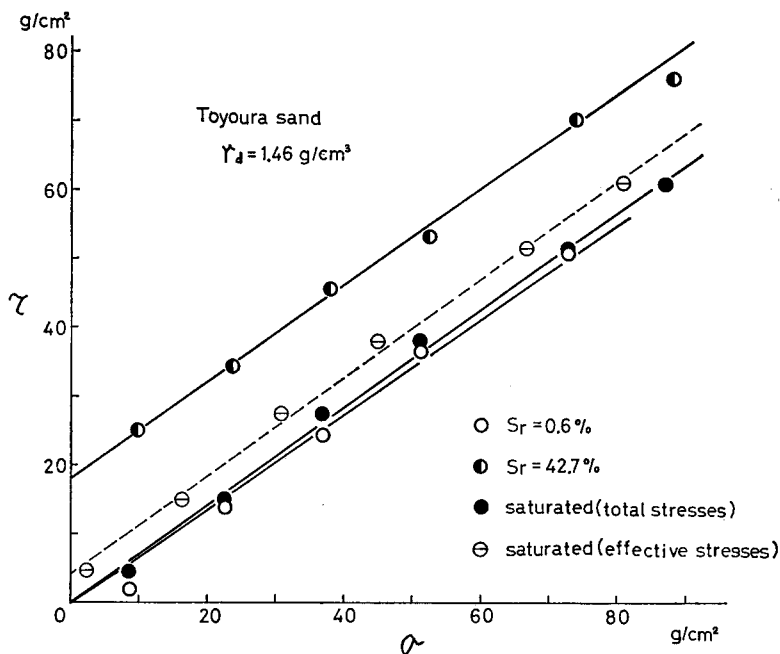


Fig. 7. Results of direct shear tests on Toyoura standard sand.

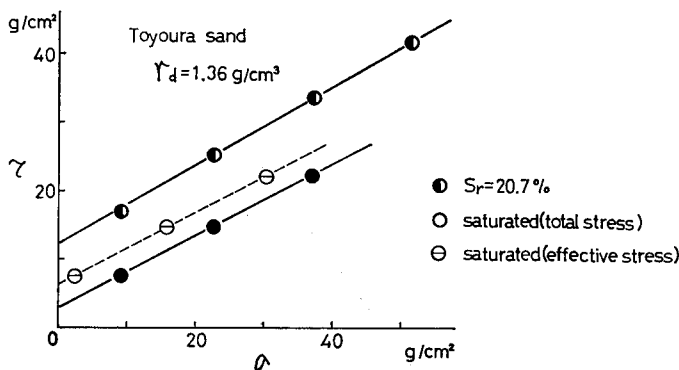


Fig. 8. Results of direct shear tests on Toyoura standard sand.

図8は乾燥密度 $\gamma_d = 1.36 \text{ g/cm}^3$ の時の試験結果である。低密度であるので、上載荷重は小さい範囲に限られている。飽和度 $S_r = 20.7\%$ の時と飽和の時の剪断強度を比較したものである。この場合もやはり剪断強度は顕著な低下を示している。飽和の時は内部摩擦角 τ が $1.5 \sim 2^\circ$ 小さくてよっているが大部分は見掛けの粘着力成分 C の低下

である。この場合も飽和時は全応力の場合と、静水圧分の有効応力を考慮した場合との両方の場合について表示しているが、それを考慮に入れても粘着力成分はさらに大きく低下している。

なお、実験手法上の問題として、飽和度の異なる試料を作成する場合、粗粒土では密度を一定にすれば含水状態の如何にかかわらず形成される構造に差異はないという前提に立っている。今回の実験では乾燥密度 1.46 g/cm^3 の場合の飽和状態の試料を作成する際には当初から水と砂とを混合したものをサンプラーに流し込んで所定の密度としており、一方乾燥密度 1.36 g/cm^3 の場合の飽和状態の試料を作成する際には当初飽和度 20.7% の状態で所定の密度にした後に注水して飽和状態にしており、この場合は不飽和の場合と飽和の場合との構造の差はほとんどないものと考えられる、図7、8の両方の場合の試験結果から見れば、両者とも不飽和から飽和状態へ変わることによる剪断強度の低下は明瞭に出ていることから、どちらの方法でもほぼ同様の構造であったと考えられる。それ故砂質土の場合には密度を一定にすれば含水状態にかかわらず形成される構

造にそれ程差違はないと考えてもよいように思われる。

今回はサクシヨンの測定を行っていないが、宇野の標準砂における測定例を参照すると、乾燥密度 $r_d = 1.6 \text{ g/cm}^3$ の時、飽和度30%程度でサクシヨンは 50 g/cm^2 程度であり、垂直応力が $0.3 \sim 1.5 \text{ kg/cm}$ の範囲では負の間隙水圧としてほとんど影響を及ぼさないのは当然であると考えられる。又、乾燥密度 1.5 g/cm^3 の時、飽和度40%程度でサクシヨンは 30 g/cm^2 程度となっており、今回行った数十g程度の垂直応力の範囲では十分に効いてくることになり、実験値の不飽和時と飽和時との差を負の間隙水圧による有効応力の増加分と考えた場合オーダー的に合っていることから、そのような解釈が妥当であると考えられる。

4. 表層崩壊を想定した安全率の試算

斜面の安定問題を考える場合、大規模な崩壊に関しては、土中深部での土の剪断強度が問題となり、そのような高い垂直応力の下では含水状態の変化による剪断強度の変化は実際問題としてはほとんど問題にならない。これに反して、表層崩壊に関しては、その規模は発生頻度の高いものではすべり深さが1mないしはそれより浅い場合が多く、そのような低い垂直応力の下では、前節で述べたように含水状態の変化による剪断強度の変化は顕著である。そこで本節では、表層崩壊の場合について、土層が不飽和から飽和の状態へ変化した場合、その剪断強度の低下がどの程度安全率を低下せしめることになるかを見るために試算を行った。

前節で述べた標準砂の剪断試験の結果では、不飽和から飽和の状態になった時の強度の低下は、実際問題として ϕ の値の低下はわづかほとんど問題とならず、大部時見掛けの粘着力成分Cの低下であった。その低下量については、乾燥密度 $r_d = 1.46$ の場合、飽和度 $S_r = 42.7\%$ の時と飽和の時とでは、見掛けの粘着力Cは 18 g/cm^2 から0に落ち乾燥密度 $r_d = 1.36$ の場合、飽和度 $S_r = 20.7\%$ の時と飽和の時とでは 12 g/cm^2 から 3 g/cm^2 に落ちるといった結果であった。標準砂は粒度分布の巾が極端に狭い特殊な土であって山腹の自然斜面の土とは大いに異なるので、一例としてマサ土による試験結果(塩野による)を示す。

図9に見られるように、乾燥密度 $r_d = 1.4 \text{ g/cm}^3$ の場合、飽和度 $S_r = 24\%$ の時見掛けの粘着力成分Cは 75 g/cm^2 から 30 g/cm^2 に落ちている。現場の土の強度は、場所毎に異なり、それぞれの土の物性の相違によって飽和による見掛けの粘着力成分Cの落ち時による

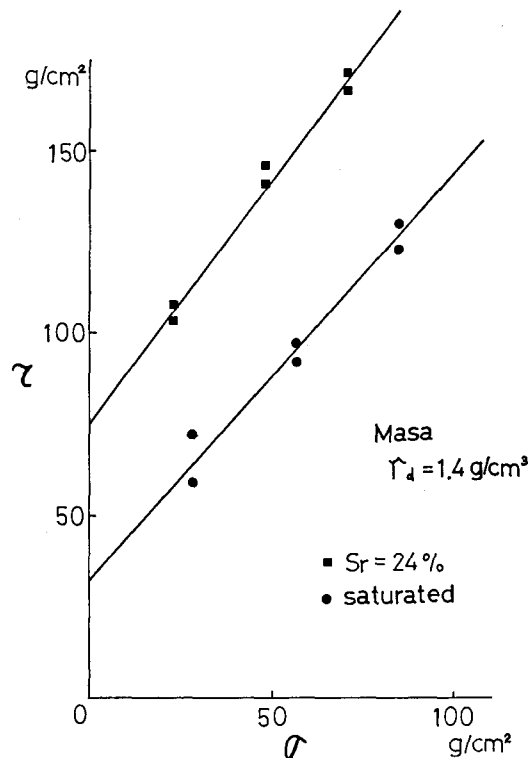


Fig. 9. Results of direct shear tests on Masa

剪断強度の低下率は異なると思われるが、今そのような場所的な差異はさておくとすれば、目安としては例えばマサ土斜面においては、不飽和状態では数十gから百g程度の見掛けの粘着力成分Cがあり、飽和状態になれば半分以下に落ちると考えてもよからう。

以上の事を前提として、安全率試算のための計算条件は次のようなものとした。安定解析の方法としては円弧すべり面を仮定した分割法を用いた。表層崩壊の長さを10mと仮定し、すべり面の最大深さを1m、75cm、50cm、25cmの4段階に仮定した。土の剪断強度に関しては、内部摩擦角 τ は一般に自然の土の取り得る範囲として $25^{\circ}\sim 40^{\circ}$ の間を 5° 刻みで4段階を、粘着力成分Cは $1\text{ t/m}^2(100\text{ g/cm}^2)$ 、 $0.5\text{ t/m}^2(50\text{ g/cm}^2)$ 、 $0.1\text{ t/m}^2(10\text{ g/cm}^2)$ 、0の4段階を仮定した。斜面勾配 θ は ϕ のそれぞれの値に対して内部摩擦角に対する安全率 $(\tan\phi/\tan\theta)$ が1から0.5までの範囲を0.1刻みで6段階の値を取るように定めた値を仮定した。土の密度は不飽和の時点で湿潤密度 $\gamma_t=1.4\text{ t/m}^3$ と仮定した。以上の計算条件の下で、それぞれの場合について不飽和の場合と、地表面まで飽和した時の間隙水圧を考慮した場合とについて計算を行った。以下その結果について考察する。

図10-1から図10-4は、ある定った内部摩擦角 ϕ と斜面勾配 θ の下での安全率とすべり面の最大深さとの関係を粘着力Cの段階別に表示したものである。図10-1は $\phi=25^{\circ}$ 、 $\theta=25^{\circ}$ ($F=\tan\phi/\tan\theta=1$)の時、10-2は $\phi=25^{\circ}$ 、 $\theta=43^{\circ}$ ($F=0.5$)の時、10-3は $\phi=40^{\circ}$ 、 $\theta=43^{\circ}$ ($F=1$)、10-4は $\phi=40^{\circ}$ 、 $\theta=$

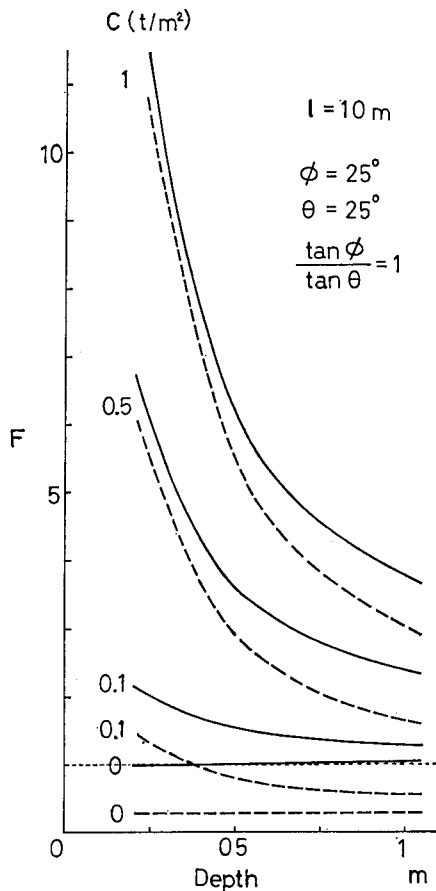


Fig. 10-1.

The relationship between the safety factor and the maximum depth of the slip surface.

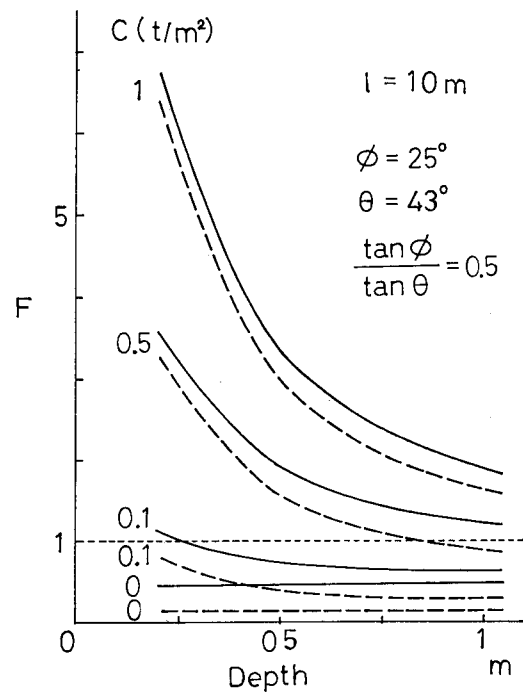


Fig. 10-2.

The relationship between the safety factor and the maximum depth of the slip surface.

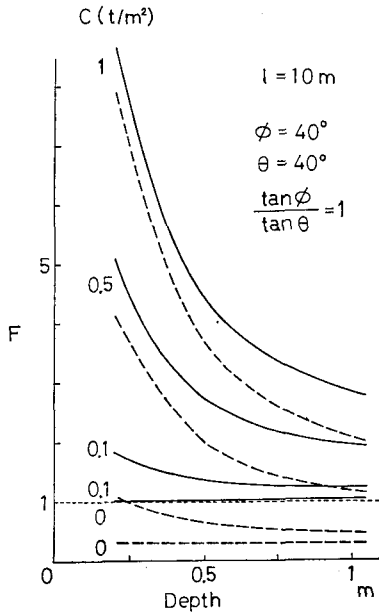


Fig. 10-3. The relationship between the safety factor and the maximum depth of the slip surface.

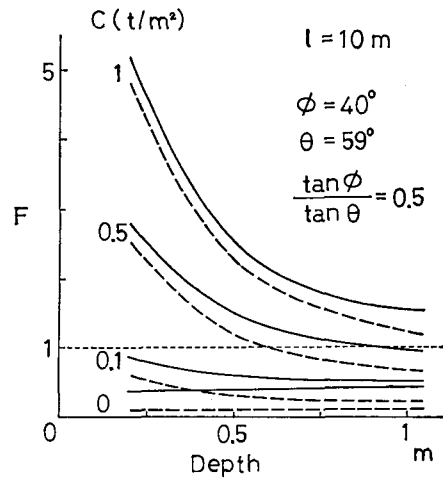


Fig. 10-4. The relationship between the safety factor and the maximum depth of the slip surface.

59.2. (F=0.5) の時の計算結果である。安全率は浅い所で急な増加を示している。いずれの場合においても、粘着力Cの減少によって安全率が大幅に低下することがわかる。飽和状態を考えると、間隙水圧を考慮しただけでは安全率の低下はそれ程でもないが、飽和に判って粘着力が半分以下になることにより安全率は相当程度落ちることになる。

図11-1, 2は、すべりの最大深さが0.5mの時のための、それぞれ $\phi = 25^\circ$, $\phi = 40^\circ$ の時について安全率Fと斜面勾配 θ の関係をCの段階別に表わしたものである。ある ϕ の値を持つ斜面

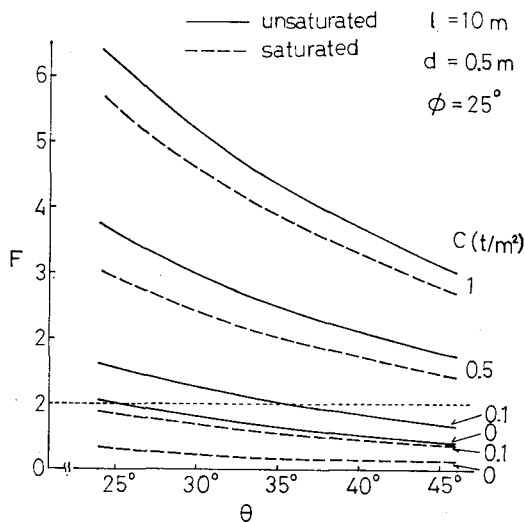


Fig. 11-1. The relationship between the safety factor and the slope angle.

面の安全率は斜面勾配が急になるにつれて低下して行く。この場合でも粘着力成分の減少が安全率の低下に大きく効いている。

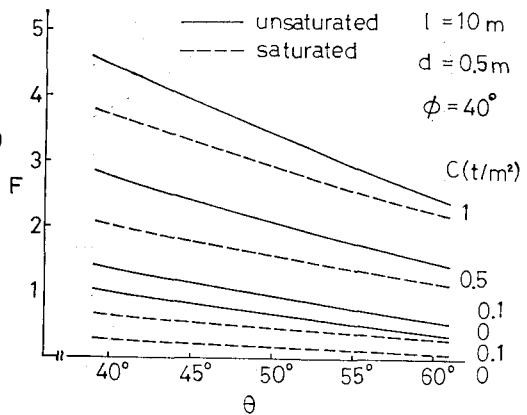


Fig. 11-2. The relationship between the safety factor and the slope angle.

図12-1, 2は, 最大すべり深さが0.5mの時についての, それぞれ $\theta = 40^\circ$ と, 45° の時について, 安全率 F とその斜面の土の有する ϕ との関係を C の段階別に表わしたものである。図で明らかのように, ある勾配 θ の斜面については, その斜面の土の内部摩擦角 ϕ が減少しても安全率

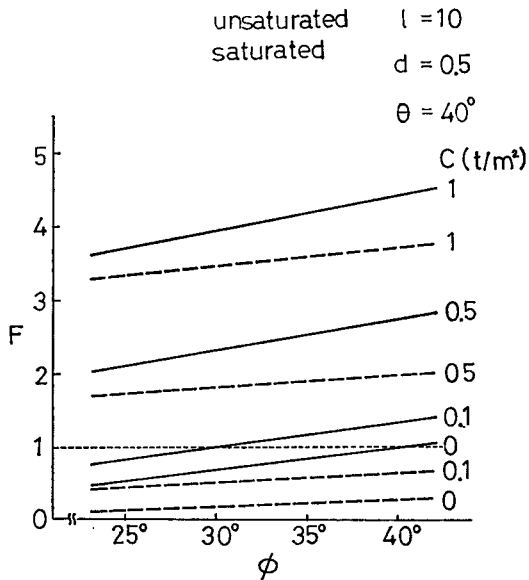


Fig. 12-1.
The relationship between the safety factor and the internal friction angle.

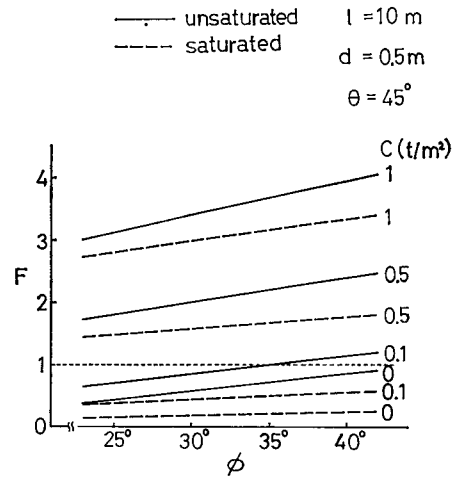


Fig. 12-2.
The relationship between the safety factor and the internal friction angle.

F の減少はわずかであり, 実用上は ϕ の変化は F にほとんど効いてこない。それに反して, C 成分が減少すれば安全率 F は大きく低下している。

試算結果から, 表層崩壊の場合においては, 土層が不飽和から飽和の状態に変わることによる見掛けの粘着力成分の低下が, 斜面の安定に対して極めて重要な要因であることが明らかになった。

おわりに

本報においては砂質土の含水状態の変化に判う剪断強度の変化を幾つかの実験によって明らかにしたが, サクシヨンの測定を行っていないので定量的な裏付けはなし得ていない。今後は種々の含水状態に対応するサクシヨンを測定することによって, 不飽和時における負の間隙水圧による有効応力の増加分の評価とそれに対応する剪断強度との定量的な関係付けを行って行く考えである。

最後に, 本研究を遂行するに当り御助言を頂いた武居有恒先生に感謝の意を表します。

引用文献

- 1) 丸井英明・佐々恭二・武居有恒：同一粒子配列の標準砂におけるせん断弾性係数, せん断強度と垂直応力, 水因垂直応力の関係, 京大演習林報告, 49号, 93~101, (1977)

- 2) Pore Pressure and Suction in Soils, Butterworths, 150, (1961)
- 3) ARCHISON G. D.: Relationships of Moisture Stress and Effective Stress Functions in Unsaturated Soils, Pore Pressure and Suction in Soils, Butterworths, 47~52, (1961)
- 4) G. D. ARCHISON: Some Preliminary Studies of Unsaturated Soils — (a) The Circumstances of Unsaturation in Soils with Particular Reference to the Australian Environment, Proc. 2nd Aust. N. Z. Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 173~190, (1956)
- 5) 宇野尚雄: 土の水分保持特性よりみた浸透と排水, 土と基礎, 21—8, 21~25 (1973)

Résumé

As concerns the stability of slope, especially shallow slips, it is considered to be very important that the shear strength decreases as the state of sand changes from the unsaturated to the saturated by rainfall. Therefore, we have performed some fundamental experiments to know how the shear strength changes with the water content in soil. We would like to state the outline of this study below.

- (1) We have performed shear tests on glass *ballotini* as a model of sandy soil, and we have found the clear qualitative tendency of the variation of shear strength with the variation of water content.
- (2) We performed shear tests on the Toyoura standard sand at such low normal stresses as in the case of shallow slips, and we have verified that the shear strength at the low normal stresses significantly decreases — mainly the component of the apparent cohesion decreases — with the change of the state of sand from the unsaturated to the saturated.
- (3) As concerns the case of shallow slips which often occur and being very disastrous in Japan, we have done the calculations of safety factor on their supposed slip surfaces for some shear strengths of soil. The results have demonstrated that the decrease of apparent cohesion studied in (2) has an influence on the decrease of safety factor.