

斜面の安定に関する総合的研究

—土の強度と間隙水の結合力—

広部良輔*・古谷 保**・中山 康***

国立防災科学技術センター

The Investigation of the Stability of Soil Slope

By

R. Hirobe, T. Furuya and Y. Nakayama

National Research Center for Disaster Prevention, Japan

Abstract

It is widely known that the landslides or the slope failures often arise at the time of a long rain or a heavy rain, and so it is possible to infer that the infiltration of rain into soil is an important factor for them, but the action of water is not evident.

In this study the strength of soils unsaturated and saturated with water is studied and the relation of water content to soil strength is explained and many factors in relation to soil strength, especially the effects of the surface tension of water, are studied and the theoretical equation is completed.

The shear strength of saturated soil with water is low, in unsaturated state the strength is high and the strength drops again in drier state.

The shear strength of unsaturated soil extraordinarily falls off on the decrease of the surface tension of water.

The rheological properties of soil show non-Newtonian viscosity in saturated state and come near to Newtonian viscosity on the decrease of water content.

If soil strength and infiltration rate are explained in relation to rain intensity, the failure of slope is foreseeable.

1. 緒 言

自然斜面の崩壊または変動が生じた場合について調査を行った際、その発生状況について我々がしばしば気付くことは、台風または長雨、集中豪雨など異常に雨量が増大した時期に発生件数が多いことである。広域的な気象条件との関連にも同じことが報告されている。この雨量と発生件数の関係の原因については、現在のところ明らかではないが、一般には降雨量が増大した結果、地中への浸透水が増加し、地下水位が上昇したためと言われている。地下水位の上昇により、通常水位よりも上位にある砂層を湿らし強度を低下させたり、あるいは

* 流動研究官（現在雪害実験研究所）

** 農業土木試験場造構部第4研究室研究員

*** 同所造構部第4研究室長

は粘土層を湿らしたりして斜面の変動を誘発するものと考えられている。降雨は地下水位を上昇させ、それが地層条件と密接に結びついて諸現象を発生させることは確かであるが、雨量の地下浸潤、表面流出、含有水分の上昇、死荷重の増大などの相互の定量的関係は明確にはなっていない。これらの個々の事象は異なった部門でかなり研究されており、たとえば降雨の地下浸潤は農業土木の土壌物理、土の強度は土質力学に属しているが、斜面の安定という土木地質の観点に立って総合的にとらえる研究はまだあまり進んでいない。さらに関連する研究としては、粘土鉱物、コロイド、粉体、材料工学など様々な分野があり、これらの研究の成果も総合的研究の中に組込まれねばならないであろう。

今回の総合的研究においては、土木地質、土壌物理、土質力学を相互に組合わせた方式によって、斜面の安定問題を取扱うことにする。このためには実験室試験、大規模モデル試験、現地試験を並行する必要があるが、この報文では実験室試験についてのみ報告する。この結果をもとにして、土木地質および土質工学の立場から、さらに研究を進展させる必要がある。

2. 実験装置および方法

2.1 試料

粒径 200μ の球状ガラス粒子および高純度ガラスを粉砕して作った粒子を用いた。図1に試料の粒度分布曲線を示す。試料は混酸に浸した後、純水で繰返し洗浄し乾燥した。

2.2 剪断試験

図2に示すような内径40mm、高さ60mmのプラスチック円筒の底に素焼板を取付け、素焼板を通して円筒内の水と下側の水が連結するようになっている。円筒は高さ30mmで上下に分離可能で、上側円筒を水平方向に移動して一面剪断ができる。上下円筒

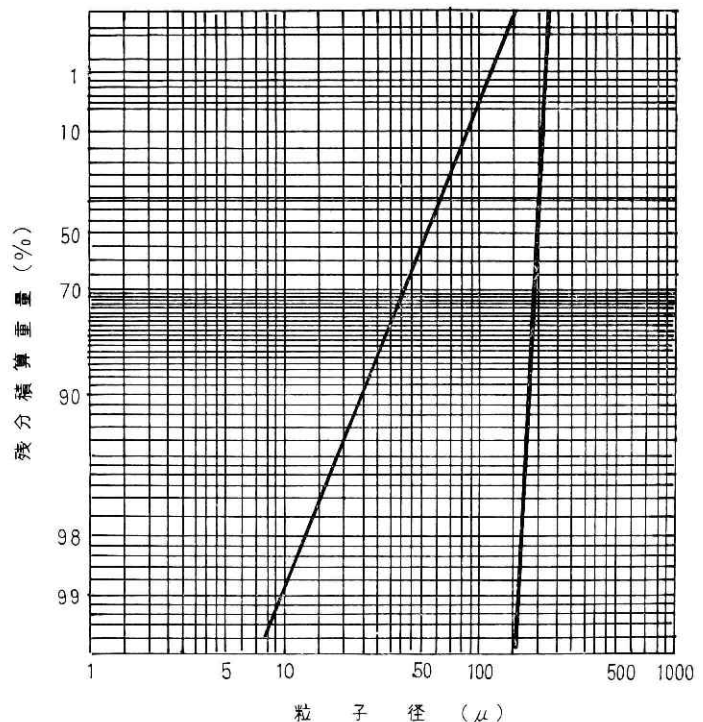


図1 試料の粒度分布曲線

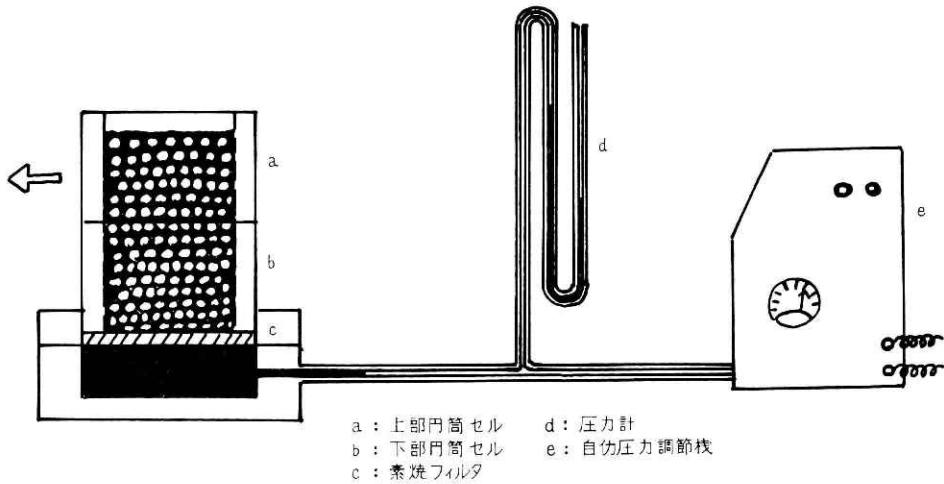


図 2 剪断試験および水分ポテンシャル調整装置

の継ぎ目をシールし水漏れを防いでから、円筒内に水を入れ、所定量の試料を加えて自然沈積させる。次いで円筒底の素焼板の下側から吸収法により種々の負圧を作用させ、沈積した試料の含有水分を変化させる。一定時間経過後、試料の含有水分が変化しなくなってから、上下円筒の継ぎ目のシールを取除き、水平方向に上側円筒を移動し、この時の抵抗力を剪断抵抗とした。垂直荷重は円筒内に入る円板を試料上におき、その上に重りを乗せた。この装置で重要なことは水温を一定に保つことであった。

2.3 貫入試験

含有水分を変化させた円筒内の試料について、ペネトロメータを用い直径 1 mmφ の針を 5 秒間貫入させ、貫入深さ $P(\text{mm})$ を求めた。レオロジー特性を知るため、種々の荷重を針に加えて貫入深さを測定した。

2.4 表面張力試験

協和 CBVP 型表面張力計を用い、水-アルコール溶液のアルコール濃度を変化させて、プレート法により表面張力を測定した。

2.5 ジータ電位の測定

光学式電気泳動法により、粒子の泳動速度 u を測定し、Helmholtz-Smoluchowski の式により計算によりジータ電位を求めた。

$$\zeta = (4 \pi \eta / D \cdot H_s) u \quad (1)$$

D は溶液の誘電率、 η は溶液の粘性係数、 H_s は電位勾配、電流を i 、溶液の比電導度を λ 、セル断面積を S_a とすると

$$H_s = i / (\lambda \cdot S_a) \quad (2)$$

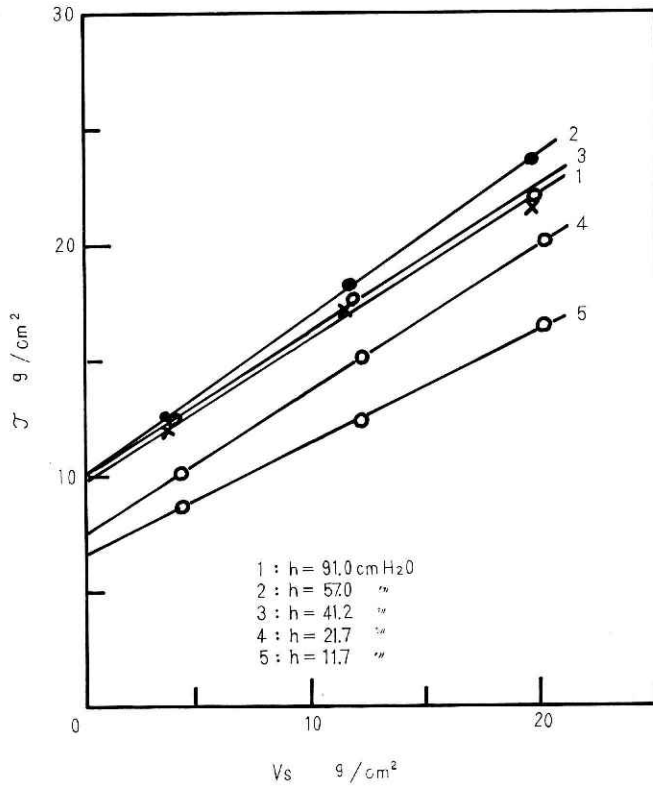


図3 200 μ 粒子の剪断抵抗 τ と垂直荷重 V_s の関係

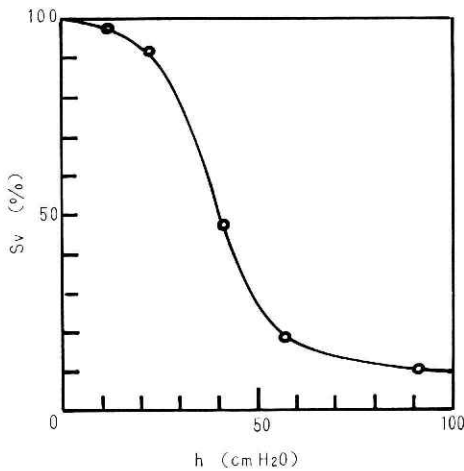


図4 200 μ 粒子の水分ポテンシャル h と含水率 S_v の関係

HCl および CaCl_2 を純水に加えた場合の試料のジータ電位を求めた。

3. 実験結果

3.1 剪断抵抗

3.1.1 含有水分との関係

粒径 200 μ の試料について、含有水分を変化させ剪断試験を行った結果を図3に示す。この場合の水分ポテンシャル h と含有水分 S_v との関係を図4に示す。水分が不飽和の時に剪断抵抗が大きくなることがわかる。150 μ の試料について垂直荷重を加えず自重のみとし、剪断試験を行った結果を図5の1に示す。中間領域での水分ポテンシャルの

時、剪断抵抗が大きくなっている。

3.1.2 水の表面張力との関係

エチルアルコールを 8 mol/l 加えた水溶液を使用した場合の剪断抵抗を図 5 の 2 に示す。中間領域での水分ポテンシヤルにおいて剪断抵抗は大きくはなるが、純水に比して遙かに小さい値を示すことがわかる。図 6 に -150μ 試料の水分ポテンシヤル h と含水率 S_v の関係を示す。アルコール水溶液ではカーブが下側にずれてくる。図 7 は水溶液中のアルコール濃度と水の表面張力の関係を示す。アルコール濃度の増大につれ表面張力は低下している。

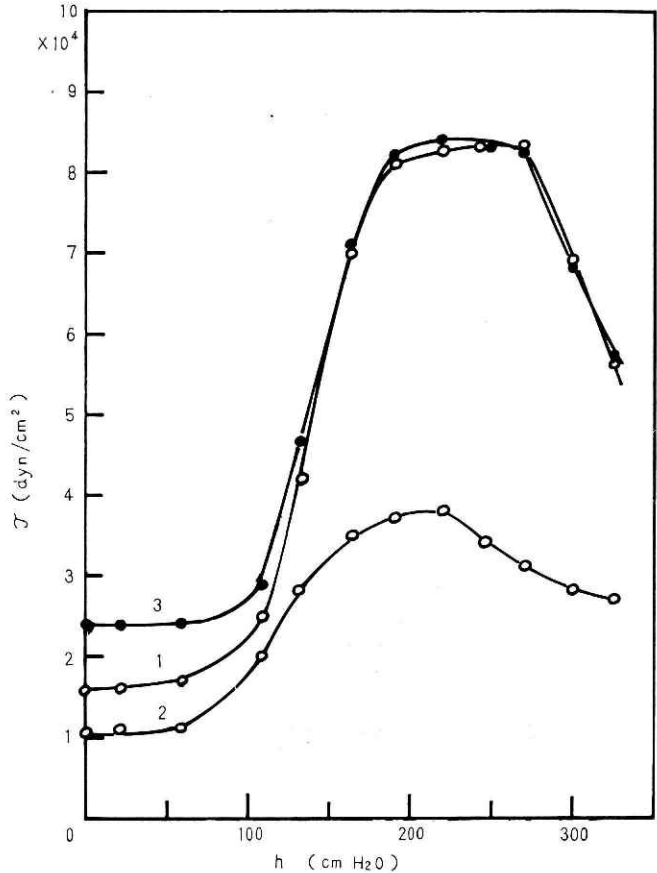


図 5 -150μ 粒子の水分ポテンシヤル h と剪断強度 τ の関係

3.1.3 ジータ電位との関係

CaCl_2 1 mol/l の水溶液を使用した場合の剪断抵抗を図 5 の 3 に示す。水分ポテンシヤルの小さい領域で多少純水に比して大きな値を示している。水分ポテンシヤルが大きくなるにつれ、その差は小さくなっている。図 8 に HCl と CaCl_2 濃度とジータ電位の関係を示す。濃度の増大につれジータ電位はゼロに近付いている。

3.2 貫入試験

3.2.1 含有水分との関係

-150μ 試料について含有水分を変化させて、貫入試験を行った結果を表 1 に

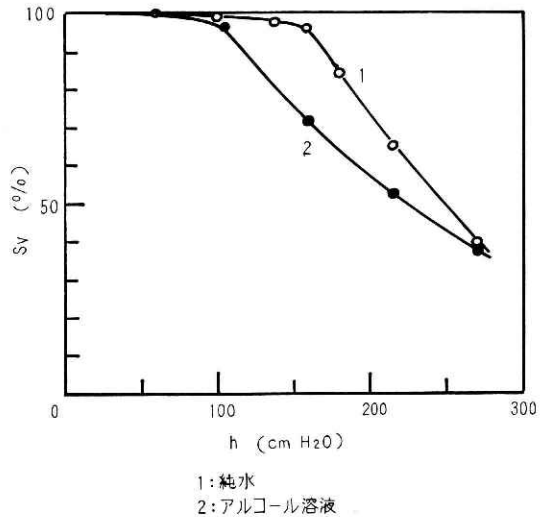


図 6 -150μ 粒子の水分ポテンシヤル h と含水率 S_v の関係
1: 純水
2: アルコール溶液

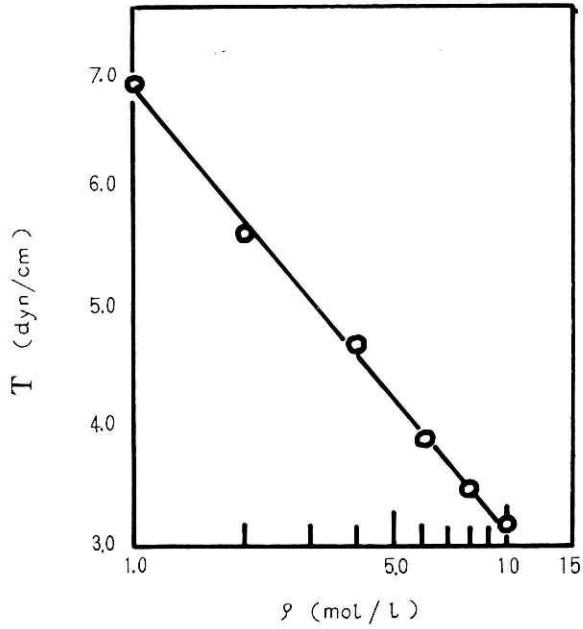


図7 アルコール濃度 ρ と水溶液の表面張力Tの関係

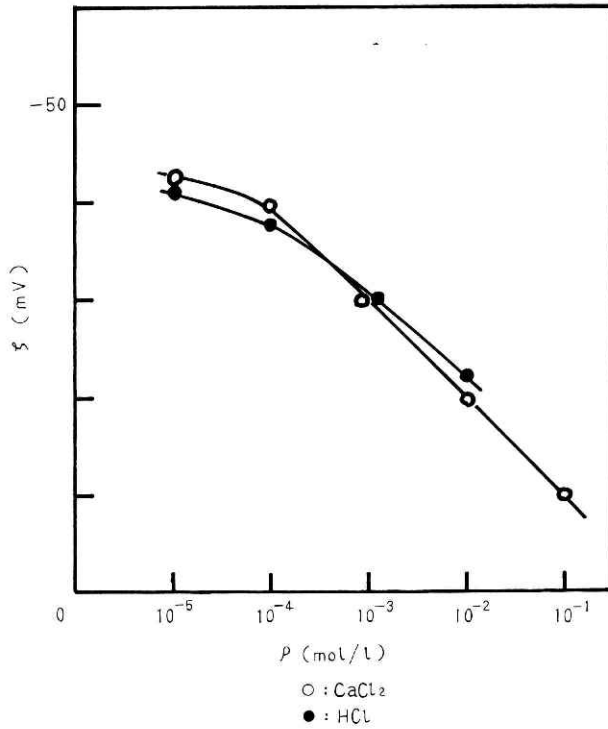


図8 試薬濃度 ρ と試料のジータ電位の関係

表 1 水分ポテンシャル h を変化した場合の垂直荷重 W と貫入度 P の関係

$h=136$ cm H ₂ O		$h=190$ cm H ₂ O		$h=245$ cm H ₂ O		$h=300$ cm H ₂ O	
(g) W	(mm) P	W	P	W	P	W	P
6	10.5	5	6.5	5	9.0	5	11.0
12	20.0	10	10.0	10	14.0	10	16.0
17	26.0	20	15.5	20	22.0	20	24.0
26	37.0	30	20.0	30	28.5	30	30.0
36	50.0	40	23.5	40	34.0	40	35.0
—	—	50	27.5	50	39.0	50	39.0

表 2 アルコール濃度 ρ を変化した場合の垂直荷重 W と貫入度 P の関係

$\rho=0$ mol/l		1.0 mol/l		4.0 mol/l		8.0 mol/l	
(g) W	(mm) P	W	P	W	P	W	P
5	6.5	5	10.0	6	18.0	6	28
10	10.0	10	15.5	12	27.0	12	42
20	15.5	20	22.0	17	33.0	16	50
30	20.0	30	30.0	26	42.0	22	59
40	23.5	40	35.0	—	—	26	65
50	27.5	50	40.0	—	—	36	78

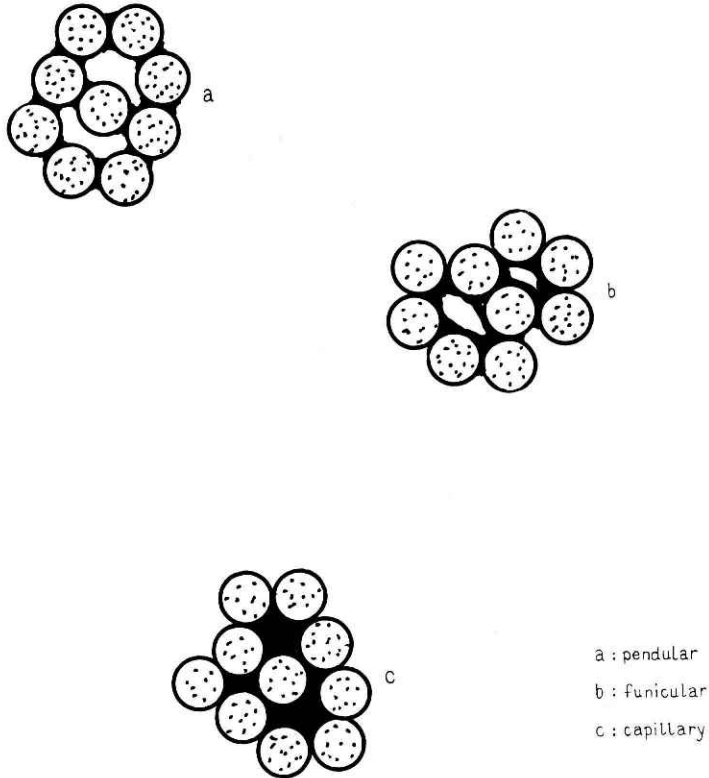


図 9 水を含んだ土粒子集合体の状態

示す.

3.2.2 表面張力との関係

水分ポテンシャルを 190 cm H₂O に一定に保ち、アルコール濃度を変化させ表面張力を変えた場合の結果を表 2 に示す.

4. 考 察

4.1 含有水分と剪断強度

4.1.1 含有水分と状態変化

Versluys (1917) によると土が含有する水分に応じて図9に示すような状態が発生し、それぞれ pendular state (懸垂相), funicular state (索紐相), capillary state (毛管相) と分類している。これらの相は含水率の増大につれ連続的に変化するものであるという。完全に乾燥した土と完全に水中に没した土の中間の状態を示しており、空気、水、固体粒子の3相より成っている。この不飽和状態の土の強度は複雑な要因が関与してくるものと思われる。気液界面エネルギーとしては水の表面張力が作用し、固液界面エネルギーとしては固体粒子の水和層や電気2重層が関係してくる。粒径が大きければ界面エネルギーは問題とはならぬ位に小さいが、粒径が小さくなると比表面積が大きくなり、界面エネルギーが粒子集団である土の強度に大きな影響を与えてくるようになる。通常の土の状態は大量の降雨がある雨季であっても、地下 20~30 cm 以下の深さでは、このような3相より成る不飽和状態になっていると考えられる。このことが実は人類の発生にも生存にも不可欠な重要な問題を包含しているのである。

4.1.2 土中の気泡圧

降雨の浸透により土の含有水分が上昇してくる過程では、土中の空気の逸散が充分でなく、気泡内の圧力は気圧よりも大きな値を示してくる。この場合の気泡圧は粒子間結合を弱めるように働き剪断抵抗を弱める結果を生じる。他方、水を飽和した土が日照により含有水分を蒸発して行く過程では、大気中の空気の侵入が充分でなく、funicular または pendular 状態の土は、気泡内の圧力を大気圧よりも小さくする。この場合は粒子間結合力を強める役割

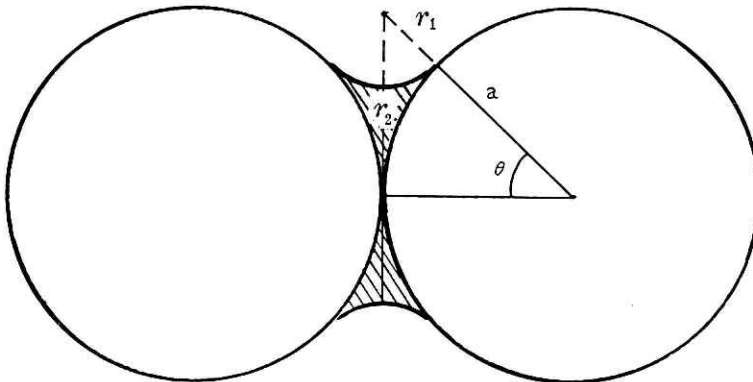


図 10 2つの粒子の接触点に形成される水リングの状態

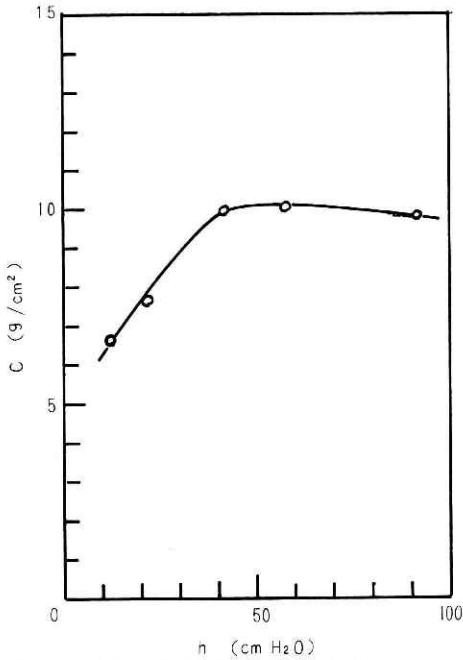


図 11 200 μ 粒子の粘着力 C と水分ポテンシャル h の関係

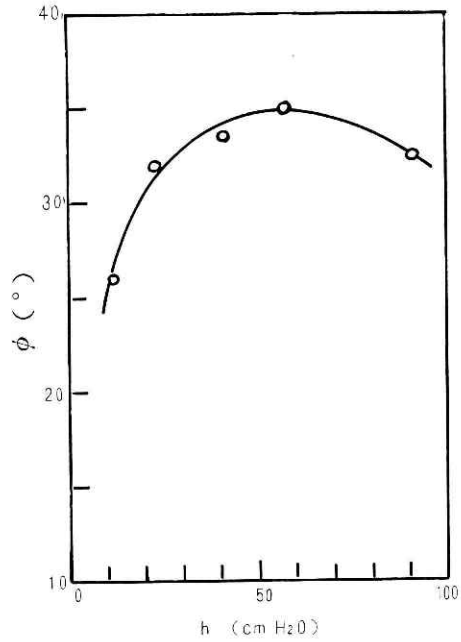


図 12 200 μ 粒子の内部摩擦角 φ と水分ポテンシャル h の関係

を果し、剪断抵抗も大きくなる。さらに蒸発や浸透がなかったとしても、土中の温度変化により、気泡圧は正負に変化し、剪断抵抗は大きくなったり小さくなったりするであろう。この研究では減圧下の状態についてのみ取扱っている。

4.1.3 含有水分とリング状水の形成

pendular 状態において二つの粒子の接触点に形成されるリング状の水は土の強度に重要な役割をはたしている。水の表面張力が粒子間結合力を強めるのに役立ち、リング状の水の量によっても結合力を変化させる。図 10 にこの状態を模式的に示すが、粒子間結合力に加算される力は (3) 式のようになる。

$$F = 2\pi a T / [1 + \tan(1/2)\theta] \quad (3)$$

F は結合力、 a は粒子半径、 T は水の表面張力、 θ は形成されたリング水の量により決まる中心角である。Baver (1972) の著書によると、図 10 における r_1, r_2 が分子サイズにまで小さくなると、(3) 式は当てはまらないという。また θ が大きくなり一つのリング水が隣りのリング水と合体するようになると当てはまらないとしている。funicular 状態では (3) 式は適用できない。水分が非常に大きくなったり、または非常に小さくなった場合には、水の表面張力の影響はなくなり、(3) 式を利用することはできない。図 3 および図 5 では (3) 式の適用限界を越えた含水率の極端に大きい所と小さい所も含めて試験を行っている。200 μ

粒子の剪断試験結果図3より Coulomb の式の粘着力Cと内部摩擦角 ϕ を求め図11および図12に示す。含有水分の変化により大きく変化していることがわかる。

広部(1971)によると剪断抵抗 τ と粒子間結合力Hの間には次の関係がある。

$$\tau = (3/2)(1-\varepsilon)/(\pi d^2) \cdot kH \quad (4)$$

ε は空隙率、 d は粒子径、 k は接触点の数である。Smith(1929)によると、空隙率 ε と接触点の数 k の間には次の関係がある。

$$\varepsilon \cdot k = 3.1 \quad (5)$$

(4)(5)式より

$$\tau = (3/2) \cdot \{(1-\varepsilon)/\pi d^2\} \cdot (3.1/\varepsilon)H \quad (6)$$

粒子間結合力を(3)式の F と荷重による摩擦力 P より成るとすると

$$H = F + P = 2\pi a T / [1 + \tan(1/2)\theta] + \mu \cdot \sigma \quad (7)$$

μ は粒子間の摩擦係数、 σ は粒子の接触点に働く荷重である。(6)および(7)から

$$\tau = 4.65 \{(1-\varepsilon)/\varepsilon\} \cdot (T/d) \cdot \{1/[1 + \tan(1/2)\theta]\} + 4.65 \{(1-\varepsilon)/\varepsilon\} \cdot \{\mu\sigma/\pi d^2\} \quad (8)$$

現実の降雨による斜面の崩壊などは、(3)式の限界付近での土の強度問題が重要になってくる。(3)式の θ および a からリング水の体積を求めることも可能であり、(8)式の粒子間の摩擦係数を実験的に求めことも可能である。(8)式は粒子間の結合力を含有水分と表面張力から求め、剪断抵抗値をうる理論式ということができよう。

4.1.3 水の表面張力

含有水分が一定であっても表面張力が変化すると土の強度は変化することが、(3)および(8)式よりわかるが、図5の2ではアルコールにより表面張力を弱めて剪断試験を行っている。この結果からわかるように、土の強度が非常に大きくなる中間領域の含水率の所で、剪断強度の低下が大きく、水の表面張力が土の強度を支える重要な要因になっていることがわかる。

4.1.4 電気2重層

図5の3に示すように、 CaCl_2 1 mol/l の溶液中での剪断抵抗は、水分ポテンシャルの小さい所で純水中の剪断抵抗より多少大きくなるが、水分ポテンシャルが大きくなるにつれ大差はなくなっている。図8のジータ電位曲線よりわかるように、 CaCl_2 濃度の大きい所では電位がゼロに近付き、電気2重層が収縮している。Verwey-Overbeek(1948)の理論によると、粒子間のVan der Waals引力と電気2重層の斥力の相互作用により結合力が決まってくるが、この関係は含水率の大きい所で出現し、含水率の小さい所では、ほとんど作用しないことがわかる。

4.2 レオロジー特性

4.2.1 粘性の特質

従来土の強度を測定する簡易法として、また道路の耐荷試験としてのCBR法として貫入

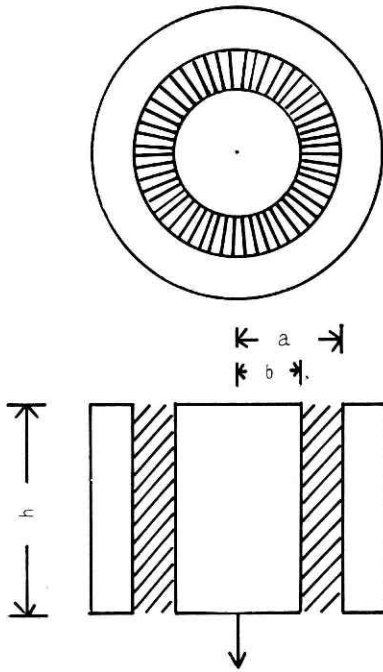


図 13 共軸円筒粘度計の断面図

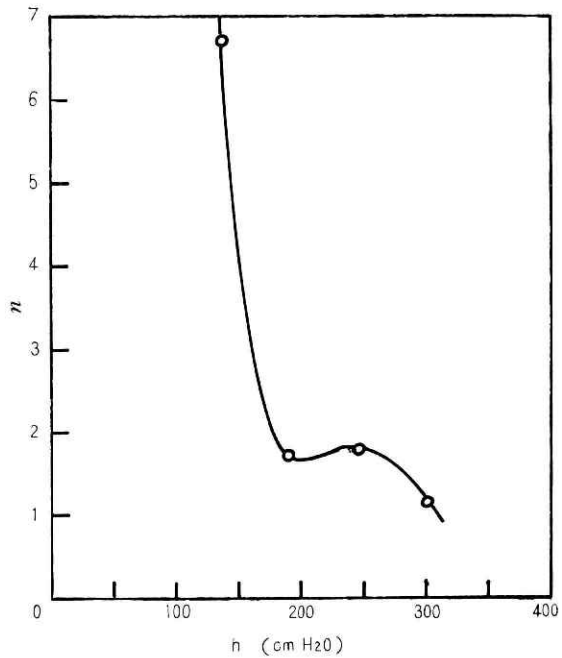


図 14 水分ポテンシャル h と n 値の関係

試験が利用されてきた。和田 (1668) は粘度、荷重、貫入時間、針入度の関係を理論的に誘導する研究を行っている。これらの理論は針入計を落下共軸円筒型粘度計とみなすことによっている。図 13 に共軸円筒型粘度計の断面図を示す。試料がニュートン粘性を示す場合には次の関係がある。

$$v = (f/2\pi h\eta) \cdot \ln(a/b) \quad (9)$$

f は内筒に働く力 (dyne), h は内筒が試料に接している長さ (cm), a は外筒が作る中空円筒の半径 (cm), b は内筒の半径 (cm) である。試料が非ニュートン流動を示す場合、ずり応力 σ とずり速度 $\dot{\gamma}$ の間に次の関係があると仮定する。

$$\dot{\gamma} = \sigma^n / \eta' \quad (10)$$

(10) 式より (9) 式は次のようになる。

$$v = (f/2\pi h)^n \cdot [1/\{\eta'(n-1)\}] (1/b^{n-1} - 1/a^{n-1}) \quad (11)$$

針入度計の場合、 $v = dh/dt$ として積分し、 $t=0$ で $h=0$ とする。

$$\{1/(n+1)\} h^{n+1} = (f/2\pi)^n \cdot [t/\{\eta'(n-1)\}] (1/b^{n-1} - 1/a^{n-1}) \quad (12)$$

$h = p/100$, $f = W \cdot g$ とすると。

$$\begin{aligned} \log P = & \{1/(n+1)\} \log t + \{n/(n+1)\} \log W \\ & + \{1/(n+1)\} \log \left((g/2\pi)^n [(n+1)/\{\eta'(n-1)\}] (1/b^{n-1} - 1/a^{n-1}) \right) + 2 \end{aligned} \quad (13)$$

貫入時間 t を一定にすると、

$$\log P = \{n/(n+1)\} \log W + K \quad (14)$$

貫入時間を一定にし、荷重を変化させ貫入度 P を測定し、 $\log P$ と $\log W$ をプロットする。この直線の勾配を β とすると、

$$\beta = n/(n+1) \quad (15)$$

n の値は粘性の特質を表わすもので、ニュートン粘性では $n=1$ となる。

表1から $\log P$ と $\log W$ をプロットし、勾配から n を求め、水分ポテンシャルと n の関係を表示すると図14のようになる。水分ポテンシャルの増大につれ n は急速に小さくなり、1に近づいている。水分の減少につれ非ニュートン粘性の性質がなくなりニュートン粘性に近づくことがわかる。乾燥状態ではほぼニュートン粘性になっている。 n の値だけでは粘性の特質を完全に知ることはできないが、水分と特質のおおよその関係は知ることができよう。

表2より $\log P$ と $\log W$ をプロットし、勾配より n を求め、アルコール濃度との関係を表示すると図15のようになる。アルコール濃度の変化に対し、大きな変動は生じていない。

図14および図15から、土の粘性の特質は水の表面張力によるよりも、含有水分が重要な役割を示していると言えよう。

4.2.2 流動曲線

非ニュートン流動を示す試料について落下共軸円筒型粘度計で測定する場合、内筒壁の部分でのずり応力を σ_b 、ずり速度を $\dot{\gamma}_b$ とすると、(10)式の関係から、

$$\eta' = \sigma^n / \dot{\gamma} = \sigma_b^n / \dot{\gamma}_b \quad (16)$$

内筒壁での部分の粘度を η_b とすると、

$$\eta_b = \sigma_b / \dot{\gamma}_b \quad (17)$$

この場合内筒壁に働く応力 σ_b は、

$$\sigma_b = f / 2\pi b h \quad (18)$$

(16) (17) (18) と (12) から、

$$1/(n+1) \cdot h^2 = \{f/2\pi(n-1)\eta_b\} t \cdot \{1-(b/a)^{n-1}\} \quad (19)$$

$$\eta_b = \{(n+1)f/2\pi(n-1)h^2\} t \cdot \{1-(b/a)^{n-1}\} \quad (20)$$

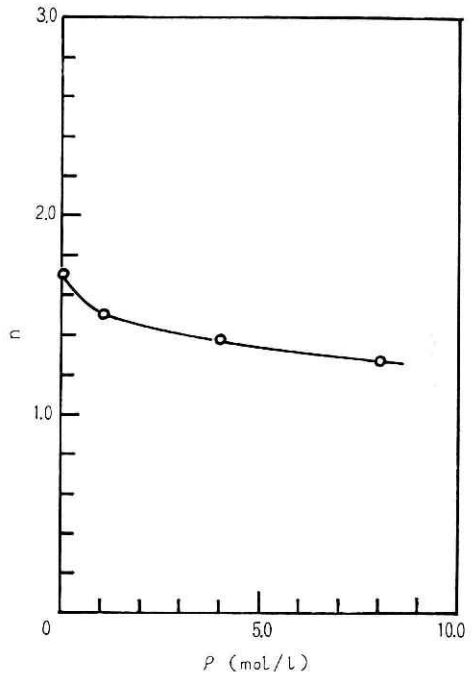


図15 アルコール濃度 ρ と n 値の関係

(17) (18) (20) 式より,

$$\dot{\gamma}_b = (n-1)h / [(n+1)l \cdot b \{1 - (b/a)^{n-1}\}] \quad (21)$$

$h = P/100$, $f = W \cdot g$, 針の半径 0.05 cm とすると, (18) 式は

$$\sigma_b = 100 W \cdot g / 2\pi b P = 3.13 W / P \times 10^5 \text{ (dyn/cm}^2\text{)} \quad (22)$$

(21) より

$$\dot{\gamma}_b = \{(n-1)P/5(n+1)l\} / \{1 - (b/a)^{n-1}\} \text{ [sec}^{-1}\text{]} \quad (23)$$

含有水分を変化させた場合の流動曲線を図 16 に示すが, 中間領域での含水率で粘性は大きくなり, 構造粘性を示すことがわかる. (10) 式の仮定では厳密な流動曲線を知ることは困難であるが, 中間領域で降伏値は大きくなるのではなからうか.

水の表面張力を変化させた場合の流動曲線を図 17 に示す. 表面張力の減少に伴って粘度は小さくなることがわかる. しかも減少の割合はかなり大きいことがわかる.

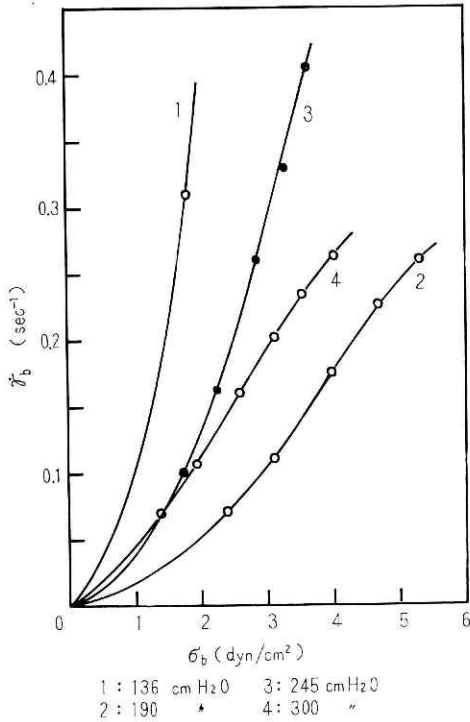


図 16 水分ポテンシャルが変化した場合の流動曲線

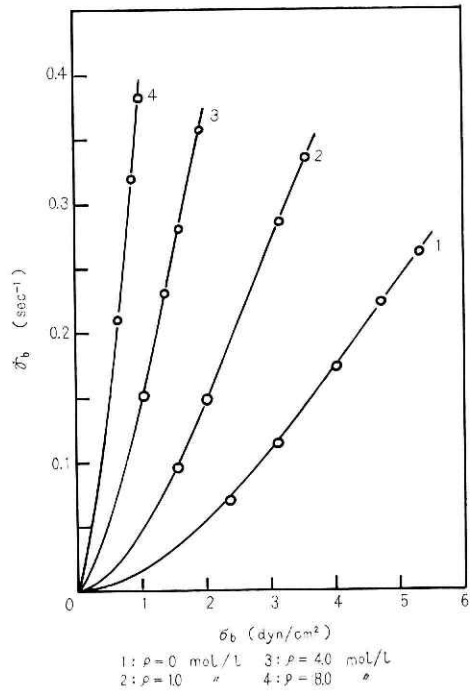


図 17 アルコール濃度を変化させた場合の流動曲線

5. 結 語

吸引圧を変化させて剪断試験を行った結果から, 含有水分が異った場合に粒子の接触点に形成される水リングの状態を変化し, 水の表面張力が結合力として作用できる条件を明らか

にした。またアルコールを用い人為的に水の表面張力を低下させ、表面張力の作用の大きさを明らかにした。

ペネトロメータを利用してレオロジー特性がどう変化するかを明らかにした。

ジータ電位を測定して粒子表面にできる水和層の厚さの変化を求め、これが粒子間結合力とどう関係するかを明らかにした。

この研究において明らかになったことは、土の強度を維持するのに水の表面張力が非常に大きな役割をはたしていることである。したがって表面張力が作用しないような条件になると強度が極端に低下した。このことは降雨による雨水の地下浸潤と関連があり、浸入した水は正にこの条件を作り出すのに役立っていると考えられる。ここでは土の強度問題だけを取扱ったが、水の浸透理論と土の強度の関連をとらえることにより、斜面の崩壊の時間的關係を明らかにすることが可能で、崩壊の予知も理論的には可能となるであろう。

謝 辞

この研究は農業土木試験場造構部第4研究室において流動研究官の共同研究として行われた。同試験場企画連絡科長岸本氏、企画連絡室長三品氏には手厚い支持を賜わり厚く御礼申上げる。造構部長中島氏には様々な御便宜を下され御礼申上げる。さらに防災センター大平所長には一貫して御指導を賜わり厚く御礼申上げたい。

参 考 文 献

- Baver (1972): Soil Physics, *John Wiley & Sons Inc.*, p.100.
広部 (1971): 土粒子の結合力を計算する新しい式. 国立防災科学技術センター研究報告, **13**, 31—34.
Smith (1929): Packing of homogeneous Spheres, *Phys. Rev.*, **34**, p.1271.
Versluys (1917): Die Kapillarität der Böden, *Intern. Mitt. Bodeuk.*, **7**, p.117.
Verwey-Overbeek (1948): The theory of the stability of lyophobic Colloid. Elsevier Press.
和田八三久 (1968): レオロジー測定法. 高分子学会編. 共立出版. p.129.

(1977年10月31日原稿受理)