

鹿児島大学農学部 正 員 ○ 春山 元寿
九州大学工学部 正 員 山内 豊聡

はじめに：一般に砂質土の設計強さとしては見かけの粘着力 c は無視されている。これは普通の砂質土には適用できるが、シラスのような砂質土には、そのまま適用することに疑問がある。実際にシラスの自然斜面は数10mの高さで、ほとんどを直なガケとなして長期の安定を維持していることはセン断底面角中だけでは説明できないし、また乱さなシラスのセン断試験によれば、かなりの大きさの c が生ずることを筆者らは経験している。¹⁾従来、シラスの自然斜面が垂直で安定を保つことは耐水性の観点からだけ説明されているが、これはいささか皮相的説明である。またシラスが大きな c を有することは土質力学的観点からは説明できず、何かに地質的要因に基因するものであろうという考えもある。しかし筆者らはシラスのような砂質土の c は粒子のインターロッキングに基因するものであることを明らかにした。排水三軸圧縮試験では、セン断強さに対するインターロッキング効果は最大軸差応力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ から供試体の体積変化による外的仕事の部分 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{de}$ と補正した軸差応力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ff}$ と終局軸差応力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_u$ との差 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{di}$ によって表わすことができ、比 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{di} / (\sigma_1 - \sigma_3)_{de}$ は、供試体の初期間ガケ比が小さいほど、また側圧 σ_3 が大きいほど増大する。²⁾最近、Myslivec³⁾は粒子の方向性を考慮して砂質土が c を有することを示した。さらにBeer⁴⁾は乾燥砂の急斜面の安定の原因と中にあるが、彼の考えはシラスガケの安定を説明するには不十分である。本報では、シラスガケの安定は粒子のインターロッキングを考慮することによって満足すべき説明ができるという考えに連したので、締同めにシラスの三軸試験結果に基づいてシラスガケの安定に関する2,3の考え方を述べることにする。

試料および試験方法：実験に用いた試料および供試体の大きさは、さきの報告²⁾と同じものである。試料の粒子形状を写真-1に示す。シラスの粗粒部分には写真-1(A)の粒子 a , c のような安山岩質の粒子を含んでいるが、ほとんどすべての粒子 a のようなガラス質である。セン断にあたっては圧縮速さを供試体高さの1.0%/min.とし、定側圧定ヒズミ法で排水三軸圧縮試験を行った。またセン断中の含水比は気乾状態から飽和状態まで5種類とした。

試験結果およびその解釈：試験結果の1例を図-1に示す。破壊面より線は拘束圧 σ_3 あるいはセン断面上の垂直応力 σ_v が増すに従って平たく

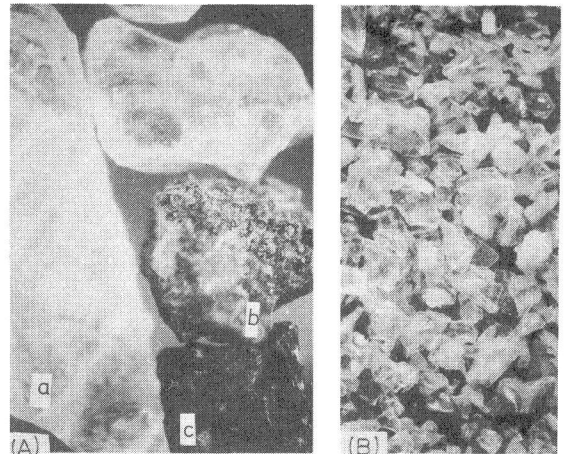


写真-1 シラスの顕微鏡写真

- (A) 粒径 840~2,000 μ , a はガラス質粒子,
b, cはシラスの粗粒部分に含まれている安山岩
系の粒子
(B) 粒径 74~420 μ

なっている。この傾向は供試体の e_0 が一定のときは含水比が小さいほど、含水比が一定のときは e_0 が小さいほど明らかであり、飽和試料では直線であるが、 σ_3 を大きくすると乾燥試料と同様平たくなるであろう。 σ_3 をさらに大きくするとこの破壊包絡線は Skempton⁵⁾が指摘したように粒状体からなるポーラス材料固有の包絡線に近づくと考えられる。

筆者ら⁶⁾はシラスのような砂質土のせん断強さでは、粒子間の内部摩擦による部分 τ_{fr} 、粒子のインターロッキングに基因する部分 τ_{cl} および拘束圧に対して膨張するために必要な外的仕事に基因するいわゆるダイレイタンスー部分 τ_{de} の成分から成ることと示した。これを熱力学的に考えると τ_{fr} は移動エントロピーに、 τ_{cl} は生成エントロピーに、 τ_{de} は外的仕事に移行する内部エネルギーにそれぞれ対応していると考えてもよいかも知れない。さらに、 τ はつぎのように表わされる。

$$\tau = C(\theta) + \sigma \tan \phi(\phi_{fr}, \theta) \quad \cdots (1)$$

ここに、 C はインターロッキング θ ⁶⁾の関数であり、 ϕ は内部摩擦角 ϕ_{fr} と θ の関数である。また、この式は図-1に示す破壊包絡線上のある σ に対する接線を表わして

いるものとする。試験結果によると、 e_0 が一定のとき、含水比が小さいほど、また拘束圧は大きいほど、 C は増加し、 ϕ は減少する。飽和試料については実験の範囲では C 、 ϕ とも一定である。このように拘束圧の減少に従って ϕ が減少し、 C が増加する現象と土粒子のインターロッキング効果の増大によるせん断強さの摩擦部分の粘性部分への転化現象として解釈することとする。

試験結果の利用—シラスガケの安定と崩壊の機構について—：シラスのような砂質土の斜面の安定と土質力学的に考えると (i) 表面侵食に対しては土粒子の比重や分散性が、(ii) ケービング (caving) による崩壊には浸透圧が (iii) 飽和による崩壊には有効土カアリ圧の減少が、また (iv) 地震などの動的作用に対しては粒子間の作用応力が関係しているであろう。そこで、シラスガケの安定と上記の (iii) および (iv) の説明に対して試験結果をどのように利用するかについて述べることにする。

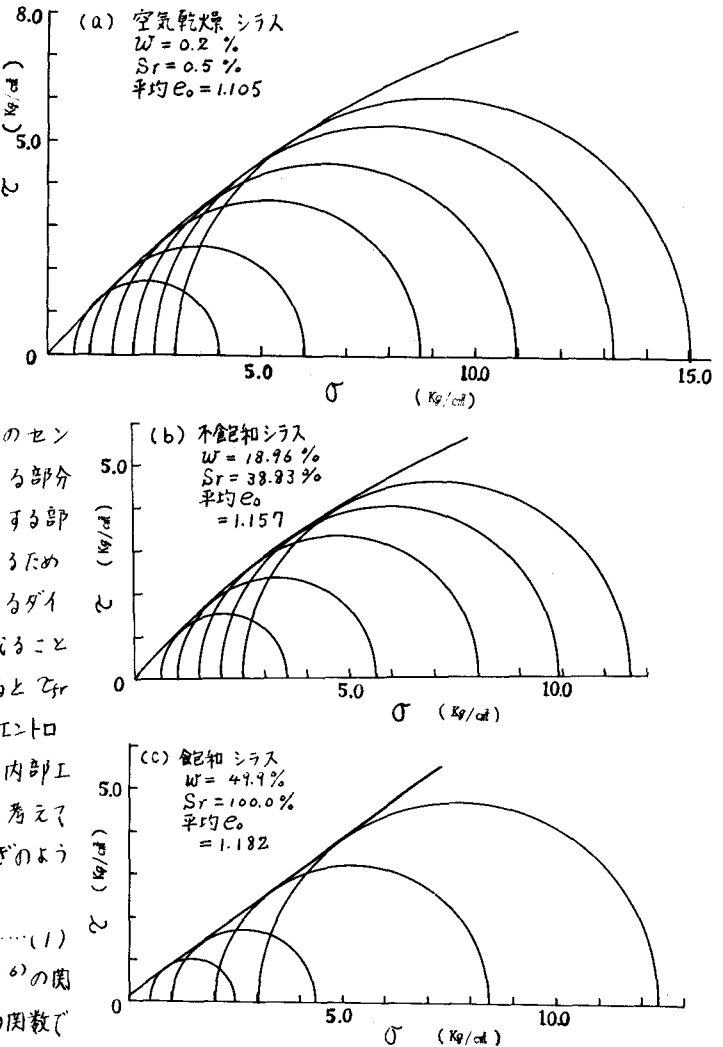


図-1 締固めたシラスの三軸圧縮試験結果
(鹿児島市唐湊産シラス)

(1) シラスガケの安定について：前節で述べた拘束圧の増加は自然地盤では有効土カブリ圧の増加に対応すると考えられる。したがって、シラスガケはその高さを増れほど摩擦によって安定を保つ部分は少なくなり、インターロッキングに基づくCによって安定を維持していることになる。いま、表-1に示すような数字模型によるシラス層を考え自然シラス層の安定を推定してみる。ガケの高さHを表-2に示すように仮定し直立斜面の限界安定高さHcおよび引裂り亀裂の影響を考慮した限界安定高さHc'を、それぞれ式(2)および式(3)で求めると表-2に示す値が得られる。

$$H_c = 4C \tan(45^\circ + \frac{\phi}{2}) / \gamma \quad \dots\dots (2) \quad H_c' = 2.67 C \tan(45^\circ + \frac{\phi}{2}) / \gamma \quad \dots\dots (3)$$

ここに、 γ は見かけの密度、表-2において σ' は $\gamma \times H$ として求め、 C_d 、 ϕ_d は図-1(b)から、それぞれの土カブリ圧 σ' のときの破壊包絡線に対する接線によって求めた。この C_d 、 ϕ_d は4.76mmフルイを通過した乱したシラスについての値であるから、自然地盤においては軽石の影響や粒子の方向性⁷⁾などの影響を受けて、 C 、 ϕ は表-2に示す値より大きい値を示すであろう。いま、安全率について考えるとHが10および15mのとき $H_c'/H < 1$ であり、ほかは1に近いが、 $H_c/H > 1$ であり、前述した供試体の条件を考慮すれば安全であると判断してよいと考えられる。したがってシラスのような砂質土の直立斜面の安定は、静的にはHcと一義的に考え、Hcとは一義的に取扱ってよいと考えられる。しかしシラス層が地震などの動的な作用を受けるときは、あとで述べるような事象によってHcを考慮することが必要であろう。

(2) シラス層の飽和による直立斜面の崩壊：降雨などによってシラス層が飽和し、中立応力 u が発生すると有効土カブリ圧 σ' は著しく減少する。このためシラスはインターロッキングによるCを減じて不安定となる。崩壊の発生する直前までは排水状態にあると考えられるが、ひとたび不安定となるとシラス層は非排水状態となり、間ゲキ水圧が静水圧以上に発生し、崩壊は急激に進行するであろう。いま、表-1に示すシラス層が地表面まで飽和したと仮定して、 C_d 、 ϕ_d を求め安全率を計算すると、表-2に見られるように、むしろ安定を論ずる場外にある。

(3) シラスガケの地震による崩壊：一般に、シラス台地においては地下水面は低く、ガケした(崖下)よりもさらに深くにあるのでシラス層の地震などによる動的挙動を間ゲキ水圧の変化からおしはかるということとはできないであろう。さて、安定状態にあるシラス層が地震などの振動を受けて、粒子間の有効応力が減少するような挙動が起ると、拘束圧が減少するので図-1(b)に示すような破壊包絡線に従ってCを失なう。ガケの安定に対しては ϕ よりCの影響が大きいので安全率の低下をまわくであろう。また地震力を静力学的に取扱う方法⁹⁾によればシラス層の静的な常時土カブリ圧は地震時には、土カブリ圧の

表-1 数字模型によるシラス層
(試料の最大粒径4.76mm)

比重	2.37
間ゲキ比	1.157
乾燥密度(g/cm ³)	1.099
乾含水比(%)	18.96
爆発飽和度(%)	38.83
時見かけの密度(g/cm ³)	1.307
飽含水比(%)	48.81
飽和飽和度(%)	100.0
時見かけの密度(g/cm ³)	1.635

表-2 シラス層の直立斜面(ガケ)の限界安定高さ

第1作用方向に 対して危険側す なわちガケ側は 合震度の大きさで け傾くことになり、 常時土カブリ圧は	H (m)	乾 燥 時								飽 和 時							
		σ	C_d	ϕ_d	H_c	H_c'	安全率		u	σ'	$C_d^{(2)}$	$\phi_d^{(2)}$	H_c	H_c'	安全率		
		(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	°	(m)	(m)	H_c/H	H_c'/H	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	°	(m)	(m)	H_c/H	H_c'/H	
10	1.31	0.18	42.18	12.5	8.3	1.25	0.83	1.0	0.64	0.11	37.25	5.2	3.4	0.51	0.34		
15	1.96	0.29	40.04	19.1	12.7	1.27	0.85	1.5	0.95					0.34	0.23		
20	2.61	0.50	37.14	30.9	20.6	1.54	1.03	2.0	1.27					0.26	0.17		
25	3.27	0.64	35.46	38.3	25.6	1.53	1.02	2.5	1.59					0.21	0.14		
30	3.92	0.80	34.12	46.3	30.9	1.54	1.03	3.0	1.91					0.17	0.11		
40	5.23	1.45	28.22	74.7	49.9	1.87	1.25	4.0	2.54					0.13	0.09		

常時土カブリ圧は

常時作用方向に
対して危険側す
なわちガケ側に
合震度の大きさ
け傾くことになり、

地震時には鉛直方向の成分を減じ、ガケの方に対するせん断応力を発生することになり、不安定となる。

さて、昭和36年2月の日向灘地震のときのシラス台地での代表的な震害状況¹⁰⁾をみると、ガケから2～10mのところにはガケに沿って亀裂が発生し、S町では高さ約40mのシラスガケで、幅7～8cm、長さ5～20m、最大約150mの亀裂が連なり、延べ約400m、またD市では幅約10cmの亀裂が延べ約300mにわたって発生した。さらにシラスの切取法面の崩壊はいくところには発生している。これらの亀裂や崩壊は前節で述べた地震力を静的に考えた手法で発生したせん断応力による引張り亀裂のようなものでよいと考えられる。これらの震害地のシラスの物理的性質が明らかでないので、確実なことはいえないが、前項(1)で述べたシラス層において、 $H=40\text{m}$ としたときの乾燥時の $H_c/H=1.25$ 、 $H_c/H=1.87$ であり、 H が低いときと比較して大きい値であるので崩壊にまでいたったものと考えられる。したがってシラスガケの地震に対する安定性は H_c を考慮しなければならぬ検討することができると考えられる。

結 論：掃目めたシラスの三軸圧縮試験結果を用いて、従来土質工学的説明のなされ得なかったシラスガケの安定性を粒子のインターロッキングを考えることによってつぎのように説明した。

(i) シラスの排水三軸圧縮試験によると、その破壊包絡線は拘束圧が大きくなるにつれて平たくなる。これは拘束圧が大きいほど粒子のインターロッキング効果が大きくなることを意味する。したがって、 c 、 ϕ は σ によって異なり、これは包絡線の接線から求めることができ、 σ が大きいほど、 ϕ は小さく、 c は大きくなる。

(ii) これはシラスガケの場合、その高さを増すほど、ガケの安定は c による部分が多くなり、 ϕ による部分が少くなることを意味している。ガケの限界安定高さは静的には引張り亀裂の影響を考慮しないといえる。

(iii) シラス層が飽和すると中立応力の発生によって有効土カブリ圧が減少し、インターロッキングに基づく c を失ってガケは不安定となる。

(iv) 地下水位以上にある不飽和シラス層が地震などの震動を受けると粒子の拘束圧が減ると考えられ、また地震力を静的手法で取扱うと地震時の土カブリ圧は平常時より減少し、しかも危険側にせん断応力が発生する。シラス台地の震害の発生状況から動的にはガケの限界安定高さは引張り亀裂の影響を考慮する必要があると推定される。

以上粒子のインターロッキングの考えをシラスガケの安定に対して適用したが、これはシラスのような粒子形状を有する砂質土や、また直立斜面に対してだけでなく、他の土質工学的諸問題にも適用できる面もあると考えられるので、逐次それを試みてみたい。

参考文献： 1) 未発表データによる

- 2) 香山・山内：粘土質シラスの排水せん断特性について、土木系誌、Vol.14, No.8, 昭41.8, pp.27～33.
- 3) Myslivec, A. Initial Shearing Strength of Soil, Proc. 2nd Asian Regional Conf. SMFE, 1, 1963, pp.44～46.
- 4) Beer, E. De: Influence of the Mean Normal Stress on the Shearing Strength of Sand, Proc. 6th Int. Conf. SMFE, 1, 1965, pp.165～169.
- 5) Skempton, A. W.: Effective Stress in Soils, Concrete and Rocks, "Pore pressure and suction in soils", Butterworths, 1961, pp.4～16.
- 6) 香山・山内：シラスのような砂質土のインターロッキング

について、第1回土質工学研究発表会講演集、昭41.11. pp.139～143.

7) Terzaghi, K.: Theoretical Soil Mechanics, J. Wiley & Sons, 1943, pp.152～155.

8) 大庭・阿部・三輪：自然状態におけるシラスの顕微鏡的観察、岩石鉱物鉱床学会誌、Vol.47, No.3, 昭37, pp.91～96.

9) 吉川：地震の性質と地盤調査法、「地盤と地質」、土質工学会、昭40.3. p.24.

10) 小牧・岸上：1961年2月27日日向灘地震調査概報、地震研究新彙報、No.42-1, 昭39.3. pp.245～256.