

土粒子のインターロッキングとシラス崖の安定について

九州大学工学部(研究生) 正 員 ○春 山 元 寿
同 正 員 山 内 豊 聡

1. はじめに シラスのような砂質土の自然斜面が、高さ数十メートルでも、ほとんど垂直で永く安定を維持していることについては一部の研究者によっては土質力学的観念からは説明のできないことと考えられており、また、この方面の研究はなされていまいようである。しかし筆者らは土粒子のインターロッキングと考慮することによってシラス崖の安定を説明できると考えている。シラスのような砂質土のせん断強さは限界間ゲキ比より密な状態では見かけの粘着カとせん断抵抗角中に関係し、ゆるい状態では C を有しない。筆者らは、この C の大部分は土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。¹⁾ 本報は筆者らがかねて行なっている砂質土の強さ特性に関する研究のうち、土粒子のインターロッキングについて概略的な説明を行ない、さらにシラス崖の安定と土粒子のインターロッキングの観念から考察する。

2. 土粒子のインターロッキングについて 一般に、砂質土のせん断強さは C だけに関係するものとされているが、筆者らは砂質土でもその粒子形状と粒度分布によってはインターロッキング効果(従来のダイレイタンスー効果も含めて)による C を生ずるようになると考えている。その例としてはシラスがあげられる。土は等圧せん断を受けると平均主応力の変化とせん断応力の変化による体積変化を起す。後者による体積変化が、いわゆるダイレイタンスーである。このダイレイタンスーは本来インターロッキングに基因するものであるにもかかわらず、“soil mass”としての外的な現象である膨張とか収縮、あるいはそれらに伴う間ゲキ水圧の変化が注目され、膨張や収縮に伴って土粒子相互の関係がどのように変化するかにはあまり注意は払われていない。また、これらは土をどのような観念から見るかによっても取扱いが異なるであろう。すなわち、ダイレイタンスー効果の概念は土を連続体として見たときの考え方であるが、土を粒状体として見るとインターロッキングのほうが必要となる。従来、土をどのように見るかということはいまよりかえりみられなかったようである。三笠教授²⁾のせん断に対する土の構造様式の変化の概念は、ダイレイタンスーと土粒子相互の関係から説明しようとしたものと考えてよいであろう。筆者らは、個々の粒子間に作用する力を問題としており、土を粒状体として扱う。

せん断中の土粒子の動きは複雑で把握することは困難であるが、ここでは、せん断の方向すなわちせん断応力を加える方向に対して土粒子はある角度を有して移動しており、この角度はせん断と共に漸次減少し、定常せん断状態においてせん断の方向と土粒子の移動方向とが同じになると考える。筆者らはこの方向の不一致性が土のせん断強さにおよぼす影響をインターロッキング効果¹⁾なる用語で表わした。これは密度、粒子の形と表面の状態、粒子配列の方向性、含水比および粒子間の応力条件などに関係し、せん断中の体積変化に影響する。これはせん断応力・ヒズミ曲線がピークを示す原因となる。したがって、理想的なせん断における最大せん断応力と定常せん断応力との差はインターロッキング効果(ダイレイタンスー効果も含めて)に関係していると考えることが出来る。

従来、一般にはダイレイタンスーあるいはインターロッキングは中だけに影響するものとして取扱われている。たとえば、Taylor, D.W. (1948), Bishop, A.W. (1950), Newland, P.L., Allely, B.H. (1957) および Rowe, P.W. (1962) の考え方などがそうである。

いま、簡単のために、セン断領域において図-1のような土粒子の配列状況の平面的な投影を考える。τはセン断応力、σはセン断面上の垂直応力およびθはインターロッキング角¹⁾である。あるセン断の瞬間におけるセン断領域内の土粒子の接触点の数をn個とすると

$$\left. \begin{aligned} \tau &= \tau_1 + \tau_2 + \dots + \tau_n \\ \sigma &= \sigma_1 + \sigma_2 + \dots + \sigma_n \\ \theta &= \frac{1}{n} (\theta_1 + \theta_2 + \dots + \theta_n) \\ -\frac{\pi}{2} &< \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n, \theta < \frac{\pi}{2} \end{aligned} \right\} \quad (I)$$

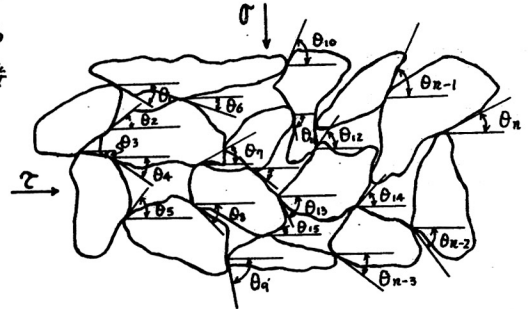


図-1

であり、ここに、 $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ および $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$ はそれぞれ接点におけるτおよびσの部

分である。nとθはセン断と共に変化する。θは平均値と標準偏差で表わすことができる。体積は $-\frac{\pi}{2} < \theta < 0$ のとき減少し、 $0 < \theta < \frac{\pi}{2}$ のとき増加する。また、定常セン断状態では $\theta = 0$ となり、最大セン断応力のときθも最大となる。また、最上教授³⁾ が言われるようにセン断領域においても間ゲキ比の分布は異なると考えられるから、セン断領域とその端まり具合に応じてN個のグループに分けるとしてもまた平均値と標準偏差によって表わすことができるがこれらの点については別の機会に報告したい。

いま、インターロッキングがφの部分としてだけ作用すると仮定し、粒子間の内部摩擦角をφ_{fr}とするとつぎのような関係がある。

$$\frac{\tau \cos \theta - \sigma \sin \theta}{\tau \sin \theta + \sigma \cos \theta} = \tan \phi_{fr} \quad (2)$$

したがって

$$\frac{\tau}{\sigma} = \frac{\sin \theta + \cos \theta \tan \phi_{fr}}{\cos \theta - \sin \theta \tan \phi_{fr}} = \frac{\tan \theta + \tan \phi_{fr}}{1 - \tan \theta \tan \phi_{fr}} = \tan(\phi_{fr} + \theta) \quad (3)$$

ここに、 $\phi_{fr} + \theta = \phi$ とおくことができる。

また、三軸応力状態では破壊面が最大主応力面となす角度をα°とするとつぎの関係がある。

$$\frac{\tau}{\sigma} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3) \sin \alpha \cos \alpha}{\sigma_1 \cos^2 \alpha + \sigma_3 \sin^2 \alpha} = \tan(\phi_{fr} + \theta) \quad (4)$$

($\phi_{fr} + \theta$) が最大となるようなαの値は $d \tan(\phi_{fr} + \theta) / d\alpha = 0$ から $\alpha = 45^\circ + (\phi_{fr} + \theta)/2$ である。このαの値と $\tan(\phi_{fr} + \theta) = \cot\{90^\circ - (\phi_{fr} + \theta)\} = -\cot\{90^\circ + (\phi_{fr} + \theta)\} = -\cot 2\alpha = \frac{1}{2}(\tan \alpha - \cot \alpha)$ の関係を式(4)に代入して主応力比 σ_1/σ_3 を求めるとつぎのようになる。

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi_{fr}}{2} + \frac{\theta}{2} \right) \quad (5)$$

しかるに、筆者らはインターロッキングは前述のように ϕ ばかりでなく C にも影響していると考えている。その定量的表示と実験結果は既に発表した。¹⁾ すなわち、インターロッキングを考慮に入れたせん断応力はつぎのように表わされる。

$$\tau = \sigma \tan \phi_{fr} + \sigma \tan \theta + \frac{\sigma(\tan \theta + i)}{1 - i \tan \theta} \quad (6)$$

$$= C(\theta) + \sigma \tan \phi(\phi_{fr}, \theta) \quad (6')$$

ここに、 $i = (\tau_{di} - \sigma \tan \theta) / (\tau_{di} \tan \theta + \sigma)$; インターロッキング係数
式(6)の右辺第1項は内部摩擦項、第2項はダイレイタンシー項および第3項はインターロッキング項である。また、 C は θ の関数であり ϕ は ϕ_{fr} と θ の関数であると考えられる。ダイレイタンシーはインターロッキングに基因するものであるから

$$\tau_i = \sigma \left(\tan \theta + \frac{\tan \theta + i}{1 - i \tan \theta} \right) \quad (7)$$

と置き、これを広義のインターロッキング効果と呼ぶことにする。

さらに、以上述べたことを熱力学的に考えてみる。すなわち熱力学的体系のつり合いの条件は力学的な考え方だけから言えば、エネルギーが極小の状態になると安定なつり合いに達するのであるが、エントロピーの立場から言うとエントロピーがなるべく大きな状態になろうとすることにある。

Rowe⁴⁾の応力・ダイレイタンシー論は前者に、最上教授の粒状体の力学理論³⁾は後者にその根拠を置いておいて考えてよいであろう。エントロピーが増大するということは確率の小さい状態から大きい状態に移行しようとすることであり、確率が最大の状態へと近づくことを意味する。エントロピーが増大すればするほど、ますます多くの内部エネルギーが熱として移動していき、内部エネルギーのうち力学的仕事に利用される部分が少なくなる。したがって内部エネルギーは2つの部分からなる。一つは外部の物体に力学的仕事を行なうことによって外部に移行する部分であり、残りの部分は熱に移行する。後者に対応するのがエントロピーである。このエントロピーは移動エントロピーと生成エントロピーからなると考える。式(6)を考えると移動エントロピーは内部摩擦項に、生成エントロピーはインターロッキング項に、外的仕事に移行する内部エネルギーはダイレイタンシー項にそれぞれ対応すると考えてよいであろう。これらの点の詳細については別の機会に発表したい。

3. 土粒子のインターロッキングを考慮したシラス崖の安定と崩壊の機構について インターロッキング効果は式(7)に示すように θ の増加に従って大きくなる。いま、乾燥したシラスの排水三軸圧縮試験結果の一例を図-2に示す。破壊包絡線は σ が増すに従って平たくなっている。 σ をさらに大きくするとこの包絡線は Skempton⁵⁾ が指摘したように粒子からなるポーラス材固有の包絡線に近づく傾向を有すると考えてよいであろう。これは土カブリ圧(たとえばシラス層の堆積圧)が増加するほどインターロッキングによる C が増すことを意味している。したがってシラス崖は高くなるほど摩擦によって安定を保つ部分は少なくなり、その代りインターロッキングによる C によって安定を維持することになる。筆者らは、この現象を堆積圧 σ_v によるインターロッキングの増加に

伴う摩擦の C への転化現象と考えている。

従来シラス崖の崩壊は主として水による侵食の観点からだけ説明されてきている。しかし崩壊の本質は単なる侵食現象だけではとらえることはできない。これは土質力学的観点からとらえるべきであろう。すなわち、

表面侵食に対しては土粒子の分散率や比重が、ケービング (caving) に基因する崩壊には浸透圧が、飽和による崩壊には有効応力の減少が関係しているであろう。シラス崖の安定の機構は前節において述べた。ここでは、飽和による崩壊の機構について簡単に述べる。

シラス層が降雨などによって飽和すると中立応力が発生し、粒子間の有効応力 σ' すなわち有効堆積圧は著しく減少する。このためシラスはインターロッキングに基因する C によって安定性を減じ崩壊し、飽和したシラス

の強さ定数に対応する傾斜一応安定状態になる。しかしシラス粒子は分散作用が大きいので、この崩土はその後の降雨によって流失せられる。いま、表-1に示すようなシラス層 A と B を考え、引張り亀裂の影響を考慮した直立斜面の限界安定高さ H_c' をつぎの式で求めると表-2 のようになる。

$$H_c' = 2.67 \frac{C}{\gamma_e} \tan(45^\circ + \frac{\phi}{2}) \quad (8)$$

たとえば、シラス層 A の崖の高さ 20 m のとき $H_c' = 28.1$ m まで安定であるが飽和すると著しく安定を欠いて $H_c' = 9.3$ m となっている。さらに一度崩壊が起こると、急激に非排水状態で進行すると考えられるので間ゲキ水圧は表-2の計算に用いた静水圧以上になり、せん断強さをますます減じもはや垂直な崖状には安定を保持しえないであろう。

4. むすび 土粒子のインターロッキングについての考え方とそれが土のせん断強さ (C , ϕ) のどのような部分に影響しているについて述べた。さらに、シラス崖の安定および飽和による崩壊の機構はインターロッキングと中立応力を考慮することによって説明できるとを明らかにした。

参考文献 1) 春山元寿 山内豊聡: 土質工学研究発表会講演集, 昭. 41. 11. 139~143. 2) 三笠正人: 道路工の土質工学, 土質学会関西支部, 昭 37. 1. 27~62. 3) Mogami, T.: Soil and Foundation, V-2, Mar. 1965, 20~30. 4) Rowe, P.W.: Proc. Roy. Soc. London, A. 269, 1962, 500~527. 5) Skempton, A.W.: Pore pressure & Suction in Soil, Butterworths, 1961, + vii. 6) Terzaghi, K.: Theoretical Soil Mech. J. Wiley, 1943, 152~155. 7) 春山元寿 山内豊聡: 土と基礎, 昭. 41. 8, 29~33.

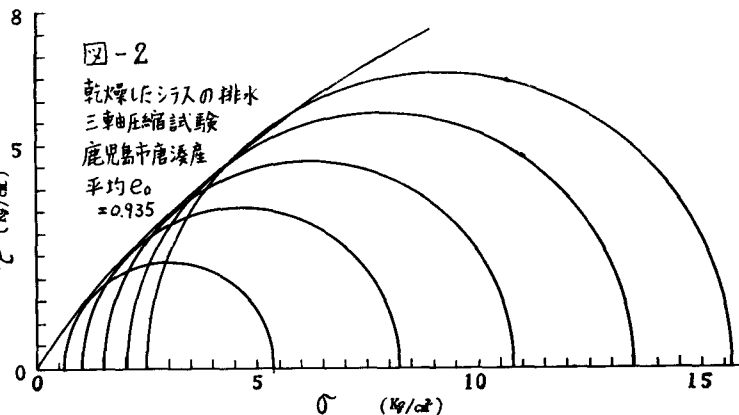


図-2
乾燥したシラスの排水
三軸圧縮試験
鹿児島市唐湊産
平均 e_0
 $= 0.935$

表-1

シラス層	e	乾燥時		飽和時	
		w (%)	γ_s (g/cm³)	w (%)	γ_s (g/cm³)
A	0.939	20.0	1.47	36.9	1.67
B	1.105	20.0	1.35	46.6	1.65

e = 飽和比, w = 含水比, γ_s = 見かけの密度

表-2

シラス層	崖の高さ (m)	乾燥時				飽和時			
		σ' (kg/cm²)	C (kg/cm²)	ϕ °	H_c' (m)	σ' (kg/cm²)	C' (kg/cm²)	ϕ' °	H_c' (m)
A	10.0	1.47	0.28	48 30	13.6	0.67	0.25	43 30	9.3
	20.0	2.94	0.68	42 37	28.1	1.34	0.25	43 30	9.3
B	10.0	1.35	0.25	43 00	11.3	0.65	0.14	38 40	4.7
	20.0	2.70	0.47	40 22	20.1	1.30	0.14	38 40	4.7