

岩盤分離面の表面形状とせん断強さとの関連

よし なか りゅうのしん
吉 中 龍之進*

おの であ とおる
小野寺 透**

1. はじめに

岩盤の力学的解析手法が進んだ今日においても岩盤の真の力学的性質がどのようなものであり、それをいかに量的には握し表現するかという基本的問題に関して未知の点が多い。これは岩盤中にある各種のさまざまな規模の不連続面の存在、あるいは変質・風化などによる局部的変化の多様性、などが問題の解決を困難なものにしている。

岩盤には節理、層理、断層などの地質分離面・不連続面が基本構成要素として存在し、その性質、存在を抜きにしては岩盤は考えられない。たとえば写真-1は地表近くの花コウ岩露頭である。数方向の節理系では特徴づけられた典型的な分離面分布の様相を呈している。このような岩盤の性質を評価するのに通常は原位置岩盤試験が実施されるが、実施上での制約から試験面積で0.4m² 足らずにならないをえない。この測定値から写真のような広がりをもつ岩盤の性質を予測しなければならないところに問題の困難さを宿している。したがってこの種の問題は、岩盤試験による実測調査が進められると同時に、より広い岩盤の性質に関連した基本要素の研究が必要であろう。

岩盤破壊はそれを構成する岩石の強さによるよりも既往

の分離面を中心に生ずることが多い。特に斜面破壊は分離面の存在が決定的である。また、ダム基礎のような大型基礎の破壊も分離面に依存する度合いが大きい。このような意味から、本文は分離面の有する性質のうち、とりわけせん断強さに大きな影響を及ぼす分離面の表面形状の調査方法とその実態、および表面形状とせん断特性の関連について、花コウ岩の資料を中心に述べたものである。

2. 表面形状・アラサの測定方法

分離面上の凹凸性はさまざまな寸法（微視的寸法から数m単位のうねり状まで）のものから成り立っているため、測定は対象物の大きさによって変えなければならない。

(1) 岩盤露頭における表面形状・アラサ測定

断面曲線を測る方法：いくつかのものが考案されている。最も簡単な方法は図-1(a)のように岩盤表面に、ある長さの基準線を当て、これと表面の間隔の変化を記録する方法である。レンジャース(Rengers)¹⁾ は基準線長を20~200cmの表面アラサ計(Profilograph)を開発している。これは深さを実寸で、長さを1/5に自動的に縮尺するものである。筆者らは基準線長を100cmとし、それに直角にあてた鉄心を手でスライドさせながらその動きを1:1で直接



写真-1 花コウ岩の露頭 シールディングジョイント他2系列の分離面が顕著、高さ約60m、愛媛県大島荒々鼻

* 工博 埼玉大学助教授 理工学部建設基礎工学科

** 理博 埼玉大学教授 理工学部建設基礎工学科

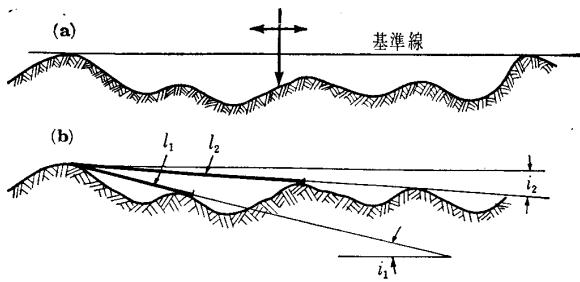


図-1 表面の形状・アラサ測定方法の原理

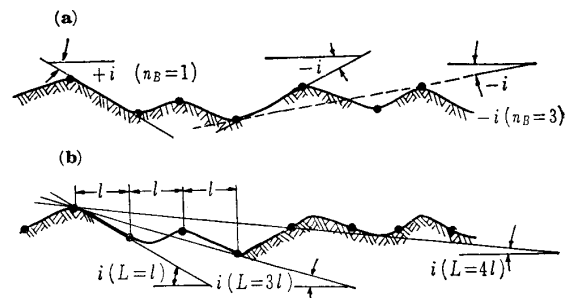


図-2 断面曲線の表示方法

記録する方法で測定を試みた。この方法で数mm程度までのアラサが測定できる。他方、分離面に直角方向から写真を取りこれを解析する方法、ステレオ写真を利用する方法などが試みられている。

クリノメータなどの利用：地層面などの方位・角度の測定に用いるクリノメータや、コンパスが利用される。フェッカ、レンジャース (Fecker, Rengers)²⁾ はコンパスに円板 (base plate) を取り付け、その円板を分離面上にランダムに当て、そのときの走向・傾斜を多数点測定して、表面アラサ角の分布と円板寸法との関係を求める方法を採用した。円板の寸法は4種類 (5.5, 11.0, 21.0, 42 cm) を選び、寸法と角度の関係 (図-1 (b)) を求めた。

(2) 供試体表面のアラサ測定

触針型などで低倍率用の表面アラサ測定器や、深さ測定用立体顕微鏡など、一般に市販されている測定器が利用できる。

3. 表面形状・アラサの表現方法

一般に固体表面は、取り扱うスケールに応じてさまざまな形状・アラサが現われる。これらの形状・アラサは複雑な形と分布をもち単一のインデックスでは表現できない統計量の性質である。

金属などの切削加工面の形状誤差の表現に対してはいくつかの表現方法が規定 (JIS・B・0101, 0610, 各1970) され、いずれも高さに関する単位で表現している。すなわち、最大高さ、10点平均アラサ、中心線アラサなど、また形状誤差のうち周期の比較的短いものをアラサ、長いものをウネリと区別している。一方、岩盤の場合は切削面のような規則正しい周期性が顕著でないこともあって独自の表現方法が工夫されている。

断面曲線の表現：任意の基準線長に対して図-2のような曲線が求まると図-2 (b) のように基準線のある単位長さで等分し各区間上での直線のコウ配を求める方法¹⁾ と図-2 (a) のように変曲点間を割線で結びそのコウ配を求める方法²⁾ が提案されている。いずれも区間長さを順次大きくとり、たとえば後者では変曲点の間を順次とばして角度を求めることにより、長さに対する角度分布を求めることができる。レンジャースは図-3のように、パートンは

Asperity Base (A. B.) を次式で定義して A. B. に対する角度分布を求めた。

$$A. B. = (n_B / N) \times 100\%$$

ここにNは基準線長に含まれる変曲点数であり、 n_B はコウ配を求めた変曲点間の変曲点数より1小さい数である。

図-2 (a) 参照。

クリノメータなどで測定した場合：単位長さ (base plate の直径に相当) に対して、それぞれ多数点の3次元的な方位が求まるので、これをステレオ投影法で等面積ネット上に、図-4のように表現する。単位長さに対する角度分布範囲が求まる。図から分離面上における任意の方向に対する角度分布が図-3と同様に求まる。図-4の各閉曲線は各 base plate について測定した角度範囲である。

4. 花コウ岩分離面の表面形状・アラサ測定例

花コウ岩節理面上に図-1 (a) の方法で基準線長さ 100 cm をとり計75測線について現地測定した。場所は愛媛県越智郡の大島で、同島からは大島みかげと称する良質の石材を産出している。測定は面の走向と傾斜の2方向とした。断面曲線の例を図-5に示す。同図の下の欄には比較の意味で試験片の微小区間のアラサの例を示してある。分離面の性状の一例を写真-2に示す。

まず、形状の規則性の有無を調べる目的で各断面曲線に

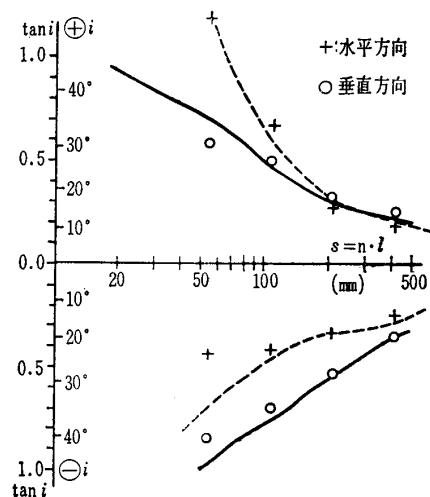


図-3 単位長さ (n・l) に対する最大アラサ角の分布¹⁾

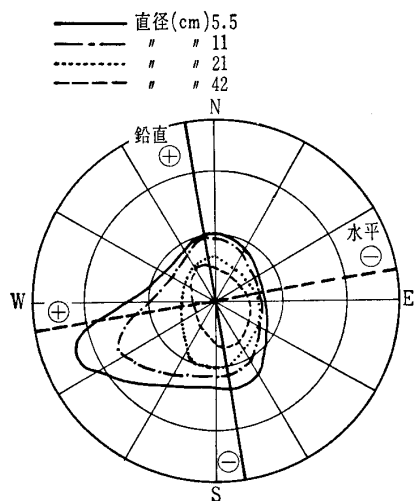


図-4 地質調査用コンパスによる調査結果の表示
直径の異なる測定円板ごとのアラサ角の分布範囲



写真-2 節理面の表面性状 大島 (愛媛県: 余所国)

みられる大小の波の深さと幅の関係 (隣接する、上に凸の変曲点間、たとえば図-1(b)の l_1 は小さい波の幅を与え l_1 に垂直の最大深さをとる) を求めたものが図-6である。この関係は方位別に区分して表示しなければならないが大局的な傾向を知るため、および対象が均一な花コウ岩であるので一括表示した。図-6は波の幅と深さには全体的に比例関係があることを示している。このことは、表面の凹凸は複雑ではあるが基本的には、相似関係にある大小の凹凸が互いに重なり合っていてできているとみてもよく、したがって平均的には基準線長 (波長) が L で i の傾斜がある場

合は $(1/2)^n \cdot L$ の波は n_i の角度をもつことになる。以上は分離面の形成が、上記のアラサにおいては同一の機構のもとになされたことを推定させる。

つぎに図-2(a)に示す断面曲線上の各変曲点間を結ぶ直線コウ配の分布を求めた。3. に述べたように各A. B. に対する角度の計算は、1測線ごとに同一の n_B について i の分布が求まるので、その平均値および標準偏差を求めた。解析では計算の都合上、測定点 80cm 区間について求めた。図-7はこの結果を示しており、各A. B. に対する平均角度と平均角に標準偏差を加えた値でプロットしてある。全測線のデータをプロットしたためバラツキが大きいが、全体の傾向、および上限線に注目すると、この岩盤のA. B. と i の関係の特徴、すなわちA. B. の増大に従い i が急に

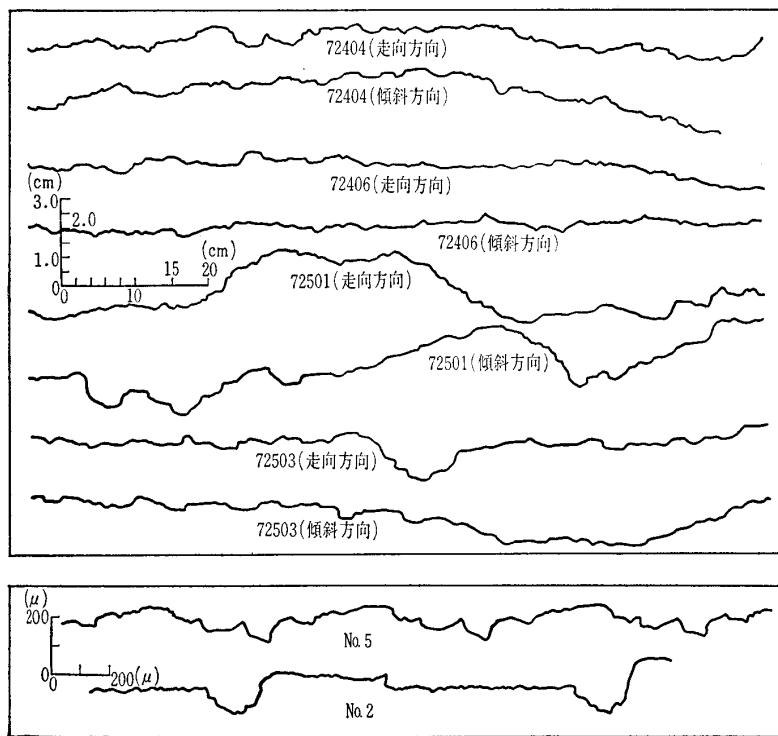


図-5 自然節理面上の形状アラサの測定例。上段は縮小図 (縦: 横=4: 1), 下段は拡大図 (縦: 横=1: 1)

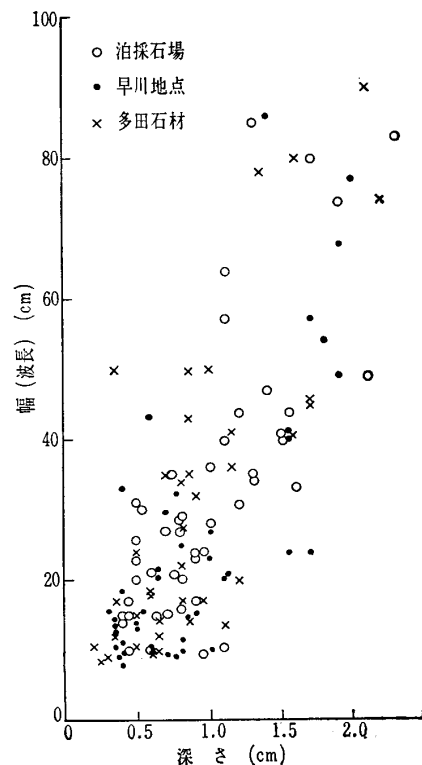


図-6 断面曲線上の凹凸部の幅と深さの関係

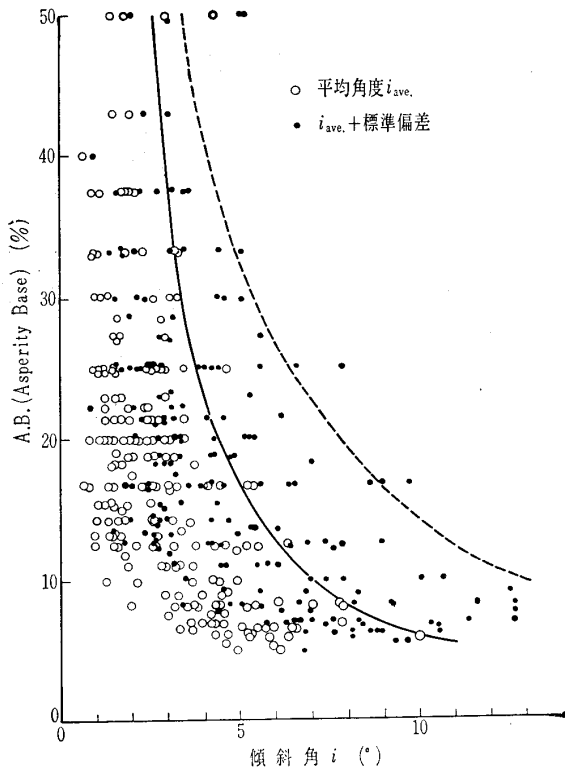


図-7 A. B. (Asperity Base) と傾斜角の関係

減少することがわかる。A. B. = 50% は約 80 cm の長さ
に相当している。

図-8 は図-2 (b) の方法で各単位長さごとの最大角度
(ただしピーク値の一段下の値とした) および平均角度を
求め、半対数グラフ上に長さとの関係で示している。
バラツキはあるが同一測線では両者は直線関係にある。こ
の解析は基準線長を 100 cm としているので単位長さが 100
cm のとき $i=0^\circ$ である。この単位長さもさらに大きい波
長にのると考えられるが、この場合は図-8 の関係がさら
に大きい単位長さにもあてはまるものと仮定すれば、必要

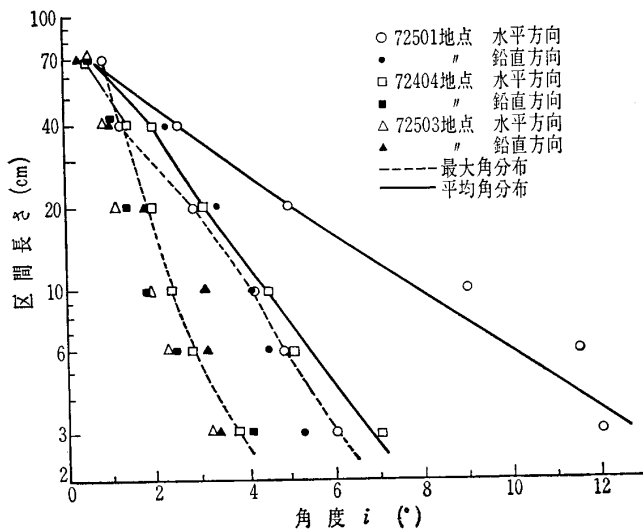


図-8 単位区間長さを異にする場合の角度分布

とする長さまでこの関係を図上で平行移動すればよい。フ
ック (Hoek) は 10 m で $i=0^\circ$ としたときの直線関係が
5. で述べるパルトンの i_e と垂直応力関係に相当するもの
と予想し斜面設計に用いることを提案⁹⁾ している。

5. 分離面の表面アラサとせん断特性に関する考 察

岩盤分離面の凹凸性とその面に沿うせん断強さに大き
く影響することはモデル実験と斜面調査によるパットン
(Patton) の研究⁵⁾ で初めて明確に示された。この概念を模
式的に示したものが図-9 である。すなわち垂直応力が材
料の強さに比較して十分に小さいときのせん断は、主とし
て角度 i の分離面上のスベリとして生じ、一方垂直応力が
十分に大きい (たとえば一軸圧縮強さより大きい) ときは
角度 i には関係なく材料自身のせん断で生ずる。この結果、
分離面を含む岩体のせん断強さを表わす $\tau_f - \sigma$ の関係は
図-9 の 2 本の実線で示され、前者はスベリ面上の応力条
件から

$$\tau = \sigma \tan(\phi_b + i)$$

後者は材料自身のせん断強さで表わされる。ここに ϕ_b
はクーロンの摩擦角である。

しかし実際の分離面における凹凸は前節にみたようにき
わめて複雑であり、どのような関係で上式と結びつくかが
問題である。従来の研究³⁾⁶⁾⁷⁾ では $\tau - \sigma$ の関係は図-9 に
点線で示したような 2 本の線を結ぶ曲線であり、したがっ
て各 σ における i 、すなわちダイレーション角は、作用す
る σ に見合った特定の値 (有効アラサ角 i_e) が選択的に現
われせん断強さは、凹凸上のスベリと岩質部分のせん断が
重なったものとなる。以下では各垂直応力下における有効
アラサ角、およびせん断強さに対するせん断面の寸法の影
響 (寸法効果) を中心に述べる。

先に図-5 に見たように数次のオーダーにわたるアラサ
が重なった面がせん断力を受けるとき、面のアラサがせん
断特性にどのようにかわるかを花コウ岩供試体による室
内実験⁸⁾⁹⁾ にみる事ができる。図-10 は各種のアラサを
持つ新鮮な花コウ岩の人工分離面に 0.2~120 kg/cm² まで

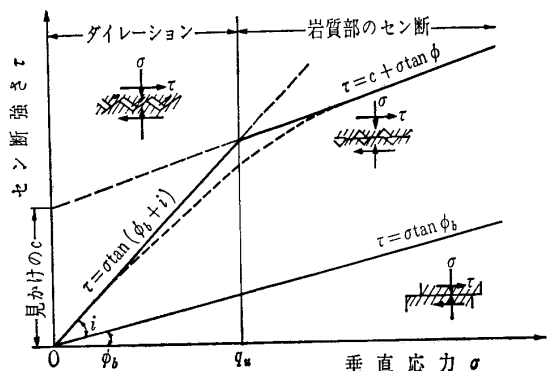


図-9 節理面のせん断モデル

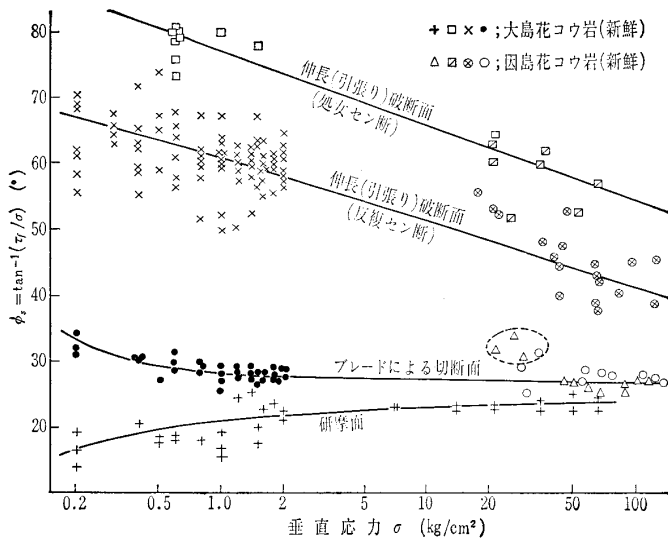


図-10 割線摩擦角 ϕ_s に対する垂直応力の影響⁹⁾

の σ を加えたときのせん断強さを $\phi_s(\tan^{-1} \tau/\sigma)$ で示したものである。 $\tau_f-\sigma$ グラフ上では $\sigma=0$ のとき $\tau_f=0$ であるので ϕ_s は各 σ における破壊曲線の割線コウ配である。試料は一軸圧縮強さが $1000\sim 1700 \text{ kg/cm}^2$ 、せん断面積は約 28 cm^2 、また各試験面の形状はつぎのようである。伸長引張り破断面は圧裂および2点載荷試験で作ったもので表面は 1 cm 程度の波長の上にさらに結晶粒子破断面のアラサが重なる。

切断面はダイヤモンドブレードで切断したもので最大 30μ のアラサがある。波の上面高さは均一であるので凹凸のかみ合わせは生じない。研摩面は鏡状である。試験面はいずれも湿潤面とした。

ϕ_s に対する σ の影響は複雑であるが概略つぎのように考えることができる。伸長破断面の第1回せん断と反復せん断の差は、面上で急角度でまじわる凹凸部分のせん断によるもの、反復せん断とブレードによる切断面の差は主に表面形状による効果である。研摩面の ϕ_s が σ とともに増大するのは従来からも知られているように平滑な固体面間の摩擦にみられる不純物膜によるものと考えられる。

つぎに伸長破断面で著しい形状効果を示したせん断で、どの程度ダイレクションを生じたかを実測変位 (水平 dh 、垂直 dv) から $\tan^{-1}(dv/dh)$ を求めこれを有効アラサ角 i_e として、先の ϕ_s との関係をもとめてものが図-11である。図にはバートンの石膏モデルによる実験値³⁾ を併記している。これは伸長破断面に対する第1回せん断のピーク強さである。花コウ岩のデータ (丸印) は反復せん断による値である。切断面は実質的に $i_e=0^\circ$ であるので全体のデータは、ほぼ点線の範囲に分布することになる。伸長破断面で i_e が小さくなる範囲は、大きい σ を作用させた部分に相当するが、この領域の測定値は装置の不備のため得ていない。図-11から i_e が 40° を越える異常に高い部分を除くと ϕ_s には i_e の最大2倍に相当する凹凸の効果があり、

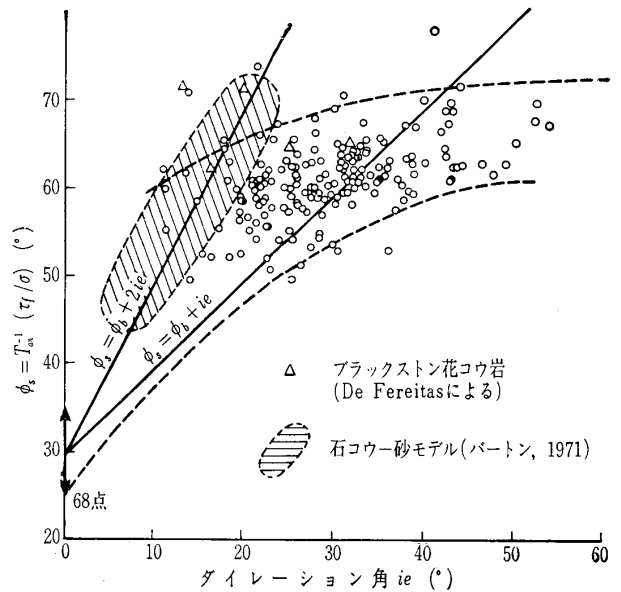


図-11 最大せん断応力時のダイレクション角と ϕ_s の関係

反復せん断にあっても単純なスベリ ($\phi_s = \phi_0 + i_e$ となるケース) のみが生ずることは少なく、かみ合わせ部分のせん断が加わっていることがわかる。

バートンは引張り破断面のようなあらい面のピークせん断強さの i_e は統計的につぎの関係³⁾ になるとしている。

$$i_e = 20 \log_{10} \left(\frac{\sigma_c}{\sigma} \right)$$

ここに σ_c は面を構成する材料の一軸圧縮強さである。この式は20がアラサによる係数で $\log_{10}(\sigma_c/\sigma)$ が垂直応力による低減率に相当する。斜面の安定解析による調査によると σ_c を $1/4$ に低下させて求めたときの i_e が実際の安定性条件によく適合するとしている¹⁰⁾。これは、つぎに述べる寸法効果の問題とも関係してくる。

同一アラサと材質を有する分離面上に、等しい σ が作用した場合のせん断強さは、せん断面積の増大に従ってピークせん断強さが現われなくなり、反復ないし残留せん断強さに漸近する。このことはいくつかの実測例で明りように示されている。応力-変位関係では石英せん断緑岩中の節理の実験¹¹⁾ がその典型的なものであり $\tau-\sigma$ の関係は石灰岩中の節理を用いた大型の原位置せん断試験(せん断面積 4.4 m^2)¹²⁾ に良く特徴が示されている。図-12、図-13はこれを示したもので、面積の増大による影響がピークあるいは見かけの粘着力の消失、いかえれば高次のオーダーの急角度の凹凸からなるかみ合わせ部分のせん断強さへの影響が寸法の増大に伴って減少することを物語っている。

一般に分離面間の真の接触面積 (At) は全面積 (A) に比べてきわめてわずかな部分であって、その比 (At/A) は、面に作用する垂直応力 σ (平均) の関数で表わされ σ の増大によって比例して増大する性質がある¹³⁾。この性質は分離面における高次のアラサ部分にせん断面積の増大による

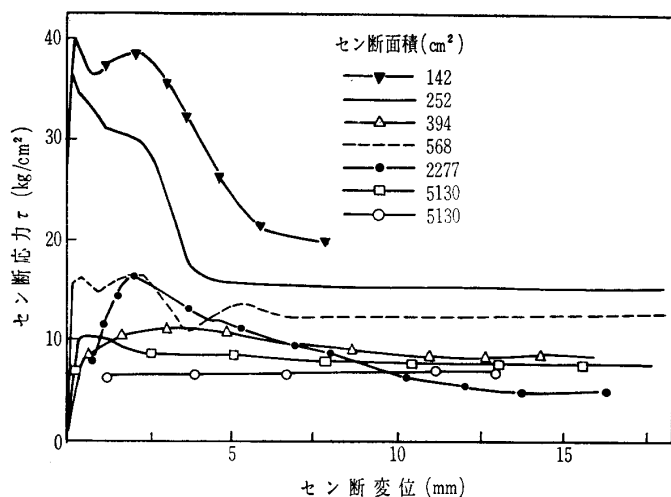


図-12 セン断面積が異なる場合のせん断応力-変位関係¹¹⁾
石英セシ緑岩の節理面、すべての試験面は載荷軸に
対して45°傾く。

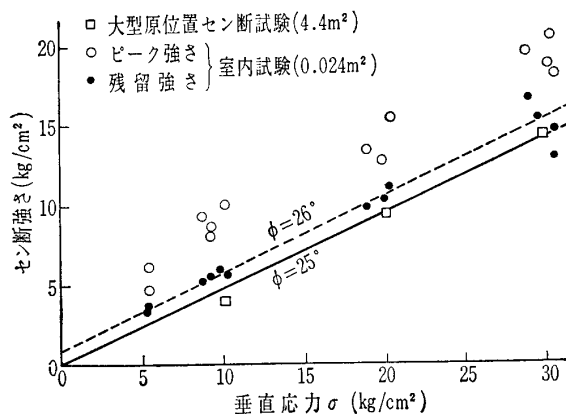


図-13 セン断強さに対するセン断面積の影響

応力集中の増大を生じさせ、その結果として容易に接触部の変形・進行性破壊を引き起こすものと考えられる。このようにしてセン断面積が増大した場合、せん断特性への影響は高次のアラサから、より低次のアラサへと移行することになる。

パットンおよびディア(Deere)は、砂岩および石灰岩からなる斜面の安定性の研究¹⁴⁾から岩盤分離面のせん断強さは、大きな第1次のオーダーの凹凸に対応する、より低い凹凸角に密接に関係することを明らかにし、またフック(Hoek)¹⁵⁾はスペインの露天掘鉱山(Rio Tinto Espanola's Atalaya Mine)の斑岩の斜面(高さ数10~約130m)で崩壊斜面9地点の解析を行ない、岩盤の破壊に対応する供試体せん断試験値はピーク強さではなく残留強さであると結論している。

バートンも同じ斜面の解析で彼の有効アラサ角 i_e の算定式で一軸圧縮強さを $1/4$ として導いた値(モデル実験では一軸圧縮強さそのものを用いて i_e が求まる)が斜面の破壊を合理的に説明するとしている³⁾。

このような現地岩盤の解析例は、いずれも寸法効果によるせん断強さへの影響が先に述べたような同一の現象に基づいて現われたものと考えられることができる。

6. あとがき

岩盤の性質を支配する基本要素の一つとなる節理などの分離面の形状・アラサの測定とせん断強さの関連を花コウ岩の資料を中心に述べた。この種の問題は複雑な岩盤の性質を解明するのに必要な基礎資料を提供する。しかし現状では表面形状の測定方法が十分開発されているとはいえず、また大寸法の分離面の性質と室内あるいは通常規模の原位置試験結果との対応をつけにくいなどの難点がある。しかし地質分離面が卓越する地盤の破壊はこのような分離面を中心に生ずることは良く知られている。原位置岩盤試験の最初の国際基準(ISRM)案が分離面のせん断強さの測定をねらって作成された意図もここにあると思われる。

本文は上記問題の一端に触れたのみである。今後とも、このような見地からの研究が望まれる。最後に本文の花コウ岩の分離面の形状測定・解析に協力いただいた石井宏幸君(現東京ガス)に厚くお礼申し上げる。なお本研究の一部は本四公団よりの受託研究費によった。

参考文献

- 1) Rengers, N.(1970): Influence of the surface roughness on the friction properties of rock planes, Proc. 2nd Congr. of ISRM, Vol. 1, 229-234.
- 2) Fecker, E., Rengers, N.(1971): Measurement of large scale roughness of rock planes by means of profilograph and geological compass, Sympo. of ISRM, Nancy, I-18.
- 3) Barton, N.R.(1971): A relationship between joint roughness and joint shear strength, Sympo. of ISRM. Nancy, I-8.
- 4) Hoek, E., Bray, J. (1974): Rock Slope Engineering, The Institution of Mining and Metallurgy, 81-87.
- 5) Patton, F.D. (1966): Multiplemode of shear failure in rock, Proc. 1st Int. Cong. of ISRM, Vol. 1, 509.
- 6) Jeager, J.C. (1970): The behavior of closely jointed rock, Proc. 11th Sympo. Rock Mech. Berkeley, 57-68.
- 7) 吉中・萩野・新井(1972): 規則的な凹凸をもつ連続性節理面の強度的性質, 第7回岩盤力学に関するシンポジウム, 51.
- 8) 吉中・古田(1974): 花こう岩分離面のせん断強度特性, 応用地質, Vol. 15, No. 2, 58-68.
- 9) 吉中・石井(1975): 花こう岩分離面のせん断特性に及ぼす表面性状と垂直応力度の影響, 応用地質, Vol. 16, No. 2,
- 10) Barton, N.R. (1971): Estimation of in-situ shear strength from back analysis of failed rock slopes, Symp. of ISRM, Nancy, II-27.
- 11) Pratt, H.R., Black, A.D., Brace, W.F. (1974): Friction and deformation of jointed quartz diorite, Proc. 3rd Int. Cong. ISRM, Vol. 2, 306-310.
- 12) Londe, P. (1973): The role of rock mechanics in the reconnaissance of rock foundations, Q.Jl. Engng Geol. Vol. 6, pp. 55-74.
- 13) Duncan, N. (1969): Engineering Geology and Rock Mechanics, Vol. 2, Leonard Hill, London.
- 14) Patton, F.D., and Deere, D.U. (1971): Geologic factors controlling slope stability in open pit mines, Proc. 1st. Int. Conf. on Stability in Open Pit Mining, 23-48.
- 15) Hoek, E. (1971): Influence of rock structure on the stability of rock slope, Proc. 1st Int. Conf. on Stability Open Pit Mining, 49-64.
- 16) 桑原, 佐藤(1975): 規則的な凹凸をもつ割れ目のせん断特性, 土木技術資料, Vol. 17, No. 8, 16-20.

(原稿受理 1975. 10. 13)