

岩石の内部摩擦角

あ だ と し ひ
足 立 紀 尚*

次式で与えられるクーロン (Coulomb) のせん断強度規準を岩石材料の破壊規準に適用したとき、求まる摩擦角 ϕ を岩石の内部摩擦角という。

$$s = c + \mu \sigma_n = c + \sigma_n \tan \phi \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 s : せん断強度、 c : 粘着強度、 μ : 摩擦係数、 σ_n : 垂直応力、 ϕ : 摩擦角である。

(1)式は“2物体間の摩擦力は摩擦面に働く垂直力に比例し、見掛けの接触面の大小に関係しない”，という1776年のクーロンの研究と“摩擦力は垂直力に比例する真の摩擦力と垂直力に無関係な粘着力から成る”ことを示したビンチ (Vince) の研究に基づいており、摩擦角はクーロン以前、18世紀初頭にパラン (Parent) によって導入されている^{1),2)}。このように(1)式はあくまでも2物体間の摩擦現象についての実験式であって、以後の研究にもかかわらずその物理機構が完全に解明されてはいないことを認識する必要がある。

したがって“岩石の内部摩擦角とは?”は“(1)式が岩石のせん断強度規準として適用できるか?”との間に答える現状にあると考える。

岩石の強度規準を調べるとき三軸試験によることが多い。図-1のように最大主応力 σ_1 と最小主応力 σ_3 の作用する供試体内に、最大主応力軸と α の角度を成す潜在的なせん断面を考える。その面に作用する垂直応力 σ_n とせん断応力 τ はモール (Mohr) の応力円を利用して決定できるのは周知のことである。もし、せん断破壊が(1)式で規定されるなら、図-1のように破壊時のモールの応力円は(1)式の

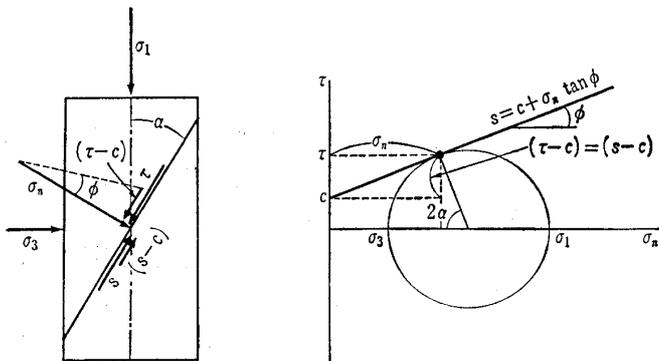


図-1 供試体内の応力状態とモールの応力円表示

直線と接し、 $\tau = s$ を満足する場合で、応力や角度などの中には図に示す種々の関係があり、 $\tan \phi = (s - c) / \sigma_n$ や $\alpha = 45^\circ - (\phi / 2)$ が成立することも明らかである。

さて、岩石の破壊規準として(1)式が唯一的に成立するのだろうか。図-2は軸差応力-せん断ひずみ関係と体積ひずみ-せん断ひずみ関係を模式的に表している。拘束圧が対象とする岩石特有の遷移拘束圧 σ_3^T 以上か以下で異なる挙動を示し、遷移拘束圧以下の低拘束圧下では通常破壊強度とする最大強度とそれと値の異なる残留強度の二つが求まるが、拘束圧が遷移拘束圧以上になると、残留強度は最大強度にほぼ等しくなる。また、残留強度はせん断応力も体積もそれ以上には変化しないで、単にせん断変形のみが継続する状態であって、特に低拘束圧下においてはせん断による破断面が生じ、それに沿ってすべっている状態でもある。

図-3には(1)式を検証するため凝灰岩(大谷石)の最大強度と残留強度に対するモールの応力円と包絡線を示しており、この結果は他の岩種に対しても定性的に変わらない³⁾。なお図中にこの岩石に対する遷移拘束圧に対応する応力状態 (σ_n', τ) を示しているが、遷移拘束圧 σ_3^T はこの点を通る応力円から約 $\sigma_3^T = 30 \text{ kgf/cm}^2$ として求まる。最大強度、残留強度双方に対する破壊包絡線いずれも非線形の曲線であって、クーロンの規準は c, ϕ を一定とする限り直線となるから適用できないことは明らかである。また、非線形

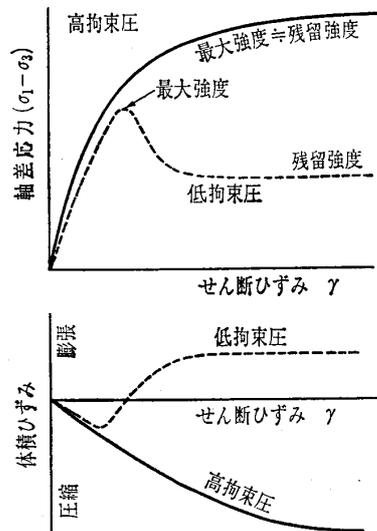


図-2 岩石の応力-ひずみ関係

*ph.D 京大助教授 防災研究所

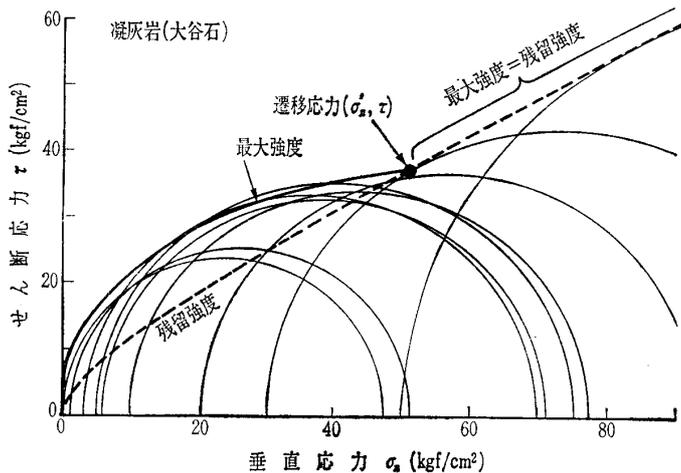


図-3 凝灰岩の最大残留強度に対する破壊包絡線³⁾

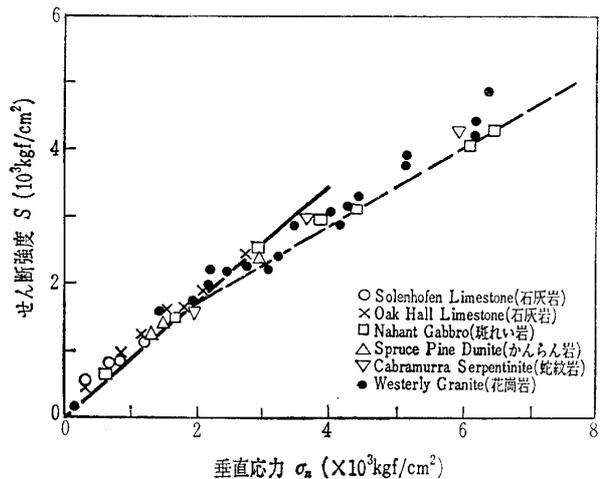


図-4 摩擦強度(≒残留強度)の拘束圧依存性 (バイヤリーによる)⁴⁾

性は最大強度に対して著しく、破断面に沿ってすべている状態の残留強度(摩擦強度)では近似度はよく、クーロン式が2物体間の摩擦現象を対象とした基本に戻ると理解しやすい。

バイヤリー(Byerlee)⁴⁾は種々の岩石を用いて、既存の地質分離面や人為的に切断した切断面に沿う摩擦強度(≒残留強度)を調べ図-4の結果を得ている。摩擦強度は岩種に関係せずほぼ等しいという興味ある結果とともに図-3と同様、拘束圧の広い範囲にわたっては(1)式が唯一的には適用できないため図に示す2本の直線、すなわち $s = \sigma_n \cdot \tan 40^\circ$ ($0 \leq \sigma_n \leq 2000 \text{ kgf/cm}^2$) と $s = 5000 + \sigma_n \cdot \tan 30^\circ$ ($2000 \text{ kgf/cm}^2 \leq \sigma_n$) のように c, ϕ が拘束圧の範囲により変化するとして、(1)式の適用を考えている。

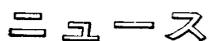
このように(1)式は岩石の破壊規準として広範囲な拘束圧のもとで唯一的に成立するものではない。換言すると(1)式の適用はあくまで建前であると理解する必要がある。した

がって、(1)式を用いる場合には対象とする問題において想定される拘束圧の範囲を考え、非線形な破壊包絡線を直線で近似することにより内部摩擦角 ϕ と粘着力 c を決定することになる。この際、図-3に示すような下方に凹な破壊包絡線を直線で近似するため、適用を限定した拘束圧の両端部で強度を過大に評価しがちである点は留意を要する。

参考文献

- 1) 曾田範宗：摩擦の話，岩波書店，1971
- 2) 柴田 徹：土のプロフィール，土質工学入門，土質工学会，pp.29-33，1977
- 3) 足立紀尚・林 正之：軟岩の力学特性に及ぼす不連続面の影響，土木学会論文報告集投稿中
- 4) Byerlee, J. D.: The Fracture Strength and Frictional Strength of Weber Sandstone, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 12, pp.1-4, 1975

(原稿受理 1980. 1.12)



富樫元会長が

“IRF マン・オブ・ザ・イヤー賞” に輝く

当学会名誉会員 第9回国際土質基礎工学会議日本組織委員会委員長 元会長富樫凱一氏が、道路交通の発達への国際的・国家的な貢献で1979年の“IRF(国際道路連盟)マン・オブ・ザ・イヤー賞”の栄に輝き、さる1月21日ナイロビのケニヤッタセンターで開催されたIRF第4回アフリカ道路会議の席上晴れの栄誉を受賞されました。「マン・オブ・ザ・イヤー賞」は、IRFの最高の栄誉であり、過去29年間にわたり道路および道路交通の発達について特別の貢献をした人に対し、毎年1名ずつ贈られてきました。

富樫氏の今回の栄誉は、同氏の多年にわたる、道路部門における国家的ならびに国際的な指導者としての顕著な功績が高く評価され認められたものであります。

日本人としては、昭和35年に当時日本道路公団総裁であられた岸道三氏が受賞されて以来2人目であります。

当学会に多大のご貢献をいただいた富樫元会長の今回の栄誉を心からお慶び申し上げ、今後の一層のご健勝とご活躍を期待し会員の皆様とともに心からお祝いいたしたいと存じます。

(社団法人土質工学会)