III-19　粒子破砕がせん断特性に与える影響について

神戸大学工学部　正員○軽部大蔵
復建調査設計K.K.　寺井久史

研究の目的

礫やロック材などの高圧下におけるせん断挙動を一般に普及している低圧・小型の三軸圧縮試験機を用いて推定することが研究の目的である。これらの材料は大型の高圧三軸試験機を用いるのが最良であることは勿論であるが、一般に労力・時間・費用がかかるので細粒土のように日常的試験として行ないにくい。そこで、これら粗粒材料のせん断特性を通常の試験機を用いて推定する方法を若干の考察と実験によって検討した。

予備的考察

まず、低圧下における土のせん断特性についてわかっている事柄のうちで高圧下の粗粒材料のせん断特性に関係しそうな部分を整理すると、土要素のせん断特性は要素を構成する土粒子の表面の性状（摩擦係数 $\tan\phi_\mu$）と巨視的な変位特性（ダイレイタンシー）に支配されるものである。前者については、Caquot や Bishop が土要素の残留せん断抵抗角 ϕ_{cv} と表面摩擦係数 $\tan\phi_\mu$ の間に成立する簡単な式を提案している。

後者については土要素の応力・ひずみ関係式が ϕ_{cv}, C_c, C_s などの力学定数と I_p などの物理定数をパラメーターとして組み立てられている。これは構成方程式と呼ばれるもので多くの式が提案されているが、大抵の式は意識的に、あるいは結果的に、土要素に出入するエネルギーの釣合式を利用して導かれている。つまり土要素に外部から加えられる仕事分 $\delta E'$ は、内部的に消費される塑性仕事分 δW と弾性的に蓄えられるエネルギー δU の和に等しいと考えて

$$\delta E' = \delta W + \delta U \qquad (1)$$

簡単のために、軸対称圧縮状態（$\sigma_1' \geqq \sigma_2 = \sigma_3$）におかれた等方材料（$\delta\varepsilon_2 = \delta\varepsilon_3$）について考えると、$q = \sigma_1' - \sigma_3'$, $p = (\sigma_1' + 2\sigma_3')/3$, $\eta = q/p$, $\varepsilon = \varepsilon_1 - (v/3)$, $v = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_3$ とおいて

$$(\eta p \delta\varepsilon + p\delta v) = \delta W + (\eta p \delta\varepsilon^e + p\delta v^e) \qquad (2)$$

ここに添字 e は弾性成分を表わす。上式において、$\kappa = C_s/2.3$, e_1：基準間隙比, M を ϕ_{cv} に対応する η とし、$\delta v^e = \{\kappa/(1+e_1)\}\delta p$, また $\delta\varepsilon^e = 0.166M^{1.5}\delta\varepsilon$（文献1）とおくと、

$$\eta = \frac{1}{1-0.166M^{1.5}}\left\{-\left(\frac{\delta v}{\delta\varepsilon}\right) + \left(\frac{\kappa}{1+e_1}\cdot\frac{\delta p}{\delta\varepsilon}\right) + \frac{\delta W}{p\delta\varepsilon}\right\} \qquad (3).$$

一方、実験的には、

$$\eta = -a(\delta v/\delta\varepsilon) + b \qquad (4)$$

という直線関係が、三軸試験の全領域について成立する。同様の式は初期間隙比や側圧を変えた三軸試験のピーク強度（η_{peak}）点においても成立している。したがって、式3, 4を組み合わせると

$$\delta W = \{1 - a(1-0.166M^{1.5})\}p\,dv + (1-0.166M^{1.5})\,b\,p\,\delta\varepsilon \qquad (5)$$

が得られる。

さて、高圧下で土がせん断されるときは土粒子は著しく破砕されるが、この傾向は大きな粒子ほど著しいと思われる。したがって、高圧下でも式(4)が成立するかどうか疑問が生じる。この点について、三浦氏は高圧下の豊浦砂について(4)式が成立することを示された（文献2）。高圧下における式4の定数 a, b が低圧下にも適用できるかどうかを同じ論文のデーターから計算してみると、ある側圧を境にして急激に破砕が生じているにもかかわらず、a, b はすべての圧力を通じて一定値を保っていることがわかった。（この事実は、粒子破砕に伴なうエネルギー消費分が、破砕に至るまでに蓄えられた弾性エネルギーの放出でまかなわれていることを示している。）つぎに、同じ鉱物でも粒径が違えば、式4の定数が変化することが考えられる。ところが、式5を見ると b は粒子表面の摩擦係数 $\tan\phi_\mu$ の地位を占めている。表面摩擦係数は粒径にはよらないから、定数 b は粒径に

よって変化しないと仮定できるであろう。以上の考察から，少なくともピーク強度については研究目的は次の方法で達せられる可能性があると思われる。

粗粒材料の高圧下におけるせん断強度の推定法（仮説）

いくつかの材料について，ロサンゼルスすり減り試験法など，すでに規格化されていて，容易に行なえる方法で「破砕のされ易さ」を定量化し，それらについて広い側圧範囲に亘って三軸試験し，ピーク強度における $(\delta v/\delta\varepsilon)_{peak}$ を実測する。試験結果を「破砕され易さ～側圧～$(\delta v/\delta\varepsilon)_{peak}$」関係にまとめる。これは標準曲線とも呼べるもので，たとえば図-4のようにまとめ，式6のように表示される。一度(ひとたび)この標準曲線が作られると，個々の与えられた材料の高圧下におけるピーク強度は，つぎの様な手順で推定される。(i) 材料の破砕され易さを規定の試験法で求める。標準曲線から側圧に応じた $(\delta v/\delta\varepsilon)_{peak}$ を読みとる。(ii) 手近かな三軸試験機に適用できる粒度になるまで材料を粉砕し，低圧のもとで式4の定数 a，b を実測する。(iii) 式4に $(dv/d\varepsilon)_{peak}$ と a，b を代入して η_{peak} ＝ピーク強度を得る，ということになる。

予備的実験

大型三軸も高圧三軸も手許にないので，低圧でも粒子破砕を起すといわれているマサ土とシラス及び硬い粒子から成る豊浦砂の3種を通常の三軸試験機でCD試験した。試料の粒度分布は図-1に示す通りである。また，ロサンゼルスすり減り減量は，豊浦砂 1.9％，シラス 14.0％，マサ土 16.3％（ただし，JIS A 1121では，1.7mmふるい残量から求めるが，ここでは0.105mmふるいの残量から求めた）である。三軸試験は飽和・ゆる詰め状態で行なった。供試体寸法は高さ80mm，直径50mm，初期間隙比は（圧密後）豊浦砂 0.65，シラス 0.65，マサ土 0.35 付近であった。シラスとマサは圧密に長時間を要したので，軸圧縮速度は0.1％/minとした。図-2は η_{peak} と $(\delta v/\delta\varepsilon)_{peak}$ の関係を示しているが，実験技術のためか乱れている。図-3は $(\delta v/\delta\varepsilon)_{peak}$ を側圧の対数目盛に対してプロットしたものであり，図-4は同じ結果を内挿法ですりへり減量(ΔW/W)の平方根目盛に対してプロットしたものである。図-3，4より

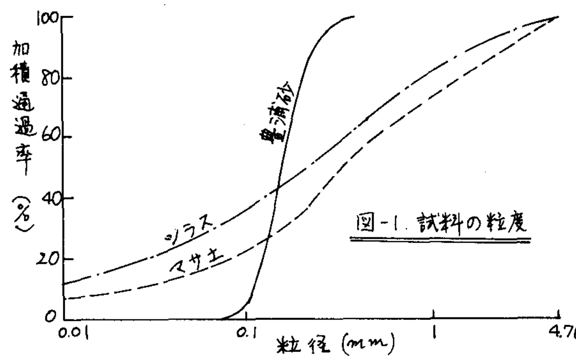
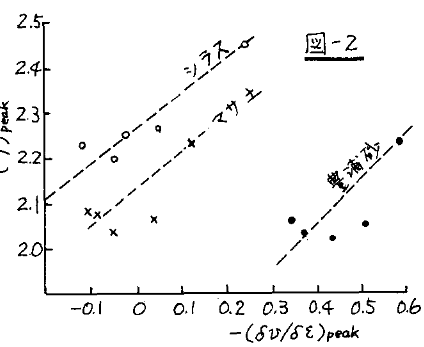
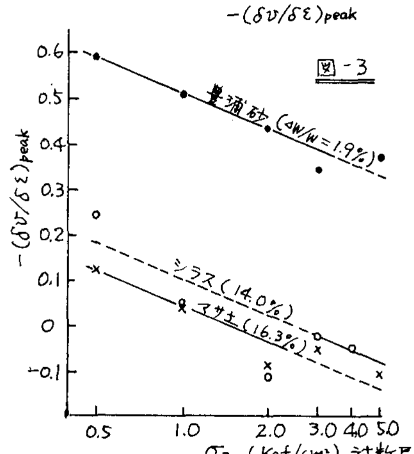


図-1. 試料の粒度

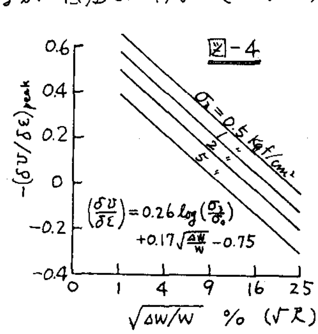




$$(\delta v/\delta\varepsilon)_{peak} = 0.26\log_{10}(\sigma_3/\sigma_0) + 0.17\sqrt{\Delta W/W} - 0.75 \quad \cdots(6)$$

σ_0：1 Kgf/cm²

という標準曲線の式が一応得られるが，低圧しか行なっていないので手順を示す例程度の意味しかない。なお，シラスは鹿児島大学の春山先生にいただいた。感謝します。



文1）矢後ほか，第33回土木学会

文2）三浦・山内，土木学会論文報告集 260号