

III-41 粒状体のせん断強さにおよぼす粒子破碎の影響について

東大工学部大学院 学生員 吉 越 洋

1. はじめに

ロックフィル材料やレキのせん断試験を行うと、ほぼ例外なく、拘束圧が大きくなるにつれて内部摩擦角の減少する傾向が認められる。筆者がレキについて行った三軸試験の場合にもこの傾向が顕著であつた。¹⁾ 砂の場合にも拘束圧を非常に大きくすると内部摩擦角の小さくなるのが既に1933年に山口昇によって指摘されており、²⁾ 最近では Bishop や鈴木らの高圧三軸試験によつても同様の結果が得られている。^{3) 4)}

モールの破壊包絡線がカーブする度合は一般に砂よりもロックフィル材料の方が著しく、また砂の場合にもマサ土のように破碎し易いものほど著しい。砂についての研究によれば、(a)密度の大きいもの、(b)粒度が均一なもの、(c)原地盤の場合には *over-consolidated* のもの、ほど著しくカーブすることが指摘されている。⁵⁾ これらの結果によれば、拘束圧が大きくなると内部摩擦角の減少することはせん断によつて粒子の破碎することと密接な関連を有するものと推察される。

元々モールの包絡線が直線であるという仮定にはあまり積極的な根拠はないようである。しかし少なくとも砂や粘土のせん断試験を小さな拘束圧の下で行つた場合にはそれがほぼ直線になるということは多くの人の認めていることであるから、ここでは一応本来は直線になるのであるが、粒子破碎に影響されて外れるのである、と考へて考察を進めてみよう。

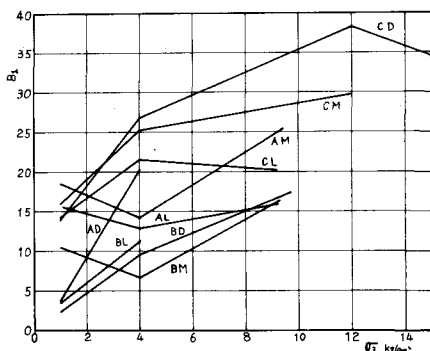
2. 破碎量

粒子の破碎による影響を数値的に論ずるには破碎量を如何なる数値で定義するかということが重要な課題となる。一口に破碎といっても二つに割れるような破碎、角がとれるような破碎等々、種々考えられるのでこれは仲々難しい課題である。ここでは試みにせん断前後の試料の粒度加積曲線から次のような二種の破碎量 B_1 , B_2 を定義してみた。 B_1 は前後の粒度曲線の間に囲まれる面積を図上で求めたもので、 B_2 は試験前の最小粒径の粒子がどれぐらい増したかを全体に対する重量百分率で表わした値である。

¹⁾ レキの三軸試験結果から、セル圧 σ_3 と B_1 , B_2 との関係をプロットしたのが図1, 2である。図中A, B, Cは材料の相違を、L, M, Dは締固めの程度の相違を示す。

直観的には σ_3 の大きいほど破碎量も大きくなるものと思われるが、その意味では B_2 の方が破碎量を適切に表わしているといえよう。材料別にはBACの順に破碎量が増しており、試料の取扱い中の観察と一致している。同一の材料では密詰めのものほど B_1 , B_2 が大きくなる傾向が認められる。また図2を見ると、BLの試験以外はすべて σ_3 が 1 kg/cm^2 から 4 kg/cm^2 になると B_2 は

図1 セル圧 σ_3 - 破碎量 B_1



急激に増大し、 σ_3 が4 kg/cm²から9~12 kg/cm²になると、Medium と Dense の試験では B_2 が増大するが、Loose の試験では B_2 はほぼ一定値を保っている。さらにMとDとを比べると、Dの方が B_2 の増し方が著しい。このように試料の初期間ギャキ比の大きさによって、セル圧の増加に対する破砕量の増し方がかなり異なることは興味深い結果である。

図2で締固めエネルギーの等しいものどうしを見較べると、 σ_3 の増加に対する B_2 の増加の割合は、試料Cが最も大きく、次いでA、Bの順になっている。このように材質によって σ_3 -B特性に差異のあることは

Marsalによっても指摘されている。彼のロックファイル材料についての試験結果によれば、堅硬な材料では σ_3 がある値に達すると、それ以後は σ_3 が増しても破砕量は増加せず一定値を保っている。一方脆弱な材料では破砕量がほぼ σ_3 の増分に比例して増加しており、他の材料はその材質に応じて中間的な性状を示している。

3. 破砕量と ν 値などとの関係

レキの三軸試験の結果を最上の関係式； $\sin \phi = \nu / (1 + e) \dots \dots \dots (1)$

で整理して定数 ν を求め、これと破砕量 B_1 、 B_2 との関係をプロットすると図3が得られる。図中●はA材料（粘板岩）、○はB材料（石灰岩）、△はC材料（風化砂岩）、である。この図で同種の材料に対応する点を見ると、破砕量が多いほど ν 値が小さくなる傾向のあることがわかる。しかし B_1 、 B_2 の値が等しい場合、Cの ν 値が最も大きく、次いでA、Bの順になっており、破砕量が同程度であっても材料が異なれば ν 値も異なることがわかる。これは粒子形状などの相違によるものと思われる。

図4は B_2 とセン断試験終了時の体積ヒズミとの関係をプロットしたものである。これは破砕量が多いほど供試体の体積が減少する傾向のあることを示している。すなわち、粒子破砕が起るとすればそれは材料をより詰まり易い粒度にするような仕方で起る、といえよう。これは当然の事ではあろうが、仲々興味深い結果である。

Bishop は密詰め材料ほどモールの破壊包絡線のカーブが著しいことから、拘束圧が増すと内部摩擦角が減ずるのは、粒子の破砕によって粒度が変わり、破壊時の体積増加の度合が大幅に減ずるからであらうと説明している。

材料の詰まり易さは粒子形状、粒度配合、粒子間摩擦の大きさ等で定まるものと思われる。粒子形状と粒子間摩擦については、形が丸くて表面が滑らかなものほど詰まり易いであらうこ

図2 セル圧 σ_3 -破砕量 B_2

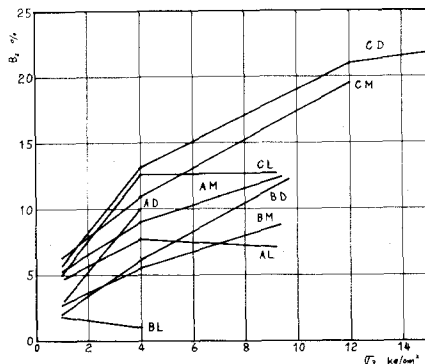
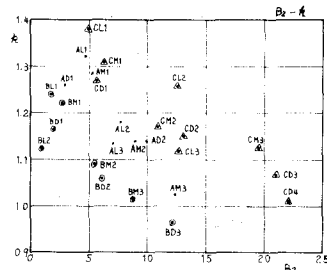
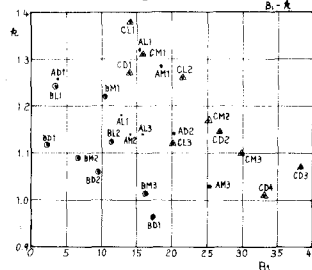


図3 破砕量- ν 値



とは想像に難くない。しかし粒度配合については事はあまり単純ではなく、粒子形状や粒子間摩擦の大きさに対してある最も詰まり易い配合、最適粒度とでもいうべき配合、が定まるものと考えられる。Bishop の高圧三軸試験の結果によれば、拘束圧がある値を超えるとモールの包絡線が直線になることが示されている。これは拘束圧が増すにつれて破砕量が増し、内部摩擦角が減少して行つて、ある拘束圧に達すると最適粒度になり、それから先は拘束圧を増しても内部摩擦角の大きさが変化しなくなるであろうことを暗示している。この点を確かめるためには更に多くの資料が必要である。また、砂岩が形成されるほどの超高压の下では事情は全く異なるであろう。今後の課題として検討したいと考えている。

4. 粒度の変化と内部摩擦角との関係

筆者らの検討によれば、粒度配合の特徴を均等係数で表わした場合、その対数 $\log U$ と最上の定数 ϕ との間に直線的な関係のあることが見出されている⁶⁾。図5はレキの三軸試験結果からセン断前後の試料の均等係数と ϕ 値との関係をプロットしたものである。実線と破線とで示されているのは、過去の検討においてロックフィル材料に対応するものとして示されている直線と領域である。この図によれば試料の初期粒度分布と ϕ 値との間にはあまりはつきりした関係は認められないが、均等係数としてセン断試験後の値を採れば、多くの点が過去に比較的小さな拘束圧の下での試験からロックフィル材料に対応するとされた領域にプロットされる。セン断中に粒子が破砕して粒度分布が変化し、この変化の大きさに応じて同じ初期状態の材料であつてもその ϕ 値に、従つて内部摩擦角にも、差異が生じてくるものと推察される。この点を数式的に検討するため、均等係数 U と ϕ 値との間に直線関係、

$$\phi = -\lambda \log_e U + \alpha, \quad \lambda, \alpha; \text{const.} \quad \cdots \cdots (2)$$

が存在するものと仮定し、破砕による粒度の変化を U の変化としてとらえて考察してみよう。図5等より、 $\lambda \approx 0.19$ となる。破砕によつて間ゲキ比が変化しないと考えれば、(1)(2)式より、

$$\Delta \phi = \frac{-0.19}{(1+e)U \cos \phi} \Delta U \quad \cdots \cdots (3)$$

が得られる。これは上のように仮定した場合、セン断中の粒子破砕によつて均等係数が ΔU だけ変化したときに内部摩擦角の大きさの変化 $\Delta \phi$ が大略どれぐらになるのかを予測する関係式である。

レキの三軸試験結果から e , U , ϕ , ΔU を求めて $\Delta \phi$ を計算すると表1ようになる。表1には実測値から求められた $\Delta \phi_r$ の値も併記してある。 $\Delta \phi_c$ と $\Delta \phi_r$ との関係をプロットしたのが図6である。図中 $\odot$ は ϕ が 1 kg/cm^2 から 4 kg/cm^2 に増したときの $\Delta \phi$ に、 $\bullet$ は 4 kg/cm^2

図4 破砕量 B_2 -最終体積とズミ

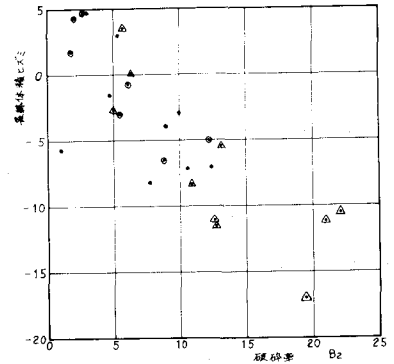
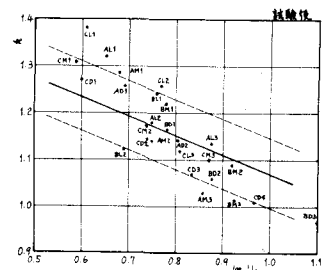
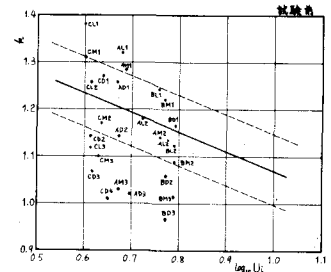


図5 $\log_{10} U - \phi$



から9~12 kg/cm²に増したときの $\Delta\phi$ に対応する点である。

図6の点はかなりばらついており、 $\Delta\phi_R$ の方が $\Delta\phi_c$ よりも大きいものが大部分である。しかし大まかに見れば $\Delta\phi_R$ の大きいものは $\Delta\phi_c$ も大きい傾向が認められるし、点はずべて第1象限にプロットされているから、少くとも定性的には両者は矛盾しない。また、●はほぼ $\Delta\phi_c = \Delta\phi_R$ を中心とする図中の破線の領域内にプロットされているが、◎はすべてその上方に外れている。ここでのデータでは厚さ3mmのゴムスリーブや、それを保護するために挿入されたボール紙の拘束の影響で、 $\bar{\sigma} = 1 \text{ kg/cm}^2$ の場合には中が実際よりも大きく出ている可能性が強いので、◎に対応する $\Delta\phi_R$ もいくらか大き目になっているものと考えられる。従って、より正確な条件の下で試験を行ってれば、◎はもっと下方にプロットされ、図中の破線の領域に入るか、近づくであろう。なおここで試験後の粒度分布と称しているのは、実は試験の供試体全体についての平均値である。セン断面付近の試料について粒度分析を行うことが出来たとすれば、 $\Delta\phi_c$ もいくらか異なる値となるであろう。以上の考察より、 e 、 U 、 ϕ の間に(1)(2)式の関係を仮定して議論を進めた場合、セン断による粒子の破砕が内部摩擦角に及ぼす影響を少くとも定性的には説明し得るといってよいであろう。また、ここでの資料だけでは何ともいえないが、定量的な議論にまで進み得る可能性もある。

5. まとめ

1) 粒子の破砕量の多寡は本質的には材質に左右される。 2) セン断中の粒子の破砕量は拘束圧が大きいほど、また密度が大きいほど大きい。 3) 粒子の破砕は材料をより詰まり易い粒度にするような仕方では起るらしい。 4) モールの破壊包絡線がカーブするのはセン断によつて粒子が破砕するからであると思われる。 $\log U - \phi$ の直線関係を仮定してこの説明を試みたところ、試験結果と大きな矛盾はなかった。 本研究に当り、御指導下さった最上武雄先生に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 吉越洋, レキの大型三軸試験, 第5回土質工学研究発表会, 1970, 土質工学会。
- 2) 山口昇, 土壌の剪断抵抗の測定(第三報) 山口昇博士論文選集,
- 3) Bishop, A.W., The strength of soils as engineering materials, *Geotechnique* No.16, 1966, 他,
- 4) 鈴木惣野, 伊藤, 東京砂層に含まれる細砂の高压三軸試験, 第4回土質工学研究発表会, 1969,
- 5) Marsal, R.J., Large scale testing of rockfill materials, *Proc. A.S.C.E.*, SM2, 1967,
- 6) 最上武雄, レキの内部摩擦角と常数 ϕ について, 土と基礎 vol.16, No.11, 1968, 他,

表1 $\Delta\phi$ の計算値と実測値

	ϕ	U_R	ΔU	$\Delta\phi_c$	$\Delta\phi_R$	$\Delta\phi_R - \Delta\phi_c$
AL1	48°20'	4.479				
2	42°55'	5.602	1.123	2°20'	5°25'	3°05'
3	40°01'	7.521	1.919	2°53'	2°54'	0°01'
M1	53°08'	4.762				
2	45°38'	5.611	0.849	2°02'	7°30'	5°28'
3	41°00'	7.176	1.565	2°43'	4°38'	1°55'
D1	53°14'	4.917				
2	45°39'	6.385	1.468	3°26'	7°35'	4°09'
3	40°55'	—	—	—	4°44'	—
BL1	50°37'	5.726				
2	45°14'	6.179	0.453	0°51'	5°23'	4°32'
M1	54°59'	6.009				
2	46°53'	8.241	2.282	4°49'	8°06'	3°17'
3	42°18'	8.400	0.109	0°08'	4°35'	4°27'
D1	54°12'	6.043				
2	48°04'	7.526	1.483	3°11'	6°08'	2°57'
3	42°46'	12.574	5.048	7°34'	5°18'	-2°16'
CL1	48°46'	4.064				
2	41°55'	5.871	1.807	4°01'	6°51'	2°50'
3	39°21'	6.432	0.561	0°45'	2°34'	1°49'
M1	49°54'	3.857				
2	43°14'	5.462	1.605	4°06'	6°40'	2°34'
3	39°39'	7.425	1.963	3°07'	3°35'	0°28'
D1	50°16'	3.860				
2	44°06'	5.492	1.532	4°10'	6°10'	2°00'
3	40°37'	6.826	1.334	2°15'	3°24'	1°09'
4	39°07'	9.250	2.424	3°07'	1°30'	-1°37'

図6 $\Delta\phi$ の計算値と実測値

