

九州大学工学部 内留研究員 正員 ○ 春 山 元 寿

同 正員 山 内 豊 晴

まえがき：シラスは自然状態においては、風化部分は膨軟であるが、未風化部分は半固結の岩相を示す。その強さ成分は、地質的な固結作用、粒子間の内部摩擦およびシラス粒子の形状の特異性によるインターロッキング効果が、その主なものであり、乱したものは構造が乱され、その固結による強さ成分を失うために、両状態における工学的性質を甚しく異にすると考える。シラスのせん断強さはMohrの破壊理論に従い、Coulomb式 $\tau = C + \sigma' \tan \phi$ (ここに、 τ ：土のせん断強さ、 C ：見かけの粘着力、 σ' ：せん断面上の有効垂直応力、および ϕ ：せん断抵抗角) にて表わし得る。藤本(1)は C の大部分は負圧の作用によると考え、破壊時のせん断強さ τ_f をScott流に $\tau_f = (u_f + \sigma_f) \tan \phi_u$ (ここに、 u_f ：間ゲキ水圧、 σ_f ：破壊時の全応力、 ϕ_u ：せん断抵抗角) にて表わし、シラスのせん断強さから C の項を除外した。本文においては、シラスの直接せん断と三軸せん断による強さ定数(C, ϕ)を比較検討し、その強さ成分について考察し、限界間ゲキ比の求め方を示す。

試料および試験方法：実験に用いたシラスは鹿児島市鳴池町青瀬において採取したもので、軽石流の非熔結部と思われる。その比重 G_s は2.37、自然間ゲキ比 e_n は1.30、自然乾燥密度 γ_{dn} は 1.03 g/cm^3 、自然含水比 w_n は22.3%である。粒度組成は図1に示すようなもので、採取シラスの 4.75 mm フルイの通過部分を用いた。その最大間ゲキ比 e_{max} は1.525、最小間ゲキ比 e_{min} は0.800であり、最大乾燥密度は 1.317 g/cm^3 、最適含水比は23.5%である。粒子の鏡下における形状は、ガラス質で、角張つた薄片状ないし針状を呈する。

直接せん断試験では、空気乾燥試料を用い、供試体の大きさは直径約 60 mm 、高さ約 20 mm で、3種類の初期間ゲキ比 e_0 について、垂直荷重 σ を0.5、1.0、2.0および 30 kg/cm^2 とし、 σ による圧縮を生じなくなつた後、せん断速度 0.6 mm/min を加え、排水型定ヒズミ法で試験した。三軸圧縮試験用供試体の大きさは直径約 50 mm 、高さ約 12.5 mm で、4種類の e_0 について、側圧 σ_3 を0.5、1.0、2.0および 30 kg/cm^2 とし、 σ_3 による圧密を生じなくなつた後、せん断速度 1.0 mm/min の排水型定ヒズミ法で試験した。シラスの透水係数は 10^{-3} cm/sec

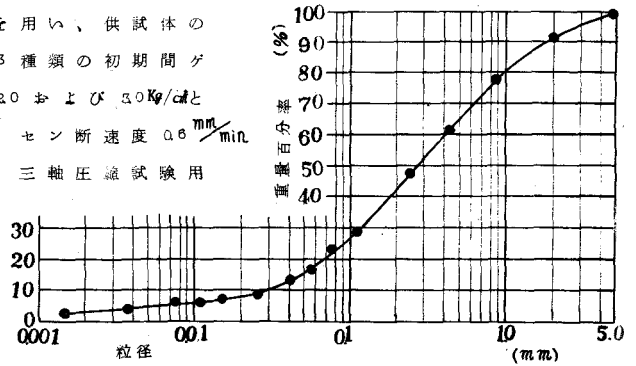


図1 試料の粒度分布曲線

のオーダーであるから、本実験の排水条件ではせん断中、間ゲキ水圧は発生せず、全応力 σ は有効応力 σ' に等しいと考えてよい。

応力および体積の変化とヒズミの關係：一般に砂質土(2)が排水せん断を受けるときの応力・体積変化～ヒズミ特性は図2のようになる。図3は e_0 の等しいシラスの供試体を直接せん断した場合と三軸圧縮した場合の実験結果に基づく定性的な傾向を示したものである。図2と図3の相逢点は、 e_0 の状態に見出される。すなわち直接せん断では、 τ はピークを有し、体積は収縮→膨張→定常と変化する。三軸せん断では、体積は収縮→定常と変化する。

するにも拘らず、軸差応力 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ はピークを有し、密な状態と同じ傾向を示す。また密な状態のセン断初期の収縮は、一般の砂に比較して大きい。これらの相違点はシラス粒子の特異性によるインターロッキング効果によるものと思われる。図3にて、点Oは e_0 およびOBは、それぞれ両試験法の圧密段階における収縮を意味する。

このシラスの供試体がセン断を受けると、点Mに対応する間グキ比 e_m で、 τ および $(\sigma_1 - \sigma_3)$ はピークに達し、このときの両試験による e_m は等しい。密なシラスは直接セン断では、三軸セン断よりも e_m までに、大きな膨張を必要とするので、それだけ多くの外的仕事を行う。 τ の等しいシラスは、三軸セン断では、膨張による仕事は行なわれないが、直接セン断では、それを行う。このように e_0 の等しいシラス供試体では、三軸セン断より直接セン断の方が多くの外的仕事を必要とすることが直接セン断の方に大きい強度定数を与える一つの原因となる。

シラスのセン断強さの成分：土はセン断を受けると、その構造は変化する。前項で述べたように、排

水型等圧セン断では、セン断変形は必ず体積変化を伴い、ダイレタンシーを生ずる。それは砂質土では、粒径や粒度分布、粒子の形状、密度および粒子間応力などに関係する。セン断による膨張を正のダイレタンシー、収縮を負のダイレタンシー、および膨張も収縮もない場合をダイレタンシー0と考える。Skempton(3)は砂質土の体積変化 $\Delta V/V$ を平均主応力 σ_m の増加によるもの $\Delta V/V$ と、セン断応力 τ_{oct} の変化によるもの $\Delta V/V$ (ダイレタンシー)とに分けた。Skemptonの体積変化を表わす式は $\sigma_2 = \sigma_3$ なる本三軸圧縮試験では式(1)のようになる。

$$\frac{\Delta V}{V} = C \left(\frac{\Delta \sigma'_1 + 2\Delta \sigma'_3}{3} \right) + \sqrt{2} D (\Delta \sigma'_1 - \Delta \sigma'_3) \quad (1)$$

ここに $\Delta \sigma'_1, \Delta \sigma'_3$ ：主応力の増分、C：圧縮係数、およびD：ダイレタンシー係数

供試体に生ずる体積変化はエネルギーの増加または消費を意味しており、シラスのセン断強さSは式(2)にて示されると考える。

$$S = S_{rf} + S_{di} + S_{de} \quad (2)$$

ここに S_{rf} ：粒子間の内部摩擦による成分で、この場合セン断中の体積変化はない、 S_{di} ：セン断領域でのインターロッキングによる粒子間の摩擦による成分で、ダイレタンシー効果に伴う内的仕事の成分、および S_{de} ：セン断中膨張するため拘束圧力に抵抗することによつて生ずる成分で、ダイレタンシー効果に伴う外的仕事の成分とする。

S_{di} と S_{de} は分離することは困難で、 $S_{di} + S_{de} = \tau_d$ とすると、直接セン断試験では $\tau_d = \sigma \left(\frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right)_{\max}$ 、三軸圧縮試験では $\tau_d = \sigma_3 \left(\frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right)_{\max}$ で表わされ、最大セン断応力 $\tau_{\max}$ は式(3)、最大軸差応力 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ は式(4)の形で示すことができる。

$$\tau_{\max} = \tau_{rf} + \sigma \left(\frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right)_{\max} \quad (3)$$

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max} = (\sigma_1 - \sigma_3)_{rf} + \sigma_3 \left(\frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right)_{\max} \quad (4)$$

ここに τ_{rf} および $(\sigma_1 - \sigma_3)_{rf}$ ：それぞれ $\tau_{\max}$ および $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$ の S_{rf} 成分、 $\left(\frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right)_{\max}$ および $\left(\frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right)_{\max}$ ：

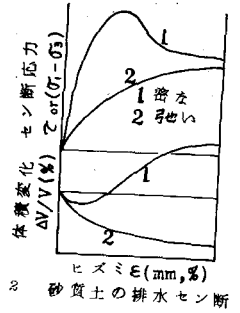


図2 砂質土の排水セン断

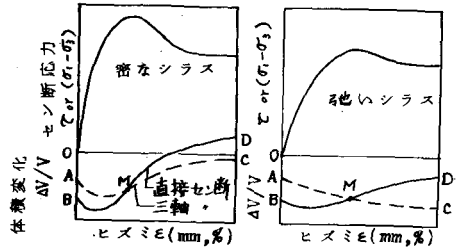


図3 シラスの排水セン断

それぞれ厚さの変化～ヒズミ曲線、 $\Delta V/V \sim$ 軸ヒズミ曲線上における、最大応力のときの接線のコウ配。

また、拘束型の直接セン断によるセン断縮の側面摩擦を除いたセン断強さとして式(5)が提案されている。

$$\beta = \sigma(d\epsilon/d\epsilon)_{\max} + \tau_f \quad (5)$$

ここに、 τ_f : 定常セン断応力

式(3)と式(5)から $\beta = \tau_{\max} - (\tau_{rf} - \tau_f)$ なる関係が得られ、 $(\tau_{rf} - \tau_f)$ は側面マサツによる値ということになるが、シラスの直接セン断試験結果によれば、これはセン断領域におけるインターロッキングの抵抗がその大部分を占めていると考えられる。

シラスについての $\tau_{\max}$ 、 τ_f 、 τ_f および β と e_0 の関係を図4に、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$ 、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{rf}$ および $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ と e_0 の関係を図5に、これらの値をそれぞれ Mohr-Coulomb の式に適用して求めた C 、 ϕ の値を図6に示す。これらの実験結果から次のようなことが考えられる。

理論的には、 $\tau_{rf} = \tau_f$ 、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{rf} = (\sigma_1 - \sigma_3)_f$ (ここに、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$: 定常軸差応力) となるはずであるが、本実験では、 e_0 の小さいほど、 $\tau_{rf} > \tau_f$ 、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{rf} > (\sigma_1 - \sigma_3)_f$ である。また β 也い状態で、収縮しつつあつても、応力はピークを示している。

これらはインターロッキング効果を示すもので、セン断領域では $(\sigma_1 - \sigma_3)$ によつてダイレタンスを生じているが、供試体全体としては σ_m による圧縮量が大きいので、相対的には体積を減じていると考えるべきであろう。以上の点から式(3)および式(4)の右辺第2項はシラスの強さ成分であるダイレタンス効果としての、内的・外的仕事を表わしていないといえる。さらに定常セン断状態における考察より、乱したシラスの C はインターロッキングによるもので、 e の関数である。式(5)による C 、 ϕ については、 C は殆んど無視し得るほどに低下するが、 ϕ は密なとき、 $\tau_{\max}$ によるそれに比較して殆んど変わらず、 β 也いときはむしろ大きくなつているので、この式はシラスについてはなお検討を要する。

シラスの限界間ゲキ比 e_{cr} およびその求め方 : セン断に伴う体積変化は e_{cr} に関係する。Casagrande, A. は e_m が e_0 よりも大きくも小さくもないような e を e_{cr} とした。これは定常的な意味でのセン断に伴う e の変化のない状態を表わすものでなく、このとき e は増加または減少しつつある。

またシラスはセン断初期における収縮が大きいので、Casagrande, A. の方法で求めた e_{cr} は不合理なほど小さい値を示す。そこで、 e_{cr} を定常的な意味において、セン断に

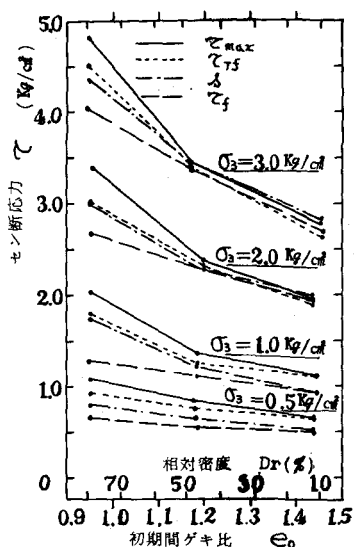


図4 シラスセン断応力と初期間ゲキ比の関係 (排水直接セン断)

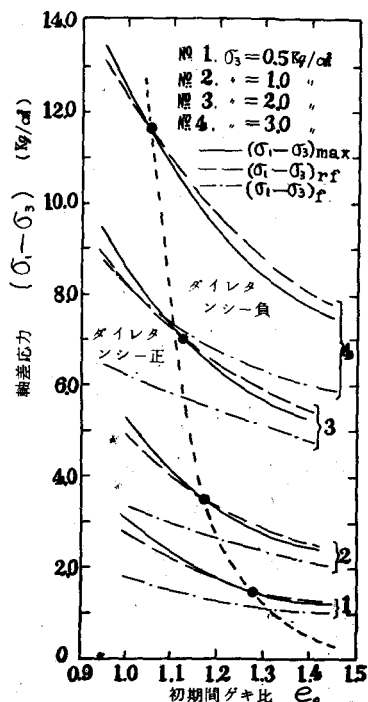


図5 シラスの軸差応力と初期間ゲキ比の関係 (排水三軸セン断)

伴う e の変化のない状態と定義し、以下のようにして求めた。先に示した $(d\epsilon/d\epsilon_1)_{\max}$ は体積変化率であり、膨張を正、収縮を負とすれば、膨張も収縮もない場合 $(d\epsilon/d\epsilon_1)_{\max}=0$ で、このときの e を e_{cr} とする。これは e_0 の異なる供試体について σ_3 をパラメーターとして、 e_0 と $(d\epsilon/d\epsilon_1)_{\max}$ の関係曲線を求め、これが $(d\epsilon/d\epsilon_1)_{\max}=0$ と交わる点によつて示される。この方法で求めた σ_3 と e_{cr} の関係を図7に示す。図7で、曲線A、BおよびCは、それぞれ e_0 、圧密終了時の e 、および e_m に対して $(d\epsilon/d\epsilon_1)_{\max}$ をプロットして求めた e_{cr} で、a、bおよびcはCasagrande, A.の方法で求めた。Aはa、Bはb、およびCはCに対応する。また図5の $(\sigma_1-\sigma_3)_{\max}$ 曲線と $(\sigma_1-\sigma_3)_{Tf}$ 曲線は e_{cr} に等しい点で交わり、この交点を結ぶ曲線は e_0 に対する $(\sigma_1-\sigma_3)$ と e_{cr} の関係を示しこの曲線上の点ではダイレタンスは0、左側では正、および右側では負である。このように e_{cr} は粒子間応力によつて変わるもので、自然地盤等における e_{cr} を一つの数値によつて代表することはできない。

さらに直接セン断では、従来指摘されているような諸欠陥によつて適切な e_{cr} は得られなかつた。三軸試験による $(d\epsilon/d\epsilon_1)_{\max}$ を用いて求めた e_{cr} は定常セン断状態に対応する適切な e_{cr} を与える。

結論：1) シラスは排水型直接セン断試験の場合、密な状態も引いた状態も、セン断を受けるときの体積変化は収縮→膨張→定常状態となり、そのセン断強さはピークを有する。排水型三軸試験の場合、体積変化は密な状態では上記と同様であるが、引いた状態では、収縮→定常となるにも拘らず、軸差応力はピークを示す。これは引いた状態でもセン断面上ではインターロッキングが作用しているためであると考える。

2) 乱したシラスのセン断強さは、土粒子の摩擦による成分とダイレタンス効果による成分とからなり、式(2)によつて表わされる。ダイレタンス効果は拘束圧力に対する体積の膨張に必要な外的仕事の成分とインターロッキングのために消費される内的仕事の成分とからなる。実験的には、式(3)および(4)の右辺の項によつて、全てのダイレタンス効果を表わすことはできない。

3) 乱したシラスのセン断強さはクーロンの式 $\tau=c+\sigma'\tan\phi$ にて表わされ、見かけの粘着力はセン断面上のインターロッキング効果によつて生ずるものが大部分である。自然状態のシラスは、さらに固結効果が作用している。

4) 拘束型直接セン断試験機にて求めた最大セン断強さから、セン断箱の側面摩擦を除いた値として、式(5)を用いると、見かけの粘着力は最大セン断強さによるもの

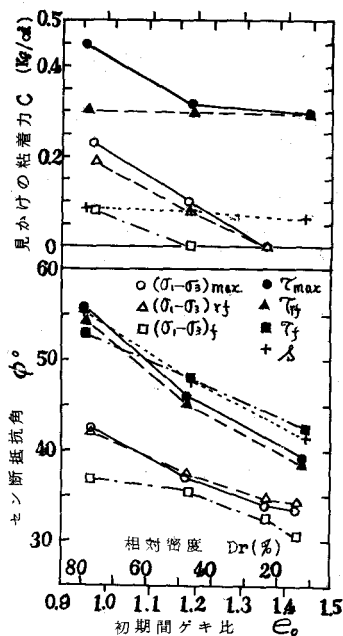


図5 シラスのセン断抵抗角、見かけの粘着力と初期間ゲキ比の関係

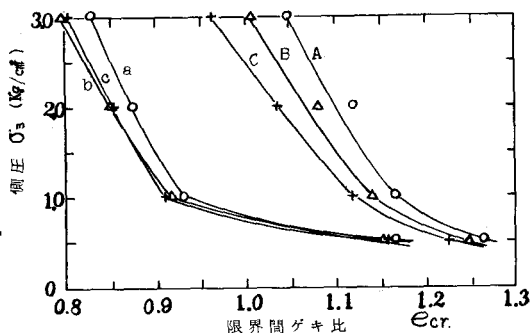


図7 側圧と限界間ゲキ比との関係
初期間ゲキ比に対してプロットしたもの A, a.
圧密終了時の間ゲキ比に対してプロットしたもの B, b.
破壊時の間ゲキ比に対してプロットしたもの C, c.

より減少する。しかしせん断抵抗角は密な状態では減少しているが、3也い状態ではかえつて増加しており、シラスに対しては式(5)は今後検討を要する。(図6)

5) 乱したシラスの排水せん断試験による強度定数は図6に示す。 τ_f においては密度に関係なく $\phi = 0$ であるが、 ϕ は τ_{max} によるものに比較して、密なときは約 3° 小さくなるが、3也いときは約 3° 大きくなっている。これは3也いシラスでは、破壊面の垂直荷重 σ が小さい場合、 τ_{max} に対する τ_f の低下の割合が大きく、 σ が大きい場合、この低下の割合が小さいためと考えられる。また $(\sigma_1 - \sigma_3)_{rf}$ による ϕ と $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ による ϕ とが、 $e_0 \approx 1.08$ で、その大小関係を逆転しているのはダイレタンシーの影響である。

6) シラスの限界間ゲキ比を、定側圧三軸試験によつて、Casagrande, A. の方法で求めると過小な結果を与えるので、限界間ゲキ比を定常的な意味で、せん断に伴う間ゲキ比の変化のない状態と定義すると、 σ_3 をパラメーターとして、初期間ゲキ比と体積変化率 $(d\epsilon/d\epsilon)_{max}$ の関係曲線を求め、この曲線が $(d\epsilon/d\epsilon)_{max} = 0$ なる線と交わる点は初期間ゲキ比に対応する限界間ゲキ比を与える。

7) 間ゲキ比に対して、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ をプロットして得られる点を結ぶ曲線と $(\sigma_1 - \sigma_3)_{rf}$ をプロットして得られる点を結ぶ曲線との交点は、限界間ゲキ比に一致し、この交点を結ぶ曲線上では、ダイレタンシーは0、この曲線の左側ではダイレタンシーは正、右側では負である。またこの曲線上の点は、側圧、軸差応力および限界間ゲキ比の関係を示す。(図5)

参考文献

- 1 藤本 広、土と基礎、Vol.13, No.2, 1965, 2, pp. 56~63.
- 2 Watson, J. D., proc. ASCE, Vol. 39, 1939, pp. 1046~1057.
- 3 Skempton, A. W., Géotechnique, Vol. 10, No. 4, Dec. 1960, pp. 186~187.
- 4 Taylor, D. W., Fundamental of Soil Mechanics, 1948, pp. 345~347.
- 5 Bishop, A. W. & Eldin, A. K. G., proc. 3rd Int. Conf. S.M.F.E., 1, 1953, pp. 100~105.
- 6 井上 広胤 土木学会論文集 No. 101, 昭 39. 1, pp. 15~24.
- 7 Casagrande, A., Jour. Boston Society of Civil Engng., Vol. 23, No. 1, Jan., 1936, pp. 17~22.