

九州大学工学部 正員 山内豊聡  
 鹿児島工業高専 正員 〇村田秀一

1. まえがき

シラスの乱さない状態の強さ成分は、地質的な固結効果、粒子間の内部摩擦および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る。乱したものはその構造が乱れ、固結効果や粒子の方向性などに起因する強さ成分を失うため、両状態においては工学的性質がかなり異なると思われる。昭和43年2~3月の一連のえびの地震で、繰返し地震動を受けたため、自然シラス層のガケの崩壊が大規模に起きた。これは回転スベリ的な崩壊ではなく、引張力が働きクラックを生じて崩落した形式のものが多いように見られた<sup>1)</sup>。このように自然状態でのシラス層は、土としての強度にかなり特異性があるように考えられる。そこで本文では乱さないシラス、乱したシラスの自然含水状態における非排水せん断特性ならびに三軸の連続繰返し載荷試験の結果について考察し、主として1) 自然シラス層が繰返し地震動を受けたときの耐震問題に役立つばかりでなく2) 道路の路床、路盤としての乱さないシラスおよび乱したシラスの挙動、3) 土木構造物の基礎地盤としてのシラスが、動的な力を受ける時の問題に役立つようにするものである。また、この考察ではそれらの両試料の破壊のメカニズムについてもできるだけ触れることにしたい。

2. 試料、供試体および試験方法

a) 試料 試験に用いたシラスは鹿児島県国分市のガケにおいて採取した硬質シラスである。粒度組成はレキ分2%、砂分71%、シルト分23%および粘土分4%で、三角座標によれば砂質ロームに属するものである。粒子の形状は玻璃(はり)状で細粒になるに従って角張った扁平なものとなる。試料(供試体)の指数的性質を表-1に示す。

表-1 試料の指数的性質

| 試料       | 乱さないシラス       | 乱したシラス                 |
|----------|---------------|------------------------|
| 土粒子の比重   | 2.475         |                        |
| 土粒子の均等係数 | 15.5          |                        |
| 見かけの密度   | 1.83 % $cm^3$ | 1.75 % $cm^3$          |
| 乾燥密度     | 1.48 "        | 1.40 "                 |
| 含水比      | 21.0 %        | 21.0 %                 |
| 飽和度      | 86.6 "        | 76.4 "                 |
| 最適含水比    | 23.8 %        |                        |
| 最大乾燥密度   | 1.40 % $cm^3$ |                        |
| 間ゲキ比     | 0.600         | max 1.620<br>min 0.680 |

b) 乱さない供試体 現位置のシラス層に、内径3.5cm、高さ12cmの真チェウ製のサンプラーを静かに押し込んで採取し、試料抜き取り器でとり出し、径3.5cm、高さ9cmの供試体を作成する。

c) 乱した供試体 乱さないシラスの試験後の試料を含水比を21%に調整し、径3.5cm、高さ8.6cmで $e = 0.700$ になるように三層に突固めて作成する。

d) 試験方法 以上のように作成した供試体に対し、拘束圧を0.5~5.0 $Kg/cm^2$ の範囲にとり、拘束圧による圧密の終了後圧縮速さを供試体高さの0.8~1.0%/minとし、定圧、定ヒズミ法で非排水せん断を行なった。また、拘束圧0.5~1.5 $Kg/cm^2$ の範囲で、繰返し載荷周期2秒(載荷除荷時間比を1:1)とし、荷重強さを適宜変え、三軸の連続繰返し載荷試験を行なった。

3. 三軸圧縮試験結果および考察

a) 応力-ヒズミ曲線 図-1(a)(b)は明瞭なピークを示している。乱さないシラスの場合供試

体の変形はほとんどともなわずにヒズミと応力は破壊点まで比例的に増加する。しかし急激にクラックを生じ(破壊音を伴うこともある)セン断され、急速に終局セン断強さ $(\sigma_1 - \sigma_3)_u$ に到着し、ヒズミが進行してもセン断面がスベルのみである。乱したシラスは湿な砂においてみられる傾向と同じである。両状態においてセン断面は形成されるが、乱した状態の場合それが徐々に明瞭になるのに比べて、乱さない状態の場合は全く臨時的に現われる。

b) セン断強さ 図-2は乱さないシラスおよび乱したシラスの最大軸差応力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ と終局セン断時の軸差応力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_u$ を拘束圧 $\sigma_3$ に対してプロットしたものである。

この図からわかるように乱さないシラスの場合、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ と $(\sigma_1 - \sigma_3)_u$ との差が乱したシラスの場合に比べて著しく大きい。モールの応力円から求めた強さ定数をみれば、乱さないシラスの破壊時の見かけの粘着力 $C$ が乱したそれに較べ著しく大きな値を示す。これが乱さないシラス特有の地質的な固結効果を現わしていると思われる。図-2で $(\sigma_1 - \sigma_3)_{mat-f}$ と $(\sigma_1 - \sigma_3)_{dis-f}$ がこの固結力を示しているとするれば、ほとんど拘束圧に影響なく $9.0 \text{ kg/cm}^2$ の値である。しかしゼイ性材料は拘束圧を上げると延性材料として挙動すると報告されていることから、この範囲の拘束圧でははっきりしたことがいえない。また乱さないシラスと乱したシラスの終局セン断強さおよび $C$ 、 $\phi$ がほとんど同じであることから、乱さないシラスは固結力を有している間は著しい強さを有するが一度固結力を失うと急激に破壊し、スベル面付近は乱したシラスと同様粒状体となってしまうのであろう。この固結力を有するため、乱さないシラスは以上述べたようにゼイ性破壊的で、また引張り力に対する抵抗を有するようで、ここに乱さないシラスに対しては岩盤力学的取り扱いが必要で、ゼイ性材料として検討する必要がある。一般にシラスのような砂質土のセン断強さ $S$ は、<sup>3)</sup> 春山らによれば

$$S = S_{rf} + S_{di} + S_{de}$$

$S_{rf}$  : 粒子間の内部摩擦による成分

$S_{di}$  : ダイレイタンスーに伴う内的仕事の成分

$S_{de}$  : ダイレイタンスーに伴う外的仕事の成分

で表わされる。これは乱したシラスに対しては適当であるが、乱さないシラスのセン断強さ $S_{mat}$ には、次式のように固結力による $S_s$ を加えるべきだと考える。

$$S_{mat} = S_s + S_{rf} + S_{di} + S_{de}$$

#### 4. 連続の三軸載荷試験結果および考察

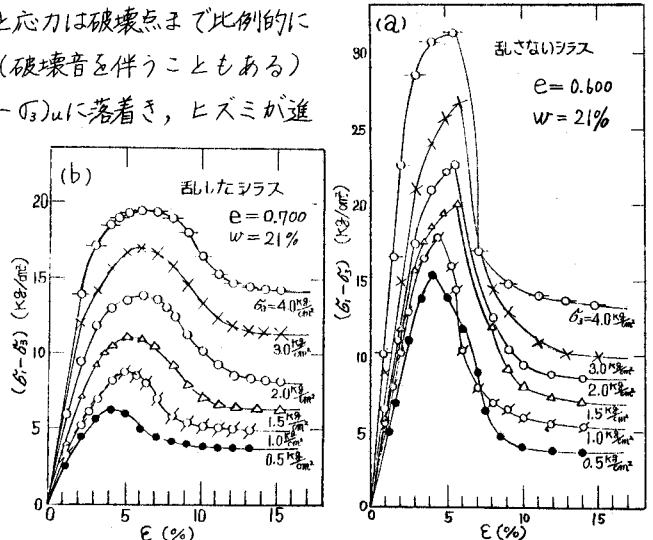


図-1 乱さないシラスと乱したシラスの応力-ヒズミ曲線

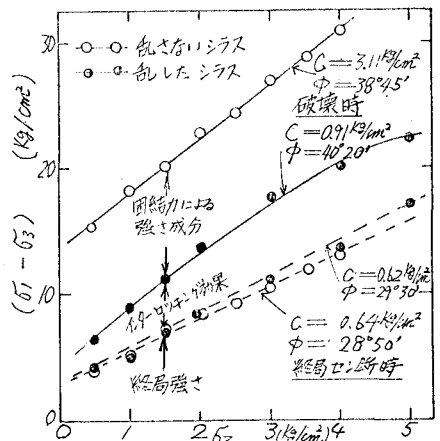


図-2 乱さないシラスと乱したシラスの破壊時・終局セン断時の $(\sigma_1 - \sigma_3)$ と $\sigma_3$ との関係

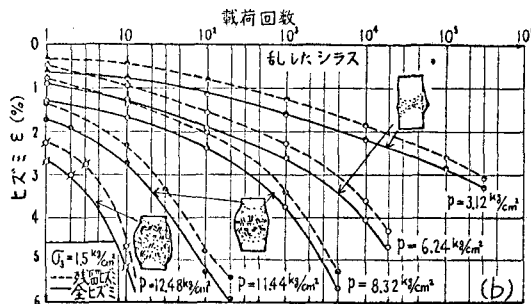
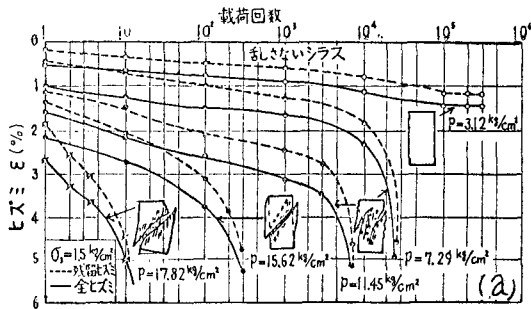


図-3 乱さないシラスと乱したシラスの種々の荷重強さに対する繰返し回数と全ヒズミ・残留ヒズミの関係

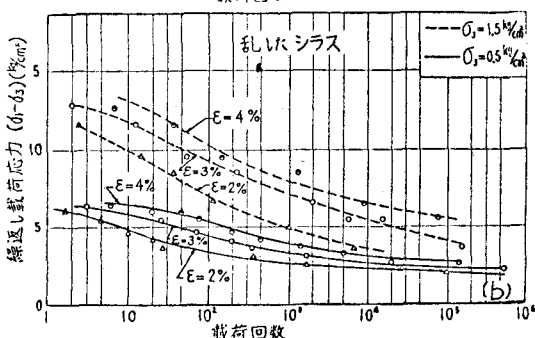
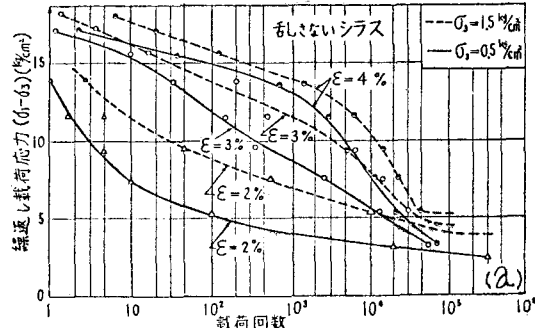


図-4 乱さないシラスと乱したシラスの種々の全ヒズミ量に対する繰返し応力と载荷回数との関係

α) 载荷回数-ヒズミ曲線 乱さないシラスの場合図-3 (a) からわかるように、ある载荷回数までは変形はかなり弾性的であるが、ある载荷回数以後急にせん断面が現われるか、あるいはクラックを生じて破壊する。このように弾性的挙動から、急に変形の速さが無限大になる点を破壊点とみなす。その時の供試体の破壊の様相を図中に示した。このように乱さないシラスが繰返し载荷を受けるときの破壊はゼイ性破壊に属すると言えよう。3.で述べた固結力(結合エネルギー)が繰返し载荷を受けることにより漸次消滅し、残存固結力の中における応力を増加させることになるので急速に固結力は瓦解し、ゼイ性破壊に至ると考えられる。また静荷試験においては破壊後もかなりの抵抗を示した粒状体としての摩擦による成分はこのような繰返し载荷重に対しては有効に働き得ない。乱したシラスの場合、図-3 (b) からわかるように、载荷回数の進行とともに漸次ヒズミが進んでいる。そしてある载荷回数になると、ヒズミの速さが一定となる。試験中に供試体を観察しているとこの载荷回数の付近から、供試体に変化が認められ、载荷回数の進行と共にその脹らみが顕著になる。供試体は人工的に最も密に締固めてはあるが、繰返し载荷により、粒子が移動を促し変形の速さが0にならない一定値に収束するのであろう。いわゆる供試体内部には塑性流動の状態が生じて载荷回数の進行と共にこの領域がかなりの範囲に拡大し供試体に連続したスベリ面を形成し、破壊が進行している状態で耐荷の極限とみなせる。しかし繰返し载荷応力、拘束圧により塑性領域の広がり速さが異なり、いちがいに破壊点はつかみにくい。したがって、本文においては塑性流動の始まる点を破壊点とみなす。その点は図中に矢印で示し载荷試験終了後の供試体のスケッチも示した。以上より乱したシラスが繰返し载荷重を受けるとは延性破壊的で塑性流動破壊に属するといえよう。

β) 载荷応力-载荷回数曲線 図-4 (a)(b) からわかるように、乱さないシラスにおいては $\epsilon =$

2%の曲線とほとんど破壊点付近と思われる $\varepsilon = 4\%$ の曲線の曲率が逆になっている。この傾向が  
 載荷応力が $1.5 \text{ kg/cm}^2$  ( $\sigma_s = 0.5 \sim 1.5 \text{ kg/cm}^2$ ) 以下で  
 著しい。このことから $\varepsilon = 2\%$ から破壊までには  
 更に充分な繰返し載荷回数が必要であることがわ  
 かる。また乱さないシラス、乱したシラスの $\varepsilon = 2\%$   
 の曲線は同じ傾向をもっているにもかかわらず  
 $\varepsilon = 4\%$ の曲線の曲率は全く逆である。この差  
 が乱さないシラス特有の固結効果によるものと考  
 えられる。従って固結効果はこのような繰返し載  
 荷重に対しても有効に働き得るといえる。しかし

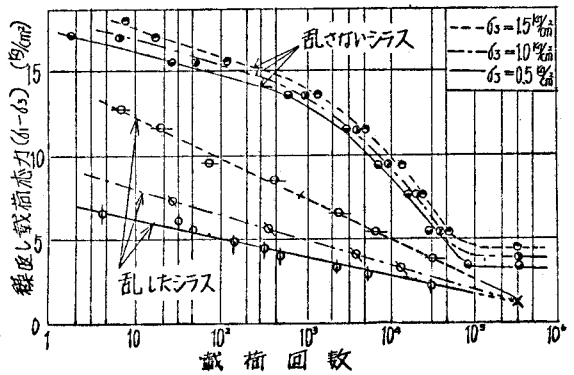


図-5 乱さないシラスと乱したシラスの破壊点  
 に対する繰返し応力と載荷回数との関係

繰返し載荷応力が $1.5 \text{ kg/cm}^2$ 以上になると、この固結力は数回目の載荷でかなり失われ数10回の載荷で  
 完全に破壊してしまう。また図-4(b)の一連のヒズミ曲線がほとんど平行とみていいから、乱す  
 ことにより固結力による強さ成分はほとんど失われることがわかる。図-5から乱さないシラスにお  
 いては疲労限(無限の載荷回数に対して安全な載荷応力)がそれぞれの拘束圧に対して明確に現われ  
 ている。乱したシラスの場合破壊点(塑性流動開始点)に対してそれぞれの拘束圧に対する関係は直  
 線となり、一点で交わっている。つまり載荷応力が小さくなればそれ程拘束圧の影響は受けない。

## 5. 結 論

- i) 乱さないシラスは静的な三軸圧縮の条件でゼイ性破壊を起すが、その後も粒状体としての強さ成  
 分を保持する。
- ii) 乱さないシラスは繰返し載荷によりゼイ性破壊を起し、変形の速さ( $d\varepsilon/dN$ )が $\infty$ となる点を破  
 壊点とみなし得る。また破壊後の粒状体としての強さ成分はこのような動的条件下では有効でない。
- iii) 乱したシラスは静的な三軸圧縮条件で密な砂の挙動と同じであるが、繰返し載荷により塑性流動  
 破壊を示す。
- iv) 乱さないシラスの強さ成分は地質的な固結力が著しく大きい。
- v) 固結力は $\sigma_s = 0.5 \sim 3.0 \text{ kg/cm}^2$ の範囲ではほとんど拘束圧に影響せず、シラスの持つ固有値と思われ  
 る。
- vi) 乱すことにより固結力の効果はほとんど失われる。

なおシラスは数10種類に分類されるわけで、この実験に用いたシラスが硬質であったため固結力が  
 大きく現われているが、定性的な傾向としては他のシラスにおいても同様だと思われる。

謝辞 この実験の一部については、建設省久留米技術事務所および鹿児島国道工事々務所の協力を  
 受けた。付記して謝意を表するものである。

- 文献 1) 山内豊聡・村田秀一・能戸件：えびの地震におけるシラスの問題点について 土質工学会第3回研究  
 発表会講演集, (昭.42.5) 2) 茂木清夫：岩石破壊における組合せ応力の影響 材料, Vol. 17 No. 181 (1968)  
 3) 春山元寿・山内豊聡：乱したシラスの排水せん断について 土と基礎, Vol. 14 No. 4 (1966)