

東大土木 学生員 ○龍岡 文夫
東大土木 学生員 安 田 進

§ まえがき

砂を、歪硬化体として扱う場合に、その降伏特性を記述するには、次の2つの側面が、明らかになる必要がある。

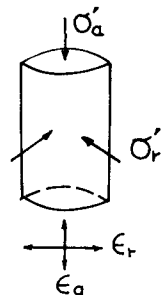
1. 応力～歪特性、降伏する際に、ある応力変化に対して、どういう様子で、どれだけ、塑性歪が進行するか、という問題である。応力-タイルイタンシー特性は、 (p', q, e) 座標における、重層的な state surface の概念を用いると、統一的に説明できることが分っている。(龍岡1971, 龍岡, 芝1972) この state surface は、初期の締め固めの程度に応じて存在し、降伏した時の p', q, e 関係を示している。応力-せん断歪特性は、等価稜の概念を用いると、等方圧密された供試体の、様々な応力経路に対するせん断歪を統一的に記述できる。(龍岡1971)

2. 降伏条件、ある応力履歴、歪履歴を持つ砂が、どの応力条件に対して、塑性変形を進行させるか、という問題である。今回は、この降伏条件について、これまで、明らかになったことについて報告する。

§ 歪硬化体としての砂

Fig.2 は、非排水くりかえし試験の結果である。砂が降伏している時の、

stress path は、1→2, 4→5, 7→8, 10→11であり、単調載荷時の stress path と一致する。stress path の変曲点Aの



$$p' = \frac{1}{3}(\sigma'_a + 2\sigma'_r)$$

$$q = \sigma'_a - \sigma'_r$$

$$v = \epsilon_a + 2\epsilon_r \text{ (圧縮)}$$

$$\gamma = \epsilon_a - \epsilon_r$$

Fig.1 三軸応力歪状態

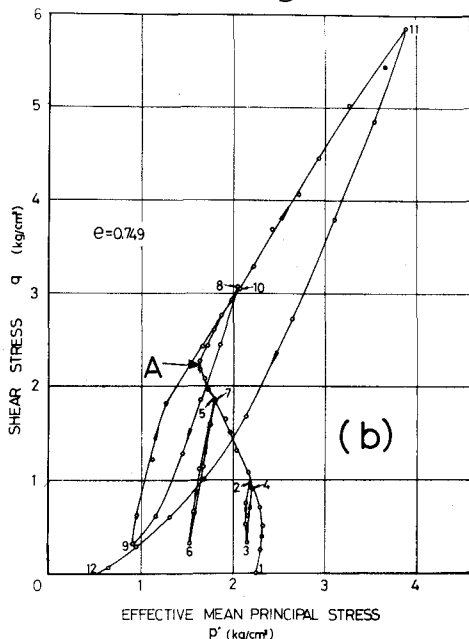
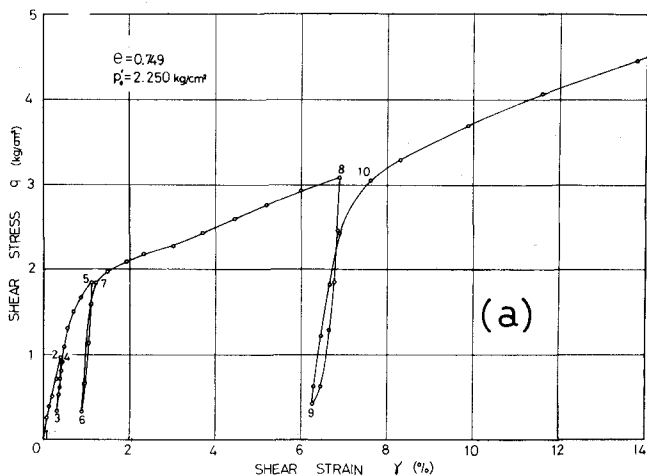


Fig.2 圧縮、非排水くりかえし試験(ゆるぶめ)

前の、除荷と載荷の stress path 2→3と3→4, 5→6と6→7は、ほとんど一致し、それに対応する δ - γ 曲線も一致する。従って、変曲点Aの前では、十分、弾塑性体として扱える。一方、Aを越えての、除荷と載荷の stress path と δ - γ 曲線は、必ずしも一致しない。特に、除荷時の stress path 8→9, 11→12は、著しく原点($p=0$, $\delta=0$)に向ってゆき、除荷の時にも、著しく塑性的挙動が生じている。

§ 砂における yield loci

砂の塑性変形は、圧密による塑性体積歪と、せん断による、塑性体積歪、塑性せん断歪がある。これを統一的に表現するのは、後の課題として、まず、せん断による塑性変形について述べる。Fig. 3は、ゆるづめ砂に対して (a) に示すような stress path の試験をした時の、体積歪特性 (b), せん断歪特性 (c) である。応力点1まで圧密して、1→2の stress path のせん断する時、塑性変形が生ずる。次に、

2→3→4→5 によって、弾

性的挙動であるが、応力点5で、塑性体積歪、せん断歪が、同時に開始する。同様に、応力点9, 13で、塑性変形が開始している。従って、(a)の、応力点、2と5, 6と9, 10と13と、結んだ線分は、それぞれ、別な yield locus の一部と考えるよう。同様に、Fig. 4(a)の stress path の実験を行った時にも、発点5, 9, 13, 17が来まり、yield locus の

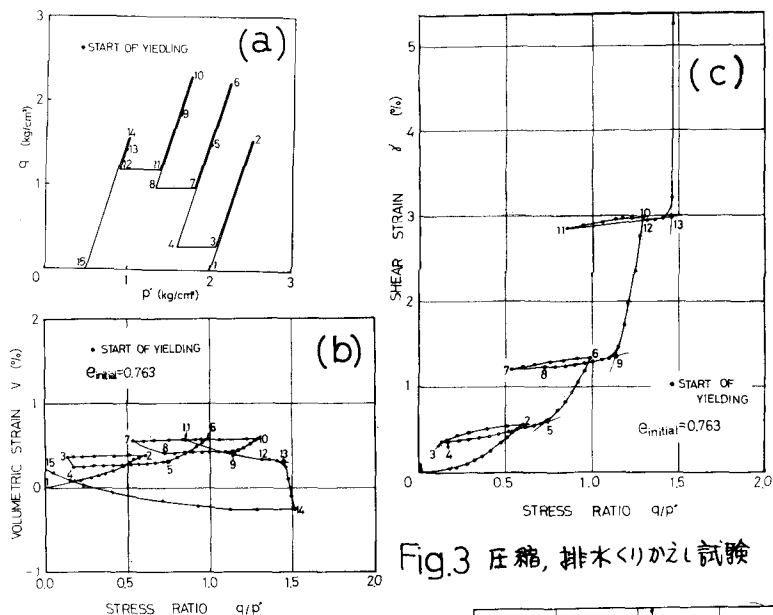


Fig.3 圧縮、排水くりかえし試験

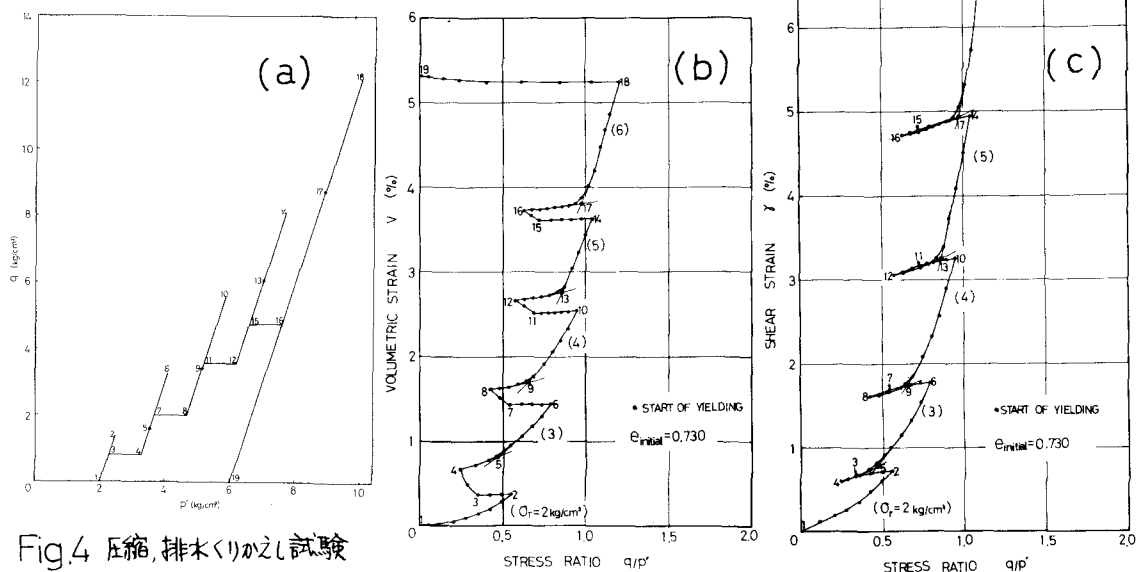


Fig.4 圧縮、排水くりかえし試験

一部としての、2.5, 6.9, 10.13, 14.17が得られる。この yield loci の (p', q) plane における一般的な形は、どうなるであろうか？ Fig.4のように、くりかえして、次第に p' が増加してゆく一連の実験の結果をまとめると、以下のようになる。今、Fig.5で示してある stress path において、A点は、これまで受けた最大の q/p' に対応する点で、

B点は、降伏点である。この種の試験から得た、このような2点A, Bにおける p'_A, p'_B と η_A, η_B ($\eta = q/p'$) の値から、 $(\eta_B - \eta_A) / (p'_B - p'_A)$ と、 $(p'_A + p'_B) / 2$ の関係とプロットすると、Fig.5のような η と、くりかえし数 N によらない、一義的な関係が得られた。Fig.3のようなくりかえして、次第に p' が減少してゆく場合でも、この関係が、ほぼあてはまるようであるが、今の所、データの数が少なく、はっきりしたことは言えない。今、

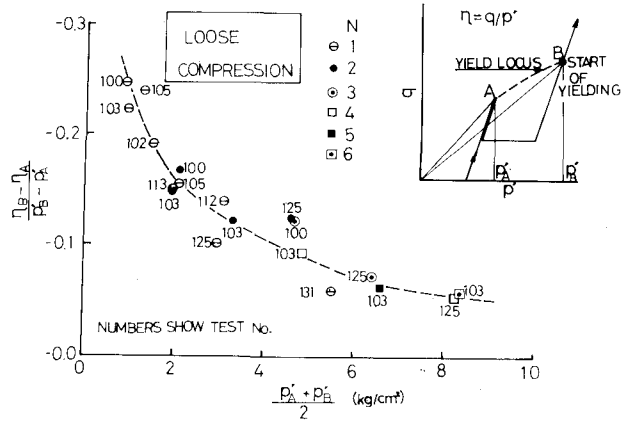


Fig.5 yield locus を求めるためのグラフ

$$(1) \frac{\eta_B - \eta_A}{p'_B - p'_A} = \frac{d\eta}{dp'}, \quad \frac{p'_A + p'_B}{2} = p'$$

とすると、Fig.5から、 $d\eta/dp'$ と p' の関係が得られ、

$$(2) \begin{aligned} d\eta/dp' &= f(p') \\ d\eta &= f(p') dp' \end{aligned}$$

これを、状態1と2の間で積分すると、

$$(3) \eta_2 - \eta_1 = \int_1^2 f(p') dp' = F(p'_2) - F(p'_1)$$

今、1の状態を、 $p' = 0.75 \text{ kg/cm}^2$, $\eta = \eta_1$, 2の状態を、 p', η とすると、

$$(4) F_1(p') = F(p') - F(0.75)$$

が定義できる。Fig.6 は、 $F_1(p') \sim p'$ 関係である。 $|F_1(p')|$

は、 $p' = 0.75 \text{ kg/cm}^2$ から、 $p' = p'$ の間での、yield loci の η の減少分をあらわしているから、これを用いて、 (p', q) plane に yield loci を画くことができる。Fig.7 に、それと、実験データを示してある。この yield loci は、Puroshasb (1971) が、提案した形

$$(5) f = \eta + m \ln p' \quad (m = \text{a constant})$$

よりも、曲率が若干小さくなっているが、ほぼ同一形となっている。Fig.7の yield loci は、塑性変形の少ない p' 軸付近と、 p' がかなり大きな部分を除いた範囲では、 p' の増加と共に、 q は減少するが、 q が増加して

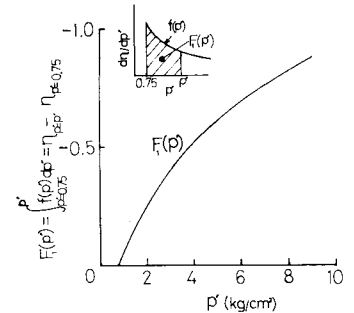


Fig.6 $F_1(p') \sim p'$ 関係

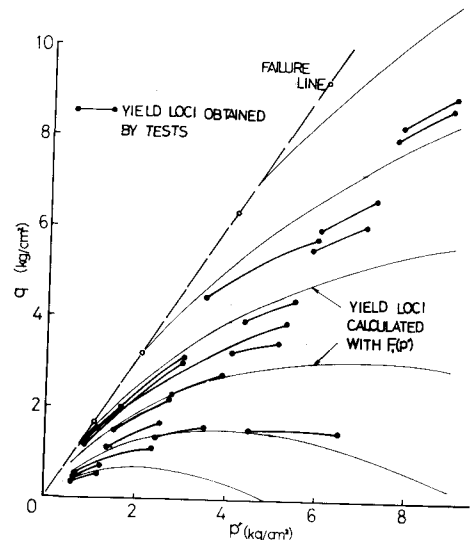


Fig.7 $p' \sim q$ 面上の yield loci

ゆく形となっている。従って、 σ/p -一定試験、 σ -一定 p' 減少試験では、せん断降伏し、 σ -一定 p' 増加試験では、せん断降伏しないことになるが、これは、実験結果と一致する。又、この yield loci は、粘土に対して、提案されているもの (Roscoe, et. al 1963. Ohta, et. al 1971) とは、異なった性質を持っているのは、注目すべきことと思われる。

§ 歪硬化の異方性

ここで言う、異方性とは、砂では、粘土で提案されているような、等方歪硬化モデル (Schofield et. al 1968) は、適用できない、という意味である。Fig. 8(a) の stress path (σ -一定、偏差応力を次第に増加させながら、伸張→圧縮のくりかえし) に対する、体積歪特性が、(b) に示してある。1→2の間では、降伏が生じ、次に除荷し、伸張側に移ると、3の点から降伏が生じている。そして、次に、再び圧縮側に移ると、前の最大応力点を越える6で、降伏が開始する。このように、 $|\sigma/p|$ が、まだ破壊値に、それほど近くないと、歪硬化が、圧縮側、伸張側で、独立に生じていると言えよう。しかし、破壊応力比に近づいてくると、22以降のように、除荷時にも、供試体は、著しく収縮するようになる。これは、Fig. 2での、stress path 8→9, 10→11に対応する現象である。小田の研究(1972)によると、砂は、初期構造に、異方性がある他に、せん断の進行と共に、構造の異方性が発達してゆく。砂の歪硬化とは、このような構造の異方性の発達を、別な言葉で言ったものと言えよう。従って、せん断面の回転があるようなくりかえし载荷は、しめかため、液状化に、非常に効果のあることになる。李の中空三軸を用いた液状化の研究(1972)も、これを示している。

§ まとめ

- (1) 一定の限界性はあるが、砂を歪硬化体として扱って、その変形特性を、研究することが出来る。
- (2) 砂の yield locus は、 p' の増加と共に、 σ が増加してゆくような形をしている。
- (3) 砂の歪硬化は、異方的である。

§ 謝辞、本研究をすすめるにあたって、絶えず御指導をいただいた、最上教授(日大)、福岡教授、

石原助教、実験を共に行った吉原君(千葉工大4年)に、感謝致します。

§ 参考文献 □ 龍岡文夫(1971): 三軸圧縮における砂の応力-歪特性(第=報)第26回土壌学会 □ 龍岡文夫, 芝野司(1972): 三軸圧縮における砂の応力-歪特性(第=報)第7回土壌学会 □ Poorooshasb, H. B. (1971) "DEFORMATION OF SAND IN TRIAXIAL COMPRESSION" アジア会議 □ Roscoe, K. H. et. al (1963) "Yielding of Clays in States Wetter than Critical" Géotechn. □ Ohta, H. et. al (1971) "PLANE-STRAIN STRESS-STRAIN RELATIONS FOR SOILS" アジア会議 □ Schofield and Wroth "Critical State Soil Mechanics" 1968 □ 小田 匡亮ら(1972) 砂の微視的な変形機構について: 第7回土壌学会 □ 李相一ら(1972): 中空三軸におる飽和砂のくりかえしせん断: 第7回土壌学会

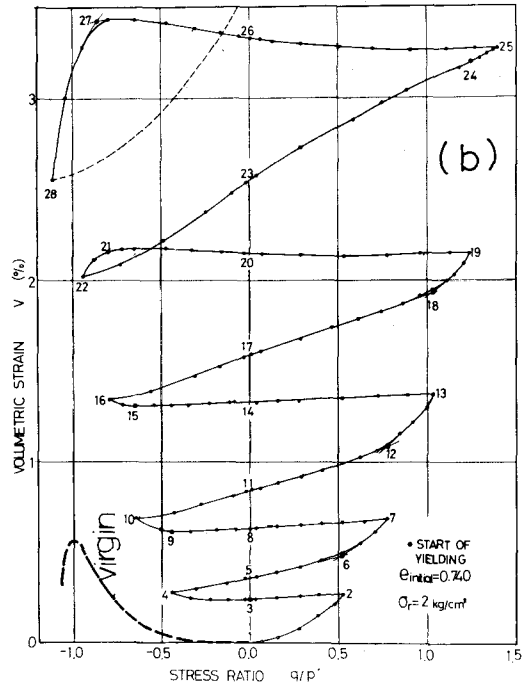
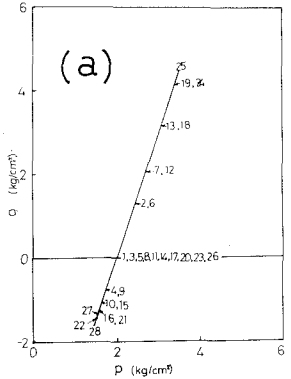


Fig. 8 排水くりかえし試験 (圧縮→伸張)