

砂の圧縮とせん断特性について

八 木 則 男

ON COMPRESSION AND SHEARING CHARACTERISTICS OF SAND

By *Norio YAGI*

Synopsis

In this paper, the results obtained from laterally confined compression tests and triaxial extension tests for Japanese standard sand are presented and discussed. The conditions of the samples in former tests are as follows; (1) initial void ratio e_i is maximum void ratio (0.960), (2) $e_i=0.920$, compacted by vibration (3) $e_i=0.940$, precompressed, (4) $e_i=e_{max}$, repetitive compression. The pressure-strain curves are influenced by above condition. Volumetric change due to dilatancy in extension test is compared with one in compression test.

1. ま え が き

砂の変形や強度に関する研究は以前より種々なされているが、その挙動を支配する要素は多く、いまだ不明の点が多い。とくに変形に関する問題は測定上の精度や実験上の困難さが原因で数多く取り扱われていない。

著者らは以前に種々の応力条件の下での砂の変形特性について三軸試験による実験的研究を行なった。今回はとくに Extension 状態におけるダイレイタンスを調べるため平均主応力を一定にした Extension 試験を行なった。

また砂の圧縮性は、その砂が荷重履歴を受けたか、振動により締め固められたかなどにより異なるので、それらを調べるため側方拘束の圧縮試験を行なった。なお、これらは三軸試験によっても行なえるが、供試体を作ることが非常に困難でむしろ大きな誤差が生ずる可能性がある。

2. 側方拘束の圧縮

砂層に荷重が作用した場合、沈下計算を行なうには正確な砂の応力～沈下量曲線が必要である。砂に dp kg/cm² なる荷重が作用した場合、 $d\varepsilon$ の沈下が生じたたとすると両者の関係はよく次式で示されている。

$$dp = E_s \cdot d\varepsilon \dots \dots \dots (1)$$

ここに E_s は側方変化のない場合の圧縮を表わす係数である。(1)式の $d\varepsilon$ は通常2つに分けられる。すなわち砂粒子自身の弾性的な圧縮 $d\varepsilon_e$ と間ゲキに砂粒子が貫入することによる圧縮 $d\varepsilon_p$ である。前者は弾性的であるから応力があまり大きくないかぎり可逆的である。後者はエネルギーの大部分は砂粒子間の摩擦にうち勝つために消費されるのでほとんど非可逆的である。

$$d\varepsilon = d\varepsilon_e + d\varepsilon_p \dots \dots \dots (2)$$

Wilson & Sutton¹⁾ は弾性球体の集合体の球自身の弾性圧縮を次式の形で表わしている。

$$\epsilon_e = 1.8454 \left(\frac{4p}{E} \right)^{2/3} \dots\dots\dots(3)$$

ここに E は球の弾性係数である。そこで砂粒子自身の弾性圧縮を (3) 式の形で表われると仮定して次式のようにする。

$$\epsilon_e = \alpha \cdot \left(\frac{p}{E} \right)^\beta \dots\dots\dots(4)$$

さらに $\Delta\epsilon_e = \alpha' \cdot p^{\beta'} \cdot \Delta p \dots\dots\dots(5)$

ここで β' は多分 $-1 < \beta' < 0$ となるであろう。

つぎに粒子が間ゲキに貫入するためには、粒子間摩擦にうち勝って粒子が起動しなければならない。粒子間圧力は粒子各々によって異なるが、その大きさは作用している荷重にほぼ比例するであろう。したがって Δp なる荷重増分があった場合、粒子間摩擦にうち勝って移動の起る粒子間接点の数は p が大きいほど少ない。一方、間ゲキ e 比が大きいほど、 Δp に対する $\Delta\epsilon_p$ は大きくなることは常識的に正しい。したがって $\Delta\epsilon_p$ は次式で表わされると仮定しよう。

$$\Delta\epsilon_p = a \cdot f \left(\frac{e}{p} \right) \cdot \Delta p \dots\dots\dots(6)$$

ここに a は常数である。

2. 1. 実験装置、試料

側方拘束の容器は内径 6.0cm, 高さ 5.0cm の円筒形である。試料は乾燥状態の豊浦の標準砂である。

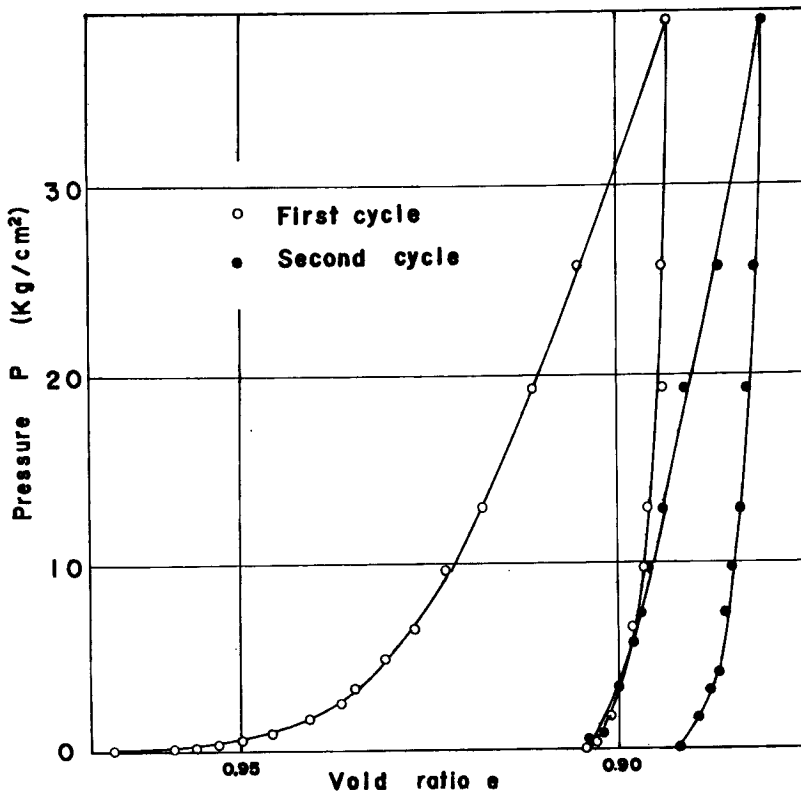


Fig. 1 $e \sim p$ curve.

試料の最大間ゲキ比 e_{max} は 0.962 最小間ゲキ比 e_{min} は 0.642 である。試料は先端に直径 2mm の孔を開けた円錐形容器の中から上記の側方拘束の容器の中へ高さ 5cm より自由落下させ、その時の間ゲキ比を e_{max} とした。そのばらつきはあまりなかった。また試料と容器側面との摩擦を減少せしめるため、容器側面にわずかにグリースをぬった。

2. 2. 実験結果

試料の初期条件として間ゲキ比を最大間ゲキ比にして、段階的に荷重を増加させて圧縮を始めると Fig. 1 に示すような間ゲキ比 e 圧力 p 曲線が得られる。これは載荷を 2 回繰り返したものである。第 1 回目の加圧時の $e-p$ 曲線上での任意荷重 p' に対する間ゲキ比 e' はその荷重の上ではより大きな間ゲキ比が存在しない。もし振動により初期に締め固められていたとか、荷重履歴を有していたとすれば、 p' に対する間ゲキ比は e' より小さい。つぎに圧力と沈下量の関係を示すと Fig. 2 のようになり、第 1 回目と第 2 回

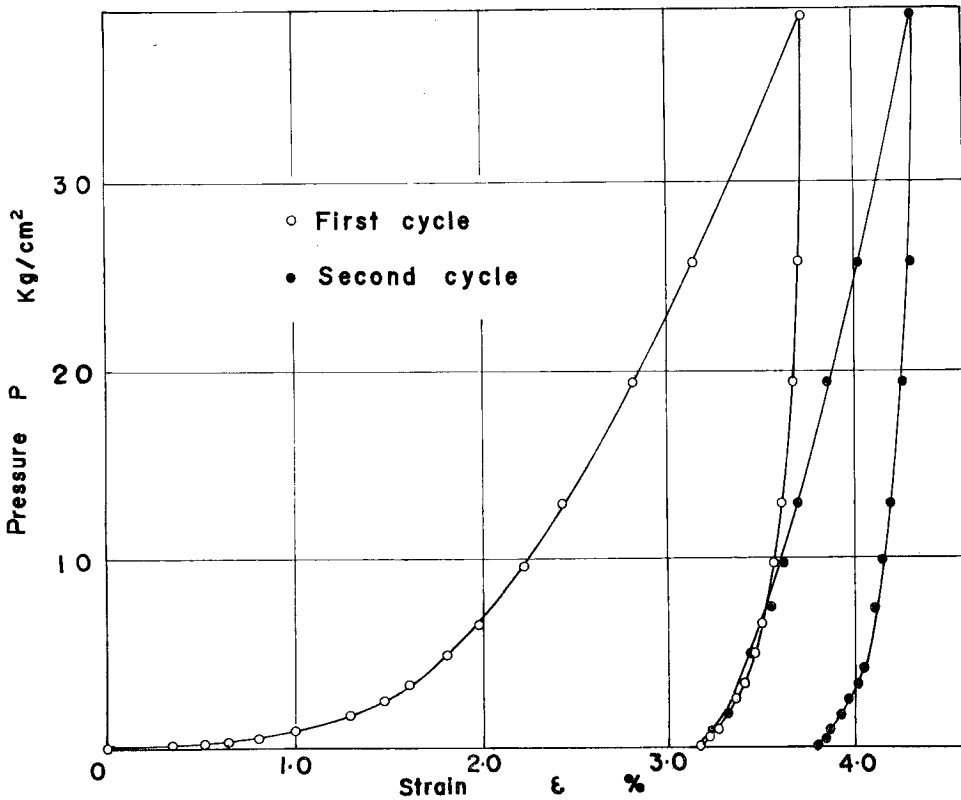


Fig. 2 Relation between strain and pressure.

目の除荷時における沈下の回復量が全く同じになるので、これが弾性的な沈下量とみなすことができよう。したがってこの弾性的な沈下量 ϵ_e と圧力 p の関係を両対数紙上にプロットすると Fig. 3 のようになり (4) 式で示されるように直線にはならない。これは回復しうる沈下量が粒子自身の弾性的変形によるもののみでないということにもよるが、砂のような複雑な集合体では整列した球の弾性圧縮で示された (3) 式のような形では表わすことに無理があるようである。

また Fig. 3 に全沈下量 ϵ , $\epsilon - \epsilon_e = \epsilon_p$, および振動により初に締め固めた試料の ϵ をプロットすると ϵ ,

ϵ_p は Schulze²³⁾ らによって示されたように、荷重の小さいところを除けば近似的に直線となる。したがって (6) 式で示されるような ϵ_p と P の関係は両対数紙上でほぼ直線の関係である。ゆえに (6) 式はつぎのように書ける。

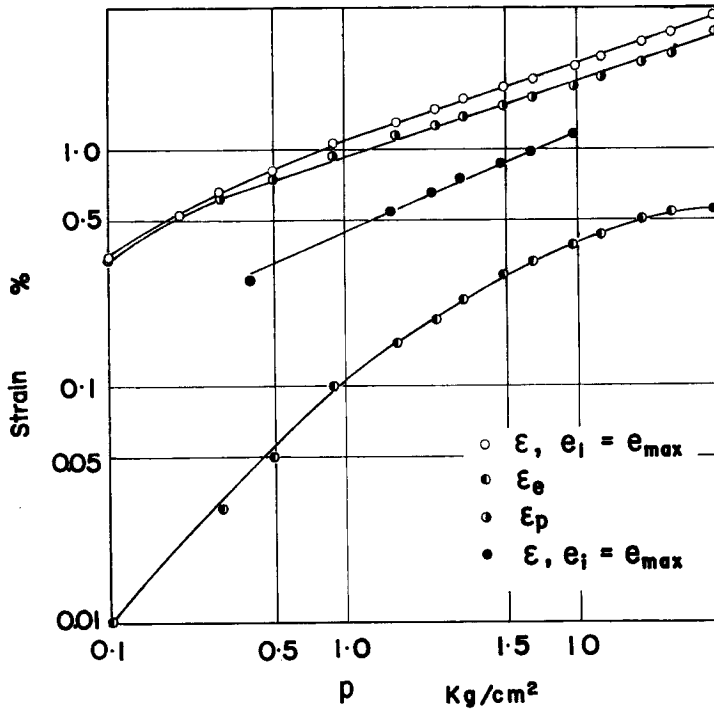


Fig. 3 Relation between pressure and strain.

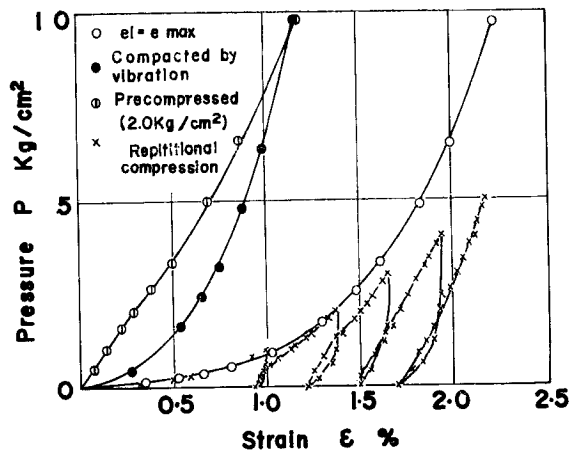


Fig. 4 Relation between strain and pressure.

$$\Delta \epsilon_p = \frac{a}{p^n} f(e) \cdot \Delta p \dots\dots\dots (7)$$

ここでは常数で、 e はあまり大きな変化がない。そしてこれらの直線の勾配は初期間ゲキ比によってあまり変化しない（これは Schulze によっても示されている。ただし ϵ_0 を無視する）から n の値は初期間ゲキ比の値によってほとんど変化しない。しかし初期間ゲキ比によって $af(e)$ の値が変化する。

つぎに初期間ゲキ比 $e_i = e_{max}$ にしたもの、振動により初期間ゲキ比を e_{max} より小さくしたもの、先行荷重により圧縮し初期間ゲキ比を e_{max} より小さくしたもの、初期間ゲキ比を e_{max} にして繰り返し増減させながら荷重を増加させたもの、について圧縮試験を行ない圧力～沈下量曲線を示したのが Fig. 4 である。この図の4種の曲線を比較するとつぎのことがわかる。初期間ゲキ比が大きければ圧縮性も大きい。先行荷重の近くで沈下量 ϵ ～圧力 p 曲線の連続性がなくなる。先行荷重を受けた試料でも先行荷重を越えた荷重に対しては e_{max} より圧縮を始めたのと同じ圧縮量を示す。すなわち (1) 式の E_s の大きさが等しい。過圧密領域では間ゲキ比が同じであれば先行荷重を受けていけない試料より圧縮量は小さい。荷重を繰り返し増減させると繰り返し回数の増加とともに荷重を繰り返さない場合の沈下量よりも大きくなってくる。

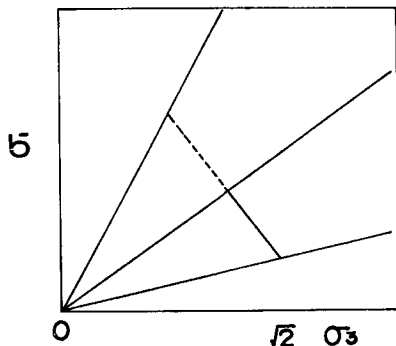


Fig. 5 Stress pass.

3. Extension 状態におけるダイレイタンスー

以前に行なった Compression 状態におけるダイレイタンスー³⁾は Fig. 5 における点線の応力径路に対応するものである。Extension 状態のダイレイタンスーを測定するには Fig. 5 の実線の応力径路に対応した試験を行なわなければならない。一般に土に応力変化があった場合、体積変化 $\Delta V/V$ は次式で示される⁴⁾。

$$\frac{\Delta V}{V} = C \cdot \Delta \sigma'_m + D \cdot \Delta \tau_m \dots\dots\dots (8)$$

ここに C, D は係数、 σ'_m は有効平均主応力、 τ_m は八面体せん断応力である。さらに Compression 試験の結果から砂には次式を用いる方が妥当であることがわかった³⁾。

$$\frac{\Delta V}{V} = C \cdot \Delta \sigma'_m + D^* \left(\frac{\Delta \tau_m}{\sigma'_m} \right) \dots\dots\dots (19)$$

この式の第2項がダイレイタンスーを表わしている。

3. 1. 実験装置

Extension 試験の装置⁵⁾は Fig. 6 に示すように三軸試験のキャップをピストンにつけたフックで引き上げるものである。また試料の両端面での摩擦を減少させるため、Fig. 6 のように、キャップおよびペデス

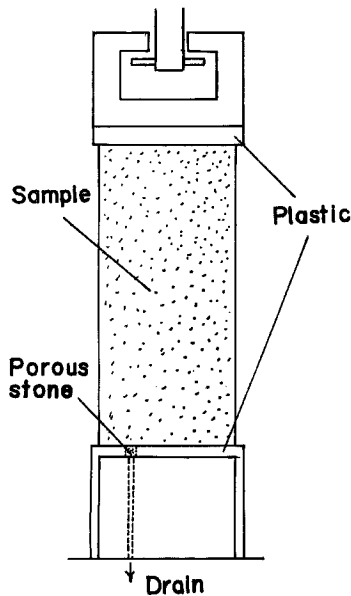


Fig. 6

タルをプラスチック性としてポーラストンを挿入しないで直接砂試料に接触させた。ただ排水のために、排水口に直径3mm程度のポーラストンを埋め込んだ。砂は透水性がよいのでポーラストンを試料端面の全面におくよりも早く排水が行なわれる。なお試料は豊浦の標準砂である。試験法としてはまず等圧 σ'_m を作用させて軸圧を減少させるのと同時にその3分の1だけ側圧を増加させた。このようにして、平均主応力を一定として(9)式の右辺の第1項をゼロとして、ダイレイタンシー量を測定した。

3. 2. 実験結果

ダイレイタンシーによる体積変化と応力比 $(\sigma_1 - \sigma_3) / \sigma'_m$ に対して示すと Fig. 7 のようになる。Compression 状態の場合と合せて示した。Comp. と Ext. を比較してみると $(\sigma_1 - \sigma_3) / \sigma'_m$ が小さいところではダイレイタンシーは Ext. の方が小さいが、 $(\sigma_1 - \sigma_3) / \sigma'_m$ が大きくなると逆になる。しかしこれだけでは両者のダイレイタンシーの大小は論じることができない。それは Ext. 試験には測定上の種々の誤差がともなうからである。例えば Fig. 8 に示すように Compression ではほぼ供試体全体にわたりセン断されているのに対し Ext. ではセン断される範囲が中央部のわずかの部分であり、ここに変形の

大部分が集中する。したがって、供試体全体の平均的なヒズミだけではこれらの変形問題を扱うことはできない。また粒子が粗い場合は側圧が変化するとゴムスリーブが試料の間ゲキに貫入して体積変化に誤差を与える。今後これらの誤差を確実に測定して資料を整理し、つぎの機会に報告したい。

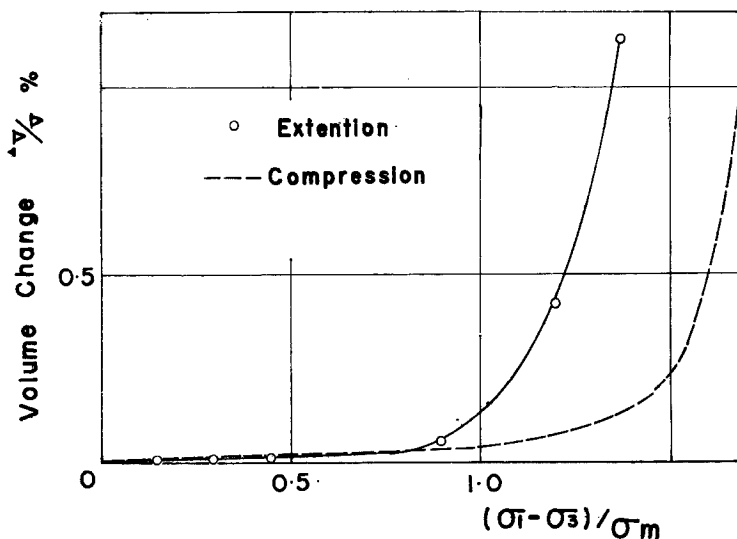


Fig. 7 Relation between stress ratio $(\sigma_1 - \sigma_3) / \sigma'_m$ and volume change due to dilatancy.

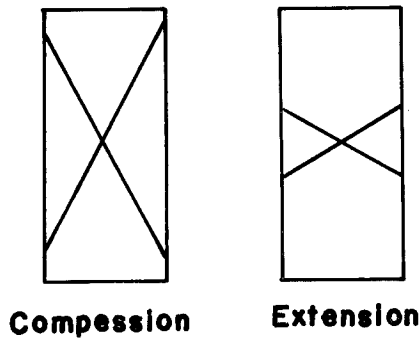


Fig. 8

4. む す び

種々の初期状態にある砂の側方拘束圧縮と Extension 状態のダイレイタンスーについて述べたが、三軸試験により砂の挙動とくに変形の問題を扱うのは種々の誤差が伴ない、正確なデータを得ることが困難である。今後、この誤差を少くするよう努力しなければならないし、またそれらの測定も必要であろう。

終りにではあるが、常に研究の御指導を賜った村山朔郎教授に深く感謝するとともに、実験にあたり多大の労をかけた高木俊郎君に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Wilson, G. and Sutton, J., "Contribution to the Study of Elastic Properties of Sand", Proc. 2nd Int. Conf. on S.M.F.E., Vol. I, 1948, pp.197—202
- 2) Schulze, E. and Moussa, A., "Factors Affecting the Compressibility of Sand", Proc. 5th Int. Conf. on S.M.F.E., Vol. I 1961, pp.335—340
- 3) 村山朔郎, 八木則男: 砂の変形特性について, 京都大学防災研究所年報第7号, 昭和39年, pp.24—38
- 4) Skempton, A. W., "The pore-pressure coefficient in Saturated Soil", Geotechnique Vol. 10, 1960, pp.186—187
- 5) 柴田徹, 軽部大蔵: "粘土の強度に与える中間主応力の影響", 第19回土木学会年次学術講演会講演概要, 昭和39年, pp.29-1—29-2