

單純せん断時ににおける砂のダイレイタンシー特性に関する一考察

宮崎大学 正員・藤本 廉

〃 学生 池下 菲

〃 横山順一

1. まえがき

單純せん断時ににおける砂の応力-変形-ダイレイタンシー関係については、すでに、小田^{1)~6)} P.W. Rowe⁵⁾あるいは落合^{6),7)}に代表される多くの優れた研究がある。特にダイレイタンシー現象については、小田は、せん断中ににおける主応力軸の回転を考慮に入れて独自に提案した式、 $\sigma/\sigma_n = n \tan \psi$ ——ここに、 σ と σ_n はそれぞれ水平面に加えられたせん断応力と垂直応力、 n は実験条件によるひずみ定数、 ψ はせん断中に回転する最大主応力軸と鉛直軸とのなす角——に基づいて、三軸圧縮試験による応力-ダイレイタンシー関係式が平面ひずみ状態の單純せん断や直接せん断試験時の応力-ダイレイタンシー関係には適用できないことを示している。³⁾ところで、筆者の一人(藤本)⁸⁾は、以前、三軸圧縮試験による乱したシウドのせん断特性の解明に関連して、砂のダイレイタンシー現象に粒子形状の影響が無視できないことを指摘しており、今回、その問題を改めて單純せん断試験によって照合するため、小田の理論の適用を試みてみたところ、三軸試験によるダイレイタンシー式に小田の基本式を導入しても比較的簡単に單純せん断あるいは直接せん断時のダイレイタンシー現象が説明できることが確かめられたので、第1報として報告し、批判を乞うこととした。

2. 提案式の誘導

一般に、三軸圧縮試験時のダイレイタンシー式には赤井⁹⁾が提案した次式が基本になっている。 $(\sigma_1 - \sigma_3)_p = (\sigma_1 - \sigma_3)_r + \left(\frac{d\sigma}{d\varepsilon_e}\right)_{\sigma_3} \dots \dots \dots (1)$ ここに、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_p$ はピーフ主応力差、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_r$ はせん断のみに消費された部分の主応力差、 $(d\sigma/d\varepsilon_e) = d(\sigma/\varepsilon)/d\varepsilon_e = D_i$ はダイレイタンシー指数である。ところで、小田の基本式をモール応力円について解釈した落合によれば、單純せん断時においては、 $\sigma_1 = (\tau^2 + K\sigma_n^2)/K\sigma_n \dots \dots \dots (2)$ $\sigma_3 = (1-K)\sigma_n \dots \dots \dots (3)$ が成立するので、式(1)に式(2)×(3)を代入すれば、 $\left\{ \frac{\tau^2 + K\sigma_n^2}{K\sigma_n} - (1-K)\sigma_n \right\}_p = \left\{ \frac{\tau^2 + K\sigma_n^2}{K\sigma_n} - (1-K)\sigma_n \right\}_r + D_i(1-K)\sigma_n \dots \dots \dots (4)$ ここで、式(4)の右辺第2項の D_i の代りに單純せん断時のダイレイタンシーの程度を表わす($\Delta h/\delta$) = \bar{D}_i —— Δh は鉛直方向変位、 δ は水平方向変位 ——を用いれば、 $\left\{ \frac{\tau^2 + K\sigma_n^2}{K\sigma_n} - (1-K)\sigma_n \right\}_p = \left\{ \frac{\tau^2 + K\sigma_n^2}{K\sigma_n} - (1-K)\sigma_n \right\}_r + \bar{D}_i(1-K)\sigma_n \dots \dots \dots (5)$ 式(5)はさうに、 $\left\{ \frac{\tau^2 + K\sigma_n^2}{K\sigma_n} + K\sigma_n \right\}_p = \left\{ \frac{\tau^2 + K\sigma_n^2}{K\sigma_n} + K\sigma_n \right\}_r + \bar{D}_i\sigma_n - \bar{D}_i(1-K)\sigma_n \dots \dots \dots (6)$ となる。また、 $(\sigma/\sigma_n) = n \tan \psi$ より $\tan \psi = (\tau/\sigma_n)$ を式(4)に代入すれば、 $\left\{ \tau \tan \psi + \frac{\tau}{\tan \psi} \right\}_p = \left\{ \tau \tan \psi + \frac{\tau}{\tan \psi} \right\}_r + \bar{D}_i\sigma_n - \bar{D}_i \frac{\tau}{\tan \psi}$ 、この式はさうに次式となる。 $\left(\frac{2\tau}{\sin 2\psi} \right)_p = \left(\frac{2\tau}{\sin 2\psi} \right)_r + \bar{D}_i(1-K)\sigma_n \dots \dots \dots \dots \dots (7)$

式(7)が今回提案する單純せん断あるいは直接せん断時のダイレイタンシーに関する基本式である。

3. 実験的考察

(1) 実験方法：実験に使用した單純せん断試験機はケルマンタイプで、供試体寸法は直径10cmで高さが3cm²

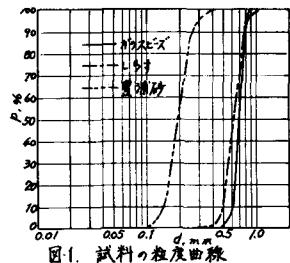


図1. 試料の粒度曲線

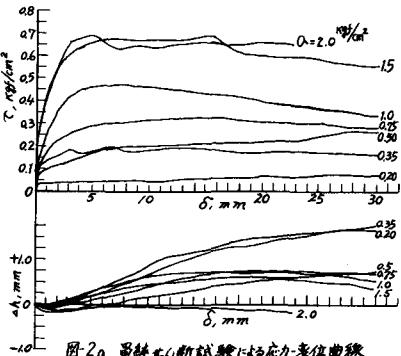


図2a. 単純せん断試験による応力-変位曲線 (ガラスビーズ)

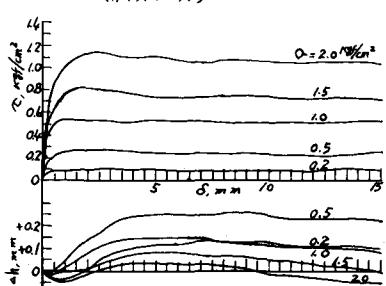


図2b. 改良型一面せん断試験による応力-変位曲線 (ガラスビーズ)

ある。試料には粒子形状の影響を調べるために、豊浦標準砂とそれに粒度の近似したガラスビーズ及びガラスビーズの粒度に調整したシリカを使用した。これら3種の試料の粒度曲線を図-1に示す。また、3試料の最大及び最小隙間比の実測値を表-1に示す。

実験には3試料共気乾状態のものを使用し、垂直応力には、 $\sigma_n = 0.20, 0.35, 0.50, 0.75, 1.00, 1.50$ 及び 2.0 kgf/cm^2 を用意として5段階採用した。さらに、單純せん断試験と比較する目的で、改良型一面せん断試験機で $\sigma_n = 0.20, 0.50, 1.0, 1.5$ 及び 2.0 kgf/cm^2 の下で同様の試験を行った。せん断は、試料をセットして上記の σ_n で10分間圧縮された後、 1 mm/min の変位速度で変形を与えた。

(2) 実験結果と考察

図-2a,b は、ガラスビーズの單純せん断と一面せん断試験による応力-変位-ダイレイターンシーカーブを示す。他の試料でも同様であったが、單純せん断試験による応力-水平変位(8)曲線は一面せん断試験よりも比べて乱れながら現われてピーク応力の決定に困難なものがあった。また、 σ_n が小さい場合には水平変位が供試体直徑の約1/3に達しても正のダイレイターンシーカーが進行してピーク応力の決定が困難であった。

図-3は、2種類のせん断試験によるダイレイターンシーカーブの値と σ_n の関係を示す。この実験では2種の試験時の初期隙間比 e_0 が同一ではなかったので厳密な解釈はできないが、ほぼ D_i は σ_n が大きくなると小さい値を示す傾向にあるようである。

図-4は、2種類の試験によるピーク応力時の破壊線式(7)によると、ダイレイターンシーカー補正をした場合の破壊線及び応力が対応状態で達した(一応、残留応力を称した)場合の破壊線を示したものである。表-2は3試料のピーク応力、 D_i 補正によって応力及び残留応力のそれぞれによって求めた強度定数を示した。豊浦砂については以前に行なった三軸圧縮試験の値を参考までに示した。これらの結果から、ガラスビーズに関しては、式(7)によるダイレイターンシーカー補正が一応有効であるようである。式(7)による計算に当っては $\alpha = 0.58$ ³⁾ の値を採用した。豊浦砂の計算値に疑問があるのはこの α の値が不適当であるためと考えられる。

4. 終わり

單純せん断本邦の直接せん断時のダイレイターンシーカー現象を簡単に説明するために、三軸圧縮試験による応力-ダイレイターンシーカー関係式に小田と落合の理論の導入を試みてみたが、現時点ではなお不十分な点がある。また、実験の精度も不十分であるので今後検討の余地がある。

参考文献 1) M.Oda & J.Konishi: Microscopic Deformation Mechanism of Granular Material in Simple Shear, Soil and Foundations, Vol.14, No.4, 2) M.Oda & J.Konishi: Rotation of Principal Stresses in Granular Material during Simple Shear, Soils and Foundations, Vol.14, No.4. 3) On Stress-Dilatancy Relation of Sand in Simple Shear Test, Soils and Foundations, Vol.15, No.2. 4) Oda, M.: On the Relation $\Delta G_n = k \tan \phi$ in the Simple Shear Test, Soils and Foundations, Vol.15, No.4. 5) P.W.Rowe: Geotechnique, Vol.19, No.1. 6) 岩谷義典: 土壌せん断試験における3種の導動、土壤工学会論文叢集第15号, 7) 寺内・直接せん断試験と平面せん断試験における砂のせん断強度の関係、同上。8) 藤井・山田・吉田: 土壤工学会論文集第15号、9) 佐井・川島: 土壤工学会論文集第15号。

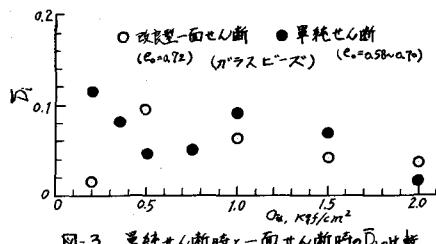


図-3. 単純せん断時と一面せん断時の D_i 比較

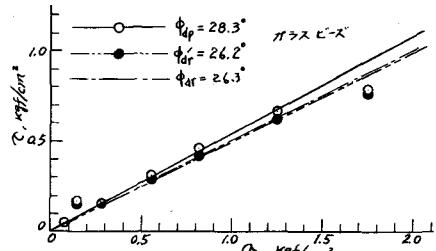


図-4a. 単純せん断試験によるピーク応力時とダイレイターンシーカー補正後のせん断抵抗角

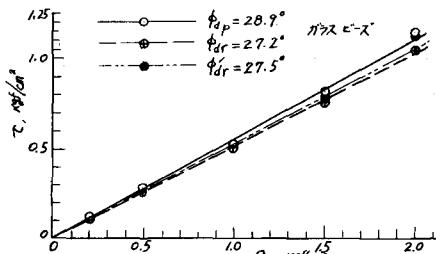


図-4b. 一面せん断試験によるピーク応力時、残留応力時及びダイレイターンシーカー補正時のせん断抵抗角

表-2. 強度定数一覧表

試料	豊浦砂			ガラスビーズ		
	ピーク応力	D_i 補正	残留応力	ピーク応力	D_i 補正	残留応力
強度定数	C_{dp} ϕ_{dp} °	C_{dr} ϕ_{dr} °	C_{ds} ϕ_{ds} °	C_{dp} ϕ_{dp} °	C_{dr} ϕ_{dr} °	C_{ds} ϕ_{ds} °
單純せん断	0.180	33.2	0.180	32.9	0.160	23.1
一面せん断	0	37.5	0	37.5	0	32.2
三軸圧縮	0	40.9	0	36.8	—	—

図-4は、2種類の試験によるピーク応力時の破壊線式(7)によると、ダイレイターンシーカー補正をした場合の破壊線及び応力が対応状態で達した(一応、残留応力を称した)場合の破壊線を示したものである。表-2は3試料のピーク応力、 D_i 補正によって応力及び残留応力のそれぞれによって求めた強度定数を示した。豊浦砂については以前に行なった三軸圧縮試験の値を参考までに示した。これらの結果から、ガラスビーズに関しては、式(7)によるダイレイターンシーカー補正が一応有効であるようである。式(7)による計算に当っては $\alpha = 0.58$ ³⁾ の値を採用した。豊浦砂の計算値に疑問があるのはこの α の値が不適当であるためと考えられる。

单純せん断本邦の直接せん断時のダイレイターンシーカー現象を簡単に説明するために、三軸圧縮試験による応力-ダイレイターンシーカー関係式に小田と落合の理論の導入を試みてみたが、現時点ではなお不十分な点がある。また、実験の精度も不十分であるので今後検討の余地がある。

参考文献 1) M.Oda & J.Konishi: Microscopic Deformation Mechanism of Granular Material in Simple Shear, Soil and Foundations, Vol.14, No.4, 2) M.Oda & J.Konishi: Rotation of Principal Stresses in Granular Material during Simple Shear, Soils and Foundations, Vol.14, No.4. 3) On Stress-Dilatancy Relation of Sand in Simple Shear Test, Soils and Foundations, Vol.15, No.2. 4) Oda, M.: On the Relation $\Delta G_n = k \tan \phi$ in the Simple Shear Test, Soils and Foundations, Vol.15, No.4. 5) P.W.Rowe: Geotechnique, Vol.19, No.1. 6) 岩谷義典: 土壌せん断試験における3種の導動、土壤工学会論文叢集第15号, 7) 寺内・直接せん断試験と平面せん断試験における砂のせん断強度の関係、同上。8) 藤井・山田・吉田: 土壤工学会論文集第15号、9) 佐井・川島: 土壤工学会論文集第15号。