

III-15 直接せん断時における砂の動き(才二報)

東洋大学工学部 正員 赤木 俊允

1. はじめに

直接せん断をうける砂などのような流動を示すものを、できるだけローカルな変化として把握するために、側面がガラスの大型直接せん断試験機を製作し実験を行った。予備実験¹⁾の結果については、試料内部の間ゲキ比変化の分布として発表した²⁾が、今回は装置・方法に若干の改良を施した後、一連の本実験を行い、間ゲキ比の変化のみならず、試料内部に発生する各種のヒズミの計算を行ってその分布を調べることにした。現在整理のついでに一部資料についてここに報告する。

2. 実験概要

今回は上下せん断箱に若干の補強を施した他、鋼鉄製の木ネジ(頭の直径5.5mm,長さ20mm)を図-1のように約2cm間隔で等長に配置し、測定位を大中に増加した。中30cm,厚さ15cm,高さ10~20cmの砂の試料について垂直荷重0.2 kg/cm²,上箱可動・下箱可動の場合の実験が終了しているが、ここでは高さ10cm,初期間ゲキ比が平均0.637の試料につき下箱を固定し上箱可動の条件で行った試験について報告する。試料は比較的粒径の良い乾燥砂で、試験開始時の相対密度は約66%であった。試験中は上箱に水平変位を1mm与える毎に写真とり(写真1)、後これを拡大して各マーカーのx,y座標、およびその変化分を、ひきおこした。上箱に与えた全水平力をストレーン・ゲージで測定したが、この読みと水平変位dとの関係を図-2に示す。水平抵抗には種々のマサツが含まれているが、d=6mm近辺で最大値をとり、所謂「破壊」に達したことを示している。試験中に測定した土蓋の沈下量から得られる体積変化を「実験値」として、145ヶのマーカーによって形成される251ヶの三角形要素の各面積変化分を総和して求めた体積変化を「計算値」として、全くと図-2に示したが、後者には配置されたマーカーから外側の部分(上下両側約1cmの領域)の計算が含まれていないにも拘らず、よい一致を示している。

3. ヒズミの計算

砂のような材料の内部におけるヒズミについては、ロスコー³⁾が用いた近接する4点の座標と変位量とから求める方法もあり現在検討中であるが、ここでは有限要素法⁴⁾でよく用いられる仮定「水平、垂直方向の変位量u,vはx,yの一次関数として与えられる」からヒズミを定義することにする。

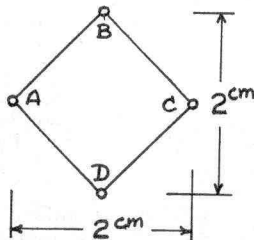


図-1 マーカーの配置

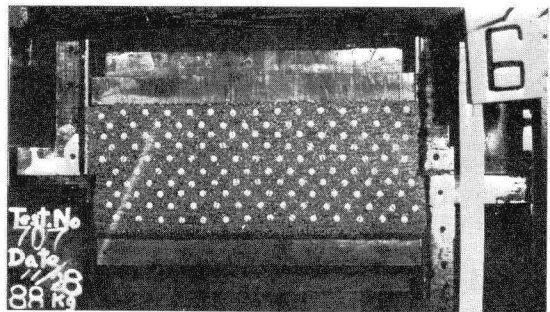


写真-1 d=6mmの状態(上半分が左へ移動中)

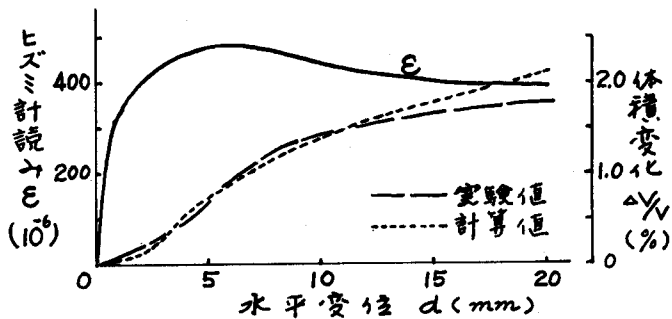
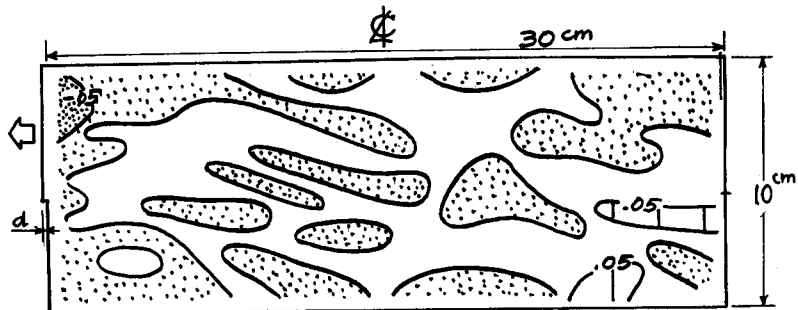


図-2 直接せん断中の
水平変位と
体積変化

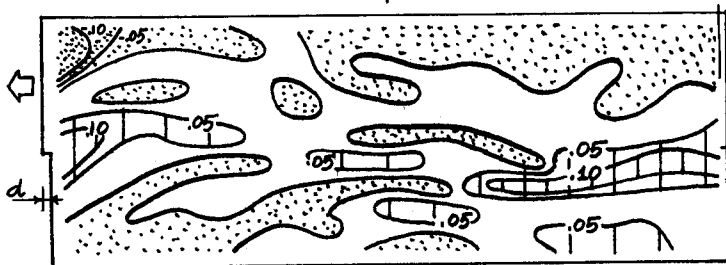
図-3

せん断ヒズミ
 γ_{xy} の分布

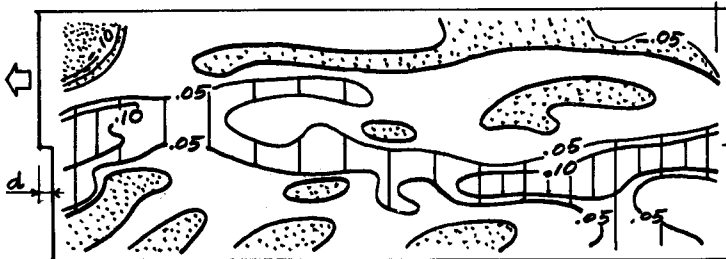
(a) $d=2$ mm



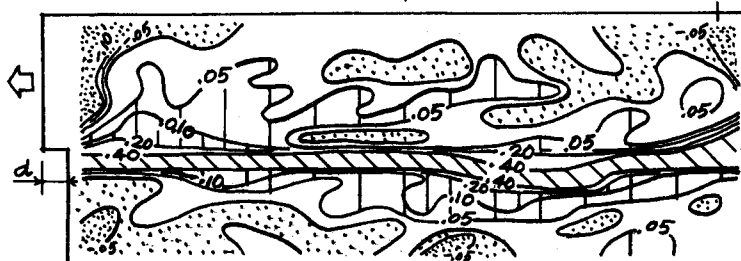
(b) $d=4$ mm



(c) $d=6$ mm



(d) $d=12$ mm



すなわち、
$$u = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y$$
$$v = \alpha_4 + \alpha_5 x + \alpha_6 y$$
 ——— (1)

これが成立せば、 x, y 方向のヒズミ ϵ_x, ϵ_y およびせん断ヒズミ γ_{xy} は次式で与えられる。

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \partial u / \partial x \\ \partial v / \partial y \\ \partial u / \partial y + \partial v / \partial x \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \alpha_2 \\ \alpha_6 \\ \alpha_3 + \alpha_5 \end{Bmatrix} \quad \text{—— (2)}$$

従って、任意の三角形要素を考えた場合、その三角形の頂点にあたる3点の x, y 座標とその変化分 u, v がわかっていれば、(1)式よりすべての α の値が決定され、その三角形内部における三種のヒズミが(2)式により求まる。さらに要素内の最大・最小主ヒズミ ϵ_1, ϵ_3 、最大せん断ヒズミ γ_{max} 、および主ヒズミの傾き θ は、次のように計算できる。

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_3 \end{Bmatrix} = \frac{1}{2} (\epsilon_x + \epsilon_y \pm \sqrt{(\epsilon_x - \epsilon_y)^2 + \gamma_{xy}^2})$$
$$\gamma_{max} = \sqrt{(\epsilon_x - \epsilon_y)^2 + \gamma_{xy}^2}, \quad \tan 2\theta = \frac{\gamma_{xy}}{\epsilon_x - \epsilon_y} \quad \text{—— (3)}$$

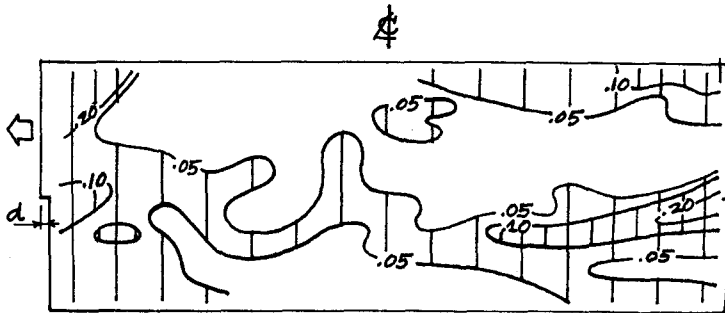
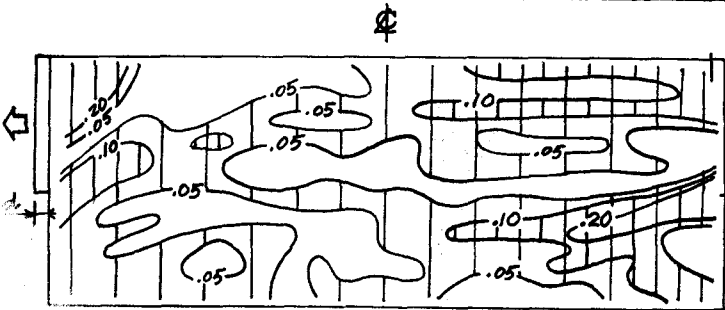


図-4
最大せん断ヒズミ
 γ_{max} の分布

(a) $d=4\text{mm}$



(b) $d=6\text{mm}$

なお、体積変化を求める α に前項¹⁾、各三角形要素の面積 T の変化分 ΔT として計算したが、

$\Delta T / T = \epsilon_x + \epsilon_y$ としてよい筈であるから、平面ヒズミの条件下では一要素内における

間ゲキ比の変化分 Δe は、
$$\Delta e = \frac{\Delta T}{T} (1 + e) = (\epsilon_x + \epsilon_y) (1 + e) \quad \text{—— (4)}$$

としても表現できることになる。以上の計算では変化管理すべて累積の形で定義し、例えば d_{i-1} に対してある要素内に生ずるヒズミ ϵ_i は、 d_{i-1} から d_i までに生じたヒズミ $\Delta \epsilon_i$ を求め、 $\epsilon_i = \epsilon_{i-1} + \Delta \epsilon_i$ として計算した。すべての計算は本学工学部の NEAC 3100 を用いて行った。

4. セン断ヒズミ

図-1においてACで横割りにしてできる三角形要素について種々のヒズミを計算したもののうち、セン断ヒズミ δ_{xy} の分布を図-3(a)~(d)に示す。黒点を配した部分とそれ以外の部分とは δ_{xy} の符号が異なっており、夫々、右へたり張られる様なヒズミ(-)と、左へ引きずられるようなヒズミ(+)の発生する領域であることを示している。同様なヒズミの分布では、試料全体にわたって戸状ないし塊状の体積増減が発生し、これがめまぐるしく変化しなげらるゝ、与えた水平変位 d が大きくなると破壊領域とも呼べる大きな体積変化を示す帯状領域が確立されてくるものがあるが、 δ_{xy} の分布についてはこの傾向がより明確に見られる。 $d=2\text{mm}$ では既に全域にわたる「ゆがみ」が発生しており、右端の印断面近辺で大きなヒズミの領域が発達（始まる）が認められる（図-3a）。 $d=4\text{mm}$ になると、左右から舌状に伸びてくる0.05以上のヒズミ領域がほぼ連続（図-3b）、 $d=6\text{mm}$ に達すると、この領域が完全に一体化し、0.10以上の帯が顕著に発達してくるものが見られる（図-3c）。 $d=2, 4\text{mm}$ で発現した全水平塩坑は、夫々、最大値の83, 96%であって、 d の値のみでは、どの位「試料全体としての破壊」に近づいたのか即断を許さない。 $d=12\text{mm}$ に到ると、塩坑力は最大値の88%に下り、厚さ約2cmのセン断ヒズミ0.20以上のベルトが、印断面より稍下側に確立される（図-3d）。0.40以上のベルト内では三角形要素の変形が極端で、長径にはあまり意味がないと思われる。

比較のため、最大セン断ヒズミ δ_{max} の分布、 $d=4, 6\text{mm}$ の場合を図-4(a), (b)に示す。これは(3)式により経体値として算出されるので、向きについては区別できないが、大体 δ_{xy} の分布と似た傾向を示し大きなヒズミの帯状領域が左右から発達してくるものが見られる。 $d=4\sim 6\text{mm}$ になると0.05以上の領域では δ_{xy} は δ_{max} に近い値となり始め、殊に0.10以上のゾーンではほぼ等しくなるので、主ヒズミの方向は45°近く傾いていることがわかる。従って大きなヒズミの領域内では主応力もその程度傾いている事が想像される。さらに d が大きくなるにつれ、「破壊帯」内では到るところで δ_{xy} は δ_{max} にほぼ等しくなることが認められる。

5. おわりに

今回ヒズミの計算では、通例のFEMの経路を逆に少々さかのぼってみたわけでもあるが、 E_x, E_y の計算値などは満足すべきものではないように思われ、砂などに対する(1)式の妥当性、および三角形要素のとり方については検討中である。極端な変形を示す印断面附近を除いても、図-1の菱形をACで横割りにするのとBDで縦割りにするのとでは、 d やヒズミの値にかなりの差が生じている。二に報告したセン断ヒズミについてもまだ結論を下す段階には至っていない。しかしながら、直接セン断をうける砂試料内部に生ずる変化とその分布は、普通考えられている以上に複雑であることは明らかであって、現在なお、この破壊機構の解明に資するための実験・計算が進行中である。

本研究について東京大学の石原研助教授より有益な示唆を蒙った。こゝに感謝の意を表す。

6. 参考文献

- 1), 2) は夫々 筆者による土木学会(1969)[Ⅲ-38], 工機工学会(1970)[50 D-6]の講演集報告
- 3) 1)の中参考文献5
- 4) Zienkiewicz, O.C. (1967) "The Finite Element Method" McGraw-Hill

[19 June '70 for 26th JSCE Conf., Sendai.]