

排土板に作用する力の解析 (その 2)

Soil-Structure Interaction of Moving Machineries (2nd Report)

浦 環*・坂 巻 隆*

Tamaki URA and Takashi SAKAMAKI

1. はじめに

図1のように、地盤等を削り取り、掘り起こす機械の排土板に作用する力はいわゆる受動土圧であるが、それを解析するのに2次元の土圧理論を直接利用できない。なぜなら、排土板の板幅が有限であるために、すべり面の3次元影響および盛り上がった土の影響が多く、それを考慮せねばならないからである。すべり面を実際の現象に対応するように仮定し、前方に盛り上がった土砂の形状をうまく表現すれば、3次元の土楔論を用いて解析し得ることが前報に示された。^{1,5)} 前報では板幅内の盛り上がり形状を一様としたために、排土板のアスペクト比 d/b が小さい場合に実験値と解析値の間に誤差を生じた。本論では、この点を修正して、より現実的な解析法について述べる。

2. 解析モデル

定常状態で前進する長方形の排土板 (図2参照) STUV を考える。板面と乱されない土表面との交線の板中心に原点をとり、板の進行方向に X 軸、鉛直上向きに Z 軸、水平方向に Y 軸をとる。簡単のために、板は進行方向の左右に傾きを持たない対称状態とする。板幅を b 、乱されない土表面からの板先端までの深さを d とする。板面と水平面とのなす角 η を開き角と呼ぶ。機械加工関係では鉛直面とのなす角 $90^\circ - \eta$ をすくい角と呼んでいるが、ここでは排土板の傾きを開き角で表す。また、 30°

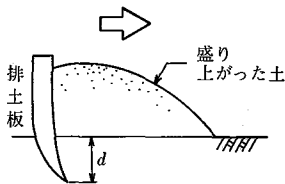
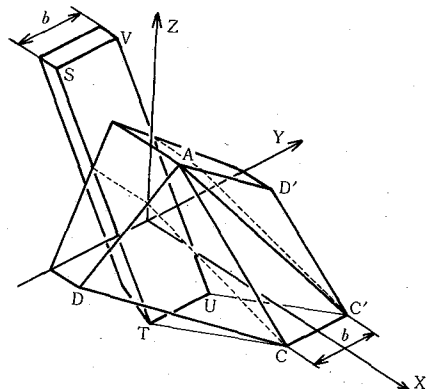


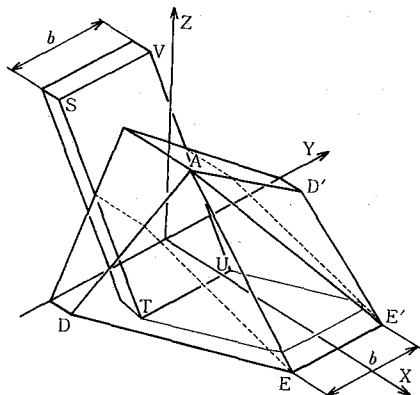
図1 土を盛り上げて前進する排土板

$\leq \eta \leq 90^\circ$ の範囲で考え、すくい角は負にならないものとする。著者らはガラス浸透法を用いて、このような排土板の前方の土粒子の3次元的な変形を計測しており、^{2,3,4)} その結果、次の結論を得ている。

A. すべり面は板幅内の断面ではほぼ同一の形状をしており、平面とみなすことができる。



(A) アスペクト比 d/b が大きい場合



(B) アスペクト比 d/b が小さい場合

図2 土の盛り上がり形状とすべり面の仮定

* 東京大学生産技術研究所 第2部

研 究 速 報

B. すべり面の内側の粒子はすべり面に平行に移動する。

C. 板幅の外側の粒子の変位は無視できる。

これより、次の条件で塑性解析を行う。

(1) すべり面について

(1-1) 板の左右縁から進行方向に延びる鉛直面と、排土板下縁から前方へ水平面となす角 ρ で延びる平面との3面ですべり面が構成される。

(1-2) 下縁から延びる面へは、内部摩擦角 ϕ で方向が表される力が作用する。

(1-3) 鉛直な側面に作用する面に垂直な力は、土表面からの深さに比例する応力 $K_0\gamma Z^*$ で与えられ、面内の摩擦力は板の下縁から出るすべり面に平行であり、垂直な力の $\tan \phi$ 倍として $\tan \phi K_0\gamma Z^*$ で与えられる。ここで、

K_0 : 静止土圧係数

γ : 浮力をのぞいた土の見掛けの比重

Z^* : 土表面からの深さ (盛り上がりも考慮する)

(2) 盛り上がり形状について

(2-1) 排土板先端の真上より後方では、板の対称面上で、

$$\sqrt{db} \tan \phi + \frac{1}{2}b \tan \phi \quad (1)$$

の高さに盛り上がり、左右へ角度 ϕ で崩れる。排土板直上の頂点を A とし、そこより側方へ崩れた乱されない土表面上の点を DD' とする (図2参照)。

(2-2) 排土板下縁から出るすべり面が乱されない土表面を切る線分を CC' とする。面 ACC' と水平面となす角が ϕ 以下のときには、板の先端より前方では ADC, ACC', AD'C' で囲まれる領域に盛り上がる (図2-(A)および図3-(A)参照)。CC' は板幅に等しい。

(2-3) アスペクト比 d/b が小さく、盛り上がり量が大きくなれば、土は前方にも崩れる。すなわち、面 ACC' と水平面がなす角が ϕ を越えるときには、前方にも角度 ϕ で崩れる。図3-(B)に示すように、面 AEE' が水平面

と角度 ϕ をなし、EE' は板幅に等しい。したがって、ADE, AEE', AE'D' で囲まれる領域に盛り上がる。板下縁から延びるすべり面は、結果として盛り上がった土を貫くことになる。面 ADE, AD'E' の傾斜は ϕ を越えるが、無視する。

すべり面で囲まれる土の重量を W 、左右の鉛直面に作用する剪断力をそれぞれ R とする。

$\cot \rho \tan \phi \geq h_1 + h_2$ のとき

$$W / \frac{1}{2} \gamma d^2 b = (1+h_1) \{ (1+h_1) \cot \eta + \cot \rho \} + h_2 \left\{ \left(1+h_1 + \frac{1}{3} h_2 \right) \cot \eta + \frac{2}{3} \cot \rho \right\} \quad (2)$$

$$R / \frac{1}{2} \gamma d^2 b = \frac{1}{3} K_0 \tan \phi (d/b) (1+h_1)^2 \times \{ (1+h_1) \cot \eta + \cot \rho \} \quad (3)$$

$$h_1 = \sqrt{(b/d) \tan \phi} \quad (4)$$

$$h_2 = \frac{1}{2} (b/d) \tan \phi \quad (5)$$

$\cot \rho \tan \phi < h_1 + h_2$ のとき

$$W / \frac{1}{2} \gamma d^2 b = (1+h_1) \{ (1+h_1) \cot \eta + x_2 \} + h_2 \left\{ \left(1+h_1 + \frac{1}{3} h_2 \right) \cot \eta + \frac{2}{3} \cot \rho \right\} - \frac{1}{3} (x_3 - x_2)(x_1 - x_2)(2 + x_1/x_3) / (\tan \lambda + \tan \rho) \quad (6)$$

$$R / \frac{1}{2} \gamma d^2 b = \frac{1}{3} K_0 \tan \phi (d/b) (1+h_1)^2 \times \{ (1+h_1) \cot \eta + x_2 \} \quad (7)$$

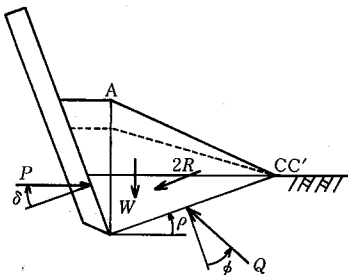
$$\tan \lambda = h_1/x_3 \quad (8)$$

$$x_1 = (1+h_1+h_2) / (\tan \phi + \tan \rho) \quad (9)$$

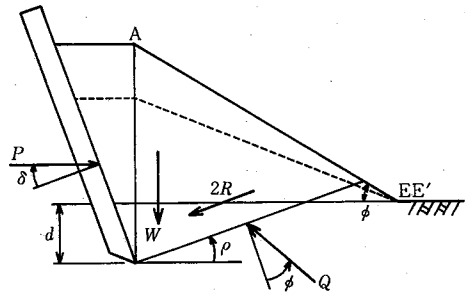
$$x_2 = (1+h_1) / (\tan \lambda + \tan \rho) \quad (10)$$

$$x_3 = (h_1+h_2) / \tan \phi \quad (11)$$

排土板に作用する力 P は、 ρ を未知の量として、力のつり合い条件より (図3参照)



(A) アスペクト比 d/b が大きい場合



(B) アスペクト比 d/b が小さい場合

図3 土楔に作用する力

$$P = \{W \sin(\rho + \phi) + 2R \cos \phi\} / \sin(\rho + \phi + \eta + \delta) \quad (12)$$

δ : 板面と土との摩擦角
 であり、土楔理論と同じ手法により、 ρ に関する P の最小値が求める P の値である。

板面に作用する垂直力を F_n とすれば

$$F_n = P \cos \delta = \frac{1}{2} C_n \gamma d^2 b \quad (13)$$

の関係があり、無次元の垂直力係数 C_n はアスペクト比と開き角の関数になる。板面内の力 F_t は

$$F_t = F_n \tan \delta \quad (14)$$

であるので、抗力 F_D と揚力 F_L は次式で表せられる。

$$F_D = (\sin \eta + \cos \eta \tan \delta) F_n \quad (15)$$

$$F_L = (-\cos \eta + \sin \eta \tan \delta) F_n \quad (16)$$

板面に作用する応力が、砂表面からの深さに比例することを仮定すると、板に作用するモーメントを計算することができる。すなわち、乱されない土床面と板面との交線である Y 軸まわりのモーメント M を

$$M = \beta d F_n = \frac{1}{2} C_n \beta \gamma d^3 b \quad (17)$$

とおけば、 β は着力点の深さを表す無次元量となり、(4)、(5)式を考慮して

$$\beta = \frac{2}{3} \left(1 + \frac{3}{2} h_1 + \frac{3}{8} h_1^2 - \frac{1}{2} h_1^3 - \frac{3}{8} h_1^4 - \frac{1}{8} h_1^5 - \frac{1}{64} h_1^6 \right) / \left(1 + 2h_1 + \frac{3}{2} h_1^2 + \frac{1}{2} h_1^3 + \frac{1}{12} h_1^4 \right) \quad (18)$$

が得られる。

3. 実 験

粉粒体の 3 次元変形を計測した装置^{2,3,4})を用いて、排土板のアスペクト比と開き角を変え、作用する力の 3 成

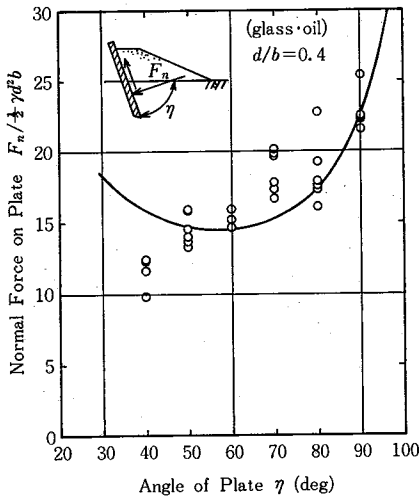


図 4 排土板に作用する垂直力

分を計測した。排土板は硬質ガラスで作られ、粒子も同じ硬質ガラスを粉砕して作ったものである。粒子の性状を以下に示す。粒子の 3 次元的な変位を計測するために、粒子間隙はテレピン油で飽和させており、また、盛り上がった粒子が液体面上に出ることはない。板幅は 20~80 mm、深さは 8~50 mm の間である。

- 内部摩擦角 $\phi = 33.0^\circ$
- 見掛けの比重 $\gamma = 0.666$
- 間 隙 比 $e = 1.0$
- 粒 径 $D_{50} = 0.96$
- 均等係数 $U_c = 1.43$
- 曲率係数 $U_c = 1.11$
- 板面摩擦角 $\delta = 20^\circ$

図 4~6 にアスペクト比 $d/b = 0.4$ の場合、開き角 η と

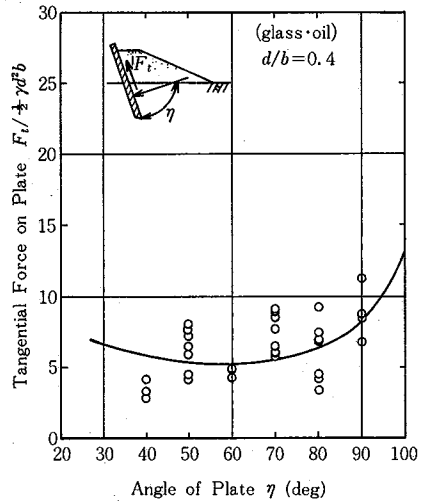


図 5 排土板に作用する面内力

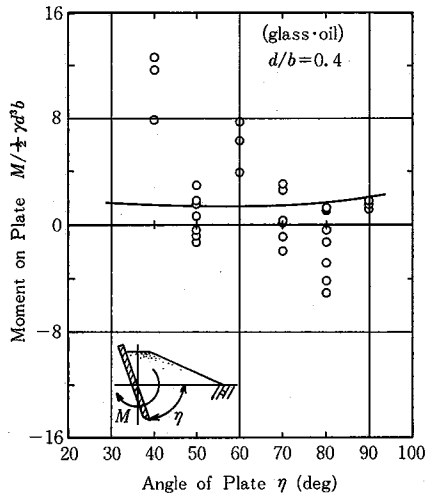


図 6 排土板に作用するモーメント

研究 速 報

F_n , F_t およびモーメント M の結果を示す。力は $(1/2)\gamma d^2 b$ で、モーメントは $(1/2)\gamma d^3 b$ で割り無次元化している。(13), (14), (17)式を用いて計算した値を実線で示す。また、図7~9に $\eta=40^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ の場合、アスペクト比 d/b と F_n, F_t, M の関係を示す。

計算値は実験値を非常に良く説明しており、アスペクト比と開き角による力の差異が明らかになった。図4~6で開き角の小さい場合に実験値は計算値を下まわる。これは、排土板の下方にできる空隙に板の左右から粒子がまわりこんで落下し、すべり面や盛り上がり形状が仮定

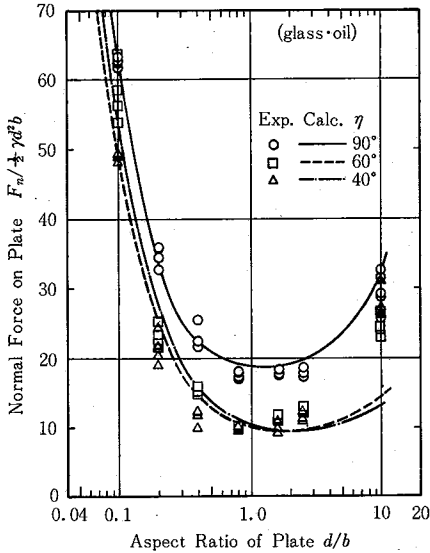


図7 排土板に作用する垂直力に対するアスペクト比の影響

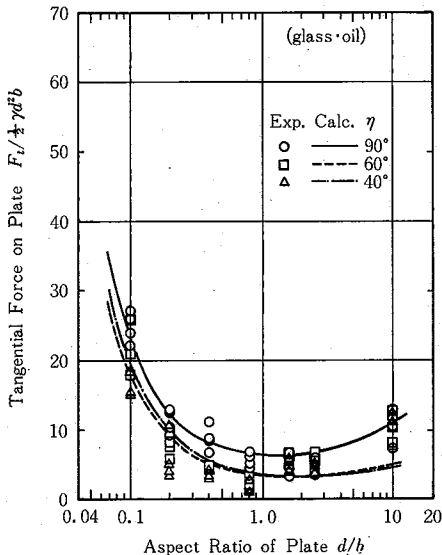


図8 排土板に作用する面内力に対するアスペクト比の影響

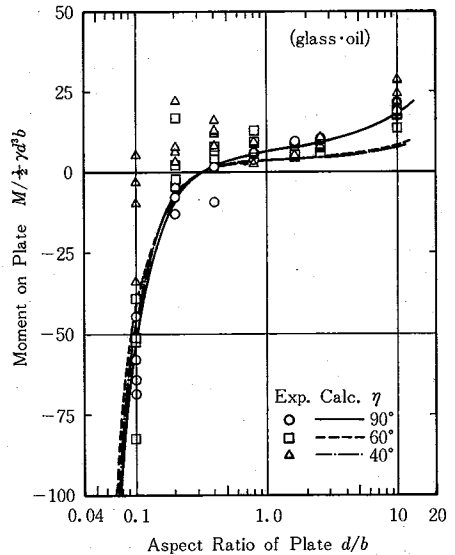


図9 排土板に作用するモーメントに対するアスペクト比の影響

と若干異なることによるものである。モーメントは、計算における仮定が荒いわりには、実験値を良く表していると言える。アスペクト比 d/b が小さくなると盛り上がった粒子から受ける力が大きく、着力点が乱されない表面より上にあがること示されている。

4. おわりに

比較的緩い状態の砂質土を切削する排土板に作用する力に関して、排土板のアスペクト比を考慮した理論と実験とが良い一致を示すことが示された。締まった砂質土に関しては、乱された土と乱されない土との間に内部摩擦角等の差があるので、これを考慮すれば同様の手法で解析をすることができると考える。

(1984年6月23日受理)

参考文献

- 1) 浦・能勢：“排土板に作用する力の解析”，生産研究，第31巻，4号(1979.4)，pp. 220-222
- 2) 浦・坂巻：“粉粒体の3次元流れの計測(I)”，生産研究，第35巻，2号(1983.2)，pp. 105-107
- 3) 浦・坂巻：“排土板による粉粒体の3次元変形”，機論講，No. 840-6(1984.3)，pp. 16-18
- 4) 浦・坂巻：“粉粒体の3次元流れの計測(III)”，生産研究，第36巻，4号(1984.4)，pp. 195-198
- 5) 浦・山本：“アンカーの安定性に関する基礎的研究”，造船論集，第140号，(1976.11)，pp. 279-285