

X線ラジオグラフィ法を用いた土の切削機構の可視化

大石善啓*

土の変形・破壊現象の可視化および定量解析手法であるX線ラジオグラフィ法を用いて、平刃による水平切削時の周辺土の変形挙動の解明を試みた。この結果、従来詳細な観察が困難であったせん断破壊線の発生・発達機構が明らかになるとともに、大変形時の土中の変位・ひずみ分布の定量的な比較から、切削角度、土質種類等による切削機構の相違が明らかになった。

Keywords: X-ray radiography, shear failure line, strain circle

1. まえがき

一般に多用されている土の可視化実験技術としては、透明な土槽側壁を通して土の変形状況を目視する平面ひずみ化法が挙げられる。ところが同方法では、土槽側壁の影響を排除できない、土の変形状態を定量評価できないといった問題点があり、定性的な観察にとどまっている¹⁾。一方、X線ラジオグラフィ法は、土の内部の変形状態をX線写真に透過撮影し、土中に生じたせん断破壊線を視覚的にとらえるとともに、埋設された多数の鉛標点の位置座標の変化から、土の変位、ひずみ分布を定量的に評価可能な土質実験技術である²⁾。X線ラジオグラフィ法の土質工学問題への適用の歴史は古く、1960年にCambridge大学のK.H. Roscoeが土中ひずみを定量的に把握する必要から考案し³⁾、その後、国内でも数例の研究結果が公表されている(例えば文献4)~8)など)。

筆者らは、まず、土質条件に応じた最適X線照射条件の選定を行い、さらに、X線フィルム上に写し出された埋設鉛標点の座標より土の変形量、ひずみ量を求めるシステムを完成させた。次に、土の大変形問題である切削現象の解明にX線ラジオグラフィ法を適用し、各種切削条件下における平刃周辺土の変形挙動の相違を検討した。この結果せん断破壊線の発生・発達機構が明らかにされるとともに、解析的な検討が困難である切削現象のような土の大変形問題の定量的評価がなされた。本報はその主要な実験結果を紹介するものである。

2. X線ラジオグラフィ法

(1) 原理

図-1はX線ラジオグラフィ法を平刃切削実験に適用

*正会員 工博 三菱重工業(株) 高砂研究所
(〒676 高砂市荒井町新浜 2-1-1)

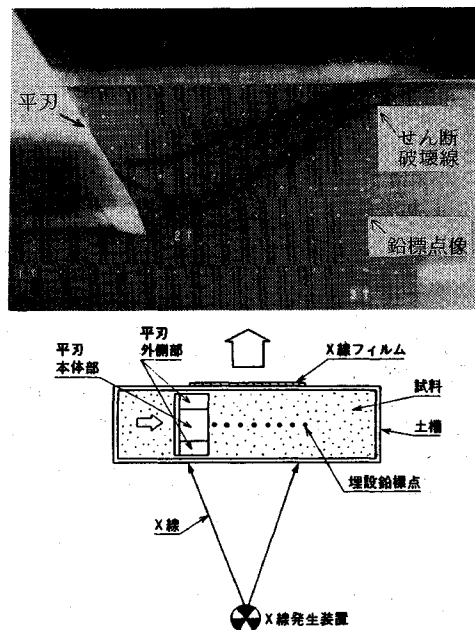


図-1 X-ray radiography method

する場合の概念を示す平面図である。すなわち、土槽中央の一鉛直断面に鉛標点を正方形格子状に埋設し、切削過程のいくつかのステップで平刃を停止させ、その時の土の変形状況を土槽側壁に設置したX線フィルムに透過撮影する。得られた一連のX線写真上には、土と鉛標点のX線透過度の差異によって、鉛標点像が白い点として現れる。そこで、連続したX線写真間の鉛標点像の位置座標の変化から、切削に伴う変形挙動を定量的に把握することが可能である。ところで、土の可視化実験技術としてのX線ラジオグラフィ法の特長の一つとして、土中に生じたせん断破壊線を目視できるという点が挙げられる。これは、せん断破壊線が土の密度の低下部となるた

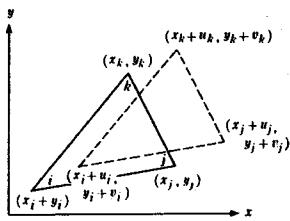


図-2 Triangular element

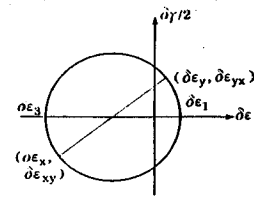


図-3 Mohr's strain increment circle

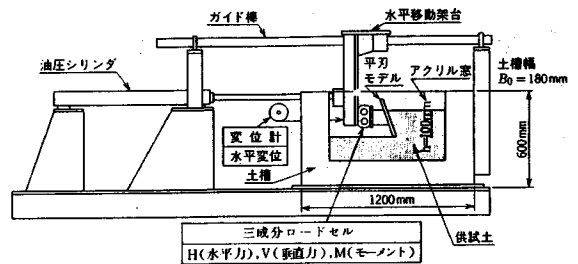


図-4 Test apparatus

め、X線透過量が他の領域よりも卓越することによるものであり、土の変形・破壊といった諸現象を解明する上で重要な情報となる。

(2) X線写真解析法

図-1に示したとおり、撮影されたX線写真上には埋設された鉛標点像が白い点として鮮明に現れている。そこで一連のX線写真上の鉛標点像の位置座標の変化を次のとおり解析した。まず、各写真上の鉛標点像の位置座標をディジタイザを用いて精度よく読取る。次に、得られた鉛標点像の座標データを土中の実座標に変換後、各ステップの対応する鉛標点の位置座標データから相対変位量を算定し、種々の解析を行う。なお、ディジタイザの読取り精度(人為誤差)は $10^2\mu\text{m}$ 程度であり、本実験に関しては実用上十分な精度である。

(3) ひずみ計算法

X線写真上に撮影された土中の一鉛直断面を平面ひずみ場とし、図-2に示すように、隣接した鉛標点で構成される三角形要素を考える。要素内を線形変位場と仮定すれば、要素内の任意の位置座標 (x, y) の変位成分 (u, v) は次式で定義される。

$$\begin{cases} u = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot x + \alpha_3 \cdot y \\ v = \alpha_4 + \alpha_5 \cdot x + \alpha_6 \cdot y \end{cases} \dots\dots (1)$$

ここで、式中の未定係数 $\{\alpha\}$ は3個の節点の座標と変位成分によって定まる。

また、要素内のひずみ成分の増分は次式で与えられる。

$$\begin{cases} \delta \epsilon_x = -\partial u / \partial x \\ \delta \epsilon_y = -\partial v / \partial y \\ \delta \epsilon_{xy} = -1/2(\partial u / \partial y + \partial v / \partial x) \end{cases} \dots\dots (2)$$

(ただし、圧縮を正とする)

したがって、要素内の任意の点におけるひずみ成分の増分 $\{\delta \epsilon\}$ は次のようになる。

$$\{\delta \epsilon\} = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} b_i & 0 & b_j & 0 & b_k & 0 \\ 0 & c_i & 0 & c_j & 0 & c_k \\ \frac{c_i}{2} & \frac{b_i}{2} & \frac{c_j}{2} & \frac{b_j}{2} & \frac{c_k}{2} & \frac{b_k}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ u_j \\ v_j \\ u_k \\ v_k \end{Bmatrix} \dots\dots (3)$$

ただし、

$$2A = \det \begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_k & y_k \end{vmatrix}$$

$$b_i = y_j - y_k, b_j = y_k - y_i, b_k = y_i - y_j$$

$$c_i = x_k - x_j, c_j = x_i - x_k, c_k = x_i - x_j$$

図-3のモールのひずみ増分円に示すように、体積ひずみ増分 δV 、最大せん断ひずみ増分 $\delta \gamma$ は次式で表される。

$$\begin{cases} \delta V = \delta \epsilon_x + \delta \epsilon_y \\ \delta \gamma = \sqrt{(\delta \epsilon_x - \delta \epsilon_y)^2 + 4\delta \epsilon_{xy}^2} \end{cases} \dots\dots (4)$$

したがって、主ひずみの増分は次のようになる。

$$\begin{cases} \delta \epsilon_1 \\ \delta \epsilon_2 \end{cases} = \frac{1}{2}(\delta V \pm \delta \gamma) \dots\dots (5)$$

以上により、連続した2枚のX線フィルムより各ひずみの増分が算定され、その代数和が累積ひずみとして求められる。

3. 実験内容²⁾

(1) 実験装置

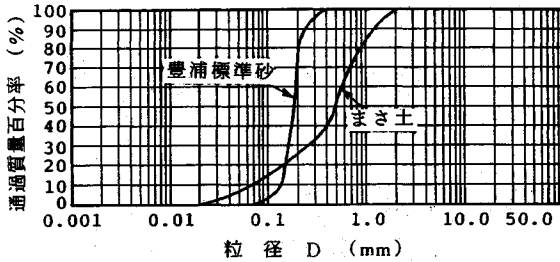
実験は、図-4に示すとおり、三分ロードセルを介して水平移動架台に取付けられた鋼製の平刃モデルによる準静的な二次元水平切削を行った。土槽は、長さ1200mm、深さ600mmであり、幅はX線撮影条件から180mmとした。また、土槽側壁には厚さ20mmの亚克力製窓を設けた。なお、切削角度が切削機構に及ぼす影響を検討するため、切削角度 $\alpha = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ の4種類の平刃を用いた。ここに切削角度 α は、水平面と平刃表面とのなす角度で表し、各平刃とも逃げ角、表面粗さは同一とした。

(2) 実験条件

表-1に実験条件を示す。切削対象土は、密度 $\rho = 1.3 \sim 1.4 \text{ g/cm}^3$ 、内部摩擦角 $\phi = 32 \sim 35^\circ$ の気乾状態の豊浦標準砂、及び含水比 $w = 14.4\%$ 、内部摩擦角 $\phi = 40^\circ$ の密に締めめられた六甲マサ土を供試した。両試料の粒径加積曲線を図-5に示す。なお、締め固め方法としては、20mm厚さの層ごとにまき出し、転圧した。また、内部摩擦角は一面せん断試験によって測定した。

表—1 Test condition

実験 Case	土質条件			切削条件	
	試料種類	密度 ρ (g/cm ³)	内部摩擦角 ϕ (°)	切削幅/土槽幅 B/B ₀ (mm/mm)	切削角度 α (°)
A	豊浦標準砂	1.34	32.2	80/180	60
B-1	"	1.32	31.5	178/180	30
B-2	"	1.37	33.7	178/180	45
B-3	"	1.37	33.7	178/180	60
B-4	"	1.40	35.2	178/180	75
O	六甲マサ土	密結	40.0	178/180	60



図—5 Grain-size distribution

実験の全ケースを通じて、切削速度は10 mm/sで一定とし、切削深さ(切削開始時の土被り高さ) h は100 mmで一定となるよう設定した。

ところで、土中に埋設された鉛標点で土の動きを代表させるためには、鉛標点の寸法は供試土の粒径に近いのが望ましい。したがって今回の実験では、X線写真上の鉛標点像のコントラストも勘案して直径2 mmの鉛標点を選定し、埋設間隔20 mmで一断面当たりおよそ100点の鉛標点よりなる正方格子を作成した。

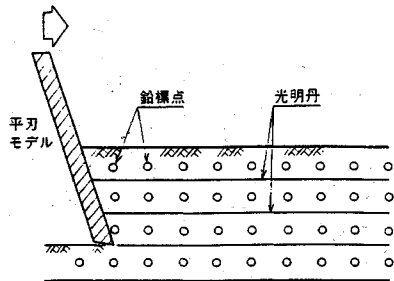
また、X線の撮影間隔については、切削中に切削抵抗力が急減した直後にせん断破壊線が発生したものと考え、その都度平刃の進行を停止させてX線写真撮影を行った。

4. 実験結果及び考察

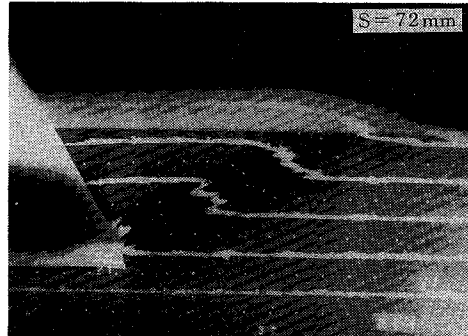
(1) 土と鉛標点の動きの一体性

X線ラジオグラフィ法を土質実験技術として確立したCambridge大学のK.H. Roscoeらは、変形量の比較的小さい問題について、土と鉛標点の動きが十分に同一視しようと報告している⁹⁾。ここでは、切削現象のような大変形問題における両者の挙動の一体性を確認するため、ここでは次の実験を実施した。

図—6に示すように、鉛標点と光明丹(酸化鉛粉末)を互層に敷きならす。光明丹は粉体であるため、薄層に敷きならした場合、土との密度差による影響はほとんどなく、周辺土と一体化して挙動することを予備実験にて確認している。図—7は、切削中の土の動きを示すX線写真例であり、白い線が光明丹層である。なお、写真の右上に記しているのは平刃の切削距離 S (mm) である。各写真の鉛標点と光明丹との変形量分布を比較したとこ



図—6 Buried lead markers and plumbic oxide powder



図—7 Movement of lead markers and plumbic oxide powder

ろ、両者の変形挙動、変位置に差異は認められなかった。したがって、図—7に示すような大変形問題においても、慣性の影響が問題にならない変形速度の範囲では鉛標点十分土の動きを代表しているものと判断した。

(2) 土の切削機構

a) せん断破壊線の発生状況

図—8は、標準砂における切削角度 $\alpha=60^\circ$ の場合の切削過程を示すX線写真である。一連の写真には、切削に伴って発生したせん断破壊線が明瞭に認められる。各写真の比較から、せん断破壊線の発生状況について以下のことが明らかになった。

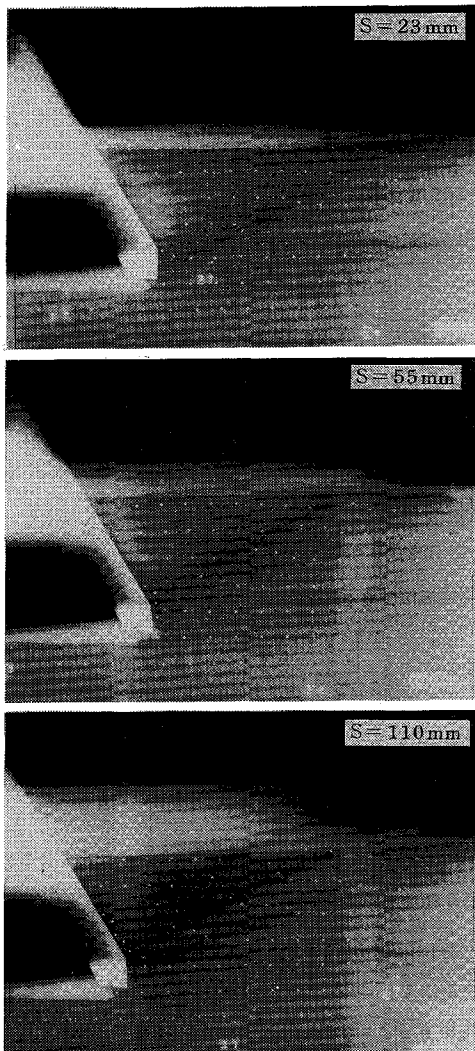
(1) せん断破壊線は刃先に発生し、地表へと伸長する。なお、刃先付近には無数のせん断破壊線が発生し、これらのうち卓越したものが地表面にまで発達する。

(2) 平刃の切削距離が増大するにつれて、新しいせん断破壊線が次々と間欠的に発生する。今回、切削抵抗力が減少するたびにX線写真を撮影したが、図—8から、そのたびに新たなせん断破壊線が地表面に到達していることが分かる。

(3) 切削の進行に伴って、せん断破壊線と平刃表面で囲まれた領域は、ほぼ剛体的に(幾何形状を変えずに)、平刃表面に沿って上方へと移動する。

b) ひずみ分布

図—9は、切削距離 $S=11$ mm, 22 mmにおける締固められたマサ土の切削挙動を示すX線写真である。また、図—10, 11は、図—9の両写真から解析された最大せん

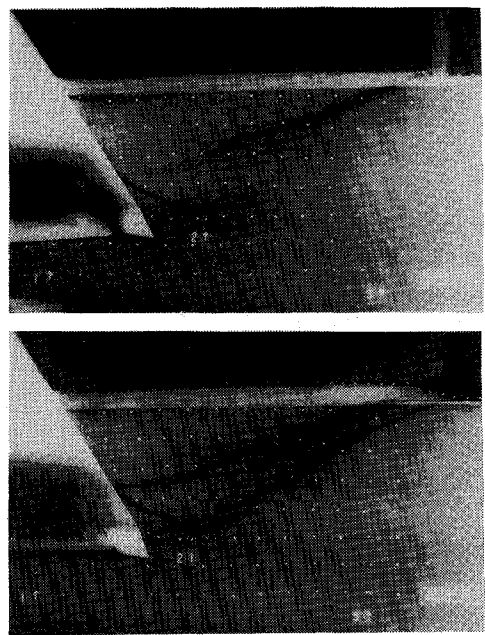


図—8 Behavior of shear failure lines (standard sand, $\alpha=60^\circ$)

断ひずみ γ_{max} 及び体積ひずみ V の等値線図であり、図中の陰影部は、それぞれ $\gamma_{max} \geq 20\%$ 、 $V \leq -5\%$ の領域を示している。ここに、最大せん断ひずみはせん断変形の程度を、体積ひずみは体積の増減を表すひずみの特性量である。これらの図の比較から、以下のことが明らかになった。

(1) 図—9、図—10より、最大せん断ひずみはせん断破壊線付近に集中して発生しており、特に刃先近傍及び地表面付近で大きな値を示している。また切削の進行に伴って、最大せん断ひずみの高い領域は上方へと広がっている様子がうかがえる。なお、せん断破壊線の内外の領域では、最大せん断ひずみが小さいことがわかる。

(2) 図—11より、体積ひずみはせん断破壊線近くの領域で負の値となり、膨張変形が生じている。また、膨張側の体積ひずみのピークは、せん断破壊線の地表面



図—9 Behavior of shear failure lines (decomposed granite soil, $\alpha=60^\circ$)

付近と刃先より前方の領域に生じており、刃先のごく近傍では体積ひずみはほぼ0もしくは圧縮を示している。これは金属切削でいう“構成刃先”と同様の現象と考えられ、刃先付近の土は刃と一体化して動いているものと考えられる¹⁰⁾。

(3) 最大せん断ひずみ、体積ひずみの比較により、図—12に示す特徴的な4領域[(I)~(IV)]のモールのひずみ増分円は、模式的に図—13のとおりに表示できる。

(I) 平刃先端近傍

体積ひずみはほとんどなく、最大せん断ひずみは最も大きい。最大、最小主ひずみの絶対値はほぼ等しく、等体積せん断変形状態にある。

(II) せん断破壊線中間付近

体積ひずみが負に大きい。最大せん断ひずみは領域(I)、(III)に比べて小さい。平刃表面と地表面との相互的な影響を受けるため、切削の進行につれて不安定に変動する。

(III) 地表面近傍

最大せん断ひずみ、体積ひずみともに大きい。この領域は土の変形に及ぼす自重の影響が卓越する受働領域であるため、地表面に近づくにつれて鉛直方向の伸張変形が増加する。

(IV) せん断破壊線内部

体積ひずみ、最大せん断ひずみ共にほとんど発生しない。したがって、せん断破壊線内部の領域での相対変形はほとんどなく、土塊が剛体的に変位するものと考えら

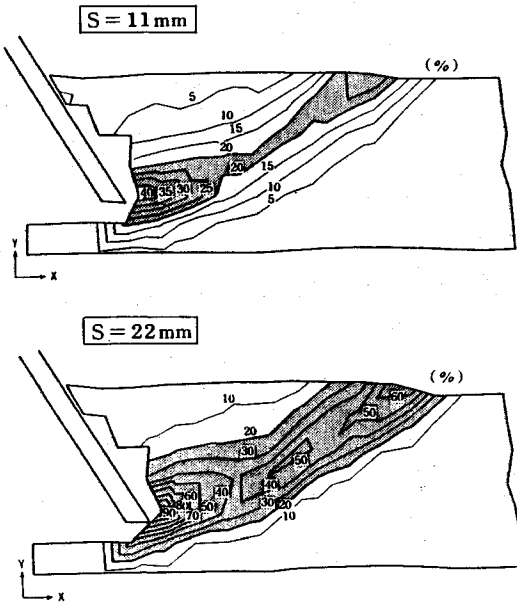


図-10 Distribution of maximum shear strain

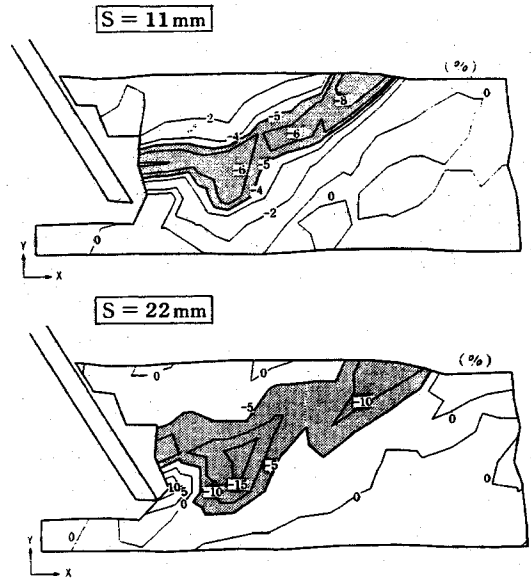


図-11 Distribution of volumetric strain

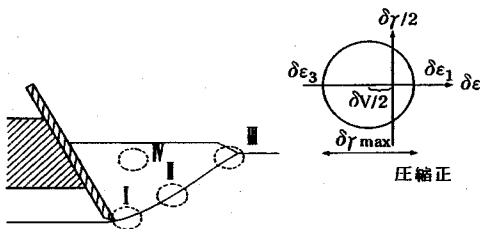


図-12 Compared areas in soil

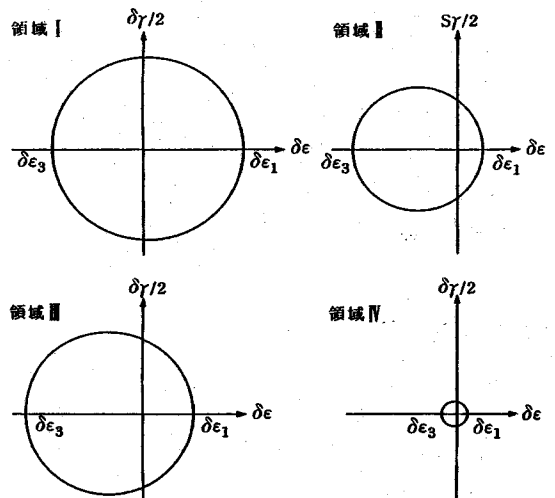


図-13 Comparison of strain circles

れる。

(3) 切削角度による切削機構の相違

図-14は、各切削角度における最初のせん断破壊線発生時のX線写真である。また、図-15は図-14の各X線写真より解析した鉛標点の変位ベクトル分布を示すものである。図-14及び図-15から、切削角度による地盤の変形挙動の相違について下記の知見を得た。

(1) 図-14から、最初のせん断破壊線が発生するのに必要な切削距離は、切削角度が大きほど短い。つまり、平刃が立っているほど少ない変位で地盤は破壊に至る。また、図-15に明らかとなり、特に切削角度が小さい場合にせん断破壊線内部の領域では、変位量、方向ともほぼ一様であり、剛体的に変位していることが分かる。

(2) 図-14に明らかとなり、切削角度が小さいほどせん断破壊線は直線に近く、切削角度が大きくなると刃先付近で曲線形状になる。この傾向は、図-15 ($\alpha = 75^\circ$) の刃先付近で水平変位成分が卓越していることから同様に認められる。したがって、切削角度が大きい場合には過切削を起こす恐れがあり、切削後の地表面

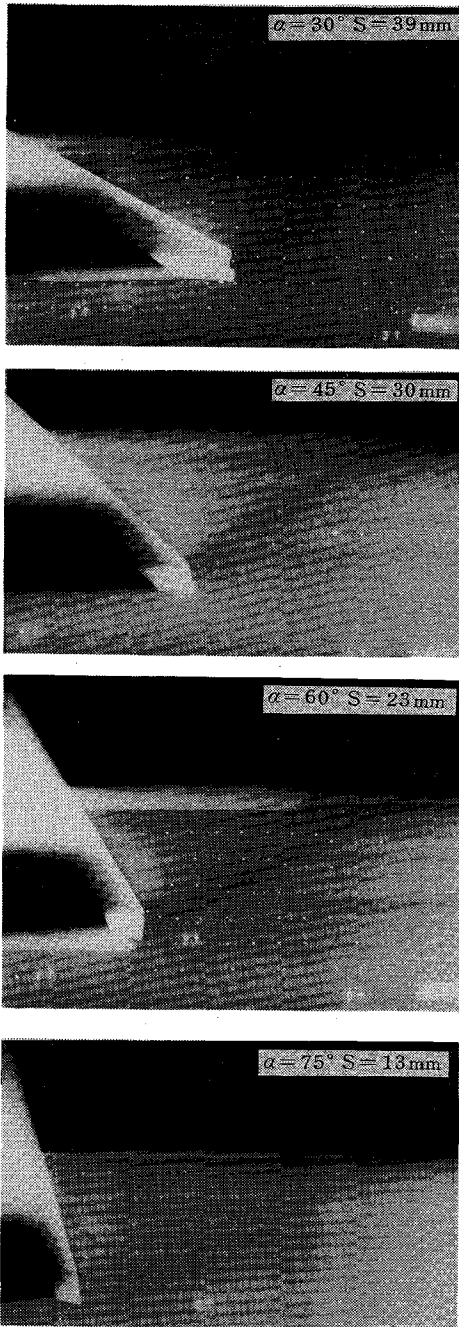
の凹凸が問題になるような土工機械には不向きである。

(3) 図-14 ($\alpha = 75^\circ$) では平刃表面付近に第2群せん断破壊線の発生が認められる。なお、切削の進行に伴って、第1群、第2群せん断破壊線はほぼ同数発生した。

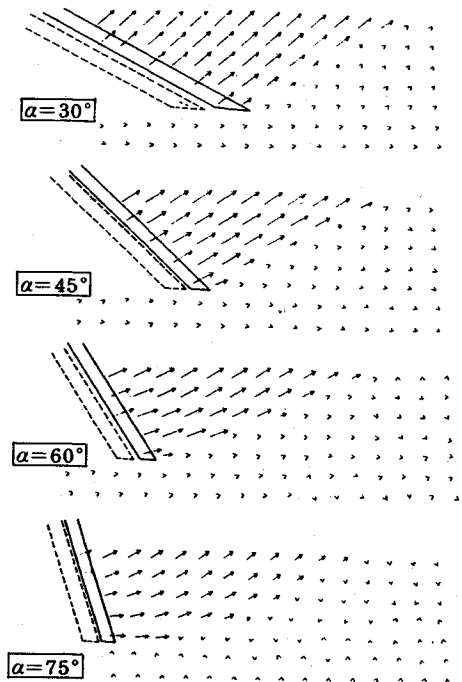
(4) 砂とマサ土の切削機構の相違

図-16に同一の切削距離 ($S=22\text{ mm}$) における豊浦標準砂と六甲マサ土との最大せん断ひずみ分布をそれぞれ示す。両図並びに図-8、図-9に示した両者の切削状況を示すX線写真から、砂とマサ土の切削機構の相違について以下の知見を得た。

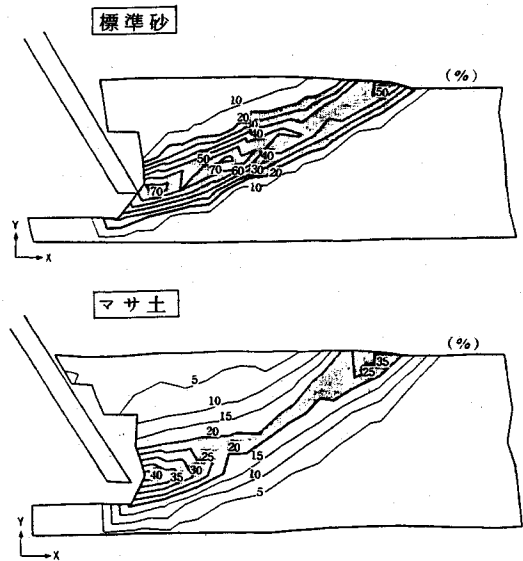
(1) 図-8と図-9の比較から、締め固められて粘着力を有するマサ土では、刃先及び地表面の両側からせ



図—14 Comparison of shear failure lines by cutting angle



図—15 Comparison of displacement vectors



図—16 Comparison of sand and decomposed granite soil (maximum shear strain)

ん断破壊線が発生していることが分かる。このことは、図—16のマサ土の最大せん断ひずみ分布において、地表面近くに最大せん断ひずみの卓越域が存在することからも明らかである。

(2) せん断破壊線の発生状況はマサ土の方が明瞭である。これは、マサ土の方がせん断破壊線(帯)の幅が広いことを意味し、一般にせん断破壊線(帯)の幅は粒

径に比例することが知られている。今回の場合も図—5に示したとおり、マサ土の方が標準砂に比べて粒径が大きいため、上記の相違が生じたものと思われる。

(3) 締め固められたマサ土のように内部摩擦角 ϕ と粘着力 c によって破壊条件が定まるものは、破断形¹¹⁾に近い切削パターンになる場合があることが示唆される。

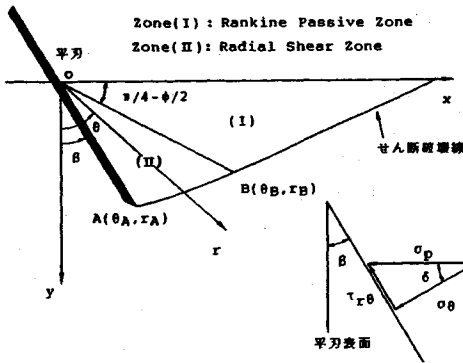


図-17 Boundary conditions of the limit equilibrium solution

(5) 極限釣合解析結果との比較

a) 極限釣合法

土の切削現象に関する問題の解析手法として、極限釣合法、応力特性曲線法などの塑性力学的アプローチ法や有限要素法、個別要素法などの数値解析手法が挙げられる。ここでは、理論が簡単で取扱いが容易な極限釣合法による解析結果と実験結果との比較を行った。以下に切削問題に極限釣合法を適用する場合の概要を示す^{11), 12)}。

図-17において、乾燥砂の破壊基準として、モール・クーロン則が適合すると考えると、二次元極座標表示で次式が成立する。

$$\begin{cases} \sigma_r, \sigma_\theta = \sigma(1 \pm \sin \phi \cdot \cos 2\Psi) \\ \tau_{r\theta} = \sigma \cdot \sin \phi \cdot \sin 2\Psi \end{cases} \dots\dots\dots (6)$$

ただし、

$\sigma_r, \sigma_\theta, \tau_{r\theta}$: 各応力成分

σ : $(\sigma_r + \sigma_\theta)/2$

ϕ : 砂の内部摩擦角

Ψ : 最大主応力と r 軸のなす角度

応力の釣合方程式は土の単位体積重量を γ として次式のとおりである。

$$\begin{cases} \partial\sigma_r/\partial r + 1/r \cdot \partial\tau_{r\theta}/\partial\theta + (\sigma_r - \sigma_\theta)/r = \gamma \cdot \cos \theta \\ \partial\tau_{r\theta}/\partial r + 1/r \cdot \partial\sigma_\theta/\partial\theta + 2\tau_{r\theta}/r = -\gamma \cdot \sin \theta \end{cases} \dots\dots\dots (7)$$

σ が原点からの距離 r に比例し、主応力角 Ψ は θ のみに関係すると仮定すると、応力関数 $s(\theta)$ を用いて次式のとおりである。

$$\sigma = \gamma \cdot r \cdot s(\theta), \Psi = \Psi(\theta) \dots\dots\dots (8)$$

式(6)を式(7)に代入し、式(8)を用いて整理すると、極限釣合方程式として次式が得られる。

$$\begin{cases} \sin \phi \cdot \sin 2\Psi ds/d\theta \\ + 2s \cdot \sin \phi \cdot \cos 2\Psi (d\Psi/d\theta + 1) \\ + s(1 + \sin \phi \cdot \cos 2\Psi) = \cos \theta \\ (1 - \sin \phi \cdot \cos 2\Psi) ds/d\theta \\ + 2s \cdot \sin \phi \cdot \cos 2\Psi (d\Psi/d\theta + 1) \\ + s \cdot \sin \phi \cdot \cos 2\Psi = -\sin \theta \end{cases} \dots\dots\dots (9)$$

表-2 Comparison of cutting resistance

	切削抵抗力 (N)	水平成分 (N)	垂直成分 (N)	方向 (°)	作用点
極限釣合解析結果	91.0	91.0	0.00	0.0	0.667·h
実験結果	106.6	106.6	2.0	1.1	0.650·h

* 鉛直下向きを正

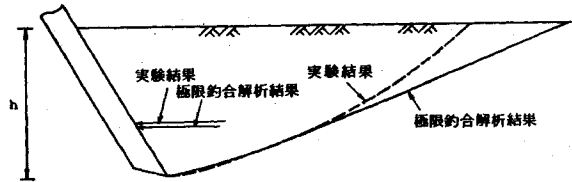


図-18 Comparison of shear failure line

一方、せん断破壊線については、最大主応力方向と $\mu = \pi/4 - \phi/2$ なる角度で交わると考えれば、 C_1 を積分定数として、次式で表わすことができる。

$$r(\theta) = C_1 \cdot \exp \left[\int_{\theta_A}^{\theta} \cot \{ \Psi \pm (\pi/4 - \phi/2) \} d\theta \right] \dots\dots\dots (10)$$

また、単位切削幅当りの切削抵抗は次式にて求められる。

$$\begin{cases} P = \gamma \cdot r_A^2 \cdot s(\beta) \{ 1 - \sin \phi \cdot \cos 2\Psi(\beta) \} / 2 \cos \delta \\ P_H, P_v = P \cdot \cos(\beta - \delta), P \cdot \sin(\beta - \delta) \end{cases} \dots\dots\dots (11)$$

ただし、

P, P_H, P_v : 切削抵抗合力、水平成分、垂直成分

以上の支配方程式を図-17に示す境界条件について解く。

b) 比較結果

実験値と極限釣合法による解析値との比較は、刃先角 $\alpha = 60^\circ$ 、標準砂について行った。表-2に切削抵抗力、図-18にせん断破壊線形状の比較結果をそれぞれ示す。

図-18に示すとおり、実験結果ではせん断破壊線が地表面に近付くに従って上向きになり、極限釣合解析結果に比べて地表面との交角が大きくなる。この理由としては、解析ではランキン受動領域の仮定に基づく静的な力の釣合のみを考えているが、実際にはせん断破壊線が発生、発達して地表面に至るまでに平刃が前進し、せん断破壊線の地表面到達部分付近の領域が水平方向に圧縮されることなどが考えられる。また、解析ではせん断破壊線と平刃表面とで囲まれた土塊の全領域が極限釣合状態になると仮定しているが、実際にはこの領域の大部分は剛体的に変位している。

一方、切削抵抗力の大きさ、方向、作用位置については、表-2からわかるように実験結果と解析結果との対応は概ね良好である。したがって、極限釣合理論によって最初のせん断破壊線発生時の準静的な切削抵抗力の推定は充分可能であることがわかる。

5. あとがき

土の大変形問題である切削現象にX線ラジオグラフィ法を適用し、各種条件下での切削機構の解明を試みた。主要な成果をまとめて以下に示す。

(1) せん断破壊線の発生機構

せん断破壊線は刃先から無数に発生し、その中で卓越したものが地表面へと発達する。また、切削の進行に伴って新たなせん断破壊線が間欠的に発生し、このとき切削抵抗力は低減する。

(2) 変形領域の分類

切削に伴う変形領域は、次の4領域[(I)~(IV)]に分類される。

- (I) 刃先近傍……著しいせん断変形を受ける。なお、刃と一体化して挙動する構成刃先が認められる。
- (II) せん断破壊線付近……せん断破壊に伴う体積膨張が発生する。
- (III) 地表面近傍……土被り圧の減少に伴う鉛直方向の伸張変形が支配的である。
- (IV) せん断破壊線上部……平刃表面に沿ってほぼ剛体的に変位し、相対変形は小さい。

(3) 切削角度による切削機構の相違

切削角度が増大すると、平刃表面の摩擦の影響が支配的となるため、刃先付近のせん断破壊線が曲線状になる。また、刃先に圧力集中が生じるため、切削抵抗力が増大する。

(4) 砂とマサ土の切削機構の相違

両者ともせん断形の切削パターンを呈するが、マサ土の場合、粘着力の影響によって裂断的な変形挙動も認められる。

(5) 極限約合解析結果との比較

切削抵抗力の大きさ、作用位置は良好に対応するが、せん断破壊線の地表面との交角は実験結果の方がやや大きい傾向にある。

以上のとおり、X線ラジオグラフィ法は土の大変形問

題に適用可能であり、従来の解析、実験手法では評価し得ない土質工学的諸問題を解明する有効な手法であることが明らかになった。なお、今回報告の二次元的な現象に引き続いて、三次元的な現象についても、X線ラジオグラフィ法を適用して興味深い結果を得ているため、機会を見て報告する予定である。

最後に、本研究を遂行するに際し御助言を賜った東京ガス(株)技術研究所 西尾宣明博士、高木宣雄研究主幹に深く謝意を表す。

参考文献

- 1) 市場・兵頭：土の切削抵抗に関する基礎研究，テラメカニックス，No. 2, 1982.
- 2) 大石・兵頭：X線ラジオグラフィ法を用いた切削機構の可視化，土木学会第40回年次学術講演会，1985.
- 3) Roscoe, K.H. et al : The determination of strains in soils by X-ray method, Civ. Eng. & Pub. Wks. Rev., 1963.
- 4) 西尾・米山・高木・島村：X線写真による埋設管周辺地盤の挙動の研究，第15回土質工学研究発表会，1981.
- 5) 西尾・米山・高木・島村：X線写真による埋設管周辺地盤の挙動の研究(第2報)，第16回土質工学研究発表会，1982.
- 6) 西尾・米山・高木・島村：X線写真による埋設管周辺地盤の挙動の研究(第3報)，第17回土質工学研究発表会，1983.
- 7) 山口・木村：遠心載荷装置による浅い基礎の支持力実験，土木学会論文報告集，No. 232, 1975.
- 8) 高野・岸田：X線による杭先端部地盤の変形解析，第11回土質工学研究発表会，1976.
- 9) Thurairajah, A. : Some Shear Properties of Kaolin and of Sand, Ph. D. Thesis, Cambridge Univ., 1961.
- 10) 畑村・千々岩：土の切削機構の解明(第2報)，日本機械学会論文集，Vol. 41, No. 349, 1975.
- 11) 畑村・千々岩：土の切削機構の解明(第1報)，日本機械学会論文集，Vol. 40, No. 338, 1974.
- 12) Sumino, K. et al : Application of ADINA in analysis of a soil structure, Computers & Structures, Vol. 21, No. 1/2, 1985.

(1991. 4. 10 受付)

VISUALIZATION OF SOIL CUTTING MECHANISM BY X-RAY RADIOGRAPHY

Yoshihiro OOISHI

For the development of efficient earthmoving machinery, it is necessary to make clear the soil cutting mechanism, but there is no usual analytical or experimental technique for large deformation problems like soil cutting. Therefore, we have tried to apply the X-ray radiography method, which is an experiment method for the visualization and for the quantitative analysis of soil deformation, to the flat edge cutting problem.

Firstly we have confirmed that the X-ray radiography method is applicable to the observation of large deformation of sand, and have examined the cutting mechanism of soils under various cutting conditions. As a result, the behavior of shear failure lines, which have not been studied in detail before in this kind of problem, are made clear, and the differences in the cutting mechanism with the cutting angle and the nature of soils are discussed through the quantitative estimation of the strain distribution.