

X線可視化実験による切羽の挙動に関する研究 三次元歪解析によるアプローチ

西岳 茂¹・櫻井 春輔²・有川 究³

¹ 正会員 三菱重工業株式会社 神戸造船所 建設機械部 (〒652 神戸市兵庫区和田崎町1丁目1番1号)

² 正会員 工博 Ph.D 神戸大学 工学部建設学科 (〒676 神戸市灘区六甲台1丁目1番)

³ 正会員 工修 三菱重工業株式会社 高砂研究所 建機研究推進室 (〒676 高砂市荒井町新浜2丁目1番1号)

実験による事前検証は、トンネル縦断、横断モデルによる二次元評価が実施され、有用なデータが得られている。本論では、二次元実験の精度を更に向上させるため、地盤中の土砂粒子の微小な移動現象を、X線ラジオグラフィ法を用い三次元可視化による歪解析を行った。そして、各種切羽形状による切羽の安定性の比較を行い、さらに、圧力制御実験により切羽安定に必要な限界支持力も明確にした。この実験より、切羽を安定させるのに必要な圧力は Terzaghi 理論により得られる値の約 20%であった。また、ベンチカット、加背割りモデルはいずれも全断面モデルの約 50%程度であった。X線可視化実験は、トンネル切羽近傍の挙動を解明できる有効な手法である。

Key Words: :ratm, interaction, x ray radiography, three dimensional strain

1. まえがき

トンネルを合理的に施工するため、新工法の導入を検討する際、検討対象の掘削方法や新規に開発しようとしている工法が、従来の施工方法と比べて切羽の安定性に関しどのような差異があるかを明確にすることが重要である。それ故、より精度の高い実験室レベルでの事前検証技術が求められている。

切羽の安定性評価には、地中の土粒子の移動現象を直接観察することが有効である。土粒子の変位量の直接計測により、切羽の安定性の評価に必要な、変位の発達過程や、体積歪、剪断歪、主歪を得ることができる。

地中の土粒子の移動現象の把握技術は、非常に重要な事項であるにもかかわらず、その現象を直接観察するには、大規模な X 線による可視化実験装置を必要とするため、まだ一般化してはいないが、今後確立すべき重要な技術である。

地中の土粒子の移動現象把握には、現在、主として二次元モデルによるトンネルの縦、横断方向別の土槽実験^{1),2),3)}、あるいは、アルミ棒積層体などによるトンネル縦・横断モデル実験が実施されている^{4),5)}。

土槽実験においては、土粒子の移動現象の可視化のため、土槽面に摩擦の影響を極力少なくなるよう工夫した標点を設置し、それら標点の変位ベクトルを計測する方法がとられている^{6),7)}。アルミ棒積層体実験では、棒自身の移動量を計測する方法がとられており、それぞれ成果をあげているが、土砂内部の土粒子移動現象を直接測定できないため三次元問題として捉えることは困難である。

土粒子の移動現象問題は、切削刃が移動する時の現象を解明する際に行われている大変形解析や⁸⁾、トンネル掘削の切羽安定性を評価する際の微小変形解析等がある。本論では、実トンネルにおける切羽の安定性を研究対象としているため、地中変位が微小な領域を扱うこととし、また、トンネルの切羽の安定性確保に必要な力を評価する目的から、圧力制御方式による実験を実施した。圧力制御方式による報告例は、著者の一人の研究報告があり¹⁾、トンネル掘削時に必要な地山保持力が得られている。圧力制御方法は、変位量制御方式に比べ、地山が崩壊を始める限界の保持力が計測可能で、結果として、切羽安定に必要な力を把握できるところに長所がある。

筆者らは、従来の研究を更に深度化するため、X線

ラジオグラフィ法により、土粒子の移動現象を、三次元、微小変位領域において、切羽が安定な状況から、不安定な状況に移行する状態を、実験と各種歪解析により求め、切羽の安定性の評価に対する知見を得たので、その主要部分を発表する。

2. X線可視化実験

(1) 実験の目的

実験の目的を下記に示す。

X線ラジオグラフィ法による

- ① 切羽地盤中の土粒子移動現象の三次元計測と解析技術の確立。
- ② 切羽形状の差異による、安定性の比較と、切羽の安定性確保に必要な力の把握。
- ③ 体積歪、最大剪断歪の解析結果と、歪の発達状況との比較による、切羽地盤中の歪分布の明確化。
- ④ トンネルの合理的施工に関する事前検証技術の確立。

②では、筆者の一人が先に行った二次元実験で指摘している緩み領域により計算した土圧が、そのまま切羽における山留め力にはならず、相当小さい値である点も明確にし、合理的設計の有効なデータとすることとした。

(2) 実験装置

図-1に実験装置概要図、写真-1に実験装置を示す。

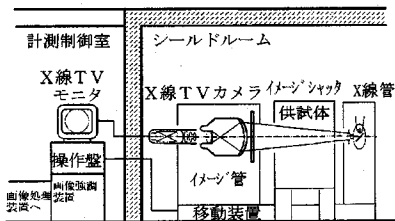


図-1 実験装置概要図

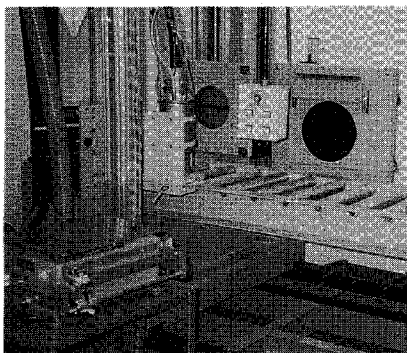


写真-1 実験装置

また、表-1にX線可視化装置の仕様概要を示す。

表-1 X線可視化装置の仕様概要

装置構成	仕様
X線発生装置	形式：据置式工業用x線管 出力：max.225KV*30mA 可変式 焦点：3.0*3.0mm 0.4*0.4mm 可変式 高電圧発生装置 x線管冷却装置：水冷式
X線イメージアンプリファイ	形式：CsI 蛍光方式 視野寸法：可変式
X線TV装置	機能：積分、平滑、強調、拡大、着色他
ビデオプリンタ	形式：感熱プリント方式
試料テーブル	寸法：高さ 850*幅 3350*奥行 450mm 耐荷重：19.6KN
X線管～イメージアンプリファイ移動装置	移動ストローク： 水平=2000mm、鉛直=1500mm 移動速度：0.5～300cm/min 駆動源：AC サーボモータ
データ処理装置	EWS Iris IndigoR4400

① モデルの種類

モデル化実験に際して、図-2のモデルを想定した。

- 1) 全断面掘削モデル A
- 2) 全断面+先受けモデル B
- 3) ベンチカット+先受けモデル C
- 4) 先受け+上下加背割りモデル D,E,F

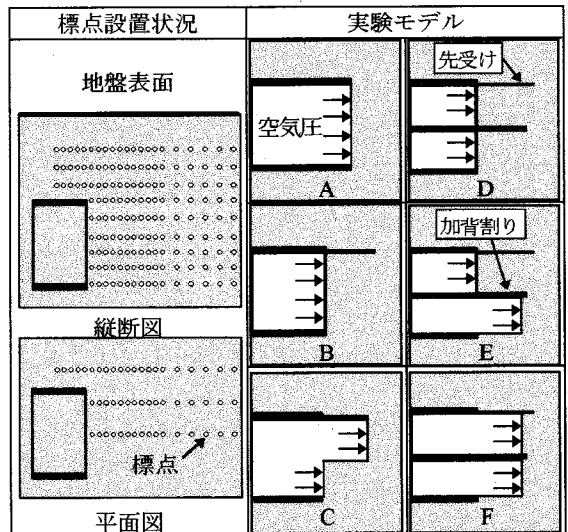


図-2 実験モデルの種類と標点設置概要

(注) 相対密度:Dr=55%,40%,土被り:1D (D=トンネル高),5D について実施した。

先受け+上下加背割りモデルでは、インパートの早期閉合による地盤沈下対策を目的として、従来の上半先行掘削とは異なり、下半先行掘削 (モデル E)

を基本とした。下半先行掘削前の状態は、モデル D、下半掘削に引き続き、上半を掘削した状態は、モデル F となる。各モデルは、実機と剛性が相似なモデルとし、貫入デッキと先受けの変位量が相似となるように設定した。先受けは、櫛状のモデルとし、打設ピッチも実機施工条件に近い値で近似した。先受け間は充填状況を模擬するため、薄紙を取り付けた。

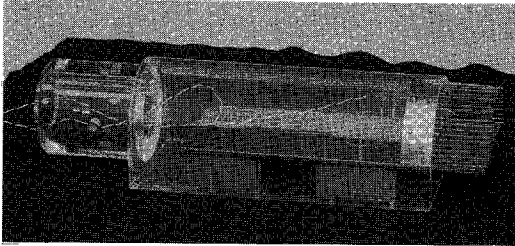


写真-2 モデル (例：先受け+上下加背割りモデル)

モデル例を写真-2 に示す。トンネル本体も等価剛性モデルとする方法も考えられるが、先受けの上部と、切羽の歪変化の把握を第一目的としたため、トンネルの剛性を高くし、その影響を無視できるようにした。モデル D,E,F では、機械的に加背割りを行うことを前提とし、その機械部位の剛性を等価とした。

(3) 実験方法

X線ラジオグラフィ法の適用に先立ち、予備実験により X線透過距離と撮影画像の鮮明度を確認し、実験土槽幅を 30cm に設定した。土槽壁面の影響を回避するため、モデル幅は約 10cm とした。

実験土槽に埋設したモデルに対し、下記手順に従い実験を行った。

- ① 実験土槽にモデルを設置
- ② 鉛の標点を、トンネル軸心方向に対して切羽より、140mm までは 10mm ピッチ、それより遠い範囲と、鉛直方向には 20mm ピッチで設置しながら地盤を作成した。この時、写真-3 に示す圧力制御袋 (剛性による影響を少なくするため、薄いポリエチレンの袋を採用) が変形しないように、土被りで計算した初期圧力を制御袋の内圧として設定した。予備実験の結果より、この方法で、標点の初期移動は微小であることを確認している。
- ③ 土槽作成後、圧力制御袋の内圧を徐々に減じながら、計測対象圧力に到達した時点で、圧力の保持状態を確認の上、X 線を照射し切羽が崩壊するまで繰り返し撮影した。

地盤材料は、1) JIS による粒土管理により品質が安定しており実験の再現性が良い、2) 均等係数が小さく ($U_c < 4$)、土粒子が移動しやすい 3) 既往の実験結



写真-3 圧力制御袋

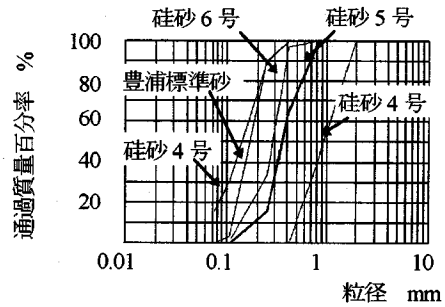


図-3 実験地盤材料粒径加積曲線

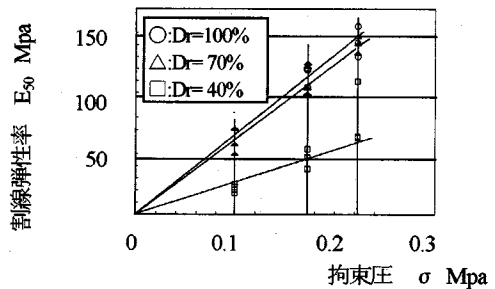


図-4 拘束圧 (σ)、相対密度 (D_r)、割線弾性率 (E_{50}) の関係

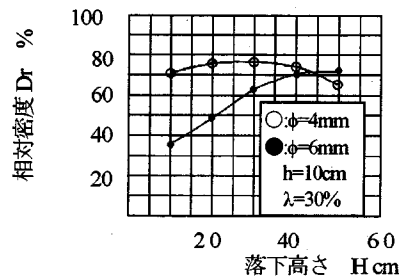


図-5 孔径 (ϕ)、落下高さ (H)、相対密度 (D_r) の関係 (h : 層厚, λ : 開口率)

果を有効に活用できる。以上の観点より、砂砂 5

号を用い、肥田の研究結果(図-3~図-5)による空中落下法により地盤を作成した³⁾。

作成した地盤は、都市部における未固結地盤を想定し、対象とする実地盤弾性係数は50~100Mpa程度とした。

(4) 計測方法

X線ラジオグラフィ法による実験手法では、試験地盤の変形問題を扱う場合、土と埋設設置された鉛標点の動きは、変形量の比較的小さい問題に対して十分同一視できることがCambridge大学のK.H.Roscoeにより示されており^{9),10)}、土粒子の移動に伴い発生する歪の変化を計測、解析するのに十分信頼できる方法である。

また、切羽崩壊モードの観察においては、大変形問題を扱うこととなるが、大石の研究により、慣性力の影響が問題にならない変形速度の範囲内においては、鉛標点の動きが十分土粒子の動きを代表することが示されており¹¹⁾変位ベクトルによる比較の上での問題は無い。

(5) 実験結果の整理方法

実験結果は、下記の順序で整理した。

- ① 各モデル、各圧力における撮影とフィルムの現像
- ② バックライト式デジタイザによる標点座標読取り
- ③ 各モデル、各圧力での、座標値の相对比较による、地盤の各種歪解析。
- ④ 微小歪領域時の圧力の特定
- ⑤ 切羽安定性評価(下記解析値で判断)
 - ・体積歪、最大剪断歪、主歪解析
 - ・剪断破壊線、ゆるみ領域発達状況解析

3. 歪解析方法

まず、初期圧力状態、即ち自重が作用した状態での標点座標を特定する。二次元評価では、初期標点座標と各圧力状態で撮影した時点の標点座標の移動量の差により、各節点の変位量を計算し、これらの結果により、各節点で構成される三角形要素の体積歪、最大剪断歪、主歪を計算する¹²⁾。三次元解析では、奥行き方向に標点を埋設し、X線を2方向から照射し、得られた標点画像と照射位置により、空間の2直線の交点(誤差を含むため、2直線は交点を持たないので、最接近位置の中心)を求めることにより、三次元的評価が可能となる¹³⁾。3次元評価においては、奥行き断面毎の、二次元歪解析による疑似三次元評価と、奥

行き方向の各節点が構成する、4面体要素による3次元体積歪、剪断歪、および主歪を求め、各モデルによる比較を実施した。

(1) 二次元解析方法

図-6に示す三角形要素を考える。X線撮影により得られた土層中の鉛直断面を平面歪場とする。隣接した、鉛の3標点で構成される三角形要素内は、微小変形条件下において線形変位場と考えられる。

要素の3節点が形成する面内の変位は、よく知られているように、ベクトルとして式(1)の成分値によって一義的に定められなければならない。二次元問題では、式(2)による二つの一次多項式が最も簡単な表示式である¹⁴⁾。

x方向の変位uは式(3)で表される。また、y方向の変位vは式(4)で表される。要素内の任意の点における歪は、内部仕事に寄与する式(5)の3成分によって定めることができる。

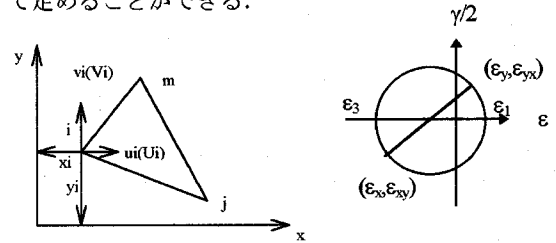


図-6 二次元平面歪連続体要素 図-7 モールの歪円

$$\{\delta\}^e = \begin{Bmatrix} \delta_i \\ \delta_j \\ \delta_m \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} u &= \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y \\ v &= \alpha_4 + \alpha_5 x + \alpha_6 y \end{aligned} \quad (2)$$

$$u = \frac{1}{2A} \left\{ (a_i + b_i x + c_i y) u_i + (a_j + b_j x + c_j y) u_j + (a_m + b_m x + c_m y) u_m \right\} \quad (3)$$

$$v = \frac{1}{2A} \left\{ (a_i + b_i x + c_i y) v_i + (a_j + b_j x + c_j y) v_j + (a_m + b_m x + c_m y) v_m \right\} \quad (4)$$

ここに、

$$a_i = x_j y_m - x_m y_j$$

$$b_i = y_j - y_m$$

$$c_i = x_m - x_j$$

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

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \end{Bmatrix} \quad (5)$$

式(4),(5)より,要素内の任意の点における歪成分 $\{\varepsilon\}$ は式(6)で表される. 図-7 に示すモールの歪円に示す様に,体積歪 ε_v ,最大剪断歪 γ ,主歪みは,それぞれ式(7),(8),(9)となる.

$$\{\varepsilon\} = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} b_i & 0 & b_j & 0 & b_m & 0 \\ 0 & c_i & 0 & c_j & 0 & c_m \\ \frac{c_i}{2} & \frac{b_i}{2} & \frac{c_j}{2} & \frac{b_j}{2} & \frac{c_m}{2} & \frac{b_m}{2} \end{bmatrix} \{\delta\}^e \quad (6)$$

$$\varepsilon_v = \varepsilon_x + \varepsilon_y \quad (7)$$

$$\gamma = \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 - 4\varepsilon_{xy}^2} \quad (8)$$

$$\varepsilon_1, \varepsilon_3 = \frac{1}{2} (\varepsilon_v \pm \gamma) \quad (9)$$

(2) 三次元解析

三次元解析においても二次元同様,式(10),(11)で要素の変位は4つの節点における12の変位成分で定義できる¹⁴⁾.

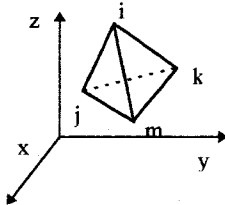


図-8 四面体要素

$$\{\delta\}^e = \begin{Bmatrix} \delta_i \\ \delta_j \\ \delta_k \\ \delta_m \end{Bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} u &= \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y + \alpha_4 z \\ v &= \alpha_5 + \alpha_6 x + \alpha_7 y + \alpha_8 z \\ w &= \alpha_9 + \alpha_{10} x + \alpha_{11} y + \alpha_{12} z \end{aligned} \quad (11)$$

x方向の変位 u は式(12)で表される.
他方向の変位も式(12)と同様に表される.

$$u = \frac{1}{6V} \begin{Bmatrix} (a_i + b_i x + c_i y + d_i z) u_i \\ + (a_j + b_j x + c_j y + d_j z) u_j \\ + (a_k + b_k x + c_k y + d_k z) u_k \\ + (a_m + b_m x + c_m y + d_m z) u_m \end{Bmatrix} \quad (12)$$

ここに,

$$\begin{aligned} a_i &= \det \begin{vmatrix} x_j & y_j & z_j \\ x_k & y_k & z_k \\ x_m & y_m & z_m \end{vmatrix} & b_i &= -\det \begin{vmatrix} 1 & y_j & z_j \\ 1 & y_k & z_k \\ 1 & y_m & z_m \end{vmatrix} \\ c_i &= -\det \begin{vmatrix} x_j & 1 & z_j \\ x_k & 1 & z_k \\ x_m & 1 & z_m \end{vmatrix} & d_i &= -\det \begin{vmatrix} x_j & y_j & 1 \\ x_k & y_k & 1 \\ x_m & y_m & 1 \end{vmatrix} \end{aligned}$$

その他の係数は上記式の*i,j,k,m*を循環することにより得られる.

要素内の任意の点における歪は,内部仕事に寄与する式(13)の6成分によって定めることができる.

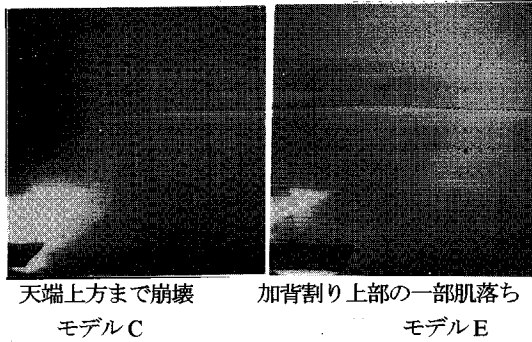
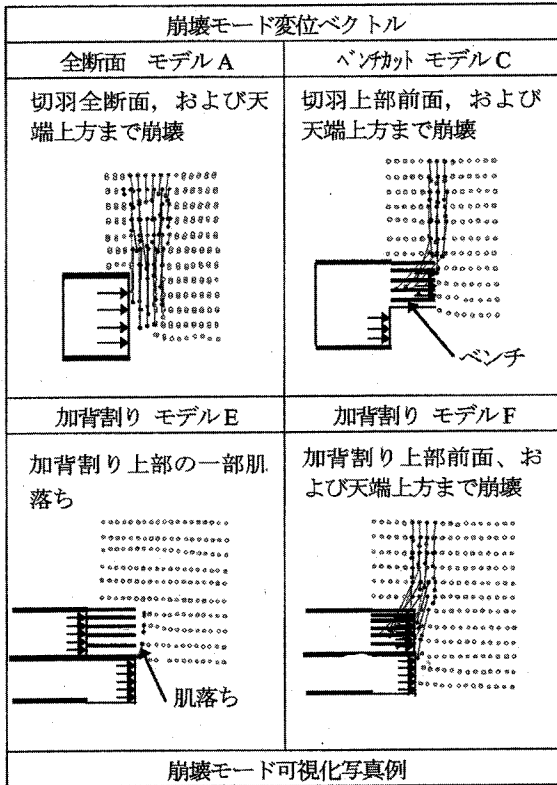
$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial z} \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \end{Bmatrix} \quad (13)$$

式(10)~(13)より,要素内の任意の点における歪成分 $\{\varepsilon\}$ は,式(14)で表される.

$$\{\varepsilon\} = \frac{1}{6V} \begin{bmatrix} b_i & 0 & 0 & b_j & 0 & 0 & b_k & 0 & 0 & b_m & 0 & 0 \\ 0 & c_i & 0 & 0 & c_j & 0 & 0 & c_k & 0 & 0 & c_m & 0 \\ 0 & 0 & d_i & 0 & 0 & d_j & 0 & 0 & d_k & 0 & 0 & d_m \\ 0 & \frac{c_i}{2} & \frac{b_i}{2} & 0 & \frac{c_j}{2} & \frac{b_j}{2} & 0 & \frac{c_k}{2} & \frac{b_k}{2} & 0 & \frac{c_m}{2} & \frac{b_m}{2} \\ 0 & \frac{d_i}{2} & \frac{c_i}{2} & 0 & \frac{d_j}{2} & \frac{c_j}{2} & 0 & \frac{d_k}{2} & \frac{c_k}{2} & 0 & \frac{d_m}{2} & \frac{c_m}{2} \\ \frac{d_i}{2} & 0 & \frac{b_i}{2} & \frac{d_j}{2} & 0 & \frac{c_j}{2} & \frac{d_k}{2} & 0 & \frac{c_k}{2} & \frac{d_m}{2} & 0 & \frac{c_m}{2} \end{bmatrix} \{\delta\}^e \quad (14)$$

ここに,

$$6V = \det \begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i & z_i \\ 1 & x_j & y_j & z_j \\ 1 & x_k & y_k & z_k \\ 1 & x_m & y_m & z_m \end{vmatrix}$$



塑性流動化領域は、密度低下のため X 線が透過し易くなり、白い帯として撮影される。

図-9 切羽形状の差異による切羽崩壊モード

体積歪は、式(15)となる。

$$\epsilon_v = \epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz} \quad (15)$$

また、主歪は式(16)の三次方程式の実根である¹⁵⁾。

$$\begin{vmatrix} 2(\epsilon_{xx} - \epsilon) & \epsilon_{xy} & \epsilon_{zx} \\ \epsilon_{xy} & 2(\epsilon_{yy} - \epsilon) & \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} & \epsilon_{yz} & 2(\epsilon_{zz} - \epsilon) \end{vmatrix} = 0 \quad (16)$$

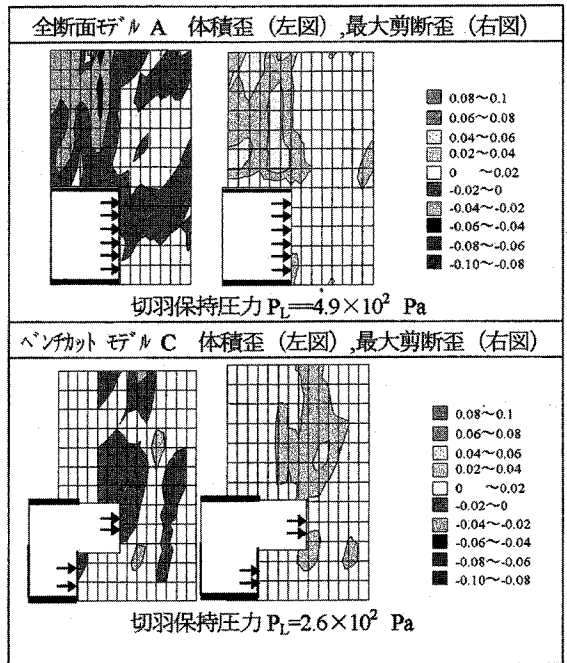


図-10(a) 微小歪領域 (切羽崩壊直前) における比較

4. 実験結果と考察

(1) 切羽形状の差異による切羽崩壊モード比較

図-9 に全断面 (モデル A), ベンチカット+先受け (モデル C), 加背割り+先受け (モデル E, F) の切羽崩壊モードの変位ベクトル解析と、可視化写真の例を示す。崩壊モード写真と変位ベクトルによる崩壊幅は良く一致している。モデル C における両者の差は、標点がプレライニングの前方から回り込んだ後のベクトルであることによるので、実際には X 線写真が真の崩壊領域を示している。

① 全般の傾向

変位ベクトル解析より、崩壊領域の大きさの順序は、崩壊幅で、モデル A=50mm, F=30mm, C=20mm, E≦10mm となっており、全断面モデル A が最も大きな崩壊領域である。モデル F は全断面を開放しているが、中央に装備した加背割り部材の効果により、切羽前方の土粒子のトンネル下方移動が抑制された結果である。崩壊した土粒子は、加背割り部材である水平デッキに堆積している様子が変位ベクトルよりもわかる。これは、ベンチカットモデル C と同様であるが、崩壊領域幅には前述の差がある。ベンチカットモデルでは、トンネル下半の土塊に、切羽保持効果があるからである。モデル E では加背割り部材の下半の圧力を開放したにも拘わらず、切羽が崩壊しないのは、剛性の高い水平デッキにより、上部の土塊の移動が拘束され、その土塊の切羽保持効果により切羽が安定

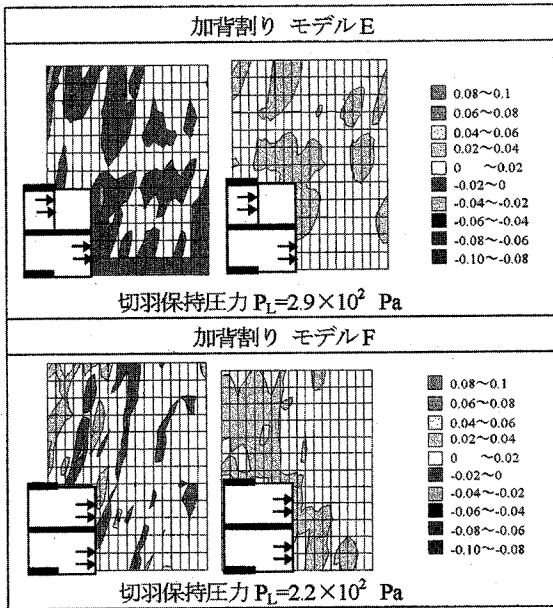


図-10(b) 微小歪領域（切羽崩壊直前）における比較
 (注) 体積歪：負は膨張，正は圧縮

したためである。

全モデルにおいて、トンネル断面外では切羽崩壊領域は、トンネル先端部から直上に発達し、前述の崩壊幅で表層にまで達する。また、断面内ではモデル C、F において、切羽の崩壊とともに土粒子のトンネル内への流れ込みが把握できた。

② 微小歪領域における比較

図-10(a)、(b)に微小歪領域における体積歪、最大剪断歪の解析結果を示す。

図-10(a)、(b)は、切羽が崩壊する直前の歪解析結果である。この状態では、体積歪は-0.06～+0.06の範囲、最大剪断歪は0～0.08の範囲であり、変位量は、まだ微小な範囲であるが、地盤内部の歪分布と崩壊直前における切羽保持圧力にはモデルによる差が認められる。全断面モデル A では、限界の切羽保持力 $P_L = 4.9 \times 10^2$ Pa に対し、ベンチカット、加背割りモデルでは $P_L = 2.2 \sim 2.9 \times 10^2$ Pa の範囲で差が認められた。この差、 2×10^2 Pa の地盤高さ換算値は 1.4cm で、トンネル高さの 14% に相当するものであり有意の差と認められる。

歪の大きな領域は、トンネル天端付近と、先受け上方である。切羽前方にも島状に歪のやや大きな部分が存在するが、先に述べた崩壊領域（トンネルの高さの半分）より前方では、剪断破壊面としては成長しない。しかし、崩壊領域内では、島状に発達した高歪領域は、切羽保持力の漸減とともに、お互いが連結し、崩壊へと繋がっていく。先受けの下部を除荷すると、先受けの剛性が十分に確保

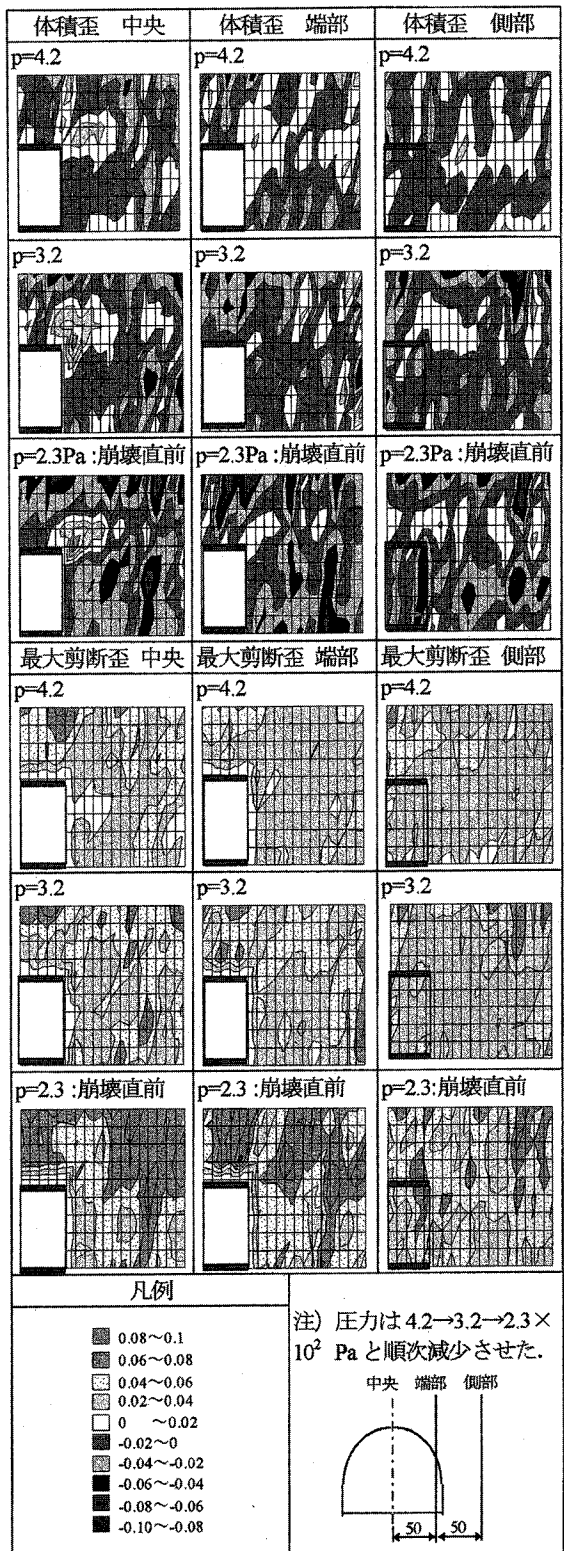


図-11 疑似三次元比較（切羽崩壊直前） $p: \times 10^2$ Pa

されていないと、この上部に大きな歪領域が発達する

(モデル C,F) .

③ 切羽保持力除荷過程における歪の発達状況

全断面モデル A において、切羽保持圧力を漸減した時の体積歪と最大剪断歪の解析結果を図-11 に示す。同時に、疑似三次元比較結果として、奥行き方向断面の歪の変化も示している。体積歪は、トンネル天端で切羽保持圧の除荷と伴に拡大している。トンネル天端では体積が圧縮された領域を囲むように、体積の膨張した領域が存在し、トンネル天端で、土塊が剛体変位を生じていることが観察される。また、トンネル断面切羽前方でも、体積膨張領域が、除荷とともに拡大している。

切羽崩壊直前における、疑似三次元結果より、中央断面においては、トンネル天端で、体積歪の変化が顕著であり、圧縮領域最大体積歪($\epsilon_v = 0.06 \sim 0.08$)の核を取り囲むように、圧縮領域がある。そして、圧縮領域全体を囲むように、膨張領域が発達している ($\epsilon_v = -0.04 \sim -0.02$) .

すなわち、トンネル天端の土粒子が剛体変位を生じ、トンネル断面に向かって移動している様子が観察される。トンネル端部では、天端付近でわずかな圧縮領域($\epsilon_v = 0 \sim -0.02$)が発生しているが、顕著な変化は認められない。しかし、トンネルスプリングラインより上の部分は、体積歪の変化 ($\epsilon_v = -0.1 \sim -0.06$)が比較的大きな値で、鉛直方向にその領域が発達していることが観察できる。この領域は、トンネル中央断面より、範囲、値ともに大きい。トンネル側部では、トンネル切羽端面延長面と交差する部位の体積歪変化($\epsilon_v = -0.06 \sim -0.04$)は、比較的大きな値である。最大剪断歪の変化は、トンネル中央断面において、上記膨張領域と最大剪断歪分布がほぼ一致している。同様に、トンネル端部においては、トンネルスプリングラインより上の部分は、最大剪断歪の変化は中央断面より大きく、トンネルの肩の部分の歪変化が大きいことがわかる。トンネル側部では全般的に最大剪断歪の値は小さく、土粒子の移動が少ない領域である。

表-2 Terzaghi ゆるみ土圧と計測限界支持力

土被	単位 $\times 10^2$ Pa		
	全土圧	Terzaghi 土圧	計測限界支持力
5D	79	22.7	4.9 (22%)
1D	16	13.5	2.3 (17%)

()内数値は、Terzaghi 土圧に対する比率

表-2 は、最大剪断歪を約 10%程度まで許容した場合に計測された切羽安定に必要な限界支持力である。Terzaghi による土圧論により計算されるゆるみ土圧比で 1/5 程度の支持力で切羽が安定することがわかる。

このように、切羽の安定に必要な力、すなわち地盤より作用する力は、二次元実験同様、Terzaghi による土圧論で

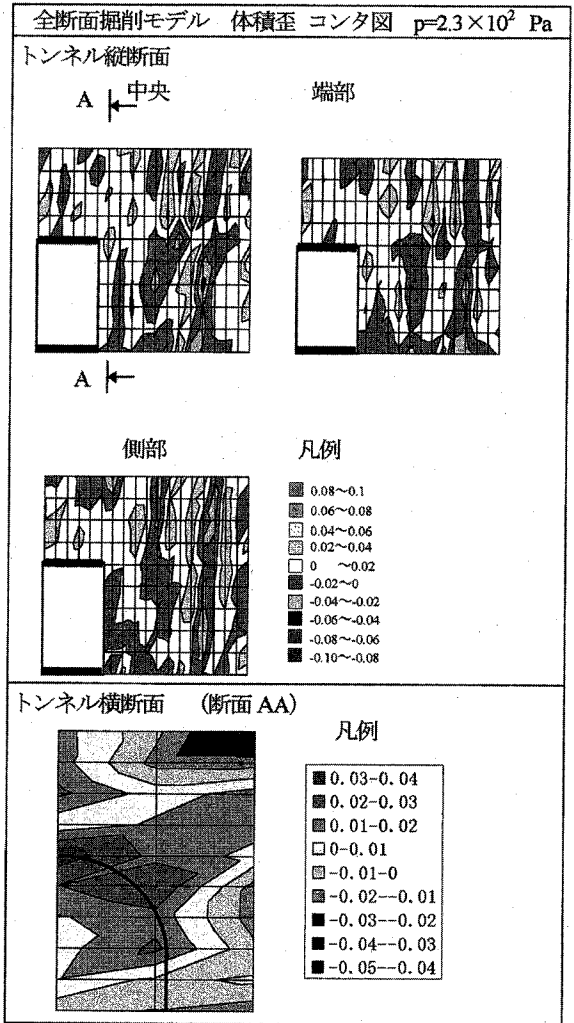


図-12 三次元解析結果 (体積歪)

得られるゆるみ土圧よりかなり小さな値である。微小歪領域 (最大剪断歪 $\leq 10\%$) の場合、歪解析結果によるコンタ図よりもわかるように、剪断面は不連続状態で、部分的に歪の比較的大きな領域が島状に分布している。すなわち、土の中でアーチアクションにより切羽が支持されているため、計測された限界支持力は Terzaghi による土圧論により計算される値よりも小さくなったと考えられる。

図-11 の体積歪の変化より、地中の歪分布は、除荷に応じて内部歪は徐々に大きくなるが、その過程は一樣ではなく、歪の再配分を繰り返しながら発達していく様子がわかる (トンネル中央 $P=3.2 \rightarrow 2.3 \times 10^2$ Pa)。すなわち、土中の一部が剛体変位を生じれば、その周辺の土粒子間隙は拡大する ($\epsilon_v = -0.02 \sim 0$)。更に除荷が行われれば、周辺の土粒子が密度の低下した領域に移動する。

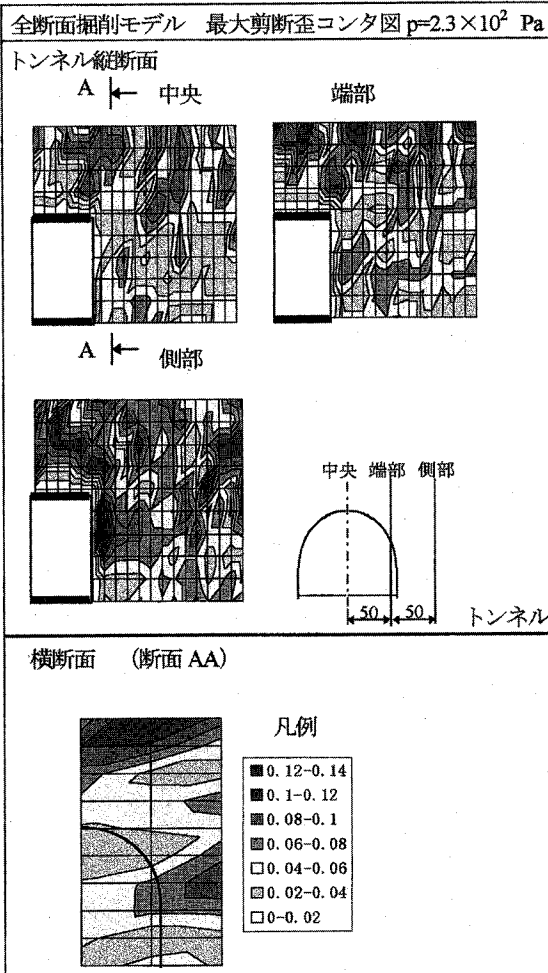


図-13 三次元解析結果 (最大剪断歪)

結果として、剛体変位の発生した領域の上部の領域に、さらに土粒子間隙の増大した領域($\varepsilon_v = 0.04 \sim 0.02$)が発生する。この現象を繰り返し、次々に上部に向かい歪は発達していく。

三次元評価

図-12 は、三次元の解析結果の内、全断面掘削モデルにおける体積歪のコンタ図を示す。図-11 に示した二次元解析における切羽崩壊直前のデータの三次元解析である。歪分布は、当然のことながら傾向は一致している。三次元解析ではトンネル横断面の分布も知ることができ、その解析結果も図-12 に示している。この横断面の解析より、トンネル頂部と肩の部分に圧縮領域が発生し、その周辺に、体積が膨張した領域を確認することができる。体積が膨張している範囲は、トンネル底部より斜め上方に発達しており、この領域がすべり線として更に発達する部分であると考えられる。図-13 は、三次元最大剪断歪解

析結果である。トンネル中央付近($\gamma=0.02 \sim 0.06$)に対して、側部($\gamma=0.1 \sim 0.14$)と大きな差が認められる。これは、トンネル切羽側部の土砂が、モデル奥行き方向に移動した結果である。中央が小さいのは、対象性より土砂の奥行き方向移動量はほとんどない結果による。また、トンネル横断面解析より、トンネルの肩付近の歪が大きいことがわかる。これは、体積歪の解析結果と同様である。トンネル直上の最大剪断歪($\gamma=0.04 \sim 0.06$)は比較的小さく、その上の歪($\gamma=0.08 \sim 0.12$)が大きいのは、直上の土砂が剛体沈下したためである。三次元解析結果は、疑似三次元結果と比べ、特に切羽近傍の評価に有効である。さらに、トンネル横断面の解析が可能であり、当初の目的である、トンネルの合理的施工に関する事前検証技術の確立に貢献できるものと考えられる。

5. まとめ

X 線可視化実験と各種歪解析により、この手法が十分精度よく地盤の歪解析が可能であることを、歪の発達状況より確認した。また、三次元解析も合理的に実施可能であることも確認した。以下に、本実験研究によって得られた知見をまとめる。

- 1) 切羽を安定させるに必要な支持力は、全断面掘削モデルの切羽形状で、Terzaghi の土圧論により得られる値の20%程度である。
- 2) 切羽の形状により、限界切羽支持力は大幅に異なる。ベンチカットあるいは加背割りモデルの場合、全断面モデルと比較して50%程度の力で支持可能である。
- 3) 切羽の下半を先行掘削しても、機械的加背割りにより上部地盤を支えれば、切羽保持に有効で、全断面モデルの半分に押さえることができる。インバートの早期閉合を実現する新規工法としての可能性がある。
- 4) 三次元解析は、地盤の挙動をより精度よく評価することが可能で、特にトンネル頂部と、肩の部分での歪変化を含む切羽近傍の評価には有効な手法である。
- 5) 当該研究で実施した手法により、切羽安定に対して、切羽の形状がどのように影響するかが、事前の実験により評価できることがわかった。これは、新規工法を検討するには有効な方法である。
- 6) 切羽圧力制御による、微小歪領域での X 線可視化実験手法および、解析手法の適用範囲を見極めることができた。

6. あとがき

今回、X 線可視化技術により、微小歪で、かつ、圧力制御方法による実験が合理的に実施でき、切羽の安定評価に

有効であることを示した。X線可視化技術は、X線の透過距離が鮮明に画像が得られるのは、今回の実験設備では約30cmであることがわかっている。そして土槽壁面の影響を考慮すると、モデルの規模が10cm程度となり、規模が限定される。また、三次元歪解析においては、解析自体の問題はないと考えられるが、データ自身の読み取り精度が、ヒューマンエラーを考慮すると100~200 μ であり、土槽の奥行き方向の精度の改善も今後の課題として残っている。また、奥行き方向の標点も、10mm程度として精度を向上する必要があるが、X線照射によって、フィルムに焼き付けられた標点が重なり、標点を区別することが困難となるため、当該実験に示したピッチで行った。微小歪領域による実験と、計測精度を考慮して、更に詳細な歪分布解析を必要とする場合には、X線照射設備の増設が望ましい。しかし、被りの厚い実験には、X線透過距離による画像の鮮明度に十分留意した実験が必要である。

筆者らは、実験検証技術の更なる改善を目的として、大型土槽実験を計画している。これは、今回実施した実験の10倍規模であり、その結果については機会を見て発表する所存である。

謝辞：本研究は、土木学会関西支部における『都市トンネルにおける合理的施工法に関する調査研究』委員会において、TMWG委員の皆様の貴重な助言と指導を得て推進した。また、本実験の実施に当たっては、当時神戸大学工学部建設学科学部生の、木谷努、射場康平両氏に協力を頂いた。ここに、感謝の意を表します。

参考文献

1) 櫻井春輔,川嶋幾夫,川端康祝,皿海章雄:土被の浅いトンネルの力学的挙動に関するモデル実験,土木学会論文集,第487号/III-26,1994年3月。

- 2) 川嶋幾夫,櫻井春輔,川端康祝,小竹剛:トンネルの切羽形状と周辺地山の変形挙動の関係,神戸大学自然科学研究科紀要 12-B:27~38,1994.
- 3) 肥田憲明:斜坑シールド工法における切羽安定性・切羽作用外力に関する研究,長岡技術科学大学院工学研究科修士論文,1994年2月。
- 4) 村山朔郎,松岡元:粒状土地盤の局所沈下現象について,土木学会論文報告集,第172号,1969年。
- 5) 村山朔郎,松岡元:砂質土中のトンネル土圧に関する基礎的研究,土木学会論文報告集,第187号,1971年。
- 6) 近久博志,荒井幸夫,筒井雅行,櫻井春輔:トンネル掘削時の挙動に関する模型実験と評価法,土木学会第47回年次講演会,1994年9月。
- 7) 福島伸二,望月美登志,香川和夫,横山章:土被の浅い砂質地山トンネルの補助工法に関する模型試験,土木学会論文集,第406号/III-11,1989年6月。
- 8) 浦上紘一,兵頭和也,大石善啓:X線ラジオグラフィ法を用いた土の移動現象の可視化,三菱重工技報,Vol.21 1984-7.
- 9) Roscoe, K. H. et al:*The determination of strain in soils by X-Ray method, Civ. Eng. & Pub. Wks. Rev.*, 1963..
- 10) Thurairajah, A.:*Some Shear Properties of Kaolin and of Sand*, Ph.D. Thesis Cambridge Univ., 1961.
- 11) 大石善啓:X線ラジオグラフィ法を用いた土の切削機構の可視化,木学会論文集第454号/III 1992年9月。
- 12) 櫻井春輔:トンネル工事における変位計測結果の評価法,土木学会論文報告集,第317号,1982年。
- 13) S.Sakurai: MONITORING OF CAVERNS DURING CONSTRUCTION PERIOD, *ISRM Symposium, Aachen*, 1982.
- 14) O.C.Zienkiewicz, Y.K. Cheung: *The Finite Element Method in Structural and Continuum Mechanics*, McGraw-Hill, 1967.
- 15) 成岡昌夫,丹羽義次,山田善一,白石成人:構造力学第三巻,板の力学,丸善株式会社,昭和49年2月。

(1995. 9. 21 受付)

STUDY ON TUNNEL FACE STABILIZATION BY X-RAY RADIOGRAPHY METHOD -APPROACH BY THREE DIMENSIONAL STRAIN ANALYSIS-

Shigeru NISHITAKE, Shunsuke SAKURAI and Kiwamu ARIKAWA

The two-dimensional laboratory tests have been studied and have obtained the useful data to design the tunnel construction methods. This paper introduce the both two and three dimensional laboratory tests by using X-ray Radiography method under the condition of small strain and tunnel face supporting pressure control tests. From the experiments, the supporting pressure required to maintain the tunnel face is approx. 20% compare with the value which is obtained Terzaghi theory. And, the supporting pressure of both the bench and the cross section heading model is approx. half value of full section model. X-ray radiography method is useful to clear the behavior around the tunnel face.