

## (32) 切羽の進行を考慮したトンネルの二次元平面ひずみ弾塑性解析

大成建設(株) ○里 健 龜村 勝美

### 1. はじめに

トンネルやシールドの安定を数値シミュレーションを用いて検討するにあたっては、従来より、二次元平面ひずみ問題として取り扱う方法がとられている。これは、数値解析結果の理解が容易であることや、経済的な理由によるものであるが、実際には、切羽面の存在や、支保工打設時期、掘削手順の影響があり、単純に平面問題として処理できない場合がほとんどである。そこで、二次元平面ひずみ解析に、近似的に三次元効果を持たせ、トンネル掘削等の問題を検討する方法<sup>1)~2)</sup>が提案されている。本報告では、円孔が等方等圧下の弾性体中に掘削されていく際の孔壁の半径方向変位履歴曲線を用いて、二次元平面ひずみ解析に三次元効果を持たせる方法について述べるとともに、本法の平面ひずみ弾塑性解析への適用性について考察を加える。

### 2. 弾性特性曲線

図-1は、等方等圧下の弾性体中に掘削された円孔の孔壁における、半径方向の変位( $U$ )と、最終変位( $U_0$ )により正規化したものであり、これを“弾性特性曲線”と呼ぶことにする。図は、切羽前方1D( $D$ :直径)より切羽後方2Dまでについて示してあるが、この外側の領域では、切羽との距離に対する変位の変化は充分小さい。また、切羽前方の変位は、孔壁の延長上の点についてのものである。

この特性曲線は、掘削により解放される応力が孔壁に作用する割合の変化と等価であり、特性曲線と同様の変形を、二次元平面ひずみ状態のモデルにより表わすことができる。即ち、掘削相当力( $P_0$ )を算出し、解析対象断面と切羽との距離に依じ、弾性特性曲線で与えられる割合

$$P = \frac{U}{U_0} P_0 \quad \text{----- (1)}$$

でこれを負荷するのである。弾性体では、荷重と変形が線形関係にあるために、切羽との距離に対する孔壁の半径方向変位は、三次元解析のそれと厳密に一致する。しかし、孔壁以外の変形や応力状態はこの限りではなく、注意が必要である。本法のトンネルの弾性解析に対する適用性については、文献(2)~(3)を参照されたい。

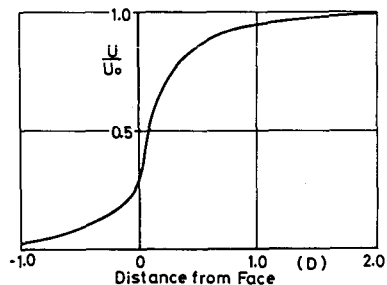


図-1 弾性特性曲線

### 3. 弾塑性解析への適用性について

前項で述べに方法は、弾性体の解析を目的としたものであるが、この考え方を、弾性体以外の材料、ここでは特に弾塑性体の解析に適用可能かどうかについて検討を加える。非線形性を有する材料の、三次元解析は、現時点では、多大な費用と労力を必要としており、二次元モデルによる近似的解析手法の検討は、有益であろう。

ここでの検討は、等方等圧下の弾塑性体中に円孔を掘削する問題と、弾性特性曲線を用いて行なった二次元平面ひずみ状態の解析結果と比較することにより行なう。

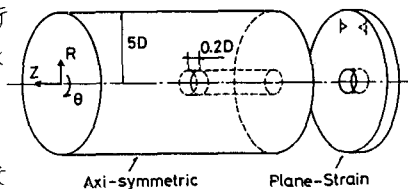


図-2 解析モデル

### 3.1 数値解析手法

検討に用いたモデルは、図-2に示すような軸対称三次元モデル、及び二次元平面ひずみ状態の円孔モデルである。二次元平面ひずみモデルでは、掘削相当外力を、切羽との距離に応じて弾性特性曲線より求め、これを順次負荷して解を求めた。また、弾塑性解析にあたっては、材料の性質を次のように設定し、ニュートン法を適用した。

- i) 材料は、完全弾塑性体とする。
- ii) 応力、ひずみの偏量成分に対し、Reuss の方程式が成立すると仮定する。

$$d\epsilon_{ij}' = \frac{1}{2G} d\sigma_{ij}' + \sigma_{ij} d\lambda \quad \text{----- (2)}$$

入：比例定数

- iii) 降伏関数は、Drucker-Prager 型とする。

$$f = C_1 \sigma_m + \tau_{oct} - C_2 \quad \text{----- (3)}$$

$C_1, C_2$ ：定数

解析に用いた定数は、以下のとおりである。

$$E = 1 \times 10^5 \text{ (tf/m}^2\text{)} \quad \nu = 0.3$$

$$C = 100 \text{ (tf/m}^2\text{)} \quad \phi = 30^\circ$$

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = 1000 \text{ (tf/m}^2\text{)} : \text{初期応力}$$

### 3.2 解析結果 — 来掘りの場合 —

まず、円孔と来掘りで掘削した場合について、両解析結果を比較する。なお、本解析では、材料を完全弾塑性体としているに、解析結果はひずみ履歴の影響を受けない。従って、軸対称モデルで切羽より充分離れた部分の変位、応力と、二次元モデルにおいて掘削解放力を全て作用させたときの応力、変位は一致する。

- i) 変位について

図-3は、切羽との距離に対する孔壁の半径方向変位を示している。弾性特性曲線による二次元解析では、実際の(軸対称モデルの)もの

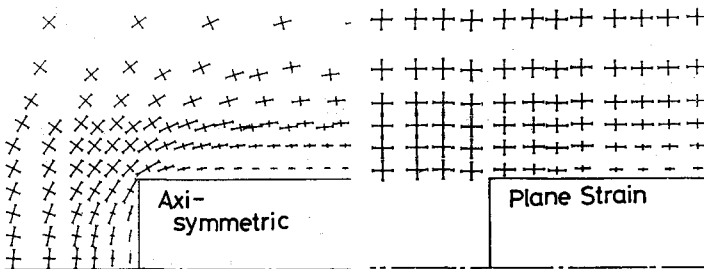


図-7 切羽付近の応力分布

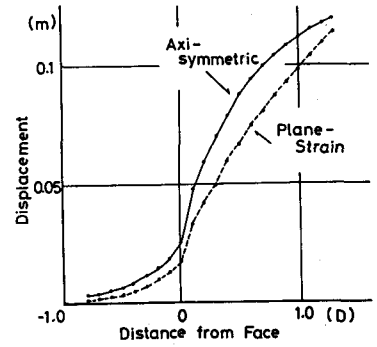


図-3 孔壁の変位履歴

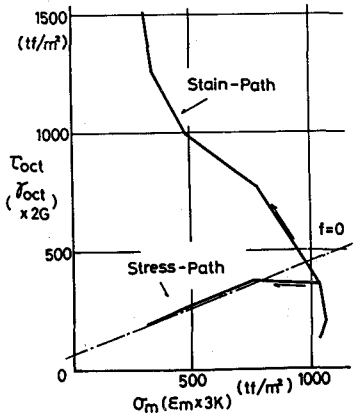


図-4 応力、ひずみ履歴(軸対称)

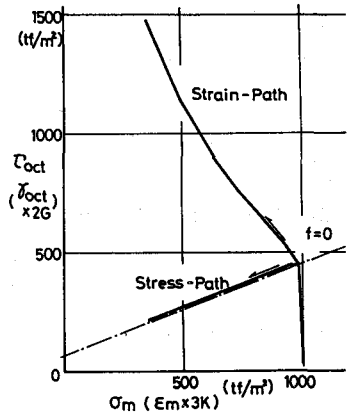


図-5 応力、ひずみ履歴(平面)

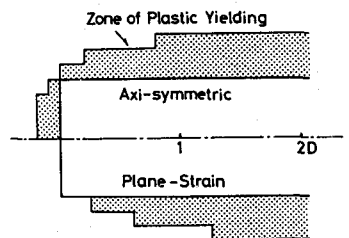


図-6 塑性域の分布

より、変形が遅れて生じていることがわかる。これは、図-6等からわかるように、塑性域が遅れて生じ、この結果、塑性変形が切羽面から離れた部分で付加されてくることに起因している。軸対称モデルでは、切羽付近の応力集中により、切羽前方より塑性域が生じており、切羽面付近で、二次元解析が大きな誤差を持っていることがわかる。しかし、変位全体の傾向は、よく一致しており、変位量も10~20%程度の誤差内に納まっている。

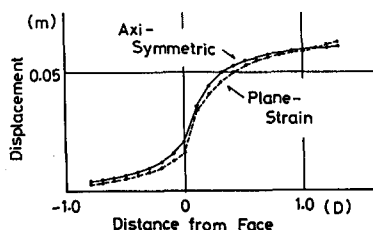


図-8 孔壁の変位履歴 (0.2D支保)

## ii) 応力、ひずみについて

図-4, 5に、孔壁部分の要素の応力、ひずみが、掘削の進行に伴ってどう変化するを示す。両者は同様の傾向を示している。ただし、軸対称解析では、切羽付近で $\sigma_m$ が上昇するのに対し、二次元モデルでは、降伏に至るまで $\sigma_m$ はほとんど一定であり、切羽付近での両モデルの差を示している。

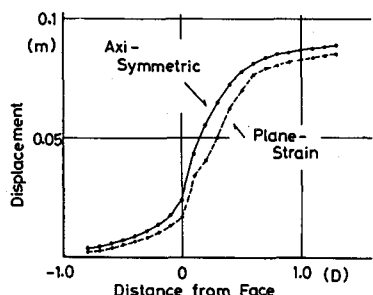


図-9 孔壁の変位履歴 (0.6D支保)

## iii) 塑性域について

二次元平面ひずみ解析においては塑性域は、先に述べたように遅れて生ずる(図-6)。図-7は、両解析により得られた応力分布を示しているが、軸対称モデルのものと見ると、切羽付近の応力集中の様子がわかる。二次元モデルではこれを表現することができないため、塑性域分布に差異が生ずるのである。なお、二次元モデルの応力分布図は、二次元解析より得られた $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$ を、対応する位置に並べたものである。塑性域の大きさや分布傾向は、よい一致をみせている。

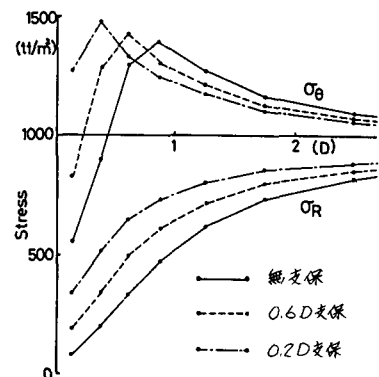


図-10 応力分布(軸対称)

## 3.3 解析結果 — 支保工がある場合 —

実際のトンネルでは、支保工がある場合がほとんどであり、支保工と地山の相互作用と、弾性特性曲線に基づく二次元解析で、どの程度まで表現できるのかは興味深いところである。そこで、切羽面より0.6D及び0.2Dの距離から支保工を付加した場合について解析を試みる。以下に、それぞれの結果を示す。

### i) 変位について

変位は、素掘りの場合に比べ小さい誤差で納まっていることがわかる(図-8, 9)。これは、支保工により塑性域の進展が抑制され、構造系の変形量が小さくなっているためである。また、最終変形量もよく一致している。

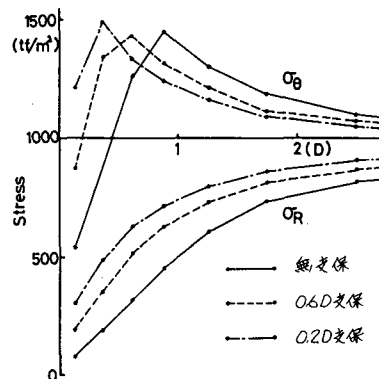


図-11 応力分布(平面)

### ii) 応力、ひずみについて

図-10, 11は、切羽から充分離れた場所での応力分布を示しているが二次元モデルの解が、軸対称モデルのものとよく一致していることがわ

かる。これは、二次元モデルに支保工を付加するタイミングの評価が適当であったことを示すものである。支保工を付加するタイミングは、支保工を付加する位置での掘削解放力を負荷しに直後であり、これは弾性特性曲線より求まる。従って、この結果は、弾性特性曲線を用いる手法がある程度妥当であることを示していると言える。また、応力、ひずみ経路も切羽付近を除いて、両解析結果とも同様の傾向にある(図-12,13)。

### iii) 塑性域について

図-14に、塑性域の比較を示す。支保工により、材料の塑性化が抑えられている様子がよくわかる。図-8~14を併せて見ると、切羽に近づけて支保工をすることにより、地山の塑性化や、これによる変形の増加が小さくなっていることがわかるが、二次元モデルの解析においても、この傾向を充分表現できている。

### iv) 支保工の応力について

二次元モデルの支保工の応力は、孔壁の変形が遅れて生ずるため、軸対称モデルのものに比べ小さめに出ている。最終状態では、10%程度小さな値が得られるが、これは、軸対称解析での一掘削幅(0.2D)が大きいための誤差である。

## 4. まとめ

本報告は、弾性特性曲線を用いた二次元平面ひずみ状態での解析により、トンネル等の挙動をシミュレートすることの妥当性について検討しにものである。解析結果全体をみると、切羽付近を除いて、二次元平面ひずみ状態での解は、よい近似を与えており、10~20%の誤差を認めれば、実用的には充分であると判断できる。特に興味深いのは、弾性特性曲線を用いた二次元解析においても、支保工と地山の相互作用をある程度表現できることであり、三次元非線形解析の予備資料としてあるいは、地山の变形挙動を予測する一手段として、ここで述べた方法が有効であることを示している。にほし、ここでは、円孔モデルのみについて検討しており、他の形状や、複雑な掘削順序を経るトンネルに対しては、更に検討を加える必要がある。

### 参考文献

- 1) 久武, 中村, 中川: トンネルの簡便三次元解析手法に関する研究, 第17回土質工学研究発表会, 1982
- 2) 木村, 亀村, 泉田, 里: 切羽の進行を考慮しに掘削の解析について, 第16回土質工学研究発表会, 1981
- 3) 亀村, 平野, 竹田, 里: 切羽進行を考慮しにトンネルの解析と実際, 第27回土質工学シンポジウム, 1982

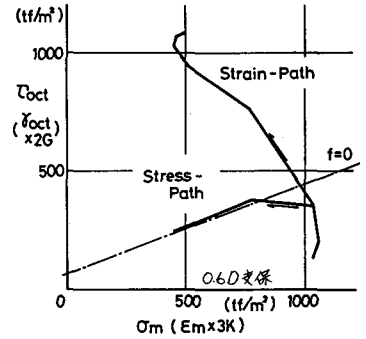


図-12 応力, ひずみ履歴 (軸対称)

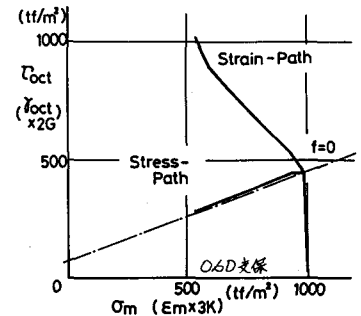


図-13 応力, ひずみ履歴 (平面)

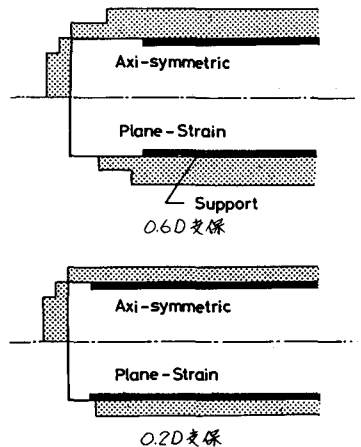


図-14 塑性域の分布

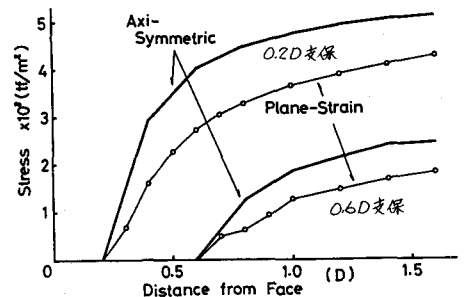


図-15 支保工の軸応力の变化

(32) A study on elasto-plastic analysis of tunnel  
considering face advance

Taisei Corp. M.Sato

K.Kamemura

On a numerical analysis of tunnel stability, plane-strain condition is usually employed because of its practicality or less computational efforts. However, three-dimensional effects near the tunnel face can not be disregarded for the interpretation of support and excavation method.

In this paper, a technique to reflect three-dimensional effect of tunnel face on plane-strain analysis, is proposed. Elasto-plastic analysis under plane-strain condition using proposed method have been carried out. Results are compared with results of axisymmetric analysis and they showed good agreement.