

(7) 塑性クラック要素を用いた 双設トンネルの有限要素解析

東急建設(株)技術研究所	正会員	○ 後藤有志
同上	正会員	壺内達也
埼玉大学 工学部	正会員	山 辺 正

FE Analysis of Double Adjacent Tunnel with Cracked Triangular Element

Yuji GOTO,	Tokyu Construction Co., Ltd.
Tatsuya TSUBOUCHI,	Tokyu Construction Co., Ltd.
Tadashi YAMABE,	Saitama University

Authors carried out base friction model tests previously in order to investigate the distance effect of the adjacent tunnels on the fracture mode.

In this paper, this experimental results were simulated by using elasto-plastic finite element analysis with the cracked triangular element. This element was developed for the purpose of simulating the internal crack.

The result of these analysis showed better agreement with the experiments than that of the ordinary elasto-plastic analysis.

1. はじめに

有限要素法は、本来、未知量として扱う物理量が連続しているという仮定に基づいているため、トンネルの天端の崩落や、斜面のすべり面の発生等の破壊面が進展するような不連続体を扱う問題は不得意であり、この問題を取り扱うために、過去、様々な研究がなされているが、一般化された方法は未だ無い。

著者らは、先に双設トンネルの近接度の差異による破壊モードの違いを底面摩擦模型実験により調べ、さらにこの実験結果を弾塑性有限要素法によりシミュレートを行ない、その結果を報告した。^{1) 2)}しかし、一般の弾塑性解析を用いたため、実験結果を良くシミュレートすることができなかった。

本研究では、この実験結果を、山辺らによって開発された比較的簡単にクラックの進展を考慮できる塑性クラック要素³⁾を用いた弾塑性解析によりシミ

ュレートし、良い結果を得られたので報告する。

2. 底面摩擦模型実験

2.1 実験の概要

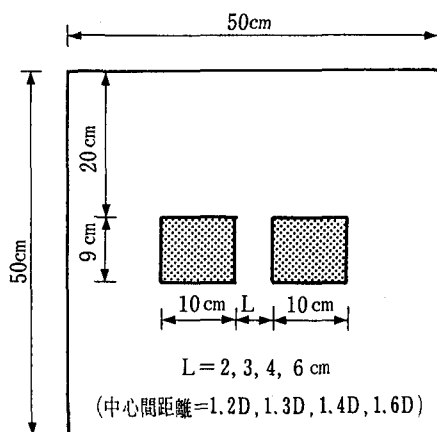


図-1 実験ケース

実験装置および今回の実験についての詳しい説明は前報¹⁾²⁾に述べているので、ここでは簡単な概要についてのみ述べる。

実験は、図-1のように高さ9cm、幅D=10cmの矩形トンネルで土被り厚を20cmとし、トンネル間の距離Lを2,3,4,6cm（トンネルの中心間距離で1.2D, 1.3D, 1.4D, 1.6D、D:トンネルの掘削幅）の4ケースについて行なった。模型の物性値は川本ら⁴⁾の実験結果によると表1のようになる。なお、模型に作用させた空気圧は、すべて0.3kgf/cm²である。

2.2 実験結果

ここでは、解析を行なった1.2Dと1.6Dの2ケースについて述べる。各ケースの破壊状況のスケッチを図-2, 3に示す。図からわかるように、1.2Dのケースは破壊面は2つのトンネルを含むグランドアーチを形成するように生じ、トンネル間のピラー部が破壊している。しかし、1.6Dの場合は、まったく独立したグランドアーチが形成され、ピラー部に破壊は生じていない。

3. 塑性クラック要素³⁾

塑性クラックの発生条件は、Mohr-Coulombの破壊基準から求める。

$$f = \tau + \sigma_n \tan \phi - C \quad (1)$$

f: 破壊基準

C: 基質部の粘着力

ϕ : 基質部の内部摩擦角

σ_n : 発生したクラック面上の垂直応力

τ : 発生したクラック面上のせん断応力

また、クラックの方向 θ は、全体座標系で図3のように θ をとると、せん断の場合には式(2)のいずれか、引張の場合には式(3)に従うとした。

$$\theta = \theta' + \phi/2 - 3\pi/4$$

$$\theta' = \phi/2 + \pi/4 \quad (2)$$

$$\theta = \theta' - \pi/2 \quad (3)$$

θ' : X軸と要素内の最小主応力のなす角

クラックが生じた後には、図4のように要素を弾性体である4つの定ひずみ三角形要素と、クラックの効果を表す弾塑性体である1つの四節点アイソパラメトリック四角形要素に分割する。クラック発生後の塑性ひずみはすべてこの四角形要素に生じるとし、その時の塑性ひずみ増分は関連流れ則に従う

ものとする。つまり、図5の局所座標系に対して Pietruszczak and Mroz⁵⁾が提案したように次式で表わされる。

$$\varepsilon_n^P = \lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_n}, \quad \gamma_t^P = \lambda \frac{\partial f}{\partial \tau}, \quad \varepsilon_t^P = 0 \quad (4)$$

ε_n^P : 局所座標系における鉛直方向の塑性ひずみ増分

ε_t^P : 局所座標系における水平方向の塑性ひずみ増分

γ_t^P : 局所座標系におけるせん断塑性ひずみ増分

この式にPragerの適合条件を導入し、マトリックス形で書くと次式になる。

表-1 模型の物性値

密度	1.9 gf/cm ³
粘着力	0.46 kgf/cm ²
内部摩擦角	37°
弾性係数	460 kgf/cm ²
一軸圧縮強度	1.85 kgf/cm ²
ポアソン比(仮定)	0.3
摩擦により作用する単位体積重量	84 gf/cm ³ (空気圧0.3kgf/cm ² 時)

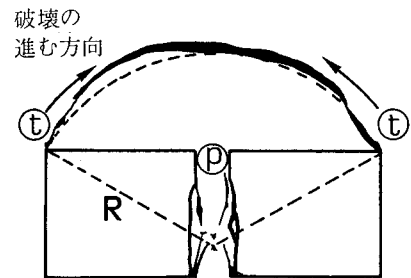


図-2 実験後の破壊状況(1.2D)

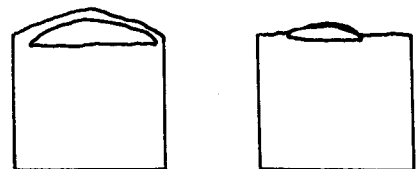


図-3 実験後の破壊状況(1.6D)

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_n^p \\ \varepsilon_t^p \\ \gamma_t^p \end{Bmatrix} = \frac{1}{H} \begin{bmatrix} \tan^2 \phi & 0 & \tan \phi \\ 0 & 0 & 0 \\ \tan \phi & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_n \\ \sigma_t \\ \tau \end{Bmatrix} \quad (5)$$

H: ソフトニングパラメータ

5つの各要素は、以下のようにして合成する。まず、4つの三角形要素の要素剛性マトリックスは次式で表わされる。

$$K^i = (B^i)^t D^e (B^i) \Delta^i, \quad (i=1 \sim 4) \quad (6)$$

B^i : ひずみ～変位マトリックス

Δ^i : 各三角形要素の面積

D^e : 弾性係数マトリックス

次に、四節点アイソパラメトリック要素は以下のように表わされる。式(5)の塑性コンプライアンスマトリックスを C_1^p とし、局所座標系における弾性コンプライアンスマトリックス C_1^e とすれば、弾塑性マトリックスは、次式で表わされる。

$$D^{ep} = T^t [C_1^p + C_1^e]^{-1} T \quad (7)$$

1: 局所座標系を意味する。

T: 局所座標系から全体座標系への変換マトリックス

この D^{ep} を用いて要素剛性マトリックスを求める。

次に、節点1～3を外節点、節点4～8を内節点と呼び、内節点形に関する変数に下添え字 a, 外節点形に関する変数に下添え字 b を採用し、外節点によって形成される主三角形要素に対する剛性マトリックス K を K^i ($i=1 \sim 5$) から作成する。外節点からなる主三角形の各辺は常に直線であり、内節点は外力を伝達しないので、

$$\begin{Bmatrix} F_a \\ F_b \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{aa} & K_{ab} \\ K_{ba} & K_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_a \\ U_b \end{Bmatrix} \quad (7)$$

と置いた時、 $F_a = 0$ となり、結局、

$$F_b = [K_{bb} - K_{ba} K_{aa}^{-1} K_{ab}] U_b \quad (8)$$

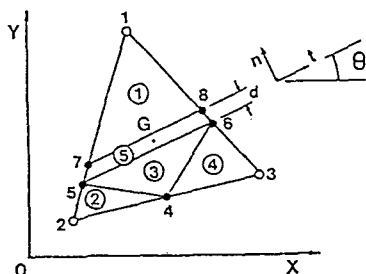


図-4 塑性クラック要素

を得る。この式が、外節点からなる主三角形に対する要素剛性マトリックスである。

4. 解析の概要

破壊基準はMohr-Coulombを用い、模型材料の引張強度を考慮できるように、図-5に示すような σ_n が引張の時には ϕ_1 、圧縮の時には ϕ_2 の、bi-linear型を用いた。本解析では、 $\phi_1 = 80^\circ$ とし、 ϕ_1 によって破壊した場合には引張破壊として、前述の式(3)に従うものとした。また、クラックの厚みは0.1 cmとした。

それぞれのケースの要素分割図を図-6, 7に示す。ただし、境界の影響を考慮し、幅を30cmほど長くとり、左上部のX方向の拘束をはずした。これは、この境界での模型が右方向には自由に動くが左方向には動かないことに対応したものである。荷重は、空気圧0.3 kgf/cm² を載荷したときに発生する摩擦力を100%の自重として、これを分割して載荷した。

クラックの発生方向はせん断破壊の場合には、式(2)に示すように2方向存在する。本解析では、実験結果に近い方向を選択するようにした。

5. 解析結果

図-8, 9に各ケースのクラックの進展状況を示す。図中の太線は引っ張りによって生じたクラックを示し、細線はせん断によって生じたクラックを示す。

1.2Dのケースでは、始めは、トンネル天端に引っ張りによるクラックが生じ、次にピラー部に引っ張り破壊が生じる。その後、トンネル天端左上に引張

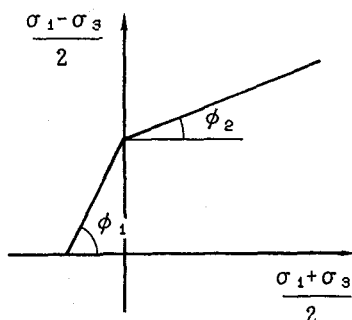


図-5 破壊基準

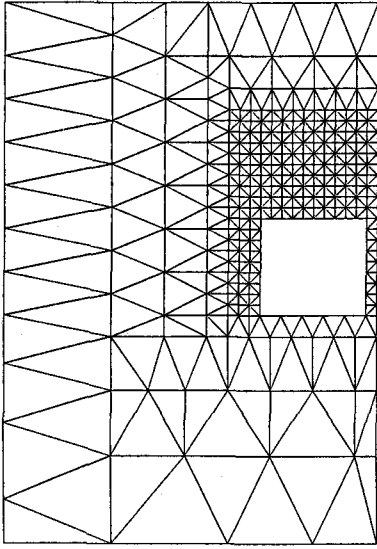


図-6 要素分割図(1.2D)

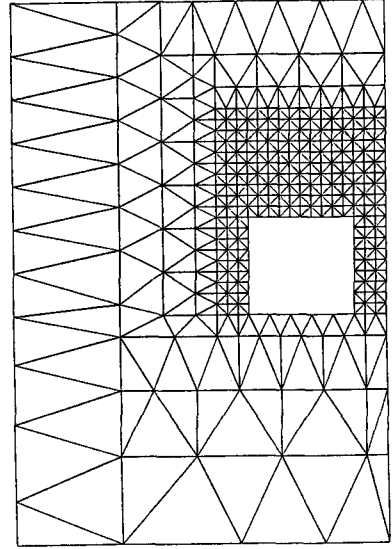


図-7 要素分割図(1.6D)

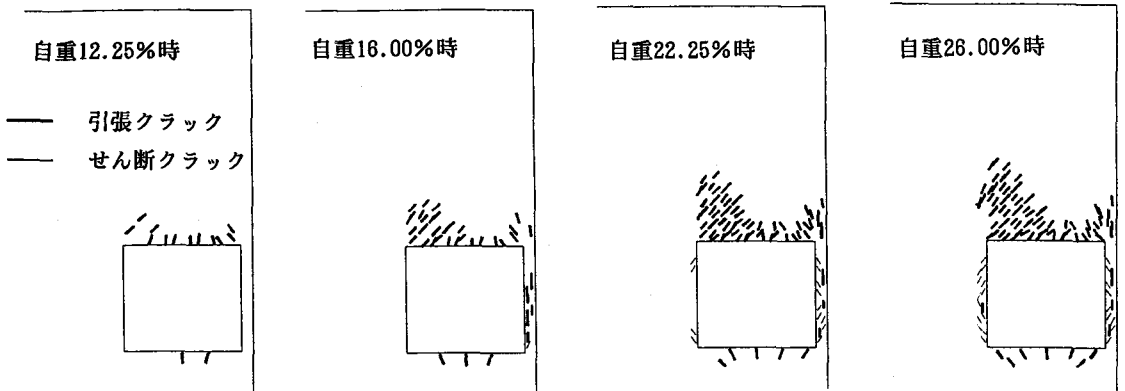


図-8 解析におけるクラックの進展状況(1.2D)

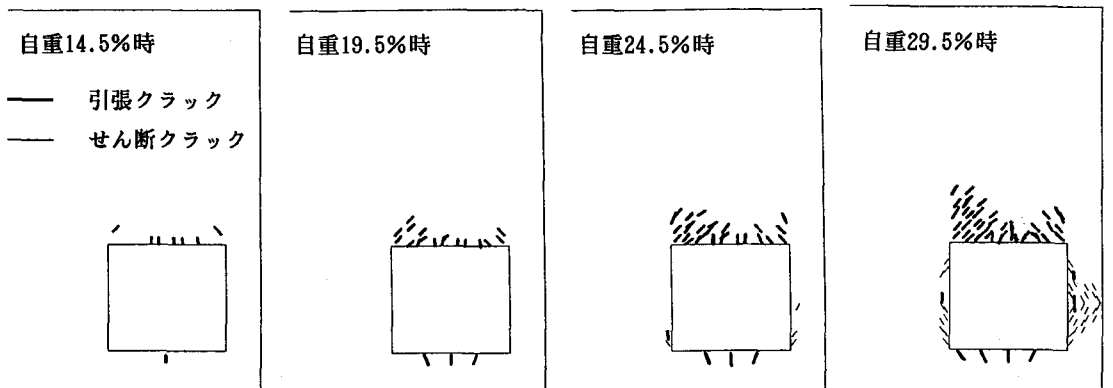


図-9 解析におけるクラックの進展状況(1.6D)

クラックが増加し、ピラー部にせん断クラックが発生する。

1.6Dのケースでは、始め、トンネル上部にほぼ対称に引張クラックが生じ、その後、トンネル上部の引張クラックが増加し、ピラー部にせん断クラックが発生する。

両ケースともクラックは、トンネル天端及びピラー部に群のようになって生じ、一本の不連続面が進展し、天端が崩落する、あるいは、ピラー部に不連続面が生じ、破壊するというような実験結果と同じ状況を示さなかった。

しかし、トンネル天端のクラックは、1.2Dの場合ではトンネル左上部から中央に向かって進展し、2つのトンネルを含むグラウンドアーチが生じる事が予想できる。また、1.6Dの場合では、クラックはピラー上部には生じず、トンネル上部にほぼ左右対称に

発生した。これにより独立したグラウンドアーチが生じる事が予想できる。

6. おわりに

塑性クラック要素を用いた弾塑性解析により、底面摩擦模型実験のシミュレーションを行なった。この結果、先に報告した通常の弾塑性解析と比較すると、良い結果を得ることができた。しかし、実験と同様な不連続面の進展を表現するためには、なお検討の余地があることがわかった。また、今回、行なった解析では、天端はすべて引張側の破壊基準で破壊した。したがって、この実験のシミュレートは引張域での破壊基準と引張破壊後のアルゴリズムに留意する必要があると思われる。

参考文献

- 1) 後藤、壺内、西岡；近接した双設トンネルの安定性の研究，東急建設(株)技術研究所報，1986年，No12
- 2) 後藤、壺内、西岡；土被りの薄い双設トンネルの模型実験，第18回岩盤力学シンポジウム，1986年2月
- 3) 山辺、他3名；誘導異方性を有する地盤の弾塑性解析，土木学会論文集 第388号，1987年12月
- 4) 川本、尾原、市川；底面摩擦実験装置および模型材料の力学特性，日本鉱業会誌 99 1139 1983年
- 5) Pietruzzak, S. and Mroz, Z. : Finite Element Analysis of Deformation of Strain Softening Material, Int. J. num. Meth. Engng, Vol. 17, 1981