

(8) 土被りの浅いトンネルの 3次元RBSM解析について

フジタ工業(株)技術研究所 正会員 ○ 波田光敬
同 上 正会員 香川和夫

Three Dimensional Numerical Analysis of Shallow Tunnel using RBSM

Mitsutaka Hada & Kazuo Kagawa
Technical Research Division, FUJITA Corp.

Abstract

Two dimensional analysis was carried out to many kinds of slope using the Rigid Body and Spring Model (hereafter called RBSM) proposed by prof. Kawai¹⁾. It is clear that RBSM is an effective analytical technique for simulation of failure^{2), 3)}. This paper reports on the application of three dimensional RBSM analysis to a shallow tunnel and some results are presented.

1. はじめに

土被りの浅いトンネルでは、鉛直土圧が大きい三次元応力状態であり、硬岩に比べ強い非線形性を示す沖積層などで周辺地山が構成され、先受工など種々の補助工の効果が三次元的であることが多いことから、トンネル掘削に伴う切羽崩壊メカニズムを把握するためには、三次元非線形解析が必要であると考えられる。筆者らは、これまでに斜面安定などの二次元問題にRBSMを適用して、このモデルが、すべりなどのような土構造物の不連続現象の解明に有効なものであることがわかった。RBSMは、1要素単位ではFEMより自由度数が少ないこと、ロックボルトなどの補助工に対応した要素が容易に組み込めることなどの特長を持っている。そこで、このRBSMを用いた解析手法により、土被りの浅いトンネルの三次元弾塑性テンションクラック解析を行なった。本文は、解析に用いた計算手法とその結果について報告したものである。

2. 解析手法

RBSMは、要素表面上に分布するバネにより、力の伝達が行なわれるものとした解析モデルであり、クラックなどの節点間に不連続が生じても支障なく解析できる。解析手法については、文献⁴⁾に述べられているが、ここでは、土被りの浅い砂層中のトンネルを解析対象とすることから、応力～ひずみ関係と弾塑性テンションクラックの計算スキームについて述べる。

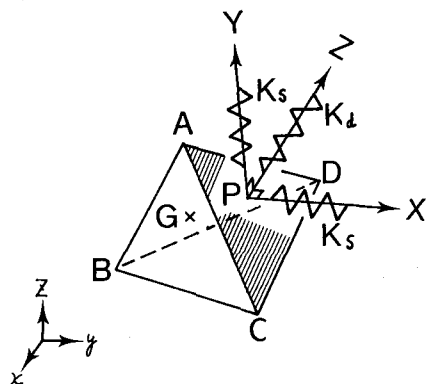


図-1 RBSM四面体要素

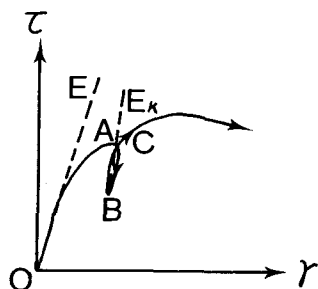


図-2 応力～ひずみのモデル化

2-1 応力～ひずみ関係

RBSMの土要素では、図-1に示す四面体要素ABCDの面ACD上の任意の点Pにおいて、法線方向に垂直バネ K_a 、接線方向にせん断バネ K_s が分布しているとし、それぞれのバネにより伝達される応力(σ_{zz} τ_{xz} τ_{yz})を対応させる。そして、二要素間の相対変位により定義されるひずみ(ϵ_{zz} γ_{xz} γ_{yz})とは、弾性時には、

$$\begin{bmatrix} \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \\ \sigma_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_s & 0 & 0 \\ 0 & K_s & 0 \\ 0 & 0 & K_a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \\ \epsilon_{zz} \end{bmatrix}$$

と定義する。ここに、

$$K_a = (1 - \nu) E / \{ (1 + \nu) (1 - 2\nu) \}$$

$$K_s = E / (1 + \nu)$$

である⁵⁾。

なお、トンネル掘削において、掘削解放力によりトンネル周辺では図-2のA→Bのような除荷状態(解析ではせん断応力 $\tau = \sqrt{\tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2}$ および垂直応力 σ_{zz} が減少する場合とした)が生じた場合には、上式において土のヤング率 E を E_k とした。

2-2 弾塑性テンションクラック

竹内らにより提案されたRBSMを用いたテンションクラック解法⁶⁾とモール・クーロンの破壊規準を塑性ポテンシャルとした関連流れ則による弾塑性解法を組み合わせ、図-3のフローにより計算を行なった。即ち、垂直応力 σ_{zz} が許容の引張応力を越えたスプリングは、その位置に開口クラックが生じたものとして、バネ剛性を以後の反復計算ではゼロとする。なお、収束計算は山田の方法⁷⁾によるRmin法で行なっており、掘削による解放率がRminに相当する。

3. 解析条件

解析したトンネルは、図-4に示す直径 $D \approx 8$ m、土被り $H \approx D$ のNATM-1型で、2 m毎の全断面掘削とした。拘束条件として、側端は鉛直方向にスライダ、下端は全方向固定としている。地山は均一砂層相当として、 $\gamma = 1.8 \text{ t} \cdot \text{f} / \text{m}^3$ 、 $\phi = 35^\circ$ 、 $E = 2000 \text{ t} \cdot \text{f} / \text{m}^2$ 、 $E_k = 10 \cdot E$ 、 $c = 0.1, 5, (50) \text{ t} \cdot \text{f} / \text{m}^2$ の3種類とした。なお、初期応力は $K_0 = 1 - \sin \phi = 0.426$ として求めた。

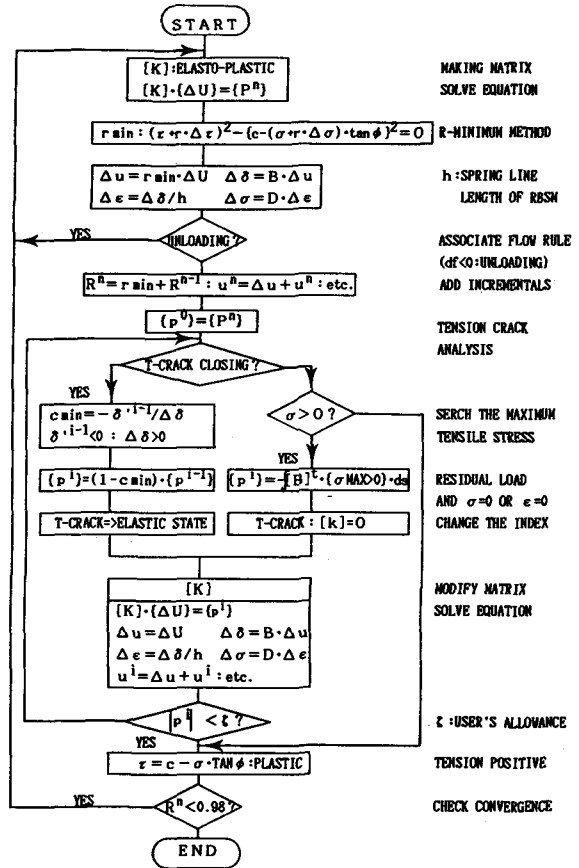


図-3 解析フロー

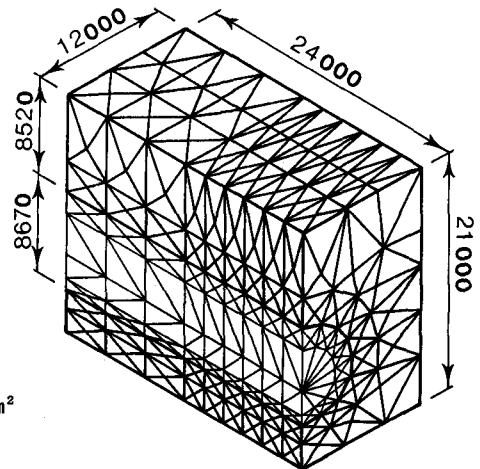


図-4 解析対象トンネル

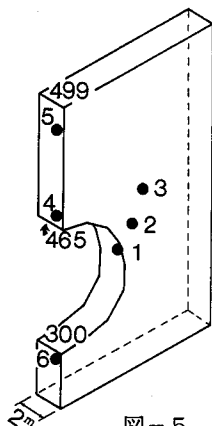


図-5. 1

4. 解析結果

4-1 平面ひずみの場合

図-4の内坑口より2mまでを解析範囲として、 $c=0.1$ の条件で $R_{min}=0.66$ までの計算結果を図-5～図-8に示す。

図-5. 2は応力経路を、図-5. 3は応力～ひずみ関係を、図-5. 1の●は、前面図中の番号に対応した位置をそれぞれ示す。図-5. 4は、図-5. 1中の番号に対応した要素重心の鉛直変位を表わす。これらの図より、単調載荷状態(番号1～3)では、定性的に土のストレスダイラテンシーが表現され、除荷状態(番号4、6)では、 $E \rightarrow E_k$ の変化が得られ、特に、インバート部に位置する要素番号300の変位に反映されている。

図-6～8は、すべり面の進行状況を示し、図中(a)は坑口から、(b)は坑口の斜め下方から、それぞれ眺めたもので、各(b)図の斜線部がすべり面を表わす。

4-2 切羽進行によるすべり面

地山の粘着力 $c=5 \text{ t} \cdot \text{f}/\text{m}^2$ として、坑口より4mまで切羽が進行した場合のすべり面を図-9～11に示す。図-9は坑口から、図-10は切羽前下方から坑口を、図-11は側面からトンネル縦断方向に、それぞれ眺めたものである。これらの図より、切羽ではクラウン部に、底のようなすべりが多少現われるが、切羽面の自立が保たれている。また、トンネル側面でのすべり面も、約1m程度の奥行であり、トンネルの崩

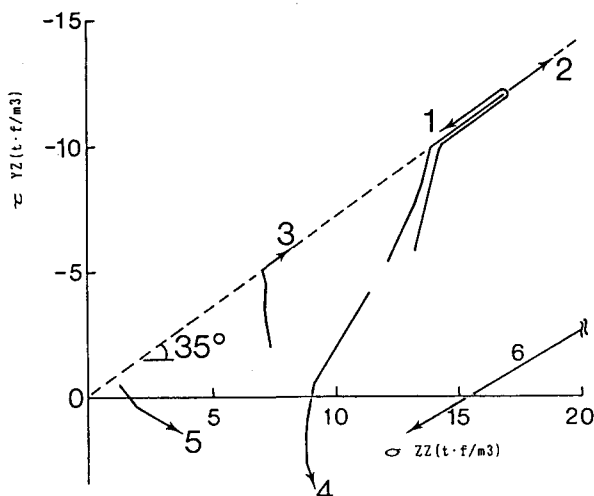


図-5. 2 応力経路

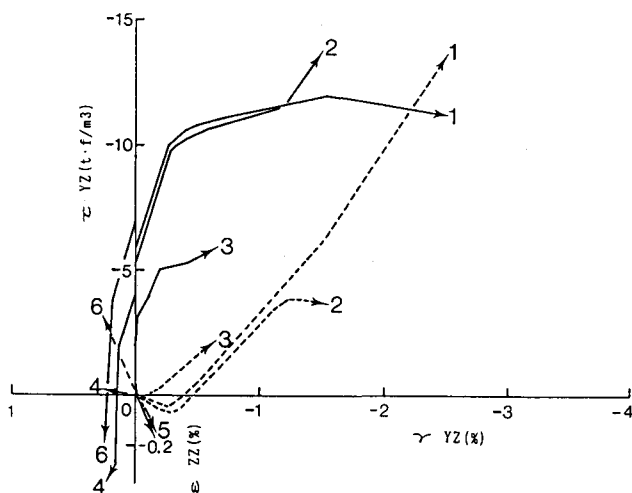


図-5. 3 応力～ひずみ

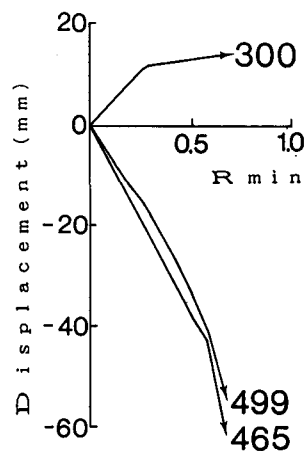
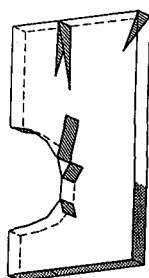


図-5. 4 荷重沈下曲線

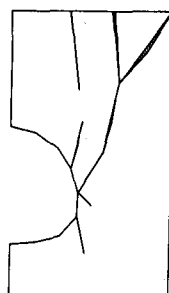
壊には至らない状況となっている。図-12は、切羽が2m進行した場合のインバート部(D)、クラウン(B)、地表(A)の各鉛直変位および切羽面のほぼ中央1/3の位置(C)の押し出し量を表わし、図-13は同じく4m切羽が進行した場合を表わす。インバート部では応力経路が除荷状態になることから、この位置の変位が、クラウン部より小さいことがわかる。図-14は地山の粘着力 $c = 50 \text{ t} \cdot \text{f}/\text{m}^2$ とした場合で、切羽の進行に伴うクラウンおよび地表の沈下曲線を示す。なお、粘着力が大きいことから、地山中にすべりの生じない弾性状態であった。



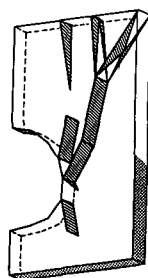
(a)



(b)



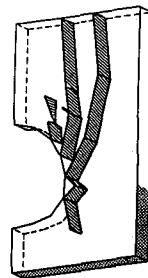
(a)



(b)



(a)



(b)

図-6 $R_{\min}=0.366$

図-7 $R_{\min}=0.500$

図-8 $R_{\min}=0.657$

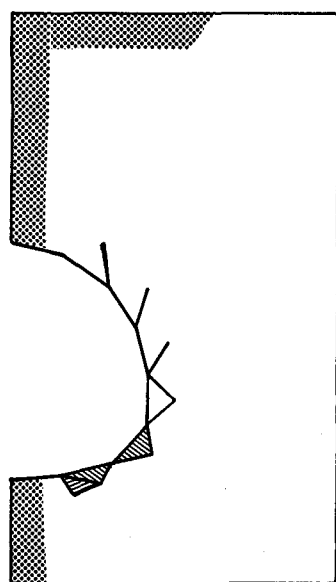


図-9

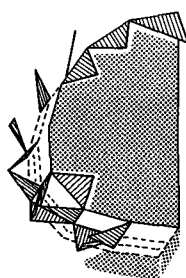


図-10

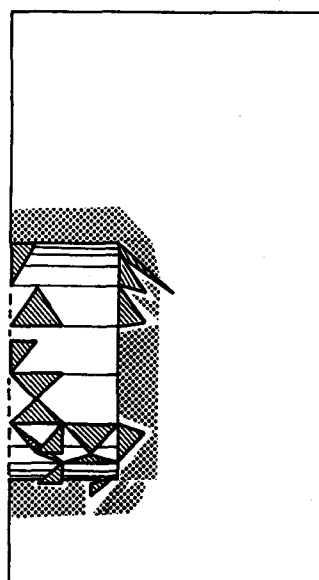


図-11

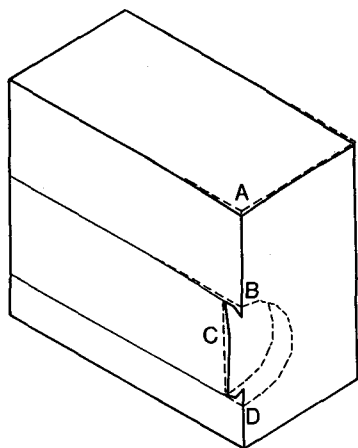


図-12 変形モード (切羽2m)

位置	沈下量 (mm)	押し出し量 (mm)
A	9.1	
B	20.1	
C	4.0	17.7
D	-27.7	

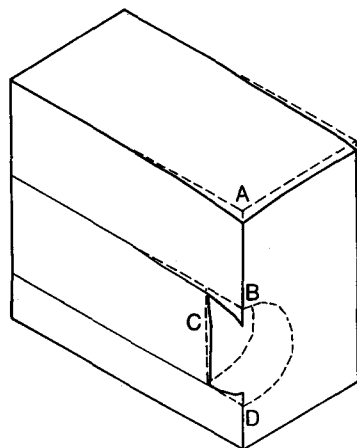


図-13 変形モード (切羽4m)

位置	沈下量 (mm)	押し出し量 (mm)
A	21.5	
B	33.9	
C	8.3	17.9
D	-29.6	

5. おわりに

RBSMによる3次元弾塑性解析を行なった結果、この手法が、土被りの浅いトンネルに適用でき得ることがわかった。今後、各種の補助工を含めた解析を行ない、実測データとの比較検討を行なっていきたい。

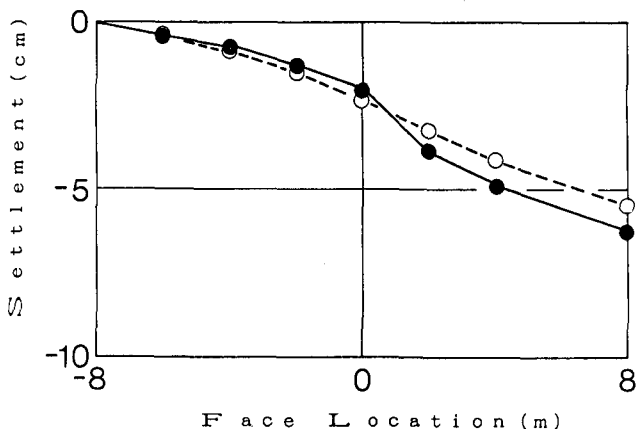


図-14 切羽進行に伴うクラウン (●) および地表 (○) 沈下曲線: $c = 50 \text{ t} \cdot \text{f} / \text{m}^2$

引用および参考文献

- 1) 川井, 「A New Discrete Model for Analysis of Solid Mechanics Problems」 1977, 生産研究 29-4
- 2) 竹内・波田・川井, 「新離散化モデルによる地盤基礎の極限解析 (その7) - 斜面の支持力 (2)」 1981, 生産研究 33-7
- 3) Hada, Taguchi & Kagawa, 「Application of RBSM analysis to earth reinforcement method」 1988, Proc. of international geotechnical symposium
- 4) 川端・近藤, 「新しい離散化手法による3次元連続体の最終強度解析」 1977, 日本鋼構造協会第11回大会7トリックス解析法研究発表論文集
- 5) 川井編, 「離散化極限解析法に関する最近の話題」 1986, 生研セミナーテキスト コス116
- 6) 竹内・川井, 「新離散化モデルによる地盤基礎の極限解析 (その1) - 引張に抵抗しない材料の解析」 1980, 生産研究 32-6
- 7) 山田, 「非線形問題解析法の現状と展望」 1970, 生産研究 22-1