

III-271

分岐を有する岩盤内トンネルの三次元掘削解析

埼玉大学

正会員

山辺 正・小田 匡寛

学生会員

前川 恵輔

清水建設

正会員

石塚 与志雄・熊坂 博夫・多田 浩幸

1. はじめに

岩盤内に大規模な地下空洞を掘削する場合には、地下空洞本体に種々の形状を有するトンネルが連結し、それらが互いに斜交するなど複雑な幾何形状を示すことが多い。また、初期地圧や地質構造など多くの計測結果と共に、数値解析を通じて事前の精度良い予測が的確に行われることが必要となる。本研究では、(1) 岩盤内に存在する不連続面群から形成される幾何学形状をクラックテンソルで表現し、(2) 原位置で計測される初期地圧・岩盤の力学特性を用いて、(3) 地下空洞の幾何形状として分岐を有する場合に注目し、これらの影響を一般的に表現することを目的としている。具体的な解析においては、不連続面による力学的異方性の効果をクラックテンソルの概念を適用して等価な異方線形弾性体で表現した構成式を用いて三次元掘削変形解析を実施した。

2. 原位置岩盤におけるクラックテンソルの決定と等価な弾性体の定義

本研究においては原位置における亀裂調査結果から得られた(1)式のクラックテンソルで亀裂群の幾何学性を代表させる。座標軸は図1に示すように断面の大きなトンネル(主トンネル)の長軸方向を x_2 、鉛直上方を x_3 とした右手系である。

$$F_{ij} = \begin{bmatrix} 14.16 & 4.03 & 6.03 \\ & 2.67 & 1.75 \\ \text{sym.} & & 2.94 \end{bmatrix} \quad (1)$$

岩盤で計測されるひずみ ε_{ij} が岩石実質部分に生じるひずみ $\varepsilon_{ij}^{(m)}$ と亀裂部分に生じるひずみ $\varepsilon_{ij}^{(c)}$ の和であるとすれば $\varepsilon_{ij}^{(c)}$ は次式で表される¹⁾。

$$\varepsilon_{ij}^{(c)} = \left[\left(\frac{1}{g} - \frac{1}{h} \right) F_{ijkl} + \frac{1}{4g} (F_{ik}\delta_{jl} + F_{il}\delta_{jk} + F_{jk}\delta_{il} + F_{jl}\delta_{ik}) \right] \bar{\sigma}_{kl} \quad (2)$$

ここで F_{ij} と F_{ijkl} は、各々2階と4階のクラックテンソルであり次式によって表現される。

$$F_{ij} = \frac{\pi\rho}{4} \int_0^r \int_\Omega r^3 n_i n_j E(n, r) d\Omega dr \quad (3)$$

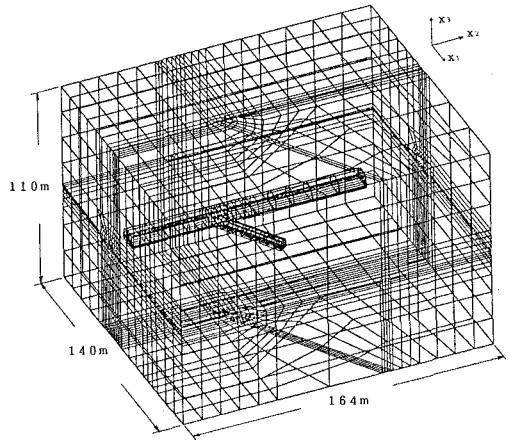


図1: 要素分割(透視図)

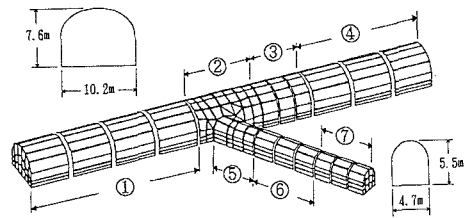


図2: トンネル分岐部分(拡大図)

$$F_{ijkl} = \frac{\pi\rho}{4} \int_0^r \int_\Omega r^3 n_i n_j n_k n_l E(n, r) d\Omega dr \quad (4)$$

また、実質部分の弾性を表現する上では等方弾性体とすれば十分であり次式を得る。

$$\varepsilon_{ij}^{(m)} = \frac{1}{E} [(1 + \nu)\delta_{ik}\delta_{jl} - \nu\delta_{ij}\delta_{kl}] \bar{\sigma}_{kl} \quad (5)$$

解析に用いる構成式は(2)～(5)式であり、これは亀裂性岩盤をそれと等価な直交異方性体に置換したことを意味している。これらの構成式を適用してクラックテンソルの意味での亀裂の主軸方向と空洞位置との相互関係を考慮した解析から、不連続面の規模、初期地圧が相互に影響を及ぼしあっていることを数値実験により別途確認している²⁾。

3. 解析モデルと入力パラメータ

解析領域は図1に透視図として示す通り内部に分岐部分を含む直方体であり、節点数8084要素数7107とした。初期応力は主トンネル天端での土被り圧相当として 49kgf/cm^2 を等方応力状態で加えた。図2は、掘削過程を①から⑦の順序に分割して計算したことを示している。ただし、本研究では分岐部分掘削以前（①～③）と掘削後（①～⑦）について、掘削の進行に伴う要素安全率および変形量の変化を論じた。計算に用いた入力パラメータのうちクラックの幾何学性は(1)式で与えられ、力学性に関するものは表1に示した。クラックの剛性が応力に依存しないとすれば、(2)式において $\bar{g} = \bar{h}$ と置くことができる。亀裂を含む供試体に関する実験結果からクラックの剛性を決定し、解析に用いた値を表1に示した。

表1: 力学パラメータ

弾性係数	$1.99 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$
ポアソン比	0.21
クラック剛性	$1.33 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$
単位体積重量	2.72 gf/cm^3
粘着力	192 kgf/cm^2
内部摩擦角	54.3 degree

4. 解析結果

クラックの効果をクラックテンソルで表現した解析と、クラックを含まない等方弾性解析を実施し比較検討した。比較の対象としたのは変位分布および要素安全率である。各節点に生ずる三次元的な変位のベクトル量を表すコンターマップを図3、4に示す。両図とも分岐部分掘削前、図2の②と③の境界付近の主トンネル断面周辺における変位量分布である。図3の等方解析結果ではほぼ左右対称な形状が得られているが、クラックの存在を考慮した図4の解析結果はコンターが著しく歪んでいることが判る。

各積分点毎に得られる応力成分を要素単位で平均し、Drucker-Pragerの降伏基準を用いて要素安全率を計算した。図5は図4と同一の断面において分岐部分も含めた全ての掘削を終了した段階での要素安全率分布を示している。安全率の低い領域が、斜め下方方向に伸びていると同時に分岐の方向に引きずられている様子が明らかである。

5. おわりに

クラックの存在を考慮することにより安全率や変位の分布状況が変化することが判明した。特に、主たるクラックに立てた法線方向の変位量が等方解析に比較して著しく増大し、これに伴い要素安全率も影響を受けることが明らかになった。

6. 参考文献

- 1) Oda, M. (1986): An equivalent continuum model **, Water Resources Research, 22(13), 1845-1856.
- 2) 多田浩幸, 他(1990): 実岩盤の計測結果からみた **, 第22回岩盤力学シンポジウム, 31-35.

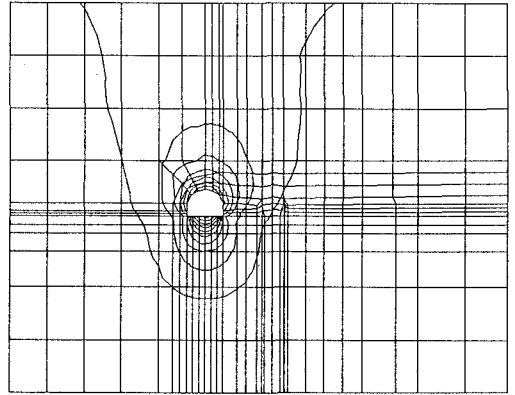


図3: 等方解析の変位分布
(等高線間隔 0.2mm)

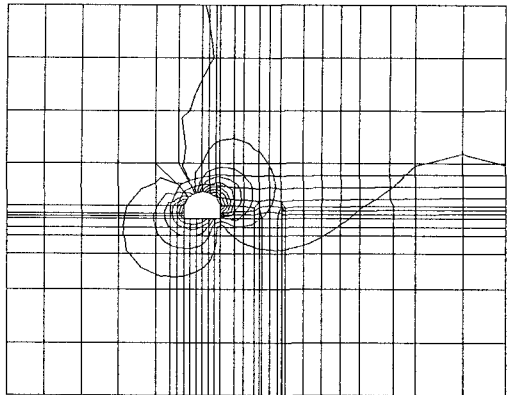


図4: クラックを考慮した解析の変位分布
(等高線間隔 2.9mm)

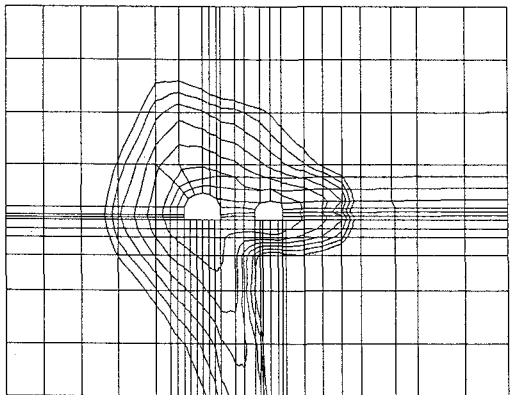


図5: クラックを考慮した解析の要素安全率分布
(要素安全率の最小値 2.09)