

地山の弾塑性履歴を考慮したトンネル掘削過程の定常解析

新潟大学自然科学研究科 学生会員 滝沢 壮太
 新潟大学工学部 正会員 阿部 和久
 株式会社福田組 正会員 若月 和人
 新潟大学工学部 正会員 紅露 一寛

1. はじめに

トンネル工事では事前の地質調査に基づいて地山の特性を把握し、適切な支保構造や工法を検討することが重要である。しかしながら、施工前および施工時に得られる地質調査データは必ずしも十分ではないため、掘削時において坑内変位等の計測データを用いた逆解析により地山物性値を推定し以降の施工に活用することも行われている。この場合の解析は弾塑性解析が望ましいと考えられ、過去にも多く行われている。しかし塑性問題になると、弾塑性解が定常解に至るまで逐次的に要素メッシュを切り替えながら解析を進めていく必要があり^{1),2)}、手間がかかるという問題点がある。そこで本研究では、要素メッシュの切り替えが不要となる定常状態の弾塑性解の導出手法を構成し、塑性に関するパラメータの推定の可能性について基礎的検討を行う。

2. 解析対象とする問題

地山内にトンネルがあり、時間とともに一定の速度で水平方向に掘進する問題を考える。地山を弾塑性材料とするならば、応力は弾塑性履歴を受ける。十分遠方からトンネルが掘進してきたと仮定すると、その段階でトンネル周辺の応力分布は定常状態となっており、次式が成り立つ。

$$\sigma(x, t) = \sigma(x + v\Delta t, t + \Delta t) \quad (1)$$

ここで、 $\sigma(x, t)$ は応力、 x は掘進方向座標、 t は時刻、 v は掘進速度である。

3. 解析手法

- (i) 図1のように初期応力 σ_0 の地山にトンネルを設定し、等価節点力 F^0 をトンネル壁面に作用させる。
- (ii) トンネル壁面にかかる等価節点力が F^0/N だけ解放されるように弾塑性解析をする。 N は等価節点力を段階的に解放するため設定されたステップ数である。
- (iii) 図2のようにトンネル先端に視点を固定し、応力や変位などの力学状態を1メッシュ分移動させ、相対的に掘進を表現する。
- (iv) (iii)の操作により、トンネル壁面や切羽面上の内部節点力が元の定められた節点力ではなくなる。そのためこの

不つり合い力の差がゼロになるようにNewton-Raphson法による修正を行う。

- (v) (ii)~(iv)のプロセスを N 回繰り返す、トンネル自由面に作用する応力を徐々に解放させていく。 N ステップで定常状態に至らない場合はその後も定常状態に達するまで(iii), (iv)の操作を繰り返す。

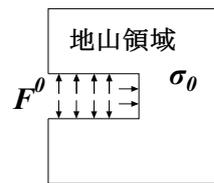


図1 初期条件

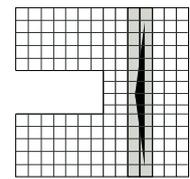


図2 掘進の概略図

4. 解析条件

直径10mのトンネル周辺を図3の領域サイズで図4のように離散化する。なお議論を簡素化するため、トンネルは円筒近似し、支保部材を考慮しない素掘り状態で解析をする。以下では質量密度 2000kg/m^3 、ヤング率 $2 \times 10^8\text{Pa}$ 、ポアソン比0.3、 N は20ステップの場合を想定する。弾塑性モデルは修正Mohr-Coulombの破壊基準で与えた。図よりA点(トンネル天端)では x, z 方向変位、B点(トンネル側面)では x, y, z 方向変位を評価した。基準点を切羽面上の点とし、そこから1m間隔でそれぞれ10点ずつ測定点を設定した。また、トンネル長手方向に対する要素分割数を40とした。

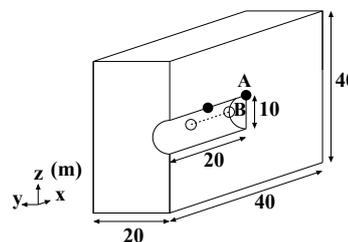


図3 領域サイズ

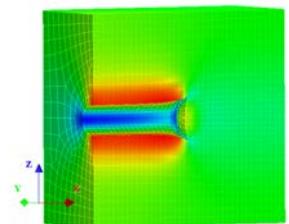


図4 メッシュ

5. 解析結果

(1) 解析手法による収束性の検討

図5は、弾塑性解析の反復回数とそれに伴う変位差ノルムの推移を示したものである。変位差ノルムは変位解の収束を示す無次元の指標であり、1メッシュ掘進前後の変位差のノルムを現在の変位のノルムで割ることで与える。図より反復回数に伴い変位差ノルムが減少し、0.002付近に至る

Key Words: トンネル, 弾塑性, 定常解析

連絡先: 〒950-2181 新潟市西区五十嵐二の町 8050 番地 TEL: 025(262)7028, FAX: 025(262)6775

と減少が小さくなり、概ね一定値に収束する様子が確認できる。これは地山領域内の変位解が1メッシュ掘進する前後において概ね同じであることを意味している。以降の解析では、変位差ノルムが一定となる時の解を定常解として用いる。

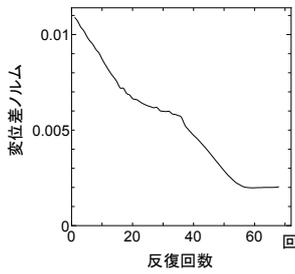


図5 変位差ノルムの収束過程

(2) 粘着力 c に関する検討

図6は $c = 1 \times 10^5 \text{ Pa}$ を弾塑性解と設定して、弾性解との相対変位の差を測定点毎に示したものである。なお、相対変位は切羽面上の点を基準として、それぞれの差をとったものである。図6より、B点y方向(By)は他の変位方向に比べ、弾性解と弾塑性解での相対変位の差が大きいことがわかる。したがって、B点y方向には地山の塑性変形の影響が顕著に表れており、粘着力 c の推定に最も適しているものと思われる。

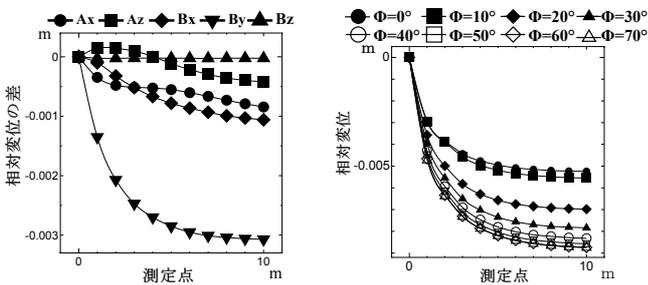


図6 弾塑性変形における粘着力 図7 B点y方向変位と内部摩擦角 ϕ の関係

(3) 内部摩擦角 ϕ に関する検討

地山を構成する岩の内部摩擦角 ϕ は $0^\circ \sim 70^\circ$ まで幅広い値をとる³⁾。図7は ϕ を 10° 毎に設定して求めた相対変位をまとめたものである。塑性領域が広がるとトンネル内空変位も大きくなる。よって ϕ の増加につれて相対変位量が大きくなり、弾性変形から弾塑性変形へと推移している様子が窺える。図7はB点y方向の相対変位に限定して評価しているが、他の方向変位でも同じ傾向を示していた。図8は修正 Mohr-Coulomb の破壊基準における垂直応力とせん断力との関係を模式的に示したものである。トンネル壁面は応力解放の影響で、トンネル自由面に対して垂直に作用する力がゼロとなり、面内方向は引張り応力が作用する。そのため地山の降伏は図8の斜線部の領域で生じ、 ϕ の増加により降伏曲面の傾きが徐々に大きくなると、弾性領域が縮小する。以上より、 ϕ の増加によって、弾性的な変形か

ら弾塑性的なものへと推移したものと推測される。図9では $\phi = 40^\circ$ の場合の変位と弾性解における相対変位の差を測定点毎に示したものである。 c の検討時と同様に、B点y方向が ϕ の推定に適していることがわかる。

なお、図7はB点y方向変位に関する評価であるが、 $\phi = 0^\circ \sim 40^\circ$ までは相対変位の変化が比較的大きく、内部摩擦角の推定が可能と思われる。一方 40° 以上は ϕ による相対変位の変化が小さく、識別が困難であることがわかる。ただし、弾塑性解析において特に重要となるのは変形の大きくなる軟弱な地山の評価であり、そのような地山を構成する岩盤の内部摩擦角の多くは $\phi = 0^\circ \sim 40^\circ$ の間に位置している³⁾。このことから、B点y方向の相対変位量から $\phi = 0^\circ \sim 40^\circ$ の値は識別可能であり、それ以上の内部摩擦角を持つ地山については、その値が 40° 以上であることが判定できるため、実用上問題はないものと考えられる。

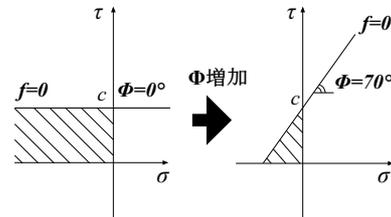


図8 内部摩擦角 ϕ の増加による弾性領域の変化

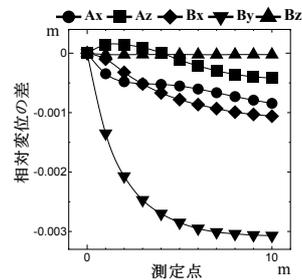


図9 弾塑性変形における内部摩擦角 ϕ の影響

6. まとめ

トンネル側面における面外水平方向の変位を評価することが、弾塑性パラメータである c, ϕ の値を推定する際に最も適切であることがわかった。また内部摩擦角 ϕ はすべての値を判定することはできないが、塑性変形が顕著となるような地山の内部摩擦角がとり得る範囲を考慮すると、実用上問題ないものと考えられる。

参考文献

- 1) 大津宏康, 大西有三, 瀧 治雄, 亀村勝美: 有効応力の概念に基づく掘削解析の問題点に関する一考察, 土木学会論文集, No.481, pp.77-85, 1993.12.
- 2) 小森 博, 堀地紀行, 熊耳哲雄, 大津宏康, 瀧 治雄: NATMにおける支保構造の三次元効果とその評価について, 土木学会論文集, No.529, pp.57-68, 1995.12.
- 3) 竹林 亜夫, 三上 元弘, 國村 省吾, 奥井 裕三, 呉 旭: 地山の内部摩擦角に着目したトンネルの岩種分類の提案, 土木学会第58回年次学術講演会, pp.109-110, 2003.