

NATM トンネル周辺地盤の変形挙動評価に関する一案

EVALUATION OF DEFORMATION MECHANISM OF GROUND AROUND A NATM TUNNEL

芥川真一¹⁾・村上浩次²⁾・李在浩³⁾・堂場直樹⁴⁾

Shinichi AKUTAGAWA, Koji MURAKAMI, Jaeho LEE and Naoki DOBA

This paper tries to find how the difference of strain softening characteristics influences the deformation mechanism of ground around shallow non-supported tunnel by numerical analysis. The results show that it is possible to evaluate the onset and progress of deformation mode to collapse by a common criterion. This implies even if the details of strain softening characteristics are not known completely, the outline of deformation mechanism can be defined with ease, which provides useful information for field engineers.

Key Words : NATM tunnel, strain softening

1. はじめに

土被りの浅い都市 NATM トンネル¹⁾⁻¹⁰⁾においては、変形を抑止するために様々な支保構造を導入してトンネルを建設するが、それらが変位を抑制するためにどのようなメカニズムでその効果を発揮しているかを、具体的かつ数量的に評価することは容易ではない。特に、支保がなければ完全に切羽が崩壊するような地盤においてはトンネル周辺地盤の変形挙動特性そのものを同定することも支保構造との相互作用などが複雑であることから簡単にはいかないのが恒である。

そこで今回、無支保では自立できないような物性を有する地盤内にトンネルを建設する際に、その挙動を大きく支配することとなるひずみ軟化特性の違いによって周辺地盤に起こる変形メカニズム、およびその程度がどのようになるかについて、数値解析を用いた検討により明らかにすることを試みた。今回用いた解析手法は、異方性パラメーター m を低下させるモデルと、地山強度定数を低下させるモデルを組み合わせたひずみ軟化解析²⁾であり、様々な軟化特性を想定し、円形トンネルモデルの掘削解析を行なった。

その結果、安全率の評価も同時に行ったところ、異なる軟化特性を有する地盤においても、崩壊に向かって進展する特殊な変形モードの出現や進展の度合いは共通の評価基準によって分析することができる可能性が見られたので、その詳細を報告する。また、これは、現場データ分析の際に、ひずみ軟化特性などの詳細が完全に数量化できていなくても変形モードの概略が判定できることを意味することにつながるため、現場においても有益な情報を与えるものであると考えられる。

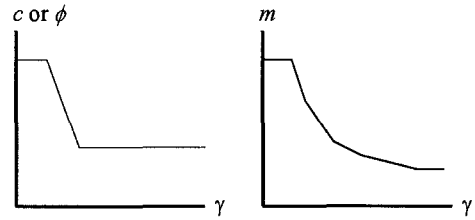
-
- 1) 正会員 神戸大学工学部建設学科 (土木系教室)
 - 2) 正会員 (株) 鹿島建設
 - 3) 学生会員 修士 (工学) 神戸大学大学院 自然科学研究科
 - 4) 学生会員 修士 (工学) 神戸大学大学院 自然科学研究科

2. ひずみ軟化解析の概要

本研究で用いたひずみ軟化解析の異方性パラメーターは、 D マトリックス（応力・ひずみ関係）におけるせん断剛性を、最大せん断ひずみ（ γ ）レベルに基づいて低下させることで、材料の異方性をモデル化しようとするものである。 m とせん断ひずみ γ の関係は、式(1)のように近似できることが提案¹⁾されており、本研究でもこれを用いた。

$$m = m_e - (m_e - m_r) [1 - \text{Exp}\{-100\alpha(\gamma - \gamma_c)\}] \quad (1)$$

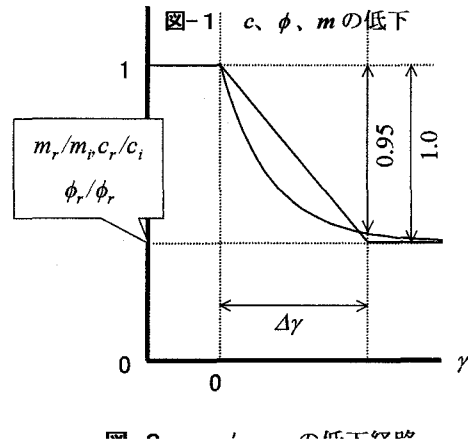
ここで、 m_e は m の初期値、 m_r は残留値、 α は変化の度合いを決めるインデックスである。また、 m は応力状態が破壊基準を超えた時点から下がり始めると定義し、そのときの γ を γ_c とした。これは、次の地山の強度定数についても同じ方法を用いる。（図-1）地山強度の低下については、応力状態が破壊基準を超えた時点からその c 、 ϕ 自体が下がり始め、せん断ひずみの増加に伴って残留値 c_r 、 ϕ_r に至るものとする。（図-1）



3. 円形モデル数値解析の概要

解析に用いた物性値は、ヤング率 150MPa、ポアソン比 0.3、単位体積重量 20.0kN/m³、初期粘着力 20kPa、初期内部摩擦角 35°である。ここで、ひずみ軟化解析には、軟化傾向を決めるインデックスとして、軟化速度と割合がある。今回は、解析パターンを最小限にとどめる異方性パラメーターと地山の強度を同じ割合で低下さ-2)。そして、軟化後の残留率を軟化の割合とし、残留るひずみ増分 $\Delta\gamma$ を軟化速度とした。そこで、軟化速度と $=0.0001$ ($\alpha=300$)、 0.01 ($\alpha=3.00$)、 0.02 ($\alpha=1.50$)、 0.04 ($\alpha=0.75$)の4パターン、軟化の割合として残留率 20%、60%、80%の4パターン、計 16 パターンの解析を行な析は、図-3 に示すメッシュモデルを用い、上半掘削のみ（図-4）、掘削部の応力を 2%ずつ、50Step に分けて解放した。

(a) c 、 ϕ の低下 (b) m の低下



おいて
軟化の
ために、
せた(図
値に至
して $\Delta\gamma$

40%、
った。解
を行い

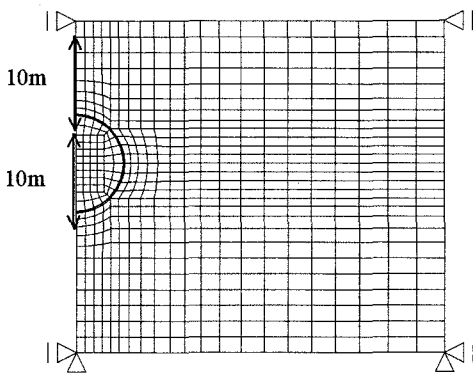


図-3 解析に用いたメッシュ

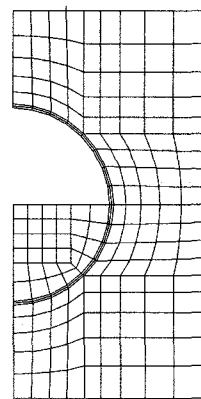


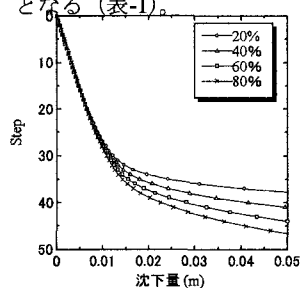
図-4 掘削領域

4. 解析結果

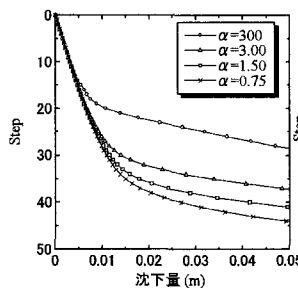
図-5、6、7に解析結果の例として天端沈下、脚部沈下および脚部水平変位曲線の一部を挙げる。これらの図より、軟化速度が等しければ、非線形な挙動が生じるタイミングは等しくなり、軟化の割合が等しければ、非線形な挙動が生じた後のグラフの傾き、つまり開放応力と変位の進み方の関係が等しくなることがわかった。この傾向は他の計測ポイントについても同様に見られた。このことより、軟化速度は非線形な挙動が生じるタイミングに影響し、軟化の割合は非線形な

挙動が生じた後の開放応力と変位の進み方の関係に影響することがわかった。さらに、天端と脚部を比べた場合、非線形な挙動を生じるタイミングは天端より脚部のほうが早いことがわかり、また、他の計測工と比べても脚部が非線形な挙動を生じるタイミングが最も早いことがわかった。

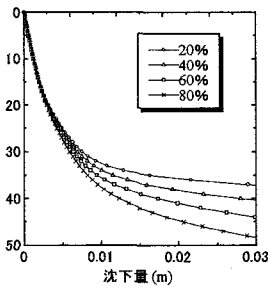
次に、各計測ポイントの変位とトンネルの崩壊への近づき方にどのような関係があるか調べてみた。せん断帯は脚部から地表面に向かって伸びていくことから、今回は、最大せん断ひずみが 0.3%のせん断帯の脚部からの高さに注目し、その高さにより崩壊接近度を定めた(図-8)。脚部から地表面までは15mであるため、1.5mごとに崩壊接近度を分類すると、0mから1.5mのものが崩壊接近度0、1.5mから3mのものが崩壊接近度1となり、地表面到達後のものは崩壊接近度10となる(表-1)。



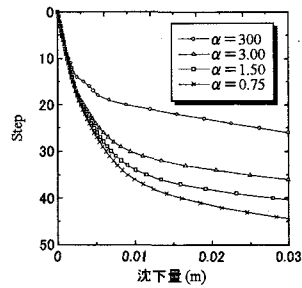
(a) $\alpha = 1.50$



(b) 残留率 40%



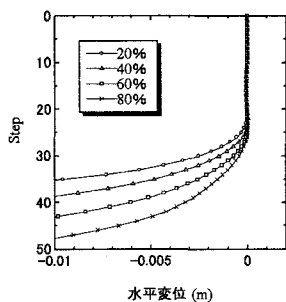
(a) $\alpha = 1.50$



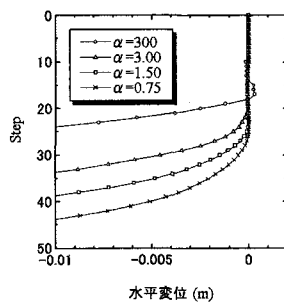
(b) 残留率 40%

図-5 天端沈下曲線

図-6 脚部沈下曲線



(a) $\alpha = 1.50$



(b) 残留率 40%

図-7 脚部水平変位曲線

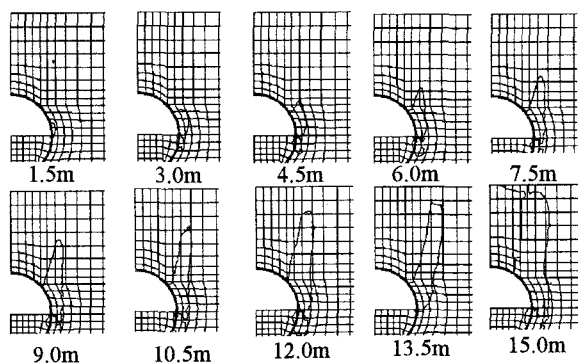


図-8 崩壊接近度境界のひずみ図

表-1 崩壊接近度

高さ (m)	0~1.5	1.5~3	3~4.5	4.5~6	6~7.5	7.5~9
崩壊接近度	0	1	2	3	4	5
高さ (m)	9~10.5	10.5~12	12~13.5	13.5~15	到達後	
崩壊接近度	6	7	8	9	10	

そして、天端沈下、脚部沈下および脚部水平変位と崩壊接近度の関係をグラフにすると(図-9、10、11)、天端沈下、脚部沈下、脚部水平変位ともに各崩壊接近度の存在領域がおおよそ判別できることがわかった。この傾向は、他の計測工

イントについても同様に見られた。つまり、開放応力と変位量の関係とひずみ分布には相関関係があることがわかった。

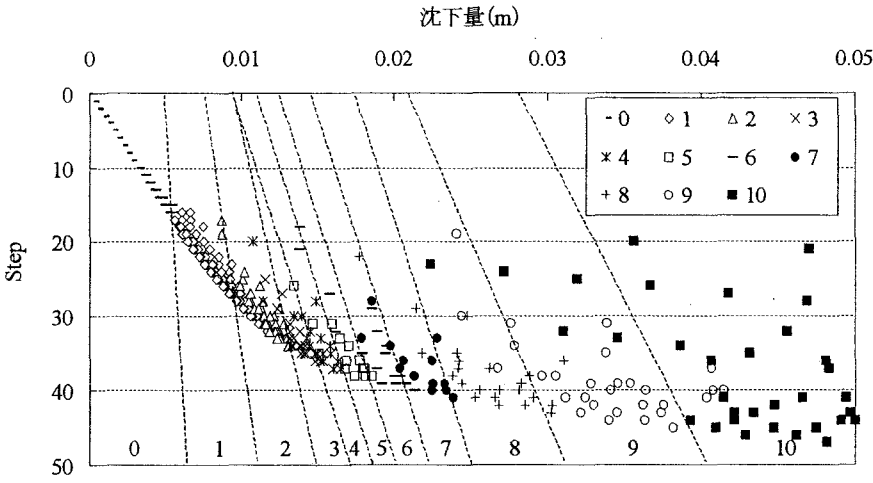


図-9 崩壊接近度と天端沈下の相関

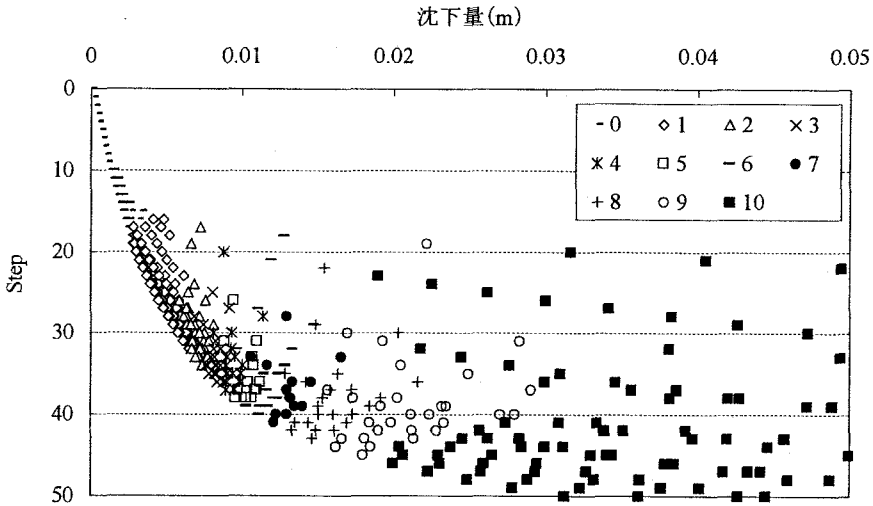


図-10 崩壊接近度と脚部沈下の相関

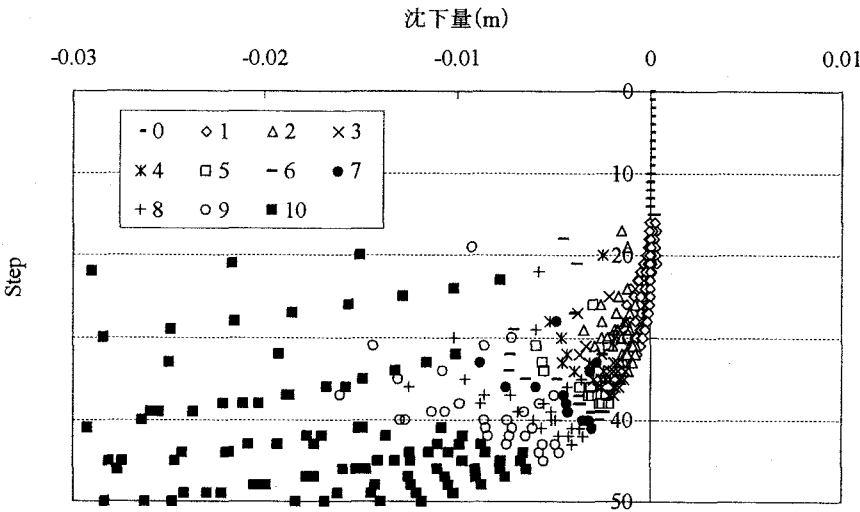


図-11 崩壊接近度と脚部水平変位の相関

次に、開放応力と安全率の推移を確認することとした。図-12はあるひずみ分布での崩壊領域の特定から安全率の計算の概念を示した図である。まず、ひずみ分布をみて、せん断帯の位置、幅を特定する。その上で、その中心部分にすべり面が形成されると仮定して、崩壊領域を推定する。次に、崩壊領域の重量を計算し、それと領域周辺に作用する力の鉛直成分を比較することとする。重量を W 、周辺に作用する力のうちトンネルからの支保圧の鉛直成分を T 、崩壊領域側面におけるせん断力の鉛直成分を St 、面に垂直な力の鉛直成分を Sn とする。このとき、通常の有限要素解析においては収束条件が満足される場合には、 $W=T+St+Sn$ が成立する。(ただし、本解析では繰り返し計算の過程で数パーセント程度の不釣り合いが存在しても次の荷重ステップに進む設定となっているため、この条件が厳密には満たされていない場合もある。) すべり面が完全に滑動されていない段階においては、その面上でのせん断力がモールの破壊条件から導かれる最大せん断抵抗力に達していない。そこで、仮にこのせん断力が最大レベルに達した場合の支保力の最大合計量 $T+Sn+Max(St)$ を求め、安全率を $F=[T+Sn+Max(St)]/W$ として定義することができる。また、本解析ではひずみの進行とともに強度が低下する設定となっているので、抵抗力の最大値計算においては最新の強度定数(解析の最初に設定する値から低下している値で、場所ごとに異なる)を用いることとする。

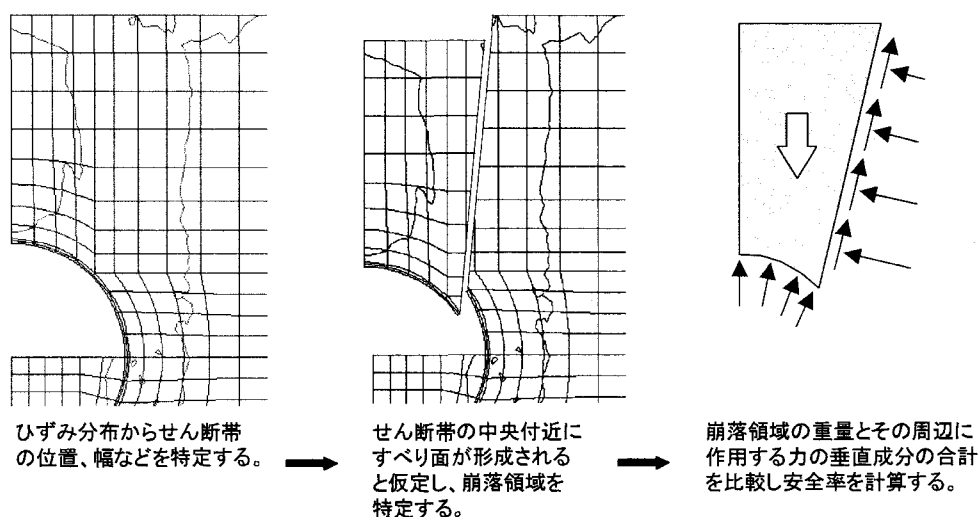


図-12 崩壊領域の特定から安全率を計算する概念

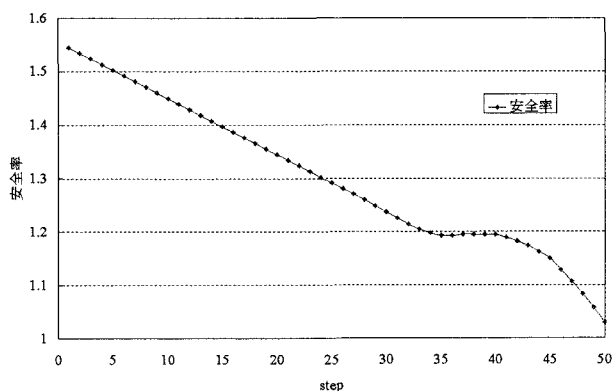


図-13 安全率の推移

一例として図-13に、残留率 60%、 $\Delta\gamma=0.04$ のケースにおける安全率の推移を示す。ステップ 30 程度までは直線的に安全率が低下している。これはトンネル支保圧 T が低下することによって応力分布が変化し、仮想すべり面におけるせん断力が一定のペースで上昇していることを意味する。ステップ 35 あたりから安全率の低下が一時不規則になり、その後急激に低下する傾向が見える。これは、解析の終盤ですべり面上での破壊が進展し、せん断応力が最大レベルに到達した領域が増えていることを意味する。このように、変形の進行と、応力分布を考慮して計算した安全率の両方をモニターすることにより、トンネルの安全性を評価する方法の構築が今後の重要な課題である。

5. まとめ

今回の研究により、軟化速度が等しければ、非線形な挙動が生じるタイミングは等しくなり、軟化の割合が等しければ、非線形な挙動が生じた後の開放応力と変位の進み方の関係が等しくなるといった、軟化特性が地山の変形挙動に及ぼす影響を知ることができた。よって、非線形な挙動が生じるタイミングより軟化速度が、非線形な挙動が生じた後の開放応力と変位の進み方の関係より軟化の割合が現場の変位データより類推できる可能性が認められた。また、掘削状況と変位量の関係とひずみ分布には相関関係があることもわかった。このことより、ひずみ軟化特性などの詳細が、完全に数量化できていなくても、変形モードの概略が判別できる可能性が認められた。これらの変形挙動の分析によるトンネルの全体的な挙動分析に安全率の評価を導入することで、土被りの浅いトンネルの総合的なモニタリング手法を構築することが今後の課題である。

参考文献

- 1) 櫻井春輔、足立紀尚：都市トンネルにおける NATM、鹿島出版会 1998
- 2) 芥川真一、松本憲典、長井寛之：土被りが浅いトンネルの非線形挙動解析に関する一考察、トンネル工学研究論文・報告集、第10巻、pp. 113-118、2000. 11.
- 3) Hansmire, W. H. & E. J. Cording 1985. Soil tunnel test section : Case history summary, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 111(11):1301-1320.
- 4) Murayama, S. & H. Matsuoka 1969. On the settlement of granular media caused by the local yielding in the media, *Proceedings of JSCE*, 172: 31-41. (in Japanese)
- 5) Murayama, S. & H. Matsuoka 1971. Earth pressure on tunnels in sandy ground, *Proceedings of the JSCE*, 187: 95-108. (in Japanese)
- 6) Adachi, T., T. Tamura & A. Yashima 1985. Behavior and simulation of sandy ground tunnel, *Proceedings of the JSCE*, 358(III-3): 129-136. (in Japanese)
- 7) Okuda, M., T. Abe & S. Sakurai 1999. Nonlinear analysis of a shallow tunnel, *Journal of Geotechnical Engineering*, JSCE, 638(III-49): 383-388. (in Japanese)
- 8) Sterpi, D. 1999. An analysis of geotechnical problems involving strain softening effects, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.23, 1427-1454.
- 9) Gioda, G. & L. Locatelli 1999. Back analysis of the measurements performed during the excavation of a shallow tunnel in sand, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 23, 1407-1425.
- 10) Akutagawa, S., T. Kitani, Y. Abe & S. Sakurai 1998. A consideration on tunnel pressure derived from the Terzaghi's formula based on an equilibrium assumption in a limit state, *Proceedings of Tunnel Engineering*, JSCE, 8:95-100. (in Japanese)