

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

NUMERICAL SIMULATION OF A NONLINEAR DEFORMATIONAL BEHAVIOUR AROUND A SHALLOW TUNNEL

芥川真一¹⁾・松本憲典²⁾・長井寛之³⁾

Shinichi AKUTAGAWA, Kensuke MATSUMOTO, and Hiroyuki NAGAI

A new finite element analysis procedure is proposed for simulation of deformational behavior around a shallow tunnel. The method incorporates reduction of shear stiffness, as well as strain softening effects of a given material. An illustrative example is shown in which the proposed method is applied to simulate an excavation process of a tunnel made of aluminum bars. Results obtained indicated that surface settlement, ground reaction curve, minimum supporting pressure, and formation of kinematic collapse are in good agreement with experimental results. The typical deformational mechanism observed in the experiment is also seen in the field, which is hopefully modeled with accuracy by the proposed numerical procedure.

Key Words: shallow tunnel, finite element analysis, strain softening, kinematic failure

1. はじめに

土被りが浅い都市トンネル周辺には地表面と天端の共下がりなど、特異な変形パターンが現れる事が多い。大断面化する都市トンネルの合理的設計を確立するためには、このような実際に生じる変形挙動を再現できる解析モデルが必要となるが、これまでに用いられている一般的な線形、もしくは非線形解析においては、必づしも十分な結果が出ているとは言いがたい。本報告は、このような背景から、実際の変形挙動をよりよく再現するために開発した新しい非線形解析手法についてその概要について紹介するものである。

本手法においては、材料が線形限界を越えた場合の異方性の発現と、強度定数の実質的な低下（軟化現象）を力学モデルに導入した非線形有限要素法を用いて、室内モデル実験の結果をシミュレートした。その結果、土被りの浅いトンネル周辺に見られる、地表面と天端の共下がり、トンネル肩部から発生するすべり面、また、天端周辺で崩落しようとする領域（1 次領域）と、その崩落によってさらに周辺から活動してくる領域（2 次領域）などの発生を概略的にはあるが、再現する事が出来た。これらの挙動は実際のトンネルにも生じる事が考えられるため、本研究で開発した解析手法は十分な現場への適用性を持つものであることが期待される。

2. 土被りが浅いトンネルに特有の変形挙動

土被りが浅いトンネル周辺においては、せん断帯の発生に伴う特有の変形挙動が現れることがある。図-1 に示すのはワシントン D.C.の地下鉄用トンネルの建設時に詳細に行われた現場計測結果からトンネル周辺のひずみ分布を求めたものである。

-
- 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）大本組
 - 3) 正会員 日本技術開発（株）

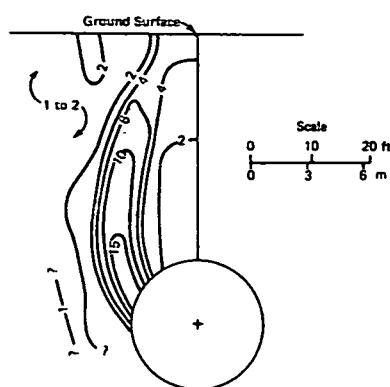


図-1 Hansmire らが求めたトンネル周辺のひずみ分布¹⁾

この時のトンネル周辺の変形挙動メカニズムは図-2 によって次のように説明することが出来る。まず、トンネル天端上部に形成された領域 A (すべり面 $k-k$ に囲まれた領域) は重力の作用により崩落の可能性を秘めた領域と考えられる。この領域を崩壊から防いでいるのは、トンネルからの土圧と領域 A の境界において存在している地盤の抵抗力である。領域 A 周辺に発生しているすべり面周辺においては、ある程度の幅においてせん断ひずみが卓越したゾーン (せん断帯 a) が存在しており、その内側において領域 A がすでにある程度の変形をトンネル内空に向かって生じている。この動きに追従して、領域 B が変形し、領域 C との境界においてもうひとつのせん断帯 b が発生する。このせん断帯 b の方向は、土被りの浅いトンネル周辺に生じる変形影響領域の概略位置を決定する際に用いられるライン (トンネル下部から $45^\circ + \phi/2$ の角度で定義されるライン、 ϕ は内部摩擦角) に関連するものと考えられる。

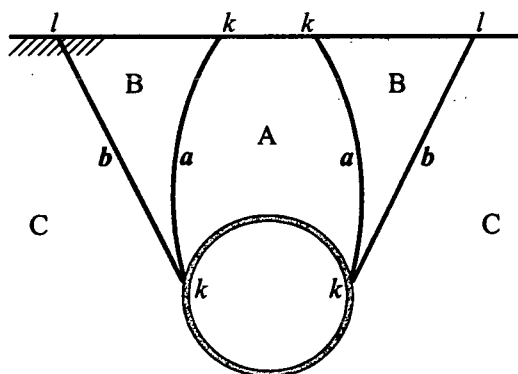


図-2 土被りが浅いトンネル周辺の特有の変形挙動メカニズム

ここで示した領域 A, B は村山ら^{2,3,4)}が落とし戸の実験で特定した 1 次領域、2 次領域が同様のメカニズムでトンネル周辺に生じているものであると考えることが出来る。トンネル周辺にこのような領域が認められることは、即ちせん断帯 a , b などが既に発生したことを意味し、周辺地盤の変形量を出来るだけ小さくして施工を行おうとする近代的なトンネル工学の見地からは望ましくないことである。しかしながら一方では、トンネルにおける作用荷重の確認、限界状態設計法の確立が叫ばれる中、土被りの浅いトンネルにおいて相当量の変形が計測されたという例は珍しくなく、そのような変形挙動からトンネル周辺地盤においてどのよ

うな変形メカニズムが発生しているのか、また、変形の程度は終局の崩壊状態に対してどの程度まで進展しているかを解明することは極めて重要な事項となっている。

3. 変形挙動のシミュレーション - 既往の研究

近年の情報化施工の発展を考慮した場合、トンネル周辺の変形メカニズムを特定し、そこから得られる様々な情報を有効利用するには、有限要素法を主とする数値解析手法の精度良い適用が不可欠である。この分野ではこれまでに多くの手法が提案されている。足立ら⁹⁾は塑性理論から導かれる潜在的なすべり面の方向にジョイント要素を入れたメッシュを用いて、土被りが浅いトンネルの特有の変形メカニズムを表現しようとしている。また、奥田ら⁶⁾は異方性損傷パラメータを用いた力学モデルに基づいて、計測変位を逆解析することによりこのメカニズムの特定を図っている。Sterpi⁷⁾は材料が塑性状態に入った直後に内部摩擦角、および粘着力を低下させる方法で軟化特性を導入し、トンネル周辺のせん断帯の発生をモデル化している。また、この手法と同様の方法で Gioda ら⁸⁾は実際のトンネル周辺で生じた変形挙動を分析し、軟化特性を取り入れたモデル化手法により、特有の変形メカニズムを十分な精度で再現できることを示している。これらの方法にはそれぞれ独自の考え方が反映されており、土被りが浅いトンネルの変形挙動の特徴をある程度再現しているが、例えば村山らが特定したような 1 次、2 次領域の発生や地表面沈下分布、周辺のひずみ分布のすべてに渡って、特徴を再現できる計算手法はこれまでに開発されていない。

4. 変形挙動のシミュレーション - 提案する手法

筆者らは、これまでの研究を概観して土被りの浅いトンネル周辺の変形挙動の特性を支配する原因は、変形が進むにつれてせん断剛性が低下する、もしくは強度特性が低下することに大きく関係しているとの見方が有力であることを認識した。これは、櫻井らの開発した異方性損傷パラメータを用いた手法⁶⁾、また Sterpi⁷⁾、Gioda ら⁸⁾が適用したひずみ軟化型モデルにおいて、土被りの浅いトンネル特有の変形挙動特性が最も良く再現されていると判断したことによる。ここでは、本研究で採用した力学モデル⁹⁾の要点について概説する。

基本的な構成則としては、櫻井らが提案している異方性損傷パラメータを用いた応力・ひずみ関係を用いる。このモデルにおいては、応力 σ とひずみ ε の関係は、 $\sigma = D\varepsilon$ のように与えられる。ここに、

$$D = \frac{E}{1-\nu-2\nu^2} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & m(1-\nu-2\nu^2) \end{bmatrix} \tag{1}$$

であり、 E は弾性係数、 ν はポアソン比である。異方性パラメータ m はせん断ひずみの増加に伴って低下する関係が提案されており⁶⁾、ここではその方法を採用している。この構成関係は有限要素のガウスポイントにおいて主応力の方向を確認した上で、潜在的な共役すべり面の方向のそれぞれに対して定義し、応力・ひずみはそれらを正規の座標に変換してから平均したものをを用いている。

さらに本研究で提案する手法においては、材料の強度（粘着力 c 、および内部摩擦角 ϕ ）が初期段階で定義される値から、破壊後に順次低下し、残留値に至るという概念を導入している。これは図-3 で示す通りであり、Gioda らの手法に類似している。この方法を用いる場合には、ひずみの進行によって破壊規準が更新されるため、可能な応力空間が狭まることになる。この際に、新規の破壊規準面の外側に存在することになる応力についてはその超過分を等価な節点外力に置き換えて釣り合い状態を再計算する手法を取っている。

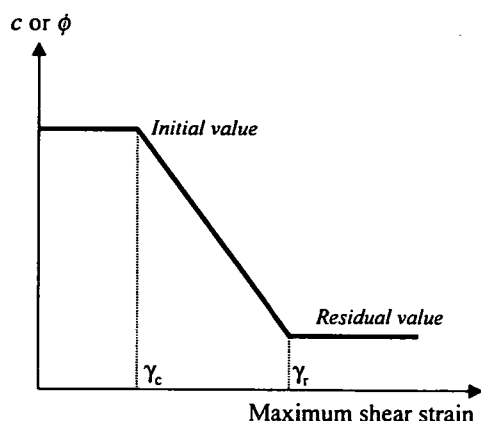


図-3 強度定数の低下に関する考え方

5. 計算結果

ここでは、アルミ棒積層体を用いて行ったトンネルの崩壊実験¹⁰⁾結果を、提案する手法でシミュレートし、トンネル周辺に出現するせん断帯や変形挙動の特性をどこまで追跡できるかを確認する。この実験は、アルミ棒積層体を用いて土被り圧に等しい空気圧を持たせたエアバッグ周辺に直径15cmのトンネルを形成し、次第に空気圧を下げることによってトンネル掘削を模擬するものである。空気圧の低下に伴う周辺地山（アルミ棒積層体）の変形挙動は画像計測装置によって記録され、そのデータからひずみ分布、変位ベクトルなどを得ることが出来る。

ここでは、土被り H をトンネル径 D と等しくした場合の実験結果について紹介する。まず、天端沈下と空気圧の関係を図-4に示す。これは、地山特性曲線といわれるものであり、実験結果と計算結果が類似していることが確認できる。参考のため、通常の弾塑性解析¹¹⁾（モール・クーロンの破壊規準を用いた解析）の結果も示している。なお、解析に入力した主なパラメータは表-1に示すとおりである。

表-1 解析に用いた入力パラメータ

ヤング率 E	0.5D	369.5 KPa
	1D	529.7 KPa
	2D	850.2 KPa
粘着力	初期値 c_i	0.2548 KPa
	収束値 c_f	0 KPa
内部摩擦角	初期値 ϕ_i	30.7°
	収束値 ϕ_f	23.2°
c, ϕ が低減するせん断ひずみ増分 $\Delta\gamma$		0.0025
異方性パラメータの残留値 m_r		0.0001
α		1
ポアソン比 ν		0.333
地山の単位体積重量 γ_w		21.36 kN/m ³

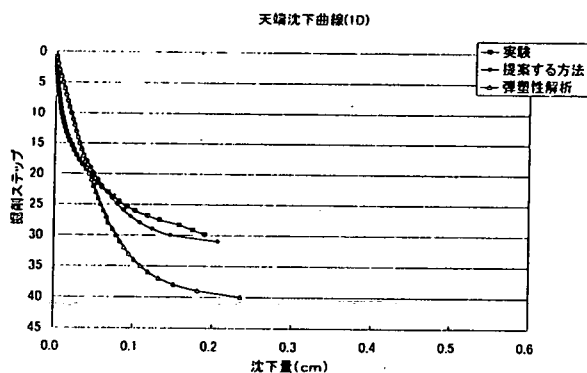


図-4 天端沈下と空気圧の関係

次に、地表面沈下の形状を比較する。図-5 は実験結果と計算結果について地表面沈下のピーク値を合わせて形状を比較したものである。トンネル周辺にせん断帯が発生すると地表面沈下のラインが下に凸から上に凸に形状を転化する現象が現れる。このような変曲点は通常の弾性解析、あるいは弾塑性解析では得がたいものであるが、提案する手法においては実験結果が示す曲率の変化に追従できていることが分かる。

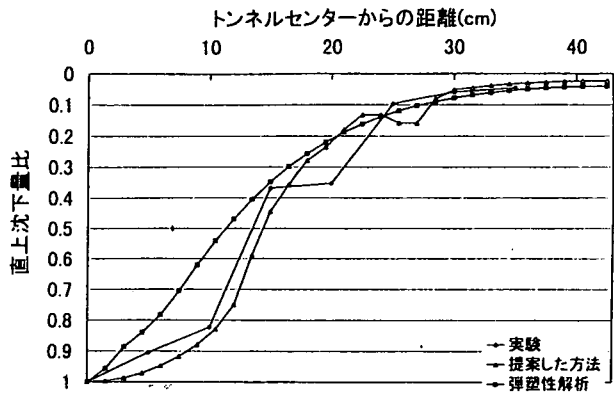


図-5 地表面沈下形状の比較

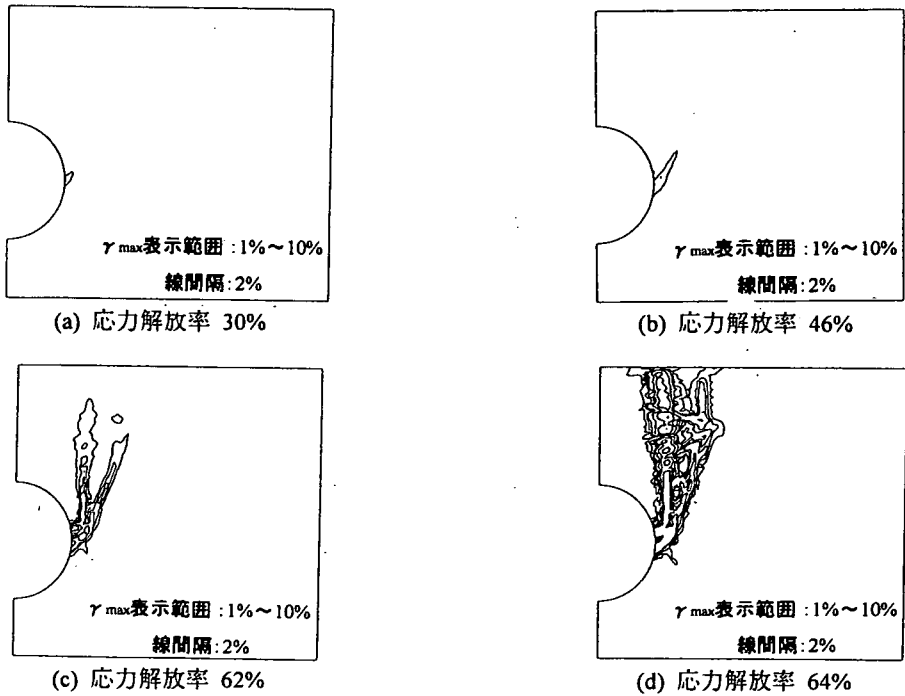


図-6 最大せん断ひずみ分布の変化

最後に、空気圧を下げてゆくにつれてトンネル周辺のひずみ分布がどのように変化したかを図-6 に示す。また、図-7 には実験における最終状態（すでにトンネルが崩壊したとみなせる段階）における最大せん断

ひずみ分布を比較のために示す。図-6 によれば、トンネルのスプリングライン上部から発生したせん断帯が上部に伸び、ある段階で二股に分岐する様子がわかる。そのご、まず内側のせん断帯が発達し、それが地表面近くにまで発達している。これは、領域 A と領域 B の境界としてのせん断帯 a と見ることが出来る。一方、もうひとつのせん断帯も次第に発達し、いわゆるトンネル掘削の影響領域の境界線に告示した位置に広がりを見せ、せん断帯 b を形成している。このような挙動が最終的にはトンネル上部の崩壊につながり、最終段階のひずみ分布形状は、実験結果に類似したものとなっている。なお、トンネルが崩壊したとみなせる空気圧（ある意味でトンネルを支えるのに必要な最小支保圧）についても、実験と数値解析の結果はほぼ一致している。

6. おわりに

本研究では、材料の異方性損傷と軟化特性を同じに考慮した非線形アルゴリズムに基づく有限要素解析手法を用いて、土被りの浅いトンネルに特有の変形挙動、終局の崩壊状態などについてその再現を試みた。ここで特に注意を払ったトンネル周辺のせん断帯の発達、独特の変形領域の発達などは、単に実験結果としてではなく、実際のトンネル建設においても計測されたものである。その意味で、地山特性曲線、地表面沈下、最終崩壊時のトンネル土圧、トンネル周辺のせん断帯の発達などの諸項目において実際の現象を再現できたこ

とは、提案する手法が土被りの浅いトンネルの変形挙動を追跡するのに必要な主要因を十分な精度でモデルに取り込めていることを示すものである。今後は、実際のトンネルにおける支保構造と地山の相互作用なども考慮した上で、実際の変形挙動を再現できるかどうかを検証して行く予定である。

参考文献

- 1) Hansmire, W. H. and Cording, E.J. : Soil tunnel test section : Case history summary, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 111, No.11, pp.1301-1320, 1985.
- 2) 村山朔郎：砂層内局部沈下にかかる垂直土圧、京大防災研究所年報、Vol.11, B, pp.549-565, 1968.
- 3) 村山朔郎、松岡元：粒状土地盤の局部沈下現象について、土木学会論文集、Vol.172, no.3, pp.31-41, 1969.
- 4) 村山朔郎、松岡元：砂質土中のトンネル土圧に関する基礎的研究、土木学会論文集、Vol.187, No.3, pp.95-108, 1971.
- 5) 足立紀尚、田村武、八嶋厚：砂質地山トンネルの挙動と解析に関する研究、土木学会論文集、Vol.358, pp.129-136, 1985.
- 6) 奥田庸、阿部敏夫、櫻井春輔：土被りの浅い未固結地山の非線形解析、土木学会論文集、No.638/III-49, pp.383-388, 1999.
- 7) Sterpi, D. : An analysis of geotechnical problems involving strain softening effects, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.23, pp.1427-1454, 1999.
- 8) Gioda, G. and Locatelli, L. : 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, pp.1407-1425, 1999.
- 9) 松本憲典：トンネルに作用する設計土圧に関する基礎的研究、神戸大学大学院自然科学研究科博士前期課程修士論文、2000.
- 10) 芥川真一、木谷努、阿部泰典、櫻井春輔：極限状態の仮定に基づく Terzaghi のゆるみ土圧に関する一考察、トンネル工学研究論文・報告集第 8 巻、pp.95-100, 1998.
- 11) Owen, D. R. J. and Hinton, E. : *Finite Elements In Plasticity*, Pineridge Press, 1980.

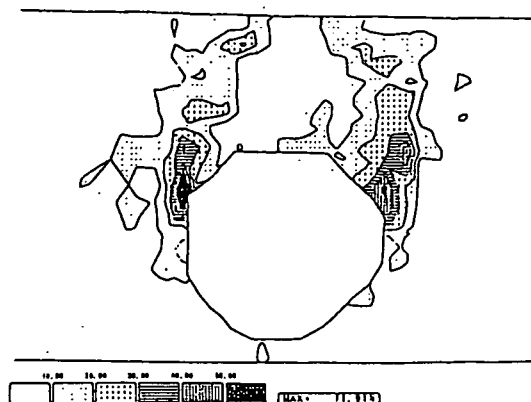


図-7 実験における最終段階での最大せん断ひずみ分布