

有限要素法によるトンネル掘削解析における 掘削および地山のモデル化について

NUMERICAL MODELLING OF EXCAVATION AND GROUND FOR TUNNEL EXCAVATION ANALYSIS USING FEM

永井哲夫¹⁾・張 玉軍²⁾・小谷野康之³⁾

Tetsuo NAGAI, Yujun ZHANG, Yasuyuki KOYANO

When shallow tunnel with large cross-section is excavated, some problems are caused by the subsidence of ground surface. Therefore, in engineering practice, FEM analysis is often used to evaluate the behaviour of surrounding ground of such a tunnel. In the case of deep tunnel, excavation analysis using FEM is useful because there are many engineering experiences. But, in the case of shallow tunnel, it is difficult for engineers to evaluate the behaviour of surrounding ground during excavation. In this research, an investigation on numerical modelling of excavation and ground for tunnel excavation analysis using FEM is carried out considering the effect of gravity on tunnel behaviour.

Key Words : finite element method, numerical modelling, tunnel excavation analysis, shallow tunnel, gravity

1. はじめに

近年、都市域においても山岳工法を用いた施工方法の採用される機会が増加する傾向にある。また、交通需要の増加に伴い、6車線道路の建設や既存の4車線道路の拡幅工事が行われるようになり、3車線断面のトンネルが多く造られるようになってきている。その結果、土被りの小さい大断面トンネルを掘削するケースも多くなっている。例えば、第二東名・名神高速道路の建設においては、幅員が従来の2倍程度で掘削断面積が200m²を越える扁平大断面トンネルの施工が必要となる。しかし、そのような大断面トンネルに関して、これまでほとんど経験がなく、技術的に未解明な点が多い。

都市域などにおいて、土被りの小さい大断面トンネルを掘削する場合、地表面沈下が問題となることが少なくない。そのような場合、トンネル周辺地山の挙動が重要な判断要素となるため、有限要素法などの解析的手法により設計されることが多い。有限要素法によるトンネル掘削解析は、土被りの大きいものに関してかなりの実績があるものの、土被りが小さいものに関して掘削時の地山挙動を評価するには十分でないのが現状である。そこで本研究では、有限要素解析における掘削および地山のモデル化について考察を行い、土被りに対応させてそれらを適切に取扱うことの重要性を示す。

1) 正会員 博士(学術) (株)青木建設 研究所 土木研究室

2) 正会員 工学博士 中国科学院 武漢岩土力学研究所(現、(株)青木建設 客員研究員)

3) 正会員 (株)青木建設 研究所 土木研究室

2. 有限要素法によるトンネル掘削解析の現状と問題点

有限要素法は、地山を構成する土や岩盤の複雑な力学特性および複雑な境界条件を容易に解析に取り込める利点を有しており、トンネルの実務においても活発に利用されるようになってきている。とくに、土被りの小さい大断面トンネルの場合には、施工事例が十分ではないことから標準化されたものがないため、設計において有限要素法の用いられる機会が多い。ただし、地山のモデル化およびその材料定数の定量的評価の困難さ、支保工による地山補強効果の適切なモデル化の困難さ、地山に作用している初期応力の推定の困難さなどのために、有限要素法による解析結果は必ずしも実際のトンネルや周辺地山の挙動とは一致しない。例えば、土砂地山に掘削される土被りの小さいトンネルにおいては、天端直上の地山の挙動は連続体的ではなく、トンネルの内方へ剛体的に落下するような動きを示すが、一般の有限要素法による解析ではそのような挙動を十分に表現できない。

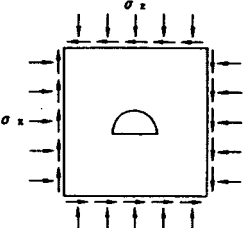
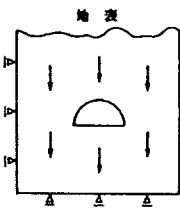
NATM の基本的な概念は、“地山が本来有する支保能力を発揮させ、最大限地山自身でトンネルの安定を保持させること”である。そのため、掘削に伴うトンネル周辺地山の挙動を適切に評価することが重要となる。そこで本研究では、土被りの小さいトンネルを対象に、掘削および地山のモデル化が掘削に伴うトンネル周辺地山の挙動に及ぼす影響について考察する。なお、支保工や補助工法による地山の補強効果については検討の対象外とする。

次に、有限要素法によりトンネルの掘削解析を行う場合について、土被りの大小による掘削および地山のモデル化の相違点をまとめ、土被りの小さいトンネルの掘削解析における課題について検討する。

(1) 掘削のモデル化

一般に、トンネルの掘削問題を有限要素法により解析する場合、まず地山の初期応力解析を行い、その結果から掘削相当外力を求めて掘削解析を実施する。このとき、土被りの大小に応じて地山の初期応力状態および掘削相当外力を適切に評価することが重要となる。そこで、現状の代表的な評価方法をそれぞれについてまとめると表-1 のようになる。

表-1 土被りの大小に応じた初期応力および掘削相当外力の評価方法の現状

土被り	初期応力状態の評価		掘削相当外力の評価
	初期応力の推定法	解析領域と境界条件	
大	土被り厚をもとに解析境界の一樣な初期応力状態 (σ_x, σ_z) を求め、これをもとに初期応力解析を行いトンネル近傍の初期応力状態を推定する。 $\sigma_z = \sigma_v = \gamma H,$ $\sigma_x = \sigma_h = K_0 \gamma H$ $K_0 \geq \nu / (1 - \nu)$		掘削前の空洞壁面に作用する初期応力をもとに掘削相当外力 {P} を求める。 $\{P\} = \int_{V_0} [B]^T \{\sigma_0\} dV_0$
小	地山の自重 (γ_c) に基づく物体力を荷重条件として初期応力解析を行い、トンネル近傍の初期応力状態を推定する。 $K_0 = \nu / (1 - \nu)$ ※平面ひずみ状態として解析すると K_0 は式により定まる。		トンネル周辺が一樣応力場として取り扱えないため、地山の自重を考慮して掘削相当外力を求める。 $\{P\} = \int_{V_0} [B]^T \{\sigma_0\} dV_0 - \int_{V_0} [N]^T \begin{Bmatrix} 0 \\ -\gamma_c \end{Bmatrix} dV_0$

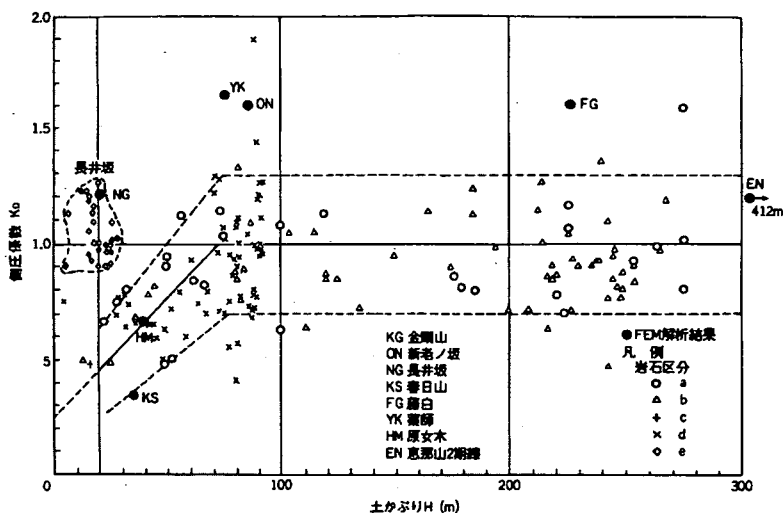


図-1 土被りと見かけの側圧係数の関係¹⁾

トンネル近傍の初期応力状態を推定する場合、水平方向の初期応力を求めるために側圧係数 ($= \sigma_h / \sigma_v$) が必要となる。既設トンネルにおける計測データを逆解析して得られた見かけの側圧係数は、土被りに対応してまとめると図-1のように示される¹⁾。この図から、土被りが70~80m以上になると見かけの側圧係数はほとんどが0.7~1.3の範囲にあること、それ以下では漸減して土被りが30m程度になるとほとんどは0.3~0.8の範囲にあることが分かる。そのため、土被りの大きいトンネルの場合、弾性論による算定式 ($K_0 = \nu / (1 - \nu)$) に岩石試験で得られたポアソン比を代入して得られる値より大きな側圧係数を設定して初期応力解析に用いる必要がある。それに対して、土被りの小さいトンネルの場合、有限要素法による初期応力解析を2次元平面ひずみ状態のもとで行うと、側圧係数として自動的に弾性論による算定値を用いることになる。土被りが30m以下のように非常に小さい場合、算定値と実績値はほぼ等しいことから問題はない。しかし、30~70mの範囲の土被りの場合、算定値と実績値の差が大きくなるため、岩石試験で得られるポアソン比より大きな値を入力値として初期応力解析を行う必要がある。

一方、土被りの小さいトンネルの掘削解析において、初期応力状態の推定に際して地山の自重に基づく物体力を用いて有限要素解析を行う場合、掘削面における外力と内力のつり合い状態が掘削前後で変化するため、掘削領域の地山自重に基づく物体力を考慮して初期応力から求めた掘削相当外力を補正する必要がある。

(2) 地山のモデル化

一般に、有限要素法において利用される地山の代表的な応力-ひずみ関係モデルとして、線形、非線形、完全弾塑性または残留強度モデルが挙げられる。土被りの大きいトンネルの場合、地山に応じて適切なモデルを用いることにより掘削に伴う地山の挙動をある程度まで表現することができる。それに対して、土被りの小さいトンネルの場合、天端直上の地山がトンネル内方へ剛体的に落下するような挙動を有限要素法により表現することは困難である。そこで、足立ら²⁾は、地山を三角形要素でモデル化し、各要素の周辺にジョイント要素を配置したモデルにより、このような土被りの小さいトンネル特有の挙動を解析している。また、櫻井ら³⁾は、異方性パラメータを用いた応力-ひずみ関係を提案することにより、連続体モデルとして取り扱う方法の有効性を示している。

一方、既設トンネルにおける計測データを逆解析して得られた見かけの弾性係数は、土被りに対応してまとめると図-2のように示される⁴⁾。この図から、支保工の影響も含めた見かけの弾性係数は、土被りの大きいトンネルほど大きな値を示すことが分かる。

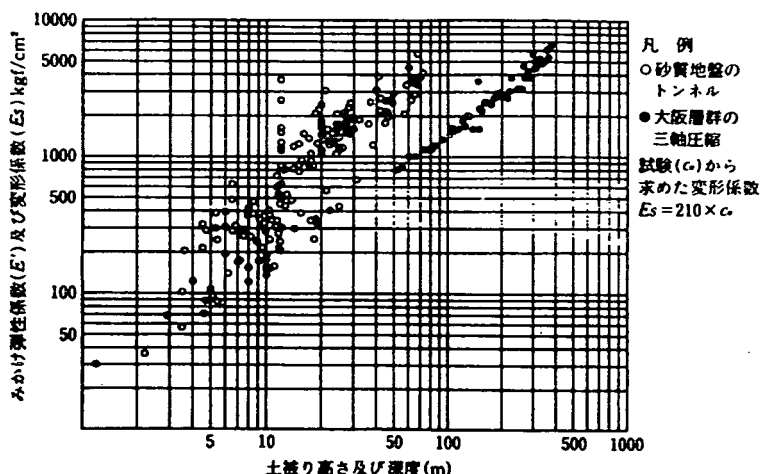


図-2 土被りと見かけの弾性係数⁴⁾

3. 土被りの小さいトンネルにおける掘削のシミュレーション解析

(1) 解析概要

前章で述べた有限要素法によるトンネル掘削解析の現状と問題点を踏まえて、本章では、土被りの小さいトンネルにおける掘削時の地山挙動を対象として、有限要素法によりシミュレーション解析を行う。解析に際しては、図-3のような有限要素メッシュを作成した。ここでは、簡単のためにトンネル形状を円形（直径10m）と仮定し、解析領域は1/2断面（40m×25mの矩形断面）としている。そして、要素数は126、節点数は140として2次元平面ひずみの条件下で解析を行った。解析に用いた掘削および地山のモデルをまとめると表-2のようになる。

a) 掘削のモデル

土被りの小さいトンネルのように初期応力状態の推定に際して地山の自重に基づく物体力を用いて有限要素解析を行う場合、厳密には掘削領域の地山自重に基づく物体力を考慮して初期応力から求めた掘削相当外力を補正する必要がある。そこで本研究では、この補正により掘削時の地山挙動がどのようになるかを検討する。

b) 地山のモデル

図-2に示したように、土被りが小さいトンネルほど見かけの弾性係数が小さくなる現象は、初期応力状態における地山の締めり程度と関連していると考えられる。そこで本研究では、地山の弾性係数を定数として取り扱うケースに加えて、土被りに応じて線形的に変化させるケースおよび応力に依存して変化させるケースを設定して掘削解析を行った。ここで、定数としての弾性係数には図-2においてトンネル中心の土被り（15m）に対応する値（50MPa）を採用し、地山の単位体積重量は16kN/m³とした。また、応力依存モデルとしては、最小主応力に依存して弾性係数が変化するもの（ $E = K\sigma_3^n$ ）を用いた。なお、ここでは K および n をともに定数としたケースに加えて、 K を地山の自重を考慮して各要素の土被り（ y ）に対応して変化させるケース（ $K(y) = a\gamma y / \{\gamma y / (1 - \nu)\}^n$ ）も設定している。

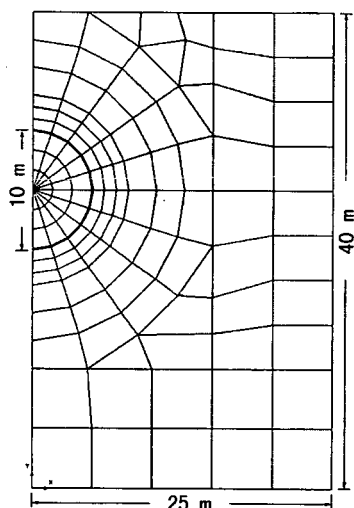


図-3 有限要素分割図

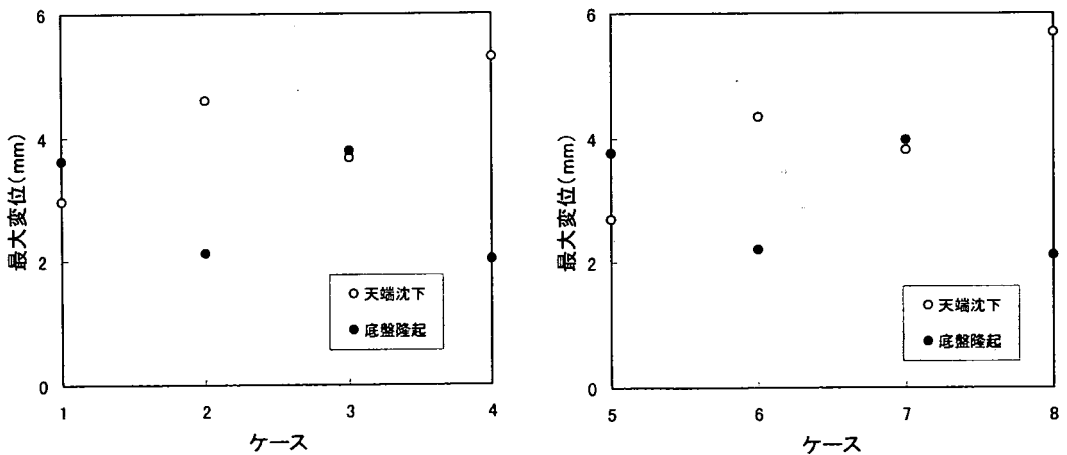
表－２ 解析ケース

解析ケース	掘削のモデル	地山のモデル	備 考
		弾性係数： E (MPa)	
1	掘削相当外力の補正なし $\{P\} = \int_{V_0} [B]^T \{\sigma_0\} dV_0$	50	$E = \text{const.}$
2		$208.3 \gamma H$	$E = a \gamma H = a \sigma_z$
3		$98.92 \sigma_3^{0.3}$	$E = K \sigma_3^n$
4		$K(y) \sigma_3^{0.3}$ $K(y) = 3.33y / (0.00686y)^{0.3}$	$E = K(y) \sigma_3^n$ $K(y) = a \gamma y / \{\gamma y \nu / (1 - \nu)\}^n$
5	掘削相当外力の補正あり $\{P\} = \int_{V_0} [B]^T \{\sigma_0\} dV_0$ $-\int_{V_0} [N]^T \left\{ \begin{matrix} 0 \\ -\gamma_c \end{matrix} \right\} dV_0$	50	$E = \text{const.}$
6		$208.3 \gamma H$	$E = a \gamma H = a \sigma_z$
7		$98.92 \sigma_3^{0.3}$	$E = K \sigma_3^n$
8		$K(y) \sigma_3^{0.3}$ $K(y) = 3.33y / (0.00686y)^{0.3}$	$E = K(y) \sigma_3^n$ $K(y) = a \gamma y / \{\gamma y \nu / (1 - \nu)\}^n$

(2) 解析結果および考察

まず、土被りの小さいトンネルの掘削に伴う地山挙動を表現する代表的な点として天端および底盤の２点を取り上げ、各解析ケースについてそれぞれの点における最大変位をまとめると図－４が得られる。ここで、図－４(a)は掘削相当外力の補正を行わない場合、図－４(b)は掘削相当外力の補正を行う場合にそれぞれ相当する。この補正による地山挙動の相違を調べるため、後者を前者で除したものを「補正による変化度」と定義して結果をまとめると図－５のようになる。これらの図から、天端沈下に関して、ケース１およびケース２の場合は補正により減少しているが、ケース３およびケース４の場合は逆に増加している。一方、底盤隆起に関してはすべてのケースとも補正により増加しており、その比率はほぼ一定となっている。

次に、ケース５およびケース８に関して変位ベクトル図を示すと図－６のようになる。図－６(a)から、ケース５の場合は掘削により盤膨れ現象が顕著であり、土被りの小さいトンネルにおいて見られる挙動と異なることが分かる。それに対して、図－６(b)から、ケース８の場合は掘削に伴いトンネルの天端上方の地



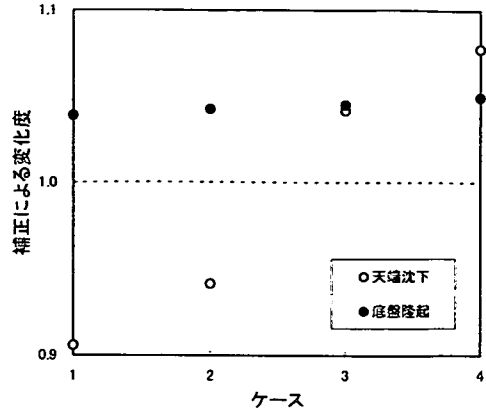
(a)掘削相当外力の補正なしの場合

(b)掘削相当外力の補正ありの場合

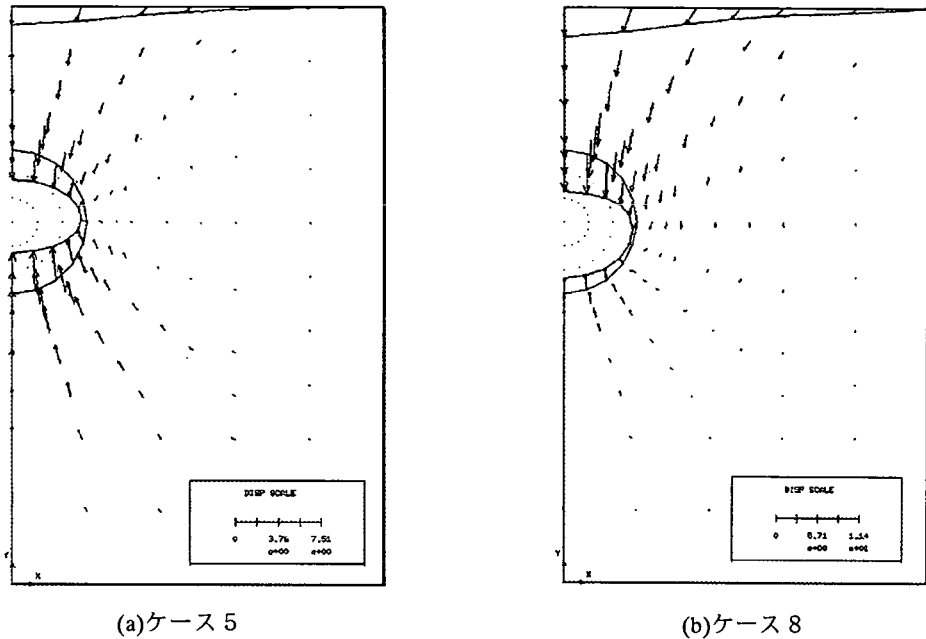
図－４ 天端および底盤における解析変位

山がトンネル内方へ大きく変位しており、地表面沈下も大きくなっている。さらに、内空変位に比べると天端沈下が卓越していることが分かる。これらの現象は、土被りの小さいトンネルにおいて見られるものとよく対応している。

以上の結果から、土被りの小さいトンネルにおける掘削時の地山挙動を有限要素法により適切に評価するためには、ケース8で用いた掘削および地山のモデルを用いることが有効であると考えられる。つまり、掘削相当外力を地山自重に基づく物体力を考慮して補正し、地山の弾性係数を地山の自重を考慮した応力依存モデルと見なして、非線形弾性の有限要素解析を実施すればよい。このように、地山自重が掘削および地山のモデル化に及ぼす影響を適切に考慮することが重要である。



図－5 掘削相当外力の補正による変化



図－6 解析により得られた変位ベクトル図

【参考文献】

- 1) 日本道路公団試験所：トンネルの標準設計に関する研究報告書，試験所技術資料第350号，1986.
- 2) 足立紀尚，田村 武，八嶋 厚，上野 洋：被りの浅い砂質地山トンネル掘削に伴う地表面沈下，土木学会論文集第370号/Ⅲ-5，1986.
- 3) Sakurai, S., Ine, T. and Shinji, M. : Finite element analysis of discontinuous geological materials in association with field observation, Proc. 6th Int. Conf. on Numerical Methods in Geomechanics, Innsbruck, 1998.
- 4) 櫻井春輔，足立紀尚：都市トンネルにおけるNATM，鹿島出版会，1988.