

矩形断面掘削時の土圧変化を考慮した 応力非一様解放に伴う地表面変位応答

西山 和宜¹・仲山 貴司²・富樫 陽太³・岡野 法之⁴

¹正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 基礎・土構造 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)
E-mail: nishiyama.kazuki.85@rtri.or.jp

²正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 基礎・土構造 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)
E-mail: nakayama.takashi.61@rtri.or.jp

³正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 トンネル (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)
E-mail: togashi.yota.93@rtri.or.jp

⁴正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 トンネル (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)
E-mail: okano.noriyuki.41@rtri.or.jp

トンネルの掘削に伴う地盤変位量を二次元解析で予測する場合, 掘削面に掘削相当外力を作用させる有限要素法が用いられている. これは地盤掘削に関して広く利用されている解析手法を応用したもので, トンネルの掘削では, 掘削相当外力に応力解放率 α を乗じることで, 切羽に作用する土水圧や切羽後方に施工されるライニングによる抵抗を表現するという特徴がある. 本研究では, トンネル施工法の一つである矩形の推進工法に着目し, この工法に対する応力解放率 α について検討した. 三次元逐次掘削解析と二次元応力解放法の地表面変位分布を比較したところ, 両者が概ね一致する応力解放率 α は50%程度であった. また, 応力非一様解放の影響 (上面と側面, 下面の応力解放率の違い) を考慮すると, 上面40%, 下面20%程度となり, 解放面一様に設定する応力解放率よりも小さくなることがわかった. これは掘削断面形状の違いによるものと考えられる.

Key Words : finite element analysis, stress release ratio, ground displacement

1. はじめに

トンネルの掘削に伴う地盤変位量を二次元解析で予測する場合, 一般に, 図-1のように掘削面に式 (1) に示す掘削相当外力を作用させる有限要素解析法 (以下, 二次元応力解放法) が用いられている¹⁾.

$$F_E = \alpha \int_{V_E} (N^T g - B^T \sigma_0) dV \quad (1)$$

ここに, F_E : 掘削相当外力, α : 応力解放率, N : 形状関数, g : 物体力, B : 節点変位-ひずみマトリックス, σ_0 : 掘削前の応力, V_E : 掘削領域

これは地盤掘削問題に関して広く利用されている解析手法²⁾を応用したもので, トンネルの掘削では, 掘削相当外力に一樣な応力解放率 α (=0%~100%) を乗じるこ

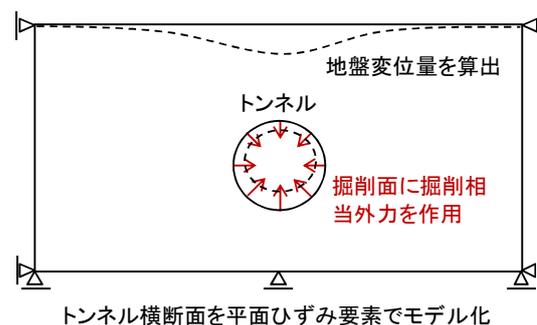


図-1 二次元応力解放法の概念図

とで, 切羽に作用する土水圧や切羽後方に施工されるライニングによる抵抗を表現するという特徴がある.

そのため, トンネルの掘削に伴う地盤変位量を精度良く予測するためには, この応力解放率 α をどのように設

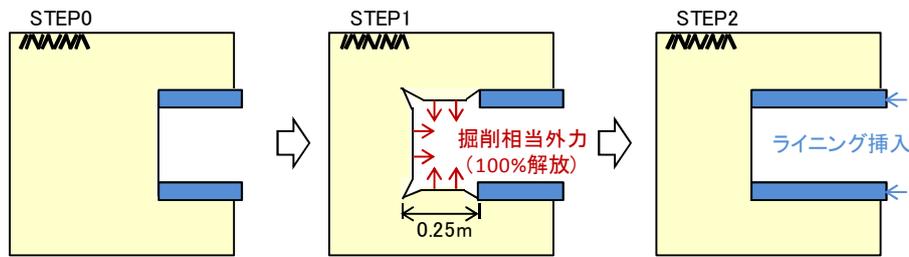
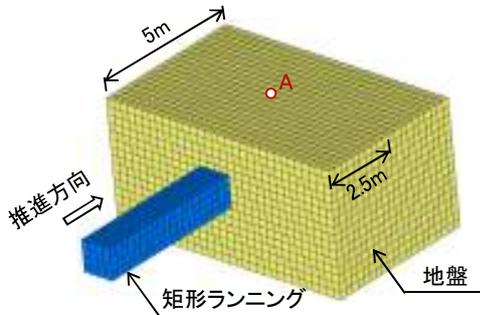
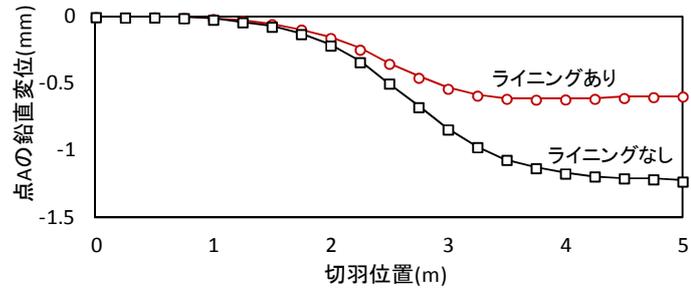


図-2 三次元逐次掘削解析の手順³⁾

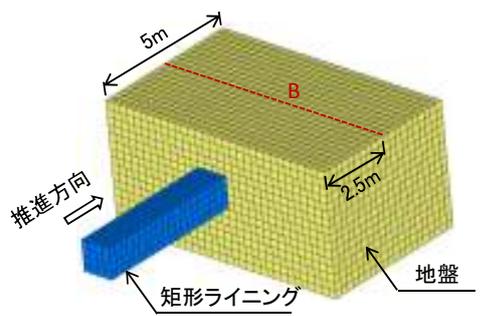


a) モデル概要図

図-3 ライニングの推進距離と鉛直変位の関係 (三次元逐次掘削解析)

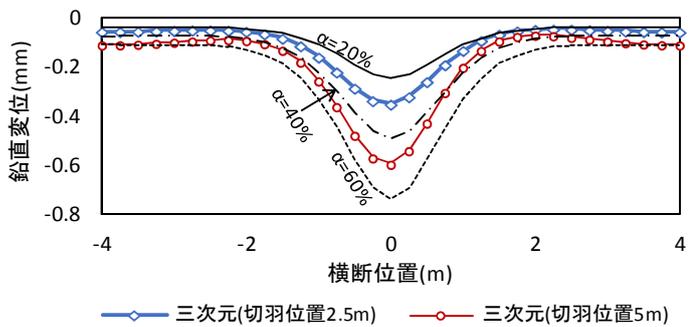


b) 切羽位置に対する点 A 鉛直変位



a) モデル概要図

図-4 横断方向の鉛直変位分布 (二次元応力解放法と三次元逐次掘削解析)



b) B線における鉛直変位分布図

定するかが重要となるが、代表的なトンネル工法であるシールド工法と山岳工法以外では、その設定に際して参考とすることができる基準・文献類が少ないという現状がある。

そこで、本稿では、トンネル施工法の一つである推進工法に対する応力解放率 α について解析的検討を行った結果を報告する。

まず、三次元逐次掘削解析と二次元応力解放法から、これらが一致する応力解放率を検討した。次に、応力解放率の異方性（上面と側面、底面の応力解放率の違い）が地表面沈下量に与える影響を検証した。

2. 三次元逐次掘削解析と二次元応力解放法の比較

(1) 検証の目的

推進工法とは、非開削で掘削した地盤内空にライニン

グを推進してトンネルを構築する非開削工法である。その断面形状には、円形のものや矩形のものがあり、円形の場合はシールド工法に類似した地盤変形挙動を示すことが想定されているが、矩形のものについてはその地盤変形挙動について検証された事例が希少である。

そのため、本研究では、矩形のライニングに着目して、三次元逐次掘削解析より得られる地表面変位量と一致する二次元応力解放法の一様な応力解放率 α を調べた。

(2) 検証の方法

①二次元応力解放法（応力解放率 $\alpha=20\% \sim 60\%$ ）と②三次元逐次掘削解析とを比較した。

本稿で用いた三次元逐次掘削解析の手順を図-2に示す。推進工法は、前述したように、地盤を掘削した後に、ライニングを地盤中に押込むという施工手順を踏むため、この施工過程を解析で表現するべく、掘削面に掘削相当外力（100%）を作用させた後にライニング要素を挿入

表-1 二次元応力解放法の解析条件

解析 ケース	応力解放率(%)				地盤条件				備考
	α_1	α_2			N 値	変形係数 $E_0(\text{kN/m}^2)$	ポア ソン比	単位体積 重量 $\gamma(\text{kN/m}^3)$	
		上面	側面	下面					
case1	40	40	40	40	5	12500	0.3	18	α 解放面一様
case2		40	40	20					
case3		40	40	0					

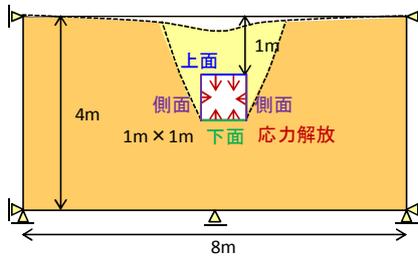


図-5 解析モデル概要図

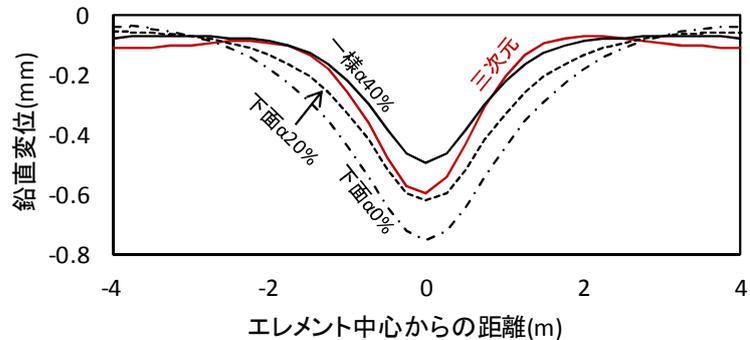


図-6 地表面変位分布図

した³⁾。

都市部の砂質一様地盤 (N値5相当) を、土被り1mで1m×1mの矩形のライニングが5m推進する場合を解析対象とした (一掘削延長は0.25m)。地盤のモデル化と特性値の算出方法は、シールド工法や山岳工法の応力解放率 α と比較できるように、これらの方法を準用した。具体的には、地盤は線形弾性体とし、地盤の変形係数 E は2500N(kN/m²)相当、ポアソン比 ν は0.3とした。

(3)検証結果

図-3に、三次元逐次掘削解析から得られた、切羽位置と図中点Aにおける鉛直変位量の関係を示す。シールド工法や山岳工法と同様に、切羽が点A通過時において沈下の増加量が最大となり、最終掘削時 (切羽位置5m) では約0.6mmの沈下となった。ただし、同図には後方からライニングの推進を行わない場合の結果も示しており、ライニングの推進を考慮することにより沈下が抑制されていることがわかる。

図-4には、三次元逐次掘削解析 (切羽位置2.5m, 5m) の図中B線における変位分布と二次元応力解放法の結果を比較した図を示す。この結果から、切羽位置2.5mでは応力解放率 $\alpha=30\%$ 程度、切羽位置5mでは応力解放率 $\alpha=50\%$ 程度で両解析結果が概ね一致することがわかる。

応力解放率 α の目安はシールド工法では洪積層で8~15%程度、沖積層で15~30%程度、山岳工法の場合は40%程度となる¹⁾。このことから本結果の応力解放率50%は他工法と比較すると非常に大きく感じられる。これは

単に工法による違いではなく、掘削断面形状の違いによるものと考えられる。本解析で対象としている矩形断面では、下面からの解放力が地表面変位を抑える方向に働くと考えられ、本解析による応力解放率が他工法より大きい結果となったのはこの影響による可能性がある。

そこで、これらの違いを深度化して考察するため、以降に示す応力非一様解放の影響 (上面と側面、下面の応力解放率の違い) に着目した検討を実施した。

3. 応力非一様解放の影響

(1)検証の目的

シールド工法による急曲線区間の掘削等では、余掘りの影響等により応力解放率 α は解放面で一様でないことも知られている。とくに、矩形の推進工法においては、その形状効果等により、上面よりも側面および下面のほうが地盤の応力は小さく解放されるものと考えられる。

そのため、解放面に非一様に応力解放率を与えた場合、一様に定める応力解放率と比較して、地表面沈下量にどのような影響を及ぼすか検証した。

(2)検証方法

応力解放率は、式 (2) のように、物体力 g と掘削前の応力 σ_0 に乗じる応力解放率をそれぞれ α_1 、 α_2 に分離し、 α_2 については、掘削解放面の上面、側面、下面で異なる値を設定した。

$$F_E = \int_{V_E} (\alpha_1 N^T g - \alpha_2 B^T \sigma_0) dV \quad (2)$$

ここに、 F_E ：掘削相当外力、 α_1 、 α_2 ：応力解放率、 N ：形状関数、 g ：物体力、 B ：節点変位-ひずみマトリックス、 σ_0 ：掘削前の応力、 V_E ：掘削領域

解析モデルの概要図を図-5に示す。2章と同様推進工法による掘削を想定し、 $1\text{m}\times 1\text{m}$ のエレメントが土被り 1m の位置を推進する場合とした。

表-1に解析条件を示す。応力解放率 α が解放面で一様となる基本ケースをcase1 ($\alpha=40\%$)とし、case2およびcase3は下面の応力解放率 α_2 のみをそれぞれ20%および0%に低減させた。

(3)検証結果

地表面変位分布について、表-1による二次元応力解放法と三次元逐次掘削解析（切羽位置5m）を比較した図を図-6に示す。最大変位量について、2章で述べたように三次元（切羽位置5m）と一致するときの応力解放率（解放面一様）は50%程度だったが、表-1より応力解放率 α_2 を上面および側面40%、下面を20%に低減させたcase2とも概ね一致している。このことから、三次元と二次元の結果が一致するときの応力解放率は、解放面非一様に設定したときのほうが小さくなることがわかった。

また、下面の応力解放率のみを変えたcase2（下面 $\alpha_2=20\%$ ）とcase3（下面 $\alpha_2=0\%$ ）を比較すると、応力解放率が小さいcase3のほうが最大変位量が大きくなった。このことから、矩形断面の掘削において下面の解放応力が地表面変位分布に与える影響は比較的大きいことがわかった。

4. おわりに

本検討では、二次元応力解放法と三次元逐次掘削解析の比較を通して、矩形断面を有する推進工法の二次元応力解放法における応力解放率 α の目安を示した。また、応力非一様解放に着目して、地表面変位に与える影響を

把握した。得られた結論は以下の通りである。ただし、以下の結果は解析による比較のみであり、実際と異なる可能性がある。今後は実験や現場計測と比較していく予定である。

- 三次元逐次掘削解析と二次元応力解放法を比較した結果、本稿の解析条件では解放面一様に応力解放率50%程度で両解析結果の地表面最大変位量が概ね一致することが明らかになった。ただし、これは他工法と比べると比較的大きく、掘削断面形状の影響によるものと考えられた。
- 解放面の応力非一様解放による影響（上面と側面、下面の応力解放率の違い）を検証した結果、三次元と二次元の地表面変位が一致するときの応力解放率は、上面および側面40%、下面20%となり、応力解放率を解放面一様に設定したときの50%よりも小さい値となった。また、下面の応力解放率を小さくすると地表面変位は大きくなる傾向にあり、下面の解放応力が地表面変位に与える影響は比較的大きいことがわかった。これらの結果から、応力解放率の値は工法の違いだけではなく、掘削断面形状に依存し、掘削面ごとに異なることがわかった。

参考文献

- （公財）鉄道総合技術研究所：都市部鉄道構造物の近接施工対策マニュアル，2007.
- （公社）地盤工学会：有限要素法による数値解析入門，学会誌 土と基礎，1987.11～1989.4.
- Hiroki Takahashi, Kazuhito Komiya, Hirokazu Akagi, Takashi Nakayama and Yu Ohashi : Finite Element Simulation of Construction Processes of A Mechanized HEP & JES Tunnelling Method, 2nd International Conference on Computational Methods in Tunnelling, pp.31-36, 2009.

(2016.8.5 受付)

STUDY ON GROUND SURFACE DISPLACEMENT RESPONSE BY NON-UNIFORM STRESS RELEASE RATIO

Kazuki NISHIYAMA, Takashi NAKAYAMA
Youta TOGASHI and Noriyuki OKANO

In the case where predicting the ground surface displacement due to tunneling, the ground displacement analysis in that excavation equivalent force is multiplied by the stress release rate α is used. In this study, first, three-dimensional excavation analysis and two-dimensional analysis were compared, and second, un-uniform stress release rate was used. As a result, the two-dimensional analysis in that un-uniform stress release rate was used is good agreement with three-dimensional excavation analysis.