

矩形断面掘削時の地表面変位応答の予測

STUDY ON GROUND SURFACE DISPLACEMENT RESPONSE AT THE TIME OF RECTANGULAR CROSS-SECTION EXCAVATION

西山 和宜^{1*}・仲山 貴司²・富樫 陽太²・岡野 法之²

Kazuki NISHIYAMA^{1*}, Takashi NAKAYAMA²,
Yota TOGASHI², Noriyuki OKANO²

For predicting the ground surface displacement due to tunneling, the ground displacement analysis is multiplied by the stress release rate α assuming excavation equivalent force or the theoretical solution of the method and Peck's method is often used. In this study, for jacking method of rectangular cross-section, three-dimensional excavation analysis and two-dimensional analysis in that un-uniform stress release rate and Peck's method were compared. As a result, it showed a measure of stress release rate α and the ground loss rate V_1 .

Key Words : finite element analysis, stress release ratio, Peck's method, ground displacement, under railway cross method

1. はじめに

トンネルの掘削に伴う地盤変位量を予測する場合、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¹⁾)や図-2に示すPeckの方法²⁾(式(2a), (2b))等に代表される理論解による方法が用いられている。

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

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

$$S = S_{\max} \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) \quad (2a)$$

$$S_{\max} = \frac{V_1 A_t}{100\sqrt{2\pi}i} \quad (2b)$$

ここに、 S : 位置 x における沈下量、 $S_{\max}$: トンネル中心線における最大沈下量、 x : トンネル中心からの水平距離、 V_1 : 地山ロス率、 A_t : 掘削断面積、 i : トンネル中心から沈下変曲点までの距離

これらはトンネル掘削問題に関して広く利用されている手法であり、これら式中の応力解放率および地山ロス率が施工法に応じた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している。

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 および地山ロス率 V_1 をどのように設定するかが重要となる。しかし、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・文献類が少ないのが現状である。

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 および地山ロス率 V_1 の目安について検討を行った結果を報告する。

なお、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る。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た。

まず、これまでに現場計測との比較から妥当性が検証

キーワード: 有限要素解析, 応力解放率, Peckの方法, 地盤変位, 線路下横断工

¹ 正会員 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 Railway Technical Research Institute, Structure Engineering(E-mail: nishiyama.kazuki.85@rtri.or.jp)

² 正会員 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 Railway Technical Research Institute, Structure Engineering

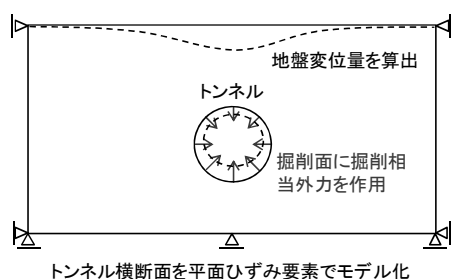


図-1 二次元応力解放法の概念図

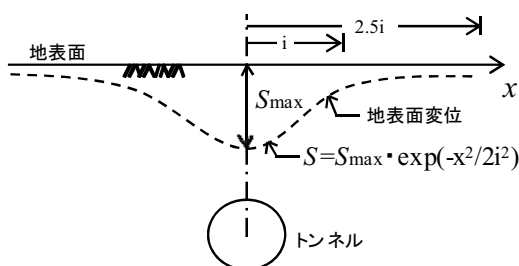


図-2 Peckの沈下曲線²⁾

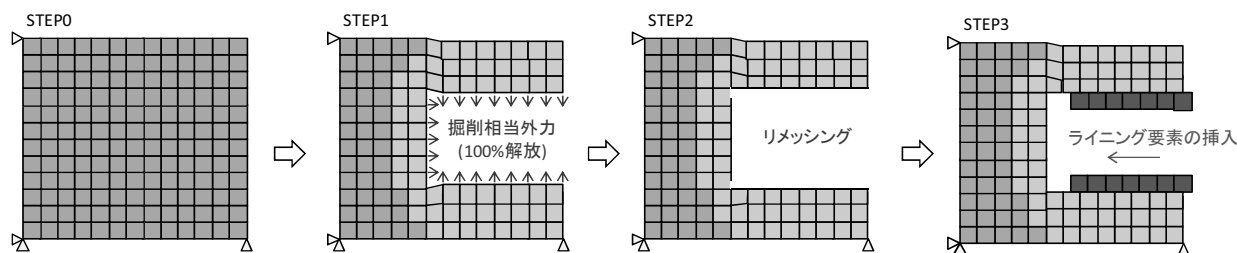


図-3 三次元逐次掘削解析の解析手順³⁾

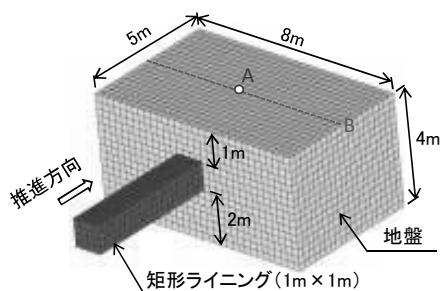


図-4 解析モデル概要図（三次元逐次掘削解析）

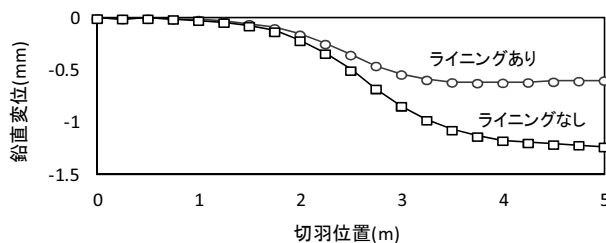


図-5 切羽位置と点Aにおける鉛直変位量の関係（三次元逐次掘削解析）

されている三次元逐次掘削解析を用い、地盤が一様条件である等の理想状態における地表面沈下量を算出した。次に、二次元応力解放法とPeckの方法²⁾を用いて地表面変位量を算出し、三次元逐次掘削解析と一致する応力解放率 α および地山ロス率 V_l を把握した。

2. 三次元逐次掘削解析

(1) 解析方法

推進工法は、掘削面の变形後に覆工を構築する通常のトンネル工法と違い、变形した掘削面を成形した後にライニングの推進が行われる。これを表現するため、三次元逐次掘削解析の解析手順は図-3³⁾のようになる。

- ・STEP1：掘削要素削除，掘削相当外力作用
- ・STEP2：掘削面の成形（リメッシング）
- ・STEP3：ライニング要素の挿入
(接触解析法を利用)

解析モデル概要図を図-4に示す。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、比較の実績が多いシールド工法や山岳工法の方法を準用した。具体的には、地盤は線形弾性体とし、地盤の変形係数 E は12500kN/m²（=2500N），ポアソン比 ν は0.3とした。

(2) 検証結果

図-5に、三次元逐次掘削解析から得られた、切羽位置に伴う地表面上点A（図-4参照）における鉛直変位量を示す。これによるとシールド工法や山岳工法と同様に、切羽が点A直下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。なお、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。

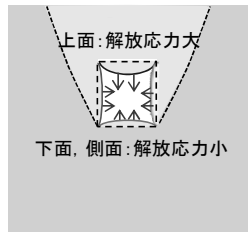


図-6 応力非一様解放の概念図

表-1 二次元応力解放法の解析ケース

解析 ケース	応力解放率(%)				備考
	α_1	α_2			
		上面	側面	下面	
case1	40	40	40	40	解放面一様
case2		40	40	20	
case3		40	40	0	

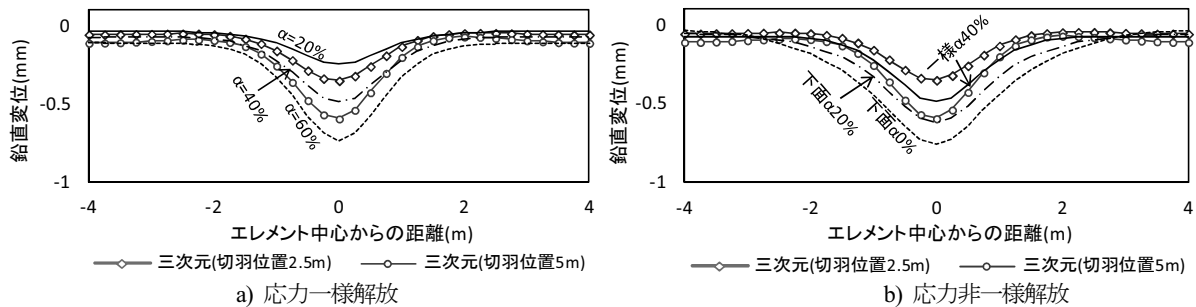


図-7 横断方向の鉛直変位分布（三次元逐次掘削解析と二次元応力解放法）の比較

3. 二次元応力解放法

(1) 三次元逐次掘削解析との比較

二次元応力解放法によって地表面変位量を算出し、三次元で得られた地表面変位量と一致するときの応力解放率 α を検証した。解析に用いたモデル領域や地盤条件は三次元と同様とした。

図-7a)に、三次元逐次掘削解析（切羽位置2.5m, 5m）の地表面上B線（図-4参照）における鉛直変位分布と二次元応力解放法の結果（ $\alpha=20, 40, 60\%$ ）を比較した図を示す。この中で最大変位量に着目すると、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。この要因として、単に工法の違いによるものだけではなく、掘削断面形状の影響も含まれると考えられる。二次元応力解放法では、一般的に掘削面に対して一様に応力解放率を設定するが、本解析で対象としている矩形断面では、その形状効果により、掘削面上面よりも側面および下面のほうが解放力は小さい、すなわち側面および下面に設定される応力解放率 α の値は上面よりも小さい可能性がある。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。

そこで、これらの違いを深度化して考察するため、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。

(2) 応力非一様解放による影響

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、地表面変位量にどのような影響を及ぼすかを検証した。

図-6に応力非一様解放の概念図を示す。ここでは式(3)のように、物体力 g と掘削前の応力 σ_0 に乘じる応力解放率をそれぞれ α_1, α_2 に分離し、 α_2 について掘削面ごとに設定した。

$$F_E = \int_{V_E} (\alpha_1 N^T g - \alpha_2 B^T \sigma_0) dV \quad (3)$$

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

表-1に解析ケースを示す。本検討では下面からの解放力が地表面変位に与える影響を把握するため、下面の応力解放率を変えて解析を行った。case1は解放面一様に応力解放率を設定した基本ケース（ $\alpha=40\%$ ）とし、case2, 3は、下面の応力解放率 α_2 の値をそれぞれ20%, 0%に低減させたケースとした。

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を比較した図を図-7b)に示す。ここで、最大変位量に着目すると、三次元（切羽位置5m）と一致するときの応力解放率は解放面一様に設定した場合で50%程度だったが、応力解放率を非一様に設定した場合では、50%よりも小さいcase2（上面・側面40%, 下

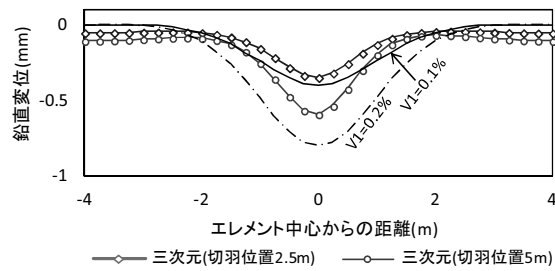


図-8 横断方向の鉛直変位分布（三次元逐次掘削解析と Peck の方法²⁾）の比較

面20%)で一致することが分かった。また、case1～case3を比較すると、下面の応力解放率が小さいほど最大変位量は大きくなることが分かった。これは下面の応力解放率を小さくすることで上向きに作用する解放力が小さくなったためであると考えられる。

4. 理論的解法

本研究では既往事例の少ない推進工法を対象に有限要素法を用いて地表面変位について検証してきたが、理論的解法を用いてある程度の精度をもった予測が可能であれば実務上有意であると考えられる。

式(2a), (2b)に示すPeckの方法²⁾は地表面沈下量の横断方向分布が正規確率分布に従うと仮定して沈下量を予測するもので、掘削工法や土質によって異なる地山ロス率 V_1 （地表面沈下面積と掘削断面積の比）を経験的に決めることで簡易に算定できる。

よって、本章ではPeckの方法²⁾を用いて地表面変位分布を算出し、三次元逐次掘削解析と一致するときの地山ロス率 V_1 の目安を検証した。

地表面変位分布図について三次元逐次掘削解析（切羽位置2.5m, 5m）とPeckの方法を比較した図を図-8に示す。最大変位量に着目すると、三次元と一致するときの地山ロス率 V_1 は0.1～0.2%程度であることが分かる。Peckの方法²⁾は近年では海外工事で用いられることが多いが、既往の事例による地山ロス率 V_1 の目安は0.2～2%とされている⁴⁾。この値は本研究で設定した解析条件と比べて掘削断面積が大きく、工法もNATM等を対象としたときのものであるが、本研究結果は、この範囲に近い値であることが分かった。

5. おわりに

本検討では、矩形断面を有する推進工法を対象とし、三次元逐次掘削解析により得られた地表面の最大変位量と一致するときの、二次元応力解放法における応力解放率 α および理論式としてPeckの方法を用いた場合の地山ロス率 V_1 を検討した。特に、二次元応力解放法では応力

非一様解放（上面と側面、下面の応力解放率の違い）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。

- 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、この値はより大断面の他工法と比べると比較的大きく、従来の方法をそのまま適用することに課題があるものと考えられた。
- 対象とした掘削断面形状は矩形であることから、二次元応力解放法にて解放面の応力非一様解放による影響を検証した結果、応力解放率が上面および側面40%、下面20%で三次元と一致し、一様に設定したa)の50%よりも小さい値となった。これは下面の応力解放率を小さくすることで上向きに働く解放力が低減されたためと考えられる。
- 三次元逐次掘削解析とPeckの方法²⁾を比較した結果、三次元の地表面変位量と一致するときの地山ロス率 V_1 は0.1～0.2%程度であった。

本研究は解析のみの比較であるため、実際と異なる可能性がある。また、最大変位量だけでなく、変位の広がりについても重要な問題であるため、変位分布形状に着目した検証が必要である。今後はこれらを踏まえ、実験や現場計測を行い、比較・検証していく予定である。

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。
- Peck, R.B. : Deep excavation and tunneling in soft ground, 7th Proc. I.S.M.F.E., Vol. State of the Art.
- 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.
- Coulter, S, Martin, C.D. : Effect of jet-grouting on surface settlements above the Aeschertunnel, Switzerland, Tunnelling and Underground Space Technology, No.21, pp.542-553, 2006.