

鉄道トンネル上部の切土工事の影響評価

An estimation of the influence of open cut excavation above an existing railway tunnel

小島芳之¹⁾，朝倉俊弘²⁾，岡野法之³⁾，齋藤 貴⁴⁾，重田佳幸⁵⁾

Yoshiyuki KOJIMA, Toshihiro ASAKURA, Noriyuki OKANO, Takashi SAITO, Yoshiyuki SHIGETA

In recent years, it is often the case that a new tunnel is constructed or a housing site is developed in the vicinity or just above an existing tunnel. It requires precise estimation of the influence of the construction work on the tunnel in service.

The authors mentioned about a case of open cut excavation above an existing tunnel in soft ground, and to show the characteristics of deformation and other behaviors of the tunnel based on the measurement results.

The authors then carried out 2-D FEM analysis while to know how to decide the section for analysis and determine input parameters of the ground. Based on the vertical displacement of the tunnel obtained, the authors analyzed the distribution of vertical displacement in the longitudinal direction using a beams model placed on an elastic floor to discuss the stability of existing tunnel and the safety of train operation and evaluate the applicability of the analysis results with measurements.

This paper reports the results of the study.

Key Words : Tunnel, cutting, Adjacent construction, 2-D FEM analysis

1. はじめに

近年、既設トンネルに近接してのトンネル新設や直上での大規模な造成工事等が増大し、既設トンネルに関する事前の影響予測に高い精度が求められるようになってきている。特に鉄道トンネルにおいては、トンネル自体の構造物としての安定性の他に、建築限界と列車走行安全性の確保が重要な問題であるため、F E M解析等による定量的な予測が行われることが多い。しかし、解析断面や入力物性値の設定方法あるいはトンネル縦断方向のモデル化の考え方等により、これらの結果は、必ずしも実際の地山あるいはトンネル等の挙動を適切に予測できないことが多いため、実務に適する合理的な手法の確立が望まれている。

このような状況に鑑み、鉄道総研では、「既設トンネル近接施工対策マニュアル」(1995.1)¹⁾を策定し、影響評価の実務に供してきた。しかしながら、適切な解析法を提示するには至らなかった。そこで筆者らは、近接施工によるトンネルおよび周辺地山の変形挙動の影響評価法を確立するために、計測実績の分析やシミュレーション、実験などを進めている²⁾。

本報告は、軟岩地山内の鉄道トンネル上部において大規模な切土工事が行われた事例をとりあげ、そこで行った計測結果と解析結果の比較検討結果について示したものである。まず、計測結果に基づき切土に伴うトンネルの変形挙動の特徴について示した。次に解析断面をどのように選定するか、また、地盤の入力物性値をどのように設定するか等に留意し、切土工事の施工後に行ったトンネル横断面の2次元F E Mによるシミュレーション結果と、その結果より得られたトンネル路盤面の鉛直変位に基づき弾性床上の梁モデルにより求めたトンネル縦断解析結果を示すとともに、実測値との適合性について評価した。

1)正会員	(財)鉄道総合技術研究所	技術開発事業本部	構造物技術開発事業部	主任技師
2)正会員	(財)鉄道総合技術研究所	技術開発事業本部	主幹技師	
3)正会員	(株)東日本旅客鉄道	上信越工事事務所	工事第二課	主席
4)正会員	(財)鉄道総合技術研究所	技術開発事業本部	構造物技術開発事業部	技師
5)正会員	(株)ダイヤコンサルタント	関東支社東京支店	環境防災部	主任

2. 工事概要

本現場は、丹沢山地のほぼ南西に位置し、標高は170～270mの高低差100m程度の山地である。トンネル周辺の地質は、主に洪積世の火山性礫岩（孔内水平載荷試験の変形係数 $D: 6,000 \sim 9,000 \text{ kgf/cm}^2$ ）で、礫径 $\phi 2 \sim 5 \text{ cm}$ 、最大 $\phi 20 \text{ cm}$ 程度の安山岩や流紋岩などの礫と基質からなる。

施工概要は、図-1（縦断方向）、図-2（横断方向）に示すようなトンネル上部の範囲を切取後、工業団地を造成するものである。切土工事期間は、平成8年11月から平成9年8月までであり、機械掘削により行われた。

トンネルは、全長約250mの単線断面で、側壁が煉瓦、アーチが無筋コンクリート、インバート無しの構造である。事前に実施した調査では、全体的に覆工は健全な状況にあった。なお、切土量が多い区間において、事前防護として裏込注入工がなされた。

除荷荷重が最大となるのは、図-1中の計測No.7～8断面である。

3. 計測

3.1 計測項目

計測項目は、図-1に示すように、内空変位、覆工ひずみ、亀裂変位、路盤鉛直変位の4項目である。計測機器は、それぞれ内空変位計、覆工ひずみ計、亀裂変位計、レベルを用いて計測を実施した。また、内空変位計測の4測線および覆工ひずみの計測位置を図-3に示す。

3.2 計測結果

(1) 内空変位

No.7断面における内空変位及び温度変化を図-4に示す。

図-4より、内空変位は、切土開始後しばらくの間（ステップⅠ～Ⅲ）はほとんど変化がないが、その後、切土の進捗に応じてB測線（■）を除き全体的に縮少（最大2mm）していることが分かる。変形モードとしては、山側の切土量が相対的に多いことから、山側斜め上方に向かい、引張られるように縦長に変形したものと考えられる。

(2) 覆工ひずみ

No.7断面に設置した覆工ひずみ計の計測結果（増減）及び測定時の温度変化を図-5に示す。

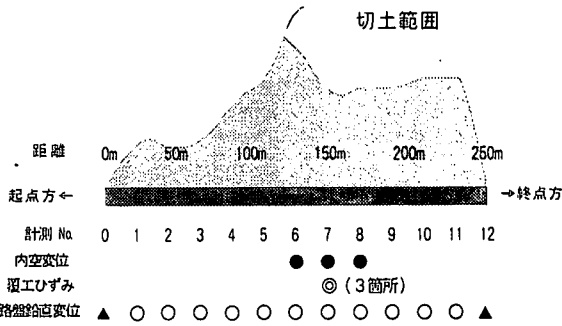


図-1 トンネル縦断方向の土被りと切土範囲および計測項目

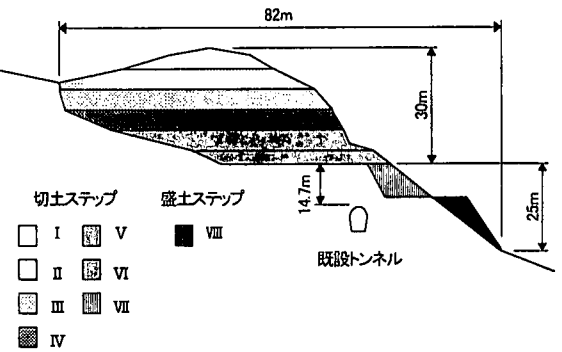


図-2 No.7断面における土被りと切土範囲

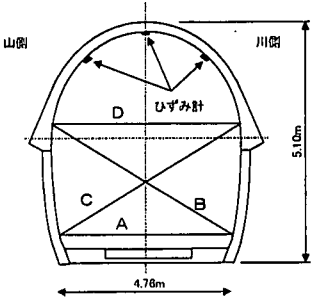


図-3 内空変位計測測線及びひずみ計測位置

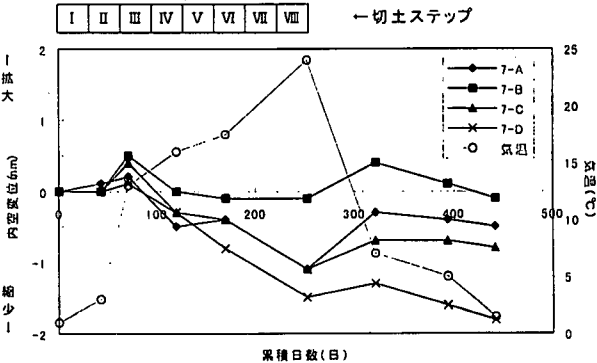


図-4 内空変位の経時変化

切土工事開始後、天端（■）および山側アーチ（▲）で圧縮傾向を示している。本来ならば、気温の上昇に伴い、覆工ひずみは引張傾向となるものと考えられる。しかし、切土初期の段階では、トンネルが山側上部に引張られるような挙動を示し、天端、山側アーチでは圧縮傾向となったものと考えられる。その後、天端の圧縮傾向のみが強まっていくが、切土位置がトンネル直上に移動するにつれて、トンネル直上に変位・変形したものと考えられ、(1)で述べた内空変位の挙動と一致する。

川側アーチ（◆）については、若干鈍い挙動となっているが、これは、ゲージ貼付位置の状況等の影響によるものと考えられる。

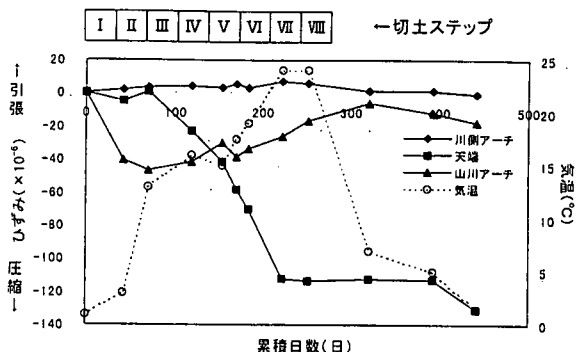


図-5 覆工ひずみの経時変化

(3) 路盤鉛直変位

切土に伴う各断面における路盤鉛直変位の変化を図-6に示す。

切土が進むにつれ、路盤は切土量の多いNo.7, 8断面付近を中心に隆起していることがわかる。

最終的にNo.8断面が最大となっている。これは、掘削土量が最大となるのはNo.7断面であるが、切土範囲の中心が、ほぼNo.8断面であることや、地質的なものが要因となっているものと考えられる。

また、切土終了後もしばらくの間（約3ヶ月程度と考えられる）、隆起が進行しているが、これはクリープ的な挙動と考えられる。

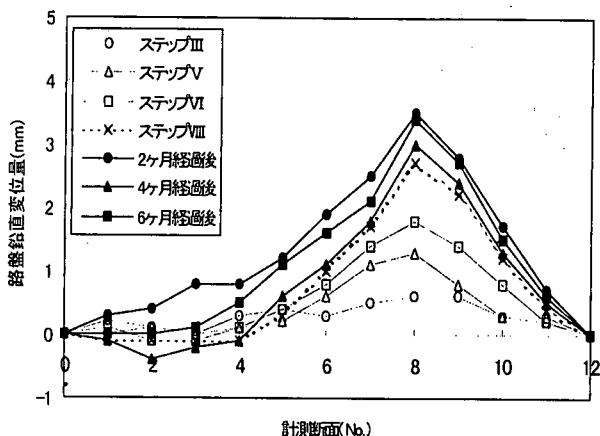


図-6 路盤鉛直変位の変化

4. シミュレーション

4.1 解析方針

2次元FEMによるトンネル横断方向のシミュレーションにあたり、①解析断面の設定方法、②地盤の入力物性値の設定方法に留意した。また、3次元的な影響を表現するため、地山の縦断方向へのブーシネスクの応力分散式により、切土部の地山の単位体積重量を低減した。

トンネル縦断方向の変形挙動を予測するため、弾性床上の梁モデルによるシミュレーション解析を実施した。

以下にそれぞれの解析方法と解析結果および計測結果を示す。

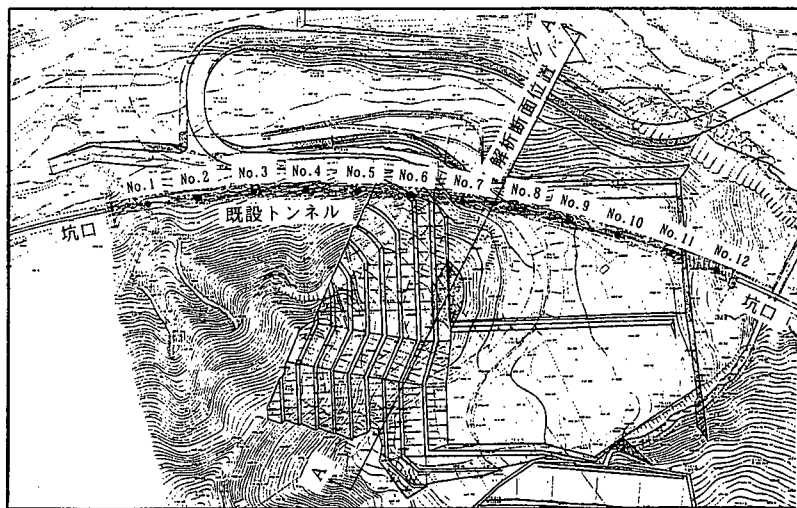


図-7 切土状況と解析断面

4.2 解析手法

(1)トンネル横断方向解析

既設トンネルと切土の関係および解析断面の位置を図-7に示す。また、図-8に解析モデル図を、表-2に地山の入力物性値を示す。

解析断面は、切土高さの平面的な分布状態から、切土量が最大となるような断面(A-A断面)を選定した。

地山の入力物性値のうち変形係数については繰り返し载荷による孔内水平载荷試験を実施し、地山の初期応力レベルに相当する除荷側の変形係数を求めた。その結果、変形係数は深度方向に増大する傾向を示し、载荷側で6000～9000kgf/cm²、除荷側で、载荷側の1.5倍程度である9000～16000kgf/cm²の値を示した。解析には、トンネルF.L付近での除荷側の変形係数である15800kgf/cm²を用いた。

横断方向解析では、トンネルと地山の接触状態を再現するため、トンネル半径方向に棒要素を設けて地山からの圧縮荷重のみを覆工に作用させた。

また、モデル奥行き方向の効果を考慮するため以下のような手順により、ブーシネスクの応力分散式³⁾を用いて切土部の地山重量を低減した。

- ①解析断面を幅Bの数個のブロックに分割する(図-9(a))。
- ②各ブロック切土面直下での等分布帯状荷重時の地中鉛直応力 σ_z ($z=0$ のとき)を求める。
- ③各ブロックの奥行き方向の载荷幅 L_1, L_2 としたときの等分布長方形载荷時の地中鉛直応力 σ'_z ($z=0$ の時)を求める(図-9(b), (c))。
- ④解析に用いる切土部の地山単位体積重量 $\gamma t'$ は、 $\gamma t' = \gamma t \cdot (\sigma'_z / \sigma_z)$ により算出する。

STEP	内 容
1	初期応力解析
2	トンネル掘削
3	掘工建て込み
4	1次切土(EL+230m)
5	2次切土(EL+220m)
6	3次切土(EL+210m)
7	4次切土(EL+205m)
8	5次切土(EL+195m)+盛土

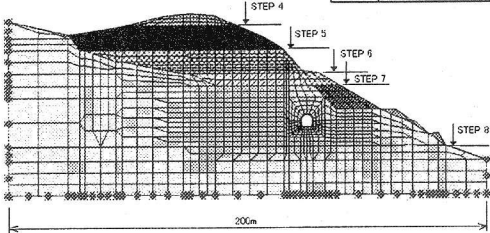


図-8 解析モデル

表-2 地山の入力物性値

	CASE 1 単位体積重量を 低減した場合	CASE 2 単位体積重量を 低減しない場合
地山の単位体積重量 γt (tf/m ³)	0.38～16.49	2.57
切土部の単位体積重量 $\gamma t'$ (tf/m ³)	2.57	2.57
変形係数 D_0 (kgf/cm ²)	15800	15800
ポアソン比 ν	0.35	0.35

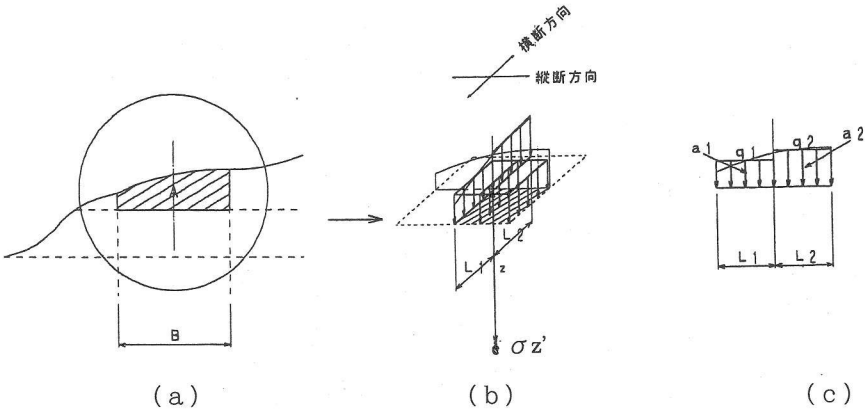


図-9 地山重量低減手法の概念

(2)トンネル縦断方向解析

トンネル縦断方向の解析は、弾性床上の梁モデルにより解析を行った。トンネル横断方向解析により得られた横断解析位置 (No.7+15m) でのトンネル路盤の鉛直変位に縦断方向解析値をあわせトンネル縦断方向の変位分布を予測した。

なお、解析に用いた地盤反力バネは、孔内水平載荷試験で得られた地山変形係数の深度に伴う増加傾向を考慮し設定した、

4.3 解析結果

(1)横断方向解析

路盤鉛直変位の解析結果と No.7 断面と No.8 断面の計測結果を図-10 に示す。路盤鉛直変位は、CASE1 で最大値 3.2mm (隆起) となった。また、CASE2 では、最大値 3.7mm (隆起) となり地山重量を低減した場合の方が15%程度小さな変位量となった。

内空変位の解析結果 (水平測線) と No.7 断面と No.8 断面の計測結果 (D 測線) を図-11 に示す。内空変位は、最大値-0.5mm (縮小) となった。

(2)縦断方向解析結果

路盤鉛直変位の解析結果及び計測結果を図-11 に示す。路盤鉛直変位の最大値は、No.7 断面で最大値 3.8mm (隆起) となった。

4.4 計測値との比較

路盤鉛直変位は、図-10 に示すように解析値で 3~3.5mm となり、3次元効果を考慮することにより、より計測結果に近い解析値をえられた。

ただし、施工の進捗に伴う解析値と計測値との変位が増加する割合に差違が生じた。これは、今回の解析では、地山を線形弾性体としてモデル化したためと考えられる。すなわち、地山の応力レベル、ひずみレベルの変化に依存した挙動と前述のように地山のクリープ的な挙動に原因があるものと考えられる。

路盤鉛直変位の縦断方向の解析値をみると、図-12 に示したように No.7 断面で最大となり、最大値の発生位置は計測結果と比べると 20m 程度のずれが生じたが、変位分布は概ね一致した。

なお、解析結果の No.4 断面、No.5 断面の微少な沈下傾向は、解析上盛土荷重が作用した結果である。

内空変位は、図-11 に示したように解析値では、-0.5mm (縮小) であり、No.7 断面と No.8 断面の計測値の中間の値を示した。また、解析値の最終値は、No.8 断面の計測値に近い値となった。

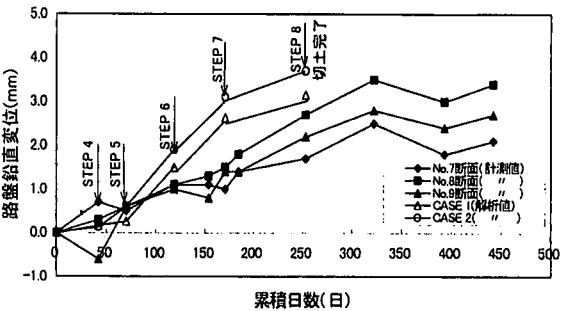


図-10 主要断面の路盤鉛直変位

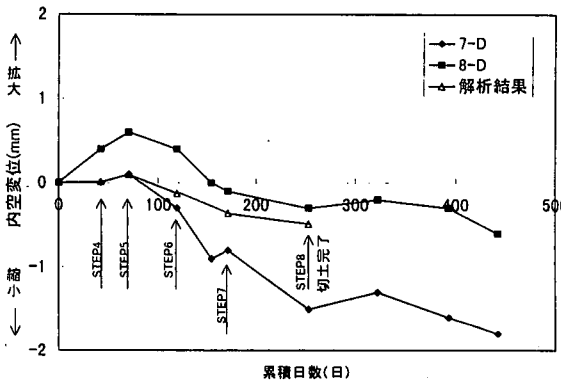


図-11 主要断面の内空変位経時変化

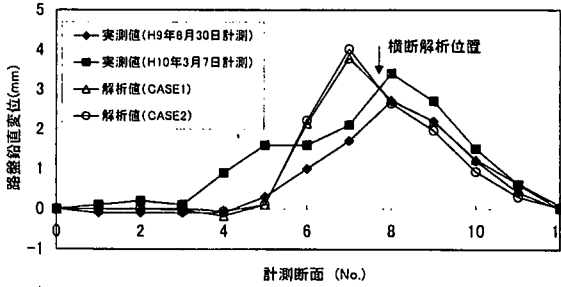


図-12 トンネル縦断解析結果

5. まとめ

切土に伴うトンネルの挙動の特徴及び影響評価法について、今回の事例分析より得られた知見は以下のとおりである。

(1)計測手法

内空変位、覆工ひずみ、路盤鉛直変位の計測結果から、切土がトンネルに近づくほど、トンネルの隆起・変形（縦長に変形）が顕著になり、切土完了後は、クリープによる時間遅れの挙動が半年間程度継続した。これらより、トンネルの安全性を確認するため、影響計測は、切土面との離隔に応じて計測間隔を密にし、隆起・変形の収束確認のため、施工後一定期間継続することが望ましい。

(2)影響予測手法

①トンネル横断方向の予測は、複雑な3次元形状を簡易に評価するためには、以下を考慮した2次元FEM解析により、実務上十分な結果が得られる。

a. 切土量が最大となる断面をモデル化する。

b. 3次元効果を簡易に表現するため、地山の縦断方向へのプーシネスクの応力分散式により切土部の地山重量を低減させる。

c. 地山の弾性係数としては、孔内載荷試験により得られた地山の初期応力レベルに応じた除荷時弾性係数を用いる。

②トンネル縦断方向の路盤変位分布は、トンネルを弾性床上の梁としてモデル化し、横断方向の解析位置での隆起量が等しくなるように地山のばね定数を設定したモデルにより、適切に予測することができる。

なお、地山物性あるいは切土の程度によっては、除荷時のひずみレベルや拘束圧レベルに依存した地山の非線形特性のモデル化や、時間依存性のモデル化が必要であると考えられる。ただし、今回のような比較的微小な影響が想定される場合には、提案した手法で十分であると考ええる。

6. おわりに

斜め上部地山の切土に伴う既設トンネルへの影響を、計測により把握した。また、施工後に実施した3次元の影響を考慮したトンネル横断面の2次元FEMと、トンネル縦断面の弾性床上の梁ばねモデルによる解析により、影響予測解析の1つの手法を示し本解析手法の妥当性を検証した。

現在、筆者らは、切土や盛土などによるトンネルへの影響実績の収集・分析を行うとともに、FEMパラメータ解析、トンネル上部地山の載荷・除荷の模型実験などを実施している。これらの一連の研究により、上部地山の載荷・除荷に伴う地山およびトンネルの変形挙動を明らかにするとともに、地山の力学的な非線形特性（歪み依存性、拘束圧依存性、時間依存性など）を適切にモデル化できる影響解析手法を提案し、今後ますます増大するであろう近接施工に対する定量的影響評価法を確立したいと考えている。

参考文献

- 1) 鉄道総研：既設トンネル近接施工対策マニュアル, 1995.1
- 2) 小島他：トンネル上部の盛土による影響解析，土木学会第 53 回年次学術講演会講演概要集，III-B80, 1998.10
- 3) 鈴木音彦著：新版例題演習 土質工学，東洋書店，1977.4