

既設トンネルに近接した切土工事のパラメータ解析

Parametric Analysis on Existing Tunnel Deformation Behavior
caused by Ground Surface Excavation

小島芳之¹・野城一栄²・川島義和²・重田佳幸³・工藤暢章⁴

Yoshiyuki Kojima, Kazuhide Yashiro, Yoshikazu Kawashima
Yoshiyuki Shigeta and Nobuaki Kudo

¹正会員 博士(工学) (財)鉄道総合技術研究所 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

²正会員 (財)鉄道総合技術研究所 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

³正会員 (株)アイコンサルタント (〒331-8638 埼玉県さいたま市北区吉野町2-272-3)

⁴正会員 博士(工学) (株)アイコンサルタント (〒331-8638 埼玉県さいたま市北区吉野町2-272-3)

To establish an adequate evaluative method of existing tunnel deformation behaviors due to ground surface excavation above the tunnels, numerical parametric analyses using two dimensional FEM have been conducted. To sum up the contents; 1) Tunnel deformation behaviors are depend on the h/B (h : final overburden, B : excavation width). 2) Tunnel deformation convergence is maximum in case of $h/B=0.5$ (horizontal convergence) or $h/B=0.4$ (vertical convergence). 3) Lining takes a role of saving deformation due to ground surface excavation in case of soft ground better than hard ground. General information of tunnel deformation behavior makes cost to redcut for numerical evaluation work.

Key words: Ground surface excavation, Existing tunnel, Deformation behavior, Evaluation method, Case study, FEM

1. はじめに

昨今、土地の有効利用の観点から既設トンネルに近接して大規模な造成工事などの事例が多く報告されている(写真-1)。このような既設トンネルに近接した切土工事によるトンネルの変形挙動については、計測実績がいくつか報告されている¹⁾ものの、これらが統一的に論議されることはほとんどなく、個別の問題として評価されてきた。そのため、影響評価の実務では、影響を過大評価あるいは過小評価

し、事前の対応にバラツキが生じることが否めなかった。このような状況に鑑み、(財)鉄道総合技術研究所では、「既設トンネル近接施工対策マニュアル」(1995.1)²⁾を作成し、上部切土をはじめとした各種の近接施工によるトンネルへの影響区分法を示した。この区分法は、現在鉄道事業者等において広く活用されている。このなかで、近接工事が既設トンネルに影響を及ぼす可能性がある場合、影響予測が必要とされているが、トンネルへ影響する要因(近接施工の種類、工事規模、既設トンネルとの位置関係など)が多岐にわたるため、その検討方法は個々の現場の判断に委ねられているのが現状である。

筆者らは、これまでに31の施工事例を分析しトンネルの変形挙動の実態を把握してきた(図-1)³⁾。また、切土幅、覆工剛性、地山剛性、覆工・地山間の接触状態、初期地圧条件(K_0)をパラメータとした二次元FEMによる比較解析を行い、各要因による影響の特質を整理してきた³⁾。本稿では、従来の検討で整理していなかった残存土被り h (切土後の土被り)をパラメータとした二次元弾性FEMによる比較解析を実施した結果について報告するものである。



写真-1 トンネル上部の切土工事の例

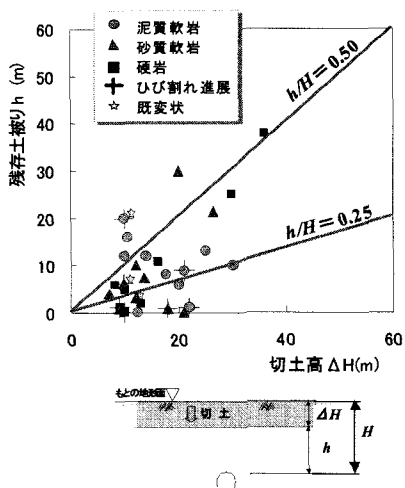


図-1 トンネル上部の切土工事の実績分布

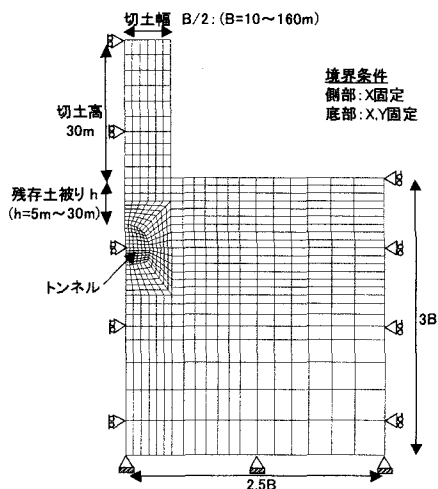


図-2 解析モデル

2. 解析概要

(1) 解析モデルの設定

図-2および図-3に解析モデルを示す。モデルを単純にするため、検討の最初のステップとして切土形状に切土幅 $B/2$ ($B=10\sim160\text{m}$)、切土高さ 30m を有する半断面モデルを設定した。トンネル断面は新幹線の標準断面形状である。トンネル覆工はインバート部も含めて梁要素でモデル化し、S.L.部、脚部においては施工状況を考慮し、ピン結合とした。トンネル覆工は地圧を受けていない健全な構造であることを前提とし、覆工にはトンネル掘削時の地山解放応力を負担させない。覆工部と地山部にはジョイント要素を配し、覆工と地山との接触状況を考慮した。ジョイント要素の有効性については既往の報告で検討されている³⁾。一般に山岳工法の覆工では、覆工と地山の間が必ずしも一体になっていないと考えられる。そのため、地山と覆工間に過度な引張応力やせん断応力が作用した場合、ジョイント要素により両者を分離・スライドさせる。ジョイント要素を用いることにより内空変位が軽減され、現実的なトンネルの変形挙動を再現できる。

(2) 解析条件

表-1に入力物性値を示す。切土によるトンネルの挙動を簡略に説明できるようにするため、地山の構成式は線形とした。ジョイント要素は引張強度を 1.0×10^{-4} (kN/m^2) とし、バネ定数を地山相当に設定した。解析ステップは、①自重解析、②トンネル掘削(応力解放率100%)ならびに覆工・インバート建込、③上部切土とした。

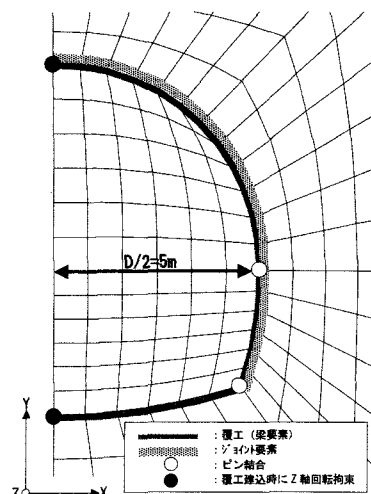


図-3 トンネル覆工部

(3) 解析ケース

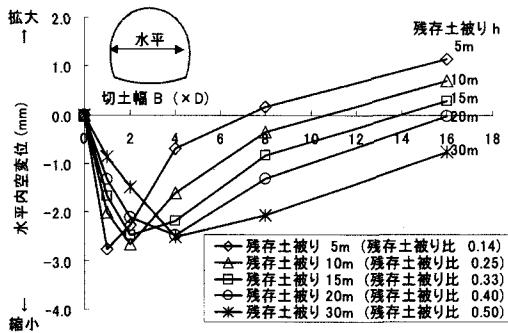
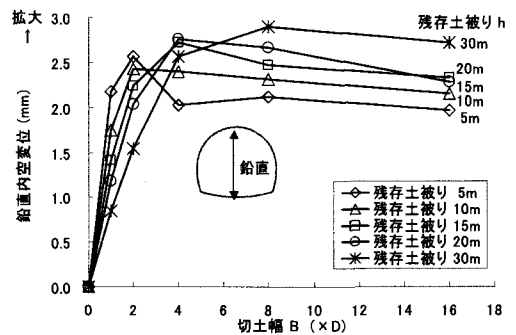
表-2に解析パラメータを示す。パラメータを①切土幅 $B/2$ 、②残存土被り h 、③地山変形係数 E として、切土幅を5ケース、残存土被りを5ケース、地山変形係数を4ケース設定し、組み合わせた100ケースについて解析を実施した。

表-2 解析パラメータ

項 目	設定値
切土幅 $B/2$ (m)	5, 10, 20, 40, 80
残存土被り h (m)	5, 10, 15, 20, 30
地山変形係数 E (MPa)	50, 500, 1000, 5000

表-1 入力物性値

入 力 値	地山変形係数(E) (MPa)	ポアソン比(ν)	単位体積重量(γ) (kN/m^3)	断面積 (m^2)	断面二次モーメント (m^4)
地 盤	50	0.3	20	—	—
	500				
	1000				
	5000				
覆 工 インバート	2.2×10^4 ($q_u=18\text{N/mm}^2$ 相当)	0.2	23.5	0.7	0.02858
				0.5	0.01041
ジョイント	バネ定数 $K_n(K_s)$	引張強度 $\sigma_t(\text{kN/m}^2)$	閉 合 量 (m)	粘 着 力 $C(\text{kN/m}^2)$	内部摩擦角 $\phi(^{\circ})$
	50(5)				
	500(50)				
	1000(100)				
	5000(500)				
		1.0×10^{-1}	1.0×10^{-5}	70	25
				500	40
				500	40
				4000	55

図-4 (水平)内空変位と切土幅との関係
(地山変形係数 $E=1000\text{MPa}$)図-5 (鉛直)内空変位と切土幅との関係
(地山変形係数 $E=1000\text{MPa}$)

3. 解析結果

解析ケース数が多いため、ここでは切土幅、残存土被り、地山変形係数に着目し、解析結果の特徴を示す一部のケースについて説明する。解析結果については全て切土後（切土高30m）の結果である。なお本検討では、切土高さが固定されているため、残存土被りの違いは残存土被り比（残存土被り／切土前の土被り）の違いと考えて良い。

(1) 切土幅と内空変位の関係

図-4、図-5に地山変形係数が1000MPaの場合の切土幅と内空変位の関係を示す。なお、水平内空変位はトンネルS.L.部、鉛直は横断中心線上の値を示した。

図-4より切土幅Bと水平内空変位との関係をみると、切土幅 $B=1D \sim 4D$ で3mm程度縮小した後、以降切土幅が増加するにしたがい、内空変位は拡大方向へむかう傾向にある。切土幅が16Dになると、残存土被り $h=5m \sim 15m$ の場合には、切土によって水平内空変位は拡大することがわかる。

図-5より切土幅Bと鉛直内空変位との関係をみると、全ての残存土被りで内空変位は拡大するが、

切土幅 $B=1D \sim 8D$ で2～3mm程度拡大したのち、以降切土幅が増加するにしたがい、内空変位は縮小方向へむかう傾向にある。しかし切土幅が16Dになっても切土によって鉛直内空変位は縮小することはない。

切土幅が増加するにしたがい、ある切土幅で内空変位量が最大となり、切土幅16Dのような大規模な切土の場合には水平・鉛直内空変位ともに拡大する結果は前述した施工実績の収集結果で得られている傾向³⁾に一致する。

(2) 残存土被りと内空変位の関係

図-6、図-7に地山変形係数が1000MPaの場合の残存土被りhと内空変位の関係を示す。図-6より残存土被りhと水平内空変位との関係をみると、残存土被りhが増加するにしたがい、水平内空変位は切土幅 $B=1D$, $2D$ の場合は縮小変位量が減少する方向へ、切土幅 $B=4D$ の場合は縮小変位量が増加する傾向へ、切土幅 $B=8D$, $16D$ の場合は拡大から縮小に転じ、縮小量が増加する傾向がみられた。

図-7より残存土被りhと鉛直内空変位との関係をみると、図-6に示した水平内空変位と逆相関の傾向が見られる。切土幅 $B=1D \sim 16D$ のいずれも、鉛直内空変位は拡大するが、残存土被りhが増加するに

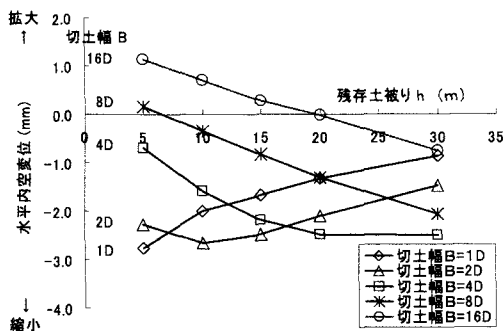


図-6 (水平)内空変位と残存土被りとの関係
(地山変形係数 $E=1000\text{MPa}$)

たがい、切土幅 $B=1\text{D}$, 2D の場合は拡大変位量が減少する方向へ、 $B=4\text{D}$, 8D , 16D では拡大変位量が増加する傾向にある。水平・鉛直内空変位量いずれにおいても、切土幅 B の違いにより残存土被り h と内空変位との関係を結ぶ線に変曲点が見られた。

なお、図-6, 7は残存土被りが増加するほど既設トンネルへの影響も大きくなる印象を与えるが、これは地盤を深さ方向に一樣な線形材料として解析したため、実際の地盤では深いほど一般に硬くなること、除荷により非線形性を有すること、不連続面等の存在によって非弾性挙動を示し得ること、3次元的にも影響を受けること、について考慮する必要がある。

(3) 地山変形係数と内空変位の関係

図-8に地山変形係数を変化させた場合の切土幅と内空変位の関係を示す。グラフ縦軸には内空変位に関する指標として、内空変位 δ (m)に地山変形係数 E (MPa)を乗じた値 $\delta \cdot E$ を示した。図-8をみると、地山は線形であるため、内空変位量 δ は地山変形係数の比にほぼ反比例するが、 E が小さい領域においては $\delta \cdot E$ 値が小さくなる傾向がある。これは軟らかい地盤においては覆工の剛性により変形が抑制される効果が生じ始めていることを意味するものと考えられる。

4. 影響評価指標の検討

FEMによる解析結果から、本報告で扱った切土高を固定した切土パターンの切土幅、残存土被り、地山変形係数が内空変位へ与える影響をより一般化し、定性的な傾向を得ることで影響評価手法の画一化を試みた。

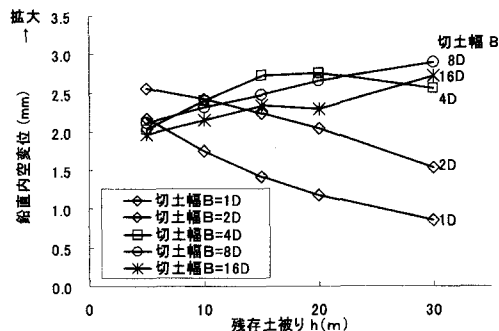


図-7 (鉛直)内空変位と残存土被りとの関係
(地山変形係数 $E=1000\text{MPa}$)

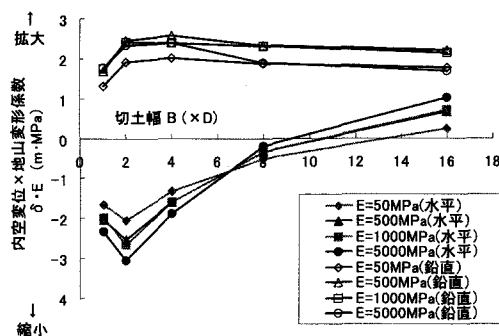


図-8 (水平)内空変位と地山変形係数との関係
(残存土被り比 0.25)

残存土被り h を切土幅 B で除した h/B を指標とし、変数を正規化した。図-9, 図-10に全解析ケース(100ケース)の指標 h/B と内空変位量との関係を示す。グラフ縦軸には内空変位に関する指標として、内空変位 δ (m)に地山変形係数 E (MPa)を乗じた値 $\delta \cdot E$ を示した。

図-9, 図-10をみると、内空変位 $\delta \times$ 地山変形係数 E の積 $\delta \cdot E$ 値は h/B に対して正規化されることがわかる。例えば残存土被り $h=5\text{m}$, 切土幅 $B=10\text{m}$ の場合と $h=20\text{m}$, $B=40\text{m}$ の場合($h/B=0.5$)のいずれの $\delta \cdot E$ 値は水平内空変位に関しては $-2 \sim -3$ (m・MPa)縮小し、鉛直内空変位に関しては $+2 \sim +3$ (m・MPa)拡大する。

h/B が増加するにしたがい、 $\delta \cdot E$ 値はゼロに漸近する方向に向かっている。これは、残存土被り h が増加するにしたがい、切土の影響が漸減することを示す。また h/B がより小さくなる(切土幅 B が大規模になる)と切土後の水平内空変位は拡大に転じる。これは前述した施工実績の収集結果で得られている傾向³⁾に一致する。

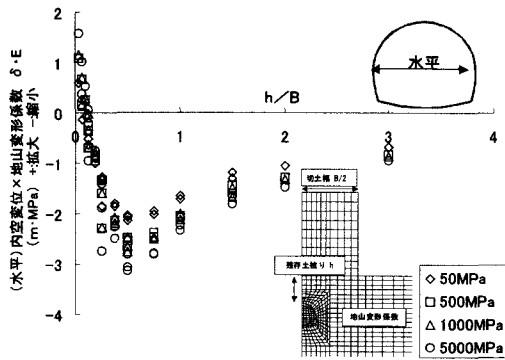


図-9 (水平) 内空変位とh/Bの関係

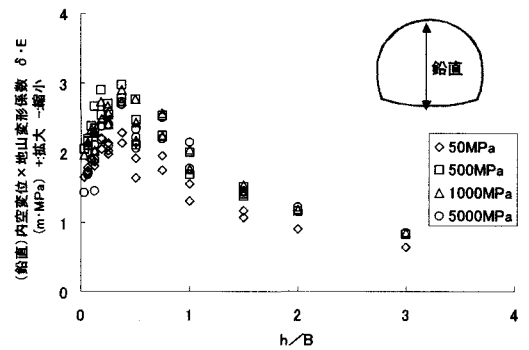


図-10 (鉛直) 内空変位とh/Bの関係

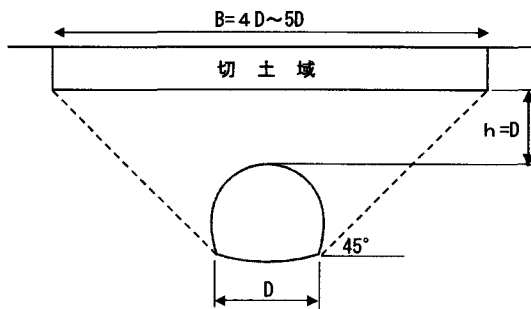


図-11 h/B=0.4~0.5 の状況

$\delta \cdot E$ 値がピークとなる h/B は、水平内空変位と鉛直内空変位でやや異なるが、おおむね 0.4~0.5 程度である。これは、図-11 に概念図を示すが、土被り $h=D$ の場合、トンネルの上方 4D~5D 程度の範囲を掘削する状況に相当する。トンネルに対する近接施工の影響検討においてはトンネルから 45° で立ち上げた線の内側の領域を掘削の影響範囲と考える方法が一般にとられるが、解析結果はこの方法の妥当性を証明するものといえる。このように切土によるトンネルへの影響は、切土の規模より切土と既設トンネルとの位置関係に依存することがわかる。

なお、地山変形係数と内空変位の関係を見ると、変形係数が小さい軟らかな地山になると、 $\delta \cdot E$ 値が抑制されていることがわかるが、これは前述の図-8 に付随した考察に対応するものである。

5. まとめ

(1) 上部切土に伴う既設トンネルの内空変位

本検討では、既設トンネルに近接した切土工事によるトンネル覆工の変形挙動の特徴を把握する

ため、トンネル周辺地山を深さ方向に一樣な線形弾性材料とし、トンネル覆工を地圧等の外力を受けていない健全な逆巻き構造の無筋コンクリート覆工としてモデル化した 2 次元 FEM により、切土幅、残存土被り、地山変形係数の影響を比較した。その結果以下の知見を得た。

残存土被り h を切土幅 B で除した指標 (h/B) に着目して、解析結果 (内空変位) をまとめた。

- i) 同一の h/B に対しては、ほぼ同一な変位量であった。内空変位 δ × 地山変形係数 E の積 $\delta \cdot E$ の値は h/B で正規化できる。すなわち、切土によるトンネルへの影響は、切土の規模より切土と既設トンネルとの位置関係に依存する。 $\delta \cdot E$ 値が最大となるときの h/B は、水平変位で 0.5 程度、鉛直変位で 0.4 程度であった。この結果は従来の影響検討の考えに一致し、従来の検討方法の妥当性を証明するものといえる。
- ii) h/B が増加するにしたがい、 $\delta \cdot E$ 値はゼロに漸近する方向に向かった。また h/B より小さくなる (切土幅 B が大規模になる) と切土後の水平内空変位は拡大に転じる。このような h/B と内空変位量との関係は、施工実績の収集結果で得られている傾向に一致し、本影響解析の妥当性を示した。
- iii) 変形係数が小さい軟らかな地山になると、 $\delta \cdot E$ 値はさほど大きくならなかった。これは軟らかい地盤においては覆工の剛性により変形が抑制される効果が出ることを意味するものと考えられる。

(2) 今後の課題

今後の課題を以下に列記する。

- i) 切土高さの考慮：本検討では切土高さを一定

にして検討を行ったが、切土高さが既設トンネルに与える影響は重要と考える。切土高さも考慮した、定性的な見解を得ることは有用と考える。

- ii) 覆工応力の検討：覆工応力の発生状況は覆工の変形形態により異なるものと考えられるので、更に詳細な検討が必要と考える。
- iii) 施工実績資料の拡充と比較検討：一般に入手可能な施工資料の個体数は依然少ない。多くの事例を収集してそれらの傾向を見出し、影響解析結果との比較を通して、評価手法の改善を行う必要がある。

倉俊弘教授には多大なるご指導を戴いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 例えば、小島芳之、藤沢一、金子静夫、五味一男：既設トンネル直上部を交差するトンネル工事の影響予測と現場計測、構造工学論文集、Vol.39A, 1993.3
- 2) (財) 鉄道総合技術研究所：既設トンネル近接施工対策マニュアル、1995.1
- 3) 小島芳之、朝倉俊弘、吉川和行、重田佳幸、土屋敬、中川浩二：上部地山の切土による既設トンネルの変形挙動、材料 別冊 第52巻8号 2003.8

謝辞：本報告の作成にあたり、京都大学大学院の朝