

トンネルへの近接施工のパラメータ解析と 近接度の判定基準の提案

Parameter Analyses on Adjacent Construction of Tunnels
and Proposal of Guideline for Judgment of Adjacent Level

野城一栄¹・小島芳之²

Kazuhide Yashiro and Yoshiyuki Kojima

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

E-mail: kyashiro@rtri.or.jp

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

We performed case studies and simulation analyses to clarify deformation behavior of tunnels at adjacent construction. We found relations between deformation modulus of ground, geometrical shape of adjacent construction and influence on existing tunnels from case studies. We confirmed those relations from parametric analyses assuming in situ tunnels. Based on the results, we proposed guidelines for judgment of adjacent level which consider deformation modulus of ground and geometrical shape of adjacent construction

Key Words : tunnel, adjacent construction, numerical analysis, design guideline

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た大規模な造成工事が数多く施工されている。既設トンネルに近接した盛土・切土工事によるトンネルの変形挙動については、挙動に影響する要因(近接施工の諸元、地質、既設トンネルとの位置関係など)が多岐にわたるため、計測実績がいくつか報告されているものの、これらが統一的に論議されることはほとんどなかった。このため、近接施工の影響予測の実務において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。

鉄道総研では、このような背景から、トンネルへの近接施工の影響予測の実務のために、「既設トンネル近接施工対策マニュアル」¹⁾(以下、マニュアル)を策定している。このマニュアルでは、近接施工により予想される影響の程度(=近接度、表1)を、もとの土被り、盛土高さ、切土後の土被りといった土被りの増減量から判定する方法が示されている。このマニュアルは、近接度の簡便な判定法として設計実務において活用されているが、近接度の判定基準には課題が残されていた。すなわち、土被りの変化

のみに基づき近接度を判定しているという点である。近接施工による影響は、実際は地山の変形係数や近接施工の幾何形状(盛土・切土の幅等)等の他の条件によるところも大きいはずであるが、マニュアルにおいては、これらの条件は考慮されていない。

このような現状に鑑みて、筆者らは、これまで、トンネルに近接した盛土・切土工事について、事例分析^{2),3)}や数値解析法の提案^{2),4)}を行い、近接施工の影響予測法の研究を実施してきた。本研究では、トンネルへの近接施工の影響の判定基準の定量化、影響の評価法の確立を目的として、覆工に作用する応力に着目して実トンネルを想定したパラメータ解析を実施し、今までの研究成果とあわせて新しいトンネルの近接度の判定基準の提案を行った。

表1 近接度¹⁾

近接度	定義
Ⅲ (要対策)	新設構造物の施工により、既設構造物に変位や変形等の影響が及ぶため、必要な対策を行うか、計画変更を要する範囲
Ⅱ (要注意)	新設構造物の施工により、既設構造物に変位や変形等の影響が及ぶ可能性がある範囲
Ⅰ (影響小)	新設構造物の施工により既設構造物に変位や変形等の影響が及ばないと考えられる範囲

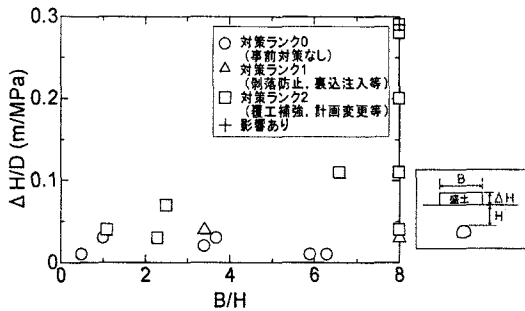


図1 変形係数と対策ランクとの関係（盛土）

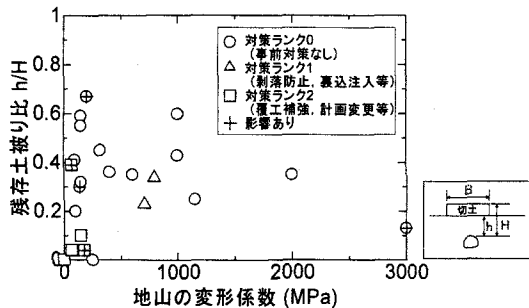


図2 変形係数と対策ランクとの関係（切土）

2. 近接施工事例の分析

2.1 概要

過去に、筆者らは、トンネルへの近接施工の事例（盛土18例、切土32例）を収集し、分析を実施している^{2,3}。ここでは、この事例を用いて、地山の変形係数や近接施工の幾何形状の影響に着目した分析を行うことにする。

2.2 分析結果

まず、近接施工の前に行われた事前対策について、対策のランクを0, 1, 2に分類する。事前対策を行っていない場合は対策ランク0、剥落防止（ネット工、繊維シート等）や裏込注入などの規模の小さい事前対策を行った場合は対策ランク1、覆工の補強（RC化、内巻工等）や計画の変更（盛土から橋梁に構造を変更、防護アーチを施工した後盛土を施工、軽量盛土に変更、計画高さ変更等）などの規模の大きな事前対策を行った場合には対策ランク2として分類する。

図1は、盛土において、地山の変形係数Dや盛土幅Bを考慮に入れて各事例の対策ランクをプロットした図である。縦軸については、盛土高さΔHが大きくなればトンネルの変形が大きくなること、地山の変形係数Dが大きくなればトンネルの変形が小さくなることが予想されるので、両者の比ΔH/Dを採用した。図より、いくつかの事例で若干のばらつきは

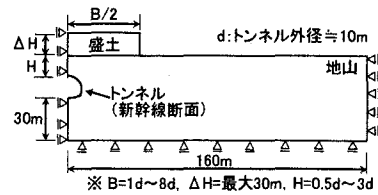


図3 解析モデル

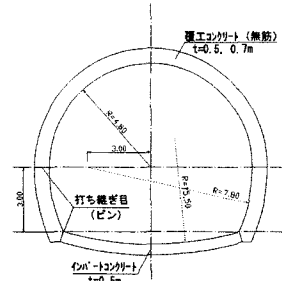


図4 新幹線標準断面

あるが、ΔH/Dが大きいほど規模の大きい対策が必要になっていることがわかる。また、盛土の相対的な幅広さを示すB/H（盛土幅Bもとの土被りHとの比）による傾向はあまりみられなかった。

図2は同様に切土において、地山の変形係数Dを考慮に入れて各事例の対策ランクをプロットした図である。残存土被り比h/H（切土後の土被りhもとの土被りHとの比）が小さく、地山の変形係数Dが小さくなると、より大きな対策が行われていることがわかる。

このように、近接施工の幾何形状については、事例においては明確な傾向を見出すことはできなかったが、地山の変形係数については、対策ランク（＝近接度）と密接な関係があることが予想される。

以下、盛土、切土の各々について、数値解析により、地山の変形係数、近接施工の幾何形状、対策ランクについて、定量的に相互の関係を明らかにしてゆくことにする。

3. 盛土

3.1 解析の概要

解析はFEMにより実施した。図3に解析モデルを示す。単純化のため、解析モデルには盛土幅B=1d～8d、最大盛土高さ30m、もとの土被りH=0.5d～3dを有する半断面モデルを用いた。トンネルには、新幹線標準断面（図4）を用いた。ここで、トンネル覆工・インバート部は梁要素でモデル化し、アーチ～側壁間の打ち継ぎ部、側壁～インバートの打ち継ぎ部についてはピン結合とした。なお、覆工にはトンネル掘削時の地山解放応力を負担させていない。

表2 入力物性値

	項目	設定値
地山	変形係数(MPa)	5~3000 (弾性)
	ポアソン比	0.3
	単位体積重量(kN/m ³)	20
覆工	巻厚(m)	0.5, 0.7
	変形係数(MPa)	2.2×10^4
インバート	巻厚(m)	0.5

表3 解析パラメータ

項目	設定値
最大盛土高さ(m)	30 (要素を逐次付加)
盛土幅 B	1d, 2d, 4d, 8d
もとの土被り H	0.5d, 1d, 2d, 3d
地山の変形係数 D(MPa)	5, 20, 50, 100, 200, 500, 1000
覆工巻厚 t(m)	0.5, 0.7

(d: トンネル外径≒10m)

その他、覆工と地山との間には圧縮時にはばね係数 ∞ であるが引張時にはばね係数が0となるような物性を与えた非線形ばね要素を配し、覆工と地山との接触を考慮した。すなわち、覆工に地山からの引張応力やせん断応力が作用しないようになっている。

解析においては、地表面への盛土を想定して、 $\Delta H=30\text{m}$ になるまで要素を逐次付加することにより盛土を再現することにした。

表2に入力物性値を示す。地山の変形係数による影響を定量的に把握することを目的とし、地山は弾性体とした。なお、地山については一般的な土砂～軟岩地山を想定している。解析ステップは、①自重解析およびトンネル掘削(応力解放率100%)、②覆工・インバート打設、③上部盛土である。

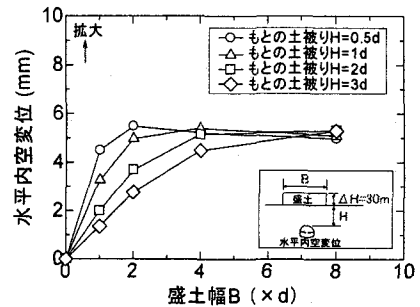
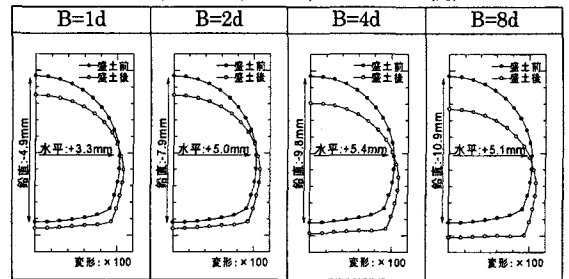
表3に解析パラメータを示す。最大盛土高さ ΔH は30mに固定するが、パラメータとして盛土幅B、もとの土被りH、地山の変形係数D、覆工巻厚tをそれぞれ変化させて解析した。

3.2 解析結果

(1) トンネルの変形

表4に地山の変形係数 $D=1,000\text{MPa}$ 、もとの土被り $H=1d$ のケースについて、盛土によるトンネルの変形を示す。なお、これは最大盛土高さ($\Delta H=30\text{m}$)時のものであるが、地山は弾性体と仮定しているため、最大盛土高さに至るまでほぼ盛土の高さに比例した線形的な挙動を示した。

地表面に盛土が行われ地山中の鉛直応力が増加するため、トンネルは鉛直内空が減少し、水平内空が増加するように挙動する。また、トンネル全体も沈下していることがわかる。トンネル全体の沈下量は

表4 盛土によるトンネルの変形
($D=1,000\text{MPa}$, $H=1d$, $t=0.7\text{m}$ の例)図5 盛土幅と水平内空変位との関係
($D=1,000\text{MPa}$, $t=0.7\text{m}$)

盛土幅Bが大きくなるにしたがって大きくなるが、水平内空の減少量については $B=4d$ で極大値をとり $B=8d$ の様な広い盛土を行う場合には $B=4d$ に比べて少し小さくなった。これは、盛土幅がトンネル径に比べて十分に広くなると、側方からの応力の増加分が相対的に大きくなってトンネルが水平方向に広がるのを抑制するように働くためと考えられる。

地山の変形係数Dについては、変位の絶対量に変化するものの変形の傾向については同様であった。考察の対象となる解析結果には水平内空変位の他に鉛直内空変位もあるが、鉛直内空変位は、水平内空変位と、拡大と縮小という違いがあり、また、それぞれの絶対値についても違いがあるものの、盛土幅Bやもとの土被りHの変化に対する応答は水平内空変位とほぼ同様の傾向となった。このため、以後、水平内空変位にのみ着目して考察することにする。

(2) 盛土幅による影響

図5に地山の変形係数 $D=1,000\text{MPa}$ のケースについて、最大盛土高さ($\Delta H=30\text{m}$)時の、盛土幅Bと水平内空変位との関係を示す。全体的に盛土幅Bが小さいほど水平内空変位は小さくなる傾向にあるが、その感度はもとの土被りHに依存し、Hが小さい場合は大きい場合に比べて、盛土幅Bが小さくなるに従い急激に水平内空変位が小さくなることがわかる。盛土幅Bが大きくなると水平内空変位はもと

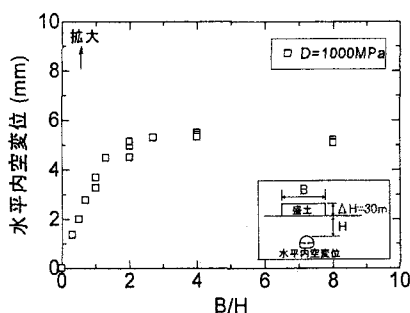


図6 B/Hと水平内空変位との関係
($D=1,000\text{MPa}$, $t=0.7\text{m}$)

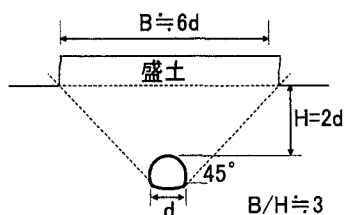


図7 影響が大きい盛土の条件 ($H=2d$ の例)

の土被り H に依存しなくなった。これは盛土の二次元的な影響によるものと考えられる。

(3) 盛土の相対的な幅広さによる影響

図5より、盛土の影響は、盛土の幅すなわち盛土の二次元的な影響の大小に依存することがわかった。次に、もとの土被り H の影響について考察することにする。正確を期するにはトンネルの絶対的な大きさによる影響も考慮すべきではあるが、鉄道トンネルは最大径7~10m程度に固定されるため、ここでは、盛土の二次元的な影響だけに着目して、もとの土被り H と盛土幅 B の比 B/H をパラメータにとることとする。

図6に地山の変形係数 $D=1,000\text{MPa}$ の各ケースについて、 B/H と水平内空変位との関係を示す。図より、多少のばらつきはあるがプロットされた点の一つの曲線を構成していることがわかる。これより、 B/H と水平内空変位とは一意の関係にあり正規化できることがわかる。なお、同一の B/H でも水平内空変位が違っているが、これは、今回のモデルでは盛土幅 B 、盛土高さ H については変化させてはいるものの、トンネルの大きさについては変化させていないためである。すなわち、解析におけるトンネル自体の影響が現れているとも考えることができる。また、 $B/H \geq 2$ の領域では水平内空変位はほぼ一定値に収束し、 $B/H \leq 1$ の狭い範囲の盛土を行うとき急に小さくなることがわかる。

内空変位が最大となる B/H はおおむね2~3程度である。これは、トンネルから45°で立ち上げた線

表5 近接施工時の覆工の増加応力の許容値の目安¹⁾

健全度	定義		引張応力 (MPa)	圧縮応力 (MPa)
	運転保安等に対する影響	変状の程度		
AA	危険	重大	0.3	1.0
A1	早晚脅かす 異常外力の作用 時危険	変状が進行し、機能 低下も進行		
A2	将来脅かす	変状が進行し、機能 低下の恐れ	0.5	2.0
B	進行すればAランクになる	進行すればAランクになる	1.0	5.0
C	現状では影響なし	軽微		
S	影響なし	なし		

内側の領域を盛土する場合に相当する(図7)。これは、トンネルに対する近接施工の影響範囲として上方90°を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が妥当であることを示すものである。

(4) 許容盛土高さ

次に、覆工に発生する応力に着目して、トンネルに対しどれくらいの盛土が可能かについて検討することにする。マニュアルでは、覆工の健全度毎に、近接施工時の覆工の増加応力の許容値の目安が示されている(表5)。ここで、健全度とは覆工の健全性を示す指標で、健全度Sが健全なトンネル、健全度Aが列車の安全な通行に支障するような変状を有するトンネルとなる。健全度Aに分類される区間は割合としては多くないので、ここでは、健全度B, C, Sの場合の目安を用いることとする。健全度B, C, Sのトンネルでは、増加引張応力の許容値(目安)は1MPaと規定されている。今回はこれを用い、近接度I~IIの境界を想定し、増加引張応力の許容値として1MPaを用いて解析結果を評価することにする。なお、増加圧縮応力については実務においては通常はあまり問題となることがない。また、今回の解析においても曲げモーメントが卓越する変形となったため、増加引張応力のみに着目することにする。具体的には、盛土を想定して解析モデルに要素を段階的に付加してゆき、覆工に発生する最大の増加引張応力が1MPaとなるときの盛土高さ(許容盛土高さ ΔH_a)を求めた。

図8に各ケースについて、 B/H と許容盛土高さ ΔH_a との関係を示す。ここで、縦軸については、許容盛土高さ ΔH_a を地山の変形係数 D で除した $\Delta H_a/D$ を用いている。これより、応力についても $\Delta H_a/D$ と B/H は一意の関係にあり正規化できることがわかる。また、 $\Delta H_a/D$ は $B/H \geq 2$ の領域ではほぼ一定の値0.02程度に収束し、 $B/H \leq 1$ の狭い範囲の盛土を行うとき急に大きくなることがわかる。

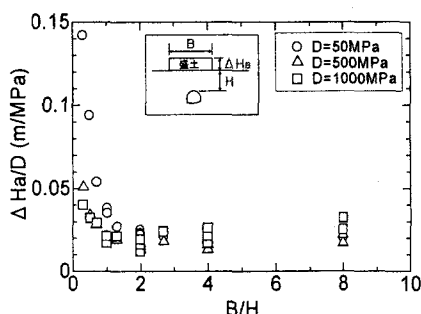


図8 B/H と $\Delta H_a/D$ との関係 ($t=0.7m$)

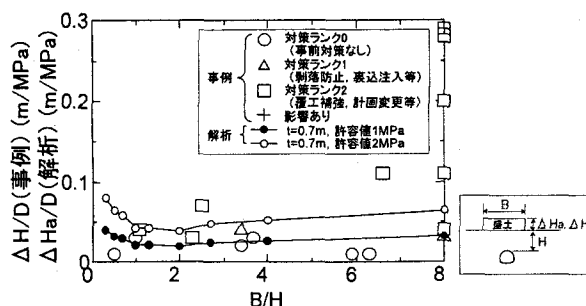


図10 盛土の事例との比較

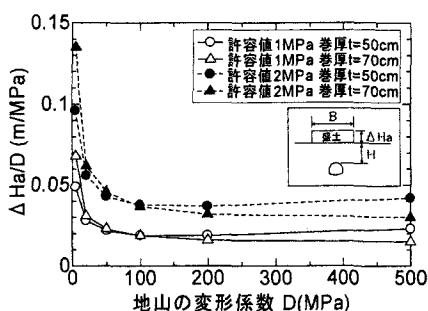


図9 地山の変形係数と覆工巻厚の影響 ($H=1d$, $B=2d$)

これらの傾向については地山の変形係数 D にはあまり依存しないが、 D が小さく、かつ B/H が小さいときには $\Delta H_a/D$ が大きくなる傾向がある。この理由は(5)で述べる。

(5) 地山の変形係数と覆工巻厚の影響

図9に $H=1d$, $B=2d$ のケースについて、覆工の巻厚 t を変化させた場合の結果について示す。地山の変形係数 D が 100MPa 程度以上になると、 $\Delta H_a/D$ の値は地山の変形係数 D によらずほぼ一定となる。地山の変形係数が 50MPa 程度以下となると、 $\Delta H_a/D$ 値が大きくなる。また、これは覆工巻厚が大きいケースで顕著である。これは、覆工の剛性が地山の剛性に対して相対的に大きくなり、覆工が地山の変形を抑制する傾向が現れるためと考えられる。なお、図中には、近接度Ⅱ～Ⅲの境界を想定し、許容値を 1MPa から 2MPa にした時の $\Delta H_a/D$ の値も点線で同時に示している。許容値が増加すると $\Delta H_a/D$ 値も増加していることがわかる。ここで、弾性解析であるので許容値を 2MPa とした時の $\Delta H_a/D$ 値は 1MPa のときの約 2 倍となった。

3.3 事例との比較

図10に2.2において調べたトンネル上部盛土の事例と解析結果との比較を示す。図中には図8に示した B/H と $\Delta H_a/D$ との関係 ($t=0.7m$, $D=1,000MPa$)

を同時に示してある。図より、許容値 1MPa での解析結果は対策ランク 0 (=近接度Ⅰ) と対策ランク 1 (=近接度Ⅱ) の境界に位置することがわかる。また、許容値 2MPa での解析結果は対策ランク 1 (=近接度Ⅱ) と対策ランク 2 (=近接度Ⅲ) の境界付近に位置することがわかる。その他、 $\Delta H_a/D$ は $B/H \geq 2$ の領域では B/H によらない傾向も出ている。これらのことから、今回の数値解析の結果は盛土の事例と整合が取れたものであることがわかった。

3.4 まとめ

今回、トンネルへの盛土を想定したパラメータ解析を実施した。この結果、盛土の影響は盛土幅 B 、もとの土被り H 、覆工巻厚 t により変化するが、 B/H と $\Delta H/D$ を指標とすることにより正規化でき、許容盛土高さ ΔH_a はこれらにより、定量的に評価することが可能であることが明らかになった。

4. 切土

4.1 解析の概要

図11に解析モデルを示す。単純化のため、解析モデルには切土幅 B 、最大切土高さ 30m を有する半断面モデルを用いた。解析においては、地表面の切土を想定して、トンネル直上の高さ 30m の要素を高さ 0m になるまで逐次削除することにより切土を再現することにした。入力物性値については盛土(表2)と同様である。

表6に解析パラメータを示す。最大切土高さは 30m に固定するが、パラメータとして、切土幅 B 、切土後の土被り h 、地山の変形係数 D 、覆工巻厚 t をそれぞれ変化させて解析を実施した。

4.2 解析結果

(1) トンネルの変形

表7に地山の変形係数 $D=1,000MPa$ 、切土後の土被り $h=1d$ のケースについて、切土によるトンネルの変形を示す。なお、これは最大切土高さ ($\Delta h=$

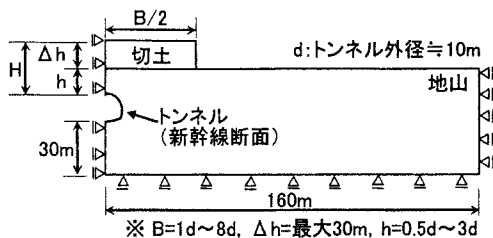


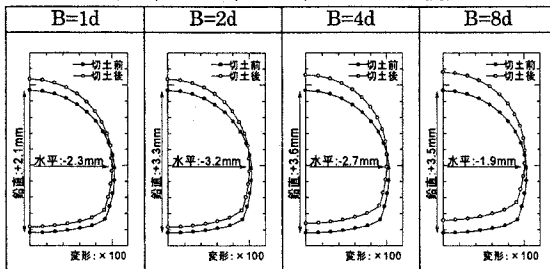
図 11 解析モデル

表 6 解析パラメータ

項目	設定値
最大切土高さ(m)	30 (要素を逐次削除)
切土幅 B	1d, 2d, 4d, 8d
切土後の土被り h	0.5d, 1d, 2d, 3d
地山の変形係数 D(MPa)	5, 20, 50, 100, 200, 500, 1000, 3000
覆工巻厚 t(m)	0.5, 0.7

(d: トンネル外径≒10m)

表 7 切土によるトンネルの変形
(D=1,000MPa, h=1d, t=0.7m の例)



30m) 時のものであるが、地山は弾性体と仮定しているため、最大切土高さに至るまでほぼ切土の高さに比例した線形的な挙動を示した。

地表面の切土が行われ地山中の鉛直応力が減少するため、トンネルは鉛直内空が増加し、水平内空が減少するように挙動する。また、トンネル全体も隆起していることがわかる。トンネル全体の隆起量は切土幅 B が大きくなるにしたがって大きくなるが、水平内空の減少量については B=2d で極大値をとり、B=4d, 8d のような広い切土を行う場合には B=2d に比べて少し小さくなった。これは、切土幅がトンネル径に比べて十分に広くなると、側方からの応力の減少分が相対的に大きくなってトンネルが水平方向に縮むのを抑制するように働いたためと考えられる。

地山の変形係数 D については、盛土と同様に変位の絶対量が変化するものの変形の傾向については同様であった。考察の対象となる解析結果には水平内空変位の他に鉛直内空変位もあるが、鉛直内空変位は、水平内空変位と、拡大と縮小という違いがあり、

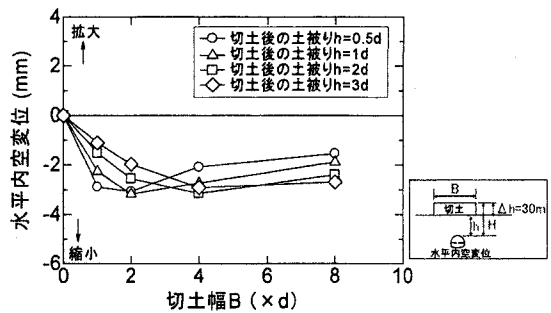


図 12 切土幅と水平内空変位との関係
(D=1,000MPa, t=0.7m)

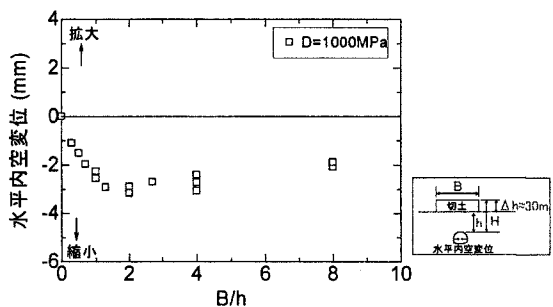


図 13 B/h と水平内空変位との関係
(D=1,000MPa, t=0.7m)

また、それぞれの絶対値についても違いがあるものの、切土幅 B やもとの土被り h の変化に対する応答は水平内空変位とほぼ同様の傾向となった。このため、以後、水平内空変位にのみ着目して考察することにする。

(2) 切土幅による影響

図 12 に地山の変形係数 D=1,000MPa のケースについて、最大切土高さ (Δh=30m) 時の、切土幅 B と水平内空変位との関係を示す。全体的に切土幅 B が小さいほど水平内空変位は小さくなる傾向にあるが、その感度は切土後の土被り h に依存し、h が小さい場合は大きい場合に比べて、切土幅 B が小さくなるに従い急激に水平内空変位が小さくなることがわかる。切土幅 B が大きくなると水平内空変位は切土後の土被り h に依存しなくなった。これは盛土と同様に、切土の二次元的な影響によるものと考えられる。なお、これらの挙動は盛土時とほぼ同様の傾向であるが、切土については、切土幅 B を増加させると、切土幅 B=2d~4d で 3mm 程度までいったん縮小するが、それ以降は切土幅 B が増加するにしたがい逆に縮小量は小さくなる傾向が生じることが異なっている。

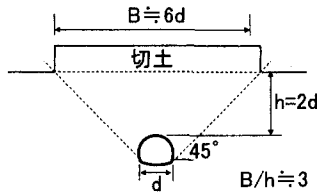


図 14 影響が大きい切土の条件 ($h=2d$ の例)

(3) 切土の相対的な幅広さによる影響

次に、盛土の場合と同様に、パラメータとして、切土の相対的な幅広さを表す B/h (切土幅 B と切土後の土被り h との比) を用いて整理することにする。

図 13 に地山の変形係数 $D=1,000\text{MPa}$ の時の B/h と水平内空変位との関係を示す。多少のばらつきがあるが、盛土と同様にプロットされた点の一つの曲線を構成していることがわかる。これより、 B/h と水平内空変位とは一意の関係にあり正規化できることがわかる。内空変位が最大となる B/h はおおむね 2~3 程度である。これは、トンネルから 45° で立ち上げた線の内側の領域を切土する場合に相当する (図 14)。盛土と同様、これは、トンネルに対する近接施工の影響範囲として一般に上方 90° を影響範囲と考える方法がとられるが、解析結果はこの方法が妥当であることを示すものであり、盛土と同様の結果であった。なお、 B/h が小さく (= 切土幅 B が小さくあるいは切土後の土被り h が大きく) になると内空変位値はゼロに漸近し、切土の影響が小さくなることがわかる。また B/h が大きく (= 切土幅 B が大きくあるいは切土後の土被り h が小さく) なった場合も、切土後の水平内空変位は小さくなるか少し拡大するようになり、切土の影響が小さくなることがわかる。

(4) 許容残存土被り比

覆工に発生する応力に関する検討は、盛土と同様の考え方で行うこととした。すなわち、切土を想定して解析モデルから要素を段階的に削除してゆき、覆工に発生する最大の増加引張応力が 1MPa となるとき切土量 (許容切土量 Δha) を求め、地山の変形係数 D で除した $\Delta ha/D$ をまず評価指標として用いることとした。

結果を図 15 に示す。 B/H が小さい切土を行う場合は $\Delta ha/D$ が大きくなり、大きな切土が可能となるが、盛土の場合とは異なり切土においてはばらつきが大きくうまく正規化できないことがわかる。このため、図 2 を参考として、指標として許容切土量 Δha の時の残存土被り比 (= 許容残存土被り比 ha/H) を用いることとした。 ha/H が小さいほど相対的に大きな切土が可能であることになる。

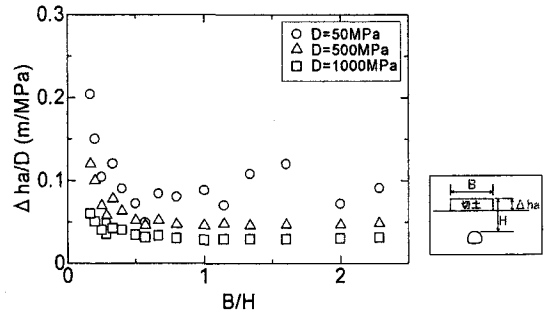


図 15 B/H と $\Delta ha/D$ との関係 ($t=0.7\text{m}$)

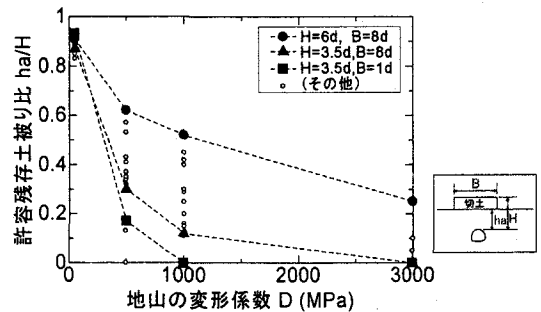


図 16 地山の変形係数と
許容残存土被り比との関係 ($t=0.7\text{m}$)

図 16 に各ケースについて、地山の変形係数 D と許容残存土被り比 ha/H との関係を示す。地山の変形係数 D が大きくなると ha/H が小さくなり、相対的に硬い地山の場合は規模の大きな切土ができるという傾向が確認できる。しかし、図 8 に示すように、盛土の場合は概ね B/H により $\Delta Ha/D$ が決まっていたことと対照的に、切土については、同じ B/H でも、もとの土被り H が大きく、切土幅 B が大きい場合は ha/H が大きくなる傾向となり、正規化することができなかった。切土の場合には、もとの土被り H も考慮に入れた正規化法を今後検討する必要がある。

(5) 地山の変形係数と覆工巻厚の影響

図 17 に図 16 で一番厳しい条件となる、 $H=6d(h=3d)$ 、 $B=8d$ のケースについて、地山の変形係数 D と覆工の巻厚 t を変化させて解析した場合の結果を示す。 ha/H の値は地山の変形係数 D が大きいほど小さくなり、地山の剛性が大きいほど大きな切土ができることがわかる。また、巻厚 t による違いについては、地山の変形係数 D が小さい場合、巻厚の大きいものの方が ha/H 値が小さい結果となっている。これは、地山の変形係数 D が小さい場合、覆工の剛性が地山の剛性に対して相対的に大きくなり、

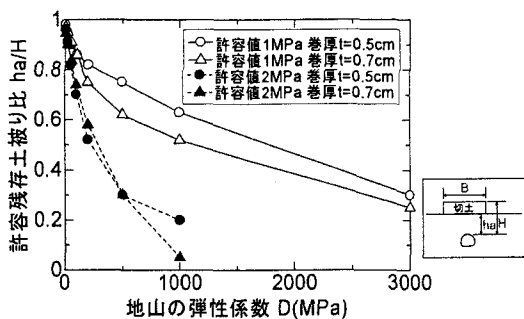


図 17 地山の変形係数と覆工巻厚の影響
($H=6d$, $B=8d$)

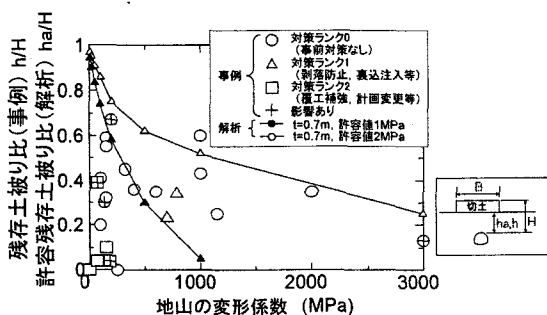


図 18 切土の事例との比較

覆工が地山の変形を抑制する傾向が現れるためと考えられる。なお、図中には、近接度Ⅱ～Ⅲの境界を想定し、許容値を1MPaから2MPaにした時の ha/H 値も同時に点線で示している。許容値が増加すると ha/H 値も低下し、また、ある程度 D が大きくなると、計算上は土被りが0になるまで掘削できることになる。

4.3 事例との比較

図17に2.2において調べたトンネル上部切土の事例と解析結果との比較を示す。図中には図15で一番厳しい条件となった、 $H=6d$ ($h=3d$)、 $B=8d$ のケースにおける、地山の変形係数 D と許容残存土被り比 ha/H との関係とを同時に示してある。図より、許容値1MPaでの解析結果は対策ランク1(=近接度Ⅱ)の事例が分布する領域よりも上側の、対策ランク0(=近接度Ⅰ)が分布する領域に位置していることがわかる。また、許容値2MPaでの解析結果は対策ランク1(=近接度Ⅱ)の事例が分布する領域と対策ランク2(=近接度Ⅲ)が分布する領域の境界付近に位置することがわかる。これらのことから、今回の数値解析の結果は、切土がトンネルに与える影響を最も大きく評価するケースを使って安全側に検討した結果ではあるが、切土の事例と整合が取れた

ものであることがわかった。ただし、4.2において示したように、切土がトンネルに与える影響は、 B/h を固定した場合でももとの土被り H によって変わるため、 B/h だけでなくもとの土被り H も考慮した上でランクづけする必要があると考えられる。

4.4 まとめ

今回、トンネルへの切土を想定したパラメータ解析を実施した。その結果、切土の影響は切土幅 B 、切土後の土被り h 、覆工巻厚 t により変化するが、変形挙動については、 B/h を指標とすることにより正規化できることがわかった。一方、許容残存土被り比 ha/H はこれらにより、ある程度定量的に評価することが可能であるが、盛土の場合と異なり、もとの土被り H を適切に評価しないとうまく定量化できないことが明らかになった。これについては、現状では事例が少ないため、今後計測実績を増やすことや、地山の非線形性、非弾性挙動も考慮した検討を行い、さらなる妥当性の確認、判定性能の向上を目指したい。

5. 近接施工の判定基準への反映

以上の検討に基づき、トンネルの近接施工設計検討実務への反映を行った。表8はトンネルに対する新しい近接度判定基準を示したものである。また、図19に盛土の近接度区分を図示する。盛土幅 B ともとの土被り H との比 B/H 、地山の変形係数 D 、盛土高さ ΔH により区分する方法となっている。なお、盛土においては B/H が小さく(盛土幅 B が小さい、あるいは、もとの土被り H が大きい)なるとトンネルに及ぶ影響が小さくなることから、条件を緩和する側に補正を行っている。

切土に関しては、切土幅 B と切土後の土被り h との比 B/h 、地山の変形係数 D 、残存土被り比 h/H により区分する方法である。図20に切土の近接度区分を図示する。なお、切土においては B/h が小さく(切土幅 B が小さい、あるいは、切土後の土被り h が大きい)なるとトンネルに及ぶ影響が小さくなることから、条件を緩和する側に補正を行っている。

なお、実務においては、近接度Ⅱ(要注意)や近接度Ⅲ(要対策)の場合は、別途解析を行い詳細な検討を行うのが一般的である。しかし、本判定基準は、盛土・切土幅や弾性係数を導入したという点で既存の判定法に比べて適切に近接度を判断できるものであり、近接度の一次区分や解析結果の妥当性の判定には十分に使用することができるものと考えている。

表8 トンネルに対する新しい近接度判定基準

D: 地山の変形係数 (MPa)		
盛土	盛土の高さ ΔH (m)	
近接度の区分	$B/H \geq 1$	$B/H < 1$
Ⅲ (要対策)	0.04D	$0.04D / B/H$
Ⅱ (要注意)	0.02D	$0.02D / B/H$
Ⅰ (影響小)		

切土	残存土被り比 h/H	
近接度の区分	$B/h \geq 1$	$B/h < 1$
Ⅲ (要対策)	1	B/h
Ⅱ (要注意)	$1+0.003D$	$1+0.003D$
Ⅰ (影響小)	1	B/h

★: 切土後の土被り h が 10m 以下の場合 ⇒ Ⅲ (制限)

6. まとめ

本研究では、既設トンネルに近接した盛土・切土工事によるトンネルの変形挙動を把握するため、事例分析、数値解析を実施した。以下に得られた成果をまとめる。

- ①事例を分析することにより、地山の変形係数、近接施工の幾何形状とトンネルへの近接施工の影響の度合いとの関連を明らかにした。
- ②実トンネルを想定してパラメータ解析を実施した。盛土・切土がトンネルに与える影響が最も大きくなる条件下で、覆工に限界となる応力が発生する際の盛土高さおよび残存土被り比を求め、盛土・切土の実績と比較した。その結果、解析結果により事例分析で得られた傾向を裏付けることができた。
- ③以上の検討結果に基づき、地山の変形係数や盛土・切土の幾何形状も考慮した、精度の良い近接施工の影響予測法を提案した。

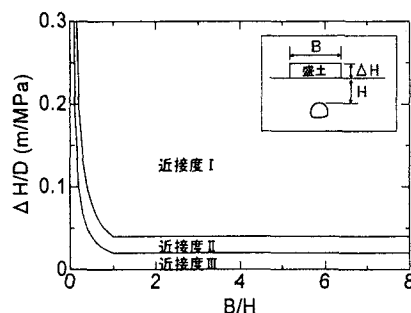


図 19 盛土の近接度区分

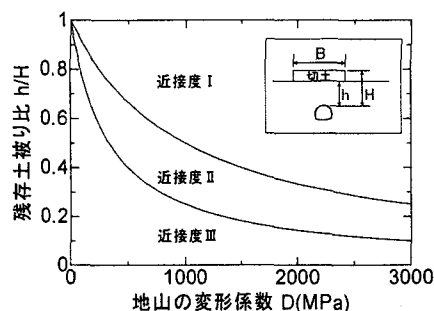


図 20 切土の近接度区分

参考文献

- 1) 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
- 2) 小島芳之他: 上部盛土がトンネル覆工に及ぼす影響に関する数値解析的評価, 土木学会論文集 No.736 / III-63, pp.193-204, 2003.6
- 3) 小島芳之他: 上部地山の切土による既設トンネルの変形挙動, 材料, Vol.52, No.8, pp.958-965, 2003.8
- 4) 小島芳之他: 既設トンネルに近接した切土工事のパラメータ解析, トンネル工学報告集, Vol.14, pp.319-324, 2004.11