

◆ 報 文 ◆

近接切土工事が既設トンネルに及ぼす影響 — 現場計測結果と数値解析の適用性について —

蒲田浩久* 真下英人**

1. はじめに

近年、土地の有効利用のための造成工事や道路拡幅工事など既設トンネル周辺の切土工事の事例が増加してきている。このように既設トンネルに近接して切土工事を行う場合には、既設トンネル覆工にどの程度の影響が出るのか、工事中に覆工を補強する必要があるのかなどを検討し、経済的、安全に工事を進めることが重要である。

しかしながら、既設トンネルに対する近接施工の影響は、地質状態、境界条件(周辺地山のゆるみ、背面空洞の有無)、覆工状態、施工順序・方法などが複雑に影響し合うためにその予測は難しく、詳細な計測結果¹⁾も少ないため、そのメカニズムは十分解明されたとは言えないのが現状である。

本報文では、既設トンネルに近接した切土工事に関する計測結果を整理し、上部切土(トンネル上部の掘削)と側部切土(トンネル側部の掘削)時の既設トンネル覆工の挙動について考察を行う。次に、各切土モデルの数値解析結果の基本的な傾向を調べるとともに、計測結果と比較することで、数値解析を適用する場合の留意点についての考察を行う。

2. 計測トンネルの概要

現場計測を行った3トンネルは、いずれも道路拡幅工事にともない開削工法により既設トンネルの一部または全部を撤去する工事である(表-1)。

表-1 計測トンネル概要

	吸坂トンネル	天満トンネル	和田トンネル
既設トンネル工法	矢板工法 (底設導坑先進) 1961竣工	矢板工法 1938竣工	矢板工法 (上半先進) 1961竣工
寸法	延長 126m 内空幅 8.0m 内空高 6.1m 覆工厚 70cm	延長 34m 内空幅 6.0m 内空高 5.0m 覆工厚 40~45cm	延長 100m 内空幅 8.8m 内空高 6.7m 覆工厚 50~60cm
地質	砂礫	頁岩	シルト岩
変形係数	50MPa	2000 MPa	700 MPa
最大土被	23m	25m	25m
切土方向	上部切土 (機械掘削)	上部切土 (機械掘削)	側部切土 (機械掘削)

図-1に吸坂トンネルの断面図を示す。切土は、上部より水平に行い(領域①、②)、最後にトンネル周辺部(③)を掘削した。なお、①、②の掘削が完了するまで、既設トンネルは補強せずに供用した状態で切土工事を進めた。トンネル周辺の地質は概ね砂礫からなり、孔内水平載荷試験より求めた変形係数は50MPa程度である。さらに、N値及び弾性波探査により、トンネル直上部約8mにはN値10以下のゆるみ域が確認されている。

図-2に天満トンネルの断面図を示す。切土は、一次掘削終了後、二次掘削範囲を番号順に行った。地質は頁岩(シルト質)で、層理・節理面に沿って褐色風化を伴うものの、岩芯は硬く中硬岩に分類され、孔内水平載荷試験より求めた変形係数は2000MPa程度である。なお、当初は天端に自立した空洞が存在したが、切土前にエアモルタルを注入し埋めた。

図-3に和田トンネルの断面図を示す。トンネルの一部の区間を除き、一次掘削終了後、二次掘削として既設トンネルの片側のみ掘削を行った。なお、一次掘削中は、覆工応力等の計測結果に変化は見られなかった。地質はシルト岩であるが、地表から標高50m程度までは、亀裂の発達した強風化岩であり、それ以深は弱風化岩となっている。孔内水平載荷試験から求めた変形係数は強風化岩で15~300MPa、弱風化岩で700MPa程度である。

吸坂、天満トンネルでは、覆工応力、覆工絶対変位、覆工内空変位の計測を実施し、和田トンネルにおいては、両肩部の亀裂変位を計測した。

以上の計測現場の特徴をまとめると、上部切土が中心の吸坂、天満トンネルは、土被りがほぼ同じで、応力解放法による初期応力測定結果より覆工全体に圧縮応力(吸坂トンネル0.6~1.5N/mm², 天満トンネル1.5~3.0N/mm²)が作用している。相違点は、吸坂トンネルは周辺に崩積土や数m程度のゆるみ域がある軟らかい地盤であるが、天満トンネルは天端に自立した空洞のある良く締まった

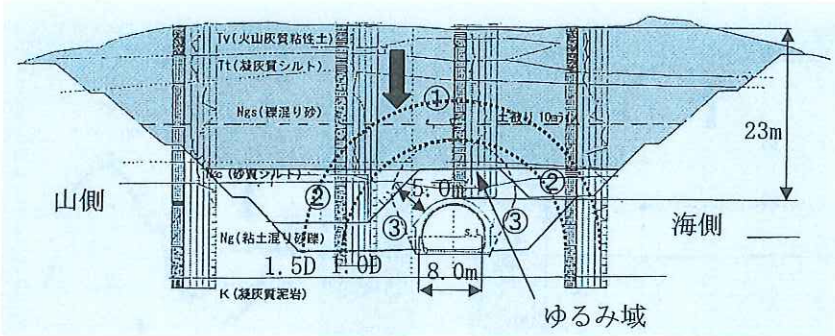


図-1 吸坂トンネル断面図

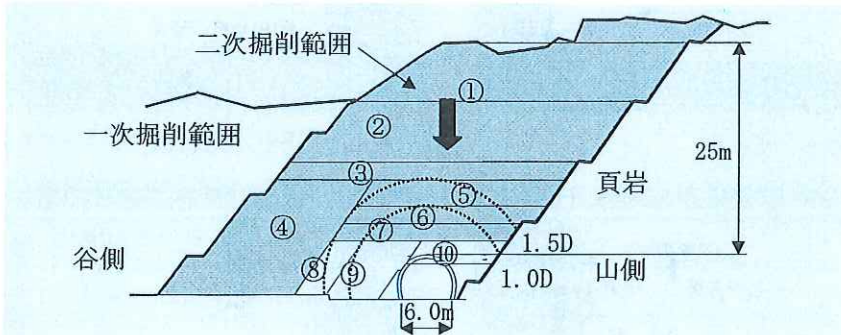


図-2 天満トンネル断面図

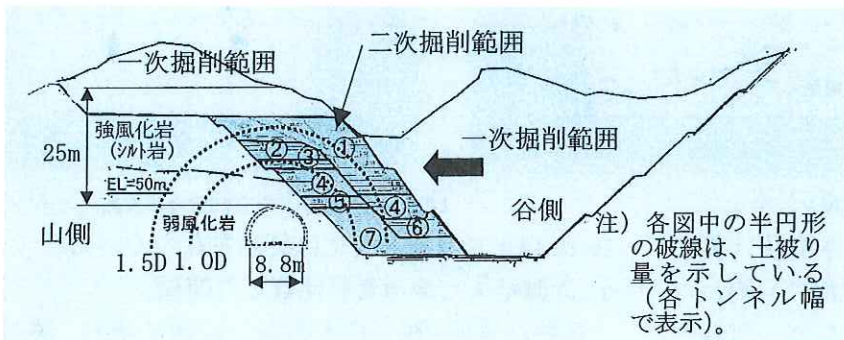


図-3 和田トンネル断面図

硬い地盤であることである。一方、和田トンネルは側部切土が中心の工事である。

3. 計測結果

3.1 上部切土の計測結果

上部切土である吸坂、天満トンネルの計測結果の比較を行う。上部切土区間として、吸坂トンネルは図-1 示す ① の領域までの結果を、天満トンネルは図-2 に示す ⑦ の領域までの結果を示す(図-1, 2 の着色部)。

a) 覆工応力

図-4、図-5 に吸坂、天満トンネルの覆工内側の応力と土被りの変化の関係を示す。応力は切土開始後の変化量で示している。応力増加パターンを見てみると、初期土被り約 3.0D の吸坂トンネルでは、土被り 2.0D~1.5D の間で応力が大きく増加するが、その後、切土が進行しても覆工全体に

応力増加はほとんど認められない。一方、初期土被り約 4.0D の天満トンネルでは、③ の掘削までは影響がなく、④ の掘削の側部切土にともない M4 で引張応力、M2 で圧縮応力がわずかに発生している。その後、⑥ の上部切土で土被りが 0.7D 程度になった段階から急激に M2, M4 で引張応力が増加しており、吸坂トンネルとは異なるパターンとなっている。次に、図-6、7 に円周方向の応力分布を示すが、分布形に関しても、吸坂トンネルは肩部 C2 で引張、肩部 C4 で圧縮応力が発生し、天端部 C3 ではほとんど応力は発生していない非対称形であるが、天満トンネルは両肩部で引張および天端部で圧縮応力が発生する対称形であり、異なるパターンとなった。上部より水平に切土しているため円周方向の応力分布は対称形になると予測されるが、吸坂トンネルでは非対称形となった。この理由については、今回の計測結果からだけでは、今回の計測結果からだけでは

は確定できないが、吸坂トンネルの覆工周辺にはゆるみ域が確認されているため、地山による覆工への拘束力の不均一性などが影響したのではないかと推測される。

なお、トンネル周辺地山全体を取り除いた掘削完了時の最大発生引張応力は、吸坂トンネルで 0.8N/mm^2 、天満トンネルで 3.0N/mm^2 であったが、目視観測の結果、両トンネルとも覆工には新たな変状などは認められなかった。 3.0N/mm^2 とかなり大きな引張応力が発生した天満トンネルに変状が発生しなかった理由として、初期応力として圧縮応力 ($1.5\sim 3.0\text{N/mm}^2$) が作用していたためと考えられる。この結果より、施工時の管理基準値の決定に対し、引張応力の増分だけでなく、初期応力の評価も重要であると考えられる。

b) 内空変位

図-8 に吸坂トンネルの内空変位 (カンチレバー

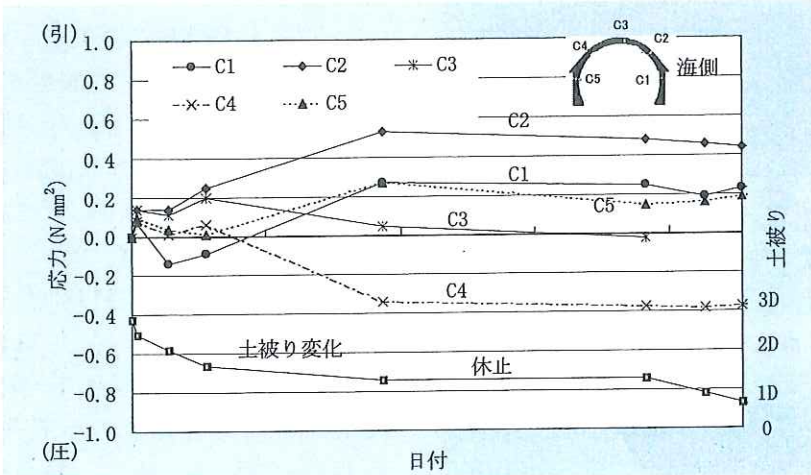


図-4 覆工応力 (吸坂トンネル)

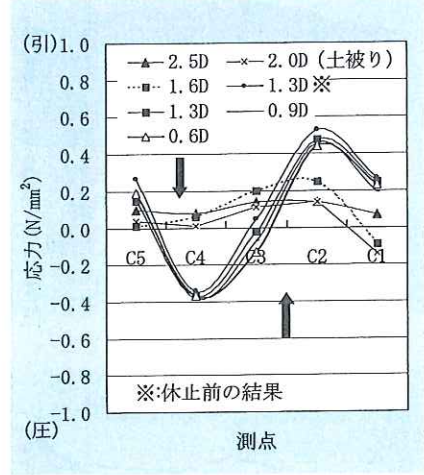


図-6 覆工応力円周方向分布 (吸坂トンネル)

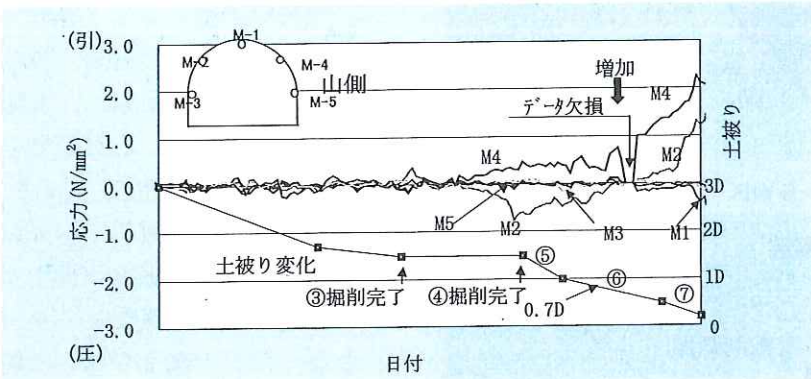


図-5 覆工応力 (天満トンネル)

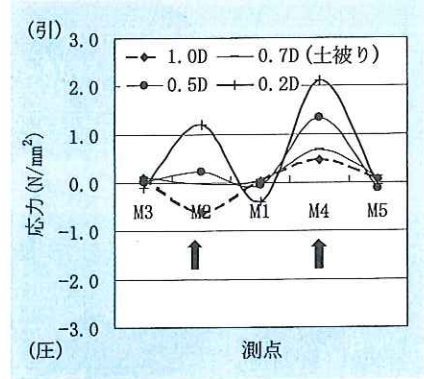


図-7 覆工応力円周方向分布 (天満トンネル)

型変位計)の時系列変化を示す。内空変位は覆工の相対変位を示しているが、除荷過程にも関わらず、掘削開始(3.0D)とともに3測線(水平測線が最大)とも微量ではあるが収縮している。土被り変化との関係では、覆工応力の変化と類似して、3測線とも2.0D~1.5Dの土被りまでに大きな変化が発生している。その後は、斜測線の変化は小さいが、水平測線は引き続き収縮傾向にあり、側圧を受けているものと考えられる。なお、天満トンネルは、光波により計測したが、有意な変化量は認められなかった。

c) 覆工天端変位

図-9に吸坂トンネルの覆工天端鉛直変位と土被りの変化の関係を示す。応力の計測断面(No.40+00)の結果に加え、他2断面の計測結果も示してある。天端変位は、縦断位置による違いはなく、3断面とも応力の変化と異なり土被りが1.0Dより小さくなっても単調に増加している。また、内空変位の変化量に比べ大きな変化量を示しており、天端だけでなく覆工全体に浮き上がりをしていると考えられる。一方、天満トンネルは

1mm以下で有意な変化は計測されなかった。

d) 計測結果と地山変形係数との関係

最終計測値(覆工最大応力：肩部に発生、覆工天端鉛直変位)と地山変形係数(地盤の硬軟)との関係を見る。覆工最大応力は、変形係数の小さい(軟らかい地盤)吸坂トンネルが変形係数の大きい(硬い地盤)天満トンネルよりも小さな値であったが、覆工天端鉛直変位は吸坂トンネルが天満トンネルより大きな値であった。

3.2 側部切土の計測結果

図-10は、和田トンネルの亀裂変位の時系列分布を示したものである。山側の亀裂変位は②番目の掘削終了とともに増加(開口)しはじめ、途中、変化はあるものの、全体的に増加傾向にある。影響の出始める側方距離としては、①番目撤去終了時まで亀裂変位の変化がほとんど現れていないことより1.5D~1.0D程度と考えられる。一方、谷側の亀裂は、わずかではあるが、減少(閉じる)傾向にある。これらの理由は、この断面の覆工応力の測定を行っていないためどの程度の応力が発生していたかは不明ではあるが、側部切土によりト

ンネルに山側から偏荷重が作用するため山側では内側引張の応力が、谷側では内側圧縮の応力がそれぞれ発生したためと考えられる。ただし、側部土被りが0.5D未満になる⑦の掘削終了時の目視観測では覆工に有害な変状は認められなかった。

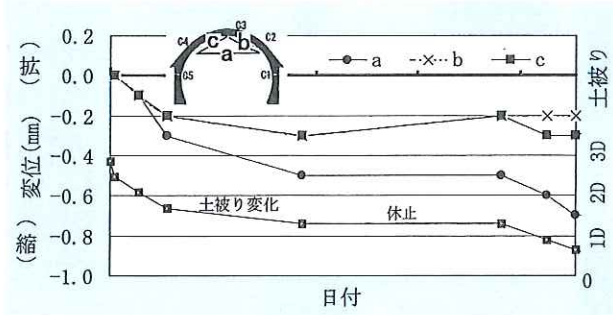


図-8 内空変位 (吸坂トンネル)

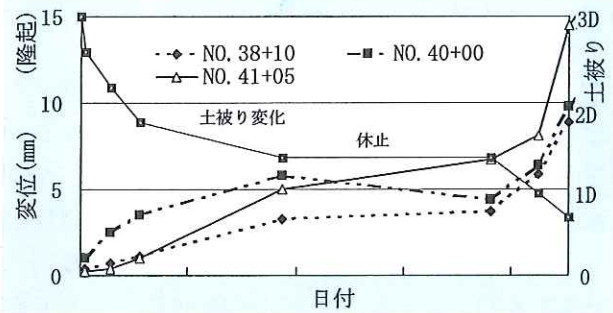


図-9 覆工天端鉛直変位 (吸坂トンネル)

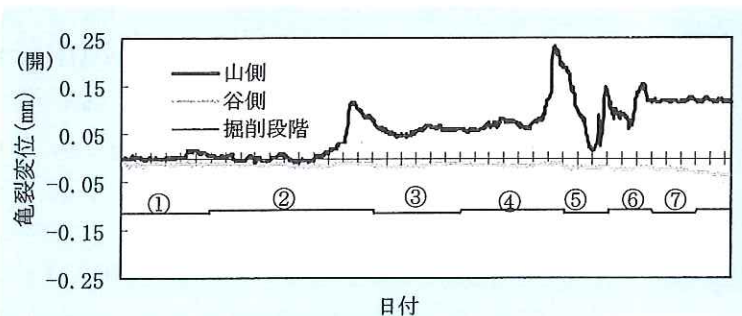


図-10 亀裂変位 (和田トンネル)

4. 数値解析結果

4.1 解析方法

図-11に示す上部切土・側部切土モデルによる数値解析を実施し、計測結果との比較を行った。解析手法は二次元有限差分法 (解析コード FLAC2D) を使い、初期応力を再現した後、上部、側部から番号順に掘削を行った。地山は弾性体とし、地山と覆工の間には圧縮力は伝達するが引張力は伝達しないジョイント要素を入れた。上部切土に関しては、計測結果との比較以外に、ジョイント要素のバネ値を変化させることで覆工と周辺地山の接触状態 (空洞の有無、ゆるく崩積土が溜まっているなど) をある程度評価できると考えられるため、 K_v 、 K_s の値を変化させたパラメータ解析を行った。なお、解析結果は計測結果と同様、初期応力・変位からの増分で表示してある。

4.2 上部切土の解析結果

図-12に、吸坂トンネルに相当する変形係数 $E=50\text{MPa}$ の土被りの変化にともなう (a) 覆工内側の円周方向の応力分布、(b) 側壁部 (SL 部) 応力の変化、(c) 覆工天端鉛直変位の変化を示す。なお、ジョイントバネ値は十分硬いことを表す $1.0\text{E}+10\text{Pa/m}$ ($E=1,000\text{MPa}$ 程度に相当) とした。(a) 図より、円周方向の応力分布は、側壁部 (SL 部) で最大、天端部で最小となる左右対称な形となるが、土被りが 1.3D 程度となる掘削 3 の終了以降は、全体に応力の変化は見られない。このことは (b) 図からも分かる。これは地山の変形が覆工へ伝わりにくくなるためである。

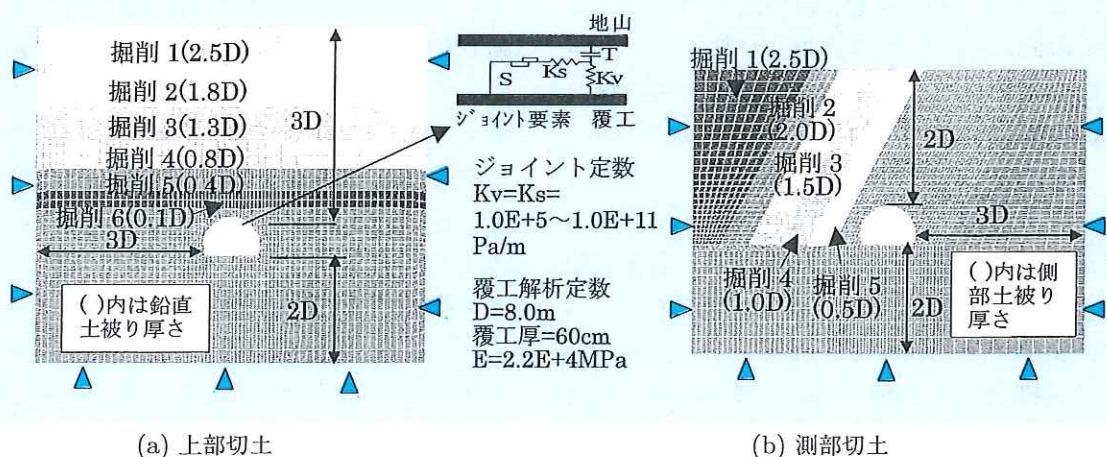


図-11 解析モデル

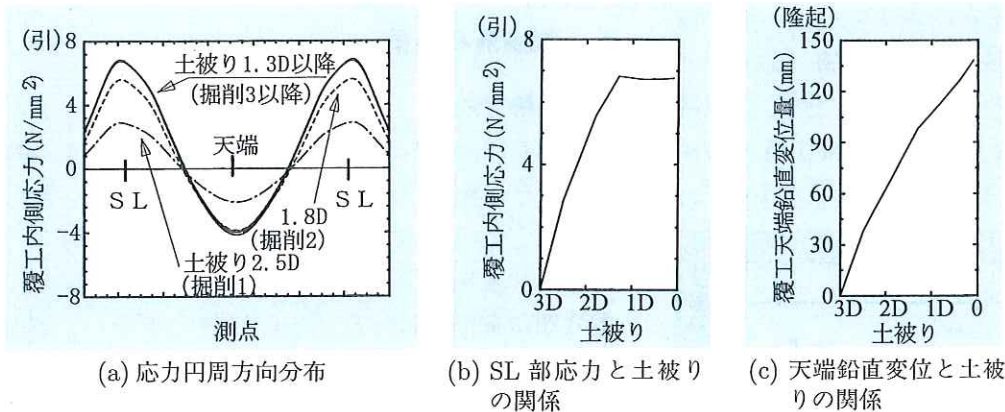


図-12 上部切土解析結果 (E=50MPa)

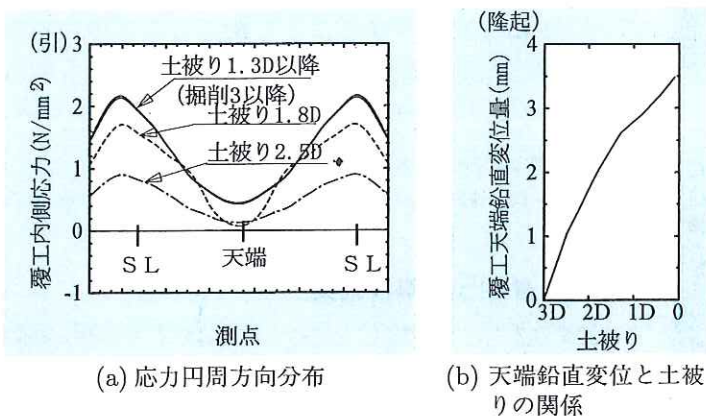
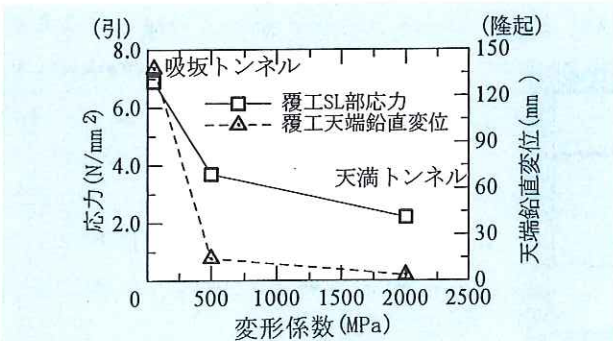


図-13 上部切土解析結果 (E=2000MPa)



つまり、上部切土にともない地山が上方へ変形することによって、天端および側壁部の一部で、地山と覆工の間にあるバネに引張力が作用し、地山と覆工が分離するためである。一方、(c) 図の覆工天端鉛直変位は、若干増加勾配は変わるが、切土進行にともなって最終ステップまで増加している。これは、鉛直方向の地山変形はトンネル底部および側壁部からも覆工に伝達されるので、応力に比べ最終段階まで影響を受けやすいためである。

次に計測結果と比較する。吸坂トンネルは、応力および鉛直変位の土被りの減少にともなう変化(図-4、9と図-12 (b), (c)) は比較的良い一致を示したが、応力の円周方向の分布形(図-6と図-12

(a)) や絶対値は計測結果と異なる結果となった。天満トンネル (E=2000MPa) の結果を図-13 に示す。こちらは、円周方向の分布形および絶対値(図-7と図-13 (a)) は計測結果と比較的良好一致を示しているが、応力の変化は、

吸坂トンネルと同様に 1.3D 以降増加しない形となり、計測結果と異なる結果となった。なお、鉛直変位の絶対値は解析領域の取り方に大きく依存するため、その評価についてはさらに検討を要する。

変形係数・ジョイントバネ値の解析結果への影響を見るため、図-14 にジョイントバネ値 (=1.0E+10Pa/m) を固定して、変形係数を変化させた場合 (50, 500, 2000MPa) の解析結果 (覆工 SL 部応力および覆工天端鉛直変位) を示す。応力、鉛直変位とも変形係数が小さい方が大きくなる傾向であることが分かる。応力に関しては、計測結果と逆の傾向である。次に、変形係数を固定して (50, 2000MPa の 2 ケース) バネ値を変化させた場合の SL 部応力と天端鉛直変位の結果を図-15 に示す。応力は、いずれの変形係数においても、バネ値がある値以下になると急激に小さくなる事が分かる。このことは、周辺地山と覆工の間のバネ値 (接触状態) によっては、変形係数が小さくても発生応力が小さくなる可能性があることを示していると考えられる。一方、鉛直変位は、変形係数に依存し、バネ値 (接触状況) の影響をあまり受けない結果となっている。吸坂、天満トンネルの周辺状況の違いを考えると、このことが、変形係数の大きい天満トンネルに比べ、吸坂トンネルで鉛直変位は大きい、応力は小さくなった原因の一つではないかと考えられる。

4.3 側部切土の解析結果

図-16 に、和田トンネルに相当する E=700MPa の側部土被りの変化にともなう (a) 覆工内側の円周方向の応力分布、(b) SL 部応力の変化を示す。バネ値は 1.0E+10Pa/m である。(a) 図の応力分

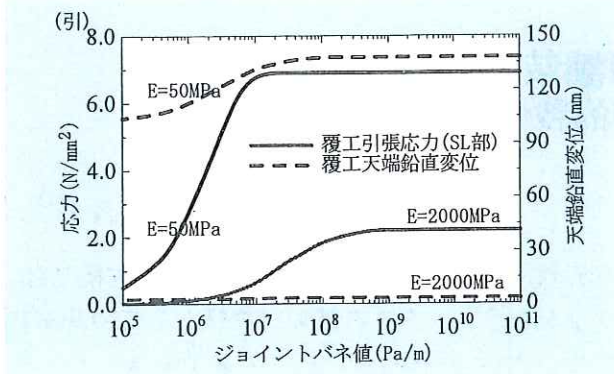


図-15 解析結果とバネ値の関係 (上部切土)

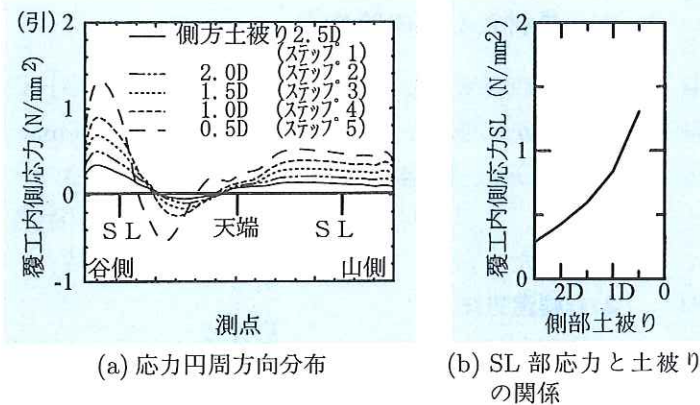


図-16 側部切土解析結果

布からは、山側肩部で引張応力、谷側肩部で圧縮応力の発生が見られ、この結果は、計測結果(亀裂変位)の傾向と定性的に一致している(図-10)。(b)図の応力の変化は、上部切土の結果と異なり、側部切土量の増加にともなって単調に増加している。特に1.0Dから0.5Dで大きく増加しているのが分かり、側部土被りが小さくなるに従い、影響がより大きくなること分かる。これは、側部切土の場合は、掘削にともなう覆工と地山との分離範囲が上部切土に比べ狭いため、周辺地山の变形が最終ステップまで影響するためと考えられる。なお、天端鉛直変位は1.0mm以下と小さな値であった。

5. まとめ

a) 上部切土に関する計測結果

同程度の土被り度で、主に地盤条件が異なる計測結果の比較より、上部切土にともなう覆工応力に関して、絶対値は、軟らかい地盤の方が小さく、硬い地盤の方が大きい値となった。覆工に影響が開始する鉛直土被りは、軟らかい地盤で2.0D~1.5Dで、その後はあまり増加しないパターンとなったが、硬い地盤では0.7D程度であり、その後は急

激に増加するパターンとなった。覆工天端鉛直変位に関しては、硬い地盤ではほとんど発生せず、軟らかい地盤の方が大きな値となり、土被りの減少とともに単調に増加するパターンであった。

b) 側部切土に関する計測結果

初期鉛直土被り約2.0D、側部土被り約2.5Dの地山において、覆工に影響(亀裂変位)が開始する側方の離れは約1.5D~1.0Dであった。その後は単調に増加した。さらに、最終的にはトンネルの側部土被りが0.5D未満になるまで近接したが覆工に有害な変状は見られなかった。

c) 数値解析結果

覆工と地山の中にジョイント要素を入れたモデルを用いて解析した結果、上部切土に関しては、土被りの減少にともなう解析値の変化は、変形係数によらず、応力はある段階まで増加し、一定値となるが、鉛直変位は切土完了まで単調に増加するパターンとなることが分かった。これは、地盤の軟らかいトンネルの計測結果の傾向と一致した。絶対値に関しては、変形係数による違いだけでは説明できず、覆工と周辺地山の接触状況の違いが影響している可能性があることが分かった。同種問題に数値解析を適用する場合、変形係数の違いだけでなく、覆工と周辺地山の接触状況の違いも考慮する必要があると考えられる。一方、側部切土に関しては、側部土被りの減少にともなう応力の変化や円周方向の分布は計測結果と同様な傾向を示した。

1) 例えば、桜井他：地表面掘削による既設トンネルの変形挙動、第8回岩の力学国内シンポジウム講演会論文集, pp.243-248, 1990.

蒲田浩久*

真下英人**



独立行政法人土木研究所
基礎道路技術研究グループ
トンネルチーム
主任研究員
Hirohisa KAMATA



同 基礎道路技術研究グループ
トンネルチーム
首席研究員, 工博
Dr.Hidetoshi MASHIMO