

めがねトンネルの地表面沈下発生に与える 土被りと地盤条件の影響

小原 勝巳¹・鎌田 和孝²・岸田 展明³・進士 正人⁴

¹正会員 飛鳥建設(株) 東日本土木支社 関東土木事業部 (〒102-8332 東京都千代田区三番町2)
E-mail: katsumi_obara@tobishima.co.jp

²正会員 西日本旅客鉄道(株) 神戸支社神戸保線区 (〒652-0897 神戸市兵庫区駅前通り5-5-2)

³正会員 中電技術コンサルタント(株) 道路部 (〒734-8510 広島市南区出汐二丁目3-30)
E-mail: nkishida@cecnet.co.jp

⁴正会員 山口大学教授 大学院理工学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)
E-mail: shinji@yamaguchi-u.ac.jp

2本のトンネルを接続して掘削するめがねトンネルの多くは、土被りが20m程度以下と小さい上に地表面部に家屋等が密集し、地表面沈下の抑制が要求される厳しい条件下で施工されている。過去のめがねトンネルの施工例を見ると、最終沈下量を予測する際に、先進坑掘削時の地表面沈下量からの予測値より実際の最終沈下量が大きいい例が見られ、予測精度の向上が実務上の課題となっている。本研究では、小さな土被りで施工されためがねトンネルの全長にわたる地表面計測結果を掘削段階ごとに分析した。その結果、後進坑掘削による地表面沈下が先進坑掘削よりも大きくなる原因は、先進坑と後進坑それぞれの掘削段階のトンネル全体幅がトンネル土被りに対して大きく変化することによる寸法効果とトンネル上部の地盤構成が影響していることがわかった。

Key Words : binocular tunnel, NATM, field measurements, scale effect, numerical analysis

1. はじめに

都市近郊の台地、丘陵部の幹線道路の建設においては、用地の制約により上下線の2本のトンネルが接続した、いわゆる「めがねトンネル」が選定される例が少なくない。それらの多くは、10~20m程の小さな土被りである上に、地表に建築物、ライフライン等が近接し、地表面沈下の抑制が施工上の重要な課題となっている。特に、めがねトンネルでは、同一断面を切羽が複数回通過するので、掘削段階ごとの発生傾向から最終的な地表面沈下を事前に精度良く予測することで、近接構造物への影響を最小限に抑制する必要がある。

めがねトンネルの2本の本線トンネルのうち、先進坑の掘削に伴う地山のゆるみ等の影響により、後進坑掘削時の地表面沈下は先進坑掘削時に比べて大きくなりやすいことが予見できる。筆者らは、近年施工されためがねトンネルの地表面沈下の計測事例を収集し、先進坑と後進坑掘削時のそれぞれの地表面沈下の増分を比較した。その結果、先進坑に対する後進坑の沈下増分の比（以下、「沈下増分比」と呼ぶ）は、土被りに比例して増加し、最大5程度まで大きくなることを見出した。このような

大きな沈下増分比となるめがねトンネルに対し数値解析を適用する場合、地盤に対する先進坑掘削の影響評価を見誤ると、最終沈下量を小さく予測する危険性を内包しており、実際の現場計測においても先進坑掘削時の沈下量を用いた予測最終値が実計測値よりも過小となった事例が見られた。そのため、理論解析を用いて実計測データに基づき最終沈下量を予測する手法を提案した¹⁾。

また、この研究を踏まえ、三次元弾性逆解析を用いて土砂地山に施工されためがねトンネルの数値シミュレーションを行ったところ、先進坑掘削による周辺地盤の強度低下を過分に評価しなければ後進坑掘削時の地表面沈下を表現できないことを明らかにした²⁾。そのため、地盤の強度低下以外の解決策を検討する課題が残った。

本研究では、土砂地山中に建設されためがねトンネルの全線にわたり実施された地表面沈下計測結果を詳細に分析し、沈下増分比が土被りとともに増大する原因について考察した。その結果、三次元弾性解析によるパラメータ解析と計測結果の比較より、掘削段階により拡大するめがねトンネルの全体掘削幅と土被りとの比が沈下増分比に大きく影響すること、トンネル上部の地盤構成が沈下増分比を大きくする原因となることを見出した。

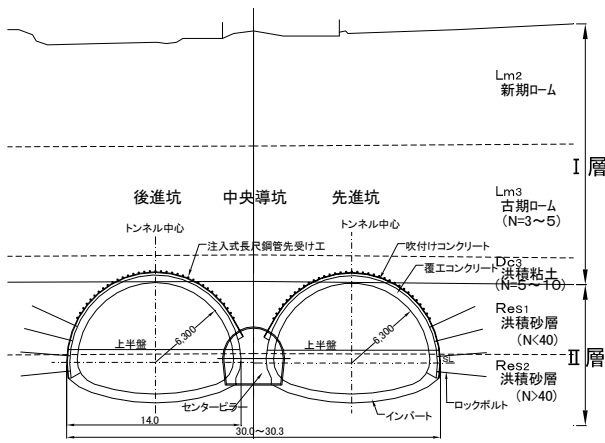


図-1 対象めがねトンネルの地層構成の代表例

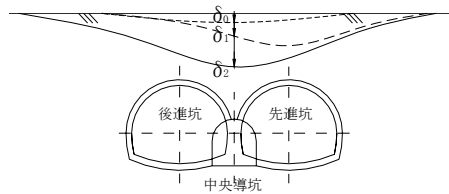


図-2 地表面沈下着目点と地表面沈下分布の概念図

2. トンネル全線の地表面沈下計測結果の特徴

(1) 研究対象とするめがねトンネルの地山状況

対象とするめがねトンネル（以下Aトンネルと略記）は、なだらかな丘陵地に施工された道路トンネルである。図-1に、代表的な地層構成を示す。この図からわかるように、このトンネルの地質構成は洪積世の未固結砂層(N値=30~100)を基盤（II層）とし、その上部をN値=3~15のローム及び洪積粘土（I層）が覆う2層構造である。

I層の層厚は10~20mで変化するものの、平均的には概ね15m程度でトンネル全線に分布している。トンネル本坑の土被りは5~24mの範囲で変化するため、それに伴いI層とII層の境界面も本坑上半盤付近から天端より約15mの上部まで連続的に上下する。また、II層の上部（厚さ5~10m）は風化の影響を受け軟質化(N値<40)した状態にある。

めがねトンネルの施工は、すべて山岳工法により施工され、中央導坑、センターピラーの構築に続いて先進坑（図-1右側）をショートベンチ工法で掘削し、インバート閉合後に先進坑と同じ手順で後進坑を施工している。また、先進坑および後進坑の全線において、補助工法として注入式長尺鋼管フォアパイリングが併用されている。なお、地表面沈下は中央導坑、先進坑および後進坑のそれぞれの掘削段階毎に収束しており、地下水位低下による圧密の影響はほとんどないと考えられる。

本研究では、図-2に示すように中央導坑直上の計測点の地表面沈下に着目し、その沈下量の累計と掘削段階ご

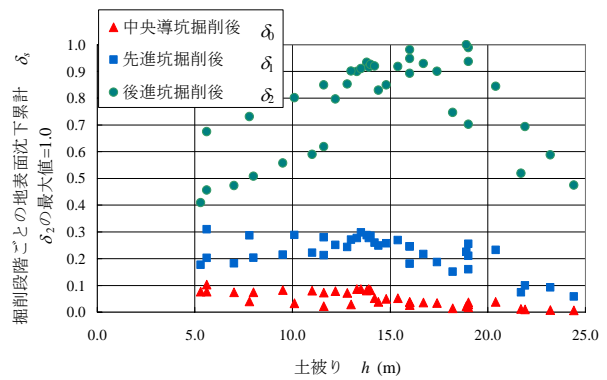


図-3 地表面沈下累計 (δs) の土被り (h) による変化

表-1 各掘削段階において最大沈下量となる土被り (h)

掘削段階	土被り h(m)
中央導坑掘削後 (δ ₀)	h=0~5(推定)
先進坑掘削後 (δ ₁)	h=12~14
後進坑掘削後 (δ ₂)	h=16~19

との地表面沈下増分を以下の添字で表現する。すなわち、

地表面沈下累計：δ_s

地表面沈下増分：δ_{Δs} (δ_{Δs}=δ_s-δ_{s-1})

ここで添字sの数値は下の掘削段階を示す。

s=0：中央導坑掘削後

s=1：先進坑掘削後

s=2：後進坑掘削後（最終値）

さらに、先進坑と後進坑掘削時の地表面沈下増分を比較するため、各掘削段階での地表面沈下増分 (δ_{Δs}) の最終沈下量 (δ₂) に占める割合「沈下増分率」(P_s) を新たに定義する。

$$\text{沈下増分率} : P_s = \delta_{\Delta s} / \delta_2 \quad (1)$$

これらより、前述の「沈下増分比」(R₂₁) は同一計測断面におけるδ_{Δ2}およびδ_{Δ1}より次のように記述される。

$$\text{沈下増分比} : R_{21} = \delta_{\Delta 2} / \delta_{\Delta 1} \quad (2)$$

(2) 掘削段階毎の最大地表面沈下と土被りの関係

トンネル全線における土被り (h) に対する地表面沈下累計 (δ_s) の関係を図-3に示す。ここで、土被り (h：添字なし) は計測断面ごとの導坑中心における地表面と本坑掘削天端の標高差で統一し、計測データは全線における最終地表面沈下累計 (δ₂) の最大値を1.0とした比率で表示している。また、各掘削段階においてピーク沈下量を示す土被りを表-1に示す。

これらの図より、以下のことがわかる。

- a) 図-3 から明らかなように、地表面沈下には最大沈下量を示す土被りが存在する。これは土被りが大きくなるとともに、トンネルがN値の大きいII層内に含まれることが一つの要因と考えられる。従来、単設のトンネルでは、坑口部から土被りが増加する中で最大沈下量が現れる計測事例、支保剛性及びグラウンドアーチ

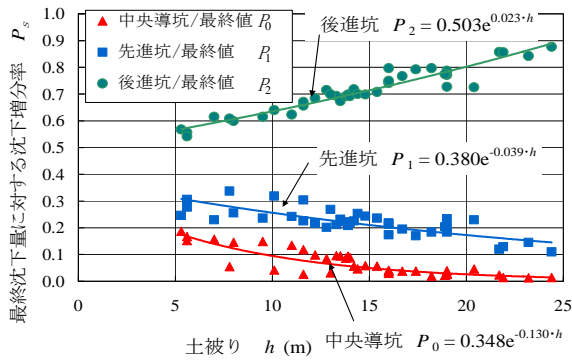


図-4 土被りに対する掘削段階ごとの沈下増分率 (P_s)

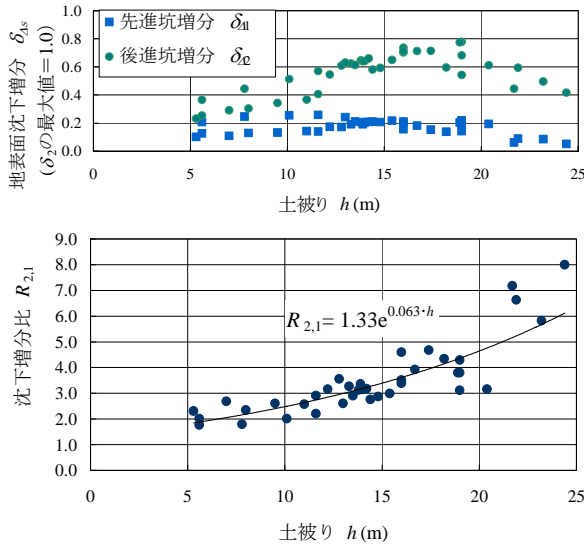


図-5 沈下増分比 ($R_{2,1}$) の土被りによる変化

と関連付けた研究例⁹⁾があるものの、図-3 に示すようなめがねトンネル全線で地表面沈下が計測され、土被り (h) と最大沈下量の関係を明瞭に表す計測例はこれまで報告されていない。

- b) 図-3、表-1 から明らかなように、掘削段階の進展に応じて地表面沈下の最大値が現れる土被りが変化し、より大きな土被りの位置で地表面沈下が最大値となる。

(3) 掘削段階毎の地表面沈下の発生割合と土被りの関係
掘削段階毎の沈下増分率 (P_s) と土被り (h) との関係を図-4 に示す。また、先進坑と後進坑の各地表面沈下増分 ($\delta_{d,s}$) および沈下増分比 ($R_{2,1}$) と土被り (h) との相関図を図-5 に示す。

これらの図から、以下のことがわかる。

- a) 図-4 から明らかなように、沈下増分率 (P_s) は、土被りの変化に対して、掘削断面毎に異なる一定の変化率を有する。
b) 後進坑掘削による沈下増分率 (P_2) は土被り 5mの地点ですでに 0.5 を超えて沈下量全体の半分以上を占めており、後進坑掘削時の地表面沈下への影響がそれまでの掘削段階より相対的に大きいことがわかる。
c) 土被りの増加に伴い、後進坑掘削による沈下増分率

(P_2) が中央導坑 (P_0) および先進坑 (P_1) に比べて増加し、土被り 20m以上では最終沈下量のほぼ 8 割以上を占める。すなわち、土被りが大きくなるほど後進坑掘削の地表面沈下に与える影響が支配的になっていくことがわかる。

- d) 図-5 に示すように、沈下増分比 ($R_{2,1}$) は、沈下増分 ($\delta_{d,s}$) の大きさによらず土被りの増加に伴い単調に増加し、かつ土被りに対して指数関数で近似できる。以上から、Aトンネル全線の地表面沈下計測データでは、計測断面ごとに同一の地盤条件を共有する先進坑と後進坑の沈下増分 ($\delta_{d,s}$) には、沈下の絶対量に関わらず、土被りに起因して連続的に変化する明瞭な一定の関係が認められた。次にその要因を考察する。

(4) 地表面沈下に対する全体掘削幅の影響

地表面沈下の大小を決定づける要因について、島田⁹⁾は、実験と実計測データに基づく地表面沈下の推定方法に関する研究において、a) 土被り、b) 地質条件、c) トンネル径、d) 施工方法の 4 項目を挙げている。

A トンネルでは全区間において同一断面形状をほぼ同一な掘削工法で施工しているため、d) 施工方法は不変といえる。したがって、先進坑および後進坑の個々について見れば、地表面沈下の変動要因は a)、b) に限定できる。一方、めがねトンネルでは掘削段階によりトンネル全体幅が拡大することも考えることができる。めがねトンネル全体を 1 本のトンネルと考えた場合、島田が挙げた上記 c) 「トンネル径の変化」に相当する要因が A トンネル全線の地表面沈下に影響を及ぼしていることも考えられる。これらのことから、掘削段階毎にトンネル全体掘削幅が変化することを考慮するため、以下の定義を追加する。

土被り断面比 : h/D_s

沈下累計断面比 : δ/D_s

ここに D_s : 掘削段階ごとのトンネル全体掘削幅

$s=0$: 中央導坑掘削後 $D_0 = 5.0\text{m}$

$s=1$: 先進坑掘削後 $D_1 = 17.7\text{m}$

$s=2$: 後進坑掘削後 $D_2 = 30.3\text{m}$

h_s : 土被り (導坑中心地表面標高)

$s=0$: 中央導坑天端土被り

$s=1$: 先進坑天端土被り

$s=2$: 後進坑天端土被り ($h_1=h_2$)

土被り断面比 (h/D_s) に対する掘削段階ごとの沈下累計断面比 (δ/D_s) の変化を図-6 に示す。

この図から、以下のことがわかる。

- a) 掘削段階毎の最大沈下累計断面比 (δ/D_s) は、中央導坑と先進坑が同程度であり、後進坑はこれらに比べて大きな値を示す。ただし、中央導坑は全線で土被り断面比 (h_0/D_0) が 2.0 以上と大きいため、沈下累計断面比 (δ_0/D_0) の最大値を示す土被りが確認できない。

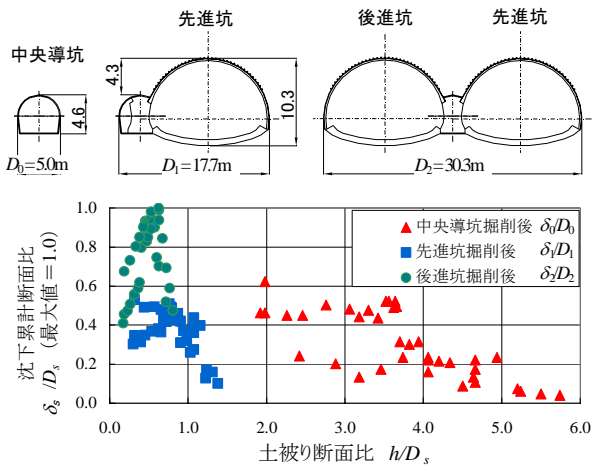


図-6 土被り断面比 (h_s/D_s) と沈下累計断面比 (δ_s/D_s) の関係

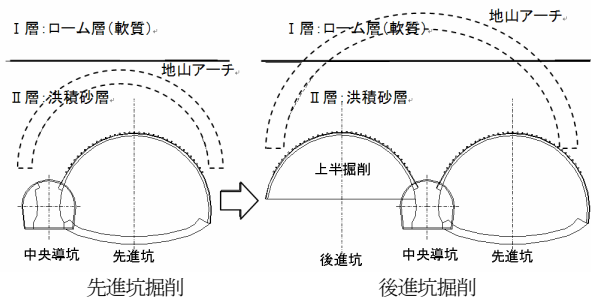


図-7 掘削段階による地山アーチの変移概念図

b) 沈下累計断面比 (δ_s/D_s) は、先進坑が土被り断面比 $h_1/D_1=0.8$ 程度、後進坑が概ね $h_2/D_2=0.5$ で最大値となる分布形状を示す。

c) 図-1 に示すようにAトンネルの地質状況は上位よりI層 (ローム層) とII層 (洪積砂層) の2層構成となっており、I層はII層に比較して軟質である。このため、図-7 に示すような地山アーチの概念を考えると、同一計測断面では後進坑掘削によるトンネル全体幅の拡大に伴い地山アーチの幅と高さが拡大し、トンネル上部に分布する軟質なI層により強く影響を受け、先進坑に比べて後進坑の沈下累計断面比 (δ_2/D_2) が大きくなると考えられる。

めがねトンネルにおける掘削段階ごとに変化する全体掘削幅 (D_s) で除して土被り (h_s) と地表面沈下累計 (δ_s) を無次元化して比較検討することにより、上記a) ~c) に示すように、地表面沈下量の掘削段階による変化は、地層分布や地山物性値などに対するいわゆるスケール効果の影響を受けていることが明らかとなった。

3. 数値解析による地表面沈下挙動の検討

Aトンネル周辺地山をI層とII層の層境を境界面とした2層系地盤と仮定してモデル化し、地層厚と地盤物性値

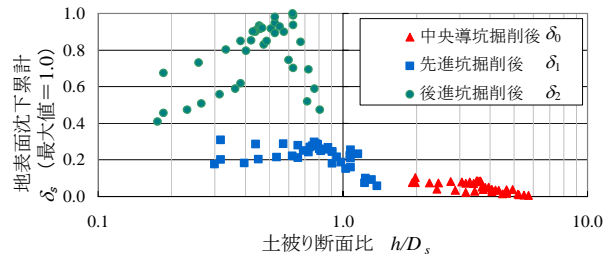


図-8 土被り断面比 (h_s/D_s) と地表面沈下累計計測値 (δ_s)

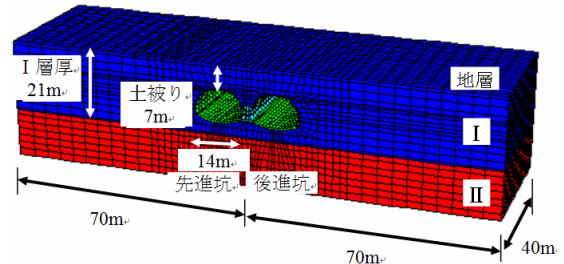


図-9 解析モデル (地層厚、土被りは変化)

表-2 地山物性値

地山物性値	単位体積重量 kN/m ³	弾性係数 N/mm ²	ポアソン比
I層	15	15	0.4
II層	15	30~60	0.4

表-3 支保物性値

支保物性値	単位体積重量 kN/m ³	弾性係数 N/mm ²	ポアソン比
吹付けコンクリート+鋼製支保工	24	3,920	0.2
センターピラーコンクリート	24	21,600	0.2

表-4 解析ケース

解析条件	I層の層厚 (m)	弾性係数 N/mm ²	
		I層	II層
I層の層厚の変化	7.0	15	40
	14.0		
	21.0		
	28.0		
II層の地山弾性係数の変化	28.0	15	30
			40
			60

を変化させた数値解析を行うことにより、土被り (h_s) の変化に対する地表面沈下累計 (δ_s) および沈下増分比 (R_{21}) の変化 (図-8) を解析的に表現し得るかを検討する。なお、土被り断面比 (h_s/D_s) 1.0 以下の比較を見やすくするため、以降の解析結果では片対数図により比較を行う。

(1) 解析条件および解析ケース

本検討では先進坑と後進坑の掘削時の変位挙動を比較するため、解析条件を絞って単純化したモデルを選択し、有限差分法に基づく三次元解析プログラム「FLAC3D」による三次元弾性解析を用いる。解析モデルの一例を図-9、地山物性値を表-2、支保物性値を表-3 に示す。また、表-4 に解析ケースを示す。初めにI層の

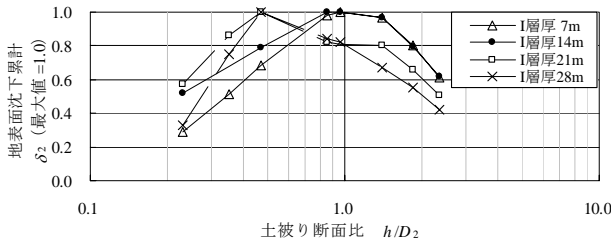


図-10 I層の層厚変化による沈下累計(δ)の分布

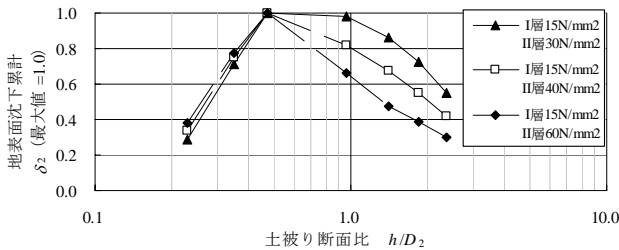


図-11 II層の弾性係数の変化による沈下累計(δ)の分布

層厚を変化させた解析を行い、次にII層の弾性係数を変化させた場合を想定し、それぞれのケースにおいて土被り(h)を7~70mで変化させて掘削段階毎の地表面沈下の発生量と沈下増分比(R_{2,1})の変化を求めた。また、解析ステップは、1.中央導坑掘削及びセンターピラーの施工、2.先進坑掘削および支保工の施工、3.後進坑掘削及び支保工の施工の3ステップとする。

(2) 解析結果と考察

a) I層の層厚変化

I層の層厚を変化させた場合における地表面沈下累計(δ)の土被り断面比(h₂/D₂)による変化を図-10に示す。I層の層厚が変化することにより地表面沈下挙動は大きく変化し、I層の層厚が大きくなるに従い地表面沈下累計(δ)がピーク値となる土被り断面比(h₂/D₂)が小さくなる。すなわち、I層の層厚を21~28mとした場合が最も計測値(図-8)に近い挙動を示す。これは、I層の実際の厚さが概ね15m程度であるものの、II層の上部(5~10m)が軟質(N値<40)であることが影響したため、実際よりも層境が低下したものと考えられる。

b) 地山物性の変化

II層の弾性係数を変化させて得られた地表面沈下累計(δ)と土被り断面比(h₂/D₂)の関係を図-11に示す。

II層の弾性係数の変化により、以下の特徴が見出せる。

- 弾性係数を60N/mm²と設定した場合、土被り断面比(h₂/D₂)が約0.5において地表面沈下累計(δ)が最大値を示す。その後は地表面沈下累計は小さくなり、実計測値に最もよく似た傾向を示す。
- II層の弾性係数の影響は、ピーク値を超えた範囲(h₂/D₂>1の範囲)で沈下挙動に差が生じる。これは、土被り断面比(h₂/D₂)の大きい範囲では、トンネル周辺地山の弾性係数が高い状況にあるため、トンネル周

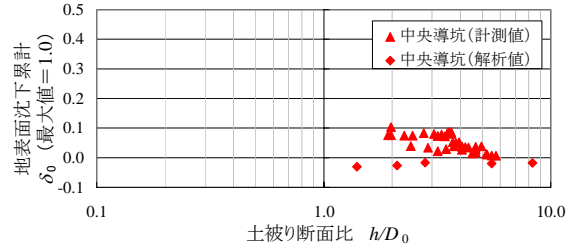


図-12 土被り断面比による計測値と解析値の比較(中央導坑)

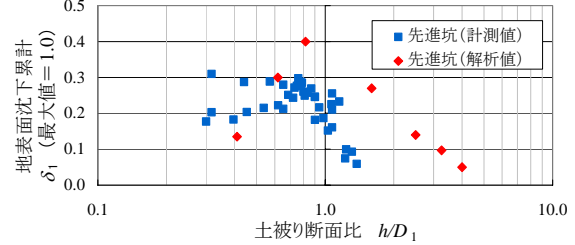


図-13 土被り断面比による計測値と解析値の比較(先進坑)

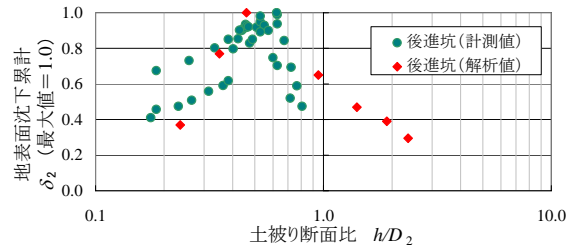


図-14 土被り断面比による計測値と解析値の比較(後進坑)

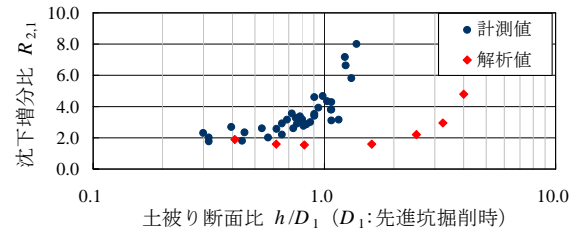


図-15 沈下増分比(R_{2,1})に関する計測値と解析値の比較

辺の変形量が小さくなるためと考えられる。

c) 掘削段階毎の比較

上記のa), b)において最も良く一致した条件(地層厚:28m, II層の弾性係数:60N/mm²)による掘削段階別の地表面沈下累計(δ)を実計測値と比較する。

図-12, 図-13 および図-14 にそれぞれ中央導坑, 先進坑, 後進坑掘削前後の地表面沈下累計(δ)と土被り断面比(h₂/D₂)の関係を示す。

これらの図から、実計測値と同様に解析結果においても、掘削段階が進展するにつれて地表面沈下累計の最大値を示す土被り断面比(h₂/D₂)が小さくなることが読み取れる。このことから、Aトンネルにおいて地表面沈下の最大値をとる深さが土被り断面比により変化するのは、地表付近の強度低下を示すI層(ローム層)の層厚とII層(洪積砂層)の弾性係数、すなわち深度方向への地盤の弾性係数の変化に大きく依存することが分かる。

d) 沈下増分比 (R_{21}) と実計測値との比較

図-5 に示した計測値と解析により得られた沈下増分比 (R_{21}) を比較し、土被り断面比 (h_1/D_1) との関係を図-15 に示す。これより、沈下増分比 (R_{21}) は $R_{21} > 1$ となっており、先進坑よりも後進坑掘削による地表面沈下増分の方が大きくなる計測結果を再現できている。しかし、全体的に解析結果の方が小さい。これより、地盤構成を考慮した本解析モデルを適用し、先進坑の沈下増分から後進坑掘削後の地表面沈下量を予測した場合、実際の沈下量は予測値よりも大きくなることが予見される。

4. まとめ

本研究で得られた知見を取りまとめる。

- めがねトンネルの地表面沈下には累計沈下量が最大となる土被りが存在し、その最大沈下量を示す土被りは掘削段階が進むにつれて、より大きくなる(図-3)。これは、掘削段階ごとにトンネル全体幅が拡大し、同一断面において土被り断面比 (h_1/D_1) が変化することが要因と考えられ、実際の計測管理において、最大沈下量となる断面が土被りの大きい側に移行することに留意する必要がある。
- 地表面沈下と土被りを掘削の各段階での断面幅で除して掘削段階毎の地表面沈下の変化を比較した場合でも、トンネル上部の地盤が2層構造となっているため相似性が働かず、いわゆるスケール効果により掘削段階毎に異なった沈下の発生傾向を示すことがわかった。このように、トンネル上部の地盤がトンネル周囲より軟質である場合には、掘削段階の進展に伴い想定以上の地表面沈下が生じることに注意する必要がある。
- 三次元数値解析により、沈下増分比が $R_{21} > 1$ となる現象、すなわち後進坑掘削時の沈下増分が先進坑の沈

下増分より大きくなる現象を表現できたが、実計測値の大きな沈下増分比 ($R_{21} > 5$) に対して解析値は小さな値となった。これより、精度良い沈下予測を行うためには、先進坑掘削時の周辺地盤の緩み等による非線形挙動の影響をより詳細に検討する必要がある。

本研究で示した沈下増分比 (R_{21}) の土被りによる変化は、近接した2本のトンネルの形状、施工方法が同じであれば、センターピラーの無い双設トンネルを含めためがねトンネルの構造形式、補助工法等の違いによらず、地表面沈下予測への応用が期待できる。本研究において示した実現象は、これまで単設のトンネルでは顕在化していなかった課題も見出せることから、今後、より多くの計測例を分析し、予測精度を高めたいと考えている。

参考文献

- 1) 進士正人, 小原勝巳, 若狭紘也, 青木宏一, 中川浩二: めがねトンネルにおける最終地表面沈下量の簡易予測法の提案, 土木学会論文集F, Vol.64, No.3, pp.218-226, 2008.
- 2) 若狭紘也, 上村正人, 青木宏一, 進士正人, 中川浩二: めがねトンネル施工における地表面への影響評価, 土木学会トンネル工学委員会, トンネル工学研究論文・報告集, 第13巻, 報告, pp.281-286, 2003.11
- 3) 島田隆夫: 土被りの浅い山岳トンネルの地表沈下, 土木学会論文報告集, 第296号, pp.97-109, 1980.4
- 4) 岸田潔, 柳民峰, 崔瑛, 木村亮: パイプルーフ工法の余掘り掘削による地表面沈下特性に関する模型実験, 土木学会論文集C, Vol.65, No.3, pp.609-616, 2009.7
- 5) 若狭紘也, 上村正人, 青木宏一, 進士正人, 中川浩二: めがねトンネル施工における地表面への影響評価, 土木学会トンネル工学委員会, トンネル工学研究論文・報告集, 第13巻, 報告, pp.281-286, 2003.11

(2010.7.21 受付)

THE INFLUENCE OF OVERBURDEN AND GROUND CONDITION FOR SURFACE SETTLEMENT ON BINOCULAR TUNNEL

Katsumi OBARA, Kazutaka KAMATA, Noriaki KISHIDA and Masato SHINJI

Most of binocular tunnels which are composed of two parallel tunnels have been constructed with severe surface condition such as residential areas, shallow overburden and weak ground conditions. According to the data base of the past binocular tunnel works, the predicted final settlement by using field measurements data at first center drift was under estimate than the real one, because of the insufficient analysis considering with the effect of the ground by excavation of the primary section. Therefore, the improvement of the forecasting accuracy become a practical issue for binocular tunnel design. In this study, surface settlements of the binocular tunnel constructed in the shallow overburden was estimated in the every excavation stage. From this result, it is revealed that the scale effect due to the expansion of tunnel width in excavation process and the existence of weak layer of upper ground of tunnel provide that the incremental of surface settlement due to excavation of secondary section is larger than primary section.