

# 三次元解析を用いた坑口部の情報化施工 Information construction of tunnel portals using three-dimensional FEM analysis

岡田 謙吾\*                      奈良 聡\*\*  
Kengo Okada                      Satoshi Nara  
原島 大\*\*                        鈴木 健\*\*\*  
Masaru Harashima              Takeshi Suzuki

## 要 約

新東名高速道路湯船原トンネル工事は、静岡県駿東郡小山町から御殿場市の区間における工事であり、上下線複線トンネルそれぞれ約1,600 mを施工する。本トンネル工事では、施工事例の少ないスコリアと称する火山噴出物が堆積した未固結な特殊地層を掘削する。トンネルの坑口部（DⅢ区間）の掘削にあたり、事前に三次元FEM解析を実施し、事前予測をした上で、実施工での変位状況を確認しながら情報化施工を行った。

## 目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 施工上の課題および情報化施工
- § 3. 土質情報の把握および土質定数の設定
- § 4. 事前予測（三次元解析）
- § 5. 施工実績
- § 6. フィードバック解析
- § 7. まとめ

### § 1. はじめに

新東名高速道路湯船原トンネル工事は、静岡県駿東郡小山町から御殿場市の区間における工事であり、そのうち、上下線複線トンネルそれぞれ約1,600 mを施工する。本トンネル工事では、施工事例の少ないスコリアと称する火山噴出物が堆積した未固結の地層を掘削する。そのため、切羽・天端の変状監視を強化しながら掘削するとともに、事前に地山の特性を把握しておくことが重要である。また、地表面の挙動、施工方法による影響および近接施工の影響を把握するためにも坑口部全体をモデル化し、掘削ステップを考慮した三次元解析を行った。

本稿では、トンネルの坑口部（DⅢ区間）の掘削にあたり、事前に三次元FEM解析を実施し、事前予測をした上で、実施工での変位状況を確認しながら情報化施工

を行った内容を報告する。

### 1-1 工事概要

工 事 名：新東名高速道路 湯船原トンネル工事  
工 事 場 所：静岡県駿東郡小山町湯船

～御殿場市神場（図-1 参照）

発 注 者：中日本高速道路株式会社  
東京支社沼津工事事務所

工 期：平成27年10月30日～平成32年7月4日

請負金額：12,555,000,000円（税込）

工事諸元\*：トンネル掘削延長

上り線 1,598 m（NATM）

下り線 1,604 m（NATM）

内空断面積：A = 73 m<sup>2</sup>（片側2車線）

掘削方式：機械掘削工法

掘削工法：上半先進掘削工法

早期閉合法（坑口部）

※工事諸元は本工事のうちトンネル工のみを記載



図-1 湯船原トンネル現場位置図

\* 関東土木（支）湯船原工事事務所  
（現：本社経営企画部企画課）

\*\* 関東土木（支）湯船原工事事務所

\*\*\* 土木設計部設計二課

1-2 地質概要

本トンネルは、東と北を丹沢山地、西を富士火山東麓、南を足柄山地とこれに続く箱根火山に囲まれた、標高300~500mの山間盆地の湯船原台地に位置する。地質としては、新富士火山砕屑物(YFL)と古富士火山砕屑物(OFL1~OFL4)が分布し、江戸時代の富士宝永噴火により堆積した宝永スコリア(Ho)が表面を覆う。宝永スコリアは土地利用に伴う地形改変により削られた部分も多い。

このうち、西側坑口周辺の地形は、奥の沢川の浸食によって形成された谷斜面地形となる。斜面の平均傾斜約30°、河床と湯船原台地の比高差約30mで、小規模なV字谷を形成している。坑口周辺斜面を構成する地層は、古いほうから順にOFL4、YFLおよびHoとなる。OFL4層は、斜面の基盤層を形成し、湯船原台地を構成する。YFL層は、OFL4層を覆って分布する台地の表層地盤である。さらにHoが薄く斜面から台地にかけての表層を覆っている。本工事における坑口部の主な掘削対象土層はOFL4層となる。図-2に西側坑口平面図を、図-3に西側坑口地質縦断面図を示す。

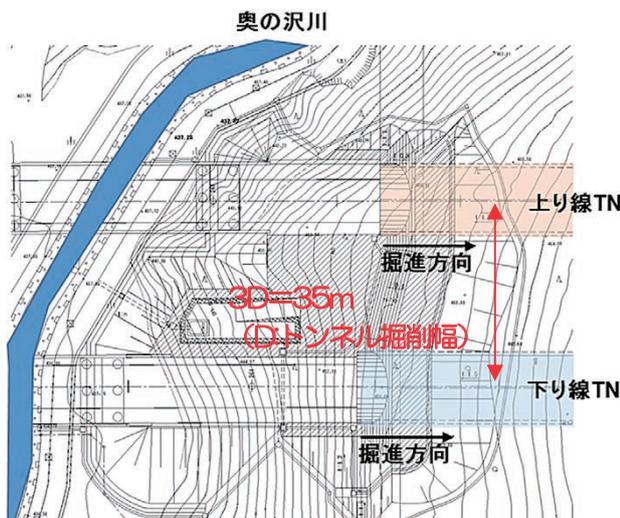


図-2 西側坑口平面図

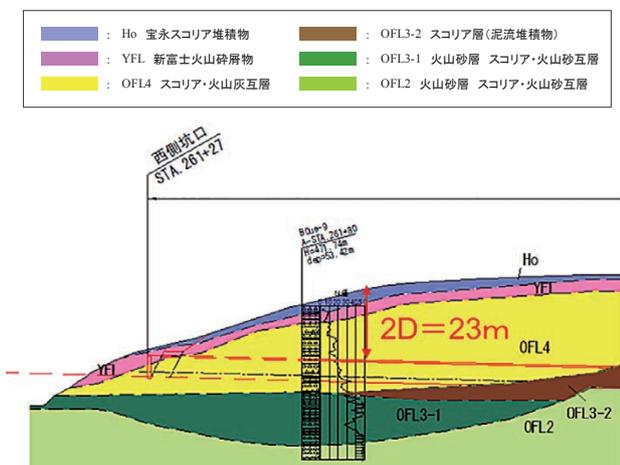


図-3 西側坑口地質縦断面図

§ 2. 施工上の課題および情報化施工

本トンネルの坑口部の施工上の課題として3つ挙げられる。①スコリアという未固結な地山を掘削すること、②坑口部のため小土被りの中を掘削すること、③上下線の離隔距離が3D程度の近接施工であることである。そのような課題がある中でトンネル掘削する必要があり、斜面崩壊や地滑り、トンネルの変状、地表面沈下等の発生が懸念された。そのため、事前検討を十分に行い、その検討結果をもとに情報化施工を実施することとした。

事前検討では、追加ボーリング調査を行い、土質情報を把握するとともに、三次元FEM解析によるトンネルの変位予測を実施した。その結果をもとに、管理基準値の設定および現場に即した施工方法の検討を行った。施工では、変位計測を行い、事前予測の情報と比較しながら、変位に応じた最適な施工方法を選択していった。また、三次元逆解析を用いたフィードバック解析も行った。これは先行掘削した下り線の計測データから地山を再評価し、その結果をもとに後行掘削を行う上り線の施工方法を見直したものである。

§ 3. 土質情報の把握および土質定数の設定

湯船原トンネルにおける地質調査として、計14箇所のボーリング調査が実施されている。そのうち、西側坑口部は、3箇所のボーリング調査(B0ue-9, B0-20, B0-21)が実施されている。しかしながら、地質調査報告書を確認すると、西側坑口部のうち、特に上り線坑口部ではボーリング調査を実施していないことから坑口部での詳細な地質の情報が不十分であった。そのために、上り線坑口位置でのボーリング調査を実施した。図-4に追加ボーリング調査位置を示す。

既往の地質調査報告書および追加調査の結果から土質定数を設定した。表-1に三次元解析で用いた土質定数を示す。

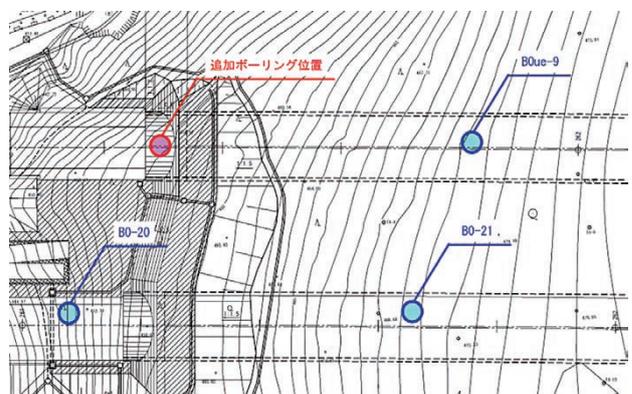


図-4 追加ボーリング位置図

表一 三次元解析で用いた土質定数

地層	単位体積重量 γ (kN/m <sup>3</sup> )	弾性係数 E (Mpa)	ポアソン比 ν	粘着力 c (kN/m <sup>2</sup> )	内部摩擦角 φ (deg)
HO	13.5	6	0.35	5	25
YFL	12	13	0.35	5	30
OFL4	14	27	0.35	5	37
OFL3-2	19	155	0.3	20	40
OFL3-1	19	155	0.3	20	37
OFL2	14	67	0.35	40	35

§ 4. 事前予測 (三次元解析)

4-1 地質概要

掘削開始前に、既知の地質調査より得られた土質定数、追加ボーリング調査結果、土質分布状況、施工サイクル、および掘削ステップを考慮して、三次元 FEM 解析を行った。得られた解析結果より管理レベル毎の管理基準値と管理体制を設定した。施工サイクルは、土被り 2D (23 m : 図-3 参照) まではアーチアクションが形成されにくく、坑口斜面への影響やスコリアという特殊地山を考慮して、切羽の安定性確保のため、上半先進工法とし、それ以後を早期閉合とした。ただし、切羽後方での地表面

沈下および坑内変位が収束しない場合には、土被り 2D 以下でも、変位を抑制するために早期閉合法を採用することとした。その場合には切羽面が大きくなるため、必要に応じて切羽の安定対策を実施できる体制とした。また、早期閉合法への変更に対応するために、ベンチ長は 10~20 m 程度とし、さらに、上下線の掘削における影響を軽減するため、下り線を先行掘削し、変位収束後に上り線を掘削することとした。図-5 に三次元 FEM 解析モデル図を、表-2 に施工サイクルを、図-6 に上半先進工法掘削ステップを、図-7 に早期閉合法掘削ステップを示す。

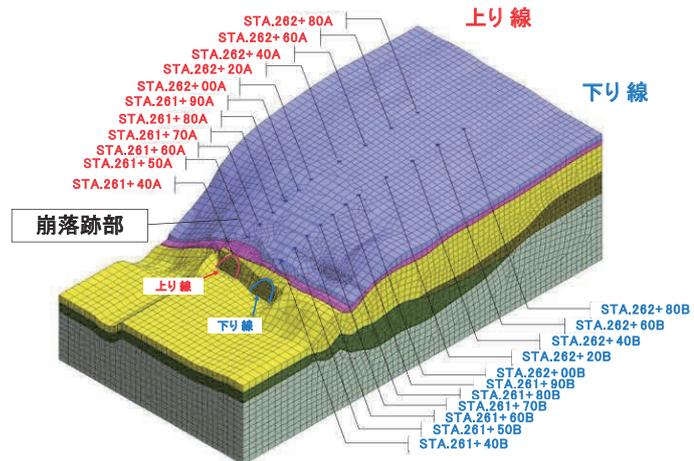


図-5 三次元 FEM 解析モデル

表-2 施工サイクル

土被り	測点		施工サイクル
	下り線(先行掘削)	上り線(後行掘削)	
土被り2D以下	坑口~STA.261+90 (TD=0~73mまで)	坑口~STA.262+00 (TD=0~73mまで)	上半先進工法 ・上半ベンチ長10mを確保 ・上半掘削10m→下半・一次インバート掘削3m(交互掘削)
土被り2D以上	STA.261+90~STA.262+91 (TD=73~174mまで)	STA.262+00~STA.262+96 (TD=73~169mまで)	早期閉合法 ・上半3m→下半・一次インバート掘削3m(交互掘削)

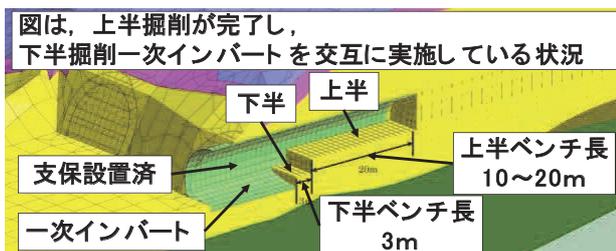


図-6 上半先進工法掘削ステップ

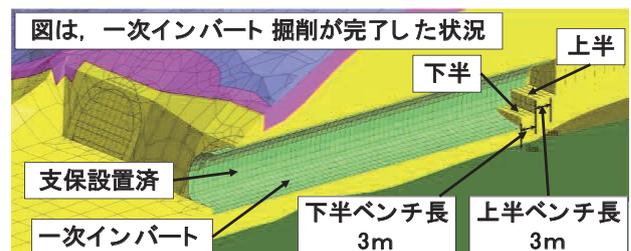


図-7 早期閉合法掘削ステップ

4-2 解析結果

下り線変位量と上り線変位量を見比べると、上下線ともに類似した変位発生状況となった(図-8, 図-9 参照)。また、下り線掘削終了時と上り線掘削終了時の各段階での上下線の地表面沈下量を示した図-10, 図-11 から上り線掘削(後行掘削)による下り線トンネル位置での地表面への影響は最大でも3mm程度であり、近接施工の影響はわずかである予測された。トンネルの変形モードについては、図-8, 図-9のように、内空変位より天端沈下が卓越する沈下卓越型の傾向となることが予測できた。また、天端沈下と地表面沈下が土被り2Dまで

同程度の沈下量を示すことから、トンネル天端から地表面までの地山が一体となって動くことが懸念された。さらに、2D以奥では沈下量に差が生じてくることからトンネルのアーチアクション効果が働く結果となったと考える。一方、表-3に示した上下線の支保工に発生する最大発生応力は、最大でも短期許容応力度の70%以下となり、当初設計の支保パターンを採用することでトンネル支保の耐力は十分である結果となった。このことから、トンネルの変位を抑制できれば、トンネル支保工の安定性を確保できると判断した。

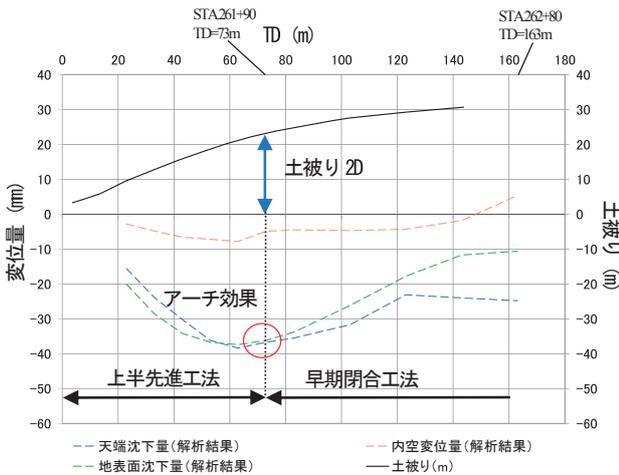


図-8 下り線変位量(解析結果)

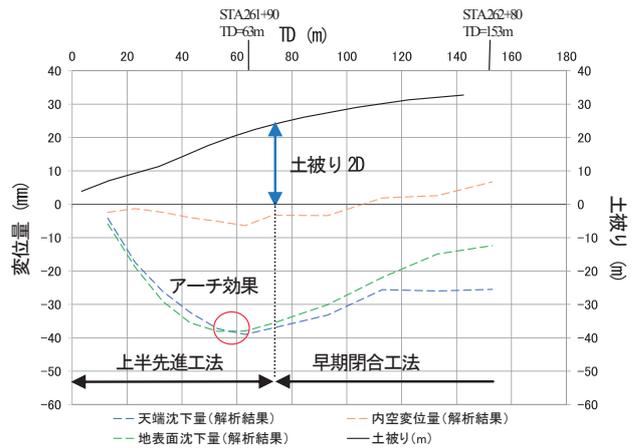


図-9 上り線変位量(解析結果)

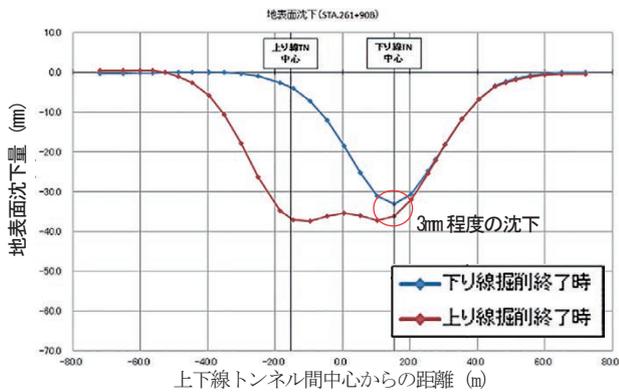


図-10 STA.261 + 90における上下線の地表面沈下量

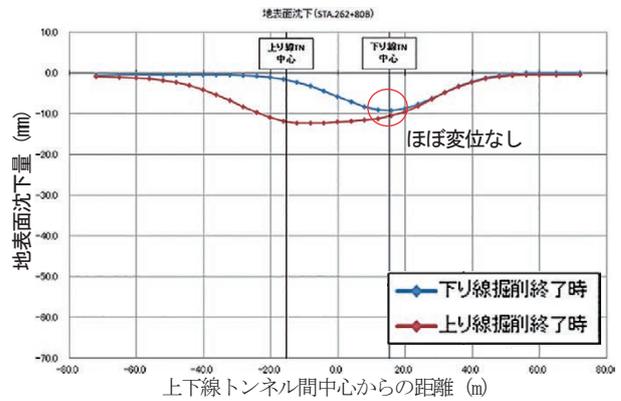


図-11 STA.262 + 80における上下線の地表面沈下量

表-3 支保工に発生している最大発生応力と発生率<sup>\*</sup>の関係(左:下り線, 右:上り線)

測点	下り線						最大発生率	掘削工法
	吹付けコンクリート(+引張-圧縮)		鋼製支保工(+引張-圧縮)		発生率			
	最大発生応力度(N/mm <sup>2</sup> )	短期許容応力度(N/mm <sup>2</sup> )	最大発生応力度(N/mm <sup>2</sup> )	短期許容応力度(N/mm <sup>2</sup> )	発生率	発生率		
STA.261+40B	-1.08	0.08	72.7	382.5	0.19	0.19	上半先進掘削工法	
STA.261+50B	-1.35	0.10	102.8		0.27	0.27		
STA.261+60B	-1.45	0.11	122.8		0.32	0.32		
STA.261+70B	-1.55	0.11	138.3		0.36	0.36		
STA.261+80B	-1.53	0.11	149.7		0.39	0.39		
STA.261+90B	-2.17	0.16	152.4		0.40	0.40		
STA.262+00B	-2.29	0.17	167.6		0.44	0.44	早期閉合法	
STA.262+20B	-2.57	0.19	177.2		0.46	0.46		
STA.262+40B	-3.27	0.24	212.8		0.56	0.56		
STA.262+60B	-4.09	0.30	210.0		0.55	0.55		
STA.262+80B	-3.81	0.28	189.8		0.50	0.50		

測点	上り線						最大発生率	掘削工法
	吹付けコンクリート(+引張-圧縮)		鋼製支保工(+引張-圧縮)		発生率			
	最大発生応力度(N/mm <sup>2</sup> )	短期許容応力度(N/mm <sup>2</sup> )	最大発生応力度(N/mm <sup>2</sup> )	短期許容応力度(N/mm <sup>2</sup> )	発生率	発生率		
STA.261+50A	-1.11	0.08	70.8	382.5	0.19	0.19	上半先進掘削工法	
STA.261+60A	-1.34	0.10	87.9		0.23	0.23		
STA.261+70A	-1.45	0.11	107.4		0.28	0.28		
STA.261+80A	-1.61	0.12	127.7		0.33	0.33		
STA.261+90A	-1.62	0.12	146.3		0.38	0.38		
STA.262+00A	-2.33	0.17	156.3		0.41	0.41		
STA.262+20A	-2.52	0.19	175.5		0.46	0.46	早期閉合法	
STA.262+40A	-3.52	0.26	229.4		0.60	0.60		
STA.262+60A	-4.17	0.31	251.7		0.66	0.66		
STA.262+80A	-3.67	0.27	191.1		0.50	0.50		

\*発生率: 最大発生応力度を短期許容応力度で除したものと

### 4-3 管理基準値の設定

前節の解析結果をもとに、管理基準値を設定した。管理基準値の設定では、以下に示す①および②それぞれの方法から管理レベル値を算出し、小さい方の値を採用した。また、実施工に即して、管理基準値は上半先進工法区間と早期閉合法区間に分けて設定し、さらに、上半先進工法を上半掘削時および下半・一次インバート掘削時に分けて設定した。

#### ① 支保工の発生応力から管理基準値を算出

解析結果から得られた支保工(吹付けコンクリート、鋼製支保工)の各側点における最大発生応力度と短期許容応力度の関係から発生率(最大発生応力度/短期許容応力度)を算出する(表一3参照)。算出した最大発生率で同測点の解析で得られた変位量を除し、各側点の許容できる管理レベル値を算出した。

#### ② 地山の限界ひずみから管理基準値を算出

掘削対象となる地質のOFL4層の弾性係数(27MPa)から、一般的な管理基準値の設定方法である「限界ひずみ法」<sup>1)</sup>を用いて、管理レベル値を算出した。

上記の方法により採用した管理レベル値を管理レベルⅢとし、管理レベル毎の管理基準値を設定した(表一4)。ここで、管理レベルⅡは管理レベルⅢの75%、管理レベルⅠは管理レベルⅢの50%に設定した。

また、当現場に即した管理レベル毎の管理体制および対策工(案)を検討した(表一5)。

表一4 管理レベル毎の管理基準値

上り線, 下り線 (共通)		管理レベルⅠ (管理レベルⅢ×50%)	管理レベルⅡ (管理レベルⅢ×75%)	管理レベルⅢ	
上半先進掘削工法	上半掘削時	天端沈下量 (mm)	-19	-28	-37
		内空変位量 (mm)	-37	-56	-74
		地表面沈下量 (mm)	-24	-36	-48
	下半・一次インバート掘削時	天端沈下量 (mm)	-32	-48	-64
		内空変位量 (mm)	-64	-96	-128
		地表面沈下量 (mm)	-42	-62	-83
早期閉合法工法	天端沈下量 (mm)	-20	-30	-40	
	内空変位量 (mm)	-40	-60	-80	

※内空変位量=天端沈下量×2

表一5 管理レベル毎の管理体制および対策工(案)

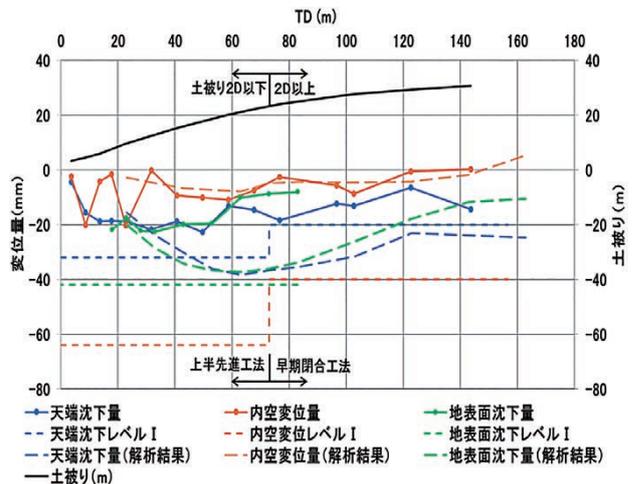
上半先進工法 (上半掘削時)			
管理レベル	体制	計測頻度	対策工(案)
レベルⅠ以内	通常監視体制	計測工指針に基づく	—
レベルⅡ以内	注意監視体制	通常監視体制の2倍	軽微な対策工の検討
レベルⅢ以内	要注体制	通常監視体制の2倍	軽微な対策工の実施 【鋼製支保工運搬、増しロックボルト等】
レベルⅢ以上	嚴重注体制	通常監視体制の2倍	全断面閉合
上半先進工法 (下半・一次インバート施工時)			
管理レベル	体制	計測頻度	対策工(案)
レベルⅠ以内	通常監視体制	計測工指針に基づく	—
レベルⅡ以内	注意監視体制	通常監視体制の2倍	軽微な対策工の実施 【施工サイクルの変更 (掘削ピッチ3m→2m) 等】
レベルⅢ以内	要注体制	通常監視体制の2倍	対策工の実施 【施工サイクルの変更 (掘削ピッチ3m→2m) 等】
レベルⅢ以上	嚴重注体制	通常監視体制の2倍	掘削中止、追加対策工の検討、協議施工
早期閉合法工法			
管理レベル	体制	計測頻度	対策工(案)
レベルⅠ以内	通常監視体制	計測工指針に基づく	—
レベルⅡ以内	注意監視体制	通常監視体制の2倍	軽微な対策工の検討
レベルⅢ以内	要注体制	通常監視体制の2倍	軽微な対策工の実施 【施工サイクルの変更 (掘削ピッチ3m→2m) 等】
レベルⅢ以上	嚴重注体制	通常監視体制の2倍	掘削中止、追加対策工の検討、協議施工

### §5. 施工実績

以下に実施工での上下線の計測結果を解析結果と併せて示す。各変位量(天端沈下量, 内空変位量, 地表面沈下量)は掘削完了後の収束値を表す。

#### 5-1 下り線施工実績

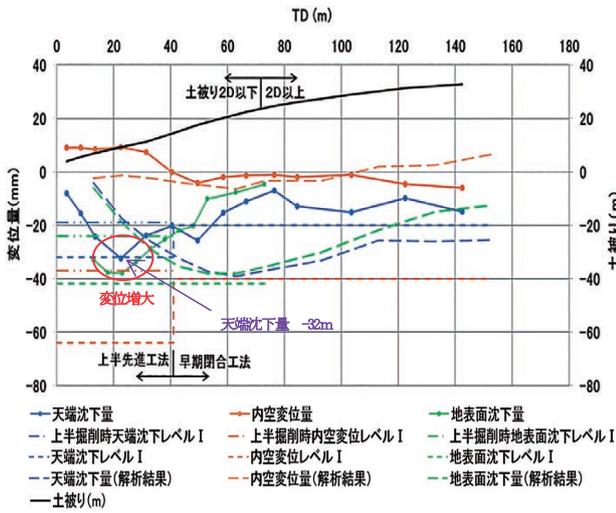
下り線のA計測結果を図一12に示す。土被り2D以下の区間では、天端沈下、地表面沈下ともに最大-20mm程度の変位が生じた。土被りが小さいために、アーチアクションが形成されず、天端部から地表面部までの地山が一体となって変位している状態である。上半先進工法を採用し、掘削断面を小さくして慎重に掘削した結果、計測変位はレベルⅠ以下で収束した。土被り2D以上の部分においては、早期閉合を採用した結果、天端沈下、地表面沈下ともに-15mm程度の変位(レベルⅠ以下)に収まった。変形モードについては、内空変位は-10mm程度と少なく、解析と同様に沈下卓越型の傾向となった。



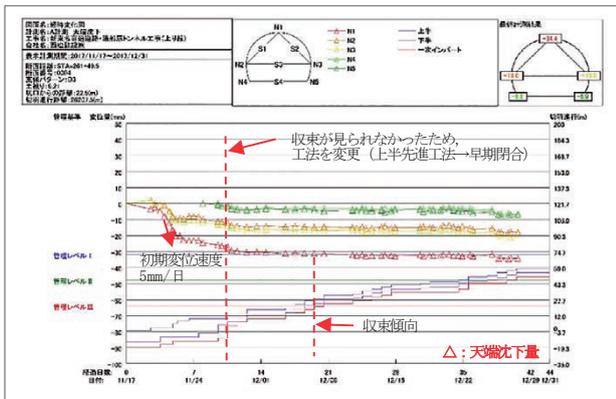
図一12 下り線A計測結果

#### 5-2 上り線施工実績

上り線のA計測結果を図一13に示す。土被り2D以下のTD23m付近において、上半掘削時に天端沈下が-32mmと上半掘削時の管理レベルⅠ(-19mm)を超える変位が生じた。また図一14に示す通り、初期変位速度が-5mm/日と大きく、切羽進行後も地山変位が収束せず、坑口部の地表面に微細クラックも見られたことから、TD31.5mにて、上半掘削を停止し、下半および一次インバートを切羽に追いつけ、早期閉合を実施した(当初: TD73mより実施予定, 表一2参照)。その際、掘削速度も計画の施工サイクルよりゆっくりと施工した。早期閉合法を採用後は、天端沈下、地表面沈下ともに-15mm程度の変位でレベルⅠ以下に収まっている。これは、変位が増大した場合の対策を事前に検討していたことにより、変位発生の初期段階で迅速に対応でき、変位を抑制できたものと考えられる。



図一13 上り線 A 計測結果



図一14 TD23 m の沈下計測経時変化図

5-3 上下線の掘削による影響

後行掘削の上り線掘削による下り線トンネル位置での地表面への影響について、解析結果では3 mm程度と予測していたが、実施工では1 mm程度の変位量で収まった。

§ 6. フィードバック解析

先行トンネル（下り線）を65 m掘削した時点の計測データを用いて、三次元FEM逆解析を行い、地山を再評価した。その結果、トンネル掘削の主な対象地層であるOFL4の弾性係数は、事前評価の27 MPaに対して、45 MPaと推定された。この結果を踏まえて、再度、三次元FEM順解析を実施し、今後の施工について、変位予測および管理基準値の検証を行った。その結果を踏まえ、以下のとおり施工方法を見直した。

- ① 鋼製支保工の上げ越し、拵げ越し量を当初150 mmのところ、80 mmに変更した。
- ② 管理基準値の妥当性を検証したうえで、引き続き、当初計画の管理基準値で管理した。

これらの情報化施工の取り組みは、より経済的かつ効率的な施工に繋がった。

§ 7. まとめ

事前にトンネル掘削時の変位等を予測し、管理体制を計画することで、実施工時に迅速な対応を行うことが重要であると考えられる。現在も施工中のスコリアという特殊地山でのトンネル掘削は、変位の収束性は良いが、未固結な地山であるため、天端の崩落や、吹付と地山の付着の悪さ等、様々な課題が発生している。今後も地山に即した工法の採用、慎重な施工に努めたいと考えている。

参考文献

- 1) 土木学会：トンネル標準示方書 山岳工法編，2016年