

開削工事に伴うトンネル周辺地山および覆工の挙動

BEHAVIOR OF TUNNEL LINING AND SURROUNDING ROCK DURING OPEN-CUT OPERATION

辻森和美¹⁾・牧添幸徳²⁾・木村正樹³⁾・大橋弘紀⁴⁾

Kazumi TUJIMORI, Kounori MAKIZOE, Masaki KIMURA, Hiroki OHASHI

A survey was conducted during the removal of a tunnel to investigate the effects of excavation on the behavior of the tunnel and the surrounding rock. As a result, it was found that 1) the extent of the loosening area of the surrounding rock is proportional to the excavation depth, 2) the effects of excavation on the tunnel can be evaluated by the distance from the tunnel to the perimeter of the loosened area, and 3) the behavior of the tunnel is dependent on whether the voids behind the tunnel lining had been grouted or not..

Key words Tunnel, Open-cut, The loosening area, The voids behind the tunnel lining, Grouting

1. はじめに

昭和10年代に施工された天満トンネル(和歌山県那智勝浦町、2車線道路トンネル)を幅員確保のために開削撤去することになった。地質は第三紀シルト質泥岩(変形係数:1000~3000MPa程度)であり、施工前の調査では覆工厚やコンクリート強度は十分であるが、天端~両肩部にかけて平均45cmの空洞の存在が確認された。このため、土かぶり減少によりトンネルが変形することや、緩んだ岩盤が覆工を貫いて崩落する懸念があった。

以上のことから、工事の安全性を確保すること、トンネルへの影響・覆工背面への充填状況と効果を把握し、類似近接工事の設計施工の基礎資料を得ること目的として観測を行うとともに

に掘削面の観察を行った。計測器の配置図について図2に示す。坑内の変位計測は1時間ごとの自動計測とし、許容変位を越えた場合には警報システムにより作業員避難を行うこととした。また、地山の3次元変位計測を定期的に行うことで地山全体の挙動を監視しつつ、逆解析を行い、次掘削段階の変位を予想しながら安全監視を行った。さらに、充填材の効果を確認するため限定注入を行うことで未充填区間を設け、観測を行った。掘削は図-2の順で施工されたが、掘削最終段階で側方からトンネルを輪切りにし、覆工背面状況を詳細に観察した。

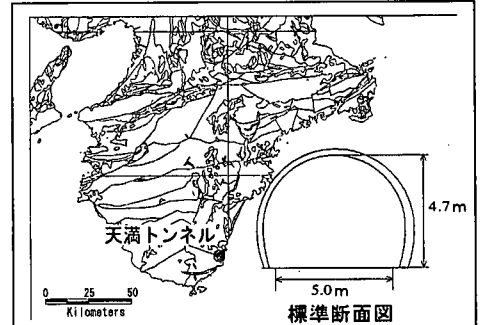


図-1 トンネル位置とトンネル断面図

- 1) 国土交通省 近畿地方整備局 紀南工事事務所長
- 2) 財団法人 道路保全技術センター 近畿支部長
- 3) 正会員 応用地質株式会社 西日本技術センター
- 3) 応用地質株式会社 西日本技術センター

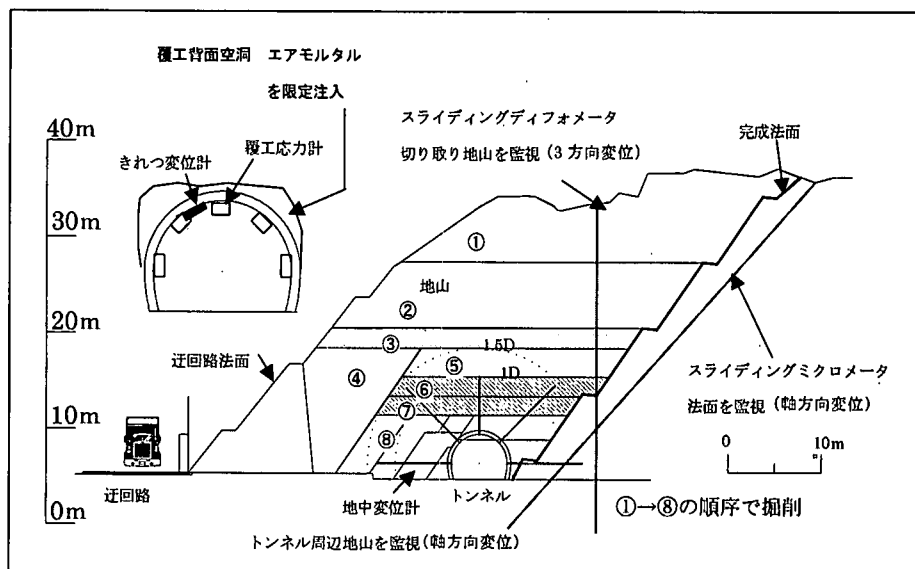
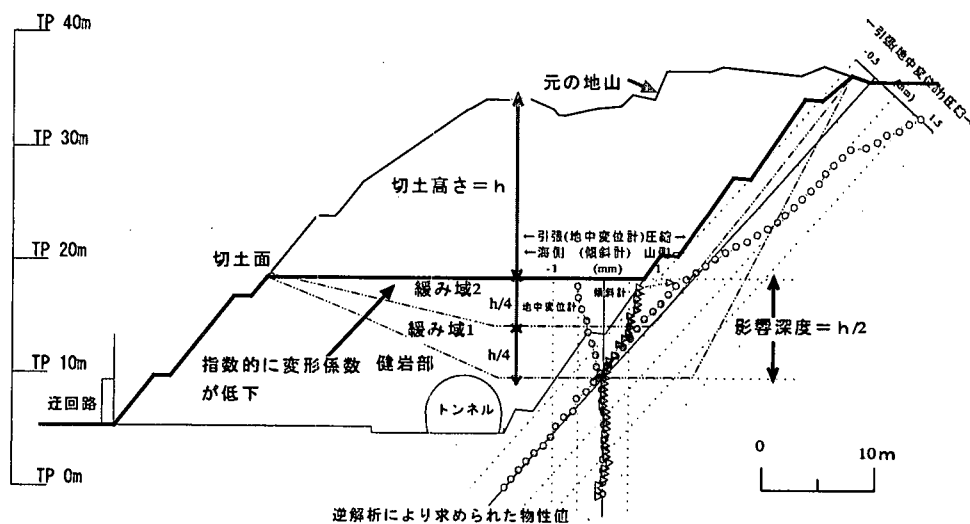


図-2 開削方法と計測器設置概要図

2. 調査結果

a. 開削によるトンネル周辺地山への影響

図-3に③(切土高さ20m)掘削時の地山挙動観測結果について示す。掘削による地山への影響は切土高さに比例しており、切土高さ h に対し、 $h/2$ の深度以浅で変位が生じた(緩み域1)。特に切土面から深度 $h/4$ までは全変位の60~70%であった(緩み域2)。この結果から図中点線で示すような切土高さに比例した厚みで、変形係数が指数的に変化していることが推測された。また、切り取り法面の観測結果では法尻とコア観察やボアホールカメラ観察で確認された亀裂密集部に圧縮変位が集中していた。以上のことから、切土高さに比例した緩み域と異方性パラメータを導入したモデルを作成し、変形係数を変化させて、FEM解析を行ったところ、図中表のようにした場合に観測結果との誤差が小さかった。



逆解析により求められた物性値

対象地盤	変形係数(MPa)	ポアソン比	異方性パラメータ m	異方性方向(水平から)
健全部	16000	0.3	0.01	40°
緩み域1	4000	0.3	0.01	40°
緩み域2	1000	0.3	0.01	40°

図-3 地山挙動観測結果と逆解析結果(土被り20m掘削)

覆工計測結果について図-4に示す。トンネルへ影響は、④掘削時（影響開始）、⑦掘削時（変位増大）トンネル上方 2m 掘削中（非弾性的な挙動）に分けられる。逆解析の結果では、④掘削時はトンネル上半が緩み域 1、⑦掘削時はトンネル全体が緩み域 2 となった場合であった。つまり、掘削によるトンネルへの影響は表-1 のようにまとめられ、掘削高さに比例する緩み域とトンネルの位置関係でダメージが異なった。よって、同様の工事を行う場合、トンネル直径での影響範囲の検討だけでなく、掘削による緩み領域での影響範囲の検討が必要である。

なお、トンネルは上方掘削時には縦長に変形し、側方掘削時には横長に変形した。この変形モードについては前述の緩み域を考慮した解析モデルにより再現が出来た。

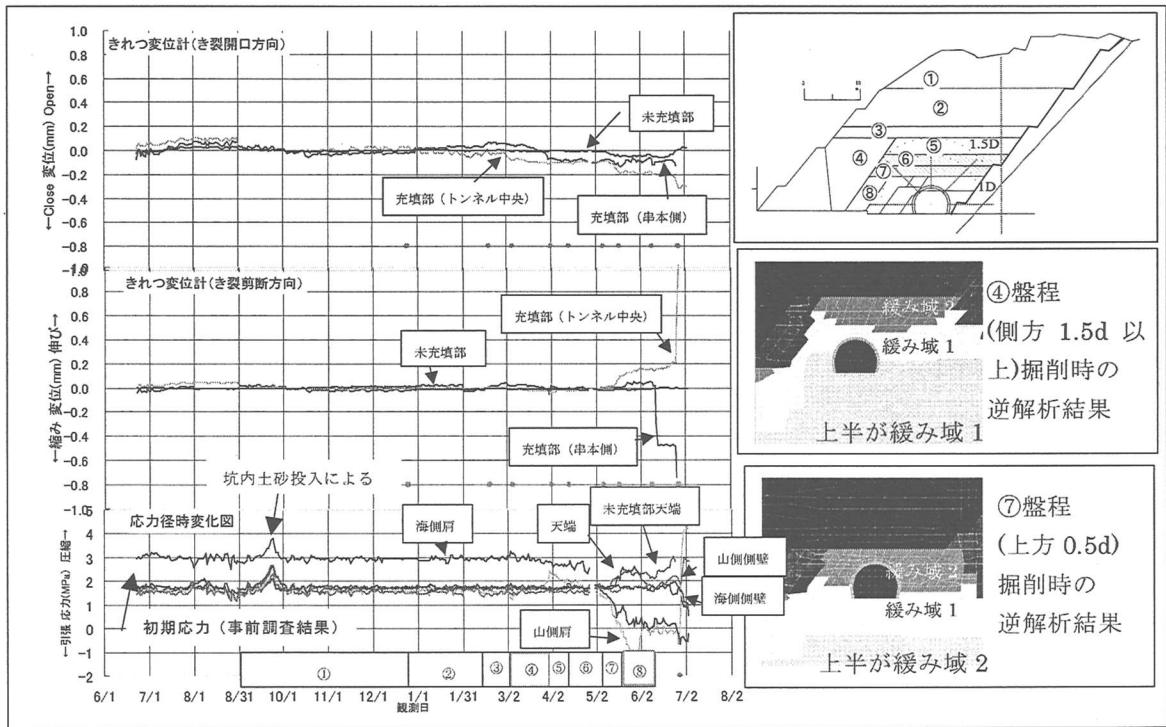


図-4 覆工観測結果

表-1 トンネルへの影響度まとめ図

影響度	影響の内容	影響開始時期			影響の度合い
		トンネル径		緩み域	
A	覆工応力計・亀裂変位計に影響が現れる。	側方掘削時	掘削開始から側方 1.5D まで掘削中。 上方は 1.5D まで開削	トンネルは緩み域外。	トンネルにはダメージはない。
		上方掘削時	1.5D～1D まで掘削中。	トンネル上半が緩み域 1。	
B	増分で 1 MPa を越える引張応力が作用し、覆工亀裂が縦ずれ方向へ変位する。	トンネル上方 4m～2m 掘削中。		トンネル全体が緩み域 2。	トンネルにダメージは受けるがトンネルとしての機能は失われていない。
C	弾性的な変形が非弾性・不連続的な変形に変わる。	トンネル肩部土被り 2.5m ～ 1.5m 掘削中。		トンネル全体が緩み域 2。	トンネルとしての機能が失われる。

b. 覆工背面充填・未充填による掘削の影響の相違

本調査においては空洞充填の有無による覆工の挙動の状況を確認するために、可塑性グラウトで1mの壁を作ることにより、エアモルタルで充填した区間と空洞残置区間を作り、それぞれ計測を行った。表-2に覆工背面空洞に充填をした場合と充填しない場合の覆工の挙動の違いについてまとめた。覆工背面空洞に対し充填をした場合は、覆工は地山と一体化した挙動を示しており応力変化及びき裂変位を生じた。しかしその変位量はトンネルの機能を低下させるほどではなかった。一方、未充填部では覆工亀裂は変位を生じず、覆工応力については地山と一体化した挙動ではなかった。

表-2 覆工背面充填・未充填による掘削の影響の相違

	新宮側坑口からの距離	き裂変位計	覆工応力計	覆工背面観察状況
充填部	TD=27m K-3	④掘削時にクラックが閉じ、⑦掘削時にクラックが閉じつつ、せん断方向へ変位。		
	TD=17m K-2		M-1（天端部） ⑦掘削時に圧縮応力が作用するが⑧掘削時には引張応力が作用。	天端部と山側肩部へは十分なエアモルタルが注入されていたが、海側肩部では認められなかった。
未充填部	TD=7m K-1	特に変位は認められない。	M-6（天端部） 充填部と同様に⑦掘削時に圧縮応力が作用するが、⑧掘削以降も圧縮応力が作用。	地山部分が崩壊し、元空洞部分へ堆積している。

c. 覆工背面状況の確認

未充填部及び充填部の覆工背面状況について写真-1及び写真-2に示す。未充填部では地山の節理が開口し緩んだ地山が覆工上に堆積していた。このことは施工中に緩んだ地山が覆工を破壊する可能性を示しており、覆工は充填をおこなった方が望ましいと思われる。また、充填部であっても注入孔と空洞の間に狭窄部がある場合、注入剤が十分に流入していなかった。覆工背面の空洞の形状は地下レーダーにより精度よく捕らえられているため、覆工背面の充填は従来の5m千鳥で注入孔を決めるのではなく、地下レーダーの結果から決定することが望ましいと考えられる。

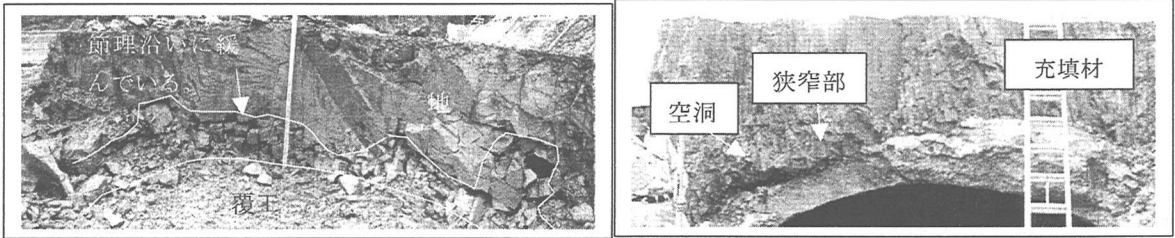


写真-1 未充填部での覆工背面観察結果
地山が節理沿いに緩み、覆工上に堆積している。

写真-2 充填部での覆工背面観察結果
狭窄部により充填材が流れ込んでいない部分がある。

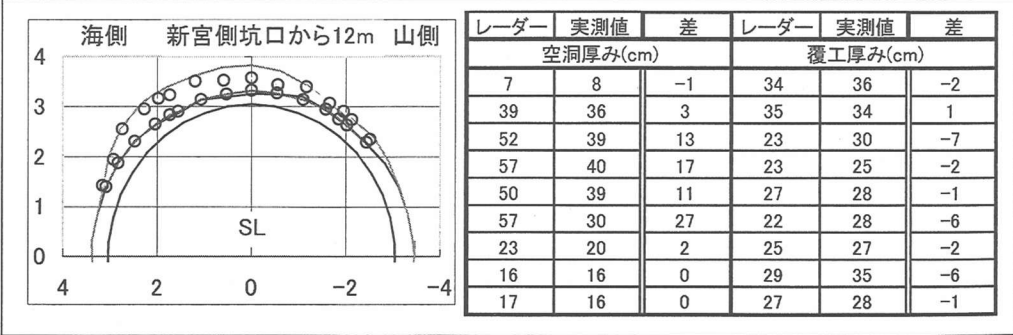


図-5 地下レーダー調査結果と実測値比

3. まとめと他事例との比較

本報告において得られた知見は以下のとおりである。

- a. 掘削によるトンネルへの影響は表－1 及び図－3 に示すような掘削高さに比例する緩み域とトンネルの位置関係でダメージが異なった。よって、同様の工事を行う場合、トンネル直径での影響範囲の検討だけでなく、掘削高さとの緩み領域での影響範囲の検討が必要である。
- b. 覆工背面空洞に対し充填をした場合、覆工は地山と一体化し応力変化及び内継目等の変位を生じるが、トンネルの機能を失わせるほどではなかった。一方、覆工背面観察の結果、未充填区間では節理が開口し緩んだ地山が覆工上に堆積していた。このことは覆工が薄い場合に、施工中に緩んだ地山が覆工を破壊する可能性を示しており、覆工は充填をおこなった方が望ましいと思われる。
- c. 覆工背面空洞部に狭窄部がある場合、注入剤が流入せず充填されていない部分があった。地下レーダーによる覆工背面空洞調査結果と実際の空洞が概ね一致していたことなどから覆工背面への注入は一般的な5m千鳥ピッチでの注入とするのではなく、地下レーダー結果などから注入孔を決定する必要がある。

表－3 に本調査による観測結果と他事例との比較について示す。本調査・解析で得られた地山の掘削によるトンネルの挙動は、変形係数が2桁程度軟質な大阪層群でも確認されており、地質の異なる他トンネルでも掘削高さとトンネルの位置、トンネル径から影響範囲をある程度予測可能である。

表－3 本調査まとめと他事例との比較

	本調査まとめ	他事例
断面図		
地質	熊野層群 シルト質泥岩	大阪層群 (砂礫層)
トンネル半径	3.0m	2.93m
トンネル施工方法	在来工法	NATM 工法
掘削高さ	28m	21m
計測方法	地中変位計, 亀裂変位計, 応力計, 光波測量	地中変位計, 内空変位計, 鋼製支保工ひずみゲージ
トンネル変形	上方掘削時は縦長に変形。側方掘削時には横長に変形。	掘削に伴い、その形状が縦長に変形しつつ上方へ浮き上がり。
逆解析による見かけ変形係数	孔内水平載荷試験除荷再載荷サイクルの割線弾性係数をEとすると、健岩部2E, 緩み域1でE/2, 緩み域2でE/8	孔内水平載荷試験の除荷時の変形係数
掘削による影響範囲	切土土被りの1/2までの深度	切土土被りの3/4までの深度
最終掘削時のトンネル状況	トンネル上方・海側側壁を全て掘削しても覆工に損傷はない。	上方地山を全て掘削しても覆工には何ら損傷も発生しない。
グラウンドアーチ	土被り1.5m掘削時に非弾性的挙動を示す。	トレンチ掘削実験により、土被り2mでもグラウンドアーチが形成。

4. 考察及び今後の課題

1) 覆工背面注入について

覆工背面観察結果および注入時の状況から、覆工背面充填時には以下の点について留意が必要と思われる。

- ① 覆工背面に事前調査で狭窄部等が予想された場合は充填材注入孔を追加する。
- ② 地下レーダーによる空洞背面調査結果と実際の空洞状況は概ね一致するが、レーダー側線から外れた部分については未知であるとともに地下レーダーの精度が $\pm 10\text{cm}$ 程度であるため、コア抜き等により確認が必要である。
- ③ 充填材注入実施の際、串本側坑門の石垣から充填材が噴出し、トンネル内の側溝にも充填材が流入した。地山に亀裂が多く逸走が予想される場合は、可塑性の材料に変更するなど検討が必要である。

なお、充填状況の確認方法については地下レーダーによる再調査が考えられるが、気泡を含む材料は空洞と地山の間隔的な電磁波の速度（比誘電率）であるため、残存する空洞を検知するのが困難な場合がある。これに対して充填材に反射面となる物質を混入する方法などが検討されているが、今のところ成果は上がっていない。

また、空洞の規模が大きいと充填剤の自重で気泡がつぶれて上面に空洞が発生する場合があるため、注入の回数を分割したり空洞最上部まで注入管（確認孔）を設けて空洞を除去する必要がある。さらに、天満トンネルの覆工は天端部の打継目を除き比較的健全で覆工厚、一軸圧縮強度も 18Mpa 以上であり注入時の亀裂開口や応力変化は無かったが、覆工の健全度が低いトンネルでは注入時の圧力や注入材の自重で覆工剥離等が発生することと考えられるため、注入前には目視観察とともに打音調査により、打音異状、浮き、薄肉部が必要と思われる。

2) 掘削による緩み領域について

大阪層群での施工例とは切土高さに比例した深度で変形を生じるという点では一致しているがその大きさ大阪層群での影響範囲が 1.5 倍であった。また、変形係数の低減率の検討結果については事例が少ない。一方、トンネルでの施工例では変形係数と密接な関係がある弾性波速度が、トンネル掘削により 40%~60% 低下することや岩種により低減率が異なること、また、応力再配分によりトンネル周辺が逆に締まる（変形係数が大きくなる）ことが報告されており、今後もデータを蓄積する必要がある。

3) 解析コードについて

覆工の挙動については、変形モードは解析により再現できたが、絶対値は異なった。これはトンネル覆工を連続体として解析していることと、覆工の物性値を均一なものとしているためと考えられる。このため、覆工の健全度を考慮に入れた物性値の決定方法や、覆工を不連続体としたモデルの導入が必要と考えられる。

参考文献

- 1) 桜井春輔, 清水則一, 金澤寛, 梶原誠: 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論文集, pp. 243-248, 1990
- 2) 中村恭介, 堀田穂: 天満トンネル開削工事に伴うトンネルの健全性及び安全管理, 平成 13 年度管内技術発表会, pp. 施・案 12-1~12-6
- 3) 竹内智明, 佐治嘉朗, 大橋弘紀, 木村正樹: 近畿地方の美濃・丹波帯, 四万十帯における地山評価と実施工の対比, 日本応用地質学会関西支部平成 13 年度研究発表会, pp23-26, 2001