

重要構造物と近接交差する 山岳トンネルの施工について

辰巳 順一¹・稲葉 秀雄²

¹正会員 安藤ハザマ 土木事業本部 技術第三部 (〒107-8658 東京都港区赤坂6-1-20)
E-mail:tatsumi.junichi@ad-hzm.co.jp

²正会員 安藤ハザマ 土木事業本部 技術第三部 (〒107-8658 東京都港区赤坂6-1-20)

本報告で対象とするトンネルは、上下線からなる併設の二車線道路トンネルである。本トンネルには、到達側坑口付近の小土被り部において水路および送水管と近接交差する区間があったため、トンネル掘削に伴う地表面沈下によって水路や送水管に変状が出るおそれがあった。

本トンネルでは、先行した下り線掘削時の施工データにもとづき、上り線を対象としてトンネルと水路の交差部、およびトンネルと送水管の交差部の2断面において二次元 FEM 解析を行い沈下量を予測するとともに、上り線掘削時の対策工の効果を検討した。その結果、対策工として長尺鋼管先受工法のシフト長の変更、およびウイングリブ付き鋼製支保工の採用という結論を得た。

Key Words : mountain tunnel, surface settlement, numerical analysis, adjacent intersection

1. はじめに

本報告で対象とするトンネルは、上下線からなる併設の二車線道路トンネル、延長は約 2 700m である。本トンネルの到達側坑口付近の小土被り部には、トンネルと水路（ブロック積みの三面張り水路）が近接交差する区間と、トンネルと送水管（φ500mm、铸铁管）が近接交差する区間が存在した。この小土被り部では、トンネル直上の重要構造物に対する沈下対策および切羽天端の安定性確保を目的として注入式長尺鋼管先受工法（AGF 工法）が設計されていた。

到達側坑口付近の小土被り部において、先行して掘削した下り線と水路の交差部で地表面沈下を計測したところ、当初予測値の約 2 倍の沈下量が生じた。このことから、土被りのさらに小さい上り線掘削時には、トンネル直上の水路や送水管の沈下量が許容値を超えることが予想され、水路や送水管に何らかの悪影響を与えることが懸念された。このため、図-1 に示す解析フローに従い、上り線掘削時の水路や送水管の沈下量予測と対策工の検討を行った。本稿では、その詳細について報告する。

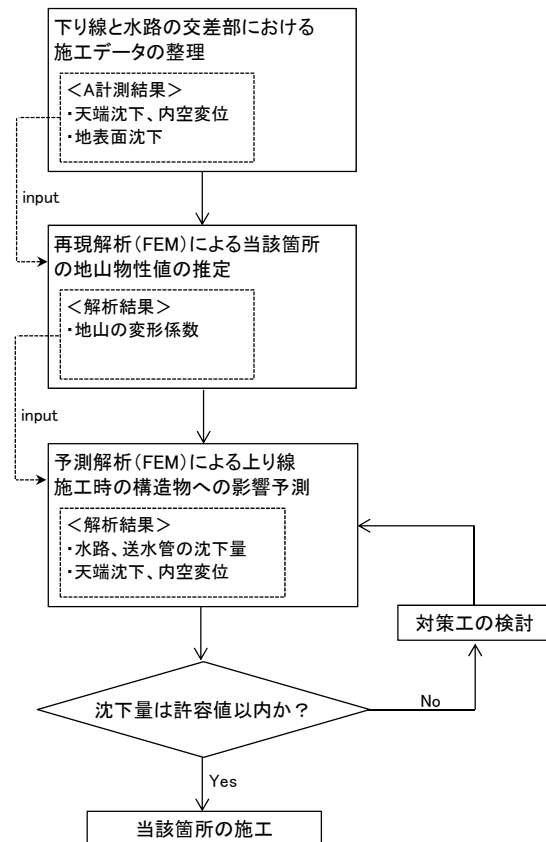


図-1 解析フロー

2. 地質概要

本トンネルの掘削対象となる地山は、発進側坑口から約2 300mまでの区間は段丘砂礫層および第三紀新世中津層の泥岩および砂岩、それ以奥の到達側は中生代白亜紀小仏層群の粘板岩を主体とする。本稿で報告する到達側坑口付近の小土被り部の地質は小仏層群の粘板岩となっている。

3. 小土被り部の概要

到達側坑口付近の小土被り部において、本トンネルは水路および送水管と近接交差する。トンネルと水路の最小離隔距離は上り線で約3.8m、下り線で約5.1m、トンネルと送水管との最小離隔距離は上り線で約8.1mであった。沈下量の許容値は水路で50mm、送水管で20mmであった（表-1参照）。

当初設計段階で、トンネル掘削による水路および送水管への影響が検討されていたが、水路の沈下量の予測値は16.6mm、送水管沈下量の予測値は12.9mmであり、トンネル掘削の影響は小さいとされていた。しかし、先行して掘削を完了した下り線と水路の交差部において、当初予測値の約2倍となる33.4mmの沈下量が生じた。このことから、上り線掘削時には、水路および送水管において許容値を超える沈下量が生じることが懸念された。

表-1 構造物とトンネルの最小離隔距離・沈下許容値一覧表

構造物の種類 上下線の区分	水路		送水管	
	離隔距離	沈下の許容値	離隔距離	沈下の許容値
上り線	3.8m	50mm	8.1m	20mm
下り線	5.1m	50mm	交差しない	-

4. 上り線掘削時の近接構造物への影響予測

本トンネルでは、上り線を対象として、トンネルと水路の交差部、およびトンネルと送水管の交差部の2断面において二次元FEM解析を行い沈下量を予測するとともに、上り線掘削時における対策工の効果の検討を行った。FEM解析にあたっては、先行して掘削を完了している下り線におけるA計測結果の再現解析（逆解析的アプローチ）により地山物性値を推定し、予測解析に実際の変位を反映させることで解析精度の向上を図った。

なお、解析方法は平面ひずみ仮定にもとづく線形弾性解析とした。

(1) A計測結果に基づく地山物性値の推定（再現解析）

a) 解析断面

再現解析は、先行して掘削を完了している下り線と水路の交差部で実施した（図-2参照）。解析断面の支保パターンを図-3に示す。

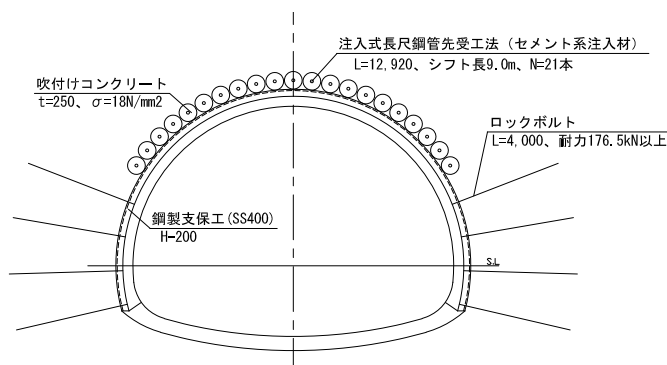


図-3 再現解析断面の支保パターン図

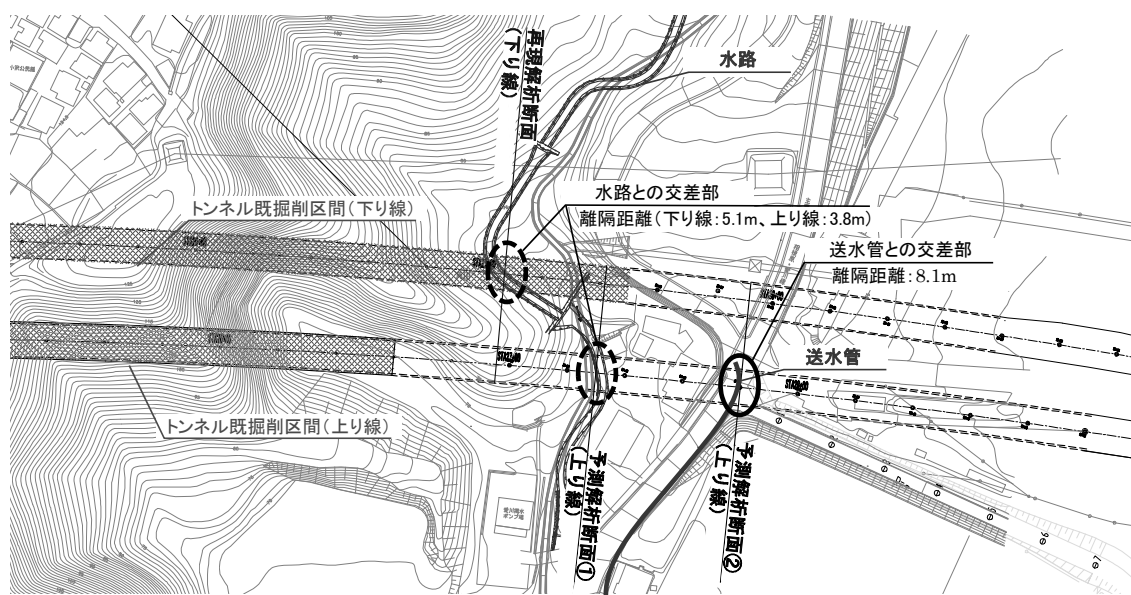


図-2 トンネル平面図（予測解析完了時点）

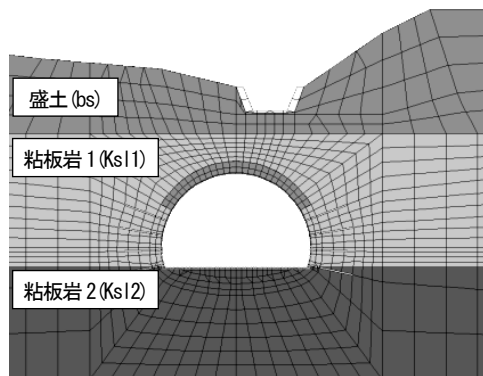


図-4 再現解析における解析モデル

表-2 地山物性値

地質区分	単位堆積重量 (kN/m^3)	変形係数 E_0 (kN/m^2)	ポアソン比
盛土 (bs)	14	7,000	0.36
粘板岩 1 (Ksl1)	26	表-4	0.43
粘板岩 2 (Ksl2)	26	170,000	0.43
AGF改良体	26	810,000	0.43
水路(無筋コンクリート)	23	25,000,000	0.2

表-3 支保部材の物性値

支保部材	弾性係数 (kN/m^2)	断面二次モーメント (m^4)	断面積 (m^2)
支保工(吹付け+H鋼)	8,650,000	0.001658	0.25
ロックボルト	210,000,000	-	-

表-4 解析ケース一覧

	変形係数 (kN/m^2)		
	盛土 (bs)	粘板岩 (Ksl1)	粘板岩 2 (Ksl2)
CASE1	7,000	170,000	170,000
CASE2	7,000	25,000	170,000
CASE3	7,000	30,000	170,000
CASE4	7,000	35,000	170,000
備考	固定	パラメータスタディ	固定

b) 解析モデル

再現解析の解析モデルを図-4に示す。また、再現解析に用いた地山物性値を表-2、支保部材の物性値を表-3に示す。

事前の地質調査では、解析断面の地質は表層部が盛土 (bs)、それより下部は一般的な粘板岩 (Ksl) であるとされていた。しかし、トンネル掘削時における切羽観察により、掘削断面内に出現する粘板岩は風化が進み脆弱であることが判明した。このため、本検討においては、掘削断面内に出現する粘板岩を粘板岩1 (Ksl1) とし、粘板岩1の変形係数を対象としたパラメータスタディを行った。粘板岩1より下部は一般的な粘板岩2 (Ksl2) が分布するものとして解析を進めた。再現解析の解析ケースは、表-4に示すとおりとした。なお、粘板岩1以外の地山物性値は、事前の地質調査結果をもとに設定した。

c) 解析結果

変位の実測値 (A計測) と解析結果の比較を、表-5および図-5に示す。本図より、計測値を最もよく再現しているのはCASE3であることが分かる。

事前の地質調査結果をもとに設定した物性値を用いたCASE1では、変位の再現率 (解析値/実測値) が低くな

表-5 変位の実測値 (A計測結果) と解析結果の比較

	変形係数 (kN/m^2)			変位 (mm)		
	盛土 (bs)	粘板岩 1 (Ksl1)	粘板岩 2 (Ksl2)	地表面沈下	天端沈下	上半内空変位
実測値	-	-	-	-33.4	-32.7	-48.3
CASE1	7,000	170,000	170,000	-4.9 (0.15)	-7.0 (0.21)	-12.4 (0.26)
CASE2	7,000	25,000	170,000	-38.5 (1.15)	-43.0 (1.31)	-49.3 (1.11)
CASE3	7,000	30,000	170,000	-32.1 (0.96)	-36.3 (1.11)	-42.4 (0.88)
CASE4	7,000	35,000	170,000	-27.6 (0.83)	-31.5 (0.96)	-37.5 (0.78)

※ () 内の数値は解析値/実測値である。

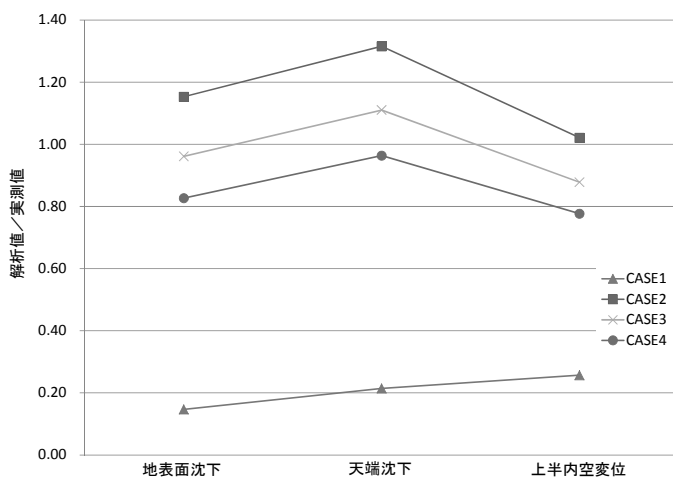


図-5 変位の実測値 (A計測結果) と解析結果の比較図

っている。これは、トンネル掘削位置の粘板岩が想定より風化しており、変形係数が実際には事前に設定した値よりも低かったことが原因と考えられる。

(2) 上り線掘削時の水路への影響予測と対策工の検討 (予測解析)

a) 解析の目的

上り線と水路の離隔距離は3.8mで、下り線の約3/4であった。そのため、水路の沈下量が許容値を超え、河床コンクリートにひび割れ等の変状が出るおそれがあった。

このことから、二次元FEM解析を行い、水路への影響を予測するとともに、各対策工の効果を検討した。

b) 解析断面

予測解析は、上り線の水路直下の断面で実施した (予測解析断面①、図-2参照)。解析断面の当初設計の支保パターンは図-3と同様である。

本解析の解析ケースを表-6に示す。当初設計の沈下予測値が許容値を超えた場合の対策工としては、AGF工法の仕様変更 (打設間隔の短縮, シフト長の短縮)、およびウイングリブ付き鋼製支保工の採用を検討することとした。

表-6 解析ケース一覧

	解析ケース	ウイングリップの有無	AGF仕様	
			打設間隔	シフト長
当初設計	CASE1	無	0.6m	9m
追加対策工	CASE2	無	0.45m	9m
	CASE3	無	0.6m	6m
	CASE1-W	有	0.6m	9m
	CASE2-W	有	0.45m	9m
	CASE3-W	有	0.6m	6m

c) 解析モデル

予測解析の解析モデルを図-6に示す。予測解析に用いる地山物性値は表-7のとおりとし、粘板岩1の変形係数には再現解析で推定された値 ($E=30,000\text{kN/m}^2$) を採用した。支保部材の物性値は表-3と同一とした。また、AGF工法による改良体の変形係数は図-7により決定し、変形係数以外の物性値は粘板岩1と同様の値を採用した。AGF改良体およびウイングリップ脚部の物性値を表-8に示す。なお、上り線においても、掘削断面内の粘板岩を粘板岩1、それより下部のものを粘板岩2と区分した。

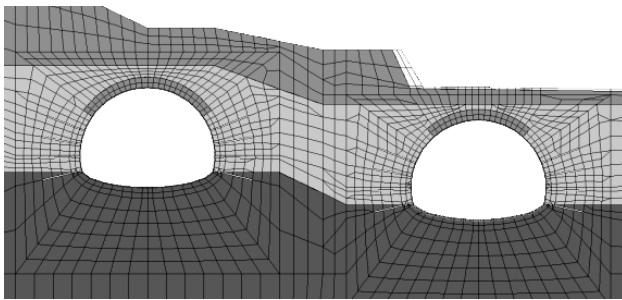


図-6 予測解析の解析モデル

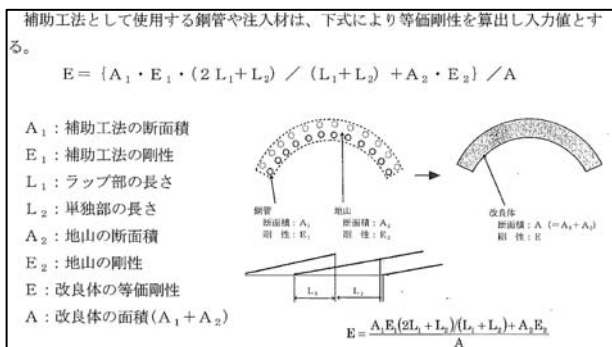
図-7 AGF工法による改良体の変形係数の算出方法¹⁾

表-7 水路に対する影響予測解析に使用した地山物性値

地質区分	単位堆積重量 (kN/m^3)	変形係数 E_0 (kN/m^2)	ポアソン比
盛土 (bs)	14	7,000	0.36
粘板岩1 (Ksl1)	26	30,000	0.43
粘板岩2 (Ksl2)	26	170,000	0.43
AGF改良体	26	表-8	0.43
水路 (無筋コンクリート)	23	25,000,000	0.2

表-8 AGF改良体およびウイングリップ脚部の物性値

			単位体積重量 (kN/m^3)	変形係数 E (kN/m^2)	ポアソン比
吹付けコンクリート(ウイングリップ脚部)			26	3,400,000	0.2
AGF改良体1 [CASE1]	鋼管長	12.92m	26	810,000	0.43
	シフト長	9.0m			
	打設間隔	0.6m			
AGF改良体2 [CASE2,2-W]	鋼管長	12.92m	26	1,300,000	0.43
	シフト長	9.0m			
	打設間隔	0.45m			
AGF改良体3 [CASE3,3-W]	鋼管長	12.92m	26	2,400,000	0.43
	シフト長	6.0m			
	打設間隔	0.6m			

d) 解析結果

予測解析における地表面沈下、トンネルの天端沈下、および内空変位の解析値を表-9に示す。なお、解析値は上り線の下半掘削時の値を示している。

また、水路はトンネル直上を横断しているため、掘削に伴い不同沈下が発生し、河床コンクリートにひび割れや目地の開き等が発生するおそれがある。このため、各解析ケースにおいて水路の沈下量から得られる河床コンクリートの傾斜を求め、不同沈下による影響も評価した。不同沈下による最大傾斜の解析値を表-10に示す。

上記の結果から、地表面沈下の解析値は全ての解析ケースで許容値の50mm以内である。しかし、CASE1~3、およびCASE1-wの計4ケースについては、不同沈下による最大傾斜の解析値がコンクリート構造物の傾斜の上限値 (0.002rad) ²⁾ 以上となった。このため、上り線の水路直下では表-6のCASE3-Wに示す対策工を採用することとした (図-8参照)。

表-9 上り線掘削時の解析値

解析ケース	地表面沈下 (mm)	天端沈下 (mm)	内空変位 (mm)
CASE1	-26.9	-28.4	-37.1
CASE2	-26.0	-27.2	-36.5
CASE3	-25.2	-26.3	-35.8
CASE1-w	-23.4	-24.6	-37.3
CASE2-w	-22.2	-23.2	-36.3
CASE3-w	-21.6	-22.5	-35.7

表-10 水路の不同沈下による最大傾斜

解析ケース	最大傾斜 (rad)
CASE1	0.0025
CASE2	0.0025
CASE3	0.0023
CASE1-w	0.0022
CASE2-w	0.0019
CASE3-w	0.0018

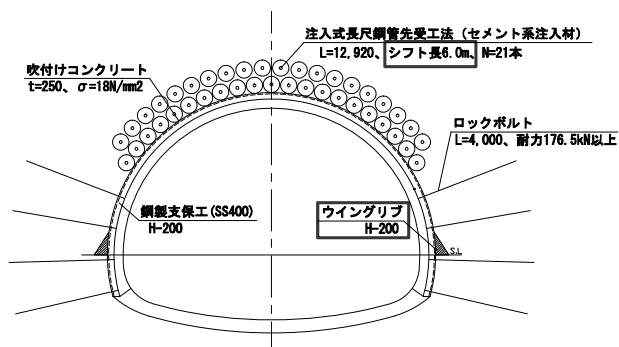


図-8 実施支保パターン図

(3) 上り線掘削時の送水管への影響予測と対策工の検討（予測解析）

a) 解析の目的

上り線と送水管の離隔距離は8mである。また、送水管の沈下の許容値は20mmで、水路の50mmと比べて厳しく、下り線掘削時の地表面沈下の実測値から、この付近では許容値を超える沈下が予想された。

このことから、二次元FEM解析を行い、送水管への影響を予測するとともに、対策工の効果を検討した。

b) 解析断面

予測解析は上り線の送水管直下の断面で実施した（予測解析断面②、図-2参照）。解析断面の当初設計の支保パターンは図-3と同様である。

本解析の解析ケースを表-11に示す。現設計の沈下予測値が許容値を超えた場合の対策工としては、AGF工法の仕様変更（打設間隔の短縮、シフト長の短縮）、ウイングリップ付き鋼製支保工、および上半仮インバートを検討することとした。

表-11 解析ケース一覧

	解析ケース	ウイングリップの有無	上半仮インバートの有無	AGF仕様	
				打設間隔	シフト長
当初設計	CASE1	無	無	0.6m	9m
追加対策工	CASE2	無	無	0.45m	9m
	CASE3	無	無	0.6m	6m
	CASE1-W	有	無	0.6m	9m
	CASE2-W	有	無	0.45m	9m
	CASE3-W	有	無	0.6m	6m
	CASE1-W-I	有	有	0.6m	9m
	CASE2-W-I	有	有	0.45m	9m
	CASE3-W-I	有	有	0.6m	6m

c) 解析モデル

予測解析の解析モデルを図-9に示す。予測解析に用いる地山物性値および支保部材の物性値は、水路への影響

予測解析（4.（2）参照）で設定した表-7、表-8と同一とした。

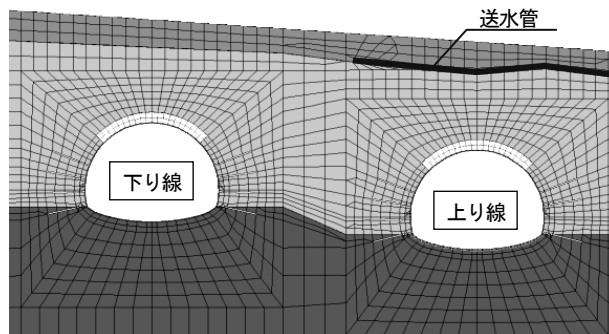


図-9 予測解析の解析モデル

d) 解析結果

予測解析における送水管の沈下量、地表面沈下、トンネルの天端沈下、および内空変位の解析値を表-12に示す。なお、解析値は上り線下半掘削時の値を示している。

表-12 上り線掘削時の解析値

解析ケース	送水管沈下 (mm)	地表面沈下 (mm)	天端沈下 (mm)	内空変位 (mm)
CASE1	-25.0	-22.0	-30.4	-25.0
CASE2	-23.7	-20.9	-28.4	-24.1
CASE3	-22.4	-19.7	-26.4	-23.2
CASE1-W	-22.3	-19.6	-27.3	-24.2
CASE2-W	-21.0	-18.5	-25.3	-23.2
CASE3-W	-19.7	-17.4	-23.3	-22.3
CASE1-W-I	-21.3	-18.7	-26.3	-21.9
CASE2-W-I	-20.0	-17.6	-24.3	-20.9
CASE3-W-I	-18.7	-16.4	-22.3	-20.1

上記の結果から、当初設計の支保パターン（CASE1）では、送水管の沈下量の解析値が許容値20mmを超える結果になった。このため、送水管直下では表-11のCASE3-Wに示す対策工を採用することとした（図-8参照）。

5. まとめ

本トンネルでは、到達側坑口付近の小土被り部において、下り線掘削時の地表面沈下量が、当初設計段階で予測されていた16.6mmに対し、実際には約2倍の33.4mmに達した。このため、実施工で得られた変位情報を反映させた解析を行い、トンネル直上の構造物の沈下対策工としてAGF工法の1シフト長を9mから6mに短縮し、さらにウイングリップ付き鋼製支保工を採用して掘削を行った。その結果、水路の沈下量は24mm以内、送水管との交差

部の地表面沈下量は15mm以内で掘削を完了することができ、予測解析による沈下量予測値と同程度の沈下量に収めることができた。また、水路や地表面を目視観察した結果、目だった変状が発生していないことを確認している。

本稿が、今後の類似工事の参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) ジェオフロンテ研究会：注入式長尺鋼管先受工（AGF工法）技術資料（六訂版），pp.63，2012.
- 2) 日本トンネル技術協会：構造物等に近接した山岳トンネルの設計施工に関する研究報告書，pp.44，1992.

(2013. 9. 2 受付)

CONSTRUCTION OF A MOUNTAIN TUNNEL ADJACENT INTERSECT WITH IMPORTANT STRUCTURES

Junichi TATSUMI and Hideo INABA

The tunnel intended for this treatise is the side tunnel consisting of a up line and down line. This tunnel was adjacent to a waterway and a waterpipe at the shallow overburden section nearby the portal of the end of tunnel, and the structures might be damaged by surface settlement.

Before a up line of this tunnel was excavated, we estimated settlement of a waterway and waterpipe from numerical analysis of a up line based on excavated date of a down line, and we examined a measure at a up line.