

河川・市道・住宅密集地と交差する 小土被りトンネルの施工

江島 武¹・古木 弘²・松野 遼太郎³・福田 毅⁴・藤野 晃⁵

¹正会員 独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構（〒231-8315 神奈川県横浜市中区本町6-50-1）
E-mail:ejima.tak-3t4n@jrtr.go.jp

²正会員 清水建設株式会社 土木技術本部 地下空間統括部（〒104-8370 東京都中央区京橋2-16-1）
E-mail:kogi_h@shimz.co.jp

³正会員 清水建設株式会社 土木技術本部 地下空間統括部（〒104-8370 東京都中央区京橋2-16-1）
E-mail:r.matsuno@shimz.co.jp

⁴正会員 清水・岩田地崎 特定建設工事共同企業体（〒258-0112 神奈川県足柄上郡山北町岸3709-8）
E-mail:tys.fukuda@shimz.co.jp

⁵正会員 清水・青木あすなろ・菱興 特定建設工事共同企業体（〒856-0044 長崎県大村市岩松町150-1）
E-mail:fujino@shimz.co.jp

木場トンネル（延長2.9km）には土被り約6～9mで河川，埋設管を有する市道および住宅密集地と交差する小土被り区間（全長197m）がある．この区間には，掘削対象となる脆弱化の著しい流紋岩と硬質な安山岩の成層上に，地下水を含む砂礫層が分布し，切羽崩落や突発湧水による地下水・河川水の流入などのリスクが想定された．そこで，FEM解析により対策工の妥当性を確認した上で，拡幅方式での長尺鋼管先受工などの切羽の安定化対策と，水抜き孔や河床保護コンクリートなどの地下水位低下対策および河川水引込み防止対策を実施した．その結果，切羽を安定させ，地表面沈下などの周辺環境への影響を最小限に抑え，無事に小土被り区間を突破することができた．本稿では，本区間の施工にあたり，想定されたリスクと対策，FEM解析および施工方法について報告する．

Key Words : Shallow overburden, Risks and measures, Auxiliary methods, Numerical analysis

1. はじめに

九州新幹線（西九州ルート）は武雄温泉・長崎間の工事延長約 67km の整備新幹線であり，木場トンネルは長崎県大村市内に位置する延長 2,885m の山岳トンネルである（図-1）．本トンネルは当初，切土に続き，橋梁を挟んだ2本のトンネルで計画されていた．しかし，切土区間近くのルート上に位置する国指定史跡候補「三城城跡」を保護するため，深度を下げてV字型のトンネル縦断線形を有する1本のトンネルに計画が変更された．これに伴い，標高が最も低くなる地点付近には坑内湧水を揚水する揚水設備立坑が計画され，この周辺は海拔 0m 以下の地点を通過する小土被り区間（全長 L=197m）となった．小土被り区間では，土被り 6～9m 程度で二級河川（内田川），市道および住宅密集地と交差し，市道にはライフライン（上下水道およびガス管）が埋設されていた．これらの厳しい施工条件を

克服するために多重の安全対策が必須となった．表-1に工事概要を示す．

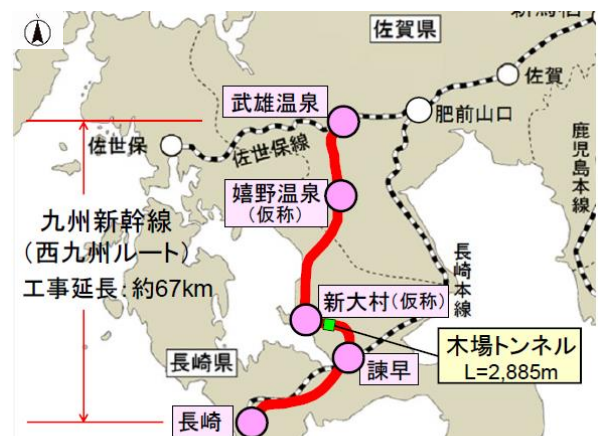


図-1 工事位置図

2. 地形および地質概要

当該地は経ヶ岳を最高峰とする多良岳地域の西端に位置しており、大村湾にかけて扇状地性の地形となっている。小土被り区間の地質状況を詳細に把握するために、トンネル周辺で実施された8箇所の既往調査による地質情報の偏りを補う目的で、5箇所の追加調査を行った(図-2)。追加調査を踏まえて判明した小土被り区間の地質状況のうち、河川および市道周辺のトンネル中心での地質縦断面図を図-3に示す。本トンネルの地質は、第四紀更新世の火山砕屑岩が主体であるが、小

土被り区間は硬質な安山岩を主体とし、河川～市道交差部には熱水変質とその後の風化作用を強く受けた脆弱な流紋岩($qu=0.1\sim0.3MN/m^2$ 程度)が分布している。地表面付近には河川堆積物である完新世の崩壊性の著しい砂礫層が厚く堆積し、固結度は非常に低い。地下水位はGL-2m程度である。

3. 小土被り区間の施工上のリスクと対策

(1) リスクの抽出

交差条件、地形・地質条件および過去の類似条件の施工事例から想定された施工上のリスクを、次の2つの観点から整理した。

a) 切羽の不安定化(切羽の崩落)

トンネル上半部から天端には粘土化した劣化の著しい流紋岩が出現するため、天端崩落が発生するリスクが高い。それとともにトンネル上部の流紋岩の薄層が破壊され、その上部に位置する砂礫層が地下水を伴って崩壊することにより、地表面にまでその影響が及ぶ可能性がある。土被りが1D未満(D:トンネル掘削幅)と小さいため、グラウンドアーチが形成されにくく、地山のゆるみに伴う地表面沈下や陥没も想定される。地表面の大規模沈下や陥没は、ライフラインや地表構造物の損傷などを引き起こし、社会的影響の大きな事象に繋がるため、地山のゆるみを抑制できる施工方法と切羽の安定化対策が必須であった。写真-1に河川直下での切羽状況を示す。

表-1 工事概要	
工 事 名 称	九州新幹線(西九州), 木場トンネル他工事
工 事 場 所	長崎県大村市岩松町地内 ～三城町地内
工 期	平成26年2月28日 ～平成31年2月27日(当初)
発 注 者	独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構九州新幹線建設局
施 工 者	清水・青木あすなる・菱興 特定建設工事共同企業体
工 事 内 容	延 長 L=3,188m トンネル延長 L=2,885m, 土路盤 L=179m, 高架橋 L=104m, 橋梁 L=20m
	断 面 掘削断面積 A=73.6m ²
	施 工 法 NATM
	掘 削 方 式 機械掘削
	掘 削 工 法 補助ベンチ付き全断面工法

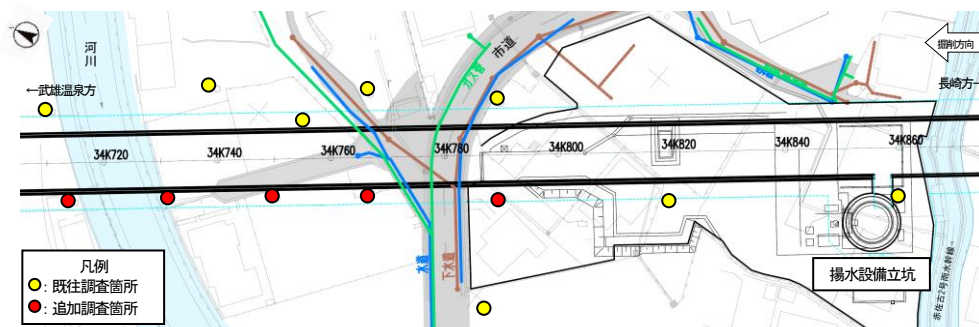


図-2 小土被り区間の地質調査位置図

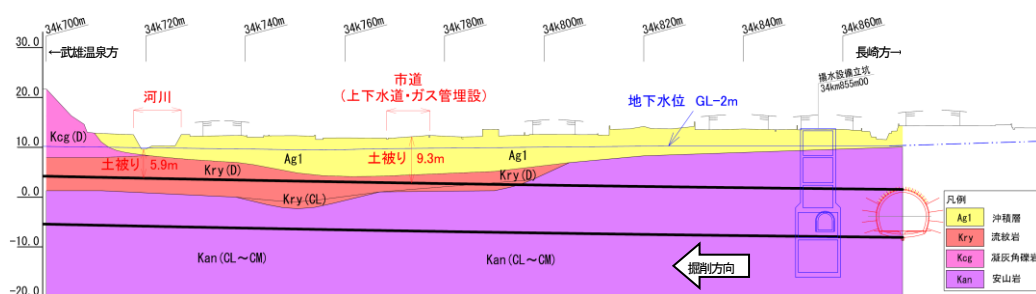


図-3 小土被り区間の地質縦断面図

b) 突発湧水による地下水・河川水の流入

地質縦断図(図-3)からもわかるように、トンネル上部には地下水を有する砂礫層が厚く堆積しており、掘削に伴い、地下水および河川水が坑内に流入することが想定された。そのため、トンネルに作用する地下水压を低減させる対策工を実施するとともに、河川水の引込みや漏水を防止する必要があった。

これらのリスクに対する適切な対策工を選定するとともに、その効果を事前に検討するために、FEM 解析を行って、トンネル掘削が地表面へ与える影響および対策工の有効性を定量的に確認した。

(2) 対策工の選定

表-2 に、想定した施工上のリスクに対する対策工をまとめた。

a) 切羽の不安定化への対策

小土盛り区間の当初設計では天端の補強対策として
充填式フォアポーリングが計画されていたが、次のよ
うな理由から不適切と判断した。

- ・打設箇所は脆弱化が著しい流紋岩であるため、孔壁周囲の地山の定着力が確保できず、ボルト周辺地山の拘束力が劣る。
- ・ボルト間や前方からの脆弱な流紋岩の抜け落ちなどの天端崩落や切羽崩壊が懸念される。

そこで、当該地の地質状況に適用可能で施工性、経

済性に優れる対策として、天端補強工には長尺鋼管先受工を検討した(図-4)。地質分布から地下水を含む砂礫層に鋼管が貫入することを防ぐ必要があったため、打設長を 9.5m とし、拡幅方式の採用により打設角度を 8 度に抑えることとした。これにより、掘削による改良体の損傷を防止し、3m 以上の十分なラップ長を確保できることから、確実な改良体を構築できる。

鏡補強工には長尺鏡ボルト工および鏡吹付けコンクリートを選定し、切羽の地質状況に応じて鏡ボルト本数を柔軟に変更することにより、鏡面の安定を図った。

脚部補強工としては、設計よりも 400mm 長い下半支保工を採用することにより、底盤部の硬質な安山岩に

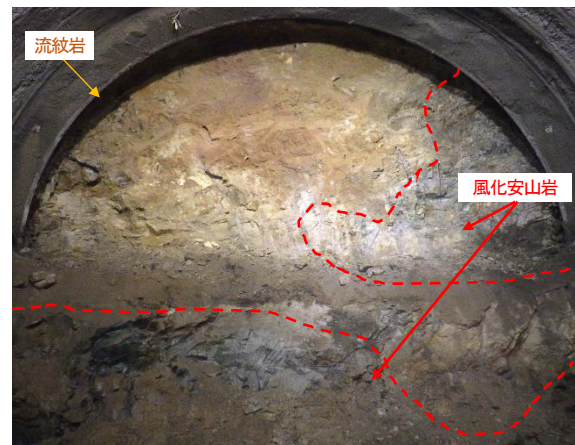


写真-1 切羽状況（河川直下）

表-2 小土被り区間の施工上のリスクと対策工

リスク	① 切羽の不安定化（切羽の崩落）				② 突発湧水による地下水・河川水の流入	
目 的	天端の補強	鏡面の補強	脚部の補強	地山挙動の把握	地下水位低下	河川水引込み防止
対策工・仕 様	・長尺鋼管先受工 〔L=9.5m, φ114.3mm, 24.5本@450mm〕	・長尺鏡ボルト工 〔L=9.5m, φ76.3mm, 平均10.5本/シフト〕 ・鏡吹付け 〔t=100mm〕 ・核残し	・脚部の吹付け ・設計+400mm長い 下半支保工を採用	・A計測 〔天端沈下、内空変位、 切羽観察・ 既施工区間観察〕 ・沈下計測 〔地表面、ライフライン〕 ・地中変位自動計測 ・民家傾斜自動計測	a)長尺水抜き孔（立坑） 〔L=20～68m、計5本〕 b)水抜きボーリング（坑内） 〔L=18.5m、計12本〕 c)ディープウェル（地表） 〔h=8～11m、計3本〕 d)水抜き孔（切羽） 〔L=30m×2本、全線〕	・仮設三面張りコンクリート 〔L=60m〕 ・ウォータータイト構造 〔L=44m、仮インバート〕 ・カーテングラウト 〔L=3m×2箇所〕
工夫点	・拡幅方式の採用 ・打設角度（8度）設定	地質に応じて本数を柔軟に変更	支保工を確実に硬質な安山岩で保持	・24h地上監視員配置 ・自動警報システム採用	a), b):地下水を含むトンネル上部の砂礫層に打設（ウォータータイト構造外）	トンネルをウォータータイト構造にすることにより、恒久的な止水対策を実施
効 果	・確実な改良体を構築 ・鋼管打設による土砂を引込むリスクを低減	鏡面の肌落ち、剥落防止	地山との一体化により、脚部の浮きや沈下を防止	異常をリアルタイムに検知し、連絡する緊急体制を確立	・トンネル掘削前に、地下水位の低下を確認 ・切羽の安定に寄与	恒久的な周辺環境の保全に寄与
	地表面沈下防止対策として機能					

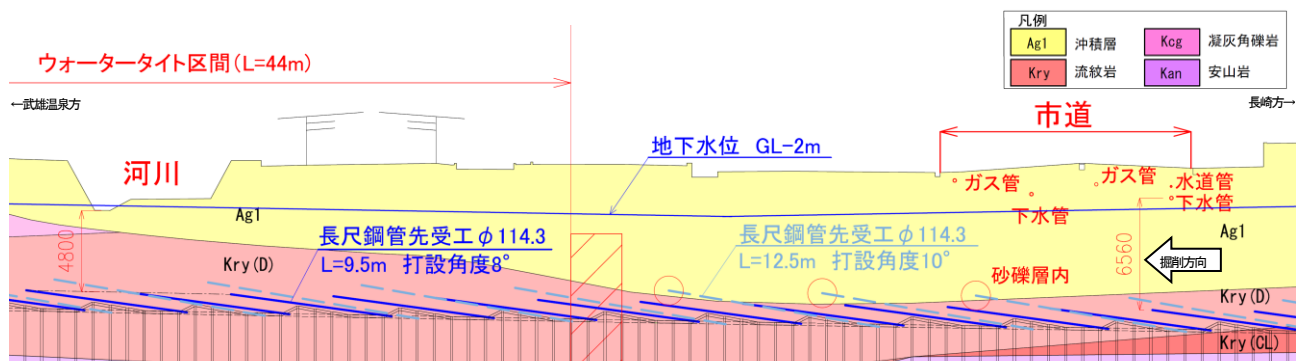
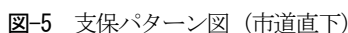


図-4 拡幅方式による長尺鋼管先受工（縦断図）

計測管理体制としては、坑内にて天端沈下計測、内空変位計測、切羽および既施工区間の観察などの A 計測を実施した。地上部では、トンネル縦断方向および市道部の地表面沈下計測、上下水道管およびガス管の沈下計測に加え、想定したトンネル掘削の影響範囲内にある民家については自動傾斜計測を行った。さらに、市道直下に切羽が到達する前の地山挙動を把握するために、地中変位計（自動計測）を設置し、管理値を超える場合には担当者に自動で警報通知するシステムを採用した。これらの各種計測に加え、地上部には 24 時間体制で監視員を配置することにより、トンネル周辺の異常を即座に検知し、迅速に対応できる連絡体制を整備した。図-6 に河川および市道周辺での計測位置図を示す。

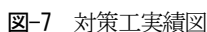
地下水位低下対策として、トンネル掘削前に、近接する揚水設備立坑からトンネル上部の砂礫層に向けて計5本の長尺水抜き孔を施工した(図-7)。地表からは



河川水の引込み防止対策として、河床に三面張りコンクリートを施工するとともに、坑内への漏水を完全に防止するために、ウォータータイト構造とした。ウォータータイト構造は防水シートをトンネル全周に設置するため、恒久的な完全止水構造となる。

対策工の有効性を確認するために FEM 解析を行い、トンネル掘削による地表面への影響を定量的に確認した。検討断面は市道および河川直下の 2 断面を抽出した。トンネル切羽は市道直下を通過後、河川直下を通過するため、次のような手順で検討を行い、予測解析精度を高めた。

- ・市道および河川直下の予測解析を実施
- ・市道部掘削後の地表面および内空変位計測結果を基に解析物性値の見直しを行い、市道直下の再現解析



を実施

- ・再現解析の解析物性値を用いて、再度河川直下の予測解析を実施

a) 地山の不均質性を考慮した解析物性値の設定

近年、小土被りトンネルの施工において地表面陥没に至る事象がみられる。土木研究所では博多の道路陥没事故を受けて「類似する条件下での都市 NATM および地下空間での工事における留意点」⁹⁾として、小土被りトンネルの施工における設計上の留意点を整理している。本検討においても、この留意点を踏まえ、地質の不均質性を考慮したうえで、危険側とならない解析物性値を採用し、複数の物性値によるパラメータスタディを行うこととした。

上記の留意点に習い、検討対象位置の地山の力学特性を把握するために地質調査結果の整理を行った。その際、力学試験が実施されている場合はその値を採用し、データ数が少ない場合は標準値²⁾を採用した。地盤固さの指標である変形係数は、各試験（孔内水平載荷試験、一軸圧縮強度試験、標準貫入試験）の結果より、推定式を用いて算出した。岩種ごとに得られた変形係数をプロットしたものを図-8 に示す。各試験結果によるばらつきが見られ、各岩種とも不均質な性状を呈していることが確認できる。地山の不均質性を考慮し、各岩種の変形係数を採用するため、今回は最小値、平均値、最大値の3ケースの物性値を用いた。この変形係

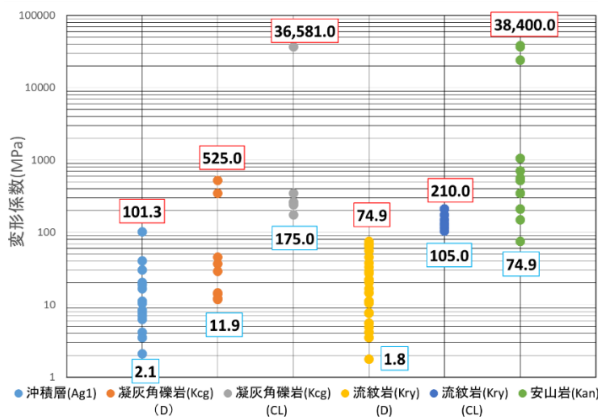


図-8 変形係数まとめ

数およびその他の解析に用いる地山物性値を表-3 に整理した。

b) 解析条件

表-4 に解析ステップを示す。解析領域は左右境界 5D、下方境界は土被りが小さいことを考慮し、1D 程度とした。長尺鋼管先受工は鋼管と地山の物性値を合成した等価剛性をもつ改良体としてモデル化した。図-9 に市道直下、図-10 に河川直下の解析モデル図を示す。

c) 予測解析結果と実測値

図-11 に市道直下、図-12 に河川直下におけるトンネル横断方向の地表面沈下量を示す。市道直下ではすべての場合で地表面沈下許容値を満足したが、河川直下では変形係数最小値の場合では沈下許容値を大幅に超過した。しかし、当該区間の全地質において、変形係数がすべて解析に用いた最小値である可能性は低いと考えられる。そこで、地表面沈下量を常時監視し、逐次解析結果と比較しながら市道直下の掘削を行うこととした。

市道直下の掘削完了後、地表面沈下量の最大実測値は 9mm (図-11：青字) となった。この値は予測結果の変形係数平均とほぼ同等の値である。計測結果を基に、地表面沈下に特に影響があると考えられる地表部の物性値の見直しを行い、市道直下の再現解析を行ったところ、地表面沈下量および内空変位ともに実測値をほぼ再現することができた。

表-4 解析ステップ

step	モデル図	備考
1		初期応力解析
2		全断面掘削 応力解放率 40%
3		支保工設置 応力解放率 60%

表-3 解析に用いる地山物性値

解析パラメータ		沖積層 (Ag1)	凝灰角礫岩 (Kcg) (D)	凝灰角礫岩 (Kcg) (CL)	流紋岩 (Kry) (D)	流紋岩 (Kry) (CL)	安山岩 (Kan)
変形係数 E [MPa]	[最小]	2.1	11.9	175.0	1.8	105.0	74.9
	[平均]	30.3	45.7	240.7	29.3	128.6	567.1
	[最大]	101.3	525.0	36581.0	74.9	210.0	38400.0
単位体積重量	[kN/m ³]	16.0	20.0	24.7	15.2	20.0	24.6
ポアソン比 ν_0	[-]	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
粘着力 C	[kN/m ²]	20.0	140.0	588.0	85.0	431.0	500.0
内部摩擦角 ϕ	[deg.]	30.0	21.0	22.0	20.0	21.0	40.0
引張強度 t	[kN/m ²]	4.0	30.0	60.0	14.0	30.0	100.0

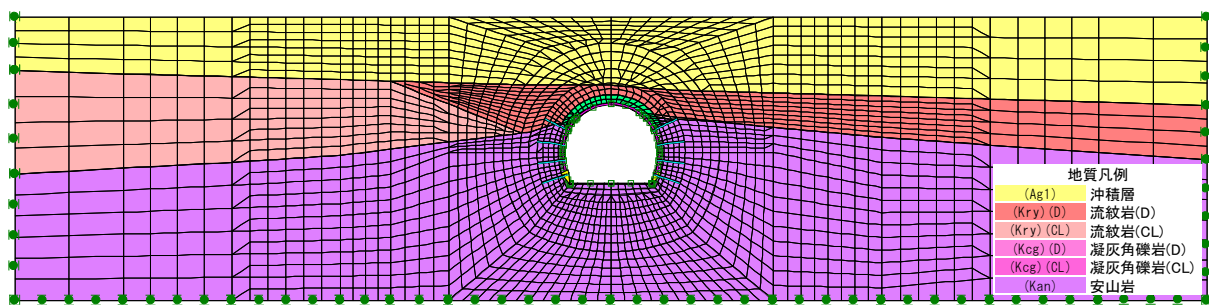


図-9 解析モデル図(市道直下)

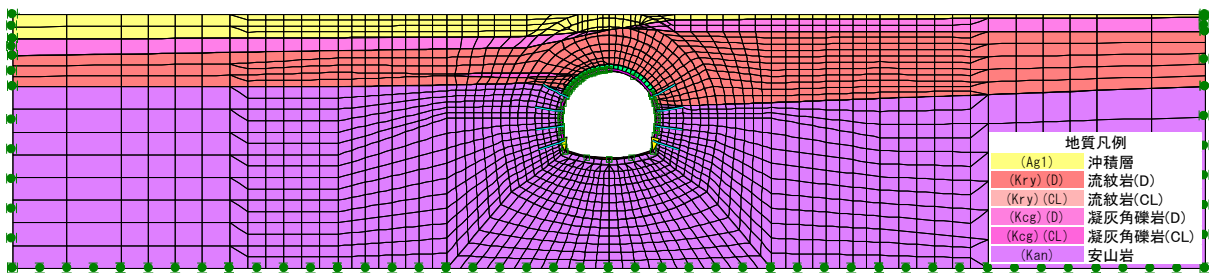


図-10 解析モデル図(河川直下)

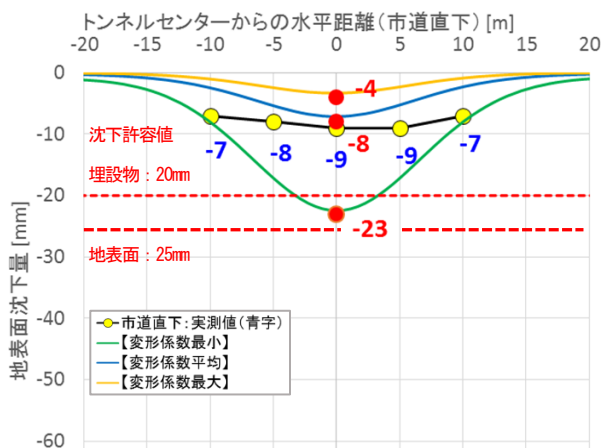


図-11 地表面沈下量(市道直下)

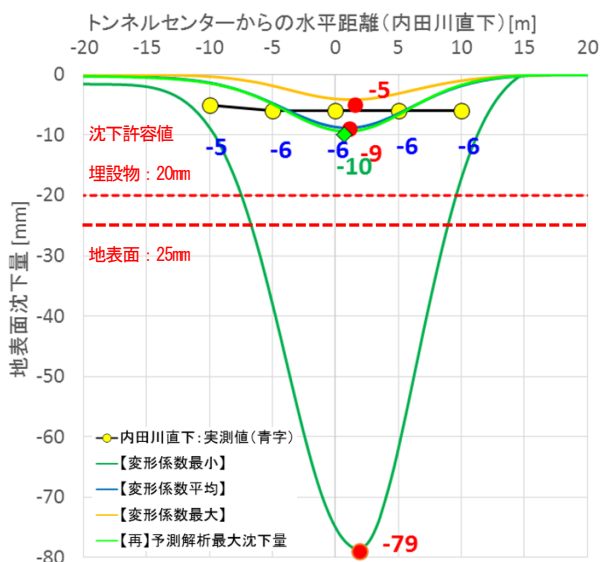


図-12 地表面沈下量(河川直下)

次に再現解析の解析物性値を用いて、河川直下の予測解析を再度行ったところ、地表面沈下量の最大値は10mm（図-12：緑字）となり、沈下許容値を満足したため、トンネル掘削を継続した。その結果、河川直下掘削完了後の地表面計測値は最大6mm（図-12：青字）となった。この値は変形係数最大値の場合の予測解析結果とほぼ同等であった。結果的に本区間の地山は比較的固結度が高かったと言える。

以上より、FEM 解析では不均質な地山を考慮した解析物性値の設定と計測結果を基にした物性値の見直しにより、河川直下において精度の高い安全側の予測解析結果が得られた。

4. 対策工の効果

(1) 切羽の不安定化に対して

切羽状況としては大きな肌落ち、天端崩落も無く、最大内空変位6.2mm（最大天端沈下7.4mm）で収束し、小土被り区間の支保部材の変状は確認されなかった（図-13）。地表面およびライフラインの沈下は7～10mmで収束し、市道のクラックや陥没は無かった。地中変位計測結果は地表面沈下とほぼ同様に推移したため、市道直下掘削前に顕著な地山の先行変位は確認できなかった。民家の傾斜計測はすべての測点において管理レベルI（1/1000rad）未満に留まり、損傷などの変状も無かった。これらのことから、トンネル掘削によ

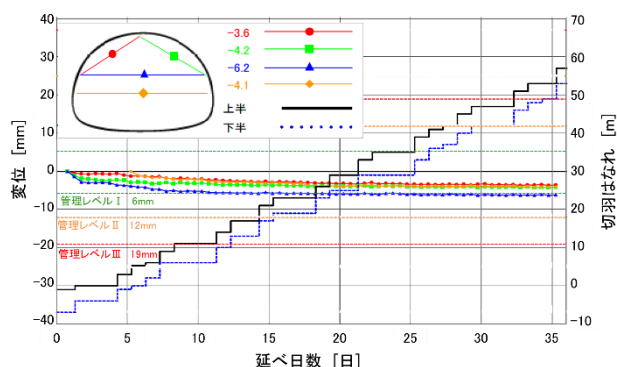


図-13 内空変位計測結果(市道直下 34km772m)

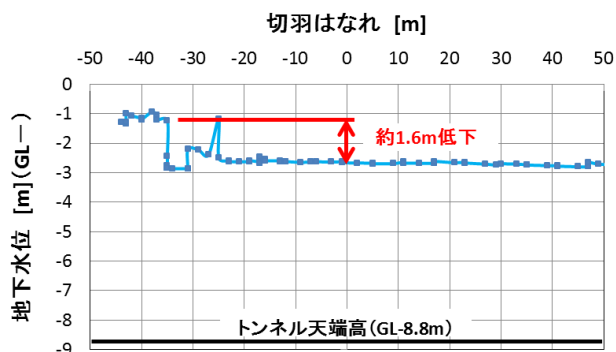


図-14 沈下計測結果平面図

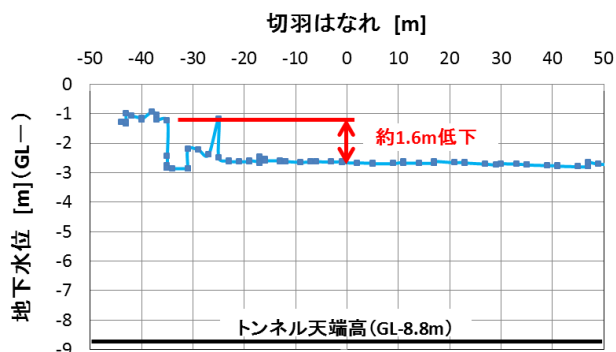
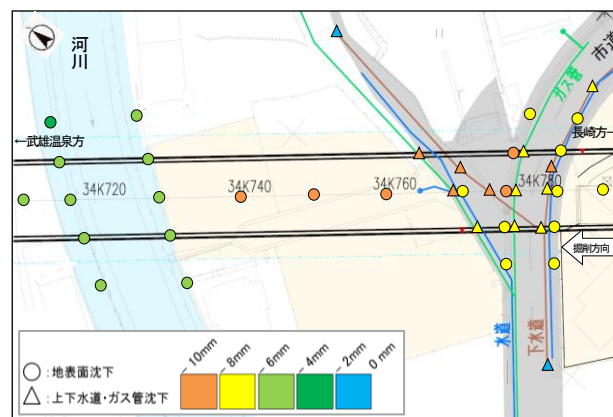


図-15 地下水位推移図

る地表部への影響は抑止できたと言える(図-14)。これは拡幅方式での先受工および鏡面の補強対策により、地下水を含んだ砂礫層を引込むことなく、切羽掘削時の改良体への影響を最小限に抑えてアーチ部および鏡面の地山を確実に改良し、先行変位を抑制することができたためであると考えられる。また、脚部補強対策により、とも下がり防止したことも、地表面沈下対策として有効に機能したと考えられる。

(2) 突発湧水による地下水・河川水の流入に対して

ウォータータイト区間の手前で実施した長尺水抜き孔および坑内からの水抜きボーリングの湧水量は最大5ℓ/min程度で、ディープウェルの設置を含め、積極的に地下水位の低下を図ったが、市道直下掘削前の地下水位は約1.6mの低下に留まった(図-15)。しかし、継続的な切羽からの水抜き工により、トンネルに作用する地下水圧を極力減少させたことで、突発湧水を未然に防ぐことができたと考えられる。ウォータータイト区間での切羽の湧水量は河川に近づくにつれて、滴水程度から1~2ℓ/minへと微量の増加のみに留まった。また、河川の流量観測(4回/月)結果は例年と同様な季節変動傾向を示し、坑内湧水も微量であった。これらのことから、坑内への河川水の流入は非常に軽微であり、トンネル掘削による河川水の減水などの影響は無かったと考えられる。



5. おわりに

河川・市道・住宅密集地直下の小土盛り区間という厳しい施工条件に加え、高水位の砂礫層と軟弱な粘土層を上部に抱えた地質条件に対し、施工上のリスクを整理し、FEM解析結果を踏まえて適切な対策工を選定した。施工中は各種計測により地山の挙動を確認しながら、対策工を確実に実施した結果、無事に小土盛り区間を突破できた。対策工の中でも、拡幅方式での長尺鋼管先受工による天端補強対策と地下水位低下対策は、非常に大きな役割を果たしたと考える。小土盛り、高地下水位という施工条件に対して、確実な天端補強対策とともに、地質条件を考慮する必要があるが、地下水位を可能な限り低下させることが最も重要であると言える。また、地山の不均質性を考慮し、岩種ごとに变形係数を変えた複数の予測解析を行った。計測結果は予測解析の範囲内であり、解析は妥当であったと言える。先行して掘削した市道直下の計測結果を考慮して物性値を見直すことで、河川直下の解析精度が向上した。本報告が今後の同種工事の参考になれば幸いである。

謝辞：小土盛り区間の施工に当たり、トンネル委員会や施工検討委員会を通して、関係各所の様々な方々にご支援、ご指導を賜り、改めて関係者の皆様に御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 土木研究所：福岡地下鉄七隈線延伸工事現場における道路陥没に関する検討委員会報告書，2017.5.
- 2) 独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構：山岳トンネル設計施工標準・同解説，2008.4.

(2018. 8. 10 受付)

EFFECTIVE TUNNEL EXCAVATION METHODS ADOPTED IN VERY SHALLOW OVERBURDEN TUNNEL IN URBAN SETTING

Takeshi EJIMA, Hiroshi KOGI, Ryotaro MATSUNO, Tsuyoshi FUKUDA
and Akira FUJINO

Part of the alignment of this tunnel was designed to pass under a river, road, underground pipes and residential area in very shallow overburden where the ground are highly-weathered with high groundwater level. Therefore, high risks of face collapse and water inrush from ground and river were assumed. After thorough consideration, we adopted some auxiliary methods like widening type excavation for forepiling, dewatering methods, waterproofing methods and so on. The validity of auxiliary method was also confirmed by numerical analysis using FEM method. As a result, the excavation along the shallow overburden was completed without any major face collapse and serious ground surface settlement.