

中国横断自動車道尾道松江線大万木トンネルにおけるウォータータイト構造による流域保全

新宅 亮太¹・狩野 浩資¹・景山 浩孝²・若杉 俊一²

¹三次河川国道事務所 工務課 (〒728-0011 広島県三次市十日市西6-2-1)

²三次河川国道事務所 調査設計課 (〒728-0011 広島県三次市十日市西6-2-1)

中国横断自動車道「尾道松江線」を代表する構造物である大万木トンネルのうち広島県側にある低土被り区間においては、断層帯や河川を横過することから従来の排水構造のトンネルでは河川水の引き込みによる流量低下が懸念された。そのため、本トンネルでは一部の区間を非排水構造とし、流量回復が可能なウォータータイト構造（以下、「WT構造」）を採用した。トンネル施工中は、掘削に伴う湧水の調査及び周辺流域の調査を行い、河川水の引き込みに留意した。施工完了後の水位回復状況を調査し、WT構造の評価について報告する。

キーワード ウォータータイト(WT)構造, 低土被り, トンネル湧水, 覆工

1. はじめに

中国横断自動車道「尾道松江線」は、広島県の瀬戸内海沿岸の尾道市を起点に、広島県北部の三次市を經由して島根県松江市に至る延長137kmの高速道路である。

島根県との県境部に位置する大万木トンネルは延長4878mと、中国地方の道路トンネルとして最長を誇る尾道松江線を代表する構造物である。

トンネル工事において、池の枯渇や地下水の低下が問題となることがある。大万木トンネルについても広島県側にある低土被り区間の地表部（篠原地区）には、約80万m²、360枚の水田（一部休耕田）が和南原川兩岸に広がっており、和南原川及び渓流水を利用した稲作が盛んであり、河川流量の低下は営農活動に大きく影響する問題である。また当該地区では、井戸・湧水を利用しており、地下水の低下により井戸水が枯渇すれば付近住民への影響が大きい。トンネル掘削による水位への影響解析、および対策工の比較検討等を行った結果、施工性・維持管理性・周辺への影響度およびコスト等を考慮して、影響区間をWT構造とした。

大万木トンネルについて、WT構造を行ったことによる結果及び評価を報告する。



図-1 大万木トンネル位置図

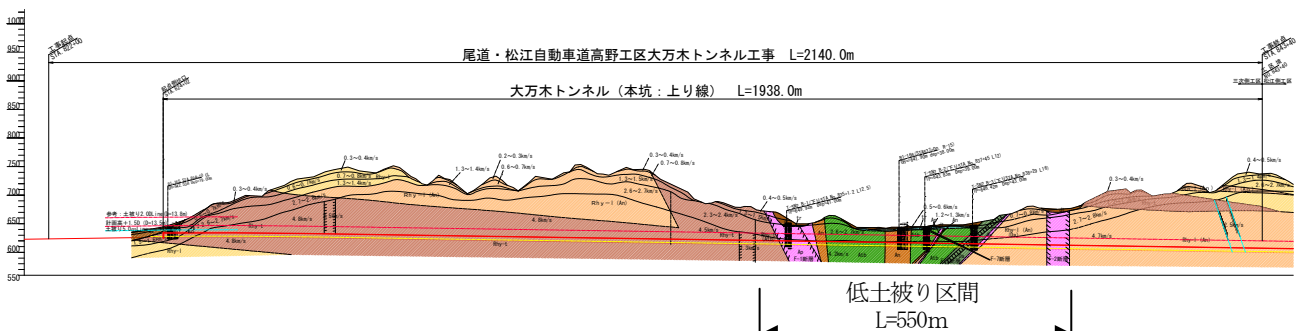


図-2 大万木トンネル低土被り区間位置図

2. WTの概要

(1) WT区間地形地質概要

地形は標高700m~1,000mの急峻な山地からなり、地質は中生代白亜紀~新生代古第3期の高田流紋岩類を基盤とし、これらを未固結な火山砕屑物、崖錐堆積物が覆っている。WT構造を施工する広島側坑口から約1,200mの小土被り区間は23m~55mの小土被りで、ほとんどが2D(D=13.5m)程度となっており、地質は、安山岩質凝灰角礫岩が主体で、多数の断層の複雑な分布が確認されている。F1断層は透水係数で 10^6 レベルの「粘土質不透水変質帯」であり、遮水層を形成しているが、F3、F7、F9断層層は透水係数が 10^3 程度あり、河川水の引こ込みなどの大きな要因となる可能性が高い。断層以外の透水係数は 10^{-4} ~ 10^{-6} 程度、小土被り区間に隣接する健岩部では 10^{-5} ~ 10^{-6} であり難透水性を示している。

(2) WTによる水位回復メカニズム

通常の山岳トンネルは排水型で、吹付け面から湧水は防水シートの裏面を通じて裏面排水工へ導かれ、横断

排水工から中央排水工を通り坑外へ排出される。

非排水トンネル(WT)では、防水工や覆工の施工中に、掘削面から集まってくる湧水が、インバート吹付面と防水シートの間で滞留することを防止するため、通常の排水トンネルと同様に吹付け面からの湧水は仮排水工へ導かせ坑外へ排出させる。トンネル完成後、仮排水工を閉塞させることで地下水位は徐々に回復し、地下水の中に浸された状態となる。

(3) WTの構造

通常の排水トンネルでは、周辺の地下水はトンネルの中央排水溝から排水され、トンネルには土圧のみ作用する。これに対しWT構造の非排水トンネルでは、周辺の地下水位が保持されるため、トンネルには土圧に加えて水圧が作用することになる。予想される水圧に耐える断面形状、覆工構造規模を骨組解析により設定した。標準部の馬蹄形のトンネルに対して構造的に優位な真円に近づけていくことより、大きな水圧にも耐えうる合理的な構造とした。大万木トンネルでは、真円に近く、構造安定性と経済性から断面を選定した。

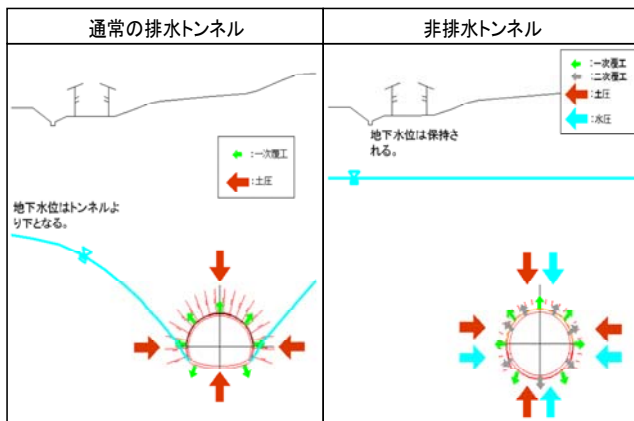


図-3 地下水状況比較図

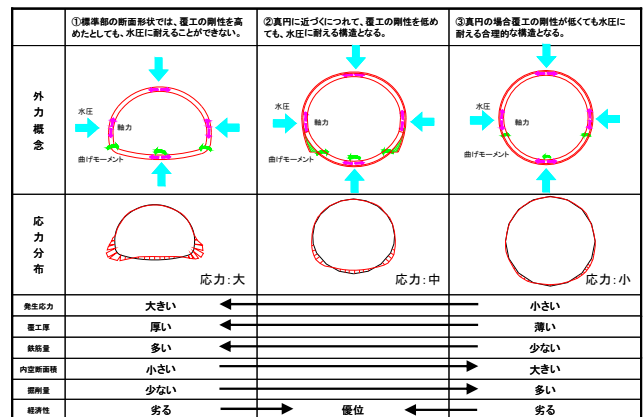


図-4 最適構造比較図

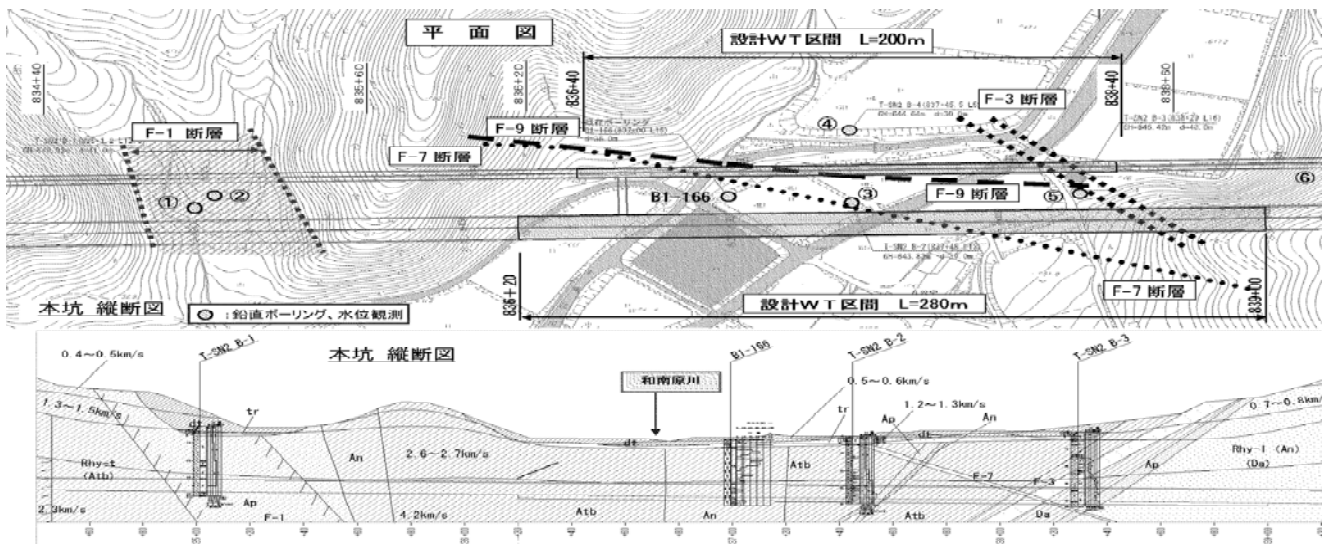


図-5 地質平面・縦断図

3. WT構造の計画・設計

(1) WT構造採用区間の設定

WT採用区間は、三次元浸透流解析結果より、F-3、F-7、F-9断層が本坑、避難坑切羽に分布し、和南原川及びその周辺の地下水を引水する割合が高い区間とした。

(2) WT構造設計

既存設計において設定された適用断面をもとに、対象区間において予想される水圧に耐える断面形状、覆工構造規模を骨組解析により設定した。

a) 覆工のモデル化

覆工を骨組みでモデル化した。応力が集中しやすい隅角部周辺については節点を多く配置した。

b) 荷重のモデル化

大万木トンネル周辺は岩盤地山であるため、道路トンネル技術基準（構造編）・同解説（2003年P146）に示す標準支保パターンを適用するものとし、一次支保が土圧を受け持つものとし、覆工コンクリートには土圧は作用しないものとした。当地区は年間の降水量の変化が大きく、地下水位の変動も大きいと予想されるため、トンネルにかかる水圧は通常発生する可能性のある4ケースと異常時との計5ケースで検討を行った。水圧は深度を考慮した静水圧分布荷重とした。

水位条件	概要	荷重条件	地下水位
①大雨時	降雨が多く、地表面に水位がある場合	短期の最大荷重用時	トンネル天端+30.0m
②通常時	ボーリング結果による地下水面	常時の最大荷重用時	トンネル天端+28.0m
③漏水期(水位:トンネル天端まで)	漏水期にトンネル天端まで地下水が下った場合	偏水圧作用時(水位:トンネル天端まで)	トンネル天端+0.0m
④漏水期(水位:トンネル肩部まで)	漏水期にトンネル肩部まで地下水が下った場合	偏水圧作用時(水位:トンネル肩部まで)	トンネル天端-1.91m
⑤水位低下時(水位:トンネル脚部まで)	漏水期にトンネル脚部まで地下水が下った場合	偏水圧作用時(水位:トンネル脚部まで)	トンネル天端-8.85m

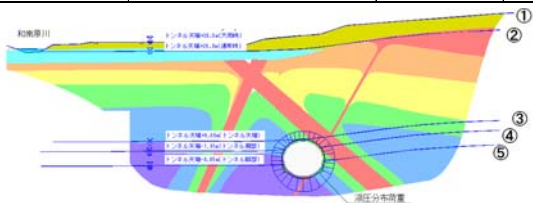
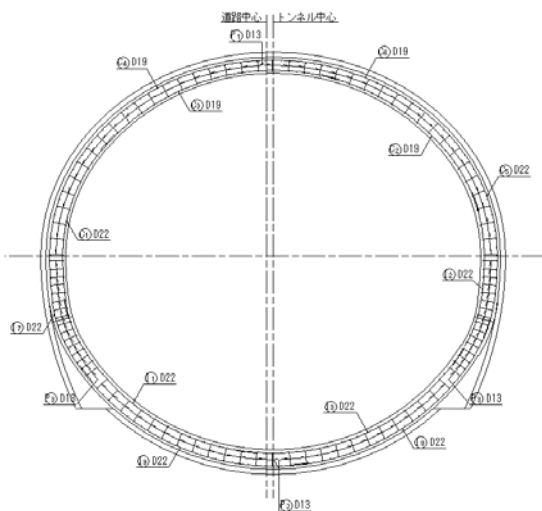


図-6 地下水位検討ケース



c) 地盤のモデル化

トンネルにかかる地盤反力は、部材の角支点に対して地盤バネとしてモデル化した。地盤バネは、覆工の軸線に対して直角に作用する法線方向のバネのみ考慮し、覆工コンクリートと地山が分離した構造であることから背線方向のバネについては考慮していない。また法線バネは圧縮方向のみ考慮した。なお、地盤バネ(法線バネ)は道路橋示方書・同解説（2002年）に準じて算出した。地盤バネの算出に採用する変形係数は、地質調査の結果から、各地山分類の中央値を目安に設定した。

d) 覆工構造方針

覆工は、発生する応力が大きく変化する箇所（SL付近）にて部材厚および鉄筋径、鉄筋間隔を変更した。最小鉄筋径、鉄筋間隔は施工性と品質を考慮し設計した。施工性を考慮した制約条件としては下記のとおりである。

①覆工厚

覆工は複鉄筋であり、組立て時の防水シート破損も考慮し、同規模トンネルでのWTの施工実績より、最も事例の多い最小厚500mmとした。

②配筋

WTは断面が大きく、配筋が困難であるため、施工実績でも最も主に採用されている200mm~300mmピッチを考慮し、上半は250mmピッチとし、下半は上半に対して施工性が向上するため、125mmピッチを最小間隔とした。

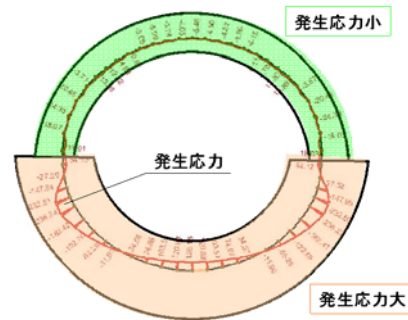


図-7 覆工応力模式図

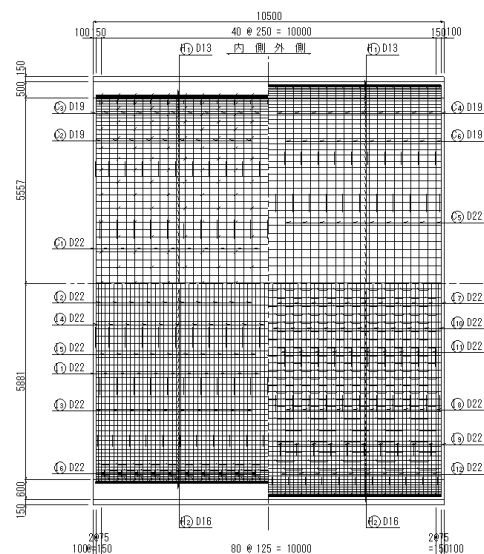


図-8 覆工配筋図

4. WT 区間の決定

(1) WT 区間の考え方

断層及び周辺の亀裂性地層を水みちとする河川からの多量引水が生じる可能性があるため、一般に考えられる緩み領域を基に、土被り 2 D 以下、または断層からの離隔が 1 D~1.5D となる範囲を WT 構造区間とした。

施工時には、トンネル坑内湧水量、和南原川及び周辺沢の流量、井戸及び観測井戸の水位の変動をモニタリングしながら範囲設定を検討した。

(2) WT 区間端部処理方法

排水型トンネルとの境界部には図-9に示すとおり水頭差を維持するため、設計当初は過去の事例にならい、ファンカーテングラウチングが検討された。ファンカーテングラウチングをトンネルの排水構造変更部で実施する場合、図-10に示すとおりトンネル円周方向に削孔、注入を行う。注入改良目標は透水係数において $1 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ とすることが多い。しかしながら、ファンカーテングラウチングは、円周方向に削孔注入する期間は切羽掘削などを並行して行うことができないため工期的負担が大きい。事例が少なく合理的な設計手法が未確

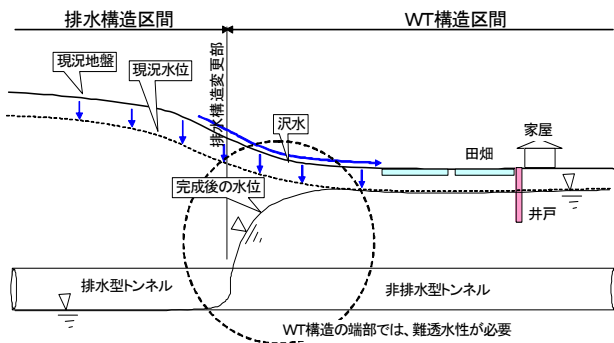


図-9 排水構造変更部の地下水位概念図

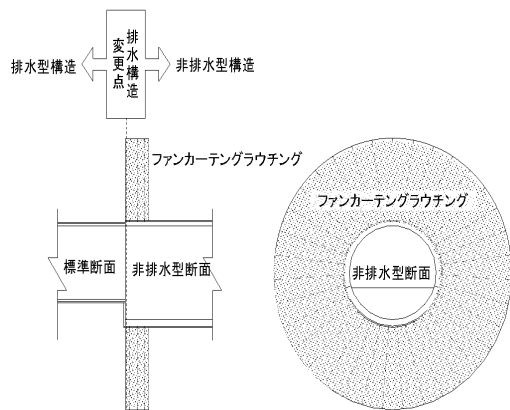


図-10 ファンカーテングラウチングによる端部処理

立である。などの理由から、本トンネルでは代替方法として難透水性の健岩部までWTを延長する手法を検討した。本トンネルでは図-11のように、透水性地山外側の健岩部に1 D程度WT構造を延伸することで、ファンカーテングラウトの代替効果を持たせることとした。その際周辺地山が難透水性を示す健岩であることを透水試験によって確認することとした。

(3) WT 区間決定指標

WT構造区間決定は、排水構造変更部の延伸を考慮するため2段階で判断することとした。図-11のとおり調査で特定した地表水への連動性の高い区間の端部を「判断点」とした。次に、判断点の排水型構造区間側の周辺地山の透水性を調査し、健岩である難透水性地山が分布する区間が1 D程度以上連続する区間を特定し、その端部をWT構造区間の「開始点（または終了点）」とした。

判断点（開始）は、①前方探査によるボーリング孔からの湧水が $5 (\text{ℓ}/\text{min}/5\text{m})$ 以上であること②トンネル坑内湧水量が $10 (\text{ℓ}/\text{min}/5\text{m})$ 以上であること③切羽観察により健岩であること④トンネル掘削に連動した河川・沢水の水位変化がないこと⑤観測井戸の水位低下 (40cm 以上) を確認することとした。

開始点（または終了点）は、判断点までの1 D 区間で、①切羽観察により健岩であること②坑内湧水量が $10 (\text{ℓ}/\text{min}/5\text{m})$ 未満であること③掘削に連動した河川・沢水の水位変動が生じないこと④透水試験を実施し健岩 ($k=10^{-5}$) であることを確認することとした。

判断点、開始（終了）点を決定するに当たっては、以下の判断基準を基に総合的に判断するものとした。

a) 前方探査ボーリングによる地山性状と孔内湧水量

避難坑ではジャンボによる探り削孔+削孔検層、本坑では水平ボーリングによる切羽前方探査を行い、地山性状や地下水の帯水状況を事前に把握した。またボーリング時の孔内湧水量を把握し、集水暗渠の公式を用いて坑内湧水量を予測してWT構造判断の目安とした。集水暗渠の公式によれば、土被り30m、半径5.5mのトンネルの坑内湧水量はφ100mmのボーリング孔からの孔内湧水量の約2倍となる。そこで、判断基準としてのボーリング孔内湧水量は、b)で述べるトンネル坑内湧水量基準の0.5倍とすることとした。

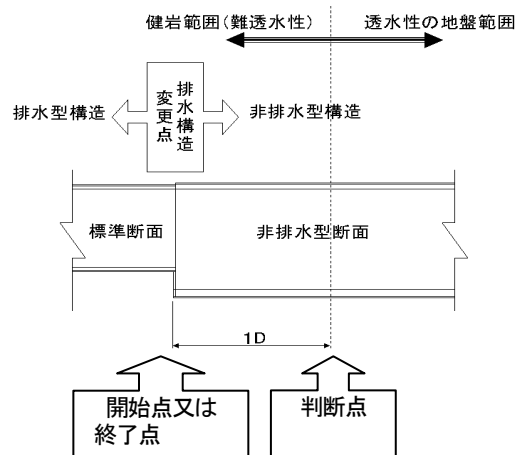


図-11 排水構造変更部の処理

表-1 トンネル坑内湧水量

	切羽距離 (m)	解析 (全線) (m ³ /min)	実績 (全線) (m ³ /min)	実績 (5m当り) (% /min/5m)
避難坑	1,097	0.58	1.15	5.24
本坑	957	0.76	0.27	1.41
合計	1027 (平均)	1.34	1.42	6.91

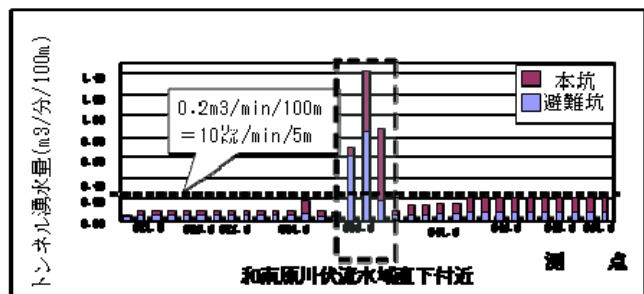


図-12 解析による無対策時の坑内湧水量

b) トンネル坑内湧水量

WT構造に至るまでの坑内湧水量の実績を三次元浸透流解析結果と比較した結果、表-1に示すとおり湧水量は概ね一致していた。そこで、図-12の浸透流解析結果より、健岩部の湧水量を10L/min/5mとし、これを越える範囲をWT構造が必要な区間の目安とした。

c) 河川や沢水の流量及び観測井戸の水位

各所で観測している河川流量及び沢水流量を継続監視した。

d) 観測井戸水位

観測井戸では、図-13のとおり過去の観測結果を基にその平均水位と最低水位の差の平均値である0.4m以下をトンネル掘削の影響判断の目安とし、観測井戸を継続監視した。

e) 透水試験

透水試験はルジオン試験により透水係数を求めた。

5. WT区間施工状況

1) 施工中の状況

トンネル掘削は、万一の急激な地下水位低下の場合でも利水への影響が小さいと考えられる避難坑を先行させ、設計WT構造区間の手前より前方探査を実施しながら進めた。小土被り区間、特に湧水が発生した区間の地質状況は全体に比較的硬質な凝灰岩質安山岩であり、板状または塊状の節理面が発達していた。切羽湧水は粘土面を含む板状節理が発達した部分から発生しており、掘進に伴い滲水箇所が徐々に広がる傾向であった。トンネル坑内湧水量は、WT区間において約40m³/h増加した。

最高水位

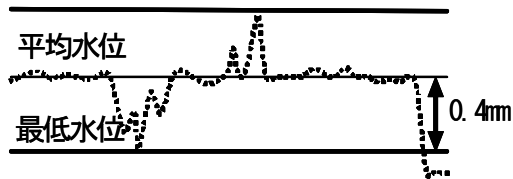


図-13 観測井戸水位低下の概念

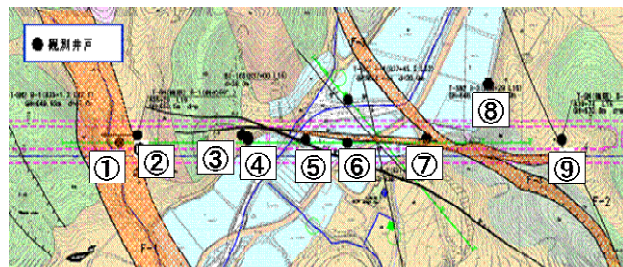


図-14 観測井戸位置図

2) 施工中の観測井戸状況

観測井戸⑤の水位は本坑通過時にトンネル天端高さ付近まで低下した。また観測井戸⑥の水位は本坑通過時にトンネル天端より10m上方付近まで低下し、いずれもそのレベルを保った。観測井戸⑦の水位は、避難坑及び本坑での探査ボーリングで30cmから50cmの水位低下が発生したが切羽通過時は挙動を示さなかった。

3) 施工中の湧水状況

本坑上半掘削時におけるウォータータイト区間の区間湧水量は約40m³/hであった。ウォータータイト構造（非排水トンネル構造）としなかった場合（排水トンネル構造）は、掘削時の湧水のほとんどが中央排水に導かれこととなり当該区間（伏流水帯）の水量は明らかに減少することとなる。

6. 周辺流域への影響・評価

1) 地下水位状況

WT区間の覆工を本坑は2011年12月に、避難坑は2011年11月末に終了し、仮排水管の閉塞は2012年2月より開始し2012年3月に完了した。

仮排水管閉塞開始直後より地下水位の回復兆候が見られ、トンネル天端より10m以上まで急激に地下水位が回復している。その後、地下水位はなだらかな上昇傾向をしめしており、最も地下水位の下がった観測井戸で、掘削前の約50%まで現在回復している。

2) 河川水状況

大万木トンネル構築により、低土被り部区間における和南原川伏流水帯からトンネル内へ引水し、その結果、その下流域にある耕作地の農業用水が不足することが懸念されていたが、和南原川伏流水帯のトンネル上下流の水量については多少の上下はあるもののトンネル内へ引水し、河川流量が減少していることは考えられない。

3) 生活井戸状況

トンネル近傍の地元住民について生活井戸の出水調査を実施しているがその結果については、トンネル構築に関わらずほぼ一定の量が確保されている。今後これ以上地下水位の上昇が見られない場合でも影響はないと考えられる。

7. まとめ

『大万木トンネル』におけるWT構造の施工によって、河川流量の低下もなく、稲作に及ぼす影響もなく観測井における水位の回復傾向も見られるため、当初のWT構造の目的は達成されたものとする。

しかしながら、現在国内におけるWT構造の施工事例はまだ少なく、施工方法が確立されていない（目的、状況により異なるが）のが現状である。品質・施工性の向上のため新たな構造設計や施工方法、品質管理、WT構造の区間設定方法の確立などを今後検討していく必要がある。

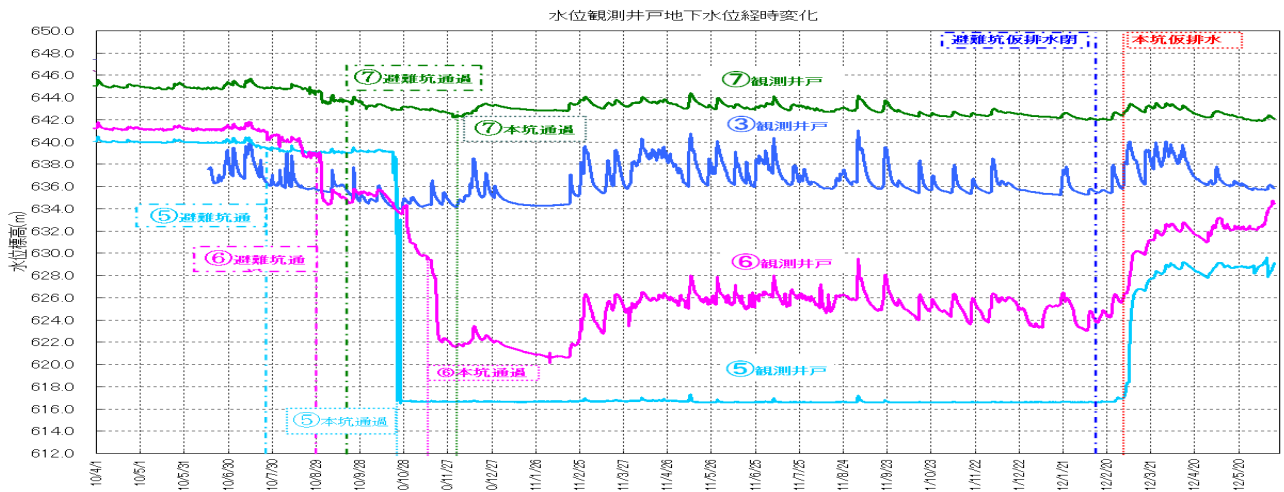


図-15 地下水位変化

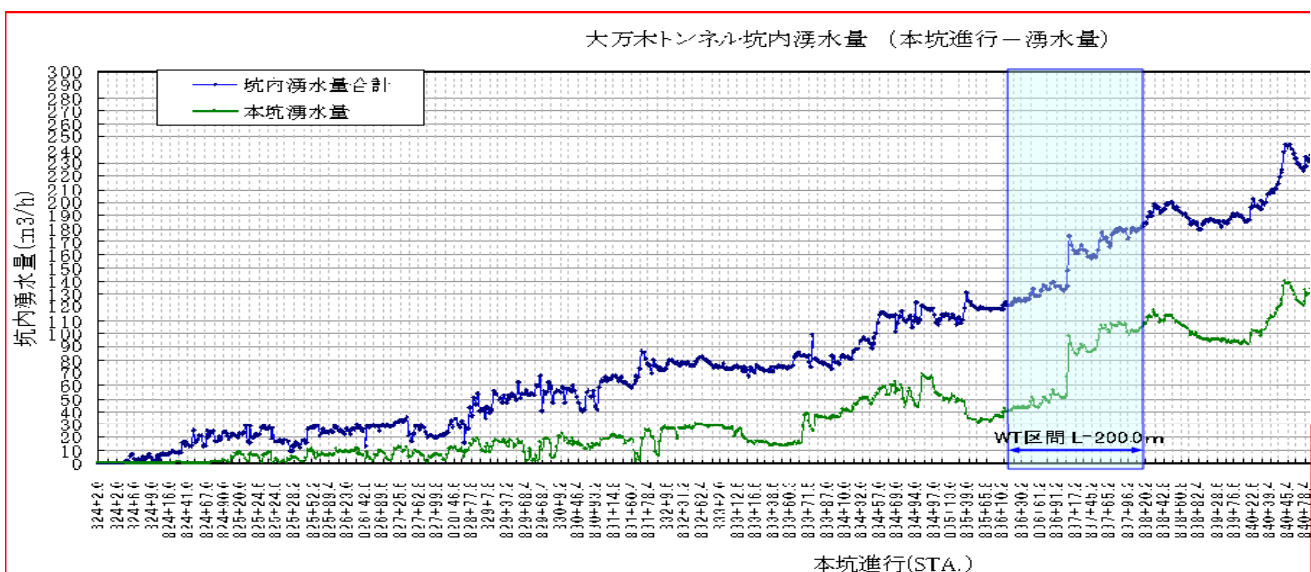


図-16 坑内湧水量変化