

シラス地山におけるトンネル掘削のための 地下水低下工法の解析的検討

STUDY ON DEWATERING METHOD FOR TUNNEL EXCAVATION THROUGH SHIRASU USING FEM ANALYSIS

稲葉秀雄¹⁾、鈴木雅行²⁾、多宝 徹³⁾

Hideo INABA, Masayuki SUZUKI, Toru TAHOU

A tunnel which has been constructed in "Shirasu", met with impervious layer at 260 meter from entrance. We observed groundwater level 20 meter higher than spring line in opposite side of the that layer, and we needed more than one month to drawdown. Therefore we conducted a drawdown simulation with finite element method to understand an effective dewatering method.

The results of simulation are as follows: (1) It's effective on drawdown to use longer drainage borings together well point drainage. (2) The specific storage of Shirasu is about 0.03 1/m, and it's very important factor in this case.

Key Words: Shirasu, well point drainage, impervious layer, finite element method, simulation of drawdown

1. はじめに

Aトンネルは $L=950\text{m}$ で、シラス地山内に機械掘削による上半先進ショートベンチ工法にて掘削している。土被りは最大約 50m であり、掘削前の地下水位はトンネル天端より最大で約 20m 高い位置にあった。

地山は一次シラスであり、含水比の高い状態で掘削を行うと流砂・崩壊が生じるため、地下水位低下工法により掘削底盤以下まで地下水位を低下させながら掘削を行う必要がある。ここでは、シルト質の遮水層が存在し切羽付近に大きな水頭差が生じた区間の対策、および地下水位の高い区間での効率的な地下水位低下工法について、3次元FEMによる浸透流解析により検討を行った事例について報告する。

2. 地下水位低下工法の概要

本トンネルの地質は、ほぼ全体が一次シラスである。シラスは、素掘りのトンネルが存在することから分かるように、水を含まない状態では非常に安定しており掘削も容易である。しかし、水による浸食に弱く、含水比が高い状態になると、流砂・崩壊が生じる。したがって、大半の部分で地下水面となる本トンネルでは、地下水位低下工法を採用し、掘削底盤以下まで地下水位を低下させた状態で掘削を行っている。

地下水位低下工法の検討に際し、シラス地山でのトンネル掘削事例¹⁾を調査した結果、ウェルポイント工法を採用することで掘削することが可能であるという結論に至った。

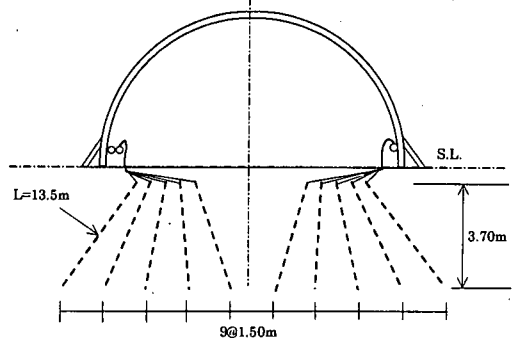


図-1 上半ウェルポイント配置図

1) 正会員 ハザマ 土木本部トンネル統括部
2) 正会員 ハザマ 土木本部トンネル統括部
3) 正会員 ハザマ 九州支店

4. FEM解析による対策案の検討

4.1 遮水層近傍の地下水位低下対策

遮水層背面の地下水位を低下させ安全に遮水層部分の掘削を行うために、適切な対策工を検討する必要があるとともに、トンネルから20m離れた位置にある坑外水位観測孔の観測データからは確実に把握することが困難であった遮水層以奥での地下水位低下状況を精度よく把握する必要があった。そこで、3次元FEM解析による飽和-不飽和浸透流解析を実施することとした。以下に解析の概要と解析結果について述べる。

(1) 解析モデル

解析においては切羽を解析モデルのほぼ中央に配置し、遮水層をトンネル軸と直行するようにモデル化した(厚さ0.5m)。そして、外部境界条件の影響を無視できるように、解析モデルは500×500×60m(標高70～130m、トンネルS.L.:標高110m)とした。解析モデルを図-4に示す。

境界条件や解析初期状態は、坑外地下水位観測の結果や切羽付近における揚水量の測定結果に基づき設定し、極力実現象との整合を図った。ウェルポイントおよび水抜き孔からの揚水は、解析モデル上でストレーナーの位置に相当する節点から、実測値に応じた流量を排出するという境界条件を設定することにより模擬した。

(2) 解析パラメーターの設定

シラスの透水係数および間隙率は原位置試験や室内試験の結果に基づいて設定した。また、遮水層の透水係数はシラスより2オーダー小さいものとし、間隙率は粘性土の一般的な値を用いた。比貯留率は解析結果に重要な

影響を与えるパラメーターであるが、試験結果が存在しない。そこで、比貯留率を変化させて複数ケースの解析を行い、坑外水位観測孔(STA+320m、遮水層から約5m奥)の位置での水位低下状態が実測データに最もフィットする値($S_s=0.03$ 1/m)を採用した(図-5)。解析パラメーターを表-2に示す。

(3) 解析結果

上述した解析条件のもとで、まず現状把握のために10月22日から12月30日までの地下水位低下解析を実施した。なお、解析は11月30日から12月10日の間に実施している。解析の結果を図-6、7に示す。

解析の結果、以下のようなことが明らかとなった。

①12月20日時点において遮水層背面の地下水位がS.L.(EL.110m)以下まで低下している。(図-6)

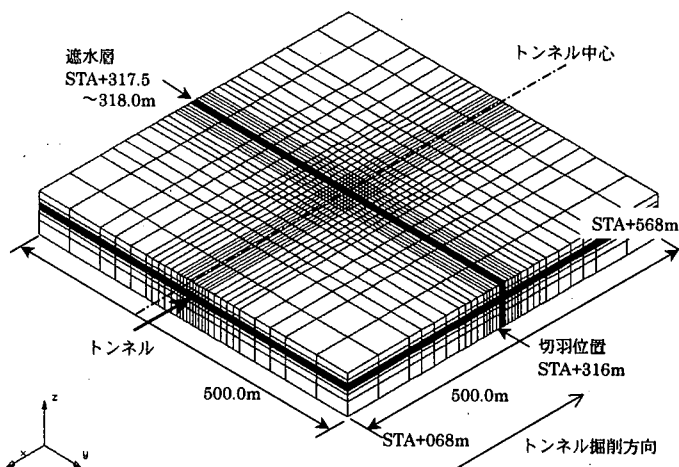


図-4 解析モデル

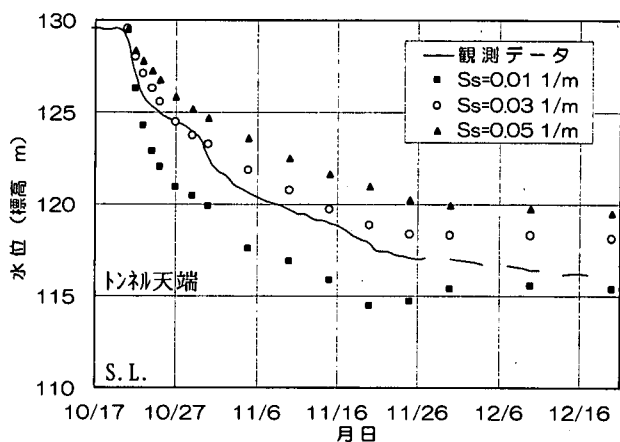


図-5 水位観測孔における水位低下解析結果

表-2 解析パラメーターの設定

地質区分	透水係数 k (m/sec)	間隙率 ϕ (%)	比貯留率 S_s (1/m)
シラス	1.0×10^{-5}	60	0.03
遮水層	1.0×10^{-7}	30	

②トンネル掘削対象となる範囲では、11月15日時点で遮水層背面の地下水位が最も低下し、それ以降は地下水位が回復する傾向にある。(図-6, 7)

③ トンネル中心部分と、25m離れた坑外地下水位観測孔では、12月20日時点において約8m、最大で約15mの水位差が生じている。(図-7)

(4) 対策工

坑外水位観測孔の水位が上半盤より5m以上高い位置にあったこと、およびL=10mの水平水抜き孔から自然排水が続いていることなどから切羽近傍の地下水位が十分低下していないと判断し掘削を中断していた。しかし、解析の結果から遮水層背面の水位は安全に掘削を行うことができる程度まで低下していると判断され、また、これ以上遮水層手前からの排水を継続しても更なる地下水位低下は生じないということが明らかとなった。したがって、追加の排水対策などは行わず、遮水層部分を掘削し無事通過することができた。

4.2 遮水層以奥での効率的な排水方法の検討

遮水層以奥の高地下水位区間における効果的なウェルポイントの配置を検討するため、同様の浸透流解析により数種類のウェルポイント配置についてのケーススタディを実施した。この解析は切羽が遮水層部分から約50m進んだ時点で実施した。解析モデルおよび解析パラメーターは、遮水層をモデル化していないことを除いて、前述の解析とほぼ同様である。

(1) 解析初期状態の設定

この解析は、現状のウェルポイント配置を基準として、より効率的なウェルポイント配置を求めることを目的としている。そのため、現状のウェルポイント配置による地下水の低下状況を精度良く再現する事が重要となる。しかし、前述した解

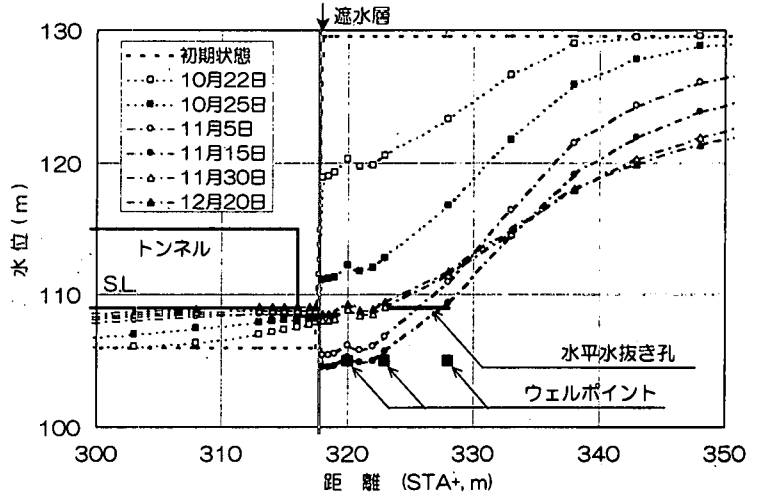


図-6 水位低下解析結果 (トンネル中心縦断方向)

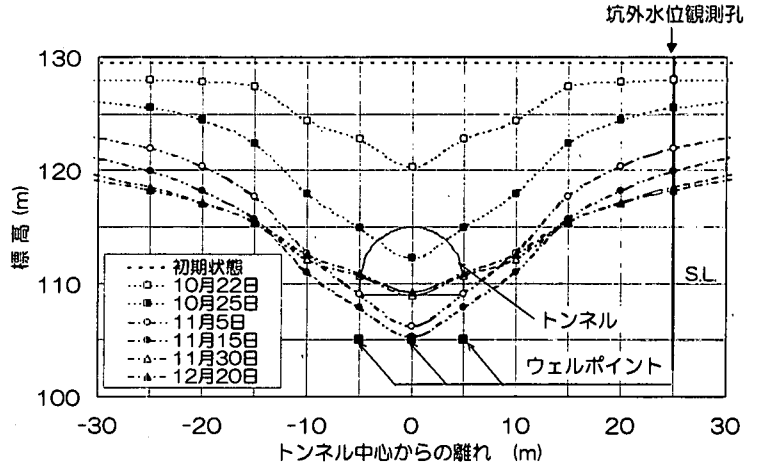


図-7 水位低下解析結果 (遮水層背面 (STA+320m) 横断方向)

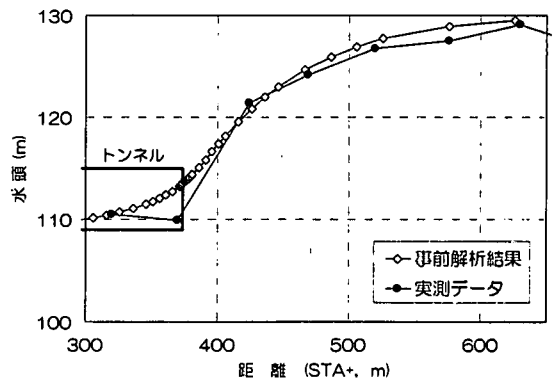


図-8 事前解析の結果
(トンネルから20m離れた縦断面での地下水位分布)

析結果からも明らかとなったように、坑外水位観測孔の水位データからトンネル周辺の地下水位低下状況を把握することは困難である。したがって、ここでは現状のウェルポイント配置による地下水位低下状態を解析により求め、その状態を各解析ケースの解析初期状態とした。

解析初期状態を求めるための事前解析は、現状のウェルポイント配置とそれによる排水量を境界条件として実施した。事前解析の結果を図－8に示す。事前解析により求めた地下水位の分布は、坑外地下水位観測孔のデータを良く再現することができており、この地下水位分布をケーススタディー解析の初期状態とすることとした。

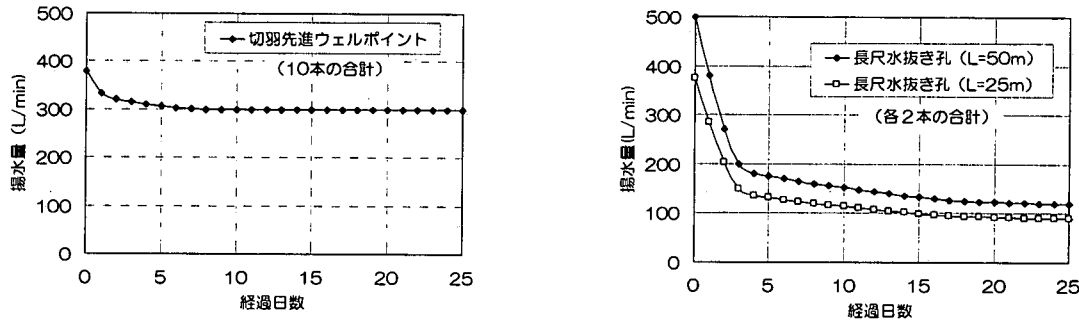
(2) 解析ケース

ウェルポイント配置に関するケーススタディーは、表－3に示すような7ケースについて実施した。境界条件としてのウェルポイントからの揚水量については、その経時変化を考慮して、これまでの実測データに基づき図－9のように設定した。

表－3 ウェルポイントの配置検討に関する解析ケースの設定

解析 ケース	ウェルポイント・水抜き孔の配置					備 考
	切羽先進WP L=10m ストレーナ=5.4m	切羽先進WP L=20m ストレーナ=5.4m	長尺W L=50m スリット=20m	長尺W L=25m スリット=15m	設定揚水量 合計 (L/min)	
case-1	10本	－	－	－	380→300	従来のパターン
case-2	－	10本	－	－	380→300	
case-3	10本	－	2本	－	880→452	
case-4	－	10本	2本	－	880→452	
case-5	6本	4本	2本	－	880→452	切羽先進WPを千鳥に配置
case-6	10本	－	2本	2本	1255→566	長尺W (L=25m)は断面外に配置
case-7	10本	－	2本	2本	1255→566	長尺W (L=25m)は断面内に配置

設定揚水量は、解析開始直後→10日経過後の値を示した



図－9 境界条件の設定（ウェルポイント、水抜き孔からの揚水量）

(3) 解析結果

解析結果の一例を図－10に示す。解析結果から各ケースの短期的（～2日）、および長期的（4日～）な地下水位低下状況をまとめると表－4のようになる。

(4) 対策工

解析の結果からは、CASE-6, 7、およびCASE-5の効果が高いと判断されたが、実際の対策工としては、掘削の進行とともに切羽から新たなウェルポイントが設置されるので、長期的な地下水位低下効果はCASE-1, 3で

も改善されると考えられること、また、掘削断面外にウェルポイントを配置することは極力回避することなどを考慮して、工費、施工性に優れたCASE-3（従来のウェルポイント配置（L=13.5m×10本）にL=50mの長尺水抜き孔2本を追加（50mピッチ））を採用することとした。

5. まとめ

FEMによる浸透流解析を用いて、シラス地山のトンネルにおける効率的な地下水低下工法について検討した。その結果を施工に反映させ、掘削の進行の遅れを最小限に留めることができた。

今回の解析結果からは、長尺の水抜き孔によりあらかじめ前方の地下水位を低下させることで、ウェルポイントによる大きな動水勾配の発生を防ぎ、排水効率を高めることが可能であると確認された。また、今回のような透水係数が比較的高い（ $k=10^{-5}$ m/sec程度）地山を対象とした浸透流解析においては、比貯留係数の設定によって解析結果が大きく左右されるため、その設定については逆解析などによって慎重に行う必要があることも確認された。

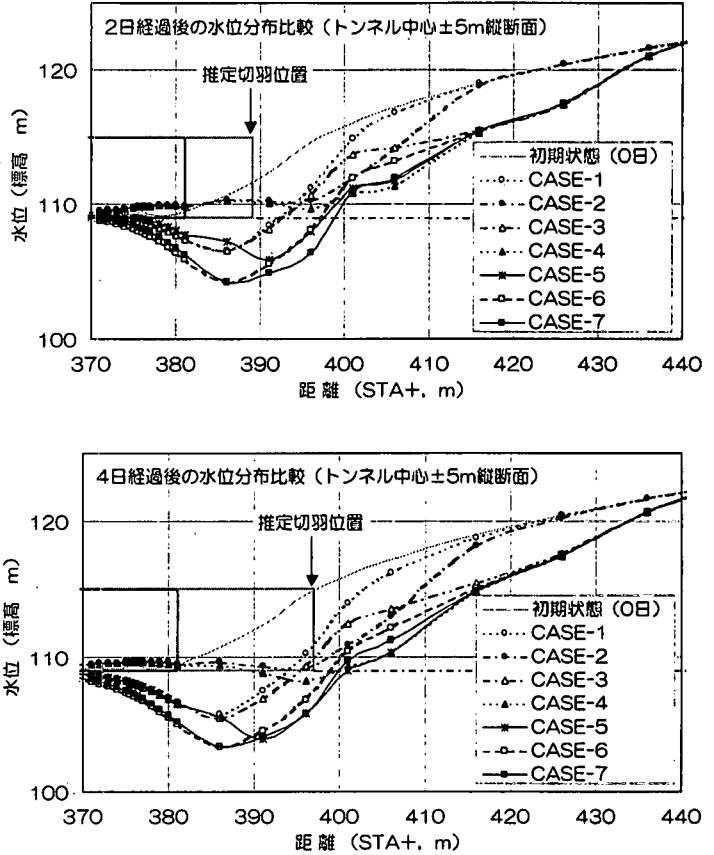


図-10 トンネル中心±5m縦断面における水位分布の一例

表- 4 ウェルポイントの配置検討に関する結果のまとめ

解析 ケース	水抜き孔の配置				水位低下状況		対策工	
	切羽WP L=10m	切羽WP L=20m	長尺W L=50m	長尺W L=25m	短期 (1,2日)	長期 (4日～)	工費 施工性	採用
case-1	10本	—	—	—	○	△	◎	
case-2	—	10本	—	—	×	×	—	
case-3	10本	—	2本	—	○	△	○	●
case-4	—	10本	2本	—	×	×	—	
case-5	6本	4本	2本	—	○	○	△	
case-6	10本	—	2本	2本 断面外	◎	○	△	
case-7	10本	—	2本	2本 断面内	◎	○	△	

参考文献

1) 例えば、板垣 治、上山秋雄：地下水位下のしらす層にトンネルを掘る、トンネルと地下、Vol.19、No.12、pp.7-14、1988
2) 地下水ハンドブック編集委員会編：地下水ハンドブック、(株)建設産業調査会、1989