

シラス地盤トンネルの設計・施工について

DESIGN AND CONSTRUCTION METHOD FOR TUNNELS ON SHIRASU

武田 幸博¹⁾・西山 智夫²⁾・藤本 孝晴³⁾・小川 逸作⁴⁾・松田 康治⁵⁾

Yukihiro TAKEDA, Tomoo NISHIYAMA, Takaharu FUJIMOTO, Isaku OGAWA and Yasuharu MATSUDA

About 20 km length of the Kyushu Shinkansen route passes through on pumice-flow deposit Shirasu area in Kagoshima prefecture. The tunnel sections which total length is about 7 km are proposed in the Shirasu under the groundwater. Since few Shirasu tunnels for railroad under the groundwater have constructed in Japan, design and construction method of the Shirasu tunnels should be developed.

This paper introduces ground improvement method with blast-furnace slag to construct permanent permeable roadbed for the Shirasu tunnels. It is expected that the Shirasu tunnels can be constructed safely and economically by using this method.

Key Word : Shirasu, Groundwater, Mud Pumping, Blast-furnace slag, Permeable roadbed

1. はじめに

九州新幹線は、博多・西鹿児島間 257km を結ぶ整備新幹線の一つである。このうち、平成3年8月に、熊本県八代市から鹿児島県鹿児島市に至る 126km が、平成10年10月には、福岡県筑後市から熊本県八代市に至る 83km が工実施計画の認可を受け、鋭意工事を進めているところである。

鹿児島県には、特殊土として全国的に有名なシラス地帯がある。九州新幹線も、このシラス地帯を通過し、約 20km の区間がシラスを対象として構造物を施工することになる。そのうち、トンネルは約 14km、19 本が計画されていて、約 7km が地下水面下を通過することとなっている。これまで、地下水面下のシラストンネルを施工した例はほとんどなく、その設計・施工法を確立するのが急務となっている。

そこで、本報告では、地下水面下のシラス地盤トンネルに生ずる可能性のある「噴泥現象」を回避するため、路盤構造にトンネル完成後も恒久的な排水機能を有し、かつ、強度も高い、水砕スラグを用いた透水性路盤を採用することとなり、種々の試験を実施し、安全かつ経済的なトンネル構造が確立できたこと、また、地下水面下のトンネル掘削補助工法として、ウェルポイントを用いた有効な地下水位低下工法を確立できたことを報告する。

2. シラスの特徴

シラスの特徴としては、含水比の増加に対して引張強度が著しく低下すること、速度を持った水の流れに対して非常に流動化しやすいことが挙げられる。シラスは、わずかに溶結組織を有しているが、火山ガラス自体では粒子間の結合を促す力を全く持っておらず、粒子間を結び付ける為の粘土鉱物も持っていないために引張り強度が小さい。また、火山ガラスは、発泡状のものであり、気泡を含んでいるため、比重が極めて小さい。シラスは、このような性質の火山ガラスを主成分とするため、水に弱いという特徴を有する。

-
- 1) 日本鉄道建設公団 九州新幹線建設局 工事第六課 補佐
 - 2) 正会員 日本鉄道建設公団 九州新幹線建設局 鹿児島鉄道建設所 副所長
 - 3) 日本鉄道建設公団 九州新幹線建設局 鹿児島鉄道建設所 担当副所長
 - 4) 正会員 日本鉄道建設公団 九州新幹線建設局 鹿児島鉄道建設所
 - 5) 日本鉄道建設公団 九州新幹線建設局 鹿児島鉄道建設所 主任

3. シラストンネルの課題

この為、地下水面下のシラストンネルに関して、従来のインバート方式では次の点が問題視された。

- ・通過列車による繰り返し荷重で発生した過剰間隙水圧により、インバート下のシラス地山が流動化し、インバート打継ぎ目等から噴泥する恐れ
 - ・完全防水構造にするために生ずる高コスト
 - ・トンネル背面をトンネル縦断方向に流れる流水による、シラス地山侵食とそれに伴う覆工背面の空洞化
- そこで、このような問題を回避するトンネル構造が検討課題となった。

また、地下水面下のシラストンネルを掘削する際には、地下水位を低下させ、切羽をドライな状態に保たなければ安全な施工が困難であるということがわかっており、最大水頭が約 20m に達するので、施工時の有効な地下水位低下工法の確立も課題となった。

4. 全く新しいトンネル構造

従来のインバートタイプトンネルの問題を回避するため、今回、地下水面下のシラス地盤トンネルに全く新しい構造を考案した。(図-1) それは、トンネル路盤部を良好な透水性と強度を有する水砕スラグ路盤で構築し、その中央に有孔管を配置することによって、トンネル周辺の地下水を集水し、トンネル外に排出する構造である。これにより、路盤部分の地下水位を常時、路盤コンクリート下面より下方に保て、噴泥の原因となる過剰間隙水圧をほとんど発生させず、経済性の問題や覆工背面の空洞化の恐れも回避することができた。

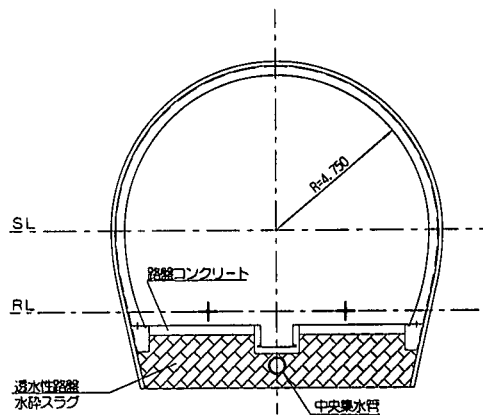


図-1 シラストンネル標準断面図

4-1. 水砕スラグについて

高炉で鉄鉱石、コークス、石灰石を溶融して鉄と分離回収した際に生じる鉄以外の成分を高炉スラグといい、銑鉄 1 t 当り 300kg 生成される。この高炉スラグを大量の圧力水によって急冷させ、粒状化させたものが水砕スラグである。

水砕スラグの粒子性状は、シラスの粒子と一部類似しており、その粒子の大半が無数の気泡を有する角張った灰黄色のガラス質粒子よりなる。シラスと異なる点は、石灰分を有するために潜在的な水硬性を発揮し、適度に水分を与え締固めた路盤は、せん断抵抗が大きいことである。一般の砂と同等の締固めを行った場合、粒子同士の噛み合いや水硬性の発現による強度増加と、粒子内気泡を通しての透水性を期待でき、砂に比べ大きな強度と透水性を確保できる特徴を有する。

ちなみに、水砕スラグの透水係数は、硬化前で、 $1 \times 10^{-1} \text{cm/s}$ 、硬化後で、 $1 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ であり、シラスの透水係数が、一般的に $1 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ であるから、水砕スラグが 1 オーダー大きい値を示す。

実際には、この水砕スラグの潜在水硬性を十分に発揮させるために、刺激剤、増強剤（主として石灰や普通ポルトランドセメント）を添加したものをを用いて施工を行う。

4-2. 透水性路盤の各種検討について

水砕スラグを用いた透水性路盤を新幹線トンネルの路盤構造として、大々的に採用するのは初めての試みであるため、路盤としての信頼性を確立するうえで種々の課題を解決する必要があった。

そこで、これらの課題を解決するため、すでに設置している「シラス地盤トンネル・路盤検討特別委員会」での審議も踏まえ、二度にわたる実寸模型路盤による振動載荷試験を主とする各種試験、それに伴う事前・事後室内試験、水砕スラグメーカーによる各種試験、さらに、トンネル坑内における試験路盤の施工を行い

次のような結論を得た。

・設計上の課題

① 水砕スラグ路盤の形状

実寸模型路盤の作成において、底面が曲面、平面、2種類の形状の施工経験から、水砕スラグ路盤の形状は、締固めなどの施工性と路盤としての耐久性等を考慮し、図-1に示すように、底面を平面とした形状とした。

② 水砕スラグ路盤の強度

当初は、事前の室内配合試験、転圧試験等をもとに、水砕スラグの圧縮強度を $q_{u14}=20\text{kgf/cm}^2$ と設定し、実寸模型路盤を作成して振動載荷試験を実施した。その結果、試験路盤に変状がほとんど認められなかった（供用10年分にあたる200万回の繰返し載荷で2mmの沈下）ため、圧縮強度 $q_{u14}=20\text{kgf/cm}^2$ として十分な耐久性が得られることが分かった。しかし、必要最低限の長期耐久強度が不明であったため、室内長期耐久性試験を実施し、その結果により、水砕スラグ路盤に作用する動的な設計荷重の5倍以上の強度（ 5kgf/cm^2 程度）を確保できれば、沈下をほとんど起こさないことが判明した。このため、この値に路盤構築時の不確定要素を加味して、水砕スラグ路盤の圧縮強度を $q_{u14}=20\text{kgf/cm}^2$ 程度と設計した。

③ 水砕スラグ路盤の透水性

実寸模型路盤試験では、 $q_{u14}=20\text{kgf/cm}^2$ 程度で、透水係数 $k=5\times 10^{-3}\text{cm/s}$ となり、中央集水管による集水効果が確認できた。また、セメント添加量や締固め度を変化させて実施した室内配合試験等では、セメント量4、6、8、10、12、14%、締固め度90、95、100%のどの組み合わせにおいても、水砕スラグ路盤の透水係数が $k\geq 2\times 10^{-3}\text{cm/s}$ を満足することを確認した。さらに、トンネル坑内での試験施工により、圧縮強度 $q_{u14}\geq 20\text{kgf/cm}^2$ の強度を有する水砕スラグ路盤で、透水係数が $k\geq 2\times 10^{-3}\text{cm/s}$ を満足することを裏付けた。また、この時、実際の排水状況により、透水性路盤が十分な排水機能を有していることを確認した。

また、水砕スラグ路盤を用いたトンネル断面をモデル化して実施した浸透流解析で、水砕スラグ路盤の透水係数を $k=2\times 10^{-3}\text{cm/s}$ 以上とすることにより、透水性路盤として十分に機能するとともに、シラスを流動化させるような限界流速を超える流速にはならないことを確認した。

さらに、別途実施した目詰り試験にて、万一、シラスが流動化しても、水砕スラグ路盤とシラス地山の境界に、難透水層を形成するような目詰りは、発生しないことを確認した。

これらの結果を踏まえ、水砕スラグ路盤の透水係数は $k=2\times 10^{-3}\text{cm/s}$ 以上と規定した。

④ 水砕スラグへのセメント添加量

室内配合試験にて、セメント添加量を4、6、8、10、12、14%とした配合の一軸圧縮強度、締固め度、透水係数の事前試験を行い、添加量8~10%で所定の強度と透水係数を満足できることを確認した。そのうえで、トンネル内試験施工を行い、セメント添加量を8%として水砕スラグ路盤を形成した結果、 $q_{u14}=20\text{kgf/cm}^2$ 以上と $k=2\times 10^{-3}\text{cm/s}$ 以上の条件をクリアした。

この結果を踏まえ、水砕スラグ路盤のセメント添加量は8%と規定した。

⑤ 排水設備

実寸模型路盤の路盤下部に中央集水管（有孔管φ450mm）を設置し、周辺の地下水位を変動させて、路盤下部の地下水位の変動を見る水位変動試験で、この集水管が十分に、路盤内の水位を低下させる効果があることを確認した。この結果より、水砕スラグ路盤の排水設備としては、路盤内部に中央集水管（有孔管φ450mm）を設置することとした。

また、構造境界部には、ダムアップ防止のため、浸透柵（ポーラスコンクリート製）を設置することとした。

・施工上の課題

⑥ 締固め方法

事前に行った転圧試験では、セメント添加量 8%、10% の材料を用い、4 t 振動ローラ（仕上り層厚 30cm）と 1 t 振動ローラ（仕上り層厚 15cm）で、各々 5 回転圧を行ったが、 $q_{0.14}=20\text{kgf/cm}^2$ 以上の十分な強度と $k=5\times 10^{-3}\text{cm/s}$ 以上の十分な透水性を確認できた。そこで、坑内試験施工で、10 t タイヤローラ（仕上り層厚 30cm）と 4 t 振動ローラ（仕上り層厚 30cm）で、各々 5 回転圧を行い、細部は、1 t 振動ローラ（仕上り層厚 15cm）で、5 回転圧を行ったところ、 $q_{0.14}=20\text{kgf/cm}^2$ 以上の十分な強度、 $k=2\times 10^{-3}\text{cm/s}$ 以上の十分な透水性、90% 程度の締固め度、 1.40g/cm^2 程度の乾燥密度、 $K_{30}=11\text{kgf/cm}^3$ 以上を確認できた。この結果を受け、水砕スラグ路盤の締固め方法は、4 t 振動ローラの振動がトンネルに与える影響も考慮し、全体的には 10 t タイヤローラにて 5 回転圧し、1 層当り厚さ 30cm で仕上げることにした。また、大型転圧機械では締固めが困難な細部については、小型振動ローラ等にて締固めることにした。

⑦ 締固め管理方法

水砕スラグ路盤作成時の締固め管理方法は、事前転圧試験、実寸模型路盤試験、トンネル内試験施工にて使用し、砂置換法との比較でも信頼性を確認した R I 法による現場密度で、締固め度 90% 時の密度を上回るように管理することとした。なお、締固め管理を行う際の下限値は 1.40g/cm^3 、上限値は透水性を損なわない値（現地試験では 1.60g/cm^3 程度でも透水性を確保できることを確認）を目安とした。

⑧ 水砕スラグ路盤の養生（養生期間）

水砕スラグ路盤作成後の養生は、トンネル内試験施工と室内配合試験の結果を踏まえ、打設後 2 週間程度とし、地下水を流動させたままの養生を行うと、刺激剤であるセメント分が流され、水硬性の早期発現が遅くなるので、ウェルポイント稼働により、水位を下げた状態で、気中にて養生することとした。

⑨ セメント添加方法・品質証明

水砕スラグへのセメント添加方法と品質証明に関しては、生コンに準じた品質管理手法が可能なことを確認出来たため、現場近傍の生コン工場等のプラントにて添加し、品質証明を提出させることにした。

⑩ 水砕スラグの材料管理

セメントと混合した水砕スラグは、空練り状態でも 4~6 時間程で硬化が始まる。このため、トンネル内試験施工の結果も踏まえ、生コンプラントでのセメント添加から、転圧完了までを 4 時間以内と規定した。そのため、敷均し・転圧 1 サイクル当り施工延長を、仕上り厚 30cm で 20m 程度とした。（図-2）

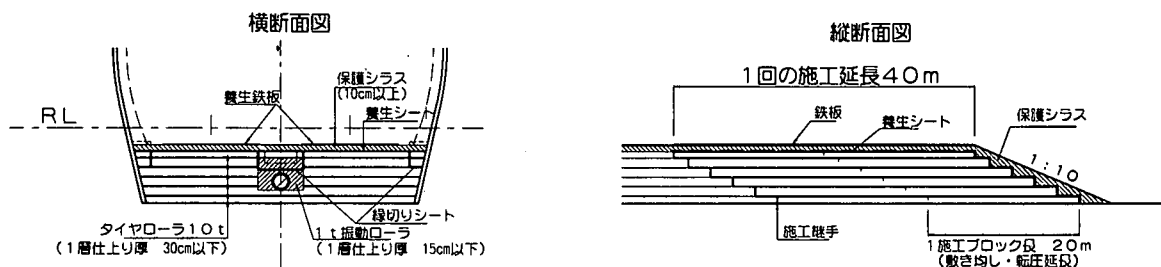


図-2 透水性路盤の標準施工図

・保守上の課題

⑪ 水砕スラグ路盤の透水性確認方法

供用中の水砕スラグ路盤は、水砕スラグの長期強度発現の影響でその透水性を低下させる恐れも考えられる。そのため、長期にわたる透水性の確認方法は、トンネル内に水位観測孔による、水位観測システムを構築する計画とした。この水位観測システムについては、施工が進んでいるトンネルを選んで、モ

デルシステムによる水位観測を実施して、そのシステムの有効性を確認する予定である。

⑫ 水砕スラグ路盤の変状への対応方法

実寸模型路盤における振動載荷試験の結果は、供用 10 年分にあたる 200 万回の繰返し載荷で最大 2mm の沈下量であったので、この結果から推計すると、路盤の最大沈下量が 6mm/100 年程度であることが分かった。したがって、所定の強度を持つ路盤であれば、供用時の沈下量がわずかであるため、通常の補修方法でメンテナンス可能であると考えている。

4-3. 透水性路盤の実施工について

上記に基づき、「シラス地盤トンネル用透水性路盤設計・施工マニュアル」を作成して、実施工を進めている。現在、約 200m 程透水性路盤の施工を完了しており、所定の強度と透水性を確保していることを確認した。また、養生期間の終了したところから、ウェルポイントを停止しているが、最下流部に設置したためまずには、順調に地下水が流れ込み、トンネル周辺の地下水位と路盤コンクリート下の水位も低位で安定した状態となっている。今後、さらに施工が進み、施工延長が長くなったときにも、このような安定した水位を保てると確信しているが、観測を続けながら、注意深く見守っていきたい。

5. 確立した地下水位低下工法

地下水位低下工法としては、シラスの透水係数が 10^{-4} cm/s オーダーと小さいため、トンネル外部からディープウェルを用いて広範囲の水位低下を図るよりも、トンネル内部から局部的に水位を低下する方法が良いと判断し、ウェルポイント工法を採用した。また、水位が高く、ウェルポイントだけでは水位低下に時間がかかる場合は、水平水抜き工を併用した。

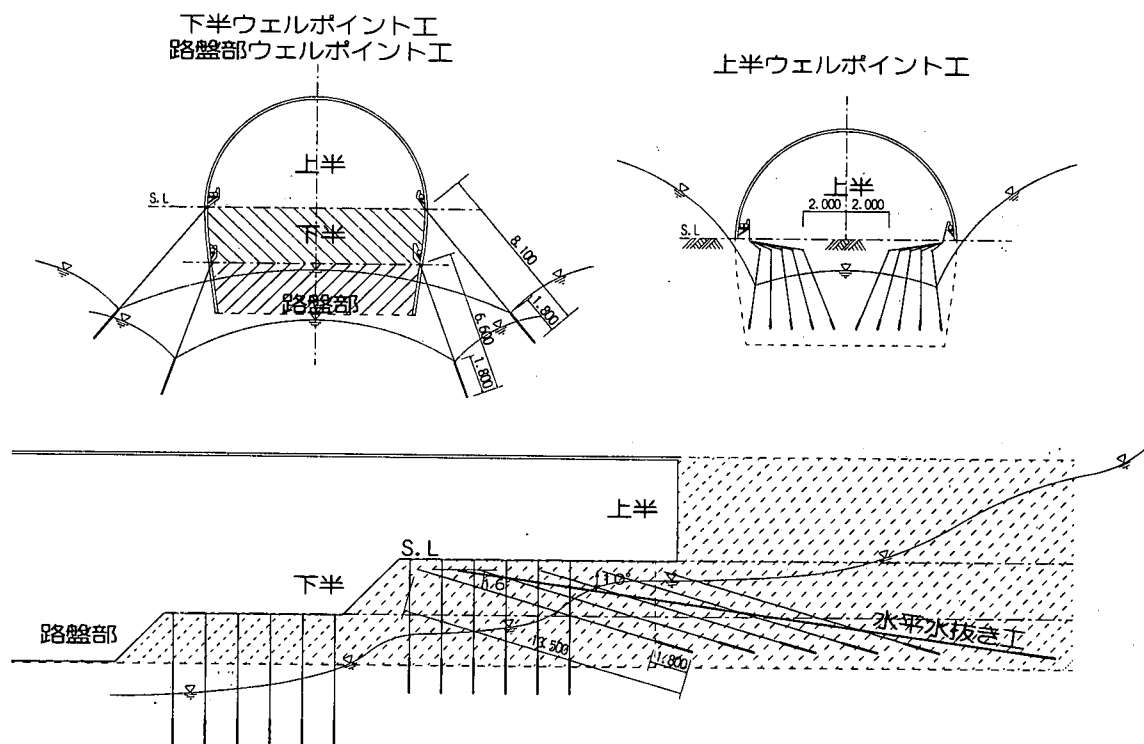


図-3 シラストンネル地下水位低下工法

5-1. 地下水位低下工法の概要

上半部の掘削は、S.Lから切羽前下方向きに、 16° の角度で、13.5mのウェルポイント（ストレーナ長1.8m）をトンネル断面内に10本打設し、切羽から10mの範囲の水位低下を図って、10m掘削し、再び、同様のウェルポイントを打設し、10mの掘削を行った。下半の掘削は、事前に上半側壁下部から、トンネル断面外下方に向け、3mピッチで長さ8.1mのウェルポイント（ストレーナ長1.8m）を打設し、掘削対象盤下まで、水位低下させ、掘削を行った。さらに路盤部の掘削は、下半と同様に下半側壁下部から、トンネル断面外下方に向け、3mピッチで長さ6.6mのウェルポイント（ストレーナ長1.8m）を打設し、掘削対象盤下まで、水位低下させて、掘削を行った。さらに、水頭の高い部分の掘削については、水位低下時間の短縮を図るため、上半掘削前に、トンネル断面外に切羽前方に向けて50mの水平水抜き工2本を打設し、トンネルクラウン付近まであらかじめ水位低下させる工法を取った。

5-2. 地下水位低下工法の施工結果について

上記の仕様は、実施工による試行錯誤の結果たどり着いたパターンで、図-3に示すようにトンネル内の水位を各施工段階に応じて、適切に低下させることを目論んだもので、トンネル掘削の待ち時間が少なく、システムチックで、無駄の無い工法が確立できたと考えている。トンネル坑内とトンネル坑外に設置した水位観測孔による水位観測の結果、上半ウェルポイント、下半ウェルポイント、路盤部ウェルポイント、水平水抜き工が、それぞれの機能を十分に発揮していることも確認している。

6. 全体施工順序

ウェルポイントを補助工法として用いた、トンネル施工の全体施工順序を図-4に示す。

7. まとめ

地下水面下のシラス地盤トンネルという、ほとんど施工例のない未知の世界に、透水性路盤という、これもまた未知の構造を用いて、問題解決を図った今回の構造は、土木という経験や実績に依存しがちの分野で、特筆すべき成果であると自負している。また、この構造が、他の類似した地盤条件の施工や他機関の設計・施工の参考となれば幸いである。今回の透水性路盤の適用区間は約6kmに及ぶが、今後、その全区間で、所定の品質の構造物が施工されるための努力を続けていきたいと考えている。最後に、本構造について、委員会でご審議いただいた委員並びに幹事の方々と、その関係者・協力者の方々に敬意を表し、本報告を結ぶ。

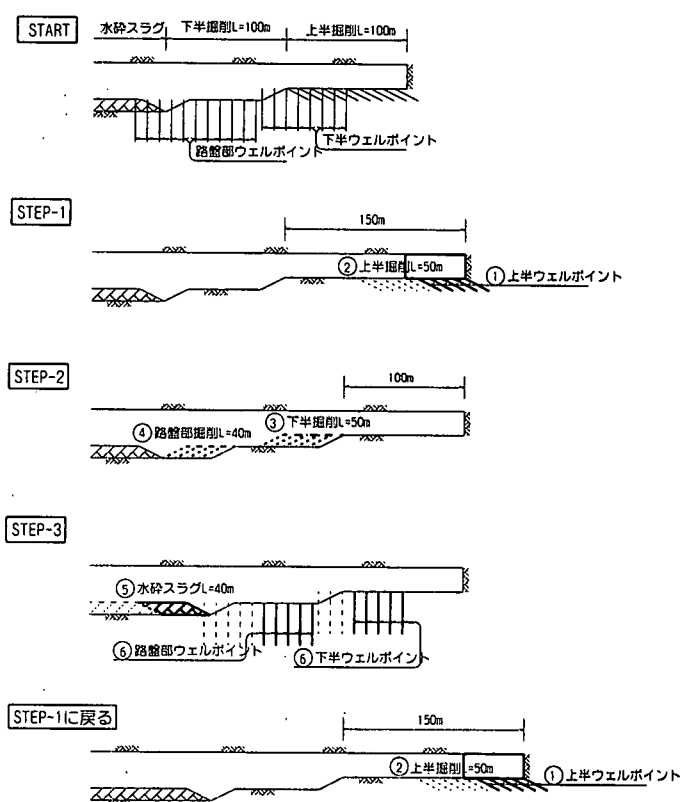


図-4 シラストーンネル施工全体フロー図