

しらす台地の地下水位下に貫通した「鹿屋分水路トンネル」

Excavation of Diversion Tunnel below Ground Water Table in
a Pumice Flow (SHIRASU) Plateau

林 重 徳 (はやし しげのり)

九州大学助教授 工学部

亀 江 幸 二 (かめい こうじ)

建設省大隅工事事務所 所長

山 内 豊 聡 (やまのうち とよとし)

九州産業大学教授 工学部

松 雪 清 人 (まつゆき きよと)

基礎地盤コンサルタンツ(株)

1. ま え が き

建設省大隅工事事務所によって、昭和61年6月より本格的なトンネル掘削工事に着工されて以来、鋭意建設が進められていた「鹿屋分水路トンネル」が、平成2年2月28日、無事に貫通式を迎えた。

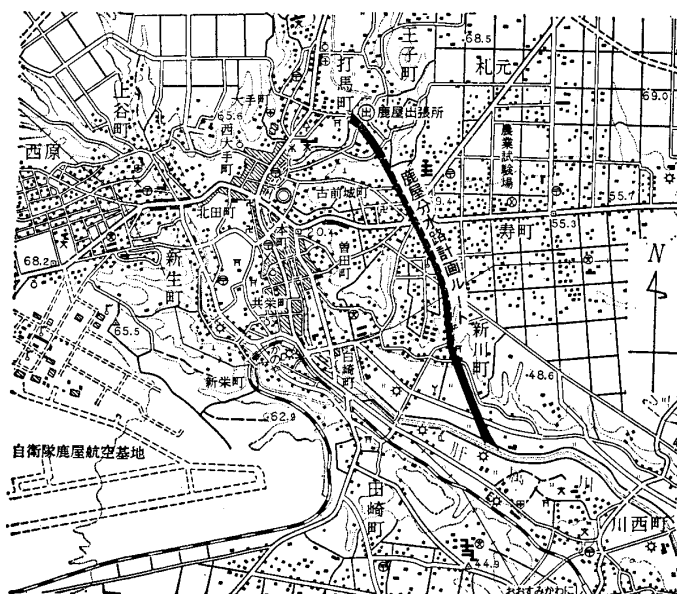
本トンネルは、主に水に弱いがゆえに特殊土の1つ(Problematic Soil)に挙げられる“しらす”台地において、恐らく世界でも初めて地下水位以下に掘削された本格的なトンネルである。以下にその目的、概要、特徴と意義とともに、本トンネル工事に関連して実施された調査研究成果の要約、設計および工事経過の概要を紹介する。

2. 「鹿屋分水路」の目的と概要

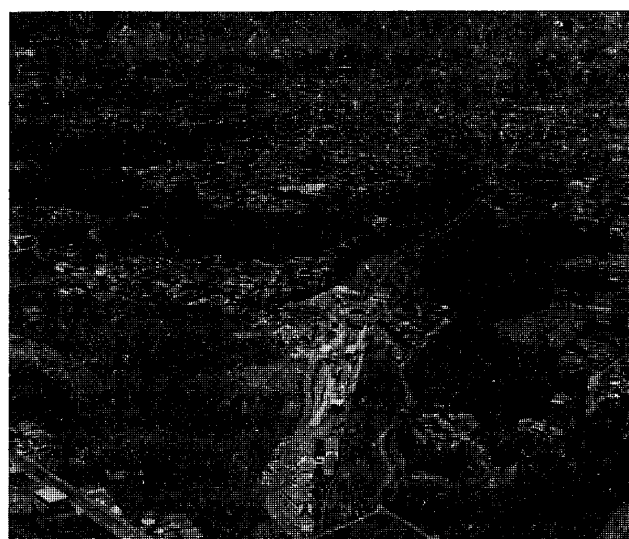
2.1 位置と目的

鹿屋市の市街地を貫流する^{きもつき}肝属川は、昭和30年以降でも6回の氾濫を繰り返してきた。特に、昭和51年6月には394mmの豪雨で護岸が決壊し、家屋流失を含む甚大な被害をもたらした。しかし、図一1に示されるように、しらす台地に挟まれた同市中心街での河道の拡幅は事実上不可能であり、河川改修によっても現在の流下能力 $120\text{ m}^3/\text{s}$ を、 $200\text{ m}^3/\text{s}$ にアップするのが限界である。一方、500mmの豪雨時に予想される肝属川の最大流量は $400\text{ m}^3/\text{s}$ とされており、「鹿屋分水路」は、この差分 $200\text{ m}^3/\text{s}$ を流下させるために計画されたものである。鹿屋分水路の総延長は2639mで、内1609mの部分が、標高50～60mのしらす台地(笠野原台地)を貫通する勾配1/450のトンネルである。

また、台地上は、写真一1に見られるように道路



図一1 鹿屋市街地と肝属川および分水路計画ルート
平面図



写真一1 下流側から見た笠野原台地と分水路の計画
ルート

網の発達とともに、学校や住宅など多くの建築物が立ち並び、既に市街化が進行している。

報告—2049

鹿屋分水路の総工事費は約 140 億円が見込まれており、平成 5 年度に完成の予定である。

2.2 地質とトンネルの概要

笠野原台地の地質構成は、図—2 に模式図として示されるように、先第三紀層を基盤とし、新生代第四紀の火山噴出物が主に分布している。火山噴出物としては、溶結凝灰岩質の阿多軽石流と始良^{あいら}火山の噴出物と考えられる大隅降下軽石層（ぼら層）および大隅降下軽石流（一次しらす）が主体をなし、地表部を新期火山灰質ローム層が覆っている。

しらす層は、直径 30～50 mm の軽石礫を含んだ火山灰質砂よりなり、30m 以上の層厚で台地の主体を構成する。一次しらすの N 値は 30～45 程度を示すが、一部には 15～20 前後の緩い領域が在る。この一次しらすの下位に分布し、通称ぼら層と呼ばれる降下軽石層は、直径 2～50 mm の軽石礫の集合体であるが、層厚 3～10m 程度で非常に複雑な起伏を呈している。また、このぼら層は間隙が大きく、水道であるとともに豊富な滞水層を成しており、台地縁部では自然湧水している箇所が多く見られる。

トンネルは、図—3 の地質縦断に見られるように一次しらす層中に計画されているが、直径が約 10m（断面積約 90 m²）と大きい台地の土かぶり厚い所でも 40m 以下、大部分は 25～30m 程度しかない。また、呑口部および吐口部の一部区間では笠野

原台地の豊富な地下水の源であるぼら層に接近した線形となる。台地の地下水位は高く、トンネル全長にわたってほぼトンネル冠部と一致する。

3. 本トンネル工事の特徴と意義

しらすが流水に対して極端に弱いことは古くから知られており、また、“水”さえなければ、しらすほど掘削・土工のやりやすい土もない。このため道路トンネルや鉄道トンネル等これまで建設された“しらすトンネル”のほとんどは、縦断および平面線形を工夫し、地下水位より上に建設されている。

しかし、分水路の宿命として呑口と吐口の標高が決まると縦断形状が確定し、台地の地下水位を避けることはできない。かくして、地下水位下のしらすに建設される本格的なトンネル工事としては、世界でも初めての挑戦となった。

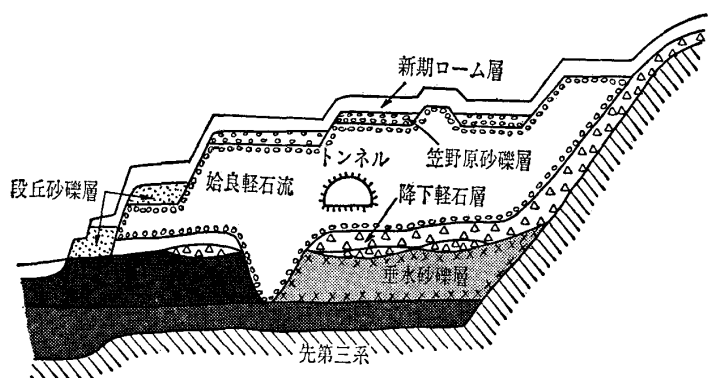
また、無限の地下水を供給する水道でもある「ぼら層」が絡んで問題を一層複雑・困難なものにしている。加えて、上述のような台地上の状況を考えると、絶対に失敗の許されない工事であった。

建設省河川局サイドでは、既に昭和 48 年頃から調査に入っていたが、以来次に述べるように様々な調査・研究が実施され、本工事そのものが“試験施工”とさえいわれるトンネル掘削工事が進められてきた。この間、貴重な成果と得難い経験が積み重ねられており、この「鹿屋分水路工事」は、土質工学の立場から見ても、世界的・歴史的意義があるといっても過言ではない。

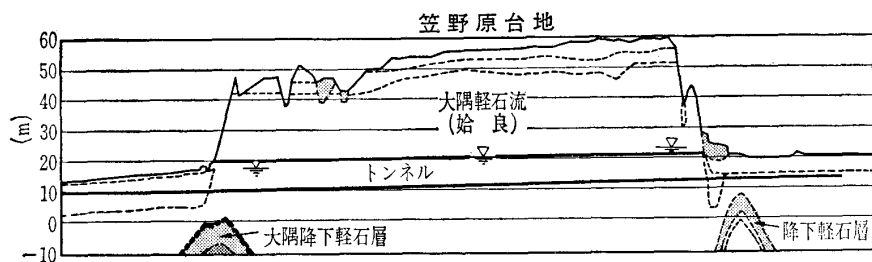
4. 調査・研究の概要

4.1 工法検討委員会

当初より未知の問題が多く、難工事となることが予想されたため、分水路計画が具体化した昭和 54 年 2 月には、山内豊聡九州大学工学部教授（当時、現九州産業大学教授・理事）を委員長とする有識者による「鹿屋分水路工法検討委員会」が設置された。以来、地下水位下のしらす台地にトンネルを掘削する際の問題点の抽出・整理から、調査および解析結果の検討と追加の調査・研究、ルートと工法の検討および管理計測と基準の作成、さらに、実際



図—2 笠野原台地の地質概要



図—3 分水路の地質縦断図

の本格掘削工事に入ってから、観測結果の検討、対策工法の確認・検討等が繰り返されてきた。今日まで合計18回にのぼる「委員会」と、ワーキンググループによる7回の「検討会」が開かれている。

4.2 調査・研究成果の要約

調査のために掘削されたボーリング延長は、約5500mにも達しており、試掘坑調査や現場透水試験・薬液注入試験とともに、まず不攪乱試料による「しらす」および「ぼら層」の各種室内土質試験が実施された。また、しらすの侵食機構と特性を解明するための「限界流速試験」ならびに「限界動水勾配試験」、更には、ぼら層とトンネルとの距離の影響を解明するためのFEM解析と模型浸透実験等が実施された。無論、水路模型実験や環境・地下水調査等が行われたことはいうまでもない。以下に調査・研究における特徴的な成果の概要を述べる。

1) 試掘坑工事の結果

地下水対策についての知見と問題点を探るため、昭和53～54年にかけて小断面（断面積約10m²）のトンネルで試験工事が実施された。その成果をまとめると次のとおりである。

- ① トンネルがぼら層に遭遇した場合、多量の湧水のため掘進が不可能となるだけでなく、止水も極めて困難である。
- ② 釜場排水等の重力排水工法では、しらす層中の地下水位は低下し難く、切羽崩壊や支保工の沈下を生じやすい。
- ③ ディープウェル工法は、広範囲な水位低下が困難なため、数多く設置する必要があり効率が悪い。
- ④ 切り羽斜め前方に打設したウェルポイントが、しらす層中の地下水位低下に非常に有効である。
- ⑤ 薬液注入工法は、懸濁型と溶液型の混合注入が比較的有効であるが、注入率が70%にも達し、工費および工期の点で問題がある。
- ⑥ 地下水位は路床面よりある程度（約1.0m）以上低下させておかないと、ダンプ等の走行によりスポンジ現象が発生する。

2) しらすの侵食特性

昭和53年には既に、大型電子計算機の出現・普及と有限要素法など解析技術の発達によって、定常浸透流に限らず非定常な場合も、実際の複雑な地盤状

態に即して、極めて高い精度で地下水浸透流の数値解析が可能となっていた。しかし、解析結果より、パイピングやボイリングなど地盤の浸透崩壊の危険度を予知・判定する基準となる「土粒子の限界流速」および「地盤の限界動水勾配」に関する研究は、当時ほとんど見当たらず、限界流速についてはJustin（ジャスティン）の理論値¹⁾、久保田・田中の実験結果およびKoslova（コスロバ）の結果²⁾が、また限界動水勾配についてはTerzaghi（テルツァーギ）の理論式が、知られている程度であった^{3)~5)}。まして、しらすについては、侵食現象それ自体は古くから知られていたが、問題が複雑で土質力学的な学理上の解析が困難なため、そのメカニズムは未解明であり、しらすの抱えている課題の中でも最も研究の遅れている分野であると言われていた。

このような状況の中で、「工法検討委員会」からの課題として、しらすの侵食特性を解明するための一連の実験的および解析的研究が、九州大学工学部土質工学研究室において実施された。その詳細については、文献7)～10)を参照いただきたい。

まず、土粒子の限界流速については、試験器具と方法さえ明示されたものがなかったため、粉体力学における流動層の理論と試験装置⁶⁾を参考にして、考案・製作されたのが、図-4に示される限界流速（流動化）試験装置である。その後、同様な試験装置を用いた実験が、(株)間組技術研究所¹¹⁾や建設省土木研究所¹²⁾等においても実施され、土粒子と限界流速の関係に関する研究が大きく進展した^{13), 14)}。図-5にそれらの成果を取りまとめた。

3) 浸透流模型実験と数値解析

地下水浸透流問題の中で、特にぼら層の影響と対策を検討するために、一連の浸透流模型実験とFEMによる数値解析を実施した。この結果、乱したしらすの場合、接するぼら層等に発生する見掛けの最大流速 $v_{\max}$ が $3\sim6\times10^{-3}$ cm/s（実流速 $v_{p\max}\div6\sim10\times10^{-3}$ cm/s）を越すと、内部侵食が始まり、時間とともに進行する事が明らかになった。

更に、トンネルルート付近の地山しらすの侵食特性を検討するため、特殊な三重管タイプの大孔径サンプラー（試料径 $\phi 200$ mm）で採取した供試体についての室内浸透実験を行った結果、同程度の平均流速において、噴気孔痕と思われる部分にピンホー

表-2 計測工

計測項目	計測間隔	配 置
坑内観察調査	掘削日ごと	—
天端側壁沈下測定	12.5~25m	—
計測	12.5~25m	側壁導坑……………1 測線 上半断面 No. 31~No. 50 } 3 測線 No. 91~No. 93+12.5 } その他……………1 測線
A 地表沈下測定	(No. 31~No. 36, No. 44~No. 50) 縦断 12.5~25m 横断 5m (その他の区間) 縦断 50~125m	1断面当たり8箇所(No. 32) " 8 " (No. 36) " 13 " (No. 45) " 13 " (No. 46+12.5) " 12 " (No. 48+20) " 17 " (No. 64+15)
計測 地中変位測定(坑内)	—	1断面当たり4本
地中変位測定(坑外)	—	1断面当たり1本
測 覆工応力測定	—	1断面当たり5箇所
B 管内傾斜計(坑外)	—	急傾斜崩壊危険斜面連続地中壁内部
地山試料試験	各岩質区分ごと	—

6にトンネルの標準断面およびウェルポイントの配置パターンを、また表-1にはパターン別の支保工基準を示す。

さらに表-2は、この工法によるトンネル施工において、解析結果に基づいて検討・策定された計測管理工である。

なおまた、土かぶりの薄い上流坑口部約30m間では、パイプルーフ工法が補助工法として採用されている。

5.2 しらすの内部侵食崩壊事例

一方、トンネルの本工事に先立ち、トンネル吐口部を横断する道路橋(新川4号橋)の橋台建設と水

路工事を兼ねて掘削中の現場で、昭和60年1月6日突然、付近の民家の庭先に直径約10mの陥没孔が出現した。徹底した原因究明のための調査・解析と検討が行われた結果、矢板沿いからぼら層に発生した水流が、しらすの限界流速を越え内部侵食・パイピング現象を発生したものであった。

この「新川4号橋周辺の陥没事故」は、流れを持った地下水下にあるしらすの恐さをまざまざと示したものであるが、同時に得難いデータと貴重な教訓を残したもので、まさに『天の啓示』であった。この事故と対策の詳細については、文献15), 16)を参照いただきたい。

5.3 トンネル吐口部のぼら層対策

この事故の教訓とデータを基に、特に、ぼら層の近接する下流坑口部約170mの区間では、更に慎重

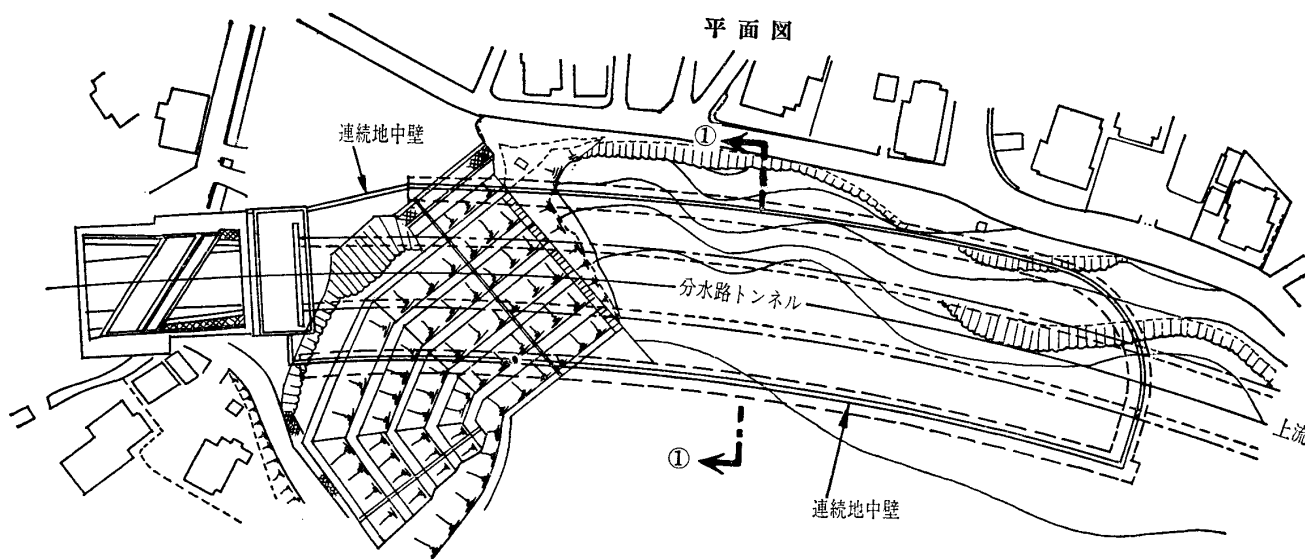
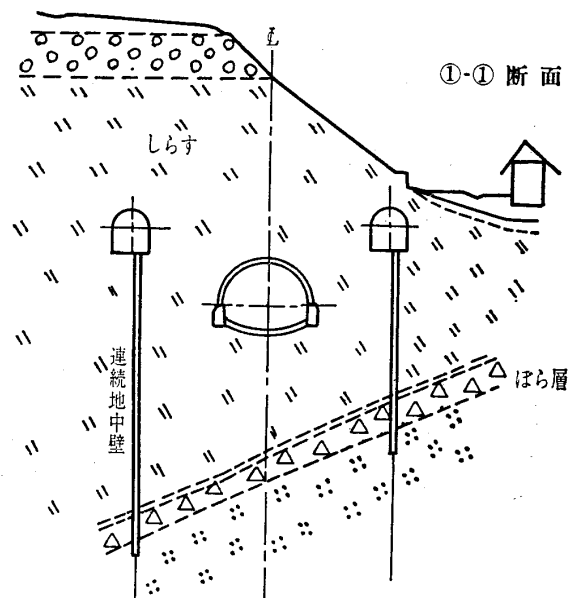


図-7 トンネル吐口部のぼら層対策

報告-2049

な調査と解析・各種工法の比較検討が加えられ、図-7に示すようにBW工法による連続地中壁でぼら層を囲い込む工法が採用された。

6. むすびにかえて

トンネル部の導坑は貫通したが、ぼら層が接近しかつ玉石まじりの河床砂礫層の分布する上流部の開水路と分流堰の難工事が残されており、まだ気を緩められる状態ではない。

次の世代に、災害のない鹿屋の街を引き継ぐための「分水路トンネル」の貫通した今年、我が国の提案による「国際防災の十年(IDNDR)」がスタートする年でもある。この世紀の難工事が是非無事に完成し、多くの貴重な資料と経験が蓄積されることを祈念する。

参 考 文 献

- 1) J.D. Justin: The Design of Earth Dams, Trans., ASCE, Vol. 81, pp. 49~53, 1924.
- 2) 土質工学会編：土質工学ハンドブック，技報堂，pp. 93~94, 1965.
- 3) 志村孝吉：粗粒土における限界動水勾配について，電力中央研究所技術第二研究所報告，71002，pp. 3~22, 1971.
- 4) 志村孝吉：粘性土における浸透侵食に関する実験的検討，電力中央研究所土木技術研究所報告，377027，pp. 43~52, 1978.
- 5) 林 正夫：フィルダムの着岩部の安定性向上に関する考察，第10回ダム技術講演討論会テキスト，pp. 4~10, 1978.
- 6) 白井 隆：流動層，科学技術社，pp. 68~81, 1977.
- 7) 林 重徳・山内豊聡・緒方健治・東 光久：しらすの侵食特性について，第15回土質工学研究発表会講演概要，pp. 1153~1156, 1980.
- 8) T. Yamanouchi, S. Hayashi and M. Toshida: Influence of Underground Water Seepage on the Tunnel Excavation in a Pumice Flow Plateau, Proc., Int. Symp. on Weak Rock, Tokyo, pp. 1051~1056, 1981.
- 9) 林 重徳・山内豊聡：しらすの限界流速と地山の浸透崩壊問題への適用，日本応用地質学会昭和59年度研究発表会，pp. 140~143, 1984.
- 10) 林 重徳・斉藤芳徳・松雪清人：乱さない一次しらすの浸透崩壊特性，第20回土質工学研究発表会講演概要集，pp. 1489~1490, 1985.
- 11) 大野睦雄・山崎 弥・T. フィォアン：砂のパイピング特性に関する実験的研究，間組研究年報，pp. 27~35, 1981.
- 12) 吉岡 淳・久楽勝行・佐藤正博：水平方向の浸透流によるパイピング現象について，土木学会第39回年次学術講演会講演概要集，III-345，pp. 707~708, 1984.
- 13) 中島秀雄・長瀬道夫・飯島 豊：X線写真を利用したパイピング現象の観察，第20回土質工学研究発表会講演集，pp. 1479~1482, 1985.
- 14) 中島秀雄・長瀬道夫・飯島 豊：X線写真を用いた土の浸透崩壊実験とその考察，応用地質年報，No. 9，pp. 1479~1482, 1987.
- 15) T. Yamanouchi, Y. Saito and K. Matsuyuki: Tunneling in Water-Bearing SHIRASU Plateau, Proc., EARC on SMFE, pp. 258~261, 1987.
- 16) 露木利貞・吉田三郎・羽田忠彦・松雪清人：しらす地盤地帯における地下水下のトンネル工事，土と基礎，Vol. 36, No. 3, pp. 43~48, 1988.

(原稿受理 1990.6.11)