

インドネシア国の火山灰地帯のトンネル掘削

西脇 芳文¹・鹿子木 唯夫²・釣哲郎³・成田伸哉⁴・吉田 好男^{5*}

¹東電設計株式会社 代表取締役社長 (〒110-0015 東京都台東区東上野3-3-3)

²東電設計株式会社 パハーンセランゴール導水建設事務所長 (〒110-0015 東京都台東区東上野3-3-3)

³東電設計株式会社 海外事業本部 海外水力部(〒110-0015 東京都台東区東上野3-3-3)

⁴東電設計株式会社 海外事業本部 海外水力部(〒110-0015 東京都台東区東上野3-3-3)

⁵東電設計株式会社 海外事業本部 海外総括部長(〒110-0015 東京都台東区東上野3-3-3)

*E-mail: byyosida@tepsco.co.jp

インドネシア、シパンシハポラス水力発電所は、1988年2月にフィージビリティ調査(F/S)が開始され、2004年11月に第一発電所33MWおよび第二発電所17MWの合計50MWの商業運転が開始されている。

今回は、この第一発電所導水路で遭遇した第四紀火山灰層の状況と検討した対策について概略を報告する。第一発電所導水路は延長1,500mの圧力トンネルで、トンネル沿いの地質は、フィージビリティ調査および詳細設計段階調査で概ね把握されていたが、このうち弾性探査による2km/sec以下の低速度帯が、トンネルほぼ中間に位置するAdit 1作業横坑より下流、水圧鉄管側出口まで約400m区間にわたって分布しており、この低速度帯がほぼ第四紀火山灰層に対応していた。

工事開始後、建設用道路の掘削に伴い、第四紀火山灰が含水比によっては流動化することが明らかになり、トンネルの掘進時には慎重な対応が要求された。実際のトンネル掘削時には、トンネル後半部で花崗岩を掘削中、発破火薬の装填孔から火山灰層の流出が確認されたため、トンネル切羽から水平ボーリングにより切羽前方の状況を確認したところ、大量の流動性火山灰がボーリング孔からトンネル坑内に流出し、以後の掘進作業が不可能となった。この火山灰の流動箇所を回避するため、地上からの垂直ボーリングおよびトンネル内からの水平ボーリングにより地下水構造を明らかにし、導水路線形を地下水位の低い河側へ変更することにより、成功裏にトンネル掘削を完了した。

Key Words : Hydropower, Tunnel, Volcanic Ash

1. 経緯

前年度のインドネシア国・シパンシハポラス水力発電所建設工事の概要紹介に引き続き、今回は第一発電所導水路において遭遇した火山灰層下の掘削について地質データとともに概説する。

建設工事の着工前におけるプロジェクト地域周辺の主要な地質については、1988-1990年Feasibility Study(以下F/S)および1993-1995年Engineering Study(以下ES)でボーリング、物理探査等が実施されており、弱層の存在区間が概ね明らかとなっていた。実際のトンネル掘削時には特にF/Sで実施した第一発電所導水路トンネル沿いの弾性波探査が地下の構造をよく把握していたことを確認した。

2. プロジェクト概要

(1) 建設位置

本プロジェクトは、インドネシア国スマトラ島北部北スマトラ州の主要都市メダンから南南西約 350km、建設工事のベースとなったシボルガの町からは東に 10km、

観光地で有名なトバ湖の南部 50km 付近に位置している(図-1)。本プロジェクトで問題となった火山灰は約7万5千年前に噴火したトバ火山の噴出物で、噴出後の火山湖(カルデラ)が現在のトバ湖となっている。

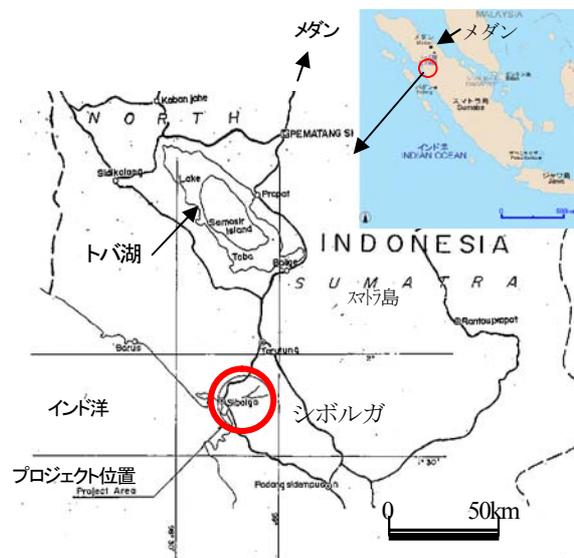


図-1 プロジェクト位置図

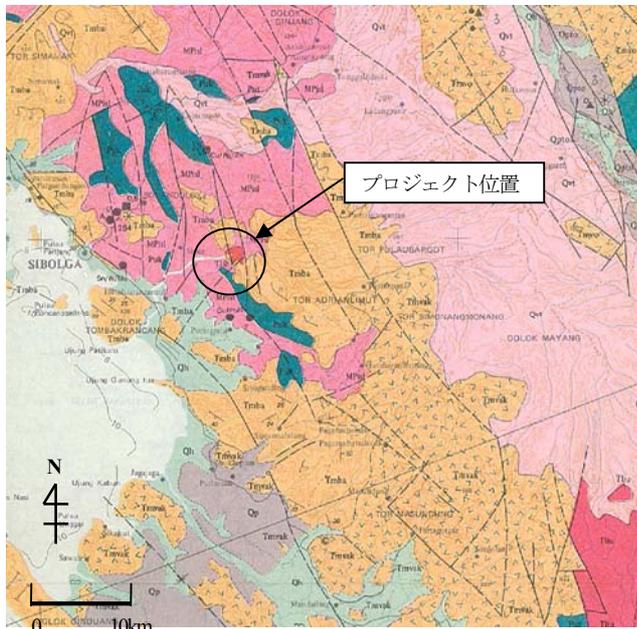
(2) 地域地質概要

既刊地質図(20 万分の 1 縮尺)によるサイト周辺の地質分布を図-2 に、層序を表-1 に示す. 本プロジェクトの位置するシパンシハポラス河流域の地質は、先第三紀、ペルム紀～石炭紀の主に珪質泥岩からなるクルエット累層と、これを貫入したシボルガ花崗岩複合岩体を基盤とし、これを覆う第三紀のバルス層および第四紀の火山岩類からなる。サイト周辺では局部的に、ハポラス花崗岩類が古第三紀層を貫入している。このハポラス花崗岩類はサイト周辺のみ偏在し、周辺では見られない。

第三紀堆積岩類は、砂泥互層からなる海成堆積のバルス層と安山岩質火山岩類からなるアンコラ層が分布し、ハポラス花崗岩類および先第三紀堆積岩を不整合に覆う。

第四紀堆積層は、主にトバ火山灰層と現世の堆積物からなり、ほとんどの地域で火山灰層が基盤岩類を覆っている。トバ火山灰層は約 7 万 5 千年前に、本プロジェクト地域の北部に位置するトバ火山から噴出したもので、火山灰の噴出量としては有史以来世界有数の量を噴出している。主に流紋岩質の溶結凝灰岩と未固結～半固結の火山灰層および砂質凝灰岩層からなる。現世の堆積物は、海岸、河岸および段丘からなる沖積堆積物である。

図-2 に示すサイト周辺の地質図では、淡いオレンジ色が第三紀堆積岩類、濃いピンクがシボルガ複合岩体、淡いピンクがトバ火山灰層で、既刊地質図上ではサイト周辺には火山灰層は分布していない。



凡例

Qh	海岸、河川堆積物	Tmba	バルス層
Qp	第四紀沖積層	Puk	クルエット累層
Qvt	第四紀トバ火山灰層	Tlih	ハポラス花崗岩類
Tmvak	アンコラ火山岩層	Mpsil	シボルガ花崗岩複合岩体

図-2 プロジェクトサイト周辺地質図

(1:250,000, The Geology of the Padangsidempuan and Sibolga, 1982)

表-1 地質層序表

記号	地質時代	地質		
		地層名(現場記号)	岩種	
新生代				
Qh Qp	第四紀	完新世	河床堆積物(Rd) 沖積堆積物(Ad)、 崖錐堆積物(Td)	礫、砂、シルト シルト、砂 礫、砂、シルト
Qvt (Ry, Tf, Wt)		更新世	トバ火山灰層 (0.075Ma), (Qv, Ry, Wt, Tf)	火山灰主体、一部 は流紋岩、溶結凝 灰岩、凝灰岩
Tmba, Ss Tmvak Cg Tlih	第三紀	中期中新世	Barus 層砂岩(Ss/Tmba) Angkola 火山岩層 (Tmvak)	シルト岩、砂岩 安山岩、集塊岩、 玄武岩
		初期中新世	Barus 層礫岩(Cg/Tmba)	礫岩
	始新世	Haporas 花崗岩類(Gd)	花崗斑岩・閃緑岩	
中生代層なし				
Puk Mpsil	古生代	ペルム紀	Kluet 類層(Ms)	変成堆積岩 (珪質泥岩)
		下部石炭紀～ 初期ペルム紀	Sibolga 複合岩体(Gr)	花崗岩、 花崗閃緑岩

(The Geology of the Padangsidempuan and Sibolga, 1982 に一部加筆)

(3) 第一発電所導水路の位置

第一発電所の構造物は、図-3 に示すように、調整ダム、導水路トンネル、調圧水槽（サージタンク）、水圧鉄管路および発電所から構成され、シハポラス川の左岸尾根沿いに位置している。

ここで報告する第一発電所導水路は、最上流部の調整ダムと第一発電所を結ぶ圧力式トンネル導水路である。

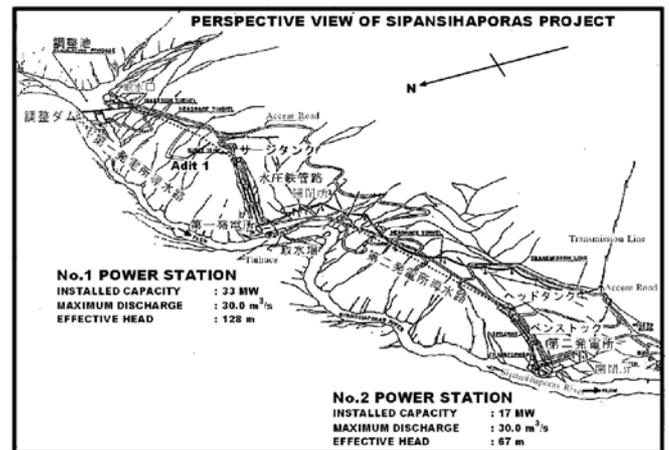


図-3 プロジェクトサイト鳥瞰図

3. 第一発電所導水路の課題と対策

(1) 概要と地質

a) プロジェクトサイトの地質

プロジェクトサイトの地質分布を図-4 に示す。サイトの概略地質は、概ね以下のようになる。

- ・ 第一発電所取水地点はシボルガ複合岩体の花崗岩類および第三紀堆積岩の主に礫岩、
- ・ 取水地点～導水路上流側は主に砂岩・泥岩からなる第三紀堆積岩類、
- ・ 導水路下流側～発電所間は火山灰を主体とする

第四紀火山岩類,

- 第二発電所取水地点～第二水路上流半部は第三紀のハポラス花崗岩類の花崗斑岩,
- 第二水路下流側～第二発電所間は古期のシボルガ複合岩体の優白質花崗岩と発電所周辺ではクルエット累層の珪質泥岩を基盤とする。

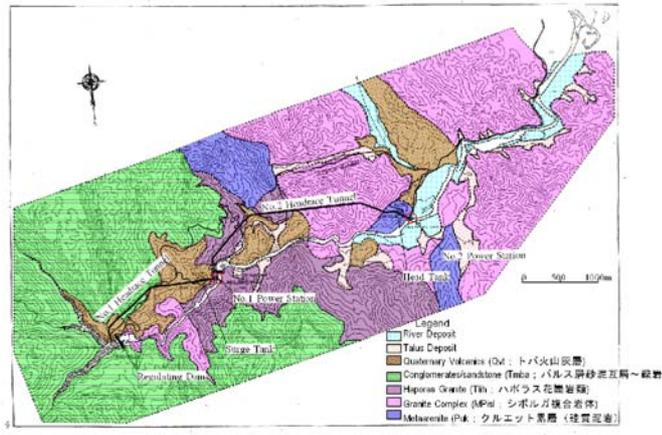


図-4 プロジェクトサイト地質平面図

b) 第一発電所導水路沿いの地質

F/Sにおいて実施された第一発電所導水路沿いの弾性波速度の分布と、実際の岩盤状況を対比するために、トンネル切り羽での観察における Barton(1974)の節理状況に着目した岩盤評価法 Q システムによる Q 値を図-5 に示す。この図のトンネル標高における弾性波速度の分布は、概ね以下のように、弾性波速度の区分が岩種の違いを反映している (Chは取水地点をゼロとしたトンネル沿いの追加距離、色は図-5の弾性波速度区分に対応)。

- Ch.0～464m；第三紀堆積岩類，3km/sec，緑色，
- Ch.464～1168m；花崗閃緑岩，4km/sec，青色，
- Ch.1168～1214m；花崗岩，3km/sec，緑色，
- Ch.1214～1584m；第四紀火山岩類，1～2km/sec，黄および赤色。

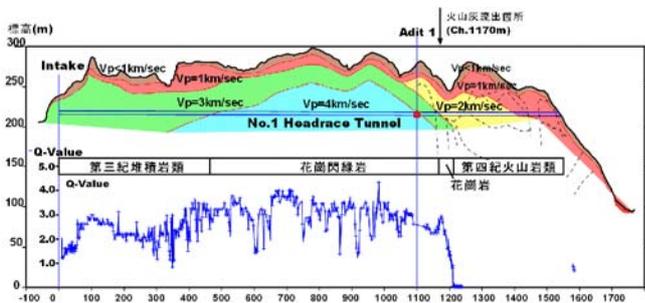


図-5 第一発電所導水路の弾性波速度、地質およびQ値

b) 第一発電所導水路下流の火山灰分布状況

Ch.1100mのAdit 1作業横坑より下流側の水平方向に拡

大した弾性波速度分布と掘削時の Q 値を図-6に、同区間における実施したボーリングとトンネル坑内の地質観察による地質断面を図-7に示す。この断面は変更後のルート沿いにとっているため、図-6とは若干ずれが生じる。

図-5 および図-6 に示す弾性波探査の結果から、水路後半部はかなり弾性波速度の低い(1～2km/sec)地質区間を通過することが判明しており、これらが第四紀火山灰および未固結の凝灰岩層に対応することが予想された。

プロジェクトサイト周辺に分布する火山灰層は地表では含水比によっては流動化することがアクセス道路の掘削時に確認されており、特にこの低速度帯の区間のトンネル掘削に際しては慎重な対応が要求された。

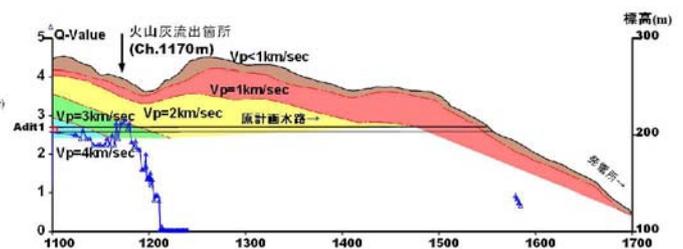


図-6 第一発電所導水路 Adit 1～発電所間の弾性波速度およびQ値 (Adit 1, Ch. 1100mより下流)

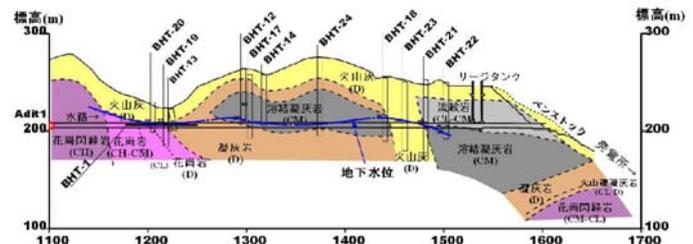


図-7 第一発電所導水路 Adit 1～発電所間の地質縦断面図 (代替ルート案 Case 1 沿い)

Adit 1 作業横坑から下流 70m 付近(Ch.1170m)において、切羽から発破火薬装填用の掘削孔を掘削したところ、液状の火山灰が大量に流出したため、一時掘削作業を中断し、火山灰層の通過対策の検討に入った。前方確認のため、切羽から水平長尺ボーリング(BHT-1)を行ったところ、5mの深度から岩盤は消失し、大量の流動性火山灰が流出し、孔口をウェス(布きれ)にて閉塞するまで流出は止まらなかった(写真-1, 2)。このボーリングでは水平距離で L=75m を掘削したが、坑底においても岩盤に到達しておらず、広範囲な火山灰層の分布が予想された。

図-7に見られるとおり、この境界位置は弾性波探査結果では 3km/sec の速度帯から 2km/sec の速度帯への境界付近にほぼ相当しており、弾性波探査の有効性が改めて確認された。

c) 火山灰層通過対策の検討

流動化した火山灰層を掘削するために、線形変更の検討と併行して、地盤改良の検討を行った。大口径ウェルによる地下水水位低下工法、LW 或いはウレタン等による薬注工法を検討したが、いずれも火山性地盤では効率性、施工性、コストの面から採用には至らなかった。将来の地質安定性、工程、施工信頼性、経済性の面から地質がより安定しているルートへの変更を検討することとした。

地表露頭の状況から、この火山灰層は含水比が低い場合には流動化現象が起きにくいことが確認されていたため、地下水位の低い箇所へのルート変更が必要となった。

図-8に示す合計25本に及ぶトンネル内からの水平ボーリングおよび地表からの垂直ボーリングにより周辺の地下水位分布を確認したところ、南側山側(図の上方)のBHT-3孔ではほぼ60mの水平距離においても岩盤に到達せず、地下水位が地表付近の高い位置にあった。

一方で北側のシパンシハポラス川寄りの斜面沿いでは複数の垂直孔での地下水位が低く(図-7の青の一点鎖線)、概ね水路標高付近に位置していた。

いずれの水平孔においても岩盤に到達したボーリングはなかったため、この低地下水位ゾーン側を通過し、かつ次節で述べる条件に基づき、コスト比較および水理的に最適となる代替ルート案を複数案検討し、最終的に図-8の Re-Case I (青実線)のように水路線形を変更した。

d) 火山灰層掘削中の状況

掘削を再開するにあたり、10m毎の先行ボーリング、3段ベンチカット、支保工間隔は50cm、切羽を含めて全断面吹き付けで細心の注意を払いながら作業を進めた。

火山灰層は未固結部中に半固結部が不規則に挟在する状況で、全体としては未固結部が大半を占める状況であったが、この路線変更により、横坑下流側の水路トンネルの掘削は流動化を起こすことなく火山灰層を通過した。

掘削時のQ値の状況はCh.1170m付近の花崗閃緑岩から花崗岩に変わった区間から徐々に低下し、最終的には0となった。実際の花崗岩の状況は徐々に風化・変質程度が強くなり、最後に粘土化して火山灰層と40~50度程度の下流落ち傾斜で境界する(写真-3)。この区間の弾性波速度区分は3km/secと2km/secの境界に対応し(図-5および6)、Ch.1200m以降の第四紀火山灰層区間は2km/sec以下の区間に対応している。この区間のQ値がとれていないのは未固結岩盤のため節理がなく、Q値が算出できないことによる。

服部ら(1975)によれば、P波伝播速度の2km/sec付近の区間は日本の地質では概ね新第三紀上部層の平均値に相当し、菊地ら(1982)の岩級区分によれば概ねC_L級からC_M級の下位に対応する。

新第三紀の堆積岩であれば、弾性波速度2km/secの速

度帯は通常は直ちに弱層となる領域ではないが、本工事地点では、2km/sec区間は流動性の未固結火山灰と一部で半固結凝灰岩の区間に対応しており、Q値では0の区間に相当していた。トンネルの事前設計において、特に火山岩地帯では、この2km/secの弾性波速度帯は掘進作業および仕上げの両面についての要注意区間となりうる。

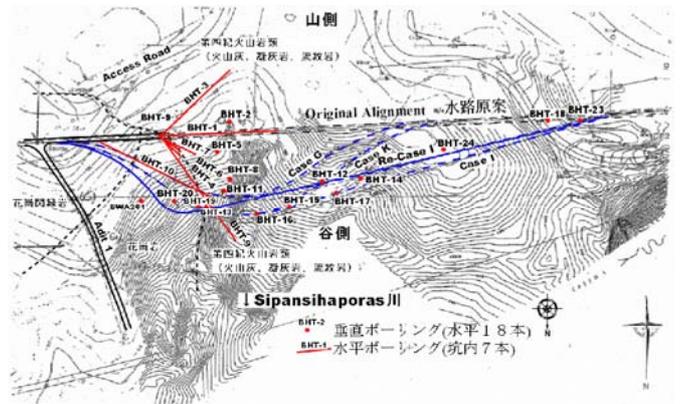


図-8 第一発電所導水路Adit 1下流における調査ボーリングとルート変更案

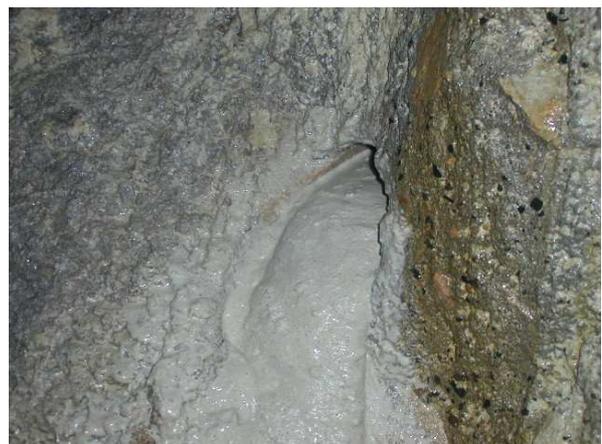


写真-1 ボーリング孔から流出する流動性火山灰



写真-2 火山灰が流出したトンネル内部(最大厚さ75cm)

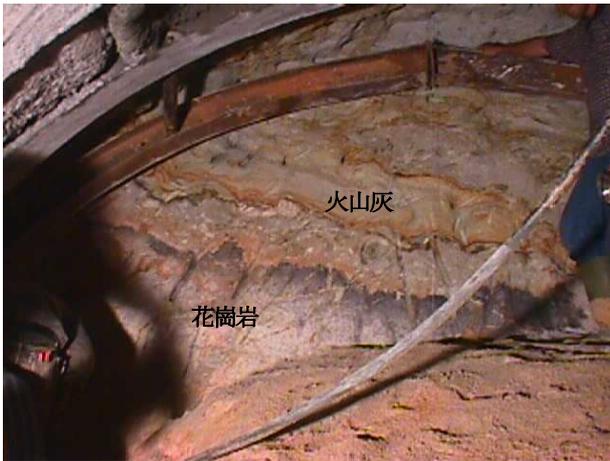


写真-3 花崗岩と火山灰の境界部(変更ルート Ch. 1214. 3m)
(灰色部分が強風化花崗岩、上の酸化鉄介在層が火山灰)

(2) 設計・施工

流動性火山灰層への対策として、水路線形を地下水位の低い河側へ変更するにあたり、導水路を健全かつ継続的に運転させるための留意点は以下のとおりである。

- ・ 沢部を直線で抜くこと。
- ・ 通過後の半固結凝灰岩区間にも軟弱部に遭遇する可能性があり、その場合の対応を考慮して、この区間も直線とする。
- ・ 充水後水圧により発生する不均等な力を全て花崗岩の岩盤で負担させるため、曲がり区間は花崗岩区間で終わらせる線形とする。
- ・ 線形変更に伴うヘッド・ロスの増加については、極力これを小さくし、増大分をインレット部の水平区間の設計変更により吸収させる。
- ・ 沢部の変形係数は花崗岩の 20 万 t/m^2 から火山岩の 1 万 t/m^2 に急激に変化しており、この区間は、鉄管板圧と材質を組み合わせることで経済設計とする。

掘進に際しては、注入式長尺先受工法(AGF 工法)による安定化工法も検討したが、最終的には以下のような工法を採用した。

- ・ 鋼製支保工のインバート部連結及び吹き付けによる盤膨れ防止、
- ・ 鋼製矢板によるアーチ部、側壁部の崩落防止、
- ・ 2段ベンチでの人力掘削区間 100m と上段でのセンターコアを残しての両袖 H 鋼支保立込み及び切羽へのショットクリートによる切羽保護、
- ・ スティールラダー敷設による天井の崩落防止。

これらの対策により切羽の崩落を起こすことなく、トンネル掘進は日進 1m を確保することができた。

トンネル仕上げには内張鉄管(SM400, $t=12mm$ /SM490, $t=13mm\sim 16mm$, 写真-3)を全長 375m に渡り敷設し、外

圧は鉄筋コンクリート(写真-4)により支持させることとした。



写真-3 内張鉄管敷設状況
(ペンストック側坑口からの搬入)



写真-4 コンクリート打設前鉄筋敷設状況

4. まとめ

今回は、海外プロジェクトとして、インドネシア国シパンシハポラス水力発電所建設における火山灰地帯でのトンネル掘削への対応について概要を報告した。

事前調査における弾性波速度分布は、トンネル内で遭遇した4種類の異なる岩種の区間を精度よく反映しており、特に第四紀火山岩区間に対応する弾性波速度 2km/sec以下の区間においては、その大半が未固結の火山灰層であった。この速度帯域は特に火山岩の場合には未固結層と半固結層が混在するような、自立しない地質区間を含んでいる可能性がある。

また、本工事においては、トンネル区間中の流動性火山灰層中の通過を可能とした最も大きな要因は、地下水位の低い箇所を通過するようにトンネル線形を変更することであった。設計の変更にあたっては、掘削通過のみ

をターゲットとするのではなく、長期的運用を考慮に入れた水理面、力学的見地からの比較検討により最適案を選択した。本発電所は現在まで、特に大きな問題はなく、営業運転を継続している。

参考文献

- 1) 国際協力事業団：シパンシハポラス水力発電開発計画
フィージビリティ調査報告書，1990.
- 2) PT.PLN : *Detailed Design Report for the Sipansihaporas Hydro Electric Power Project*, 1995.
- 3) PT.PLN : *Project Completion Report for the Sipansihaporas Hydro Electric Power Project*, Volume I to Volume VIII, 2004.
- 4) 電力土木：シパンシハポラス水力発電所工事報告，熊谷組，高橋佳久，竹内孝二郎，武居史敏，No.297，2002.
- 5) 国建協情報：海外プロジェクトに携わって－雑感，鹿子木唯夫，2006.
- 6) Barton, N., Lien, R. and Lunde, J. : Engineering Classification of Rock Masses for the Tunnel Support, Rock Mechanics Vol.6, No.4, 1974.
- 7) 服部保正，杉本卓司：岩石の P 波伝播速度に関する統計的研究 (I)，物理探鉱 第 28 卷，第 1 号，1975.
- 8) 菊地宏吉，斉藤和雄，楠健一郎：ダム基礎岩盤の安定性に関する地質工学的総合評価について，大ダム No. 102-103, (1982-1983).
- 9) 西脇芳文，鹿子木唯夫，吉田好男：インドネシア国シパンシハポラス水力発電所建設における課題と対応について，第37回岩盤力学に関するシンポジウム，土木学会，2008.

TUNNEL EXCAVATION AT VOLCANIC ASH ZONE

Yoshifumi NISHIWAKI, Tadao KANOKOGI, Tetsuro TSURI,
Nobuya NARITA, Yoshio YOSHIDA

The Project located about 350km south-west from capital city of Medan and 10km east of Sibolga city is expected to play a significant role in terms of both electric power generation and economic development in the region. This Project was initiated as a result of the Feasibility Study carried out by JICA in 1990. The scheme was planned as run-of-river type power plant with a maximum out put of 50 MW with regulating dam.

The Project comprised of two power plants, namely, No.1 and No.2 power stations with a total maximum capacity of 50 MW was finally completed by Nov. 2004.