

海底トンネル掘削における止水注入について -火山岩地域における注入実績とその止水効果-

Grouting before being excavated The Undersea Tunnels
-The Results of Grouting and Effectively at a Region of Volcanic Rock.-

穴田文浩¹・宮本武志²・大坂和弘³・秦輝道⁴・好見一哉⁵
Fumihiro Anada, Takeshi Miyamoto, Kazuhiro Oosaka, Terumiti Hata and Kazuya Yoshimi

¹工修 北陸電力株式会社 志賀原子力発電所建設所 (〒925-0161 石川県羽咋郡志賀町字赤住1)

E-mail: anada.fumihiro@rikuden.co.jp

²正会員 北陸電力株式会社 志賀原子力発電所建設所 (〒925-0161 石川県羽咋郡志賀町字赤住1)

E-mail: t.miyamoto@rikuden.co.jp

³正会員 工修 北陸電力株式会社 魚津支社電力部 (〒937-0017 富山県魚津市江口1279)

E-mail: ohsaka.kazuhiro@rikuden.co.jp

⁴鹿島建設株式会社 志賀原子力発電所建設土木工事事務所 (〒925-0161 石川県羽咋郡志賀町字赤住1)

E-mail: hata@kajima.com

⁵鹿島建設株式会社 ニンクトンネルJV工事事務所 (〒930-1408 富山県中新川郡立山町千垣145)

E-mail: yoshimi@kajima.com

In Shika Nuclear Power Plant Unit 2 which is located in the west coast of the Noto Peninsula, at a site in Shika town, Hakui district, Ishikawa Prefecture, cooling seawater is to be acquired and discharged through the undersea tunnels to protect the coastal natural environments. Now, Unit 1 is in operation and Unit 2 is under construction. The water intake and discharge tunnel of Unit 1 and the water intake tunnel of Unit 2 were excavated using the new Austrian tunneling method (NATM) with grouting. This paper describes the results of grouting before being excavated the tunnels and that of the index to understand the characteristic of grouting effectively at a region of volcanic rock.

Key Words : undersea tunnels, NATM, grouting, volcanic rock

1. はじめに

志賀原子力発電所は、能登半島中央部の西海岸にある志賀町と富来町との境界(志賀町中心部から北西へ約7km)に位置する。現在建設中の2号機は、出力135万8kWの改良型BWR(ABWR)であり、運転中の1号機(出力54万kW)の北側に隣接して、平成18年3月の運転開始を目指して工事を進めている。発電所レイアウトを図-1に示す。

志賀原子力発電所で使用する冷却用海水の取放水設備は、海岸などの自然環境の保護、地域住民の生活道路の確保などの観点から、物揚場の南北に設置した取水口から構内に導水し、防波堤沖合いに設置

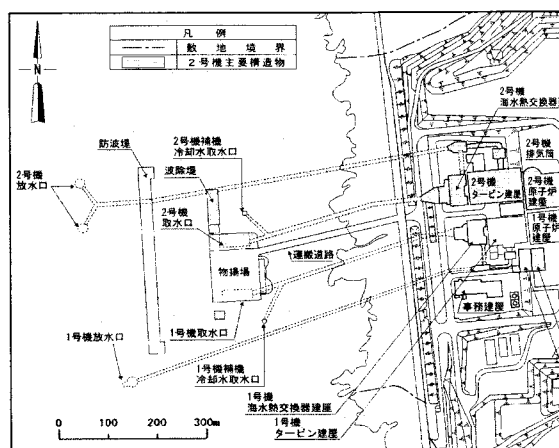


図-1 発電所レイアウト

した放水口から放水する海底トンネル形式としている。施工延長の長い2号機放水路については、機械化施工の急速な発展および経済性からシールドマシンによる機械化施工を採用したが、1号機取・放水路および2号機取水路では止水注入により岩盤からの湧水を低減させたのちNATMにより掘削した。

止水注入は、対象とする岩盤の岩質、亀裂状況、透水性等の性状に大きく支配されることから、その注入特性に応じてより適切な注入配合、注入圧力などの注入諸元を決定する必要がある。ここでは、これまでの施工結果から、岩盤の注入特性を把握するために有効となる指標および効率的な止水注入方法について検討する。

2. 地質概要

トンネル経過地の地質は、新第三系中新統の穴水累層の安山岩類からなり、岩相が堅硬・緻密で節理のやや多い安山岩（均質）と角礫岩状で節理の少ない安山岩（角礫質）、および色調の異なる安山岩の礫を含み節理が少ない凝灰角礫岩に分けられる。湧水圧試験の結果によると、透水係数は $10^{-3} \sim 10^{-4} \text{cm/sec}$ のオーダーである。また、有効間隙率の平均値は安山岩（均質）で3.53%、安山岩（角礫質）で25.28%、凝灰角礫岩で24.62%であり、一軸圧縮強度の平均値は、安山岩（均質）が約 150N/mm^2 、安山岩（角礫質）が約 15N/mm^2 、凝灰角礫岩が約 16N/mm^2 である。図-2に2号取水路トンネル経過地における地質縦断面を示す。ここでの構成比率は、安山岩（均質）が35%、安山岩（角礫質）が25%、凝灰角礫岩が40%である。

3. 止水注入工の概要

(1) 注入の目的

トンネル経過地の地質は透水性が大きく、海底トンネルをNATMで安全かつ効率的に掘削するためにはトンネル経過地の透水係数を少なくとも 10^{-5}cm/sec 程度に改良するとともに、崩壊性の大きい地山が介在する場合には地山を改良して切羽の安定を図る必要があった。このため、トンネル全長にわたって止水注入を実施した。

(2) 止水注入諸元

a) 注入範囲

止水注入の範囲は、青函トンネルの実績等から、掘削直径の3倍程度とした。

b) 注入材料

注入材料は、高炉コロイドセメントのセメントミルクと水ガラスを混合したLWを主体とし、湧水量および注入量の状況に応じてセメントミルクの濃度を300%、200%、150%、100%と変更した。

c) 注入孔の間隔

注入孔の間隔は、事前に現地地盤において実施した試験注入の結果から、注入孔の間隔が最も広くなる注入孔先端でも3m程度になるように設定した。

d) 1ブロックあたりの注入長

1ブロックあたりの注入長が長いほど、全体の注入回数が低減でき経済的であるが、長すぎると先端部での注入効果に不安が残ること、また、施工機械の能力等を勘案し最長でも55m程度とした。

e) 注入圧力

注入圧の上限値は、一般に静水圧の3倍程度で岩盤の限界圧力を若干上回る圧力が適当であると言われている。事前に実施した注入試験により当地点の岩盤の限界圧力は2.5MPa以上であったことから最大注入圧は3.0MPaを基本とし、注入状況を観察しながら1.5MPa～3.5MPaの範囲で変更した。

(3) 注入手順

1ブロックあたりの注入手順としては、まず岩盤の状態を調査することを目的として掘削断面内中央

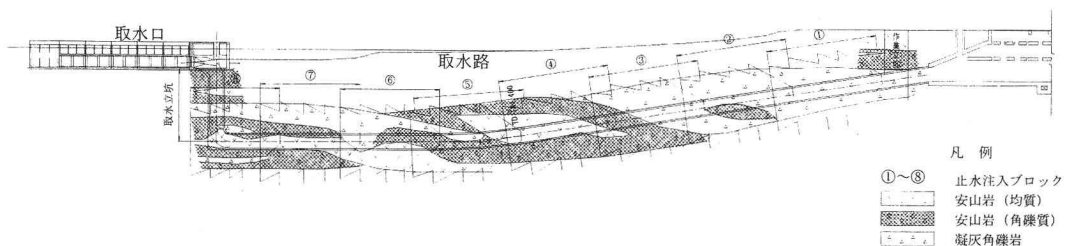


図-2 2号取水路トンネル地質縦断

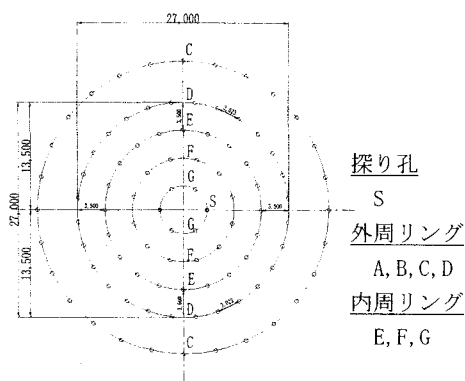


図-3(1) 注入パターン

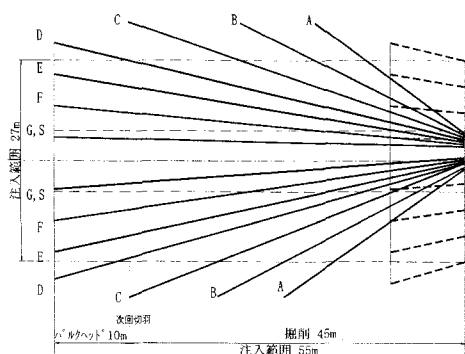


図-3(2) 注入パターン

付近に、探り孔（S孔）を先行して施工した。次に、注入材が注入対象範囲外へ逸出することを防止し、かつ、注入と並行して注入効果が確認できるよう、外側の注入孔から内側の注入孔の順に施工した。注入は2孔を削孔し、その2孔を同時注入することとし、各リングで対角線上に配置した。各リングでは、1孔おきに注入し（1次孔）、その後間の孔（2次孔）を注入することにより1次孔の注入効果を2次孔で確認しながら施工した。所定の注入が完了した時点で注入不足の箇所があれば追加孔を施工し、最後に掘削断面内にチェック孔を削孔し、湧水量およびルジオン値(Lu)により注入効果を確認した。

2号取水路における止水注入パターンを図-3(1)、(2)に示す。

4. 注入実績と注入特性

(1) 注入実績

2号機取水路は、1号取・放水路に比べて掘削径が約1.4倍であるが、基本的な注入諸元については、1号取・放水路、2号取水路ともほぼ同様であり、今回の報告ではこれら海底トンネルの水平坑部分の注入実績を検討対象とした。注入実績の総括を表-

表-1 注入実績

	放水路 水平坑 (1号機)	取水路 水平坑 (1号機)	取水路 水平坑 (2号機)
トンネル内径 (m)	4.5	4.5	6.8
掘削径 (m)	5.9	6.1	8.6
注入範囲径 (m)	20.0	20.0	27.0
注入延長 (m)	842.1	280.9	453.0
ブロック数	14	9	8
削孔数(孔)	1337	856	1402
削孔径(mm)	66	66	66
総削孔長 (m)	53,361	28,632	58,641
注入量 (m ³)	4,966	2,728	6,061
平均注入量 (ℓ/m)	91	91	103
注入率 (%)	2.82	3.1	3.1
平均湧水量 (ℓ/m)	1.12	1.3	1.75

1に示す。

これらの注入データから岩盤の注入特性を把握するために有効となる指標について検討した。

(2) 探り孔データと注入特性

各ブロックの注入量を予測するため、注入に先立ち実施する探り孔と各ブロックの注入孔の単位長さ当りの各データの関係を図-4から図-6に示す。

a) 探り孔湧水量と平均湧水量 (図-4)

探り孔の湧水量とその注入ブロックにおける湧水量は比較的良好な相関を示すことから、探り孔の湧水量から注入ブロックの湧水量が推定できる。すなわち、透水性に関して各注入ブロックのマクロ的性状には、探り孔の湧水量から推定できるといえる。

b) 探り孔注入量と平均注入量 (図-5)

探り孔の注入量と注入ブロックにおける注入量も比較的良好な相関を示しており、探り孔の注入量がその注入ブロックの注入特性をマクロに捉える指標として有効である。

c) 探り孔湧水量と平均注入量 (図-6)

本来相関があると考えられた、探り孔の湧水量と注入ブロックの注入量との間には相関は認められなかった。これは、安山岩（角礫質）および凝灰角礫

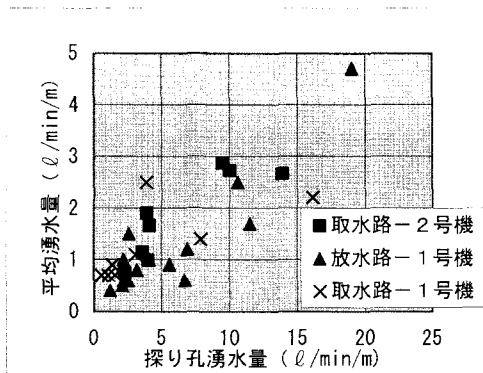


図-4 探り孔湧水量と平均湧水量

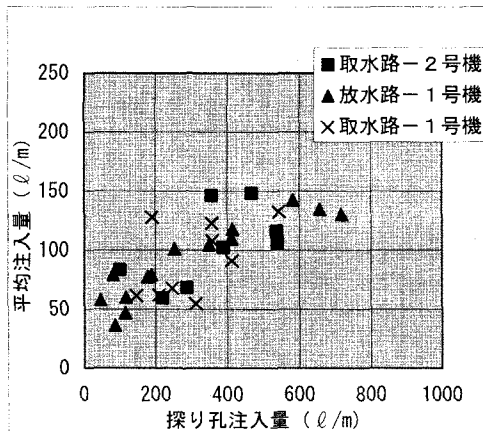


図-5 探り孔注入量と平均注入量

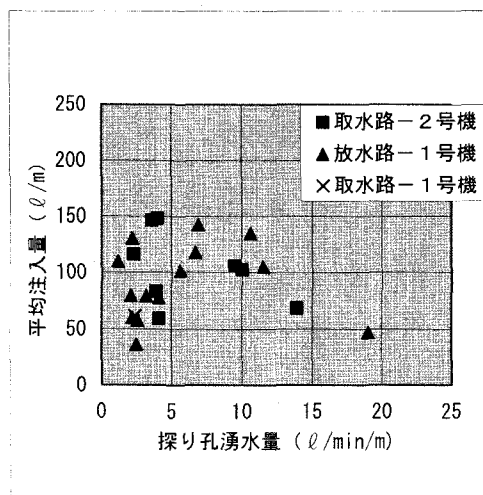


図-6 探り孔湧水量と平均注入量

岩は、節理が少ないが多孔質であるとの特性を有しており、このような特性が影響しているものと考えられた。そこで、この多孔質部の注入特性を確認するため、高さ 10.0cm、直径 5.0 cm の供試体を用い

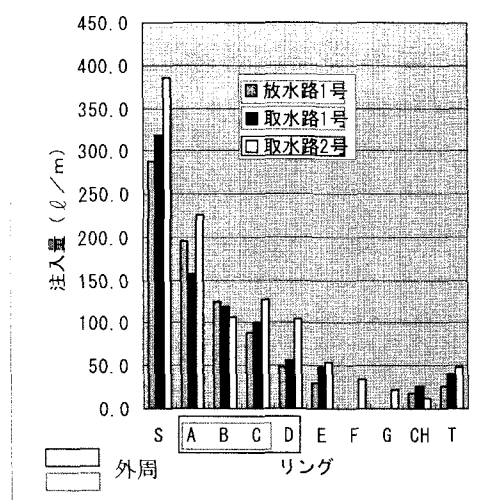


図-7 リング別単位注入量

		放水路 水平坑 (1号機)	取水路 水平坑 (1号機)	取水路 水平坑 (2号機)
平均 注入量 (ℓ/m)	外周孔	121.1	117.7	132.8
	内周孔	37.2	49.2	39.8
総注入量 比率(%)	外周孔	80.4	70.6	85.2
	内周孔	19.6	29.4	14.8

表-2 外周孔と内周孔の比較

て三軸透水試験および注入試験を実施した。注入試験の注入圧力は 1.0MPa で、注入材としては、 $W/C=300\%$ および $W/C=600\%$ の高炉コロイドセメントミルクを使用した。注入試験の結果、透水係数が $1.04 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$ と高い試料でも、 $W/C=300\%$ のセメントミルクは最大 6mm 程度しか浸透せず、 $W/C=600\%$ の注入材でも供試体の半分程度までしか浸透しなかった。この試験結果から、探り孔の湧水量と注入ブロックの注入量との間に相関が認められなかった理由としては、湧水はこの多孔質部を通過するが、LW（注入材）はその内部までは浸透しにくいことによるものと考えられる。

(3) リング毎の注入特性

リング毎の単位注入量を図-7に示す。これより外周リングでは注入量も多いが内部に向かうほど注入量の減少が顕著であり、内周リングではほとんど差がなくなる。

ここで、各ブロックの外周孔（先端部まで到達す

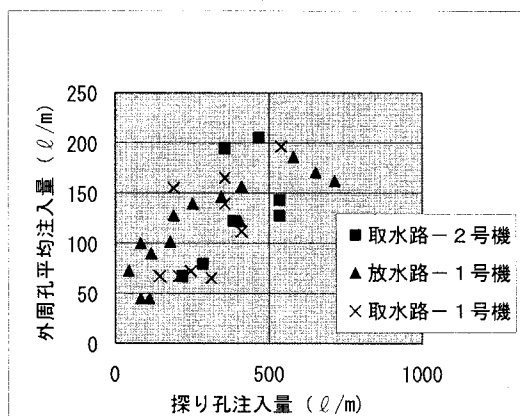


図-8(1) 探り孔注入量と外周注入量の関係

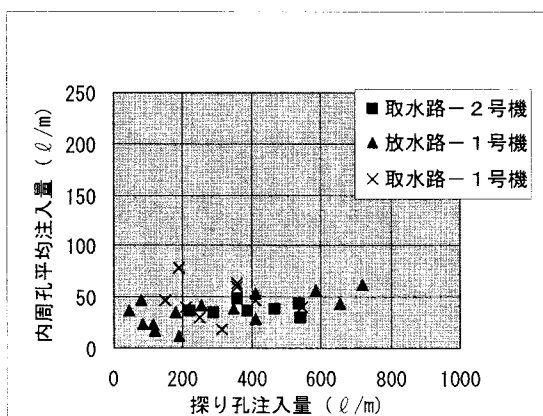


図-8(2) 探り孔注入量と内周注入量の関係

る最も外側のリングとさらにその外側の注入孔：A～D)と内周孔(外周孔の内側の注入孔：E～G)の平均注入量と総注入量比率を表-2に示す。また、外周孔および内周孔における平均注入量と探り孔注入量の関係を図-8(1)および図-8(2)に示す。これより、外周孔では初期岩盤の注入特性を強く反映し、探り孔注入量と平均注入量の比例関係が顕著であるが、内周孔では探り孔注入量にかかわらず平均注入量はほとんど変わらない。これは外周孔の場合は先行注入の影響を全く受けていないゾーンへの注入が期待されることから、初期の岩盤の注入特性に依存するのに対し、内周孔では外周孔の注入により対象範囲があるレベルまで透水性が改善されていたことによるためと考えられる。

(4) 注入圧と注入効果

一般に、注入圧が高いほど注入量が多くなり、止水効果は良くなると考えられるが、注入圧が必要以上に高い場合は、計画注入範囲外への注入材の流出や岩盤破壊等を起こすおそれがある。外周リングほ

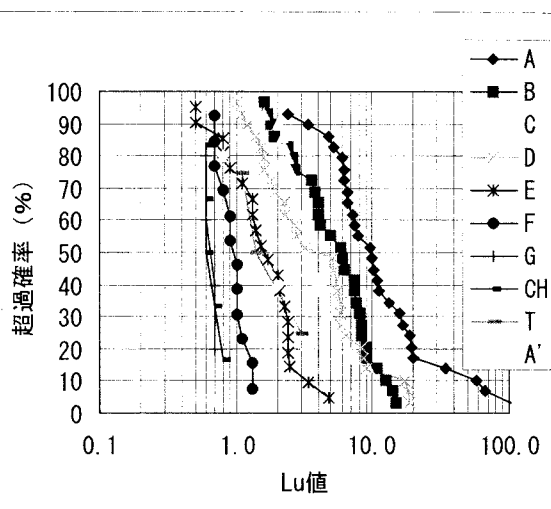


図-9(1) Lu 値 超過確率分布 (高压ブロック)

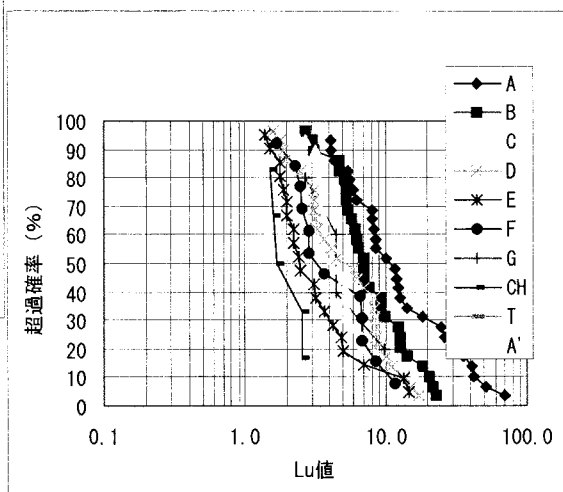


図-9(2) Lu 値 超過確率分布 (低压ブロック)

ど岩盤性状の影響を大きく受けることから、外周リング注入時にいかに無駄なく計画注入範囲へ注入できるかが止水注入の効率化に繋がると考えられる。注入圧の違いによる止水効果を比較するため、2号取水路において注入圧の異なるブロックにおけるリングごとのLu値の超過確率分布を図-9(1)と図-9(2)に示す。図-9(1)は外周リングの注入圧が3.0～3.5MPaで内周リングの注入圧が3.5MPaの高压ブロック、図-9(2)は外周リングの注入圧が2.0～3.0MPaで内周孔が3.0MPaの低压ブロックである。両ブロックの注入効果の変化に着目すると、低压ブロックにおいては最終の内周リングまで注入効果が現われているが、高压ブロックにおいては外周リングが完了した時点でほぼ目標とするLu値

(3 程度)に到達しており内周リングの注入効果が低い。また、高圧ブロックにおける外周孔の平均注入量は探り孔注入量から想定される注入量の約 1.5 倍となっていることおよび、一般的に割裂注入の兆候とされている、注入圧の一次的な低下現象が観測されたことから、高圧注入では初期岩盤の注入特性を越えるような過剰な注入が行われている可能性がある。

(5) 岩盤種別と注入特性

亀裂のない多孔質な部分には注入材がほとんど浸透しないと考えられることから、注入特性は亀裂の多少および亀裂性状等の岩盤の性質に大きく依存すると思われる。トンネル経過地における 3 種類の岩盤の分布については、岩盤強度の違い等から注入孔の削孔時に推定可能であり、岩盤種別毎の定性的な注入特性は注入時の傾向から以下のようにまとめられる。

a) 安山岩 (角礫質) および凝灰角礫岩

これらの岩盤では、建設に先立ち調査した結果等から、亀裂が比較的連続的で単純な広がりを示している。この亀裂を通して注入が進展することから、湧水量の多い場所では注入量も多い傾向にある。ただし、亀裂の少ない多孔質な部分では、湧水量の割に注入量が少ない場合がある。このような場所では、注入材の材質を懸濁型のものから溶液型に変更することにより、注入効果が確保できる。

b) 安山岩 (均質)

この岩盤では、湧水量の多い場所でも注入量が少ない傾向がある。調査結果等から、比較的クラッキーで亀裂が多く存在するが、各亀裂は複雑に発達し、密実に密着しているという性状を示しており、この性状のため注入材が浸透しにくいものと思われる。安山岩 (均質) では、亀裂への注入を確実にを行うため、孔配置を密にすることや注入圧を高めることが有効となる。

5. 成果と課題

海底トンネルの施工では、止水注入工は工事費に占めるウエイトが大きく、かつ安全施工を決定する大きな要因となる。

各注入ブロックにおける総注入量は、初期岩盤の性状を確認できる探り孔における注入量との相関が高い。このことから、各探り孔の湧水量と注入量に着目し、当該ブロックの注入特性をマクロ的に把握

することができる。ただし、湧水量に対して注入量が少なくなっている場合もあり、この場合は、岩盤種別に応じて注入材や注入圧を変更することが望ましいと思われる。

また、効率的な止水注入を行うためには、外周孔における止水効果を高めることがポイントとなる。外周孔の止水効果を高めた場合、内周孔においては、注入量の変化が少ないことから、注入孔の削減の可能性も考えられる。しかし、今回のように水平坑における前方注入では、切羽の防護および次ブロックにおける注入材のリーク防止のためバルクヘッド区間が必要となることから、内周孔を削減することは難しいものと思われる。

6. 終わりに

志賀原子力発電所 2 号機建設工事は平成 18 年 3 月運開に向けて順調に推移しており、取水路トンネルについては通水が完了し、取水口において 16 年末からの循環水ポンプの試運転に向けて諸準備を進めているところである。

土被りが小さく地山の透水性が大きい場所での海底トンネル掘削に伴う岩盤注入の事例はあまりなく、今回の検討においては探り孔における諸データを用いてマクロ的な止水注入の傾向を検討した。これらの注入傾向を事前の地質データと相関づけて評価できれば、より効率的な注入が可能になると思われる。

謝辞：志賀原子力発電所における海底トンネル工事にあたってのご指導はもとより、本稿の取りまとめに際しまして多くのご助言を賜りました土屋敬金沢工業大学教授 (現在、アルスコンサルタント㈱技術顧問) および太田秀樹東京工業大学教授に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) (社)日本鉄道施設協会、注入の設計施工指針、日本国有鉄道編、1987.
- 2) 宮崎甚夫、内田秀彦、宮岸和信：志賀原子力発電所海底取水路トンネルの設計・施工について、電力土木、No. 228、pp. 23-32、1990.