

海底に設置した構築物と海底トンネルとを繋ぐ立坑の構築

— 止水注入における揚圧力対策と計測管理 —

Construction of the vertical shaft between the undersea tunnel and the outlet

— Taking a step to uplift force and monitoring under chemical grouting —

宮岸和信¹⁾・穴田文浩¹⁾・大坂和弘¹⁾・大森禎敏²⁾・藤山浩司³⁾

Kazunobu Miyagishi, Fumihiro Anada, Kazuhiro Ohsaka, Sadatoshi Ohmori, Hiroshi Fujiyama

In Shika Nuclear Power Plant Unit No.2, cooling seawater from the condenser is planned to be discharged through the undersea tunnel, as well as Unit No.1. The vertical shaft connecting the tunnel tip to the outlet caisson was planned to be constructed from the tunnel in consideration of cost benefit and weather condition on the site.

Before constructing the vertical shaft, we injected upward from the tunnel tip to the outlet caisson for dewatering. To prevent the outlet caisson from moving by the grouting pressure, we installed ground anchors and monitored the behavior of them.

This paper describes the action and the results of uplift force by the grouting pressure.

Key Words : undersea tunnel, vertical shaft, grouting, ground anchor.

1. はじめに

北陸電力㈱では、能登半島中央部の西海岸に位置する志賀原子力発電所において、2号機の増設工事を進めている(図-1)。電気出力は国内最大級となる135.8万kWであり、熱交換に用いた93m³/sの冷却用海水は、温排水拡散範囲抑制の観点から海底トンネル(水平坑および立坑からなる)にて沖合まで導水し、海底に沈設した2箇所の放水口より水中放水する計画としている(図-2(a), (b))。海底トンネルのうち、放水口と水平坑を繋ぐ海底立坑は、従来、海面上までの高さの仮設ケーソンを設置しその内部から止水注入を行った後、海底下の水平坑まで下向きに掘削する工法で構築するのが一般的であった。しかし、今回この工法を用いると、設置場所は水深20mと深いことから仮設工事費が膨大となり、また冬期の海上作業中断による工期への影響が問題となった。このため、止水注入から掘削工事に至る一連の作業を海底トンネル内部より施工することとしたものであり、これは前例のない工法である。

当地点は地山の透水係数が比較的高く、海底立坑の掘削にあたっては確実な止水対策が重要となる。掘削

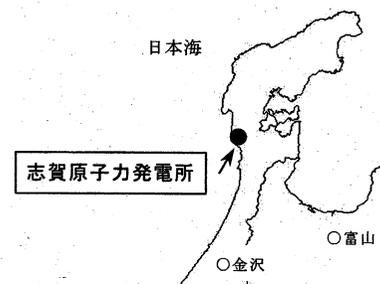


図-1 志賀原子力発電所位置図

1) 北陸電力株式会社 志賀原子力発電所建設所

2) 五洋建設株式会社

3) 前田建設工業株式会社

時の湧水経路としては、岩盤中の亀裂のほか、海底に沈設した構築物（放水口）と基礎岩盤との境界面が考えられる。したがって、この境界面を含む立坑経過地を対象に止水注入を実施することとなるが、注入圧が揚圧力となって構築物底面に作用し構築物を浮き上がらせてしまうと、却ってこれが海底面にまで達する“水みち”となる可能性がある。

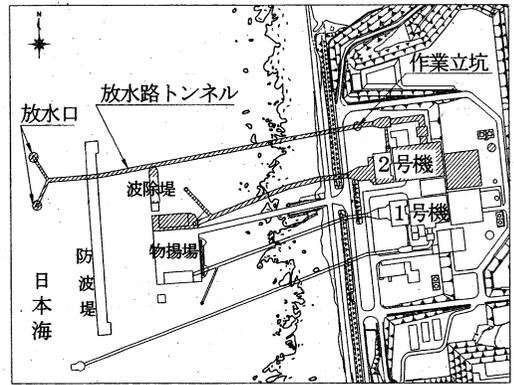
従来工法である仮設ケーソン内から下向きに掘削する場合は、新たな水みちが生じても当該位置まで掘削した段階で追加注入等により対処できるが、今回採用したトンネル内部からの上向き掘削の場合はその対処が困難となる。このため、構築物を設置面から浮き上がらせないという課題の下で、所定の止水効果を得るための工夫を講ずる必要があった。

本稿では、水平坑からの上向き注入工事で採用した構築物の浮き上がり対策と施工結果について報告するものである。

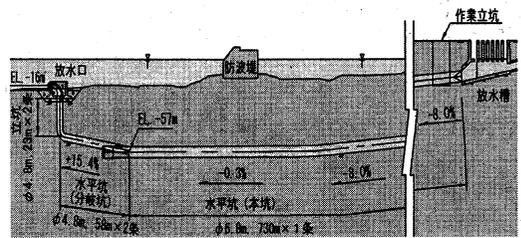
2. 地形・地質概要

海底は不陸の著しい岩礁地形で、約 1/30 の勾配で沖合に向かって傾斜している。また、地盤は安山岩と凝灰角礫岩からなり、安山岩は堅硬・緻密な安山岩（均質）と角礫岩状を呈する安山岩（角礫質）に大別される。安山岩（均質）は節理が多く認められ、安山岩（角礫質）および凝灰角礫岩は節理が少ないが多孔質で透水性の高い部分も見られる。

事前の地質調査結果によると、立坑経過地の RQD は概ね 50% 以上であるが部分的に RQD の低い箇所が認められ、透水係数としては $5.0 \times 10^{-4} \sim 2.0 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ であった。掘削に当っては 1 号機の施工実績¹⁾を反映し、透水係数を $5 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 以下（ボーリング孔の湧水量 0.4 l/min/m 以下に相当）に改良することとした。図 1-3 に立坑周辺の地質断面図を示す。



(a) 平面図



(b) 縦断面図

図-2 放水路トンネルのレイアウト

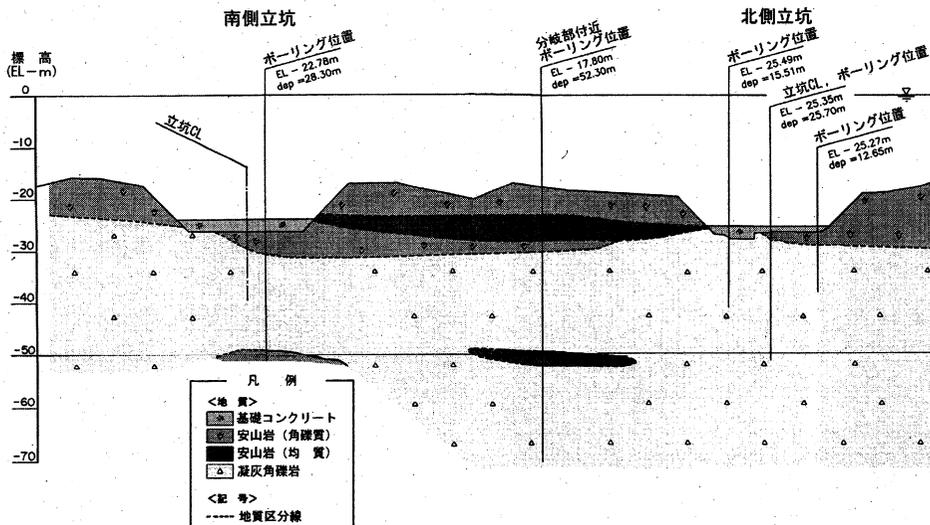


図-3 立坑周辺の地質断面図

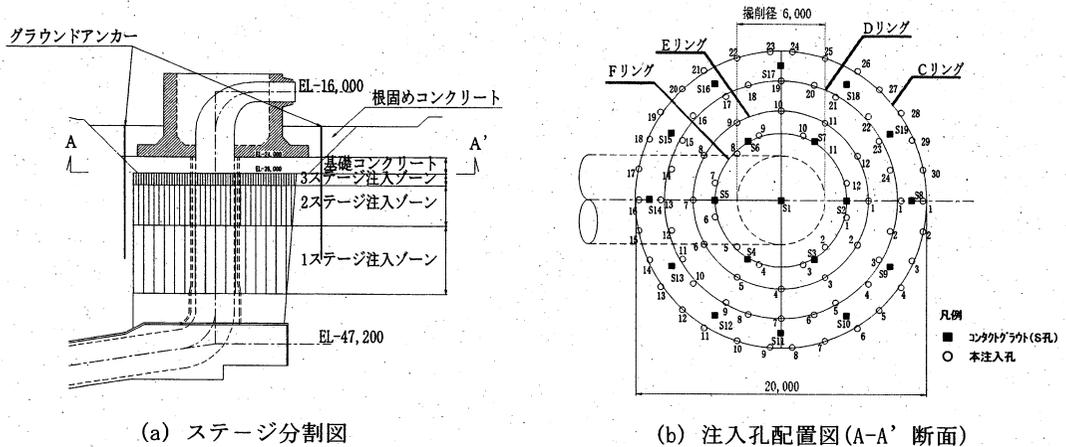


図-4 止水注入の実施概要図

3. 止水注入における揚圧力対策

止水注入における注入圧は静水圧の2～3倍以上²⁾とされており、これは止水注入を効果的に実施するための必要条件となる。本地点においてもこの考えに基づいて注入圧を設定することとしたが、注入圧による構築物への影響を極力抑制するため、次の対策を実施した。

(1) ステージ注入の採用

今回の止水注入は21mと短区間ではあったが、図-4(a)に示すようにこれを鉛直方向に3分割し、ステージ毎に必要な注入圧を設定することで構築物直下ゾーンの注入圧を抑制した。各ステージの注入圧設定の考え方を以下に示す。

- 1ステージ：十分な土被りを有することから、水平坑と同様の2.0MPa（静水圧の約5倍）とする。
- 2ステージ：構築物に影響する可能性のあるゾーンであり、必要最小注入圧である1.0MPaとする。
- 3ステージ：構築物直下ゾーンであり、必要最小注入圧である0.7MPaとする。

なお、注入孔は図-4(b)に示すように、立坑の外側にリング状に配置し、水平坑から構築物に向け、1ステージ～3ステージの順番で注入した。止水材としては、青函トンネルおよび1号機で実績のある水ガラスと高炉コロイドセメントによる懸濁型水ガラス(LW)を使用し、注入状況に応じて水セメント比を600%～100%に調整した。さらに、全ての注入が完了した後、止水効果を確認するため立坑掘削域でチェック孔を削孔した。

(2) グラウンドアンカーによる抵抗力の導入

注入圧に対する抵抗力を得るためには、①構築物の自重を大きくする、②アンカーなどによって構築物を岩盤側に固定する等の方法が考えられる。①の方法では、構築物がケーソン形式のため自重が制限されていることから根固めコンクリート量を増加させることとなるが、この場合、岩盤掘削量も増加する。比較検討の結果、②の方法が経済的に有利となり、かつ、比較的短期に施工できることから、グラウンドアンカーを打設することとした。

導入する抵抗力の検討にあたっては、構築物底面に作用する注入圧の影響範囲を算定する必要があるが、これを定量的に評価することは困難であり、また、底面全体に作用するとして設計した場合、大きなコスト負担となる。このため、底面全体に作用するような現象は認められなかったとの一事例を参考に作用面積を50%として想定し、これをを超える可能性については構築物の挙動計測を行い、施工にフィードバックすることで対応した。

具体的には、構築物底面積 346m^2 の 50% に注入圧 0.7MPa が作用する場合に生ずる揚圧力は $121,100\text{kN}$ となり、これと構築物（根固めコンクリート含む）の有効重量約 $67,000\text{kN}$ との差分である約 $54,100\text{kN}$ をグラウンドアンカーにより確保することとした。図-5 にグラウンドアンカー（設計荷重 $2,310\text{kN} \times 26$ 本）の配置を示す。

4. 計測管理の工夫

(1) 計測システム

グラウンドアンカーによる抵抗力は前記想定の下で設計したことから、施工に際しては構築物の挙動観測が重要となる。そこで、グラウンドアンカー 26 本のうち 4 本のアンカー頭部に荷重計を設置し（図-5）、アンカー軸力値を、海底に設けたデータ送信機からトンネル内の受信機（計測管理室）まで地中伝送し、構築物の挙動をリアルタイムで監視した（図-6）。データの伝送には超低周波数の電磁波を用いており、同電磁波は磁界成分が卓越することから海中や地盤内で伝送損失が少なく確実な伝送が行えるという特徴を有している。

(2) 管理基準

注入圧を加えるとアンカー軸力は増加する。その後、注入圧の発散や注入材料の体積減少等の軸力減少要因が考えられるものの、これまでの事例からすると 1 度増加した軸力が注入前の状態に戻ることはほとんど観測されていない。このため、軸力は注入毎に累積すると考えられ、その増加量が大きい場合、全ての注入が完了する前に軸力がアンカーの降伏強度を超えるおそれがある。したがって、全注入が完了するまでアンカーの健全性が確保できるよう、

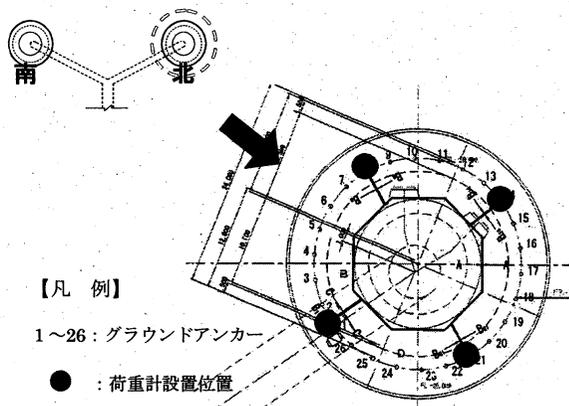


図-5 グラウンドアンカーの配置図

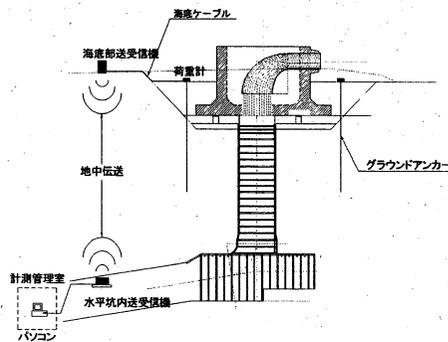


図-6 アンカー軸力のデータ伝送システムの概要

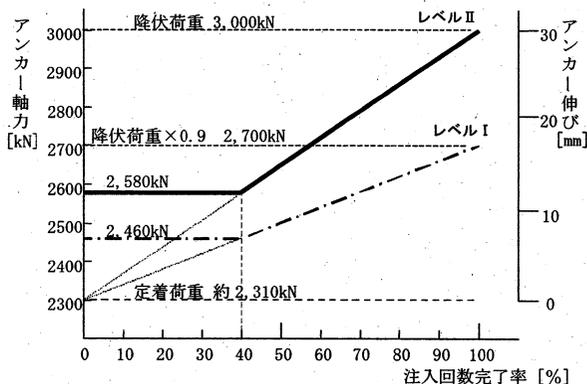


図-7 グラウンドアンカーの管理図

表-1 グラウンドアンカー管理基準

管理区分	内容	超過時の基本的対応
レベル I	アンカー軸力は注入回数に比例して増加するものとし、全注入完了時点で、軸力が降伏荷重の 90% となる変化線	次孔の上限注入圧を低減し、状態を監視 など
レベル II	全注入完了時点で、軸力が降伏荷重となる変化線	注入材料の変更等を検討 など

ただし、注入初期段階では、注入影響範囲が広く 1 回当りの注入量が多くなる。軸力はその影響を受け大きな増加傾向を示すことから、この増加傾向を許容するため、注入回数完了率（注入完了回数 / 全注入回数）40% までの区間については、管理値を緩和し一定管理値（図-7）とした。

長期的管理として表-1および図-7に示す管理基準を設けた。

また、構築物の浮き上がりはアンカー軸力の急激な増加として捉えることができることから、短期的管理として軸力の増加量が4kNを超えた場合には注入圧を低下させることとした。さらに、構築物が浮き上がった場合、その兆候として注入圧の一時的な低下現象が認められることから、注入圧の変化に細心の注意を払い監視した。

5. 計測管理結果

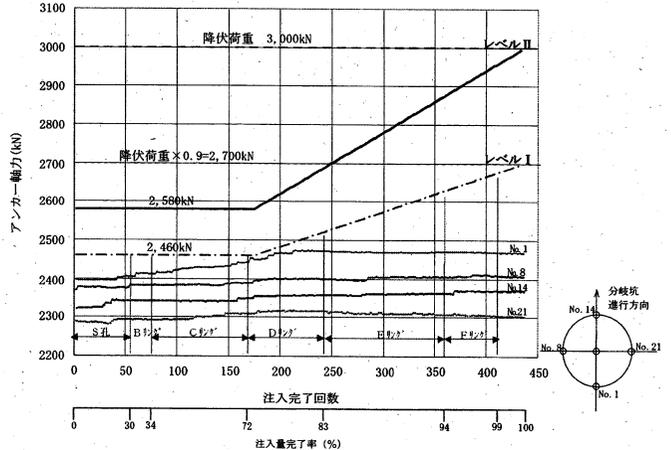
初期段階において、軸力の増加量が短期的管理値を超えるケースが見られたことから、注入圧を減ずる等の対応をリアルタイムで行うとともに、その結果を次リングの注入仕様に反映（注入圧、減圧方法等）させた。

注入完了回数とアンカー軸力の関係、および注入量完了率（累計注入量／最終累計注入量）とアンカー軸力との関係を図-8(a)および図-8(b)に示す。今回の管理手法を用いることにより、全ての注入が完了した時点でアンカー軸力を降伏荷重の90%以下に保つことができた。また、チェック孔の結果、構築物の設置面からの湧水量は減少しており、構築物を浮き上がらせることなく設置面の透水性を改善することができた。

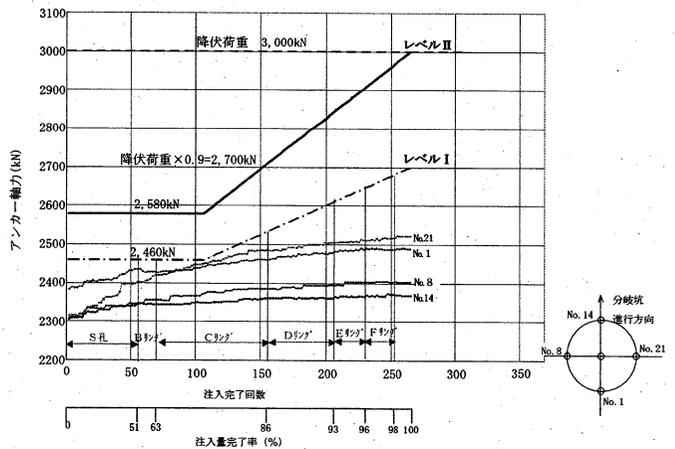
なお、アンカー軸力の増加傾向は以下に示すとおりであり、管理レベル設定時に考慮した「初期段階における管理値の緩和」は妥当であったと判断される。

南側立坑：アンカー軸力の増加傾向は、注入量完了率が約80%に相当するDリングまで見られ、Eリング以降はあまり変動しなかった。全注入完了時点でのアンカー軸力の増加量は14~69kN(表-2)であった。
北側立坑：全体をとおしてアンカー軸力の増加傾向が見られ、特に注入量完了率が約60%に相当するBリングまでの増加が大きい。全注入完了時点でのアンカー軸力の増加量は57~205kN(表-2)と、南側立坑に比べ大きくなった。

6. 止水注入効果



(a) 南側立坑



(b) 北側立坑

図-8 グラウンドアンカーの軸力測定結果

表-2 グラウンドアンカーの軸力変化

(a) 南側立坑		No.1		No.8		No.14		No.21	
日付		荷重 (kN)	変位量 (mm)						
4月25日	注入開始時点	2,397	0.02	2,370	-0.06	2,321	0.02	2,288	-0.06
6月24日	注入完了時点	2,466	3.04	2,406	1.46	2,369	2.08	2,302	0.54
	変化量	+69	+3.02	+36	+1.52	+48	+2.06	+14	+0.60

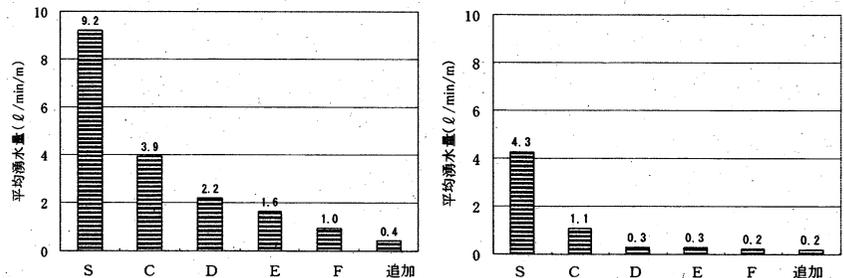
(b) 北側立坑		No.1		No.8		No.14		No.21	
日付		荷重 (kN)	変位量 (mm)						
4月25日	注入開始時点	2,385	-0.02	2,307	0.02	2,310	-0.06	2,316	-0.04
6月24日	注入完了時点	2,488	4.44	2,402	4.12	2,367	2.38	2,521	8.83
	変化量	+103	+4.46	+95	+4.10	+57	+2.44	+205	+8.87

図-9に2ステージにおける各注入リングの平均湧水量を示す。この図から内側の注入リングほど湧水量

が少なくなることが分かる。特に、Cリング削孔時の湧水量がS孔削孔時と比較して極端に少なくなったが、これは、注入初期時は岩盤中の亀裂に注入材が浸透しやすい状況にあることによるものと考えられる。

また注入量とアンカー軸力との関係は、図-10に示すように、南北立坑ともそれぞれ高い相関性が認められた。

全注入完了後に実施したチェック孔の結果、北側立坑箇所および南側立坑箇所の透水係数は、 $3.2 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ および $3.4 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ と、改良目標である $5 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 以下（湧水量 0.4 l/min/m 以下）に改善することができた。



(a) 南側立坑

(b) 北側立坑

図-9 各注入リングの平均湧水量（2ステージ）

7. 本施工を通しての成果

海底立坑を海底トンネル内部から海底面に向けて構築するという試みにおいて、止水注入をいかに効果的に実施するかが最も重要な課題であった。今回、この課題解決に向け実施した技術的取り組みにより、次のような成果を得ることができた。

- (1) ステージ注入とアンカー軸力の計測管理により、海底に設置した構築物を設置面から浮き上げることなく、目標とする透水係数に改良することができた。
- (2) 今回の電磁波を用いた地中伝送による計測システムは、海中構築物の挙動をリアルタイムで把握でき非常に有効であった。
- (3) アンカー軸力は注入量に比例して増加する傾向を示した。したがって、注入量の多い初期段階におけるアンカー軸力の管理値を緩和したことは妥当であった。

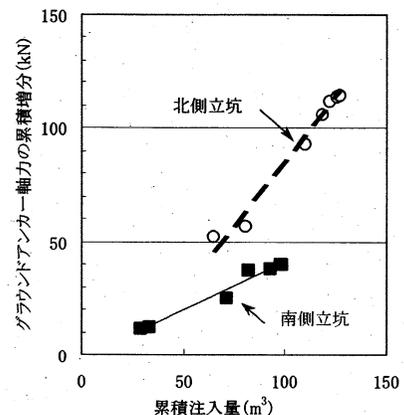


図-10 各注入リングの毎の累積注入量とグラウンドアンカー軸力の累積増分

《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御指導はもとより、本稿のとりまとめに際しまして多くの御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ツ㈱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) 谷 龍蔵, 宮崎甚夫, 内田秀彦, 野口猛雄: 安山岩中の海底トンネルにおける注入工法, 第46回土木学会年次学術講演会概要集, pp. 184-185, 1991.
- 2) (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], p. 85, 1987.
- 3) T. Yonetani, T. Nakagawa, K. Nagata, S. Fukuyo: Constructing the undersea rock tunnel using various tunnel excavation techniques, Proceedings of the ITA world tunneling congress 2003 AMSTERDAM, pp. 461-467, 2003.