

凍土方式遮水壁構築に向けた実証実験

Demonstration Test for Cutoff Walls Using Artificial Ground Freezing

佐藤 一成 吉田 輝 永谷 英基¹⁾
照井 秀幸 高村 尚¹⁾ 山本 正嗣²⁾

要 約

東京電力福島第一原子力発電所では、高レベル放射性汚染水が滞留している原子炉建屋などへの地下水流入量を低減し汚染水の増加を抑制することを目的として、1~4号機の原子炉建屋群を囲う大規模な凍土方式遮水壁（以下、陸側遮水壁）の構築が進められている¹⁾。当プロジェクトは、世界に類例の少ないチャレンジングな取組みであり、大規模かつ長期間の凍土方式遮水壁の運用、地下水流や埋設物が存在する場所での遮水壁の構築など、多くの技術的課題への対応について事前に調査検討する必要がある²⁾。その一環として、現地で小規模凍土方式遮水壁を構築し、陸側遮水壁の成立性を検証するとともに、施工計画及び施工管理に必要なデータを取得し陸側遮水壁の成立性を検証したのでその概要を報告する。

目 次

- I. はじめに
- II. 試験概要
- III. 小規模凍土方式遮水壁の構築試験
- IV. 維持運転に関する検討
- V. 融解挙動に関する検討
- VI. 凍結管複列配置部の凍土構築試験
- VII. 遮水性能の検討
- VIII. 凍結膨張に関する検討
- IX. 凍結管ピッチに関する追加試験
- X. おわりに

I. はじめに

地盤凍結工法は、都市部のトンネル工事において、地中切抜げのための地盤改良あるいは止水工法として広く用いられているが、地中切抜げを伴わず、地下水の流入抑制や汚染拡散防止を目的とする遮水壁としての事例は比較的少なく、今回の福島第一原子力発電所の陸側遮水壁は、水平・鉛直延長及び供用期間において、国内外を通じて最大級の規模となる。このため、現地条件下における陸側遮水壁の成立性を実証するとともに、施工計画及び施工管理に必要なデータを取得することを目的として、陸側遮水壁の構築に先立って、発電所内で小規模な凍土方式遮水壁を構築した。また、施工計画立案にあたっては陸側遮水壁の成立性を示すために必要な事項を網羅するとともに、長期供運用を前提とした施工方法を試行した³⁾。

II. 試験概要

1. 小規模凍土方式遮水壁の概要と試験項目

小規模凍土方式遮水壁のイメージ図を Fig.1、試験ヤードの状況

を Photo 1 に示す。小規模凍土方式遮水壁は平面形状を 10m 四方の矩形とし、凍結管設置のピッチは 1.0m、深度は 26.4m とした。また、Fig.1 に示すように、図中の左下部と右下部に独立した島状の小凍土域を設け、小規模埋設物が存在した場合に凍結管間隔が広くなる箇所での閉合対策方法についても検証した。試験項目を Table 1 に示す。

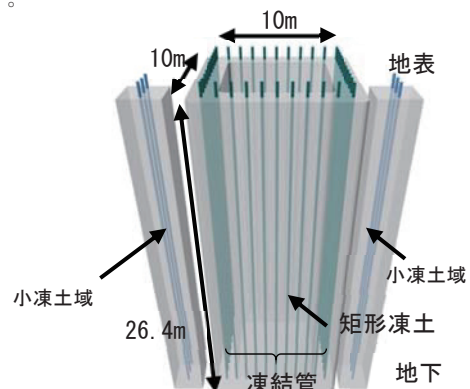


Fig.1 小規模凍土方式遮水壁
(Small Scale Cutoff Walls Using Artificial Ground Freezing)



Photo 1 試験ヤード状況
(View of the Test Yard)

1) 土木営業本部 Business Department Division
2) 東京土木支店 Tokyo Civil Engineering Branch

キーワード：地盤凍結工法、遮水壁、福島第一原子力発電所

Keywords: artificial ground freezing, cutoff wall, Fukushima Daiichi Nuclear Power Station

Table 1 試験項目一覧
(List of Test Items)

試験項目	試験項目
1	小規模凍土方式遮水壁の構築試験
2	維持運転に関する検討
3	融解挙動に関する検討
4	凍結管複列配置部の凍土構築試験
5	遮水性能の検討 (小規模凍土方式遮水壁内部の揚水試験)
6	凍結膨張に関する検討
7	凍結管ピッチに関する追加試験

2. 地質条件

地質条件を Table 2 及び Fig.2 に示す。地層構成は陸側遮水壁と同様であり、地表側から中粒砂岩層、互層部、細粒砂岩層、粗粒砂岩層の4層が帯水層である。ほかは泥質部(固結シルト)となっている。なお、互層部は砂岩と泥質の互層状である。凍結管下端は最下層の第4泥質部に3m分だけ根入れした。

Table 2 地盤の物理特性
(Physical Properties of Soils)

地層区分	土粒子密度	含水比	湿潤密度	乾燥密度	間隙比	飽和度
	ρ_s g/cm ³	w %	ρ_t g/cm ³	ρ_d g/cm ³	e	S _r %
中粒砂岩層	2.674	21.9	1.705	1.398	0.917	65.3
第1泥質部	2.546	51.8	1.628	1.073	1.378	95.9
互層部砂岩	2.641	35.2	1.721	1.276	1.074	85.6
互層部泥岩	2.530	50.1	1.634	1.090	1.328	95.7
第2泥質部	2.551	49.5	1.639	1.096	1.328	95.3
細粒砂岩層	2.622	38.7	1.710	1.236	1.132	89.7
第3泥質部	2.572	48.5	1.678	1.130	1.282	97.6
粗粒砂岩層	2.697	27.0	1.872	1.474	0.832	88.3
第4泥質部	2.563	38.3	1.716	1.242	1.048	92.8

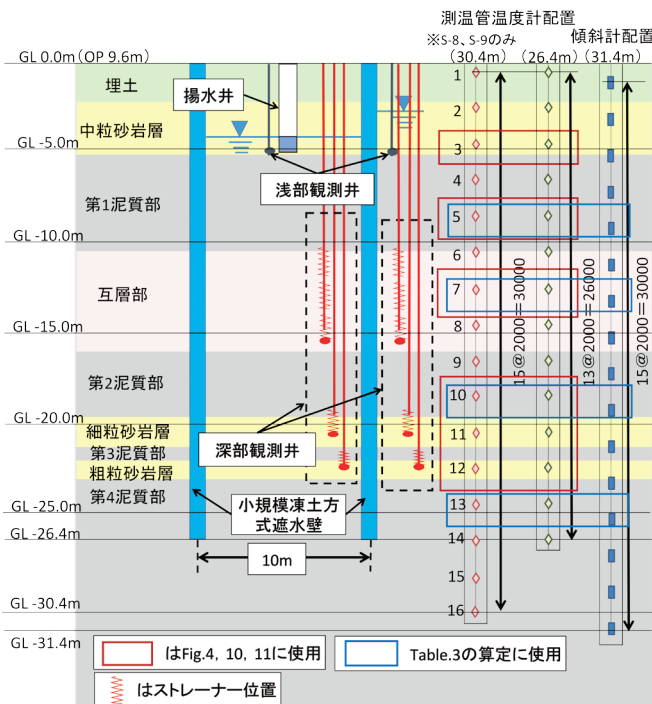


Fig.2 試験エリアの地層構成
(Stratum Structure of Test Area)

3. 凍結管及び計測機器の配置

小規模凍土方式遮水壁における凍結管、測温管、地下水観測井及び傾斜計の詳細配置を Fig.3 に示す。凍結管は地盤凍結工法で一般に用いられる鋼管(外径 114.3mm)でありブライン温度は-30℃とした。測温管は主に凍結管からの離隔 1m 又は 2m の位置に配置し、GL-0.4m から 2m おきの 14 深度に温度計を設置した。測温管の深度は基本的に凍結管と同じ 26.4m であるが、S-8、S-9 の 2 本はほかの測温管よりも 4m 長く、凍結管下端部よりさらに深い地中温度を測定できるようにした。また、地中傾斜計により GL-1.0m から 2m 置きに計 16 深度で水平変位を計測した。

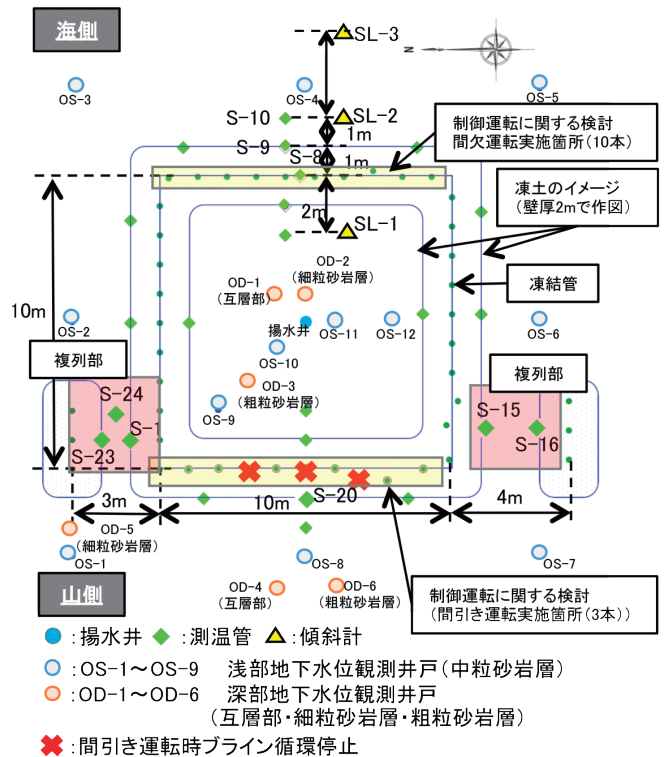


Fig.3 計測機器配置平面図

(Plan View of Layout of Measurement Equipment)

III. 小規模凍土方式遮水壁の構築試験

2014年3月14日に冷凍機の運転を開始し、-30℃のブラインを凍結管に循環して小規模凍土方式遮水壁(以下、遮水壁)を構築した。Fig.4に、遮水壁東面(海側)に配置したS-8~S-10、S-20の4本の測温管による地中温度の計測結果を示す。

3月25日には、凍結管と凍結管の中央部に設けたS-8の温度がほぼ全深度にわたり0℃を下回り(a点)、凍土構築開始後10日前後で凍土が閉合に至ったと推定される。また、5月上旬には、凍結管から1m離れたS-9の温度が全深度にわたり0℃を下回り(b点)、遮水壁の厚さが約2mに達した。冷凍機を停止する直前(7月31日)には、凍結管から2m離れたS-10においてもほぼ0℃を下回っており(c点)、遮水壁の厚さは約4mとなった。

S-9及びS-10において0℃に到達した時期を地層毎に比較すると、泥質部より砂岩層のほうが凍結の進行が速い。これは含水比が相対的に小さく凍結潜熱の放出が少ないためと考えられる。

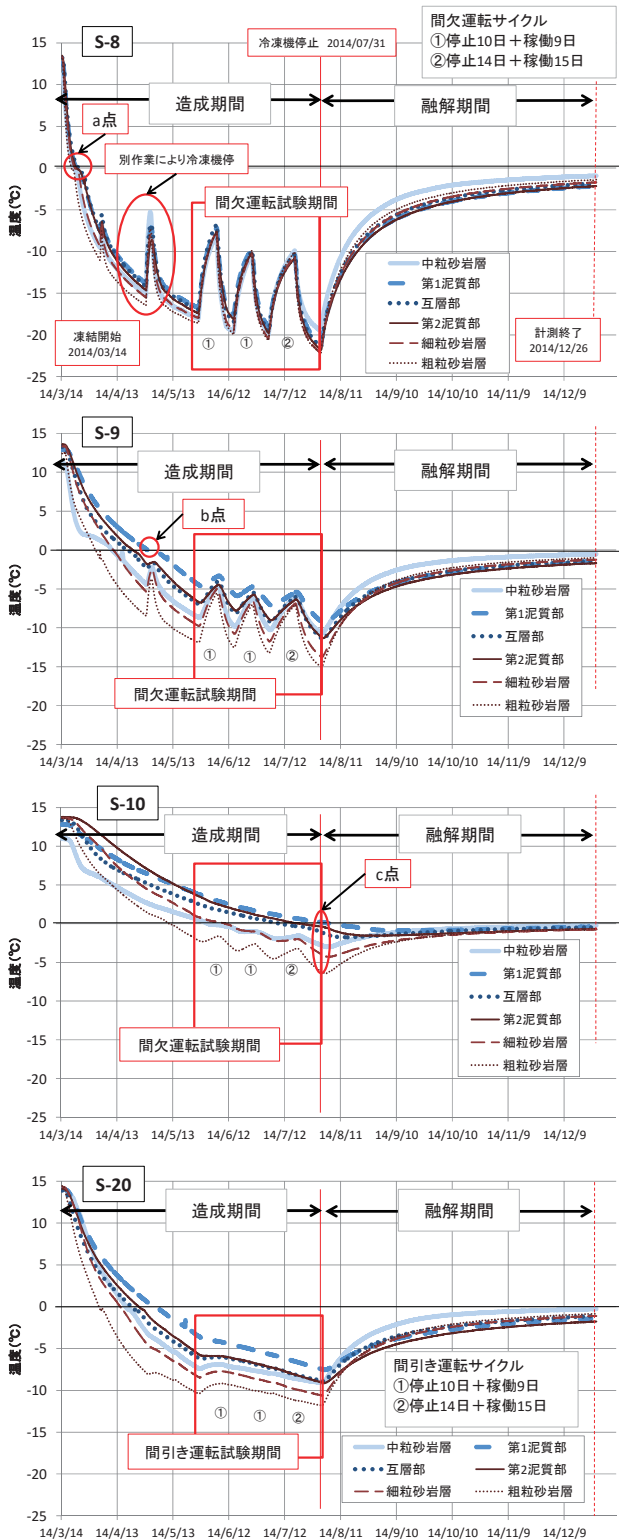


Fig.4 測温管計測結果(S-8~S-10, S-20)
(Result of Underground Temperature Measurement)

IV. 維持運転に関する検討

陸側遮水壁構築後の維持運転期間において凍土の過剰生成を抑制する制御運転検討の一環として、遮水壁構築期間の後半(5月26日~7月31日)に「間欠運転」と「間引き運転」を試行した。間欠

運転では、海側の凍結管10本においてラインの停止/再循環を19日の周期で2回、29日の周期で1回繰り返した。その結果、既に0°C未満に到達(凍結)していた地層においてライン停止に伴い地中温度が上昇した(Fig.4のS-8~S-10)。一方、間引き運転では山側中央部において1本おきに3本の凍結管のライン循環を停止した。その結果、継続的な温度上昇には至らなかったが温度低下速度が鈍化した(Fig.4のS-20)。

これらの結果は、制御運転の手段としての間欠運転及び間引き運転の有効性を示すものである。ほかに効果的な手段として、ライン温度を高温側へシフトさせることが考えられる。

V. 融解挙動に関する検討

冷凍機の運転を停止した7月31日以降も測温管、観測井などの計測を継続し、地中に放置された遮水壁の融解挙動を調べた。その結果がFig.4各図の後半部分である。冷凍機停止時点において遮水壁の壁厚中心S-8の地中温度は-15~-20°C程度であったが、冷凍機停止後の温度上昇とともに遮水壁内の水平及び深度方向の温度差が縮小して、温度が均一化かつ0°Cへ漸近していることがわかる。

また、凍結管列から2m離れのS-10では、冷凍機停止直前に第1泥質部及び第2泥質部の計測点が0°C以下に達した状況であるが、融解試験終了時の12月26日(約4か月経過)の時点でも、全深度において概ね0°C以下を維持していることから、構築された凍土はその融解潜熱のため容易に融解しないものと評価できる。これは停電など不慮の事態による凍土融解の懸念に対して、一定程度の安定性を示す結果と考えている。

VI. 凍結管複列配置部の凍土構築試験

複列配置部とは、凍結管を貫通施工できない幅2~3m程度の中規模埋設物横断箇所において、凍土を閉合させるためにFig.5に示すように埋設物に対向する凍結管列で挟み込むものである。本試験ではFig.3の赤色部に示すように、遮水壁本体に隣接して凍結管3本からなる独立した小凍土域を2か所に配置して、遮水壁本体と同時に複列配置部(凍結管の離隔3m及び4m)の凍土構築試験を行った。

凍土構築期間中(2014年3月14日~7月31日)の複列配置部の地中温度の推移をFig.6に示す。離隔3m部では、離隔中央の測温管S-24(7月4日設置)において設置直後の7月8日には地表付近を除く全深度でほぼ0°C以下となっており、遅くともこの時点で凍土が閉合していたと考えられる。一方、離隔4m部では、冷凍機を停止した7月31日までに測温管S-16の互層部上端付近が凍結に至らなかった。S-16は離隔中央に位置しておらず、離隔中央では凍結がさらに遅れることから、凍結開始から5か月経過しても閉合しないと懸念される。遮水壁本体の閉合日数とのバランスを考慮すれば、複列配置部の凍結管離隔として4mは過大と考えられる。互層部上端付近の凍結の遅れはS-1, S-15, S-23でも見られ、地下水流によるものと推定される。

VII. 遮水性能の検討

遮水壁の遮水性能を確認するため、遮水壁構築開始から約1か月後の4月15日から4月17日にかけて、遮水壁内側の最浅部の中粒

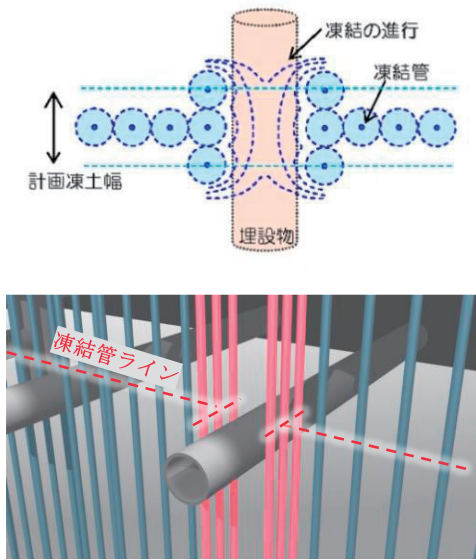


Fig.5 凍結管複列配置のイメージ
(Arrangement Unit of Double Row Freezing Pipe)

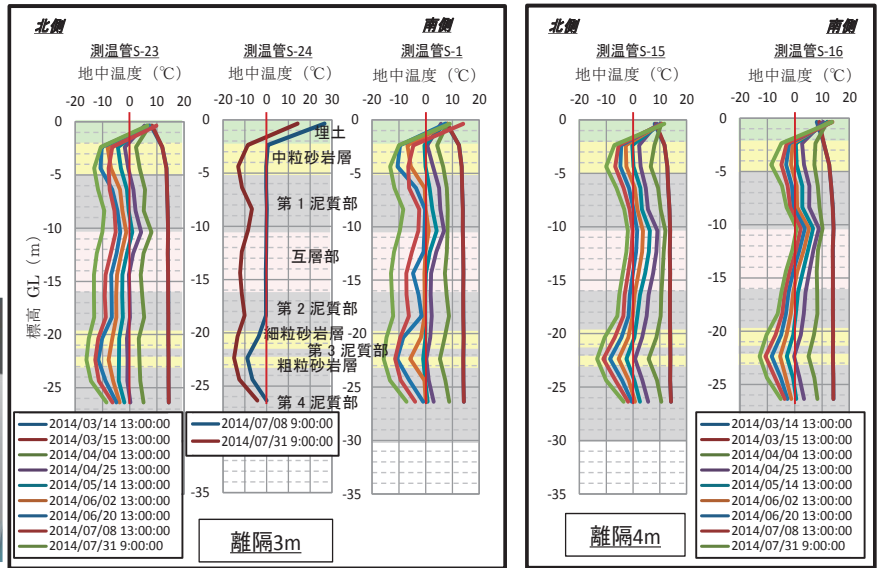


Fig.6 凍結管複列配置部における地中温度の推移
(Underground Temperature Transition of Arrangement Unit of Double Row Freezing Pipe)

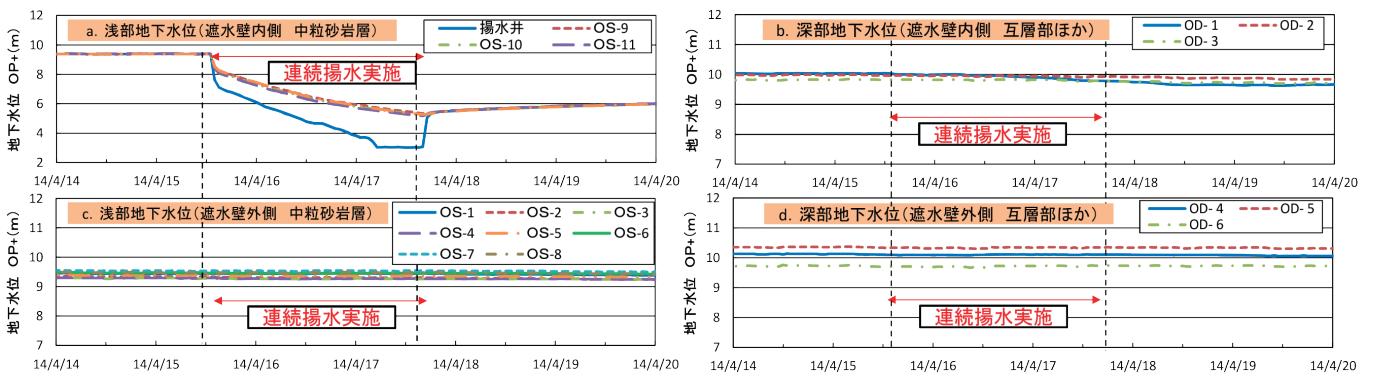


Fig.7 連続揚水時の地下水挙動
(Result of Continuous Pumping Test Measurement)

砂岩層から連続揚水により、遮水壁内外の不圧帯水層（中粒砂岩層）及び被圧帯水層（互層部、細粒砂岩層及び粗粒砂岩層）の水位の変動を調べた。その結果を Fig.7 に示す。

遮水壁内側の中粒砂岩層（a）において揚水井と連動した水位低下が観測された一方、遮水壁外側では中粒砂岩層（c）の水位には反応が見られなかった。また、各被圧帯水層（b, d）においては、遮水壁の内側で中粒砂岩層の水位低下に伴う除荷によると推定されるごく僅かな水位低下が見られたが、連動した遮水壁外側の水位変動は見られず、内外の水位も異なっている。以上から、小規模凍土方式による遮水壁は遮水壁として十分な機能を有していると判断できる。

Ⅷ. 凍結膨張に関する検討

1. 小規模凍土方式遮水壁構築に伴う地盤挙動

陸側遮水壁の構築に伴う凍結膨張による地盤変位を評価するため、遮水壁の海側部分において地中傾斜計により遮水壁直交

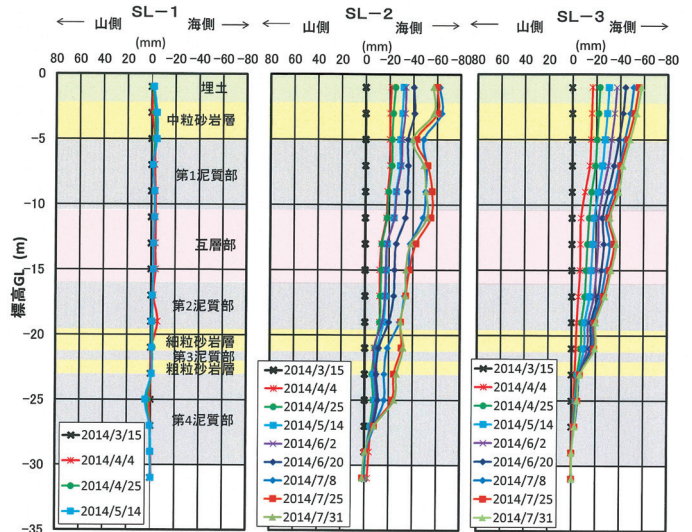


Fig.8 地中水平変位の計測結果
(Result of Underground Horizontal Displacement Measurement)

方向の水平変位を計測した。その結果を Fig.8 に示す。ここで山側への変位を正としている。遮水壁の内側に位置する SL-1 においては、凍土構築に伴う地中水平変位がほとんど発生していない。これは、遮水壁の4面が一体化した構造であり、全体として剛体的に不動であったためと考えられる。

その一方で、遮水壁の外側に位置する SL-2 及び SL-3 では、海側へ向かう水平変位が発生し、凍土構築の進行とともに増大した。また、地中水平変位は、深度が浅くなるにつれ増大する傾向が見られ、地表で最大となった。中粒砂岩層など砂岩層は凍結膨脹性の地質ではないが、上下に隣接する泥質部の凍結膨脹変位に追従して変位が生じた可能性がある。

2. 凍結膨脹率の試算

泥質部の凍結膨脹率 ξ を、地中傾斜計 S-2 の計測結果から次式によって試算した。

$$\xi = \frac{\Delta L}{L} \times 100 \quad (\%) \cdots (1)$$

ここに、 ΔL : 測温管 S-10 の各計測温度が 0°C になった日に対応する傾斜計 SL-2 の累積変位量 (mm), L : 凍結管と傾斜計 SL-2 との離隔 (mm) である。SL-2 は S-10 と同じく、凍結管列から遮水壁の外側方向に 2.0m の位置にある。このため、S-10 が 0°C となった時に SL-2 まで凍結しているとみなされる。

凍結膨脹率の試算結果を Table 3 に示す。前述したように、本試験で構築した遮水壁は 10m 四方と小規模であり、遮水壁内側の地盤は各辺からの影響を同時に受けるため、遮水壁閉合域内の変形は殆ど発生せず、変形が遮水壁外側の地盤に生じた。実際の陸側遮水壁では、南北 500m×東西 200m と大規模であるため、周辺地盤の変形挙動は凍土ラインを中心に左右対称になると考えられることから、凍結による地盤の膨脹特性が同等であれば、本試験で得た凍結膨脹率の半分程度になるものと推察される。

Table 3 SL-2 の計測結果に基づく凍結膨脹率の推定値 (Estimated Value of the Coefficient of Frost Expansion Based on SL-2)

	凍結膨脹率 (%)	SL-2 の変位 (mm)
第 1 泥質部	1.46	-29.1
互層部	0.86	-17.1
第 2 泥質部	0.80	-15.9
第 4 泥質部	0.48	-9.6

IX. 凍結管ピッチに関する追加試験

遮水壁では凍結管を 1.0m ピッチで配置して、順調な凍土構築を確認した。陸側遮水壁では 1,500 本を超える凍結管を施工するため、凍結管ピッチを広げることができれば凍結管本数の削減、ひいては工期短縮に直結する。そこで、追加試験として凍結管の間隔を 20% 広げて、1.2m ピッチとした場合についても凍土構築試験を実施した。ブライン温度はこれまでと同様の -30°C とした。Fig.9 に追加試験の平面配置図を示す。当地点は遮水壁と隣接したヤードであり、地質構成は Fig.2 と同様である。

凍結試験結果を示した Fig.10 から、構築開始 (2014 年 4 月 28 日) から約 64 日程度 (2014 年 7 月 1 日頃) で、AS-2 の地表付近

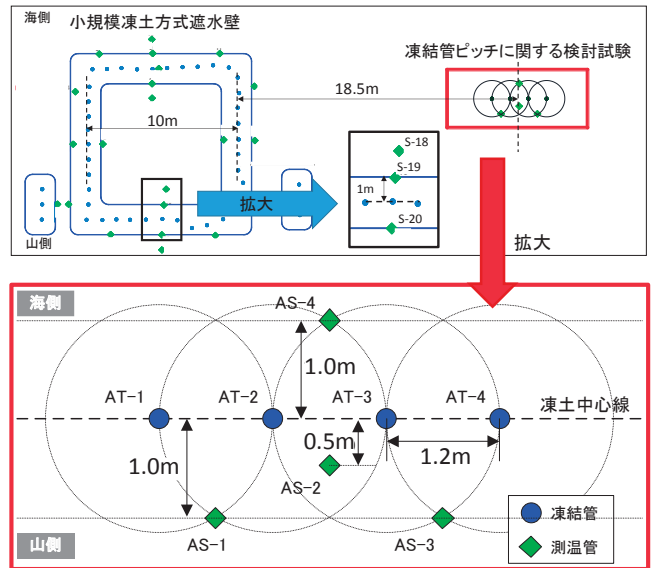


Fig.9 追加試験平面配置図 (Layout of Additional Test)

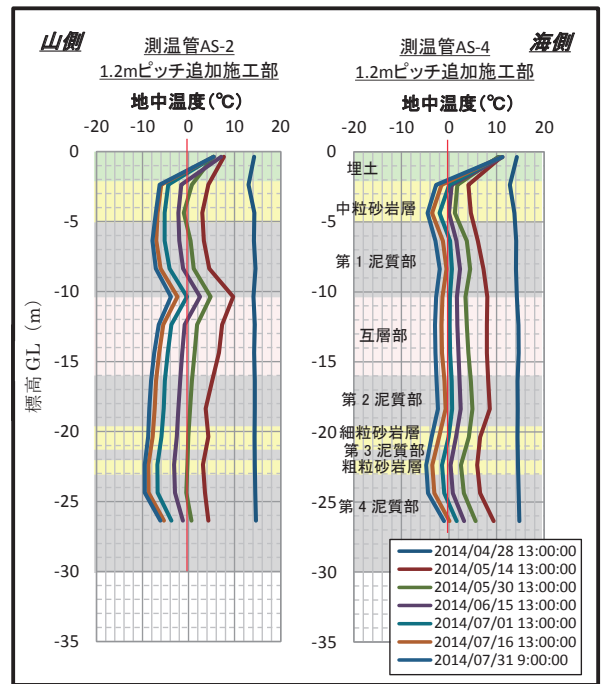


Fig.10 AS-2, AS-4 の地中温度の推移 (Underground Temperature Transition of AS-2 and AS-4)

を除いた計測点の温度が 0°C を下回り、凍土厚が約 1m、構築開始から約 79 日程度 (2014 年 7 月 16 日頃) で、AS-4 の地表付近を除いた計測点の温度が 0°C を下回り、凍土厚が約 2m に成長したことが確認できる。

Fig.11 では測温管 AS-4 と、凍土中心線から離隔が等しい小規模遮水壁の測温管 S-19 の結果を併記している。Fig.11 から AS-4 及び S-19 の各地層で 0°C を下回るまでに要した日数を読み取ると Table 4 となり、帯水層の平均は AS-4 が 56 日、S-19 が 29 日であり、凍結管ピッチを 1.0m から 1.2m に拡大することで 27 日の日数増加となった。なお、この結果を踏まえ、実際の陸側遮水壁においては凍結管ピッチ 1.0m に加え、一部で 1.2m も採用することとした。

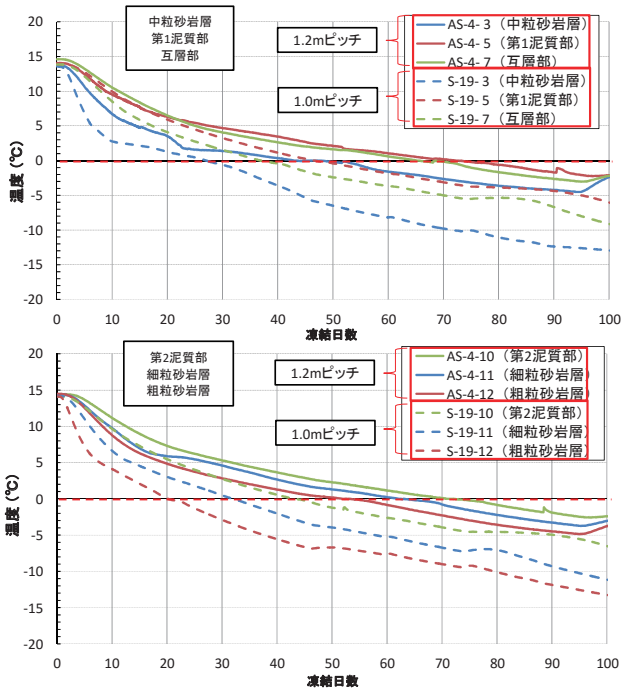


Fig.11 S-19 と AS-4 の温度計測結果

(Result of Underground Temperature Measurement of S-19 and AS-4)

X. おわりに

小規模凍土方式遮水壁の構築により、地盤の凍結特性をはじめ遮水性や凍結膨張特性など陸側遮水壁に向けての基本的な性能と成立性を確認することができた。本試験結果を踏まえて 2014 年 6 月より陸側遮水壁における凍結管設置作業に着手し、2016 年 2 月初旬に凍結設備が完成した。さらに、2016 年 3 月に凍土構築を開始しており、2016 年 6 月現在において凍土構築を継続中⁴⁾である。

Table 4 S-19 と AS-4 の所要凍結日数

(Estimation of Required Day to Freeze at S-19 and AS-4)

測温管名	S-19	AS-4	1.2m ピッチの凍結までの日数と 1.0m ピッチの凍結までの日数の差		
	凍結管ピッチ	1.0m ピッチ		1.2m ピッチ	
地層区分	中粒砂岩層	27 日	43 日	16 日(1.6 倍)	
	第 1 泥質部	47 日	73 日	26 日(1.6 倍)	
	互層部	37 日	66 日	29 日(1.8 倍)	
	第 2 泥質部	43 日	72 日	29 日(1.7 倍)	
	細粒砂岩層	32 日	62 日	30 日(1.9 倍)	
	粗粒砂岩層	20 日	53 日	33 日(2.7 倍)	
帯水層の平均			29 日	56 日	27 日(1.9 倍)
泥質部の平均			45 日	73 日	28 日(1.6 倍)

謝 辞

本検討は、資源エネルギー庁からの委託業務である「凍土方式による遮水技術に関するフィージビリティ・スタディ事業」の一環で実施した。末筆ながら本事業の関係各位に深謝申し上げる。

参考文献

- 1) 佐々木ほか; 凍土方式遮水壁大規模整備実証事業の概要 凍土方式遮水壁大規模整備実証事業 (その 1), 第 71 回土木学会全国大会年次学術講演会, 2016.9.
- 2) 江崎ほか; 凍土方式遮水壁実証事業の概要, 第 70 回土木学会全国大会年次学術講演会, 2015.9.
- 3) 陸側遮水壁タスクフォース HP, <http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/>, 2016.6.
- 4) 東京電力ホームページ, <http://www.tepco.co.jp>, 2016.6.

Demonstration Test for Cutoff Walls Using Artificial Ground Freezing

Issei Sato, Teru Yoshida, Hideki Nagatani¹⁾, Hideyuki Terui, Hisashi Takamura¹⁾ and Masatsugu Yamamoto²⁾

Construction of cutoff walls of Fukushima Daiichi nuclear power station, using artificial ground freezing, is going on, for the purpose of suppressing the increase of contaminated water by reducing the groundwater inflow into the reactor building, where high-level radioactive contaminated water is retained inside. It is a unprecedented challenging efforts in the world to operate such a large-scale of artificial ground freezing for a long period of time enclosing the building. To evaluate the feasibility of the frozen soil cutoff walls, construction of the small scale cutoff walls using artificial ground freezing was carried out at Fukushima Daiichi nuclear power station. The paper describes these test results.