

止水部に凍結技術を利用した仮設ドライアップ工法 「どこでも DRY」工法

宮 沢 明 良・網 野 貴 彦・黒 米 郁

今後、日本国内では建設後 50 年以上経過する構造物が飛躍的に増加するため、老朽化する構造物の適切な維持管理や防災・減災への機能向上といった社会ニーズから補修・補強工事も増大すると考えられる。そこで、港湾・護岸・河川構造物の水中部での補修・補強工事において、鋼製函体にてドライな作業空間を構築する仮設方法として、水を含んだ止水材を凍結させて止水効果を確保する仮設ドライアップ工法(以下「本工法」という)を開発した。本工法は、鋼製函体と対象構造物との接合部に柔軟なスポンジ状の止水材を配置し、海水や河川水を十分に含んだ止水材を液体窒素やブラインを冷媒とする地盤凍結工法の技術を応用して凍結させて、複雑な形状の構造物に対しても止水効果を高める工法である。本稿では、工法概要と開発成果について報告する。

キーワード：補修、補強、仮設、鋼製函体、止水材、凍結、液体窒素、ブライン

1. はじめに

これまで、港湾・護岸・河川構造物の海中部（水中部）から干満帯付近の補修・補強工事は、鋼矢板や鋼管矢板を打設した仮締切り工や潜水作業により施工されてきている。しかし、仮締切り工法では橋梁の桁下などで矢板打設が困難になるといった施工条件による制約があり、施工期間が長く費用が高む。また、潜水作業では気中作業と比べて作業効率が低下するとともに、気中での施工方法が選定できないことや施工の品質を確認することが容易ではないといった問題点があった。このような背景の中で、これまでもドライ空間を確保する仮設工法は存在するものの、複雑な形状の構造物に対する止水性の確保が課題として挙げられている。

今回開発した工法は、水際から水中部での補修・補強工事において、鋼製函体と対象構造物との接合部に柔軟なスポンジ状の止水材を配置し、水を十分に含んだ止水材を地盤凍結工法の技術を応用して凍結させた後に、函体内の水をポンプで排水することによりドライな作業空間を構築する工法であり、複雑な形状の構造物に対しての止水性を高めるとともに、安全性及び作業効率を兼ね備えた仮設ドライアップ工法である。

本工法は、以下の特徴を有するものと考えられる。

- ①柔軟なスポンジ状の止水材を凍結させることで、複雑な形状の構造物に対する止水性を発揮することが可能となる。

- ②函体及び止水部への凍結技術の利用によりドライな作業空間を構築することで、仮設鋼矢板による仮締切り工法と比較して本工事への早期着手が可能となる。
- ③海水や河川水を凍結するので周辺水域における水質への影響がなく、環境への負荷の低減が期待できる。
- ④同じ形状の構造物へ函体を転用することで、経済性の向上が期待できる。

本稿では、本工法の概要と止水性に関して「大型水槽内実験」、「実海洋環境実験」及び「流水条件下での室内凍結実験」により検証した結果を示す。

2. 本工法の概要

(1) 工法概要

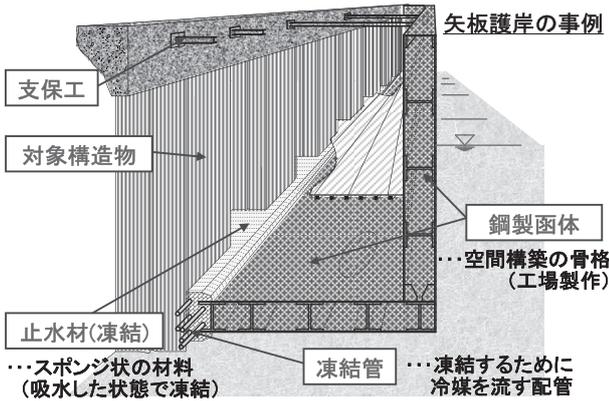
本工法の概要図を図-1に示す。

(a) 鋼製函体（以降、函体と称す）

函体（H形鋼、鋼板など）はドライな作業空間を構築するための骨格であり、現場の施工上の制約条件を考慮して設計を行い、対象構造物の形状寸法及び必要な作業空間の寸法に合わせて工場で製作する。

(b) 止水材

止水材は柔軟で吸水性の高いスポンジ材料とスポンジ内部の空隙に含まれる水を凍らせた凍結体である。止水材は対象構造物と函体との接合部に配置し、両者の隙間を閉塞して十分に吸水した状態で凍結すること



図一 本工法の概要図

により止水効果を高める役割となる。

(c) 凍結管と冷媒供給装置

凍結管は吸水した止水材を凍結させるために止水材内部に配置する。凍結管端部を冷媒供給装置に接続して、凍結管内部に冷媒を流通させることで止水材を凍結させる役割となる。

(d) 支保工

支保工は函体に作用する外力に抵抗する構造部材であり、函体の変形を抑えて凍結止水部に負荷を与えない役割となる。

(2) 施工手順

本工法の施工フローを図一2に、止水部断面の配置を図一3および写真一1に示す。

(a) 函体製作, 凍結管・止水材設置

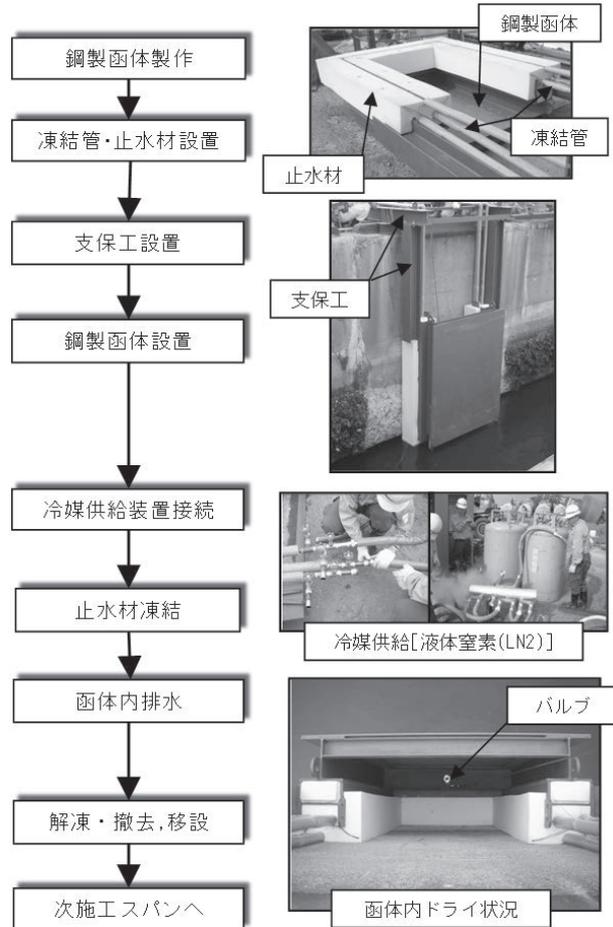
対象構造物の形状寸法を事前に測量する。5～10 cm 程度の誤差はスポンジ状の止水材の変形で対応できるが、凍結管が設計位置に配置されるように対象構造物との位置を考慮して函体を製作する必要がある。なお、現場条件により水位差が生じる場合は、函体内外の水位差を抑制する設備（注排水ポンプ、開閉バルブなど）を工場製作時に設置する。函体の工場製作完了後直ちに、気中部にて凍結管とスポンジ状の止水材を設置する。

(b) 函体設置

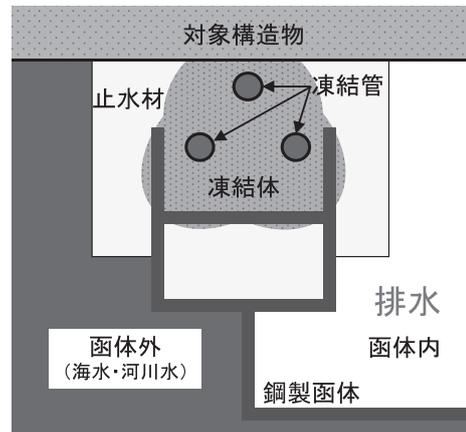
凍結管と止水材を設置した函体を所定の位置に吊り込んで、事前に対象構造物に設置した支保工により函体を固定する。止水性には対象構造物に対して凍結体が造成される位置が重要となるため、この時点で止水材と対象構造物との間に大きな隙間が生じていないことを確認する。

(c) 冷媒供給装置接続・凍結開始

函体に設置した凍結管の両端部に冷媒供給装置からの配管を接続する。凍結管内に流通させる冷媒として、



図二 本工法の施工フロー

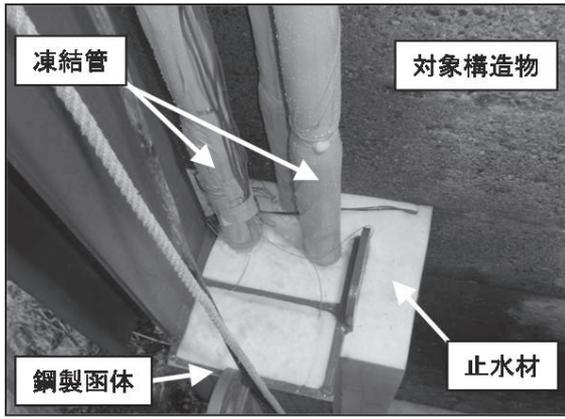


図三 止水部断面の配置図

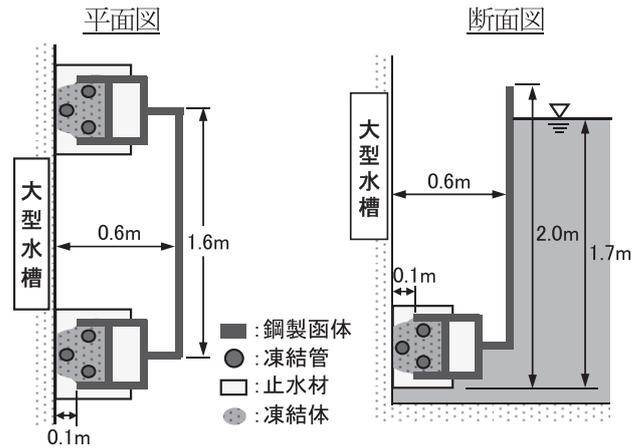
液体窒素 (LN2: -196℃) あるいはブライン (塩化カルシウム溶液: -25℃程度 [条件により設定]) を使用して凍結を開始する。冷媒の熱量を効率的に凍結へ作用させるために、事前温度解析によって凍結管の径・配置・本数を決定し、凍結完了時間の予測を行う。

(d) 函体内部排水

止水部の凍結が完了したら、函体内部の水を水中ポンプで排水する。止水材への凍結体造成完了の目安



写真一 止水部断面の写真



図一四 大型水槽内実験（実験I）平面図及び断面図

は、止水材内部の各所に設置した熱電対による温度計測データの確認により行う。函体内部の排水完了後は、本工事の施工に影響のない状態に漏水が抑えられていること確認する。

(e) 止水部解冻, 函体撤去・移設

本工事の施工及び検査が完了した後に、凍結した止水材の解冻を行う。解冻後に函体を撤去して次の対象構造物に移設し、同様の手順でドライな作業空間を構築する。

3. 止水性確認実験

本工法の実用化に向けて「大型水槽内実験」, 「実海洋環境実験」及び「流水条件下での室内凍結実験」を実施した。それらの実験において検証した結果を示す。

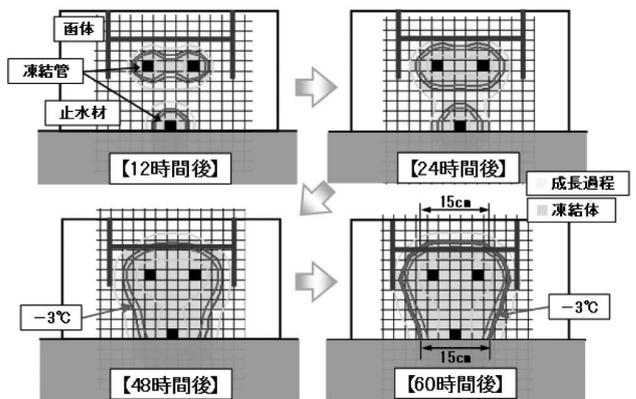
(1) 大型水槽内実験（実験I）

(a) 実験概要

実験は大型水槽（W1.8m × L3.7m × D1.8m）内で実施した。図一四に実験の平面図及び断面図を示す。製作した函体に止水材と凍結管を配置して大型水槽の側面に止水材が接合するように函体を設置した。冷媒として冷凍機で-25℃に冷却したブラインを凍結管内に流通させて、水道水を吸水した止水材に凍結体を造成した。熱電対により止水材内部の温度測定を行って温度変化と経過時間を計測し、函体内を排水して凍結による止水性とドライ状態の維持を確認した。

(b) 実験結果

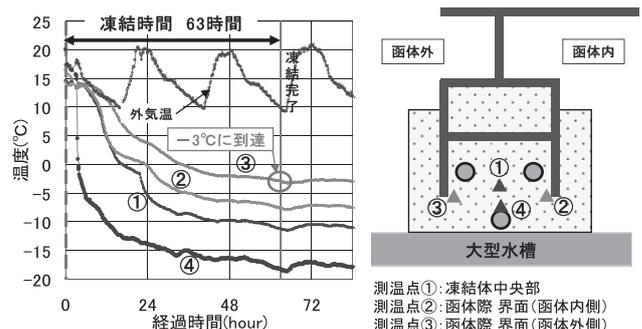
図一五に事前温度解析結果を示す。解析手法は差分法であり、外気温・水温が15℃の一定の条件で冷媒に-25℃のブラインを使用したときの函体底面中央部における解析結果である。函体側及び対象構造物側の両方に-3℃以下の凍結体が厚さ15cm以上になった時点で凍結体が造成されたと判定すると、想定凍結



図一五 事前温度解析結果（実験I）

時間は60時間であった。

一方、図一六には事前解析と同じ断面における実験での止水材内部温度と経過時間（凍結時間）との関係を示す。最も温度低下（凍結速度）が遅い測温点③が-3℃に到達した時点で止水効果を得る凍結体が造成されたと判定すると、実験結果での凍結時間は63時間であった。これは事前温度解析結果とほぼ同等の凍結時間であり、解析により概ね予測可能であることが確認できた。凍結完了後、函体内を排水して函体内外に水位差1.7mが生じても止水部分での函体内への水の流入は確認されず、十分な止水性が確認できた。



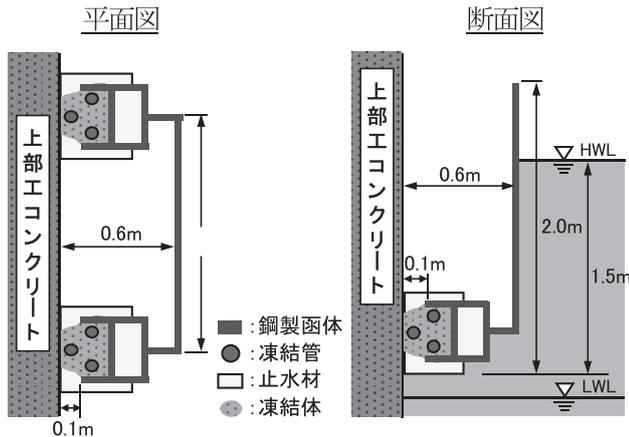
図一六 実験温度計測結果（実験I）

また、冷媒供給を継続し函体内部のドライ状態を維持できることも確認した。

(2) 実海洋環境実験 (実験Ⅱ)

(a) 実験概要

図一七に示すように実験Ⅰと同様の函体を使用して、実海洋環境に存在する東京湾内の港内の岸壁上部コンクリートを対象構造物として実施した。止水材と凍結管を配置した函体を岸壁上部コンクリートの側面に止水材が接合するように設置し、函体上部を支保工材で固定した。冷媒として液体窒素 (LN2: -196℃) を凍結管内に流通させて、海水を吸水した止水材に凍結体を造成した。凍結する際には、止水部における水の動きを最小限にすることが必要であり、函体底面に設置したバルブを開いた状態にすることで、潮位変動 (干満差 2.0 m) による函体内外の水位差が生じないように調整した。また、満潮時が凍結完了時間となるように事前解析での凍結時間から逆算して冷媒を供給する開始時間を設定した。

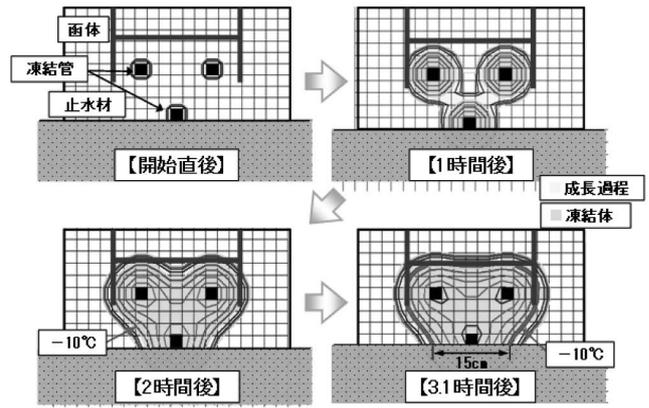


図一七 実海洋環境実験 (実験Ⅱ) 平面図及び断面図

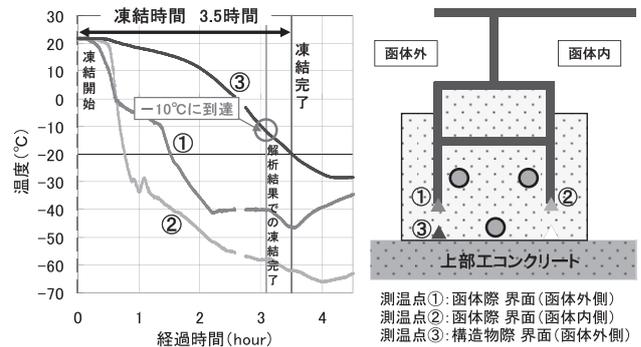
(b) 実験結果

図一八に事前温度解析結果を示す。解析条件は、外気温・水温 20℃一定のもとで冷媒に -196℃の液体窒素 (LN2) を使用したときの函体底面中央部についての結果である。対象構造物側および鋼製函体側の両方に -10℃以下の凍結体が厚さ 15 cm 以上造成された時点で凍結体が造成されたと判定すると、想定凍結時間は 3.1 時間であった。

図一九には事前解析と同じ断面における実験での止水材内部温度と経過時間 (凍結時間) との関係を示す。最も温度低下 (凍結速度) が遅い測温点③が -10℃に到達した時点の経過時間は、事前温度解析結果と同様であり解析により概ね予測可能であることが確認でき



図一八 事前温度解析結果 (実験Ⅱ)



図一九 実験温度計測結果 (実験Ⅱ)

た。潮位変動の影響から H.W.L. 付近の確実な凍結を考慮して満潮時間を経過するまで凍結を実施したため、実験結果での凍結時間は 3.5 時間であった。凍結完了後、函体内を排水して函体内外に水位差 1.5 m が生じても止水部分での函体内への水の流入は確認されず、十分な止水性が確認できた (写真一2)。また、冷媒供給を断続的 (停止 1 時間、供給 20 分) に行っても函体内部をドライ状態に維持できることを確認した。さらに、冷媒供給を停止して凍結体の融解が進んで函体内に水が流入するまでの時間は、約 5 時間であったことを確認した。



写真一2 実海洋環境実験 (実験Ⅱ) での止水性確認

(3) 流水条件下での室内凍結実験 (実験Ⅲ)

(a) 実験概要

本工法において、函体内外の水頭差によって凍結止水部に水流が存在する条件下で止水効果を得ることが可能であるかを検証するための室内実験を行った。図-10に示すようなA水槽とB水槽の間に水頭差が再現できる実験装置とし、両水槽の間に内部に凍結管を配置した止水材を設けて、冷媒として冷凍機で-25℃に冷却したブラインを凍結管内に流通させて、海水を吸水した止水材に凍結体を造成した。凍結体が造成されたことを確認するためには、止水材内部の各所に設置した熱電対の計測温度により判断している。実験条件は、Case1：水頭差が約500mm、A水槽及びB水槽内の海水の温度を制御しない場合、Case2：水頭差が約500mmと0mmを2時間毎に変動、A水槽内の海水温を約24℃に制御した場合、Case3：水頭差が約60mm、A水槽内の水温を約24℃に制御した場合の3ケースについて実施した。

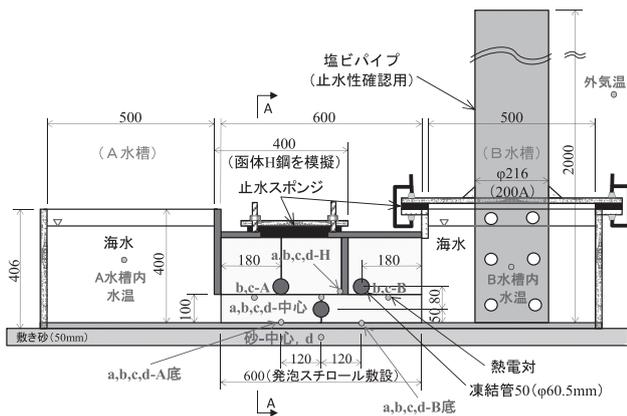
(b) 実験結果

本実験の結果を示すにあたり、全ての温度計測点でのデータを示すのは難しいため、止水材と底面(対象構造物)の界面におけるA水槽側(a,b,c,d-A底)とB水槽側(a,b,c,d-B底)の温度計測点に着目して、Case1は図-11、Case2は図-12、Case3は図-13

に温度計測データのグラフを示す。

Case1では、凍結開始からの時間経過とともに0℃を下回り凍結体が確認できる箇所が増えたものの、水頭差によって最後まで水流が残る箇所では凍結体を造成することが難しいことを確認した。なお、凍結開始66時間後から水頭差0cmの状態を2時間保持したところ、止水効果が確認できる結果を得た。これは、両

側面図



断面図

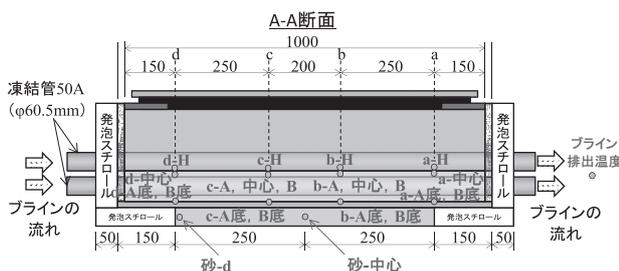
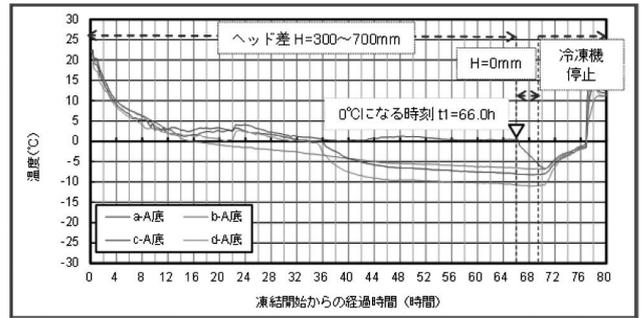


図-10 流水条件下での室内凍結実験(実験Ⅲ)装置図

A水槽側



B水槽側

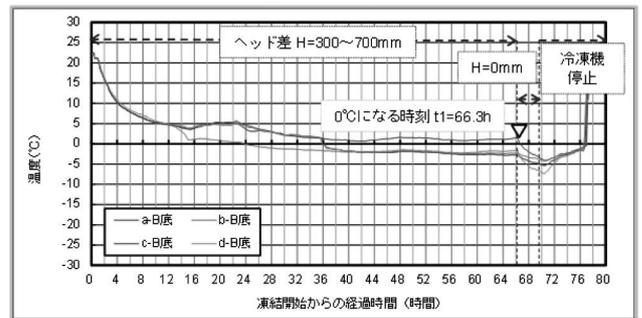
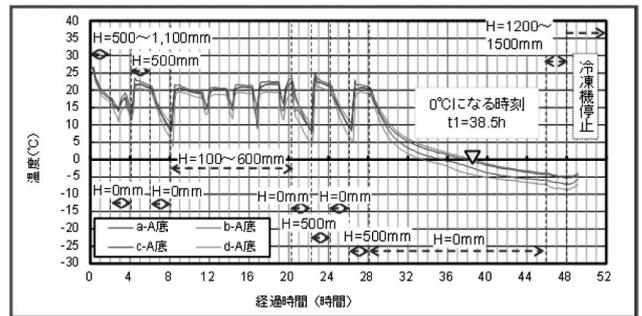


図-11 温度計測結果 (Case1)

A水槽側



B水槽側

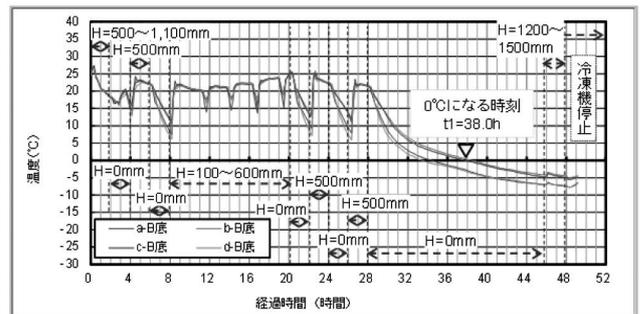
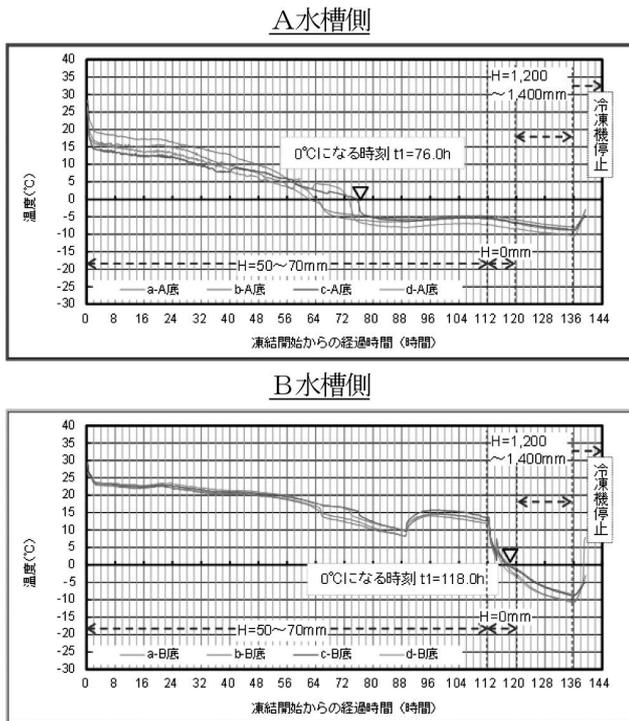


図-12 温度計測結果 (Case2)



図一 13 温度計測結果 (Case3)

水槽内の海水温度が経過時間とともに低下する条件であったためと考えられる。

Case2では、水頭差がある場合とない場合が2時間毎に繰り返される条件であり、水頭差がない状態が断続的に発生することで凍結体が造成されたと考えた。しかし、海水温を約24℃に制御したことと、水頭差が生じた際に海水が流入して一度凍りかけた凍結体が解凍してしまうことにより、止水効果を確認するまでに至らなかった。なお、凍結開始28時間後から水頭差0cmの状態を18時間保持したところ、止水効果が確認できる結果を得た。

Case3では、水頭差が約60mmと比較的小さい状態でも、Case1と同様に水頭差によって最後まで水流が残る箇所では凍結体を造成することが難しいことを確認した。また、凍結開始から112時間後に水頭差0cmの状態を2時間保持してから水頭差を800mmとした場合においても、完全な止水は達成できなかった。しかし、その後に水頭差0cmの状態を4時間保持してから水頭差を1,200~1,400mmとしたところ、完全に止水効果を確認できる結果を得た。このため、水温が約24℃の条件でも水頭差を与えないことで止水効果は十分に期待できると考えられる。

これらの結果より、本工法では凍結体造成時には函体内外の水頭差を抑制する補助工法が必要である。

(4) 止水性確認実験のまとめ

仮設ドライアップ工法での凍結技術を利用した止水方法について、実験結果から以下の事項を確認した。

- ① 函体と対象構造物との間に柔軟なスポンジ状の止水材を配置して、十分に水を含んだ状態で凍結させることで止水効果を発揮し、ドライな作業空間を構築することが可能である。
- ② 凍結に使用する冷媒は、ブライン(塩化カルシウム溶液)と液体窒素(LN2)の両方において止水効果を発揮するための凍結が可能であり、事前温度解析結果から実施工での凍結時間を概ね把握することが可能である。
- ③ 本工法において凍結により止水効果を発揮するためには、凍結体造成時には函体内外の水頭差をできる限り小さくし、凍結止水部に生じる水流(流速)を抑制することが極めて重要である。

4. おわりに

本稿では、止水部に凍結技術を利用した本工法仮設ドライアップ工法の概要および工法の止水性確認について実験的に検証した結果を報告した。今後、老朽化した港湾・護岸・河川構造物の補修・補強工事が増大していくと推測されるため、様々な形状の構造物に対する止水性・安全性の確保により有用性の高い工法へと発展させていきたいと考えている。

JCMMA

[筆者紹介]



宮沢 明良 (みやざわ あきら)
東亜建設工業㈱
土木事業本部 エンジニアリング事業部
シビルリニューアル事業室



網野 貴彦 (あみの たかひこ)
東亜建設工業㈱
技術研究開発センター
新材料・リニューアル技術グループ
グループリーダー



黒米 郁 (くろごめ いく)
東亜建設工業㈱
技術研究開発センター
新材料・リニューアル技術グループ
主任研究員