

海上におけるスリップフォーム工法による RC ケーソンの製作

谷口 修^{*1}・水野剣一^{*2}・西本洋之^{*3}・増田兼士^{*4}

概 要 国内初となる海上でのスリップフォーム工法による RC ケーソンの急速施工を行った。気温変化の大きい条件下で型枠を一定の速度で上昇させるために、気温予測値をもとに遅延剤の添加量を自動計算するアプリケーションを構築し、コンクリートの硬化時間の制御を行った。また、スリップフォーム工法の型枠が下側に開いた構造であり、型枠下部からの脱水が生じていた。それらを模擬できる円柱供試体用の型枠を作製して強度試験を実施し、強度管理を行った。本稿では施工概要とコンクリート管理について報告する。

キーワード：海上ケーソン製作、スリップフォーム、若材齢強度、遅延剤

1. はじめに

スリップフォーム工法（以下：SF 工法）は、型枠をスライドさせることで同一断面の構造物を急速施工できる工法であり、煙突や PC タンクなどの搭状構造物に数多く適用されている。港湾施設の RC ケーソン製作に使用された事例は海外ではシンガポールなどで多数の施工事例が存在するが、国内では昭和 50 年代の白島石油備蓄基地での 1 例のみと推察される¹⁾。

従来の RC ケーソン製作工法では 4 000 t クラスのケーソンの壁部を構築するのにフローティングドック（以下：FD）上で 2～3 カ月を要していたところ、この SF 工法を適用することで 8～9 日間/函の急速施工が可能となる。

SF 工法は、コンクリートが脱型強度に発現次第、型枠を上昇（脱型）させるものであり、脱型が早すぎてもコンクリートが自立できず、脱型が遅すぎても型枠とコンクリートの付着強度が大きくなり、上昇することが困難となる。そのため、適切な強度発現時期に型枠を上昇させることが必要であり、コンクリートの強度管理が重要となる。

本稿では、海上における SF 工法による RC ケーソン製作を鹿児島県鹿児島市で行った事例として FD 上に SF 設備を搭載した設備の概要、施工方法、コンクリートに関する品質管理について報告する。

2. SF 工法の概要

2.1 FD 上の設備

海上での SF 工法による RC ケーソン製作は、国内最

大級の 11 000 t 級と 7 500 t 級との 2 隻の FD を使用し、11 000 t 級 FD 上に幅 35 m、延長 37.8 m、高さ 35.5 m のガントリーを設置し、その内部に上層、中層、下層フロアからなる 3 層の SF 設備を構築している（写真-1、写真-2）。

上層には昇降用の油圧ジャッキが 28 機配置されており、このジャッキによって上層、中層、下層フロアが吊り下げられる構造となっている。SF の設備は、スウェーデン



写真-1 海上での施工状況

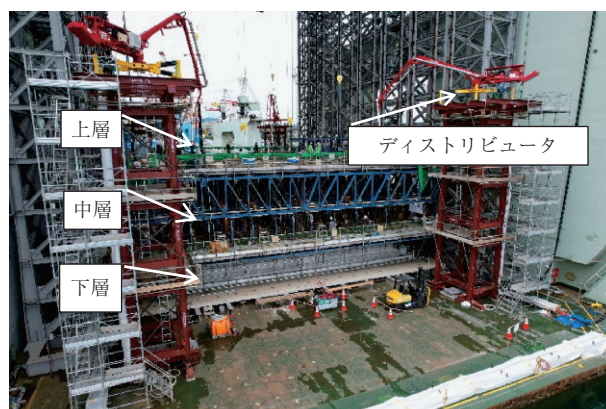


写真-2 FD 上の設備

*1 たにぐち・おさむ／五洋建設㈱技術研究所土木技術開発部 土木材料グループ長（正会員）

*2 みずの・けんいち／五洋建設㈱技術研究所土木技術開発部 担当課長（正会員）

*3 にしもと・ひろゆき／五洋建設㈱九州支店南九州建設事業所 工事主任

*4 ますだ・けんじ／五洋建設㈱九州支店南九州建設事業所 工事所長

の Byggin-Uddemann 社製のものを使用し、FD 上での
ガントリー等の組み立てと SF 設備の設置は、国内の造
船所にて行った。

ガントリーの天井部にはテルハクレーンが8基配置さ
れており、これらを用いて鉄筋の上層への荷揚げ、コン
クリート圧送ホースの移動、各種資機材の移動を行う。

製作する RC ケーソンは、全 24 マスが隔壁で仕切られ
ており、各マスの位置に対応するように上層にはコンク
リート圧送用のホースを中層に下ろすための開口部を設
けている（写真-3）。

中層フロアでは、ヨークと呼ばれる部材にて高さ 1 m
の型枠を固定しており、鉄筋の組み立てとコンクリートの
打込みを行う（写真-4）。

下層フロアは吊り足場構造となっており、型枠の上昇
に伴って現れたコンクリートに対して被膜養生剤の散布
と左官作業を行う。

11 000 t 級 FD のデッキ上には構台を 4 機設置し、その
上にディストリビュータを配置した。ディストリビュータは、
ポンプ車からの圧送配管に接続して SF の上昇に伴って上
層フロアにコンクリートを供給できるようにした（写真-2）。

2.2 RC ケーソン底版の製作

RC ケーソン底版の製作は、まず 7 500 t 級 FD 上に設

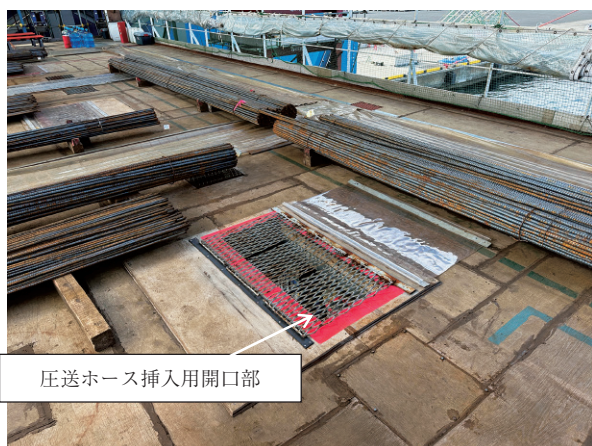


写真-3 上層での鉄筋仮置きと開口部



写真-4 中層

置した台座上で鉄筋と型枠の組み立てを行った。その後、
7 500 t 級と 11 000 t 級 FD をドッキングさせてウインチ
にて鉄筋と型枠を載せた台座をけん引して 11 000 t 級 FD
へ移動させた。台座移動完了後、底版のコンクリートの
打込みと型枠脱型を行い、底版コンクリートを構築した。

FD 2 隻を使用した台座の移動方式を採用した理由は、
陸上での施工場所を確保できないことや 7 500 t 級 FD で
底版のコンクリート打込みまで行くと重量の関係から 11 000
t 級 FD への移動が困難となるためである。また、11 000 t
級 FD には、SF 設備が存在するため、底版鉄筋と型枠の
組み立てにクレーンが使用できない制約もある。

2.3 SF の施工

底版の構築後、SF 設備を降下させ底版コンクリート上
に SF 型枠を設置した。

SF 工法では、RC ケーソンの壁高 15.5 m に対して冬
期（12 月～3 月）の場合で 9 日間、それ以外の季節では
8 日間の施工を行う。ただし、コンクリート打込みは 24
時間連続 2 日の打込みとし、その後 1 日は主筋と配力筋
の上層への荷揚げと主筋の設置のため打込みを中断し、
再び 24 時間連続のコンクリート打込みを実施する工程
である。

作業に従事する人員は、9 時間勤務の 3 交代制（8:00
～17:00、16:00～1:00、0:00～9:00）とした。また、ポ
ンプ車は長時間の稼働によりポンプ車ホッパー内のコン
クリートが硬化するおそれがあることから 12 時間ごとに
車両を交換するものとした。圧送配管は 5 インチのもの
を使用し、最大で揚程約 20 m、延長約 100 m である。

製作するケーソンは 24 マスを 4 つの区画に分けて、岸
壁上に配置したポンプ車 4 台で打込みを分担し（写真-5）、
各打込み班の施工位置と打込み順序を定めて 1 マスごと
に時間を区切って各打込み班の打込み開始が均等になる
ように管理した。また、打込み高さは 1 層 20 cm として
均等な高さで打ち上げるようにした。これは打込み高さに
むらが生じるとコンクリートの硬化が平面的に異なり、
SF の一律の上昇に障害となるためである。

1 層（高さ 20 cm あたり）の打込みは、冬期（12 月～
3 月）で 2 時間、それ以外の季節で 1 時間 45 分の施工時



写真-5 ポンプ車配置状況

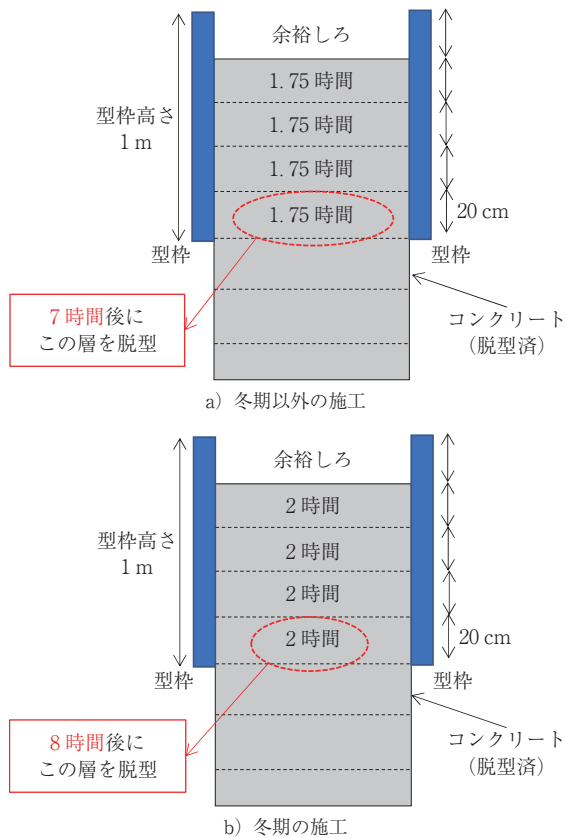


図-1 1層の施工時間と脱型時間の関係

間とした。この時間は、コンクリートの凝結時間から1層の打込み時間を設定したものであり、型枠高さ1mのうち20cmは余裕しろとして残り80cmを4層とした場合に冬場ではコンクリートの脱型強度（ $0.06 \sim 0.1 \text{ N/mm}^2$ ）に至る時間を8時間（8時間 $\div$ 4層=2時間）、それ以外は7時間（7時間 $\div$ 4層=1時間45分）としたためである（図-1）。層ごとの打ち重ね時間は最大で2時間となるが、気温の変化に合わせて遅延剤を添加し、特に暑中環境下では後述するように 2 kg/m^3 以上の超遅延剤をコンクリートに添加したためコールドジョイントの発生は見られなかった。

下層では、SFの上昇に伴って材齢7時間から8時間で脱型したコンクリート表面が現れるが、足場が型枠とともに上昇するためシート等の養生ができないことから、被膜養生剤を散布して左官仕上げてコンクリート表面に練りこむようにして、コンクリート表面の乾燥を防止するようにした。

2.4 鉄筋の組み立て

鉄筋の組み立ては、コンクリート打込み中にSFの上昇に合わせて上層に仮置きした鉄筋（配力筋）を鉄筋スライダーを使用して中層に供給して、組み立てを行った（写真-6、写真-7）。コンクリート打込みと鉄筋組み立てが混在して施工することになるため、中層には多くの人員が配置されることになる。

2.5 進水・仮置き

FD上の構台やディストリビュータなどの設備を撤去



写真-6 上層から中層への鉄筋供給

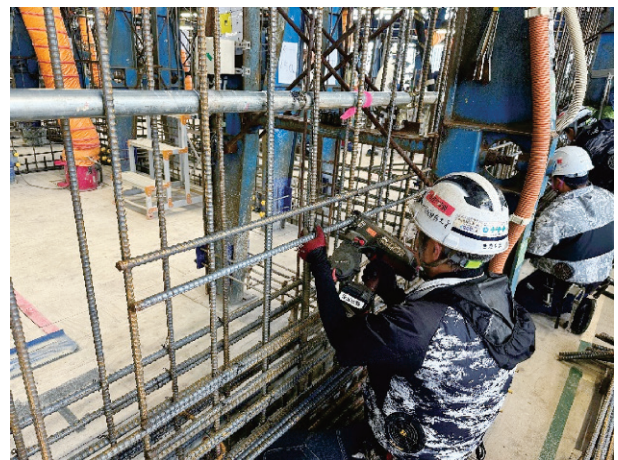


写真-7 中層での鉄筋組み立て



写真-8 ケーソン曳きだし

し、コンクリート打込み完了から10日間養生を行った。その後、FDを所定の場所まで曳航し、ケーソンを進水させ、仮置きマウンドまで曳航させて仮置きし、一連の製造工程は終了となる（写真-8）。

3. コンクリートの品質管理

3.1 使用コンクリート、配合

24時間施工で安定的に生コンを納入する必要があるこ

とから近隣の4つの生コンプラントを使用し、ケーソン1函あたりそのうちの3プラントから供給されるようにした。打込み2日間は24時間連続して同一プラントから供給を受け、その後、他のプラントに変更して2日間連続して供給を受ける体制とした。

本工法では前述したように1層20cmの打込み速度を1.75時間あるいは2時間にするため、ポンプ車1台あたりの圧送量は冬期：約1.9m³/h、夏期：2.1m³/hと一般的なコンクリート打込みに比べて少ない。さらに圧送距離が最長100m程度、高低差20m程度であり、スランプの低下が見込まれたことから荷卸し時にスランプ18cmとなるコンクリートを使用した。また、施工当初は上層において材料分離に伴う圧送配管の閉塞が発生したことからコンクリートの粘性を上げるために単位セメント量を20kg/m³増やした配合に修正した。使用プラントAの改善前と改善後の配合を表-1に示す。

4つのプラントはセメントメーカー、混和剤メーカー、細骨材の産地の組み合わせと配合がそれぞれのプラントで異なっている。そのため、各工場でのコンクリートは粘性や若材齢強度の発現性状が異なることや、4週強度では39～46N/mm²となるなどのばらつきが見られた。

3.2 気象条件

図-2は多くのSF工法によるRCケーソン製作事例を有するシンガポールと鹿児島市の年間気温を比較したものである。本工法の施工場所である鹿児島市は、シンガポールに比べ年間の気温変動も大きく、1日の気温差が大きい傾向にある。さらに同図の棒グラフは、鹿児島市での2021年の1日の気温差が10℃以上となった日の日数を示している。冬期（11月～3月）においては1日の気温差が大きい日が多く現れる傾向にある。これらの気温変動に合わせて脱型強度（0.06～0.1N/mm²）の発現をコントロールするために生コンプラントにて遅延剤を添加して硬化速度をコントロールするようにした。

3.3 遅延剤の添加量管理

（1）遅延剤添加量の算定

遅延剤の添加量は、製造時の気温と気温予測値をもとに設定する必要がある。また、使用する4つのプラントで使用材料・配合が異なることから、同一温度でも遅延剤添加量は異なる。そのため、手計算では製造バッチごとの計算が必要になり手間もかかることからタブレット端末にて自動で添加量を計算できるアプリケーションを構築した（図-3）。このアプリケーションをインストールしたタブレット端末を生コンプラントに貸与し、オペレータがタブレットの端末を見て表示された遅延剤添加量を配合に反映できるようにした。また、生コンプラントの配合を制御するシステムがセキュリティの関係からインターネットと接続しない環境であったため、コンクリートの納入伝票に動荷重の計測値を印字されるようにして搬入時に荷卸し場所にて遅延剤添加量を確認できるよう

表-1 配 合

	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
			セメント	水	海砂	砕砂	粗骨材	高性能 AE 減水剤
改善前	49.9	45.0	349	174	542	239	988	1.86
改善後	47.4	44.5	369	175	529	233	988	1.96

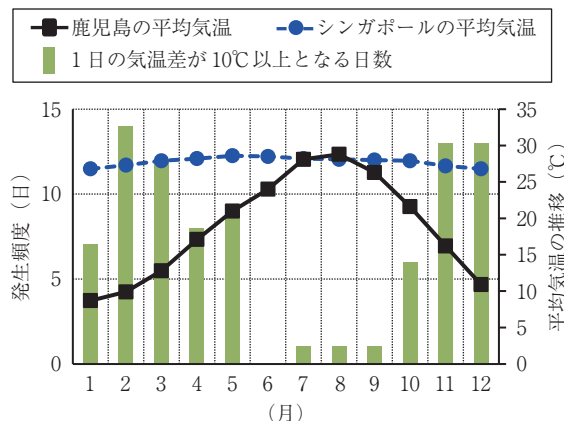


図-2 1日の気温差が10℃以上となる日数（2021年、鹿児島）

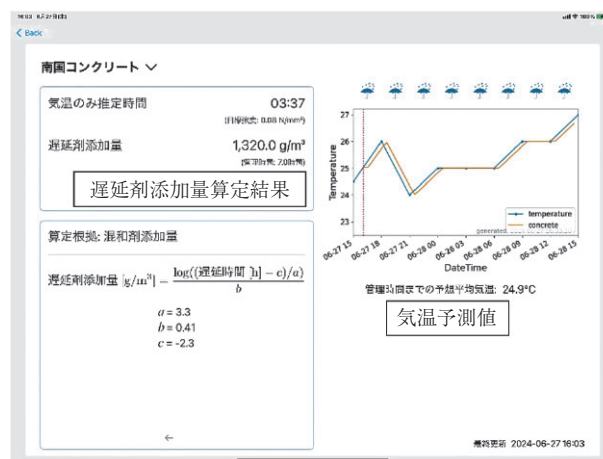


図-3 アプリケーション画面

にした。

遅延剤の添加量の計算方法は、インターネットから入手した気温予測値をもとに遅延剤無添加の場合の脱型強度（中央値の0.08N/mm²）の発現時間は積算温度を用いて算定した²⁾（図-4）。この結果をもとに脱型時間（12月～3月：8時間、それ以外の期間：7時間）となるように4つのプラントに対して遅延剤添加量を設定した。アプリケーションに入力する予測式のパラメータは、プラントの実機ミキサによって製造されたレディーミクストコンクリートを現場に搬入して強度試験を実施して算定した。

（2）遅延剤添加量の事例

2024年1月20日～22日の気温の実測値の推移と遅延剤添加量の事例を図-5に示す。19℃付近から4℃付近まで急激な温度低下を生じており、気象予報結果をもとに

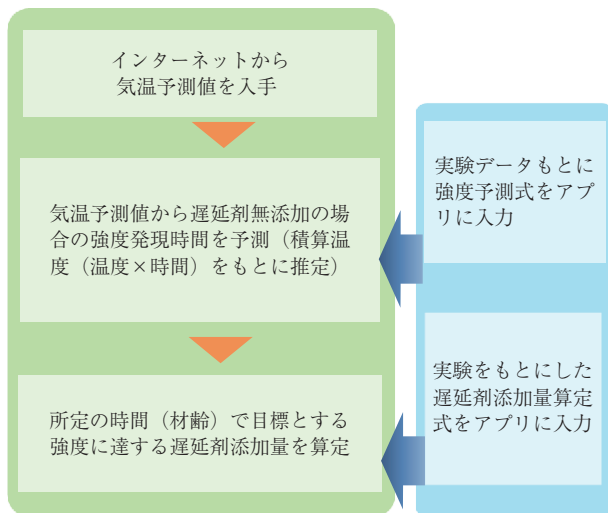


図-4 遅延剤添加量の算定方法

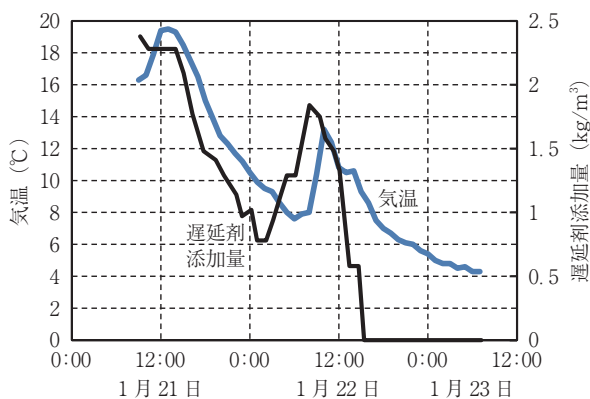


図-5 気温の推移と遅延剤添加量の例

遅延剤添加量も減少させている。なお気温が3℃以下になると材齢8時間の脱型時間では強度不足となることが懸念され、その場合には施工時間を1層2時間以上（型枠脱型が8時間以上）となるように対応した。

図-6は、図-5に示す1月21日と22日に計測した円柱供試体の強度測定結果を示す。気温の変動が生じてても材齢8時間で脱型強度の管理値0.06～0.1 N/mm²の範囲内に入っており、遅延剤添加量の制御が可能であることを示している。

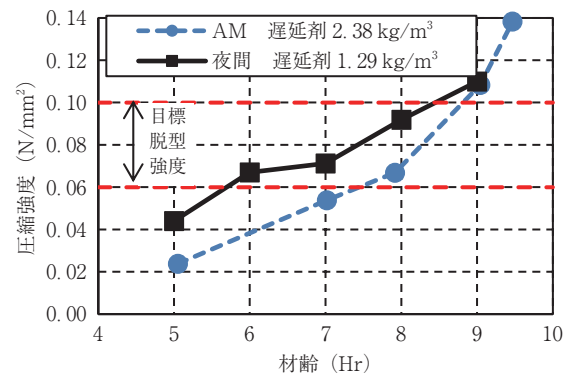
3.4 強度管理

(1) 強度管理方法

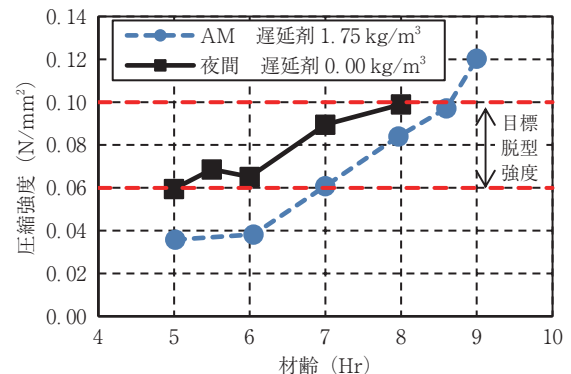
強度の測定は、ケーソン本体に対しては鉄筋棒の挿入による人的管理を行い、さらに円柱供試体作製による強度測定も行った。

鉄筋棒による管理は、打込み面に鉄筋棒を挿入して硬さを手の感触から把握するものである。脱型強度に達していると鉄筋を挿入することができないため、挿入深さの計測値から強度管理を実施した。

円柱供試体による強度管理は、SF 施工中は1日2回の頻度で供試体φ100×200を作製して試験を実施した。強度試験機は、土質試験用の2.0 kNまで計測でき、現場ヤード内に仮設の試験室を設置して試験を行った。



a) 1月21日実施分



b) 1月22日実施分

図-6 遅延剤添加量と強度発現の例

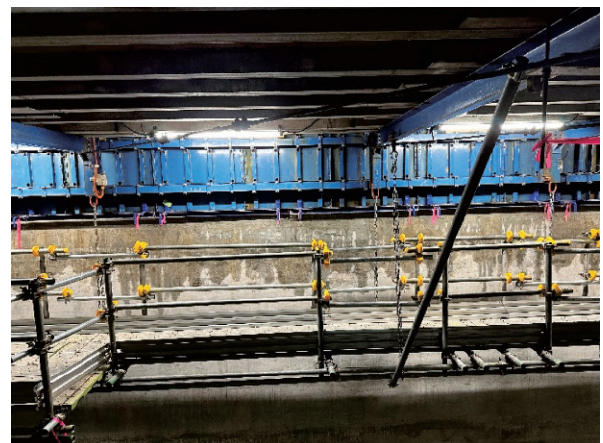


写真-9 型枠下面からの脱水

(2) 脱水による強度発現の影響

施工当初は、構造物（鉄筋棒挿入による確認）のほうが円柱供試体と比べて強度発現が早い傾向が見られ、円柱供試体と鉄筋棒挿入による強度測定では、明らかに強度発現が異なる状況が見られた。現場を観察した結果、型枠下面から打込みしたコンクリートの水分が漏出していることを確認した（写真-9）。これはSFの型枠は脱型しやすいように下に向かってハの字形状で4～6 mm程度広がっている構造であるため、脱水が生じやすくなったと考えられる。この脱水が強度発現に影響しているものと推定して、写真-10に示す透水性シートを内側に巻き付けた余剰水を脱水できる円柱供試体用型枠を作製して強度の管理を行った。図-7は、20℃環境下において同

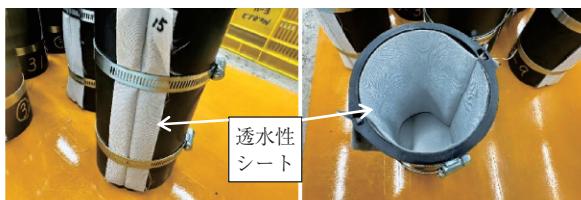


写真-10 余剰水を脱水できる円柱供試体型枠

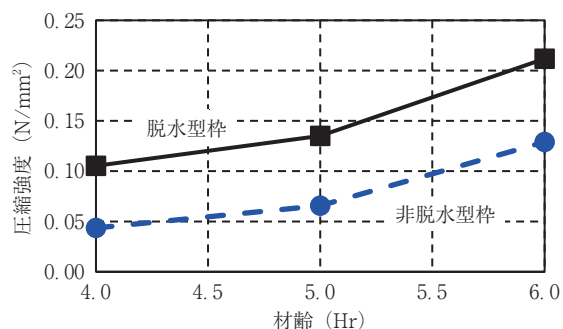


図-7 脱水・非脱水の強度発現の違い



a) 配管日よけシート

b) 散水パイプ、養生シート

写真-11 圧送配管の暑中対策

一配合での非脱水と脱水型枠を使用したコンクリート円柱供試体の強度を比較したものである。脱水を行うことで 0.1 N/mm^2 に達する時間が 1.5 時間程度早くなることが確認された。この結果をもとに脱水効果を有する円柱供試体で強度を把握したことで構造物の鉄筋棒による測定とおおむね一致する傾向が見られた。なお、脱水による若材齢強度発現の詳細な検討に関しては筆者らが今後行う予定である。

3.5 アジテータの配車管理

打込み速度が遅いことからアジテータの積載量は、 2 m^3 /台として現場内での待機時間が少なくなるように配車管理を行った。

アジテータの配車管理は、IC タグを使用し、プラント出荷、現場着、荷卸し開始・終了時に端末に IC タグをタッチすることでそれらの時間を自動で記録できるようにし、出荷時間や現場待機時間をリアルタイムで把握できるようにした。

3.6 暑中コンクリート対策

打込み速度が遅いことから、暑中環境下では圧送配管の温度上昇に伴うスランプの低下が懸念されたため、圧

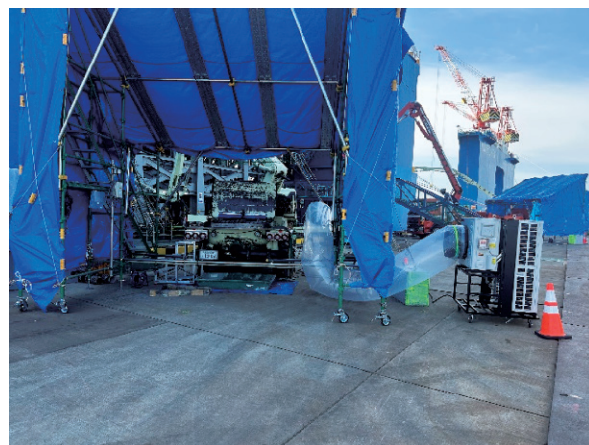


写真-12 ポンプ車ホッパーへのtent設置とスポットクーラーによる冷却

送配管には不織布からなる養生シートを巻き付け 1 時間あたり 5 分の自動散水を行うとともに日よけも設置して配管の温度上昇を抑制する対策を実施した³⁾ (写真-11)。

また、ポンプ車のホッパーには日よけのtentを設置するとともにホッパー内のコンクリート温度上昇を抑制するために大型のスポットクーラーにて冷風を当てる対策を実施した (写真-12)。

4. おわりに

国内初となる海上での SF 工法によるケーソン製作を実施し、8 日間 24 時間連続施工で壁部を構築した。

コンクリートの管理に対して、携帯端末のアプリケーションを活用した遅延剤の添加量の算定を行うことで気温変化の大きい国内（鹿児島）でも硬化速度を制御して、施工速度と型枠の上昇速度を一定とすることができた。

今後は、脱水による強度発現のメカニズムの解明を行い、より正確な強度発現予測について検討を行っていく予定である。

謝 辞 本工事は、発注者をはじめ、技術面でご指導いただきました有識者の皆様、施工に携わった皆様や材料納入の業者の皆様など関係各位の協力のもと進めることができました。ここに感謝を記します。

参考文献

- 1) 石塚由郎・入沢昭吉・酒井正晴・後藤貞治：白島洋上石油基地における大型ケーソンの施工，コンクリート工学，Vol.24，No.5，pp.22～29，1986. 5
- 2) 谷口 修・正木 徹・水野剣一・阿部哲良：スリップフォーム工法適用のためのコンクリートの若材齢強度の制御に関する検討，コンクリート工学年次論文集，pp.160～165，2023. 7
- 3) 谷口 修・西本洋之・孫 韶華・勅使晃平・東 裕太：暑中環境下におけるコンクリート圧送配管の養生方法の比較，土木学会第 79 回年次学術講演会，V-366，2024. 9