

プレキャスト工法を採用した LNG タンク PC 防液堤の設計・施工

— 東京ガス 日立 LNG 基地Ⅱ期工事 —

岩本 直樹*1・山崎 大介*2・金子 賢太郎*3・外内 和輝*4

東京ガス(株)日立 LNG 基地は、液化天然ガス(LNG)を受入れ、貯蔵、供給するために茨城県日立市に建設された東京ガス(株)の4番目のLNG基地であり、2016年3月から運転を開始している。現在、そのⅡ期工事として、2020年度の完成を目指し、2号LNGタンク(地上式、容量230,000kL)の建設を進めている。本LNGタンクは、日本初となるプレキャスト工法のPC防液堤を採用し、工期短縮と品質向上を図った。プレキャスト工法は工場製造したパネル状のプレキャスト版740枚(約240kN/枚)をサイトで円筒型に構築するものであり、ポストテンション方式により防液堤にプレストレスを導入する。

本稿では、LNGタンクPC防液堤の構造概要や設計の特徴、プレキャスト工法を採用するに至った経緯、プレキャスト工法特有の設計上の課題と工夫、および施工の状況について報告する。

キーワード：地上式LNGタンク、PC防液堤、プレキャスト、工期短縮

1. はじめに

液化天然ガス(LNG)の需要は年々増加している。東京ガス(株)は、根岸LNG基地(神奈川県)、袖ヶ浦LNG基地(千葉県)、扇島LNG基地(神奈川県)に続く4番目のLNG基地として、日立LNG基地を茨城県日立市に建設し、2016年3月から運転を開始している。また、これらの基地を高圧ガスパイプラインで結びネットワークを形成し、安定供給と輸送能力の増強を目指している(図-1)。現在、日立LNG基地では、今後のLNG需要増加対応のため、2020年度の完成を目指し、日本最大級となる2号LNGタンク(容量230,000kL)の建設を進めている(図-2)。



図-1 位置図

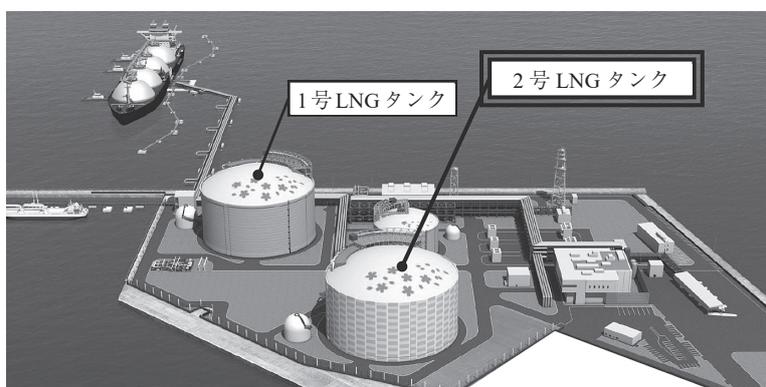


図-2 日立LNG基地 全景(完成イメージ)

*1 Naoki IWAMOTO：鹿島建設(株) 土木設計本部 構造設計部 臨海・エネルギー施設グループ

*2 Daisuke YAMAZAKI：鹿島建設(株) 関東支店 日立LNG基地2期タンク工事事務所

*3 Kentaro KANEKO：東京ガスエンジニアリングソリューションズ(株) エンジニアリング本部 LNG基地建設プロジェクト部

*4 Kazuki TONOUCHI：東京ガス(株) 原料・生産本部 日立LNG基地 建設部

○ 工事報告 ○

LNG タンクは地下式タンクと地上式タンクに分類でき、地上式タンクはさらに金属二重殻 LNG タンクと PCLNG タンクに分類できる。PCLNG タンクはタンク外側に PC 構造の防液堤を設ける。これは、貯蔵する極低温の LNG が万が一漏液したときに、周囲の安全を損なわないようにする保安確保のための構造である。地上式タンクを建設する場合、近年は PCLNG タンクが主流であり、本 2 号 LNG タンクも同様である。

2. 日立 LNG 基地Ⅱ期工事概要

日立 LNG 基地Ⅱ期工事の発注者は東京ガス(株)、施工者は元請が東京ガスエンジニアリングソリューションズ(株)であり、鹿島建設(株)と(株)IHI プラントは、JV(乙型 JV 方式)で一次下請として設計・施工に参画している。

地上式 LNG タンクは 1 基(容量 230 000 kL)であり、主な土木工事は、地盤補強工事、鋼管杭基礎工事、コンクリート基礎版工事、プレキャスト工法 PC 防液堤工事、付帯設備工事(底部ヒーターほか)、外構工事、構内電気工事、配管架構基礎工事である。

2 号 LNG タンクの構造一般図を図 - 3 に示す。PC 防液堤は内径 88.2 m、高さ 43.65 m で、コンクリート設計基準強度は 30~60 N/mm² と、部位ごとに使い分けている。

PC 防液堤の設計・施工に際して準拠した主な規準は以下のとおりである。

- ・ LNG 地上式貯槽指針 (JGA 指 -108-12) (一社) 日本ガス協会
- ・ 製造設備等耐震設計指針 (JGA 指 -101-12) (一社) 日本ガス協会

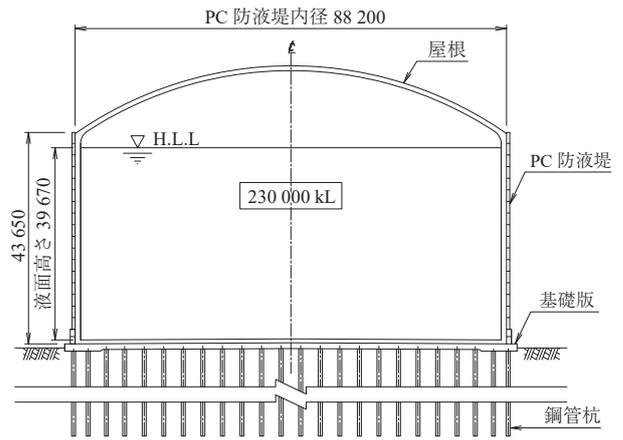


図 - 3 構造一般図

3. PC 防液堤の構造概要

3.1 PC 防液堤の構造と特徴

PCLNG タンクは、図 - 4 に示すように、金属製の内槽(底板、側板、屋根)、内外槽間の保冷、外槽(底部ライナ、側ライナ、屋根)および側ライナと一体化した PC 防液堤と基礎から成る。基礎は基礎版と鋼管杭による杭基礎構造であり、PC 防液堤と基礎版は剛結構造である。PC 防液堤は円筒形で、円周方向と鉛直方向にプレストレスを導入する(図 - 5)。

PC 防液堤の要求性能を表 - 1 に、評価項目と評価方法を表 - 2 に示す。

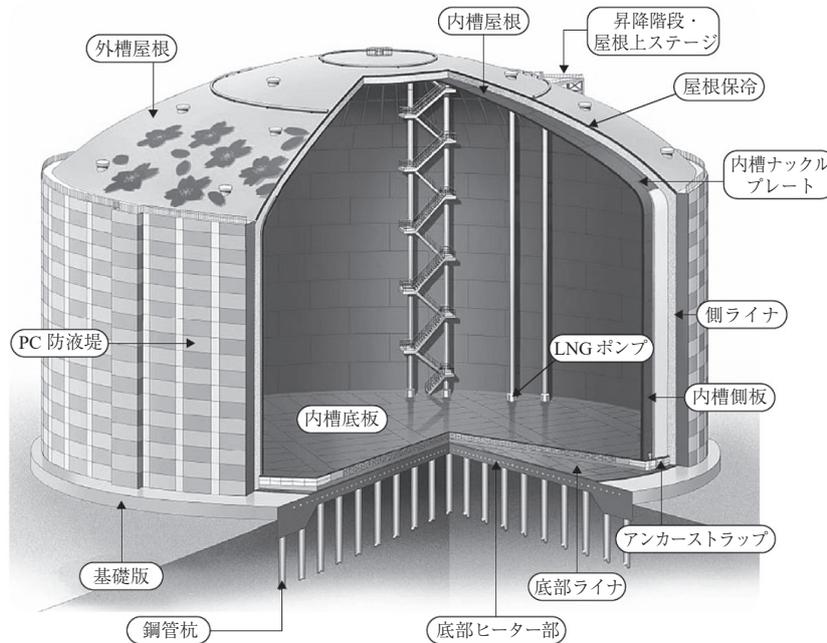


図 - 4 PCLNG タンクの構造

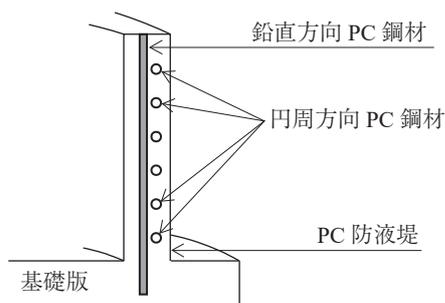


図 - 5 PCLNG タンクのプレストレス導入概略図

PC 防液堤は、内槽から漏液したとき、すなわち漏液後性能評価において液密性を確保することが求められている。このために、PC 防液堤には漏液後の液圧とバランスする程度の円周方向プレストレスを導入しており、漏液時において部材断面に残留圧縮領域を 10 cm 以上確保することで液密性を評価している。さらに、漏液後の液圧の 2 倍に相当する照査荷重が作用した場合の PC 防液堤の断面破壊についても評価している。

一方、常時性能評価における通常運転時には内槽が自立して液圧を負担するため、PC 防液堤には液圧が作用しない。そのため、力学的には内圧が作用しない円筒容器を、円周方向プレストレスで締め付けているような状態となる。また、PC 防液堤は基礎版と剛結しているため、PC 防液堤の基部には、外引張の曲げモーメントが生じる。耐久性の観点から、この曲げモーメントによるひび割れを許容していないために、PC 防液堤には鉛直方向プレストレスを導入している。

3.2 熱（温度）荷重と低温特性について

LNG タンク特有の条件として、熱（温度）荷重がある。LNG は極低温（ -162°C ）であり、PC 防液堤は高次の不静定構造であるため、その影響を考慮する必要がある。熱（温度）荷重は、通常運転時および漏液時における熱伝導解析を行い、PC 防液堤および基礎版に発生する温度分布を用いて設定する。

また、材料面からも LNG の極低温が問題とならないことを確認しておく必要がある。たとえば、鉄筋や PC 鋼材、PC 定着システムが低温環境で十分なじん性を有していることを確認しておく必要がある。本工事では、低温環境下で使用されるこれらの性能を、JIS や低温試験に関する FIP²⁾ に準拠した試験で確認している。また、本試験方法、判定基準および試験結果について EOTA³⁾ と比較し、満足することを確認している。

4. プレキャスト PC 防液堤の特徴

4.1 プレキャスト工法のねらい

一般に PC 防液堤工事は場所打ちコンクリート工法によるが、本 2 号 LNG タンクでは日本初のプレキャスト工法を採用し、工期短縮と品質向上を図った。プレキャスト工法を採用することで、サイトでの作業を軽減できることから PC 防液堤工事そのものの工期短縮が可能である。また、

表 - 1 PC 防液堤の要求性能¹⁾

性能の分類	耐荷性能、液密性能
常時性能	所定の強度を有する。 漏液後の液密性を損なわない。
レベル 1 耐震性能	有害な変形が残留しない。 漏液後の液密性を損なわない。
レベル 2 耐震性能	変形が残留しても漏液後の液密性および外槽の目標性能を損なわない。

表 - 2 PC 防液堤の評価項目と評価方法¹⁾

区分	評価項目	評価方法	
常時性能評価	通常運転時	ひび割れ	・ひび割れの評価（発生するひび割れ幅 w は許容ひび割れ幅 w_a 以下） ・応力の評価（コンクリートの圧縮応力 σ_c は $0.4f_{ck}$ を超えない、鉄筋の引張応力は f_{yk} 以下など）
		ひび割れ発生	・ひび割れ発生の評価（曲げモーメントおよび軸方向力によるコンクリートの縁引張応力が、コンクリートの曲げひび割れ強度の特性値を超えないなど）
	強風時 / 耐圧試験時 / 水張試験時	断面破壊	・断面破壊の評価 曲げモーメントおよび軸方向力、面外せん断および面内せん断力に対して、以下を評価 $\gamma_i \cdot S_d / R_d \leq 1.0$ ここに、 S_d ：設計断面力 R_d ：設計断面耐力 γ_i ：構造物係数 また、鉄筋の引張応力は f_{yk} 以下
		断面破壊	
レベル 1 耐震性能評価	断面破壊		
レベル 2 耐震性能評価	断面破壊		
漏液後性能評価	断面破壊		
	液密性	・液密性の評価（曲げモーメントおよび軸方向力によるコンクリートの残留圧縮領域を部材断面に確保。残留圧縮領域は 10 cm 以上を確保することを基本）	

PC 防液堤より内側での型枠設置作業など土木作業を無くすることができるので、土木工事と機械工事の作業が完全に分離でき、双方の輻輳作業が解消され、タンク全体の工期短縮が見込めた。このような工期短縮策を受けて、本 2 号 LNG タンクの工期（タンク工事の本格着工からマンホール閉）は、通常約 40 ヶ月であるのに対し 28 ヶ月で計画している（表 - 3）。また、プレキャスト版は工場製造であるため安定した品質確保が期待できる。

プレキャスト工法とすることによるほかの利点として、サイトでの高所作業が軽減されることや、天候による工程遅延リスクが低減される点がある。また、省人化できる工法のため、近年の建設技能工の減少に対しても有効である。

4.2 プレキャスト PC 防液堤の概要

プレキャスト化のために PC 防液堤をパネル状に分割する計画とした（図 - 6）。プレキャスト版の大きさは陸上輸送や製造工場内での制約から、重量約 240 kN 以下となるように、PC 防液堤を高さ方向に 19 分割、円周方向に 40 分割して計画した。機械工事のために防液堤内外を行き来する工事口を設けることから、PC 防液堤の一部は場所打ちコンクリートとして、プレキャスト版は 740 枚で計画した。

表 - 3 工事工程表

		2018年度						2019年度						2020年度					
		4	6	8	10	12	2	4	6	8	10	12	2	4	6	8	10	12	2
地盤補強	地盤改良	■		▼9月貯槽工事本格着工										マンホール閉		▼3月運用開始			
タンク土木	基礎杭	■		■															
	基礎版	■		■															
	防液堤	■		■		■						■		■		■			
	PC緊張	■		■		■						■		■		■			
タンク機械	外槽	■		■		■						■		■		■			
	内槽	■		■		■						■		■		■			
	保冷	■		■		■						■		■		■			
	水張・耐圧気密試験	■		■		■						■		■		■			
	内部配管・付帯	■		■		■						■		■		■			
スタートアップ		■		■		■						■		■		■			

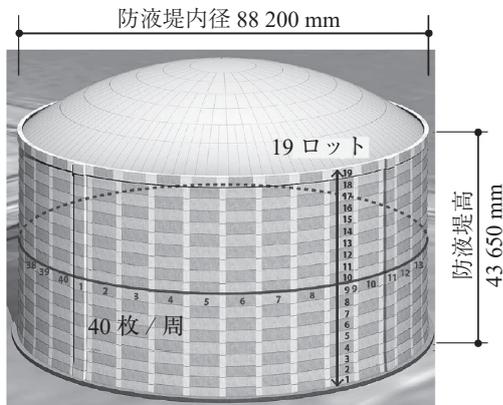


図 - 6 プレキャスト割付

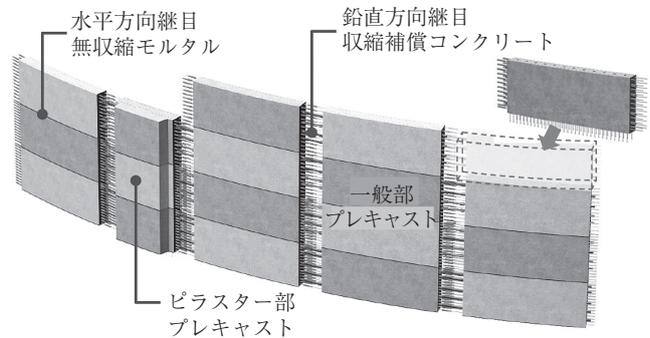


図 - 8 プレキャスト版の接合部概略図

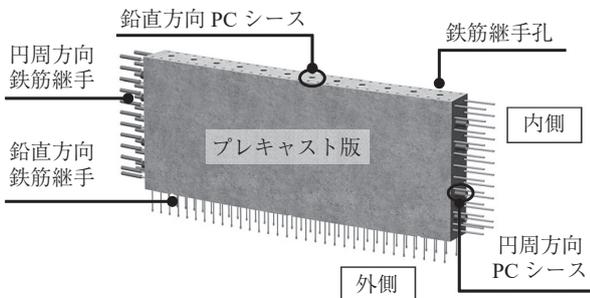


図 - 7 プレキャスト版（一般部）概略図

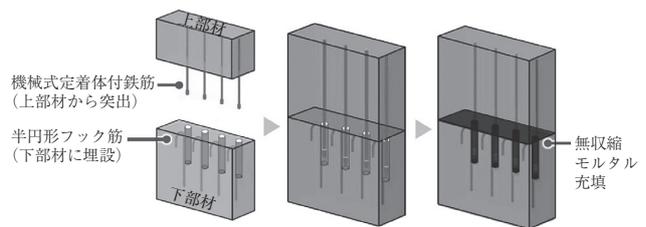


図 - 9 新型継手構造概略図

プレキャスト版は、一般部とピラスター部に分けた。ピラスター部は円周方向 PC 鋼材の定着システムを設置する特殊部である。代表的なプレキャスト版の概略を図 - 7 に示す。

プレキャスト版の接合部である鉛直方向継目と水平方向継目の構造を図 - 8 に示す。鉛直方向継目は円周方向に幅 1 000 mm 程度の収縮補償コンクリートを用いた場所打ちコンクリートであり、鉄筋は機械式継手構造とし、PC シースはジョイントシースによる接合とした。水平方向継目は高さ約 20 mm の継目を無収縮モルタルで充填し、図 - 9 に示す新たに開発した継手構造により鉄筋を接続する⁴⁾。

5. プレキャスト PC 防液堤の設計上の課題と工夫

5.1 プレキャスト版の接合部の強度および液密性の確保

プレキャスト版の接合部の強度および液密性の確保が課題となったが、確認試験により場所打ちコンクリートによる PC 防液堤と同等の性能を有していることを確認した。たとえば、前述の新型継手構造に対して継手性能の確認試験を実施し、接合部の打継目の強度確認や透水試験などを行った。また無収縮モルタルの充填性を確認した。

5.2 事前のプレキャスト版内の鋼材等の干渉確認

プレキャスト版内の鉄筋と PC 鋼材および埋込み金物の

干渉が懸念された。また、プレキャスト版の割付と機械工事の設置金物（屋根骨アンカーなど）との取合い調整も課題となった。これらを各プレキャスト版内に収めることや、その設置精度から、入念な検討が必要であった。このため、機械工事と事前に綿密な打合せを実施し調整した。また、2次元図面での干渉チェックと併用して、3次元CADによる事前の干渉確認を行った（図 - 10）。大部分の干渉は2次元図面でのチェックで回避できたが、3次元的に線形が変化するピラスター付近の円周方向PCシースと円周方向鉄筋の干渉は、3次元CADによる事前確認により回避することができた（図 - 11、12）。

また、関係するすべての干渉を回避しつつ、共通の規則的な鉄筋・PC鋼材の配置パターンを設定し、特殊なプレキャスト版が生じないように配慮して設計することで、施工の省力化を目指した。なお、3次元CADのデータは、CIMとして施工計画の立案や施工管理に活用している。

5.3 PC 定着システムの小型化

鉛直方向PC鋼材の定着システムが、鉄筋機械式継手などの影響で円周方向鉄筋とわずかながら干渉することが課題となった。また、屋根骨アンカーに干渉することも懸念された。これを回避するためにPC防液堤の部材厚を増加させるのではなく、定着システムのスパイラル筋の小型化を図ることで干渉を回避することを目指した。小型化したスパイラル筋を有する定着システムの性能試験は「PC工法の定着具および接続具の性能試験方法（JSCE-E 503-1999）」に準拠して実施した⁵⁾。スパイラル筋の巻き径を小さくする代わりに、スパイラル筋を太径とし、定着システムを設置するコンクリートの設計基準強度を大きくすることにより要求性能を担保できることを確認した。さらに、スパイラル筋の代わりに組み合わせたグリッド筋を配置することによっても、性能を担保できることを確認している。これにより、PC防液堤の部材厚を変えることなく、干渉を回避することが可能となった。

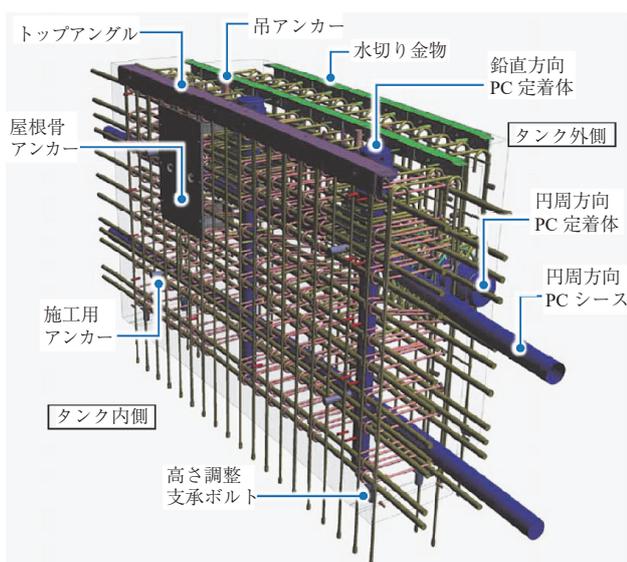


図 - 10 3次元CADによる事前干渉確認
(⑩ ロット、ピラスター部)

6. プレキャスト PC 防液堤の施工

6.1 プレキャスト版の製造

プレキャスト版は、2018年8月から2019年4月にかけて工場にて製造した。製造は、型枠組立て、鉄筋組立て、PC組立て、埋込み金物設置、コンクリート打設、常圧蒸気養生、脱枠を1日1サイクルを標準として実施した（写真 - 1）。事前に干渉確認を行なっていたため、プレキャスト版の製造過程で組立て不能となるトラブルは生じなかった。また、鉄筋のかぶりやピッチの測定値は、設計値に対して誤差が小さく、良好であった。

製造したプレキャスト版は、自重によるクリープ変形のねじりやたわみが生じないように配慮して、工場内のヤードで保管した。

6.2 プレキャスト版の設置

工場からサイトに搬入後、1日8枚を標準ベースにプレキャスト版を据え付け、PC防液堤を構築した（写真 - 2、写真 - 3）。据付けには200tクローラークレーンを使用しており、施工足場はセルフクライミングタイプを選択した。プレキャスト版の据付け精度は良好で、機械工事の要求精度に十分に収まっている。また、鉛直方向継目の場所打ち

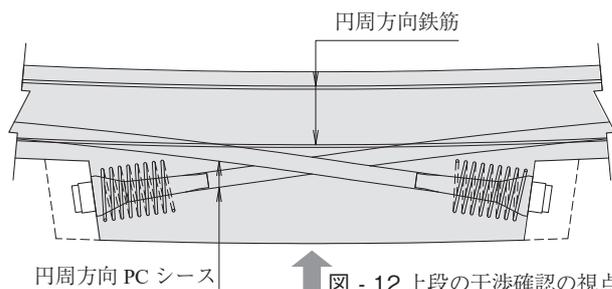


図 - 12 上段の干渉確認の視点

図 - 11 ピラスター部平面図
(円周方向 PC シースと円周方向鉄筋)

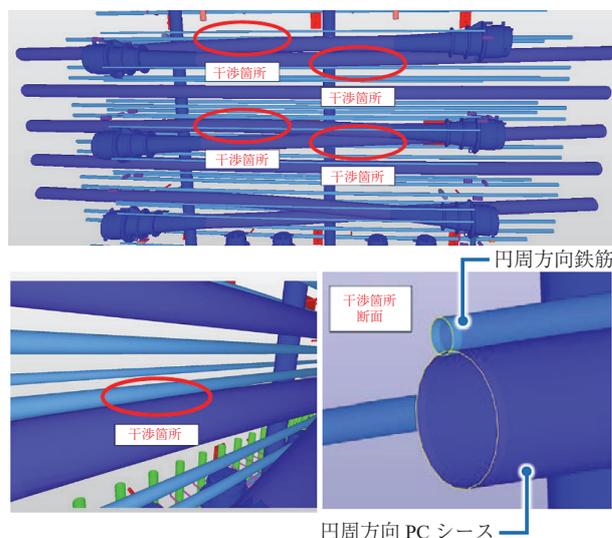


図 - 12 ピラスター部の干渉確認

○ 工事報告 ○

コンクリートの打設には、転倒式コンクリートバケツを使用している。

PC 防液堤構築に際しては、当初の計画に沿って PC 防液堤の内側を機械工事の施工範囲とし、土木作業はすべて PC 防液堤の外側からに限定しているため、作業エリアが分離され、施工の合理化・効率化が実現できている。



写真 - 1 プレキャスト版製造状況



写真 - 2 プレキャスト版設置状況



写真 - 3 施工状況

7. おわりに

本2号 LNG タンク工事は、プレキャスト版の据付けを完了し、PC 鋼材の緊張作業を進めているところである。以後、工事口の閉鎖を経て、2020 年 12 月にタンク工事が完了する予定である。

本工事により得られた知見は、今後 PC 防液堤のみならず、さまざまな構造物においてプレキャスト工法を適用し、工期短縮、品質向上を図る上で有用なものと考えている。

結びに、本工事におけるプレキャスト版の製造や PC 技術の応用、設計・施工にあたり多大のご協力とご指導をいただきました関係各位に心から感謝申し上げます。

参考文献

- 1) LNG 地上式貯槽指針 (JGA 指 -108-12), (一社) 日本ガス協会
- 2) FIP: Assessment of mechanical properties of structural materials for cryogenic applications, 1988.6
- 3) EOTA: Guideline for European technical approval of post tensioning kits for prestressing of structures, ETAG013, Edition June 2002, 2002.6
- 4) 大窪, 松浦, 一宮, 横田: 施工性に優れたプレキャスト部材接合継手その 1 (部材実験), 土木学会全国大会年次学術講演会, V-337, 2017.9
- 5) 土木学会: PC 工法の定着具および接続具の性能試験方法 (JSEC-E 503-1999), コンクリート標準示方書 規準編 土木学会規準および関連規準, p.124, 2018.10

【2019 年 8 月 8 日受付】



図書案内

PC 技術規準シリーズ

貯水用円筒形 PC タンク設計施工規準

定 価 4,000 円 + 税 / 送料 300 円

会員特価 3,200 円 + 税 / 送料 300 円

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会 編
技報堂出版