

ひびき LNG 基地 180 000 kL PCLNG 貯槽の設計・施工

溝口 敬義*1・齊藤 健治*2・梅本 正樹*3・小林 祐樹*4

ひびき LNG 基地は、ひびきエル・エヌ・ジー(株)が近年ますます拡大している天然ガスの需要に対応するため、北九州市響灘地区に建設する大型 LNG 船の受入れが可能な LNG 基地である。本基地の主要構造物である 180 000 kL の PCLNG 貯槽は、金属製の内槽タンク、保冷材、RC 構造の基礎版および PC 構造の防液堤（内径：82.2 m、壁厚： $t = 0.6 \sim 1.2$ m）からなる円筒形構造物である。本貯槽には、PC 防液堤の構造の合理化を目的として開発され、多くの施工実績のある変断面 PC 防液堤（DUAL PC 防液堤）を採用しているが、さらなる PC 鋼材配置の合理化と工程短縮を実現するため、鉛直方向 PC 鋼材に PC 鋼棒を初めて適用した。また、PC 防液堤の構築には、施工の効率化、施工ヤードの縮減、風による工程遅延リスクの低減が可能な型枠一体型クライミング足場を使用した。

本稿では、ひびき LNG 基地の PCLNG 貯槽における PC 鋼棒採用の経緯と、PC 防液堤の施工概要について報告する。

キーワード：地上式 LNG 貯槽、変断面 PC、PC 防液堤、PC 鋼棒、型枠一体型クライミング足場

1. はじめに

天然ガスは、石油や石炭などの化石燃料に比べて硫黄酸化物が発生せず CO₂ も少ないことから、クリーンエネルギーとして需要が高まっており、全国各地で LNG 基地が建設されている。LNG 基地の主要構造物である LNG 貯槽は近年大型化が進み、その合理的な構造の追及は建設コスト削減のために必要不可欠となっている。

そのような背景のもと、変断面を有し鉛直方向 PC 鋼材を 2 列配置する変断面 PC 防液堤（DUAL PC 防液堤）¹⁾は、PCLNG 貯槽の構造を合理化する技術の 1 つとして 2004 年以降採用されてきた。

ひびき LNG 基地の 18 万 kL PCLNG 地上式貯槽では、変断面 PC 防液堤のさらなる品質向上・建設費削減を目指して、鉛直方向 PC 鋼材に PC 鋼棒を適用した。また、PC 防液堤の構築には、施工の効率化、施工ヤードの縮減、風による工程遅延リスクの低減を図るため、型枠の揚げ降ろしの必要がない型枠一体型クライミング足場を使用した。

本稿では、ひびき LNG 基地の PCLNG 貯槽における PC 鋼棒採用の経緯と PC 防液堤の施工概要について報告する。

2. 工事概要

ひびき LNG 基地は、ひびきエル・エヌ・ジー(株)が北九州市響灘地区に建設する大型 LNG 船の受入れが可能な LNG 基地である。主要設備としては、PCLNG 貯槽（18 万 kL × 2 基）、LNG 気化器、ローリー出荷設備、外航 LNG 船受入れバースなどがある。図 - 1 に完成予想図を示す。

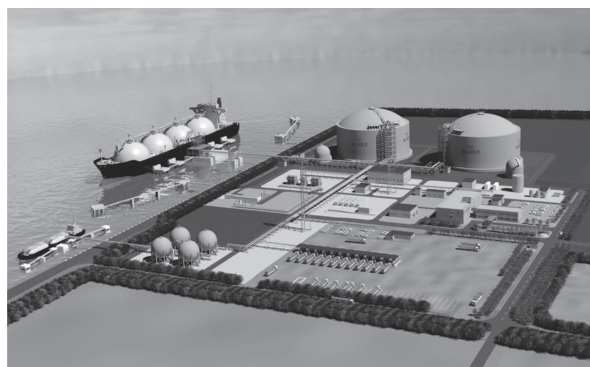


図 - 1 ひびき LNG 基地完成予想図

本工事は、2010 年 12 月に工事着工し、2014 年 11 月の運転開始を目指している（図 - 2）。

		2011 年	2012 年	2013 年	2014 年
No.1 タンク	基礎杭	■			
	基礎版	■			
	PC 防液堤	■	■		
	PC 緊張		■		
	機 械			■	■
No.2 タンク	基礎杭	■			
	基礎版	■			
	PC 防液堤	■	■		
	PC 緊張		■		
	機 械			■	■

図 - 2 工事工程

本工事で建設する容量 18 万 kL の PCLNG 貯槽の構造図を図 - 3 に示す。PC 防液堤は内径 82.2 m、高さ 40.1 m、

*1 Takayoshi MIZOGUCHI：ひびきエル・エヌ・ジー(株)

*2 Kenji SAITO：ひびきエル・エヌ・ジー(株)

*3 Masaki UMEMOTO：大成建設(株)九州支店 ひびき LNG 基地建設工事作業所

*4 Yuki KOBAYASHI：大成建設(株)土木本部 土木設計部 特殊構造設計室

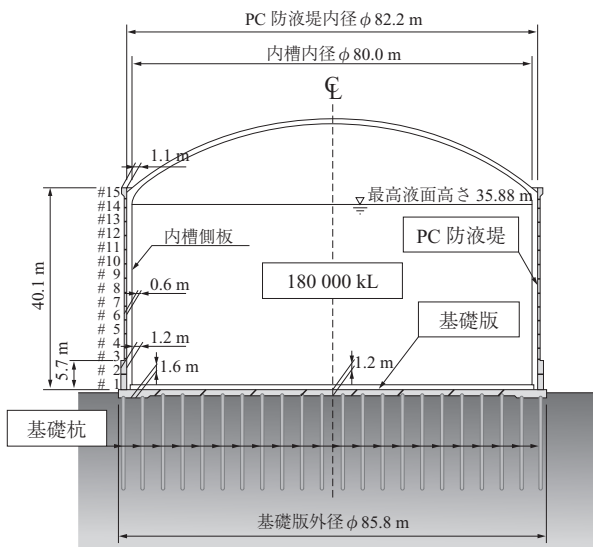


図 - 3 一般構造図

厚さ 0.6 ~ 1.2 m である。PC 防液堤の構築は 15 ロットに分割し、#1 ~ 4 ロットを枠組足場、#5 ~ 15 ロットの区間を型枠一体型クライミング足場により構築した。図 - 4 に全体施工ステップ図、表 - 1 に PCLNG タンク概要を示す。

3. PC 防液堤の設計概要

3.1 PC 防液堤の目標性能と評価項目

本基地は、ガス事業法の適用対象であるため、PCLNG 貯槽の設計および施工は「LNG 地上式貯槽指針：(社)日本ガス協会²⁾」に準拠する必要がある。LNG 地上式貯槽指針では各荷重条件ごとに規定された目標性能に対し、評価項目および限界値を設定し、各荷重に対して計算される応答値が限界値を超えないことを確認する。表 - 2 に、PC 防液堤の目標性能と評価項目を示す。

3.2 解析モデル

構造解析は、基礎版と PC 防液堤をシェル要素、基礎杭

① 基礎杭工	② 基礎版構築	③ PC 防液堤構築 #1~4 ロット構築
<p>プレボーリング拡大根固め工法にて杭を打設。</p>	<p>鉄筋の組立、底部ヒーター、アンカストラップ、基礎版用 PC シース・PC 定着具、PC 鋼棒の設置のち、コンクリートを一括で打設。</p>	<p>枠組足場により #1~4 ロット構築を行う。</p>
<p>④ PC 防液堤 #2~8 ロット構築、ライナ*・リング部保冷*・アニュラ PL*</p>	<p>⑤ 内槽側板*・底部保冷*・内槽底板* 屋根組立*</p>	<p>⑥ 頂部 PC 鋼材緊張・屋根浮上*</p>
<p>※：機械開工</p> <ul style="list-style-type: none"> ・型枠一体型クライミング足場により、PC 防液堤を構築 ・コンクリート打設は配管を設置し打設。 	<p>※：機械開工</p> <p>機械工事にて底部保冷、内槽底板、内槽側板の施工に続いて基礎版上で屋根の構築を行う。</p>	<p>※：機械開工</p> <p>頂部円周 PC 鋼材のプレストレスを行う。その後基礎版上で組み立てた屋根を浮上させ、内槽タンク頂部に据付ける。</p>
<p>⑦ PC 鋼材緊張</p>	<p>⑧ 水張り*、耐圧*、気密試験* PUF・屋根保冷材取付*</p>	<p>⑨ 完成</p>
<p>工事開口の閉鎖後、防液堤の鉛直・円周方向テンダンのプレストレスを行う。</p>	<p>※：機械開工</p> <p>PC 防液堤の内面に PUF を取付け、内槽と外槽の間にパーライトを充填する。</p>	

図 - 4 全体施工ステップ図

表 - 1 PCLNG タンク概要

工事名	ひびき LNG 基地建設工事 PCLNG タンク土木工事
発注者	ひびきエル・エヌ・ジー (株)
請負者	大成建設 (株)
構造形式	PC 防液堤・外槽一体型平底球面屋根付円筒形貯槽
貯槽容量	18 万 kL × 2 基 (内槽内径 ϕ 80.0 m, 最高液面高さ 35.88 m)
基礎杭	杭径: ϕ 700 (SC 杭, 節付き PHC 杭) × 404 本 杭長: L17.0 ~ 21.0 m, 施工方法: プレボーリング工法
基礎版	外径: ϕ 85.8 m, 版厚: $t = 1.2 \sim 1.6$ m 円周方向 PC 鋼材: 27S15.2 (PC 鋼より線)
防液堤	内径: ϕ 82.2 m, 高さ: $h = 40.1$ m 壁厚: 下端部 1.20 m, 一般部 0.6 m, 頂部 1.1 m 円周方向 PC 鋼材: 19S15.2 (PC 鋼より線) 鉛直方向 PC 鋼材 (#1 ~ 2): ϕ 36C 種 1 号 (PC 鋼棒) 鉛直方向 PC 鋼材 (#3 ~ 15): ϕ 32C 種 1 号 (PC 鋼棒)

表 - 2 PC 防液堤の目標性能と評価項目

区分	目標性能	評価項目
常時性能評価	通常運転時	所定の強度を有する ひび割れ*2 ひび割れ発生*2 断面破壊
	強風時 耐圧・水張試験時	漏液後の液密性を損なわない 断面破壊
レベル 1 耐震性能評価	有害な変形が残留しない 漏液後の液密性を損なわない	断面破壊
レベル 2 耐震性能評価	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	断面破壊
漏液後性能評価*1	所定の強度を有する 液密性が保持される	液密性*3 断面破壊

*1: 液圧 (漏液後) の 2 倍を載荷する照査荷重時についても検討を行う
*2: 長期耐久性に対する検討を行う
*3: 部材断面内の圧縮領域の確保に対する検討を行う

と地盤をバネ要素でモデル化した 3 次元 FEM 解析モデルにて行った (図 - 5)。

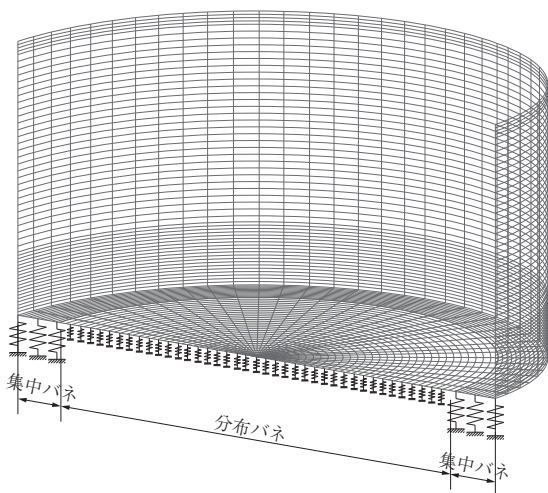


図 - 5 FEM 解析モデル

防液堤 # 1 ~ 2 ロットの鉛直方向 PC 鋼材は、部材軸線に対して偏心させて配置しているため、構造解析ではこれによる偏心モーメントを考慮した。

3.3 PC 防液堤における鉛直方向 PC 鋼材の役割

PC 防液堤は LNG が内外槽間へ漏洩した場合を想定して、LNG の液圧を打ち消すように円周方向 PC 鋼材を配置している (図 - 6)。しかし、通常運転時には LNG 液圧は作用せず円周方向 PC 鋼材による荷重のみが作用するため、基礎版に拘束された PC 防液堤下端部で鉛直方向に大きな曲げモーメントが発生し、防液堤外面にひび割れが生じる可能性がある。また、曲げモーメントは防液堤下端より高さ 5 m 程度のところで内側に反転するため、防液堤内面にもひび割れが生じる可能性がある。これらのひび割れを抑制するために鉛直方向 PC 鋼材を配置する必要がある (図 - 7)。

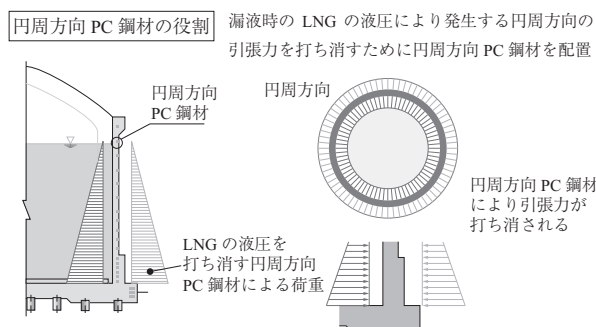


図 - 6 漏液時の荷重状態

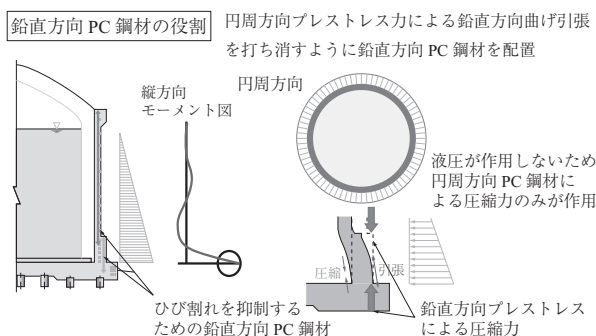


図 - 7 通常運転時の荷重状態

4. PC 防液堤における鉛直方向 PC 鋼材の変遷

4.1 従来型 PC 防液堤における鉛直方向 PC 鋼材の配置

従来型等断面 PC 防液堤は、壁厚が等厚で、下端部で必要となる鉛直方向 PC 鋼材 (PC 鋼より線) を防液堤全高にわたり配置する構造となっていた。そのため過大な鉛直方向 PC 鋼材量となっていた (図 - 10 ①)。これに対し、「必要な場所に必要のプレストレス」というコンセプトのもと開発した従来型変断面 PC 防液堤は、「応力の大きい下端部の壁厚を大きくした変断面構造」とし、「2 列の鉛直方向 PC 鋼材 (長尺 PC 鋼材・短尺 PC 鋼材) (PC 鋼より線) を配置」することで、下端部に効率的にプレストレスを導入することが可能となり、従来型等断面 PC 防液堤に比べ、鉛直方向 PC 鋼材量 50 %、コンクリート量 7 % の低減が可能となった (図 - 10 ②)。

4.2 従来型変断面 PC 防液堤の課題

従来型変断面 PC 防液堤では、鉛直方向 PC 鋼材に PC 鋼より線を使用していたため、基礎版内に U 字シースを埋め込み、防液堤下端から天端まで PC 鋼材を配置していた（図 - 8 左）。そのため、基礎版外周部の過密鉄筋部に 2 列の鋼製 U 字シースを設置する必要があり、鉄筋組立てやコンクリート打設の施工性が悪かった。また、緊張作業も①約 100 m の PC 鋼より線挿入→②緊張→③グラウトのステップを踏まなければならない、工程や品質管理を困難なものにしていた。

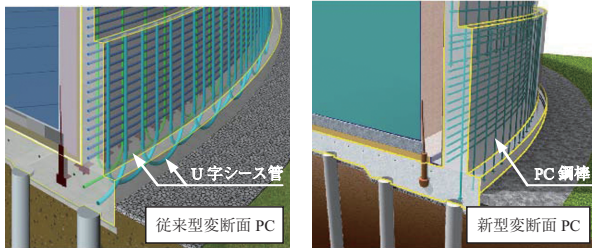


図 - 8 従来型変断面 PC 防液堤と新型変断面 PC 防液堤

4.3 新型変断面 PC 防液堤の開発

この課題を解決するため、鉛直方向 PC 鋼材にアンボンド PC 鋼棒を採用した新型変断面 PC 防液堤を開発した（図 - 8 右）。従来型のように大規模な U 字定着が不要で、防液堤内での定着が可能となった。

図 - 10 ③の鉛直 2 および鉛直 3（長尺）の定着位置を防液堤下端から約 4.5 m 上方とすることで、緊張により防液堤下端に発生する外引張曲げモーメントの発生を無くした（図 - 9）。また、防液堤内での定着が可能となったことで、図 - 10 ③に示すように発生する断面力に応じて 3 段階に鉛直方向 PC 鋼材量を変化させることが可能となった。これにより、鉛直方向 PC 鋼材量を従来型変断面 PC 防液堤からさらに 33 % 低減することが可能となった。

施工上も PC 鋼棒の緊張ジャッキは手で持ち運ぶことができ、緊張作業も容易であり、さらにアンボンドタイプを使用することでグラウト作業も不要となり、緊張作業の大幅工程短縮が可能となった（写真 - 1）。

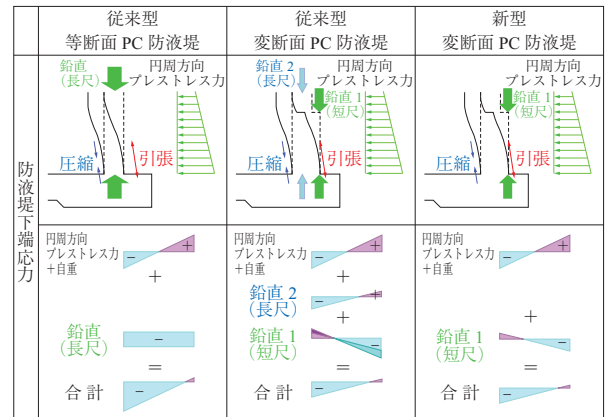


図 - 9 防液堤下端応力の違い

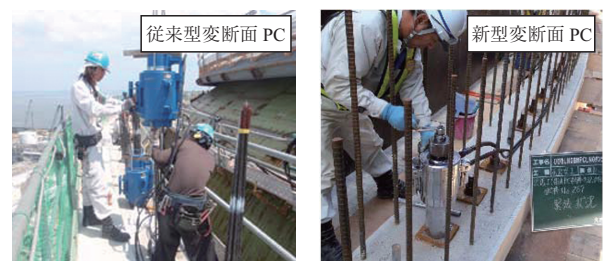


写真 - 1 鉛直方向 PC 鋼材の緊張状況

4.4 実構造物適用への確認試験

LNG が内外槽間へ漏液した場合、防液堤は冷却され、PC 鋼棒位置では -30℃ となる。今回 PC 鋼棒を PC 防液堤に適用するにあたり、設計温度において PC 鋼棒 tendon システムにぜい性的な破壊や有害な変形が無いこと、低温時でも十分な伸びや強度を有していることを確認する必要があった。そのため、図 - 11 の低温試験装置を用いて液体窒素により供試体を -40℃ まで冷却し、図 - 12 に示す載荷荷重と温度条件にて繰り返し載荷試験を行った。試験結果は良好で低温時に十分な伸びや強度があることを確認した。

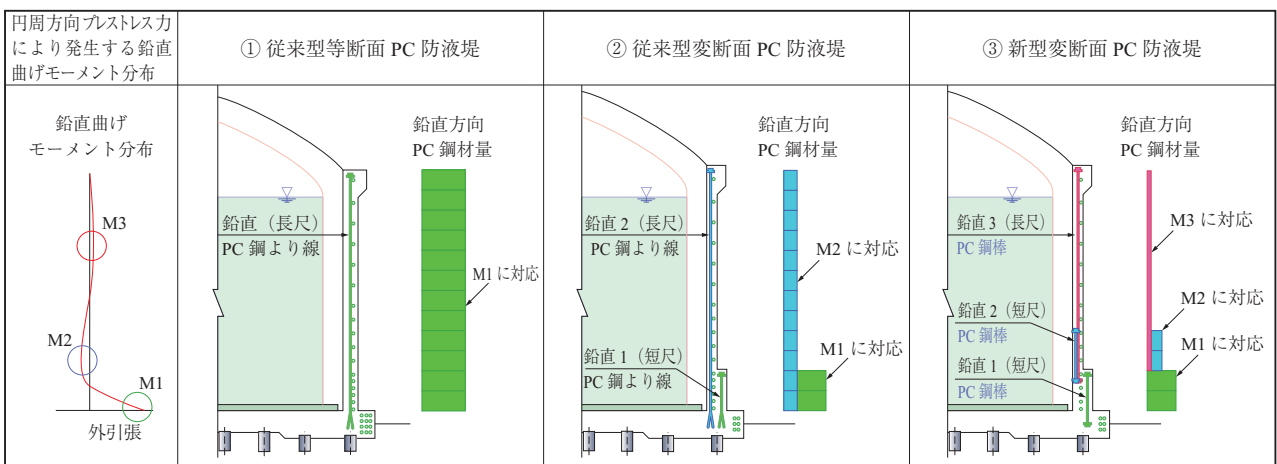


図 - 10 PC 防液堤鉛直方向 PC 鋼材の比較

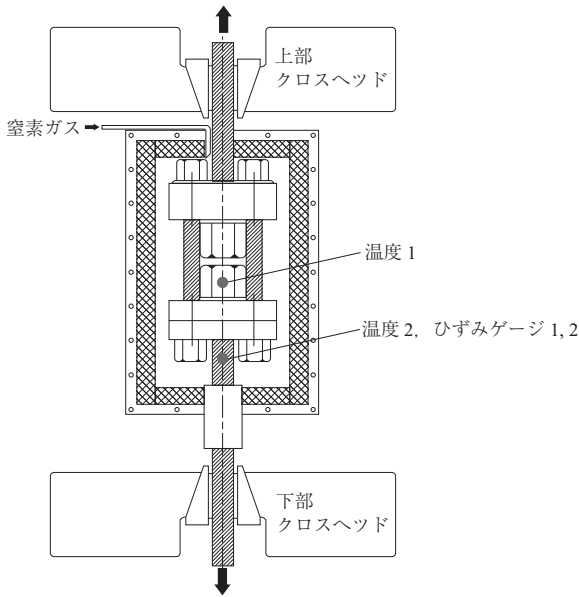


図 - 11 PC 鋼棒低温試験装置

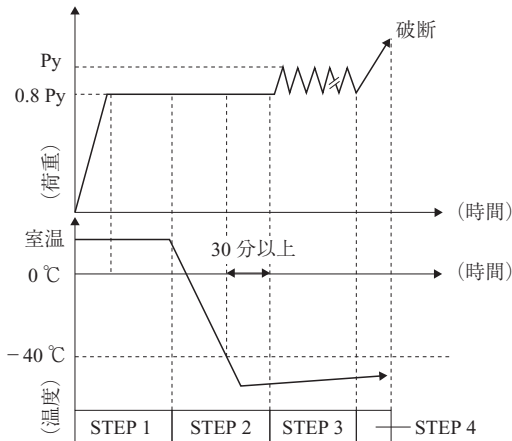


図 - 12 載荷荷重および温度条件

5. PC 防液堤の施工概要

5.1 型枠一体型クライミング足場による PC 防液堤の構築概要

PC 防液堤（#5～14 ロット）の構築には、型枠一体型クライミング足場（PERI 社、CB クライミング作業足場システム）を採用した。本足場ユニットは型枠と足場が一体となっているため、埋込金物設置や型枠清掃のために型枠を揚げ降ろす必要がない。そのため、仮設ヤードの大幅縮減、風による工程遅延リスクの低減が可能となる。

型枠サイズは高さ 3 m × 幅 6.5 m とし、内側・外側合せて 80 ユニットの型枠一体型クライミング足場を使用した。

各ロットの施工は、下記および図 - 13 に示す順序で行った。

- ① 前ロットのコンクリート打設後、作業足場レベル + 1 にて、PC 鋼棒、鉄筋および円周シースの設置を行う。
- ② 前ロットの型枠を脱型し、外側へスライドさせる。作業足場レベル 0 にて、型枠に付着したコンクリートの清掃および埋込み金物の設置を行う（写真 - 2, 3）。
- ③ 足場をクレーンにて 1 ユニットずつ上方へスライドさせ、円周方向を連結する（写真 - 4）。
- ④ 型枠を内側へスライドさせ、建ちの調整、固定を行う（写真 - 5）。
- ⑤ コンクリート打設用の配管およびシャッターバルブをセットし、コンクリートを打設する（写真 - 6, 7）。

コンクリート打設は、図 - 14 に示すように足場上に約 60 m の水平配管を 4 系統配置し、4 台のコンクリートポンプ車に配管を接続して行った。水平配管には 3～4 m おきに T 字シャッターバルブを設置し、バルブの開閉により打設位置を移動させた。

シャッターバルブの先端には、サニーホース（6 B）を取り付け、コンクリートの落下高さを 1.5 m 以内として材料の分離を防止した。

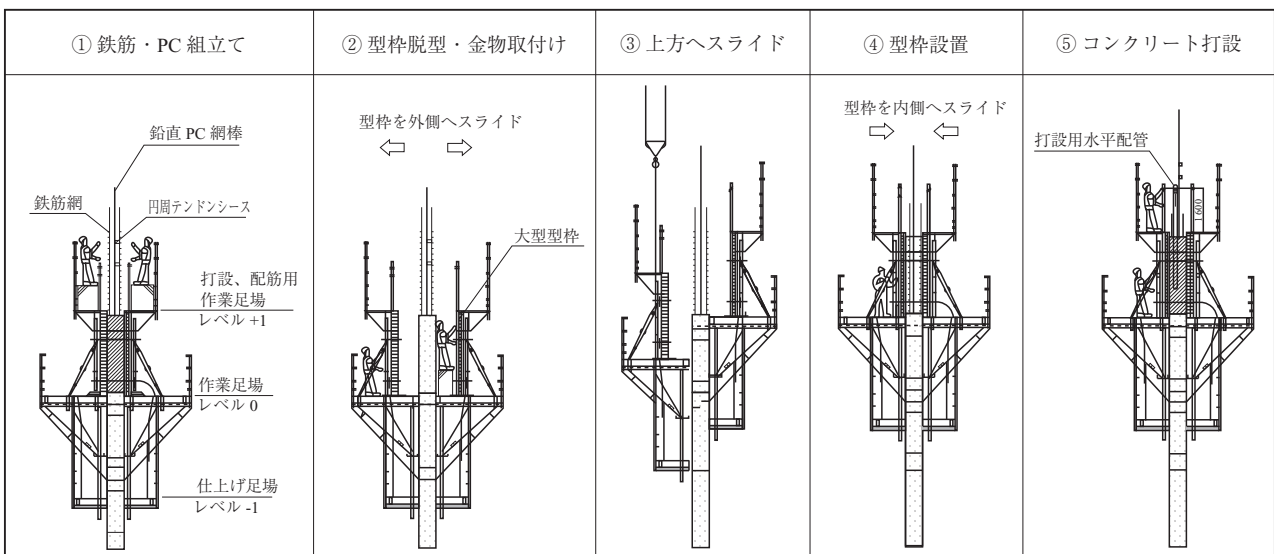


図 - 13 施工順序図



写真 - 2 型枠スライド状況 (前後)

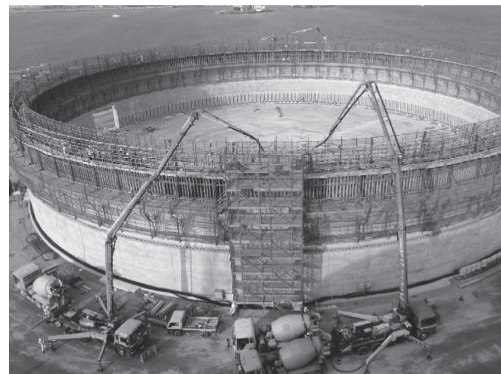


写真 - 6 コンクリート打設状況



写真 - 3 型枠スライド状況 (後方へ)



写真 - 7 配管設置状況



写真 - 4 型枠スライド状況 (上方へ)

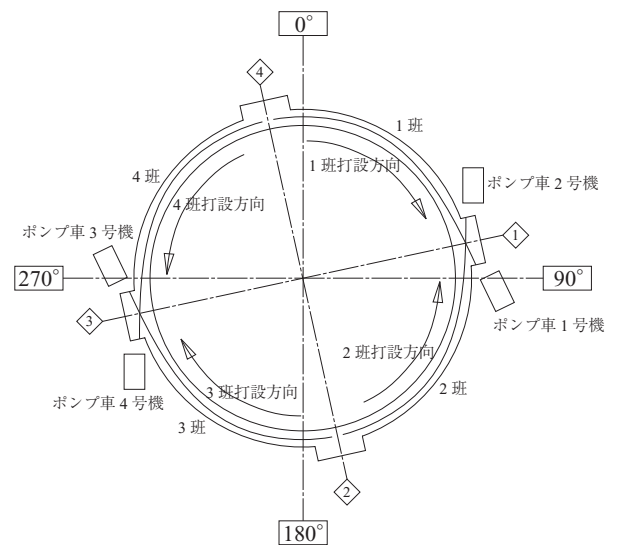


図 - 14 防液堤 #5～15 ロットコンクリートポンプ車配置図



写真 - 5 型枠鉛直精度調整状況

5.2 緊張工

円周方向 PC 鋼材のテンドンユニットには、VSL 工法の GC タイプを採用した。頂部 2 段の円周方向 PC 鋼材は、屋根のスラスト力によるフープテンションに対抗するため、最終ロット施工後にコンクリート強度 ($f_{ck} = 27 \text{ N/mm}^2$) を確認してから緊張を行った。その他の円周方向 PC 鋼材は、工事前開口部を閉鎖してから水張・耐圧試験

表 - 3 各施工段階における緊張順序

施工段階	#4 ロット完了後	PC 防液堤構築後	開口部閉鎖後
制約	#5 ロット施工前に緊張	屋根浮上 (AR) 前に緊張	開口部閉鎖～水張・耐圧試験までの間に緊張
緊張順序	① #3-4 鉛直方向 PC 鋼材 ② #1-2 鉛直方向 PC 鋼材	③ #3-15 鉛直方向 PC 鋼材 ④ #15 円周方向 PC 鋼材	⑤ 開口部 #3-15 ロット鉛直方向 PC 鋼材 ⑥ 開口部 #1-2 ロット鉛直方向 PC 鋼材 ⑦ #1→#10 ロット円周方向 PC 鋼材を1段おき ⑧ #11→#14 ロット円周方向 PC 鋼材のすべて ⑨ #10→#7 ロット円周方向 PC 鋼材の残り ⑩ 基礎版円周方向 PC 鋼材すべて ⑪ #1→#6 ロット円周方向 PC 鋼材の残り

前までの期間で緊張を行った。緊張作業は、図 - 15 に示すように、1本のケーブルの両脇にジャッキを据えて緊張する「両引き」により行った。

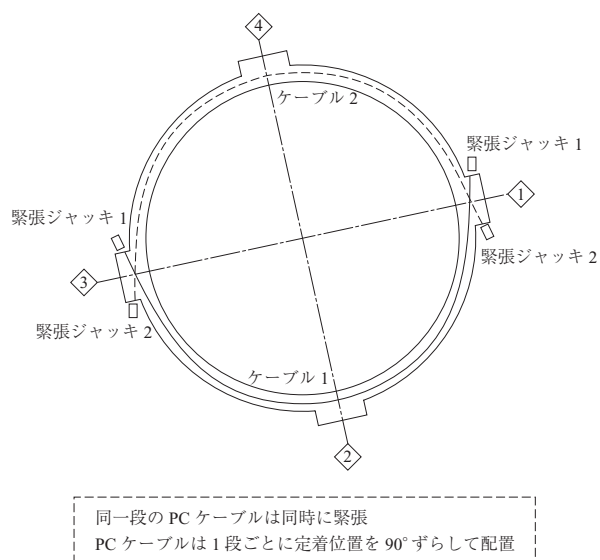


図 - 15 円周方向 PC 鋼材緊張用ジャッキ配置

鉛直方向 PC 鋼材には高周波熱錬 (株) のアンボンド PC 鋼棒を採用した。#1～2ロットおよび#3～4ロットの鉛直方向 PC 鋼材 (図 - 10 ③の鉛直1, 鉛直2) は、防液堤 #4 ロット施工後に緊張し、#3～15 ロットの鉛直方向 PC 鋼材 (図 - 10 ③の鉛直3) は、最終ロット施工後に緊張を行った。

各 PC の緊張順序は、事前に3次元シェル FEM モデルによる解析を行い、発生応力度ができるかぎり小さくなるように決定した。表 - 3 に各施工段階における緊張順序を示す。



写真 - 8 全景写真

6. おわりに

写真 - 8 に現在施工中の PCLNG 貯槽の全景写真を示す。今回変断面 PC 防液堤に PC 鋼棒を適用し、構造の合理化を行った。わが国のエネルギー事情から LNG の家庭用・産業用燃料として需要が今後も拡大すると考えられ、建設コストの増大を抑えるために今回開発した新型変断面 PC 防液堤のような合理的な構造がますます求められるであろう。

最後に多大なご協力とご指導をいただいた関係各位の皆様様に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 市波克洋, 岡嶋修一, 西宮 暁, 高木宏彰: 変断面構造を有する防液堤 (DUAL PC) の設計と施工 - 坂出 LNG 基地 180,000 kL PCLNG 地下式貯槽, ナショナルレポート 日本のプレストレストコンクリート構造物 第3回 fib コンgress 2010, (社) プレストレストコンクリート技術協会, 2010
- 2) (社) 日本ガス協会: LNG 地上式貯槽指針 [JGA 指-108-02], 2002

【2014年6月30日受付】