

ドンギ・スノロ LNG 170 000 kL PCLNG タンクの設計・施工

土屋 雅徳*1・河合 信之*2・梢 進一*3・日原 邦夫*4

ドンギ・スノロ LNG (Donggi-Senoro LNG) は、インドネシアスラウェシ島東部に位置する同国 4 番目の液化天然ガス (LNG) 生産プラントであり、その主要設備の一つである有効容量 170 000 kL の LNG タンクは、インドネシア初の PCLNG タンクである。タンクの構造は英国規格 BS 7777 の Full Containment Tank に準拠し、鋼製の内槽、二次底板、保冷材、RC 構造の基礎版、PC 構造の側壁および鋼製の屋根からなる。

本稿は、これらのうち土木工事の所掌である基礎版および側壁の設計・施工の概要について、品質確保や施工性向上のために工夫改善した点を中心に報告するものである。また、プラント建設地は離島の遠隔地であったため、そのような環境に特有の課題にも直面した。これらに関しても現場での対応の概要を報告する。

キーワード：PCLNG タンク、英国規格 BS 7777、遠隔離島工事

1. はじめに

ドンギ・スノロ LNG は、インドネシアで 4 番目となる LNG 生産プラントである。スラウェシ島東部の中規模ガス田の活用を目的として、三菱商事株式会社、韓国ガス公社、インドネシア国営石油会社プルトamina社および同国エネルギー企業大手のメドコ社の共同で開発が進められた。年間 200 万トンの LNG を生産し、うち 130 万トン発電用燃料としてわが国に供給する計画である。プラントの位置を図 - 1 に、プラントの全体概要を図 - 2 に示す。



図 - 1 ドンギ・スノロ LNG 位置図

LNG タンクは有効容量 170 000 kL で、BS 7777 “Flat-bottomed, vertical, cylindrical storage tanks for low temperature service” の Full Containment Tank に準拠する PCLNG タンクである¹⁾。インドネシアの既存のタンクは金属二重殻式であり、PCLNG タンクの建設は今回が初となる。

本稿では、ドンギ・スノロ LNG プロジェクトにおける



図 - 2 プラント全体図

PCLNG タンクの設計および施工の概要を報告する。また、本タンクの施工にあたっては、遠隔離島工事ならではの課題にも直面した。本稿の最後で、それらについても簡単に報告する。

2. 工事概要

本工事は、PCLNG タンク 1 基の基礎工事および外槽コンクリートタンクの躯体工事を設計施工で行うものである。表 - 1 に工事概要を示す。

タンクの構造概要を図 - 3 に示す。外槽コンクリートタンクは、直径 94 m、厚さ 0.6 ~ 1.4 m の基礎版と、内径 90 m、高さ 36.7 m、厚さ 0.7 ~ 1.0 m の側壁で構成されている。側壁は、4 方向に PC 定着のためのピラスター（幅 3.0 m × 厚さ 0.5 m の張出し部）を有し、円周方向、鉛直方向にプレストレスを導入する PC 構造である。

図 - 4 に機械工事（内槽、屋根、保冷などの工事）を含むタンク工事全体の施工ステップを、図 - 5 に実績工

*1 Masanori TSUCHIYA：清水建設(株) 土木技術本部 設計第一部

*2 Nobuyuki KAWAI：清水建設(株) 国際支店 ホーチミン地下鉄建設所

*3 Shinichi KOZUE：清水建設(株) 国際支店 シンガポール営業所

*4 Kunio HIHARA：清水建設(株) 土木技術本部 設計第一部

表 - 1 工事概要

工事名	ドンギ・スノロ LNG プロジェクト LNG タンク土木工事
事業者	ドンギ・スノロ LNG 社 (三菱商事 株式会社ほか 3 社の共同出資による特別目的会社)
発注者	日揮 株式会社 (プラント全体元請) トーヨーカネツ 株式会社 (タンク工事元請)
請負者	バンゲンチプタ・清水建設共同企業体
工事場所	インドネシア共和国 中部スラウェシ州 バンガイ県 ウソ村
契約工期	2011 年 3 月 31 日 ~ 2014 年 6 月 30 日
貯槽容量	170 000 kL × 1 基
基礎	直接基礎形式
基礎版	RC 構造, 外径: φ94 m, 版厚: 0.6 ~ 1.4 m
側壁	PC 構造, 内径: φ90 m, 高さ: 36.7 m 壁厚: 下端部 1.0 m, 一般部 0.7 m, 頂部 1.0 m 円周方向 PC 鋼材: 22S15.7 鉛直方向 PC 鋼材: 16S15.7

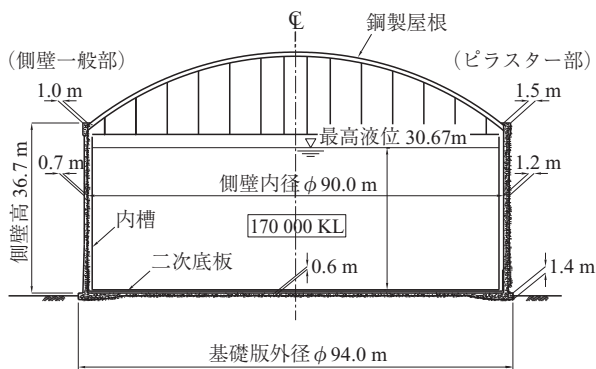


図 - 3 一般構造図

程を示す。土木工事の着手から完了までに要した期間は 31 ヶ月であった。

3. 設計の概要

3.1 基礎形式の選定

LNG タンクの基礎は、現地の地盤条件や運用条件に応じて、杭基礎、直接基礎、高床式基礎などから選定される。本タンクの建設地の地盤は、サンゴを起源とする未固結の石灰岩層（地盤工学的には礫質砂に区分される）であり、軟弱な沖積土や埋立土の地盤上に建設される国内のタンクに比べ、条件は良好である。

地盤調査結果から、タンク直下の地盤条件は図 - 6 のように整理され、これに基づき直接基礎の成立性について検討した。その結果、支持力、転倒および滑動に対する安定性、沈下とも所定の性能を満足することが確認できたため、本タンクでは直接基礎形式を採用した。また、基礎版は、タンク直下の地盤の凍上を防止するため、電気ヒーターを埋設する方式とした。

	2011	2012	2013	2014
設計	[Bar chart showing design period from 2011 to 2014]			
掘削～底部工	[Bar chart showing excavation and bottom work from 2011 to 2014]			
基礎版構築	[Bar chart showing foundation slab construction from 2011 to 2014]			
側壁構築	[Bar chart showing wall construction from 2011 to 2014]			
PC 鋼材緊張	[Bar chart showing PC steel tensioning from 2011 to 2014]			
表面塗装	[Bar chart showing surface painting from 2011 to 2014]			
機械工事	[Bar chart showing mechanical work from 2011 to 2014]			

図 - 5 全体工事工程

①～⑪は土木工事、その他は機械工事（タンクメーカー所掌）を示す。

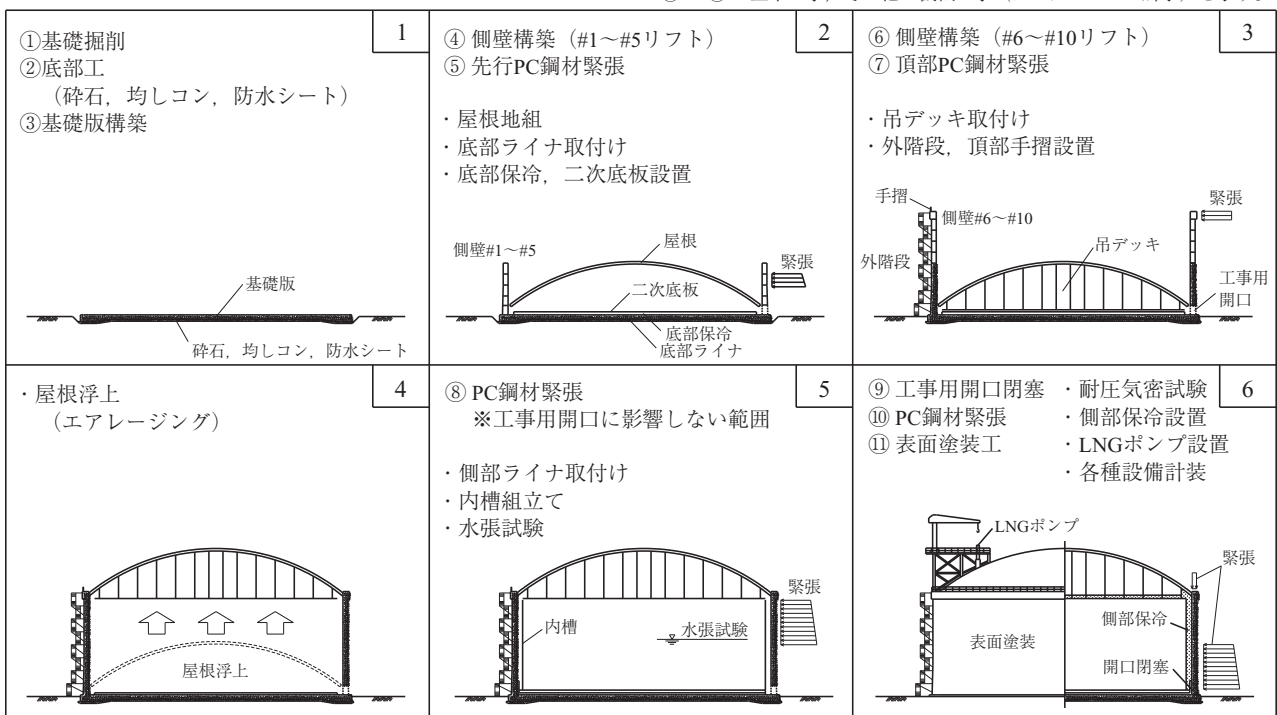


図 - 4 全体施工ステップ

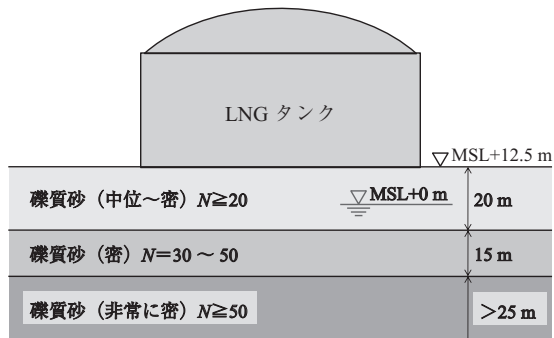


図 - 6 地盤条件

3.2 躯体の設計

躯体の設計は、BS 7777 およびその関連基準に基づき、限界状態設計法により行った。表 - 2 に設計の評価項目を示す。構造解析は、基礎版、側壁および鋼製屋根を一体とした 3 次元 FEM モデル (図 - 7) により行った。

表 - 2 設計評価項目

評価項目		対象となる状態
使用限界状態	ひび割れ幅	施工時 通常運転時
	液密性	LNG 漏洩時
終局限界状態	断面破壊	全荷重組合せ

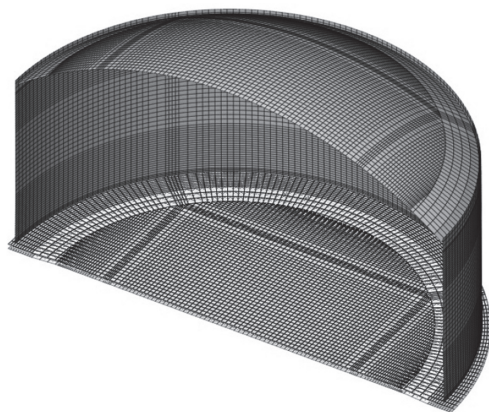


図 - 7 躯体の 3 次元解析モデル

(1) LNG 漏洩時に対する設計

LNG はメタンを -160°C 以下に冷却し液化したものである。このため一次容器としては、極低温に対応した 9% Ni 鋼製の金属タンクが用いられる。その外側に、二次容器としてコンクリート製の外槽があり、内槽金属タンクから万一 LNG が漏洩した場合に、液の拡散を防ぐ防液堤の役割を担う (このように内槽・外槽が、それぞれ単独で内容を保持できるタンクを BS 7777 では Full Containment Tank と定義している)。

LNG 漏洩時において、外槽は、液圧の作用および LNG の冷熱の作用に対して安全であるとともに、所定の液密性が確保されている必要がある。これらの要件に対する本タンクの設計の考え方を表 - 3 に示す。同表には比較対照

表 - 3 LNG 漏洩時に対する設計の考え方

	本タンク (BS 7777)	国内の標準的なタンク (LNG 地上式貯槽指針)
液圧への対応	側壁に導入する円周方向のプレストレス力により、液圧に対抗する。	同左
外槽の貯液機能確保	底部は 9% Ni 鋼製の二次底板を液密部材とし、基礎版には液密性を期待しない。したがって、基礎版はプレストレスが不要である。側部はコンクリートの液密性による。	底部、側部ともコンクリートにより液密性を確保する。このため、基礎版にもプレストレスが必要となる。
LNG の冷熱への対応	底部は二次底板および保冷により、外槽への冷熱の作用を低減する。側部は外槽が LNG に直接接触するため、側壁内面には極低温に対応した鉄筋を用いる。	底部、側部とも外槽内面に冷熱抵抗緩和部*を設置することで、外槽への冷熱の作用を低減する。
構造概念図		

*外槽内面に密着し、内槽荷重や液圧に対する強度と変形追従性を有し、外槽に作用する冷熱に抵抗し緩和する部材

のため、国内の標準的な PCLNG タンクにおける設計の考え方も併記した²⁾。

コンクリート躯体の液密性は、断面内に圧縮領域を確保することで担保する。本タンクにおける液密性能照査の判定基準は、以下のとおりである。

- 断面内に部材厚の 10% 以上かつ 80 mm 以上の圧縮領域を確保すること
- 同領域内における圧縮応力度の平均値が、1 MPa 以上であること

(2) 先行緊張によるひび割れ制御

ひび割れ幅については、本タンクの仕様書に基づき、施工時、通常運転時を対象に、側壁 0.2 mm、基礎版 0.3 mm を限界値として照査を行った。その結果、側壁の構築段階で、図 - 8 に示す躯体の変形挙動により、側壁のひび割れ幅 (強度から決まる配筋で計算した値) が一部で制限値を超過すると判定された。

対策として、1) 鉄筋の増量によりひび割れ幅を制御する方法、2) 側壁構築の途中段階で円周方向 PC 鋼材の一部を先行して緊張し、その後の側壁構築に伴って発生する可能性のあるひび割れを制御する方法、の 2 案が考えられたが、経済性および施工性の観点から 2) の先行緊張を選択した。先行緊張のタイミングおよび緊張範囲は、3 次

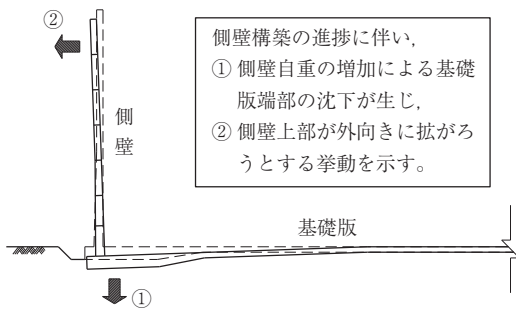


図 - 8 ひび割れ照査で想定された側壁構築時の躯体の変形挙動

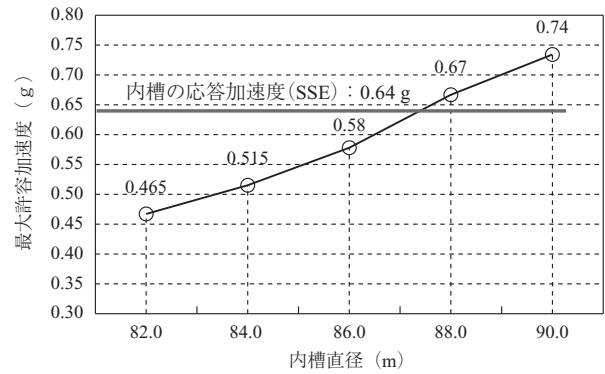


図 - 10 内槽直径と最大許容加速度の関係

元 FEM 解析に基づき決定した。

3.3 耐震設計に基づくタンクの低重心化

本タンクの耐震設計では、タンクと地盤の動的相互作用（応答の長周期化および地下逸散減衰）を考慮するため、図 - 9 に示すスウェーローキングモデルにより地震応答解析を行った。タンク本体は、基礎版、側壁、内槽、内容液（LNG）をおのおの別の質点でモデル化し、それぞれの最大応答加速度を算出できるようにした。

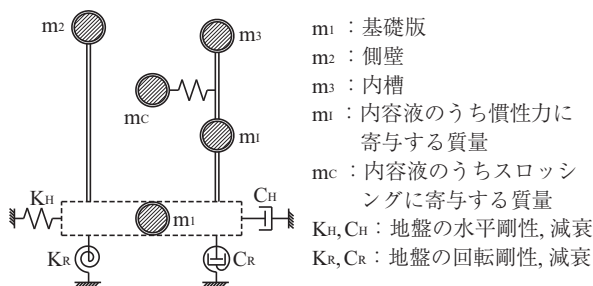


図 - 9 地震応答解析モデル

地震動は、OBE（Operating Basis Earthquake：施設が損傷することなく運転継続できることを求める地震動レベル）と SSE（Safe Shutdown Earthquake：施設が安全に運転停止できることを求める地震動レベル）の 2 段階を考慮した。

地震応答解析の結果を表 - 4 に示す。

表 - 4 応答解析結果（最大応答加速度）

	OBE	SSE
内槽	0.51 g	0.64 g
外槽	0.35 g	0.43 g
外槽 (LNG 漏洩時)	0.62 g	-

応答解析の結果、内槽の地震時の転倒に対する安定性を確保するため、タンクの径と高さを見直す必要が生じた。図 - 10 は内槽の直径に対し、設計上、内槽が転倒に対する安定を保持しうる最大加速度を示したものである。容量は一定のため、直径を大きくするほどタンクの重心が下がり、許容できる最大加速度は大きくなる。この関係に基づき、基本計画時に 82 m であった内槽の直径を 88 m に変更することで、内槽の安定を確保した（図 - 11）。

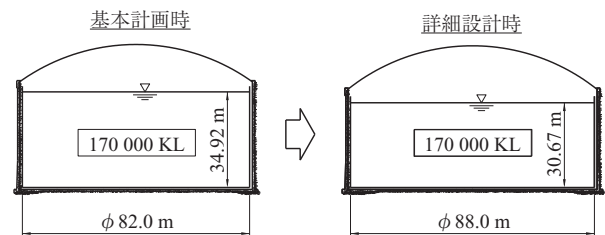


図 - 11 耐震設計に基づく低重心化

なお、安定確保の手段としては、このほかに、内槽を基礎版にアンカーで固定する方法がある（国内のタンクでは、アンカーを設置するのが一般的である）。しかし、本タンクは、内槽と基礎版の間に液密部材である二次底板があるため、これを貫通させる必要がある内槽アンカーの適用は避けた方がよいと判断した。

4. 基礎版の施工

4.1 基礎版構築の概要

基礎版全体のコンクリート量は 6 380 m³ であるが、本プロジェクトのコンクリート製造プラントが一度に供給できるコンクリート量の上限は、約 800 m³ であった。そのためコンクリートは、1 週間程度の間隔を置いて複数回に分割して打込む計画とした。打込みの順序は、次工程の側壁との取合いを考慮して外周部→中央部の順とし、鉄筋組立てや埋設管敷設などの作業も外周部が先行となるように行った。

基礎版構築の施工フローを図 - 12 に示す。また、鉄筋の施工状況を写真 - 1 に示す。

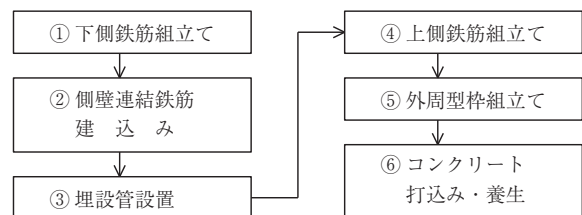


図 - 12 基礎版構築フロー

4.2 コンクリート打込み

コンクリートの施工分割は、図 - 13 に示すとおりとし



写真 - 1 基礎版鉄筋施工状況



写真 - 2 外周ブロック打込み状況

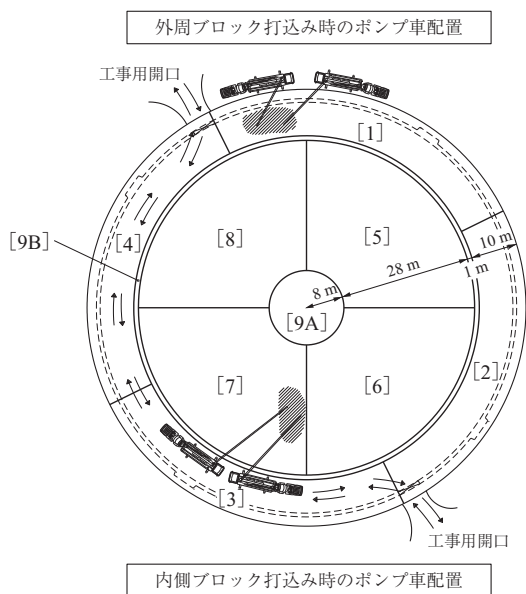


図 - 13 基礎版コンクリートの施工分割

た。外周の [1] ~ [4] ブロックと内側の [5] ~ [8] ブロックの間には、外部拘束による温度ひび割れを防止する目的で、幅 1m のスリット部を設けた。最後にコンクリートを打込む中心部 [9A] とスリット部 [9B] には、膨張コンクリートを採用してひび割れ抑制を図った。

外周ブロックは、ポンプ車 2 台を基礎版の外に配置し、1.4 m 厚のスラブを 50 cm, 45 cm, 45 cm の 3 層で打ち込んだ。打重ね時間間隔は、事前の確認試験で上限を 2 時間と定め、これを超えないように管理した。

内側のブロックは、タンク外からポンプ車のブームが届かないため、ポンプ車とアジテータ車を施工済みの外周ブロック上に配置した。中央付近はそれでもブームが届かないため、配管を延長して打ち込んだ。

外周ブロック、内部ブロックのコンクリート打込み状況を写真 - 2, 3 に示す。

5. 側壁の施工

5.1 側壁構築の概要

側壁の構築にはクライミング型枠システムを採用し、全高 36.7 m を 10 リフト (標準リフト高 3.9 m) で施工した。



写真 - 3 内側ブロック打込み状況

クライミング型枠システムは、4 段の作業足場と内外の型枠が一体になったものである。支持は、施工済みの側壁に設置したブラケットから取り、1 リフト分の構築が終わるごとに、クレーンでブラケットごと上段に移設する。型枠は、スライド機構により、組立て・脱型が容易に行えるようになっている。本システムを使用した側壁の施工状況を写真 - 4 に示す。

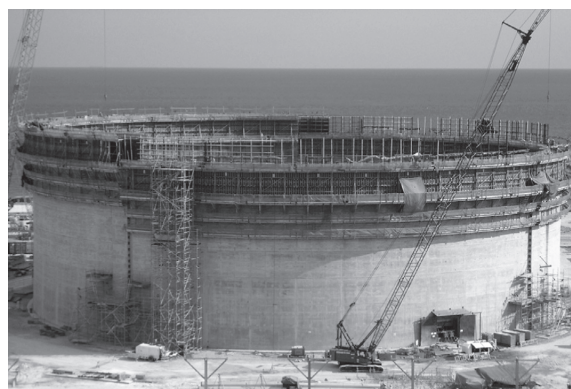


写真 - 4 側壁構築状況

1 リフト分の作業の流れは、図 - 14 に示すとおりである。標準 3.9 m リフトの施工におけるサイクルタイムは、計画 21 日に対し、実績は 19 ~ 23 日であった。

5.2 PC ダクト用架台および PC ダクト設置

PC ダクト取付け用の架台は、現地の作業場で形鋼を組

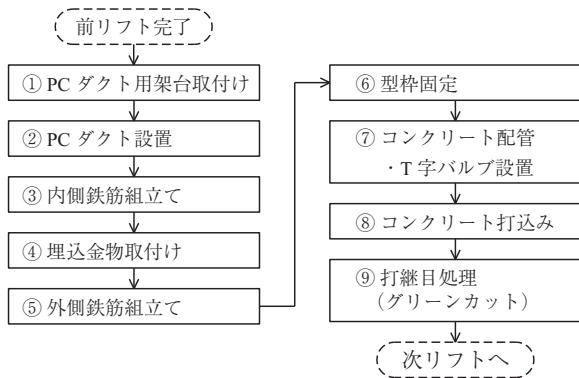


図 - 14 側壁構築サイクル

み合せて製作し、前リフトのコンクリート打継ぎ処理完了後に、クレーンにて側壁内に設置した。架台は、当初は4本脚タイプで、連結ユニットにより全ユニットを円周方向に連結する構造であった(写真 - 5)。しかし、サイクルタイム改善のため製作・設置の効率化が必要となり、PCダクトの固定と位置精度の確保に支障がないことを確認しながら、段階的に簡略化を図った。最終的に、第3リフト以降は、写真 - 6に示す2本脚タイプとし、円周方向の連結も行わない構造とした。

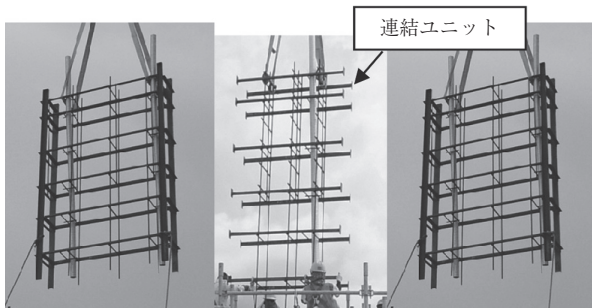


写真 - 5 PCダクト取付け用架台(初期型)



写真 - 6 PCダクト取付け用架台(最終型)

PCダクトは巻管加工機を用いて現地で帯鋼から製作した(写真 - 7)。これにより、完成品のダクトを購入する場合に比べ、輸送費を大幅に削減することができた。ダクトの接続には同様に現地で製作したカプラーを用い、位置精度の確保に留意しながら架台に固定した。

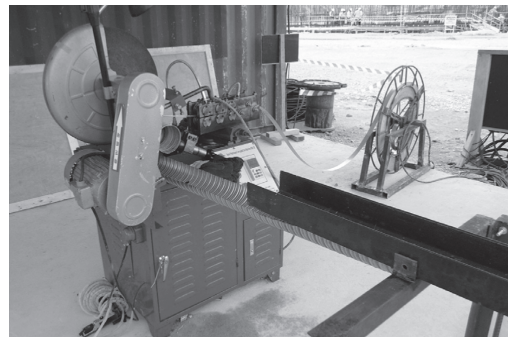


写真 - 7 PCダクト製作状況

5.3 鉄筋組立て

側壁一般部の鉄筋は、地上で幅12m×高さ3.9mの網状に組み立て、クレーンにて所定の位置に設置した(写真 - 8)。



写真 - 8 側壁鉄筋組立て状況

4箇所あるピラスター部は、それぞれの場所で組立てを行った。ピラスター部は鉄筋、定着具、ダクトなどの部材が入り組んで配置されるため、実際の施工の前に、①各部材の干渉のチェック、②組立て作業手順の確認、③作業員のトレーニングを目的として、地上で実大模型の製作を実施した(写真 - 9)。

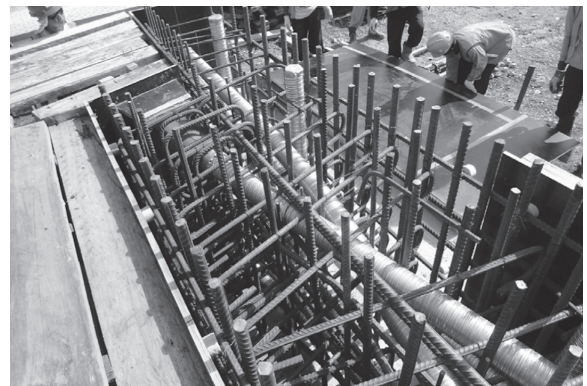


写真 - 9 ピラスター部の実大模型

5.4 コンクリート打込み

側壁コンクリートの打込みは、以下の理由により、全周

を180°ずつに2分割して行った。

- コンクリート打込みと鉄筋、型枠などの作業を並行して行うことで、手待ちによるロスを減らし工期短縮を図る。
- コンクリート製造プラントの供給能力に対し余裕のある打込み量とすることで、プロジェクト内の他工事とコンクリートを取り合うリスクを回避する。

打込み方法は、第1～第3リフトではポンプ車を使用し、第4リフト以降は、国内でよく使われるT字バルブを用いた配管打込みとした(写真-10)。



写真 - 10 配管によるコンクリート打込み状況

配管打込みのコンクリート圧送には、地上に設置した定置式ポンプを使用した。圧送距離は鉛直部が最大約40m、水平部が約75m(周長の1/4)であったが、事前に地上で延長約200mの水平圧送試験を実施し、コンクリート(スランプ21cm)を材料分離なく確実に圧送できることを確認した。

ピラスター部は、PC鋼材の緊張により大きな圧縮力および割裂力が作用する箇所であり、一般部に比べて鉄筋などの配置が複雑であることから、コンクリートの打込みにおいてとくに慎重な施工管理が必要であった。具体的な対策として、打込みに追従して移動する締固め班とは別に、ピラスター部専属の締固め班を配置することで、締固めの確実性向上を図った。結果として、コンクリートの欠陥やそれに起因する品質不具合を発生させることなく、躯体構築を完了することができた。

5.5 PC鋼材緊張工

円周方向、鉛直方向とも、PC定着工法にはフレシネーのC Rangeシステムを採用した。

側壁第5リフトの構築完了後、所定のコンクリート強度(32MPa)の発現を確認してから、3.2(2)で述べた先行緊張を実施した。

PC鋼材(tendon)のダクトへの挿入は、当初の施工計画に基づき、あらかじめ地上に設置した架台上でPC鋼材より線を束ねてから、ウィンチでダクト内に引き込む方法で行った(写真-11)。しかし、この方法では、揚重作業が多く予想以上に時間が掛かることが判明したため、次回緊張までに挿入方法を再検討することになった。

緊張はPC鋼材の両端にジャッキを据えて、同時に引張



写真 - 11 先行緊張におけるPC鋼材挿入状況

力を与える方法で行った。ジャッキの昇圧は5MPaピッチとし、所定のジャッキ圧力に到達したときのPC鋼材の伸び量を、計算値の±10%以内(隣接する10本の平均では±6%以内)で管理した。緊張終了後、グラウト充填を行って先行緊張を完了し、側壁第6～第10リフトの構築を続けた。

側壁構築完了後、屋根の架設によって生じる水平力に抵抗するため、側壁頂部3段分の円周方向の緊張を実施した。ここでPC鋼材挿入作業の歩掛り改善を図るため、プッシングマシンでPC鋼より線を1本ずつ押し入れる挿入方法を試行した。結果、円周方向についてはこの方法が有利である(安全で速い)と判断し、以降の円周方向のPC鋼材挿入は、すべてこの方法で行った。

屋根架設完了後、鉛直方向PC鋼材の緊張および残りの円周方向PC鋼材の緊張を実施した。鉛直方向PC鋼材の挿入は、ウィンチ牽引による一括方式とし、緊張および緊張管理は円周方向と同様とした。側壁には内槽工専用の仮設開口が2カ所あるが、緊張による開口周辺への影響を3次元FEM解析で検討し、開口閉塞前に緊張可能な部分とそうでない部分とに分けて2段階で施工した。

5.6 コンクリート表面塗装工

最後に、塩害対策としてコンクリートの露出面全体にエポキシ樹脂を主材とする塗装を施した。施工は、タンク頂部に取り付けられたゴンドラレールに4人乗りのゴンドラを設置して行った(写真-12)。



写真 - 12 表面塗装状況

写真 - 13 に完成したタンクの全景を示す。



写真 - 13 完成した PCLNG タンク

6. 遠隔離島工事における課題と対応

6.1 資機材の調達および輸送

本工事の主要資機材のほとんどは、ジャカルタまたはスラウェシ州の州都であるマカッサルから調達した。スラウェシ島内は陸上交通インフラが脆弱なため、ジャカルタ・マカッサルいずれの場合も、海上輸送が基本となった。

海上輸送のリスクとして、天候不良などに起因する輸送の遅延、船の揺れによる積荷の破損が考えられた。これらのリスクを軽減するため、輸送計画の策定において以下の点を考慮した。

- 冗長性をもたせるため、ジャカルタから現地までの輸送ルートに2系統確保（図 - 15）
- より現地に近いマカッサルで調達可能なセメント、重機部品などは、マカッサルで調達
- 破損によるロスを考慮した調達計画、予備の確保

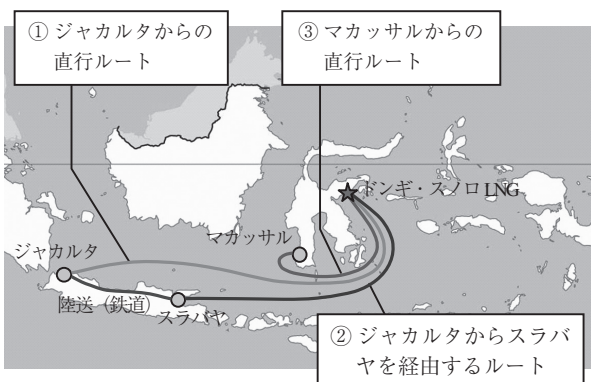


図 - 15 資機材輸送ルート

6.2 雇用に関する制約条件

インドネシアでは、1993年制定の労働環境ガイドライ

ンにより、現場が位置する地区から優先的に労働者を雇用することが義務付けられている。一方、現場監督員や鉄筋工、溶接工などのスキルを要する人材は、ジャカルタやジョグジャカルタといった島外の都市部出身者に頼らざるを得ない状況であった。

また、地元住民は利権意識が強いうえに、スラウェシ島民に特有の気性の激しさがあり、不満があれば頻繁に道路封鎖などのデモを起こした。

このような制約条件の下、実際の雇用にあたっては、島外出身者数と地元出身者数のバランスのほか、地元の各地区ごとの出身者のバランスにも配慮し、トラブル防止に努めた。

6.3 僻地勤務におけるストレス対策

僻地での共同生活では、オンオフの切替えができる環境が必要である。現場宿舎の周辺には自然以外に何も無いが、オフの時間を楽しむ場として、その自然を活かした「海の家」（写真 - 14）を建設した。このほか、可能な限り食事の質を高めるなど、僻地勤務でのストレス防止に配慮した。



写真 - 14 余暇施設「海の家」

7. おわりに

本タンクは、2014年6月、当初の計画どおり竣工した。現場を進める原動力となったのは、インドネシアの若い技術者や労働者であった。インドネシア初となるPCLNGタンクの建設を経験した彼らが、今後もインフラ整備の第一線で活躍してくれることを期待している。

最後に、本タンクの施工にあたりご指導およびご協力をいただいた皆様に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) British Standard Institution : BS 7777 Flat-bottomed, vertical, cylindrical storage tanks for low temperature service, 1993.
- 2) 日本ガス協会 : LNG 地上式貯槽指針 [JGA 指-108-12], 2012

【2015年7月6日受付】