

川越火力発電所180,000klPCLNG貯槽の 設計・施工

小林 祐樹¹・松井 剛志²・武田 聡³・今村 厚⁴

¹正会員 大成建設(株)土木本部土木設計部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1)

²正会員 大成建設(株)東北支店 (〒980-0811 宮城県仙台市青葉区一番町3-1-1)

³正会員 大成建設(株)名古屋支店 (〒450-6047 愛知県名古屋市中村区名駅1-1-4)

⁴正会員 大成建設(株)本社営業総本部甲府営業所 (〒400-0031 山梨県甲府市丸の内1-17-10)

川越火力発電所は、三重県川越町に位置し、燃料にLNG（液化天然ガス）を使用した合計出力480.2万kWの世界最大級の火力発電所である。現在、中部電力株式会社は、LNG調達の柔軟性と拡大する需要に対応するため、平成19年度から平成25年度にかけて燃料設備のインフラ整備を行っている。本工事は、現在ある既設のNo.1～No.4LNGタンク（12万kl、金属二重殻貯槽）に並列して構築するNo.5、No.6LNGタンク（18万kl、PCLNG貯槽）の増設工事である。本報文は、No.5、No.6LNGタンク（18万kl、PCLNG貯槽）の土木工事の設計と施工の概要について報告する。

キーワード：LNG、液化天然ガス、PCLNG貯槽、鋼管杭、基礎版、PC防液堤

1. はじめに

川越火力発電所は、伊勢湾内の四日市港に面した三重県川越町に位置し、発電用燃料にLNGを使用した合計出力480.2万kWの世界最大級の火力発電所である。¹⁾

LNG貯槽は、発電所用地の東側に配置され（図-1）既設のNo.1～No.4LNGタンク（12万kl×4基）に並列して、No.5、No.6LNGタンク（18万kl×2基）の増設を行っている。貯槽形式は、経済性・土地利用の有効活用の観点からPCLNG地上式貯槽を採用した。このPCLNG地上式貯槽は、金属製の内槽、保冷材、PC構造の外槽（PC防液堤）からなる構造である。本貯槽には、品質向上・建設コスト削減を目指して開発した新型の防液堤“DUALPC防液堤”を採用した。図-2に一般構造図、表-1にLNGタンクの概要を示す。

平成23年6月現在の工事進捗は、基礎版、PC防液堤の構築をほぼ終え、PC緊張工事および機械工事を行っている。表-2に工事工程表を示す。

本報文では、No.5タンク、No.6タンク増設工事の内、土木工事である基礎杭、基礎版およびPC防液堤の設計と施工の概要について報告する。

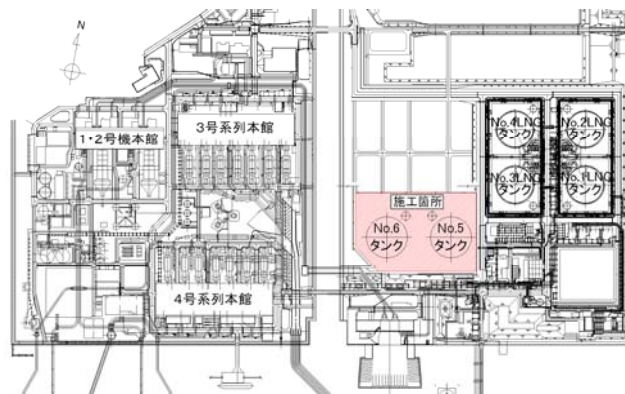


図-1 川越火力発電所のレイアウト図

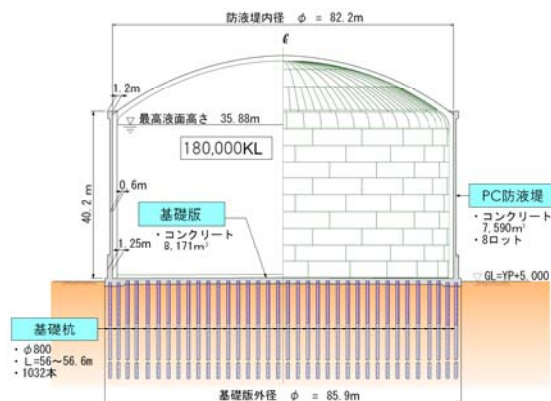


図-2 一般構造図

表-1 LNG貯槽の概要

	No.5, No.6タンク
型式	PC防液堤・外槽一体型平底球面屋根付円筒形貯槽
容量	18万kl/基 (内槽内径φ80.0m, 最高液面高さ35.88m)
基礎杭	鋼管杭: 1,032本/基 (支持層: 洪積砂礫層) 杭径: φ800mm, 肉厚: t11~22mm 杭長: L56.0~56.6m, 施工方法: 打撃工法 基礎杭 - 基礎版結合方法: 剛結合
基礎版	外径: φ85.9m 版厚: 中央部t1.4m, 外周部t1.8m 円周PC鋼より線: 27S15.2 3段×2列
PC防液堤	内径: φ82.2m, 高さ: H40.2m 壁厚: 下端部t1.25m, 一般部t0.6m, 頂部t1.2m 円周PC鋼より線: 19S15.2 63段×1列 鉛直PC鋼より線 (長尺): 10S15.2 192セット 鉛直PC鋼より線 (短尺): 19S15.2 384セット

表-2 工事工程表

		H21年	H22年	H23年	H24年
No.5タンク	基礎杭	■			
	基礎版	■			
	PC防液堤		■		
	PC緊張			■	
	機 械		■	クールダウン	H24.10 ▼
No.6タンク	基礎杭	■			
	基礎版	■			
	PC防液堤		■		
	PC緊張			■	
	機 械		■	クールダウン	H24.10 ▼

2. PC防液堤の構造

(1) PC防液堤の機能と構造

PCLNG地上式貯槽は、通常運転時には内槽によりLNGを貯液する構造となっている。PC防液堤は、この内槽からLNGが漏洩した場合に、外部へLNGが漏洩することを防ぐ機能を有する。そこで、PC防液堤には、LNGが内外槽間へ漏れ出した場合を想定し、LNGの液圧を打ち消すように円周方向にPC鋼材を配置している。

一方、通常運転時には、LNGは内槽にて貯液されているため、PC防液堤にはLNGの液圧は作用しない。そのため、円周方向のPC鋼材による力のみが作用することになり、基礎版に拘束されたPC防液堤下端部では、鉛直方向の大きな曲げモーメントが発生し、防液堤外側には、引張応力によりひび割れが生じる可能性がある。そこで、このひび割れを抑制することを目的として、鉛直方向にPC鋼材を配し、圧縮力を作用させている。

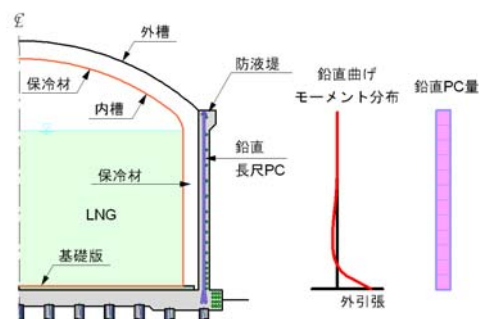
(2) DUALPC防液堤

これまでのPCLNG貯槽では、壁厚が等厚で、鉛直方向のPC鋼材は、曲げモーメントが最大となる防液堤下端部において必要な鋼材量を決定し、それを頂部まで配置する構造となっていた。そのため、下端部を除く一般部では、かなり余裕のある仕様となっていた。(図-3(a))

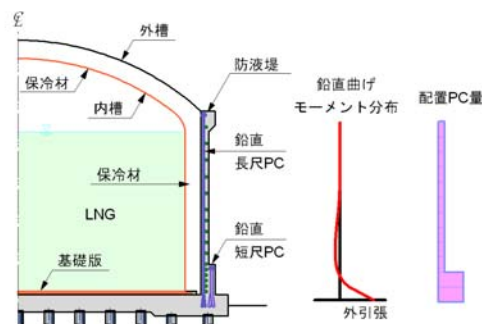
これに対し、「DUALPC防液堤」は「必要な場所に必要なプレストレス」というシンプルで合理的な発想で新しく開発された。(図-3(b)) 特徴をまとめると以下のようになる。

- ① 応力の大きい下端部の壁厚を大きくし、応力の小さい一般部の壁厚を必要最小厚さとした変断面構造である。
- ② 変断面構造部に2列の鉛直PC鋼材 (長尺PC・短尺PC) を配置することで、防液堤下端部に効率的にプレストレスを導入できる。
- ③ 円周方向のプレストレス力により発生しやすい下端部外側のひび割れに対し、短尺PCを外側に配置する。
- ④ 一般部には、小さな応力に見合った鉛直PC鋼材を配置することができる。

以上のような特徴により、合理的な壁厚・PC鋼材量となり、結果として鉛直PC鋼材の重量は従来のPC防液堤の50%以下に削減が可能となった。



(a)従来型防液堤



(b)DUALPC防液堤

図-3 従来型防液堤とDUALPC防液堤の構造比較

3. PCLNG貯槽の設計

(1) 地盤の概要

タンクエリアの平面図および地質縦断図を図-4に示す。当該地盤は、地表面から約10mまでは埋立地盤であり、粘性土と砂質土の互層となっている。表層は、粘性土が主体である範囲（A地盤）と、砂質土が主体である範囲（B地盤）に分かれている。約10m以深には、厚さ6m程度の沖積砂層および厚さ25mの沖積粘土層が堆積している。地表面から40m以深ではN値50以上の砂礫を主体とする洪積層が35mの厚さで堆積している。

この層には、層上面からおおよそ15m程度の範囲にわたり介在粘性土が存在するため、基礎杭の支持層は介在粘性土以深である地表面から50m付近とした。

地表面から約18mの深度までは、先行工事として、サンドコンパクションパイル、また、その下部はサンドドレーンおよび載荷盛土による圧密促進工法により地盤改良が行われた。

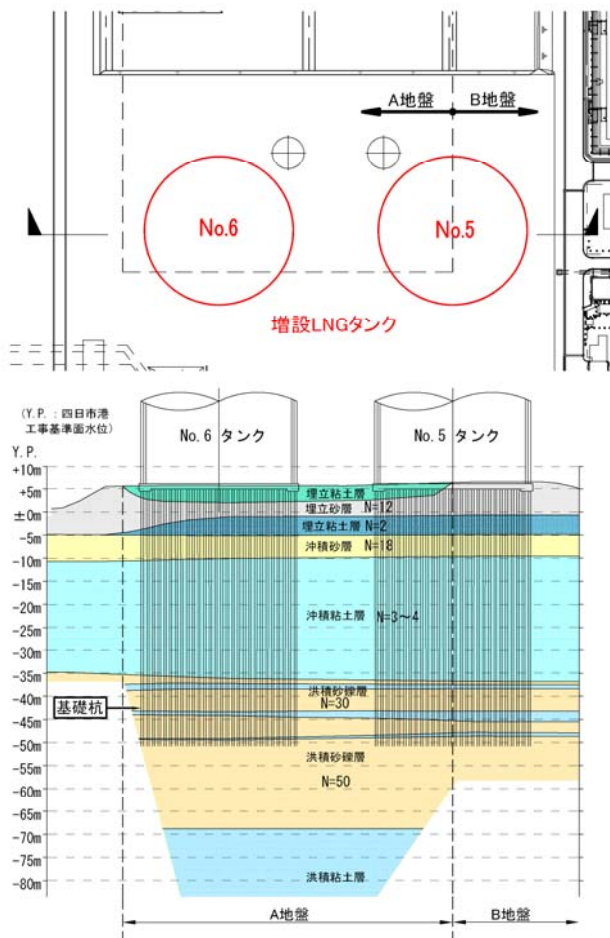


図-4 タンクエリア平面図・地質縦断図

(2) 基礎杭の設計

基礎杭の設計は、通常運転時、強風時、試験時、地震時の荷重ケースに対し、安定の保持（支持力の評価）、杭頭部および地中部の杭体の評価を行い、目標性能を満足するように杭仕様を決定した。

耐震検討は、「LNG地上式貯槽指針²⁾」に示されている修正震度法にて行った。また、当該地域に発生する可能性の高い地震動に対する評価を行うため、時刻歴地盤応答解析を行い、地盤変位および地盤の剛性低下率を算定し、その結果から応答変位法により中杭と下杭の肉厚を決定した。

(1)で述べたように、A地盤とB地盤では表層地盤は土質およびN値が異なる。そのため、杭の水平力の算定においては、A地盤とB地盤の表層地盤における地盤反力係数が異なることによる杭水平力の分担比率の違いを考慮した。具体的には、基礎版を剛体版と仮定してChangの式により算出される、A地盤とB地盤の変位が等しいという関係と、各杭に作用する水平力の合計が一定であるという関係から以下に示す式①と式②により、 H_n および H_w を求めた。

$$H_n = \frac{H_{total}}{H_n + \left(\frac{\beta_w^3}{\beta_n^3} \right) \times (N_{total} - N_n)} \quad (1)$$

$$H_w = \frac{1}{N_w} (H_{total} - H_n \cdot N_n) \quad (2)$$

ここで、

H_n : B地盤の杭頭に作用する水平力(kN)

H_w : A地盤の杭頭に作用する水平力(kN)

H_{total} : 水平方向荷重(kN)

β_n : B地盤の杭の特性値

β_w : A地盤の杭の特性値

N_{total} : 全杭本数(本)

N_n : B地盤の杭本数(本)

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{\xi \cdot k_h \cdot D}{4EI}}$$

E : 杭のヤング係数(kN/m²)

I : 杭の断面二次モーメント

k_h : 単杭の設計水平方向地盤反力係数(kN/m³)

ξ : 群杭の影響を考慮する係数

D : 杭径(m)

(3) 基礎版・PC防液堤の設計

基礎版およびPC防液堤の設計フローを図-5に示す。

PC防液堤は、万一内槽からLNGが漏液した際に、PC防液堤に液圧が作用する。この液圧と釣り合うように円周PC量および配置を決定した。これにより、圧縮領域を10cm以上確保し、液密性を確保した。同様に基礎版も液密性を確保するために円周PCを導入した。次に、PC防液堤では常時にひび割れが発生しないように鉛直PC量および配置を決定した。

さらに、基礎版ではひび割れ幅が制限値以上とならないように、かつ地震時に断面破壊を起こさないように鉄筋量およびコンクリート強度を定めた。

なお、各部の応答値(断面力)は、図-6に示す3次元シェルFEMに、自重、液圧に加え、温度荷重、地震荷重、PC力等をLNG地上式貯槽指針²⁾に基づいて組み合わせて算定した。

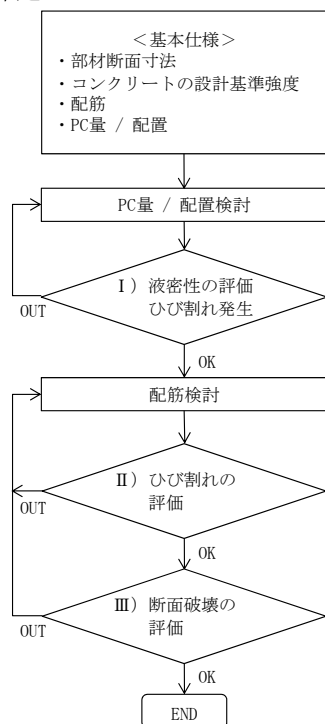


図-5 基礎版およびPC防液堤の設計フロー

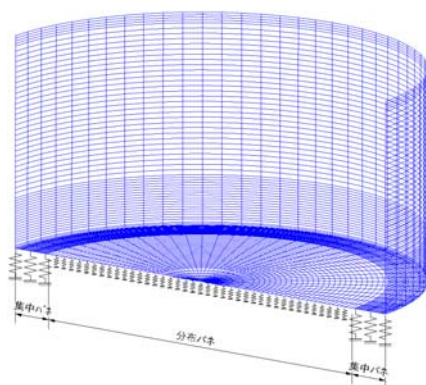


図-6 FEM解析モデル

4. PCLNG貯槽の施工

(1) 全体施工順序

PCLNG貯槽の全体施工順序を図-7に示す。

基礎杭（鋼管杭）を油圧ハンマによる打撃工法にて施工した。次に、基礎版の構築を行った。このとき、基礎版ヒータ、アンカーストラップを同時に設置した。

PC防液堤の構築は、1ロットの足場は枠組足場、2ロット以降はスライド足場として施工した。PC防液堤の構築中は、機械側の内外槽設置工事との並行作業となった。

PC防液堤構築後、頂部の円周方向PCを緊張し、機械工事にて底板部で施工した鋼製屋根をエアーで浮上させた。その後、開口部閉鎖、PC緊張を行い、側部に冷熱抵抗緩和材、保冷材を設置して完了となる。

(2) 基礎杭工

a) 基礎杭の製作

杭の肉厚は上杭が22mm、15mm、11mm、中杭～下杭は11mmとなっている。そこで、上杭の異なる肉厚間の溶接は工場溶接とした。さらに、杭長は陸上運搬上の制限から1本の長さが14m以下となるように、4本杭とした。

b) 試験杭

杭の本格打設前に、杭の鉛直支持力の確認および支持力管理式の作成を目的として、杭の鉛直載荷試験を実施した。杭の鉛直載荷試験は、衝撃載荷試験と急速載荷試験の2種類を行った。

衝撃載荷試験は、荷重として杭頭にハンマーで打撃力を与え、その時の杭頭での発生応力、速度を計測し、一次元波動理論に基づいて解析し、地盤の静的な貫入力を推定する方法である。一方、急速載荷試験は、杭頭に緩衝材を設置した状態で45tの重錘を落下させ、比較的ゆっくりとした載荷時間を確保し、静的な抵抗力を推定する方法で、静的載荷試験に比べて設備が容易で試験時間が短いのが特徴である。

急速載荷試験で確認した杭の静的支持力と、衝撃載荷試験で確認した杭打設時の静的抵抗力との比を地盤回復率（セットアップ率）として、これに乗じてHileyの式を基にIHC油圧ハンマーの打設時の支持力管理式を定めた。

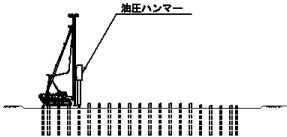
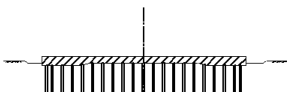
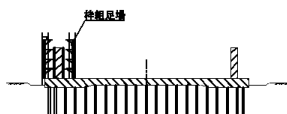
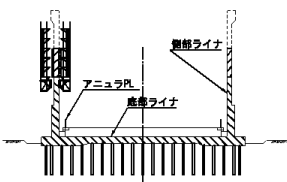
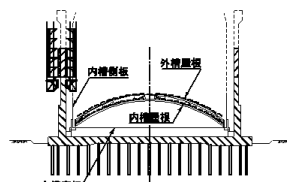
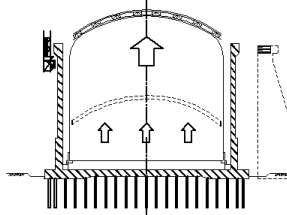
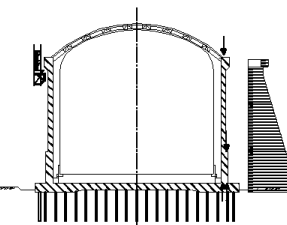
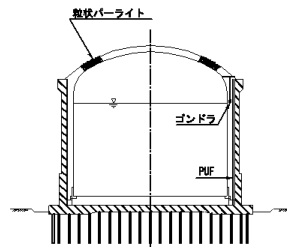
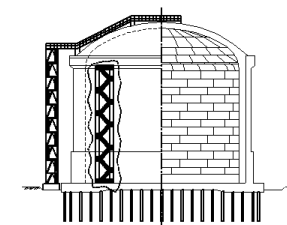
① 基礎杭工	② 基礎版構築	③ PC防液堤構築1～3ロット構築
		
先行して基礎版中央下面レベルに盤下げを行う。 その後、基礎杭の打設を打撃工法により行う。	基礎版の構築を行う。 また、基礎版内にはヒータ管の配置を行う。	PC防液堤1ロット(5.3m)の構築を行う。
④ PC防液堤2～8ロット構築、 ライナ*・リング部保冷*・アニュラPL*	⑤ 内槽側板*・底部保冷*・内槽底板* 屋根組立*	⑥ 頂部PC緊張・屋根浮上*
		
※：機械工工事 2ロット以降、スライド足場により行う。 PC防液堤3ロット構築後、機械工事との並行作業となる。	※：機械工工事 PC防液堤構築完了後、機械工事にて底部保冷、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。	※：機械工工事 屋根浮上の前に、頂部円周方向テンドンのプレストレスリングを行う。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。 その後、外槽屋根を防液堤頂部と接続する。
⑦ PC緊張	⑧ 水張り*・耐圧*・気密試験* PUF・屋根保冷材取付*	⑨ 完 成
		
工事開口の閉鎖後、防液堤の鉛直・円周方向テンドンのプレストレスリングを行う。	※：機械工工事 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。	

図-7 全体施工順序図

c) 基礎杭の施工

本LNG貯槽の杭は、1032本/基と杭本数が多いため、杭の打設工程を所定の期間内に収めることが課題であった。そこで、対策として①IHC油圧ハンマーの採用、②屏風打設の採用をした。

ハンマーの選定にあたり、地盤データから事前に打撃解析を行った。その結果、通常の10t油圧ハンマーでは打撃回数が7000回程度になると予想された。また、既設のLNG貯槽の打設実績では、洪積砂れき層を支持層として3本/日程度であり、今

回はその支持層に10m程度根入れする必要があった。そこで、通常の10t油圧ハンマーでは、所定の工程に収まらないと判断し、IHC油圧ハンマーを採用した。(図-8)

IHC油圧ハンマーは、オランダ製の油圧ハンマーで、ラムの落下に加え窒素ガスの圧縮圧力を作用させて加速して打撃するハンマーで1分間の打撃回数が通常の油圧ハンマーの2~3倍程度と多く、また、クッションを必要としないため直接打撃エネルギーが杭に作用して、効率的に打撃ができる。

通常の杭では、杭を一本毎に仕上げていくため、杭打設→継ぎ杭溶接→杭打設→継ぎ杭溶接・・・となり、溶接時に打設が中断する。そこで、この溶接時の打設中断時間を解消するため、屏風打設を採用した。（図-9） 屏風打設では、数本の杭をグループとし、同じ種類の杭（たとえば下杭）を移動しながら連続して打設し、溶接工は打設が完了した杭から順次溶接を行う。そして、杭打機はグループの杭が打ち終わり次第、はじめの杭に移動し、溶接の完了した杭の打設を始める。これにより、杭打設と溶接を並行して行うことができ、杭を効率的に打設することが可能となった。



図-8 IHCハンマー



図-9 基礎杭打設状況

(3) 基礎版工

a) 施工手順

基礎版はLNG貯槽の荷重を杭に伝達する役割を持ち、PC防液堤と剛結合される円盤構造である。基礎版外周部には、漏液時の液密性を確保するために円周方向にPCテンドン配置する構造となっている。基礎版には、LNGの冷熱による基礎版下の地盤凍結を防止するために設置される基礎版ヒータ管（SECT管）や、地震時における内槽タンクの転倒防止のために基礎版に埋め込まれるアンカーストラップ、基礎版と防液堤のコーナー部に設置される外槽ライナ設置用のコーナーアングルが設置される。また、施工時の計測を行うためのFBG固定式傾斜系および水平傾斜計用ガイドパイプ、熱電対といった計測計器を設置する。基礎版の施工フローを、図-10に示す。

b) コンクリート一括打設

基礎版のコンクリートは8,171m²であり、これを一括打設し、継ぎ目のないコンクリートとした。現場近郊でこれだけの大量打設を実施した実績はなかったため、生コン組合と十分に打ち合せを行い、現場近傍の9プラントで実施することとなった。プラント選定は次の条件を満足するプラントとした。

- ① JISマーク表示認定工場である
- ② 全ての工場で同一の種類のセメントおよび混和剤を使用することが可能である
- ③ 計画に見合うコンクリートを供給することが可能である
- ④ 運搬距離が1時間以内である。

また、事前にすべての生コンプラントにおいて、実機プラントによる試験練り、走行試験、打ち重ね試験等の各種試験を実施した。

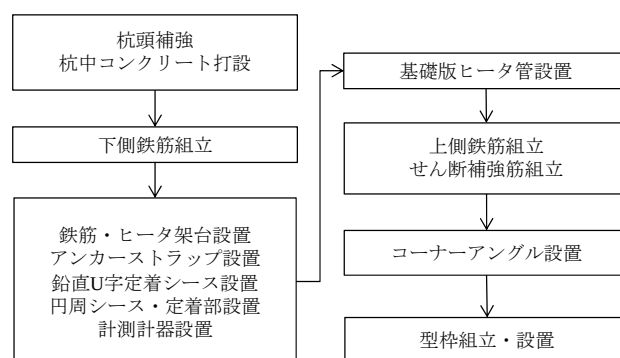


図-10 基礎版施工フロー



図-11 基礎版コンクリート打設状況

打設は総勢約350人、9班体制の2交代で、朝の5時に打設を開始し、約18時間かけて行った。打設順序は、タンク中央部から外周部へ行き、コンクリートの打ち重ね時間が2時間以内となるように管理した。

その結果、平成21年10月にNo.5タンク、12月にNo.6タンクの打設を行い、大きなトラブルもなく、無事に施工を完了した。

(4) 防液堤工

a) 概要

PC防液堤は、全高40.2mを標準ロット5.4mの8回で構築した。施工順序は、①足場のスライド、②鉄筋・PCシース組立、③型枠組立、④コンクリート打設、⑤脱型の流れで行った。PC防液堤の標準施工フローを図-14に示す。

b) 足場工

防液堤の足場は、構築に伴いスライドさせていくスライド足場とした。また、スライド足場へ昇降するためにピラスター部は、地上からのビティ足場とした。スライド足場は、全体を60ユニットに分割し、躯体に取り付けたブラケット上にクサビ式足場を組み立てた構造とした。足場のスライドは図-14に示すように内側、外側各1ユニットを同時にせり上げ、円周方向を連結固定した。

c) 鉄筋工・型枠工

鉄筋は、地上で網状に内側、外側各28枚にパネル化し、クレーンで吊り込んで組み立てた。円周PC用シースは地上で鉄筋網に仮付けしておくことで、鉄筋網の吊り込みと同時に設置した。

型枠は、地上で内側、外側各52枚にパネル化し、クレーンで吊り込んで設置した。型枠材には環境対応樹脂型枠の「NFボード」を使用した。

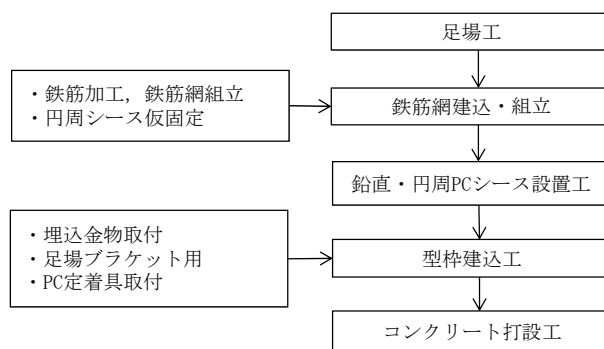


図-12 PC防液堤施工フロー

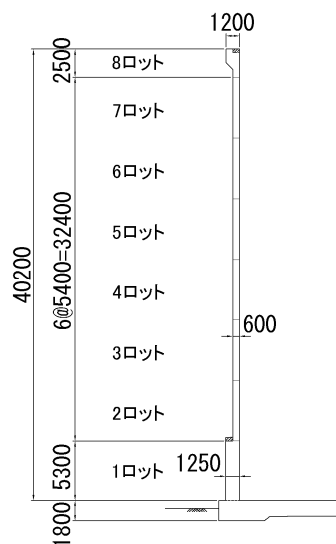


図-13 PC防液堤施工ロット割付図



図-14 足場スライド状況

「NFボード」は使用済みのプラスチックを原料とするコンクリート型枠用の再生プラスチックボードである。このボードは、耐久性に優れているので転用率が高く、切断・孔あけなど合板と同様に扱えるので取扱性が良いなどの特徴がある。今回、1タンクあたり7回転用したが、コンクリート表面の出来栄は良好であった。

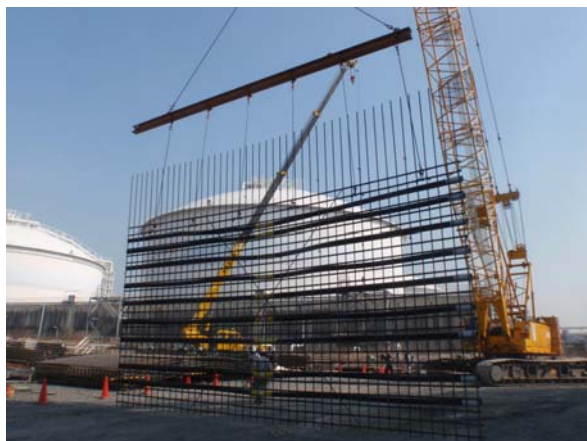


図-15 鉄筋網・円周シース仮付け

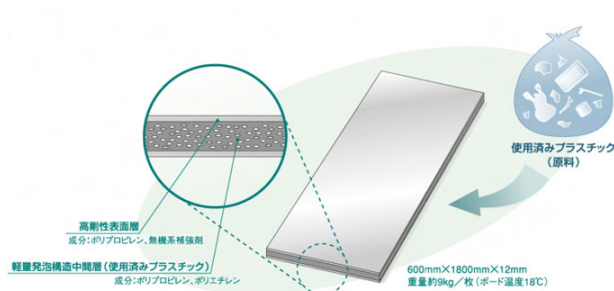


図-16 NFボード

d) VSL新型PC定着具

本LNG貯槽のPC定着具には、VSLのGCタイプ定着具を採用した。GCタイプ定着具はVSL International社が2006年から供用を開始した定着具で、従来の定着具と同等の定着性能を有し、部品が軽く、取扱いや設置作業が容易になり、コスト削減が可能となるという特徴を有する。防液堤構築時には、GC型キャスティングおよびトランペットシースと円周シースを接続して設置した。



図-17 VSL GCタイプ定着具

e) コンクリート打設

防液堤1,2ロットのコンクリート打設は6台のコンクリートポンプ車を使用し、打設口からサニーホースを使用して打設した。3ロット以降は打設口へブームが届かないため、スライド足場上に水平配管およびT字型シャッターバルブを設置し、4～6台のコンクリートポンプ車に配管を接続して打設した。

PC防液堤下端部の1ロットは壁厚1.25mと大きく、かつ基礎版に拘束されるため温度ひび割れが発生しやすい。そこで温度ひび割れ対策として、低熱ポルトランドセメントを使用するとともに、パイプクーリングを実施した。パイプクーリングは打設完了の6時間後から3日間、7～11℃の水を通水し、コンクリートの最高温度を30℃以下に抑えた。その結果、有害なひび割れは全く発生しなかった。

5. おわりに

「必要な場所に必要なプレストレス」というシンプルで合理的な発想で新しく開発された「DUALPC防液堤」を採用した国内最大級18万klPCLNG貯槽の設計と施工についての概要を紹介した。

今後、PCLNG貯槽は、さらに大容量化し、また大幅な工程短縮が求められることも想定される。その場合、建設コストを抑えるためには、今回のような合理化した構造がますます求められると考えられる。本報文が今後のPCLNG貯槽建設の一助となることを期待する。

参考文献

- 1) 林文晴, 齋藤宏彰, 水谷正人: 川越火力発電所LNGタンク増設工事の設計・施工, 電力土木, No.351, pp. 52-56, 2011.
- 2) 日本ガス協会: LNG地上式貯槽指針, 2002.