

PC 防液堤には鉛直方向曲げモーメントが発生する。この曲げモーメントは、下端部で急激に大きくなり、外側引張となる (図-3)。

一方、LNG は -164°C という極低温であるため、PC 防液堤には側部保冷材により緩和された冷熱が作用し、壁の内外温度差が生じる。このとき、基礎版は底部ヒータによりほぼ温度が一定であるので、これが拘束体となり、とくに夏場は内外面温度差が大きくなり、PC 防液堤内側に引張応力が発生する (図-4)。

一般に、通常運転時には円周方向プレストレスによる外側引張と、温度による内側引張の応力は同時に作用するため打ち消しあい、どちらかが大きくなる。また、施工時には温度による応力は作用していないため、円周方向プレストレスによる外側引張のみが作用する。鉛直方向のプレストレスの導入量および断面内の配置を決定する際は、これらの応力の作用状態を考慮し、下端部にひび割れが入らないようにしている。

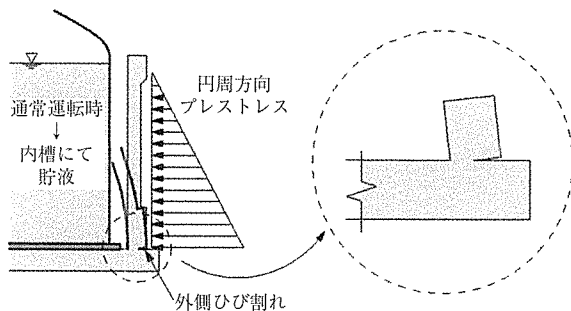


図-3 円周方向プレストレスによるひび割れ

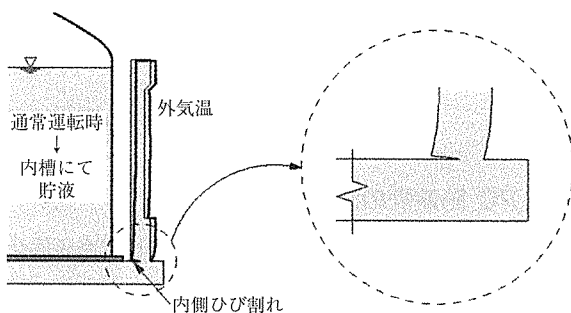


図-4 内外温度差によるひび割れ

3.2 新型 PCLNG 貯槽

PC 防液堤に鉛直 PC 鋼材を配置する際、従来は図-5 に示すように、PC 防液堤の壁厚が高さ方向に一様であるため、PC 鋼材の定着部を頂部としている。そのため PC 防液堤下端部に必要なプレストレスを導入するために、上部の応力上必要のない箇所にも下端部と同じプレストレスを導入していることになる。また、円周方向プレストレスにより PC 防液堤下端部に生じる鉛直方向曲げモーメントを低減するために、基礎版円周方向にも PC 鋼材が配置されている (図-7)。

これに対し、本貯槽においては、応力の大きい防液堤下端部の壁厚を大きくした変断面構造とし、変断面部に鉛直 PC 鋼材を定着する形式とした。

これにより、プレストレスが必要な防液堤下端部に PC 鋼材を集中的に配置することができ、上部の応力上不要な箇所の PC 鋼材を減らすことが可能となった (図-6)。

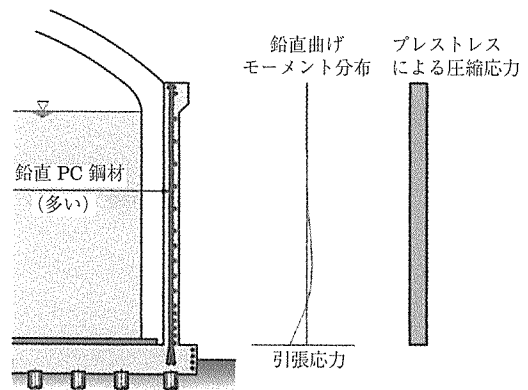


図-5 従来の鉛直方向 PC 鋼材配置

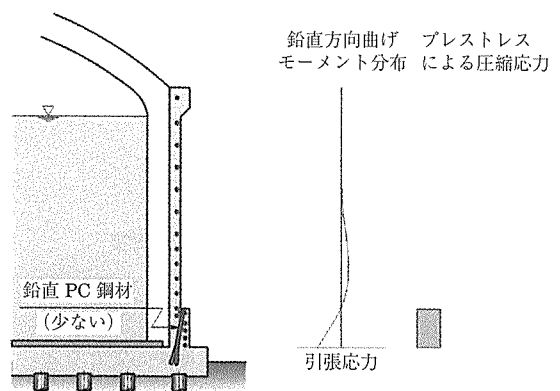


図-6 変断面構造による鉛直方向 PC 鋼材配置

4. 新型 PCLNG 貯槽による合理化

PC 防液堤下端部を変断面構造にすることにより合理化される項目には、以下のようなものがある。

4.1 PC 鋼材量の低減 (基礎版 PC 鋼材)

従来の構造では、円周方向プレストレスによる下端部の鉛直方向曲げモーメントを低減するために、基礎版にもプレストレスを導入している。従来の施工手順を図-7 に示す。図-7 に示すとおり、基礎版の外周部と防液堤の下端部を先に構築し、この部分の基礎版と防液堤の円周方向 PC 鋼材を先行して緊張し、下端部の曲げモーメントを低減している。

しかし、新構造では壁厚を大きくし、引張応力を低減しているため、先行してプレストレスを導入する必要がなく、基礎版を分割する必要がない。したがって、基礎版には PC 鋼材が必要ない (図-8)。

4.2 基礎版一括打設による品質の向上

従来の構造は、図-7 に示すように、外周部の構築を先

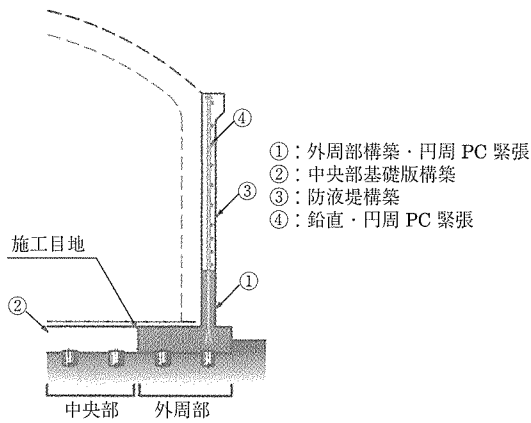


図 - 7 従来貯槽の基礎版構築

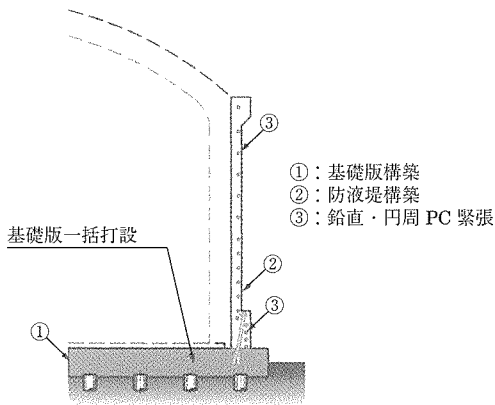


図 - 8 新型貯槽の基礎版構築

行して行い、円周方向の PC 鋼材の緊張を行う。つまり、基礎版の外周部と中央部には施工目地が必要となる。

基礎版内には、基礎版鉄筋や、LNG の冷熱により基礎版下の地盤の凍結を防止するヒータが施工目地部を横断する形で配置される。このため、打ち継ぎを考慮した施工目地まわりの処理が非常に煩雑で行いづらいため、極力基礎版内に施工目地を設けないことが望ましい。

新型 PCLNG 貯槽では、図 - 8 に示したように、基礎版を一括打設し、施工目地を設けない構造としており、より品質を向上させることが可能である。

4.3 PC 防液堤壁厚の低減

新型 PCLNG 貯槽では、壁厚を変断面構造とすることにより、一般部の壁厚が下端部の壁厚に左右されることなく、施工上必要な最小壁厚とすることができる。これにより躯体コンクリート量も合理的に決定できる。

4.4 工事用開口部の位置

PCLNG 貯槽工事においては、内槽工事の資機材搬入路として、防液堤壁に工事用開口を設ける。先に述べたように、従来構造では防液堤下端部を構築後に先行して PC 鋼材の緊張を行うため、工事用開口の高さは先行部分の壁高さより上方に決定され、これにより荷受用のステージが必要となる (図 - 9)。

一方、新型 PCLNG 貯槽においては、先行プレストレス

がなく、防液堤を構築し開口部を閉鎖したあとに PC 鋼材の緊張を行うため、開口部位置の制約がない。開口部を低所に設けることにより、開口部への資機材投入時の作業性が向上する (図 - 10)。

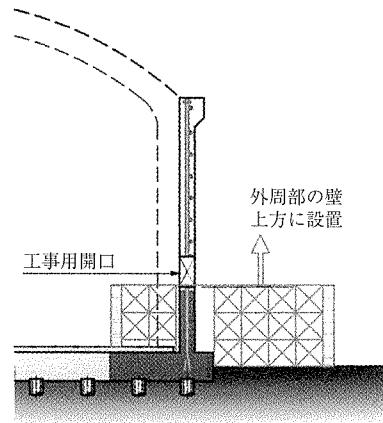


図 - 9 従来貯槽の開口位置

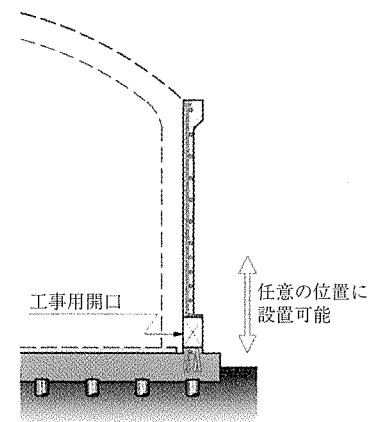


図 - 10 新型貯槽の開口位置

5. PC 防液堤の評価項目

本貯槽は、「LNG 地上式貯槽指針：(社)日本ガス協会」に準拠し設計・建設されている。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て、各荷重条件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 - 1 に PC 防液堤の評価項目一覧を示す。

6. 解析モデル

PC 防液堤と基礎版を一体化し、地盤と杭をバネ要素で評価したモデルに対し、3次元シェル FEM 解析を用いて断面力を算定する。

また、モデル上の杭バネは、実際の杭位置に水平方向バネおよび鉛直方向バネを設置する。

本貯槽においては、防液堤下端での鉛直方向の引張応力は内側引張が卓越する。そのため、鉛直方向 PC 鋼材の配

表 - 1 PC 防液堤の評価項目

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

置を部材軸線に対して内側に偏心させて配置した。構造解析にてこれによる偏心モーメントを考慮する。

3次元シェル FEM 解析モデルの概念図を図 - 11 に示す。

このモデルにより得られた断面力に対し、表 - 1 に示された項目が満足できるようにコンクリート強度、PC 鋼材量および鉄筋量を決定した。

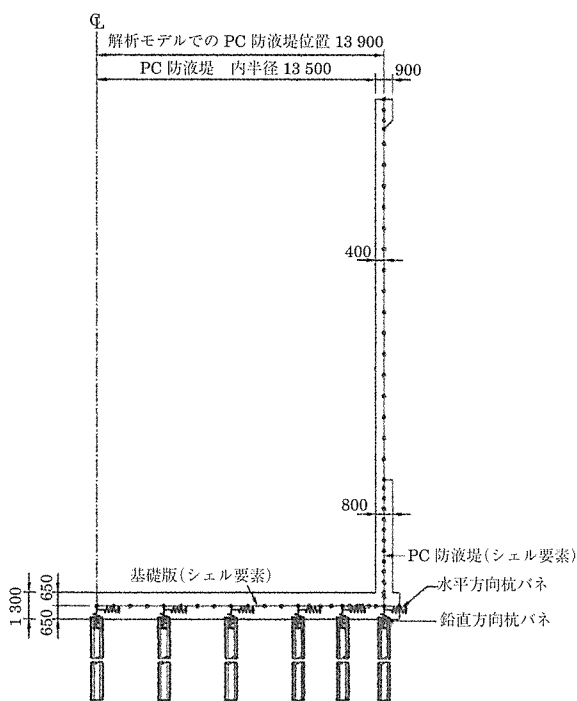


図 - 11 解析モデル概念図

7. PCLNG 貯槽の施工

PCLNG 貯槽は以下のフローに基づき施工を行っている。現在、円周方向頂部 2 段の PC 鋼材の緊張を終え、外槽ライナ工事を行っている。

7.1 基礎版工事

(1) 概要

基礎版は外径 29.500 m、厚さ 1.300 m で PC 防液堤と剛結一体化した円盤構造である。基礎版中には、底部ヒータ、

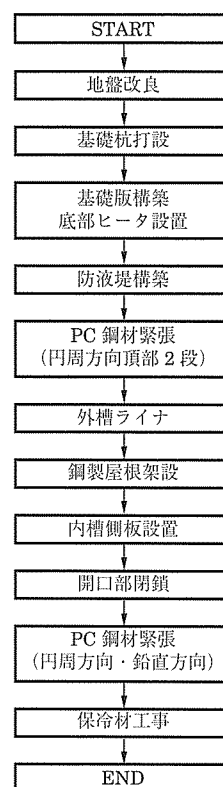


図 - 12 PCLNG 貯槽施工フロー図

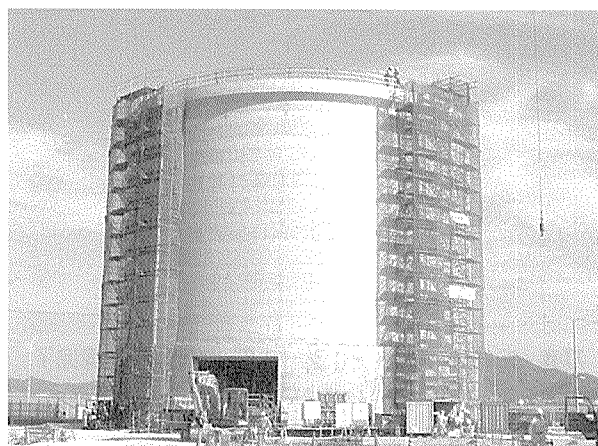


写真 - 1 PCLNG 貯槽全景

PC 防液堤に配置される鉛直方向ループ定着部シース管、内槽側板を支持するアンカストラップ、および計測計器が設置される。コンクリート強度は、材齢 28 日 $\sigma_{28} = 30 \text{ N/mm}^2$ (高炉 B 種) とした。また、コンクリート数量は約 900 m^3 である。

(2) 基礎版鉄筋工事

基礎版の鉄筋は、中央部は格子状配置、外周部は放射方向と円周方向の配置という組合せである。組立ては人力にて行い、下筋配筋後に、後述するヒータ配管工事および鉛直方向 PC シース管のループ定着部設置工事を行い、その後上筋を配筋した。

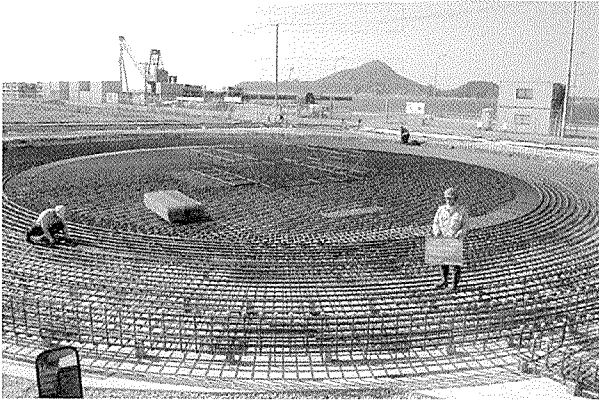


写真 - 2 基礎版下筋組立て完了

(3) 底部ヒータ工事

底部ヒータは LNG の冷熱により基礎版下の地盤が凍結するのを防止するため、不凍液（ブライン）を循環させて凍結線を制御するものである。ヒータ管は、メインヒータおよびサブヒータの 2 系統があり、2 B の STPG370 - S を用いた。ヒータ管に関する試験は、溶接部浸透探傷検査、耐圧気密試験、ピグ通し試験を行い、フラッシング後に窒素ガスを封入した。

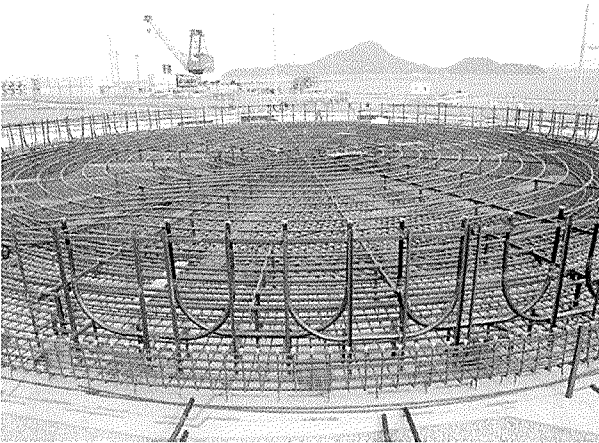


写真 - 3 ヒータ管・PC シースループ定着部設置完了

(4) 鉛直方向 PC シース設置（ループ定着部）

鉛直方向の PC シース管は、基礎版内部にてループ形状としている。図 - 13 に示すように、ループ定着部はループ

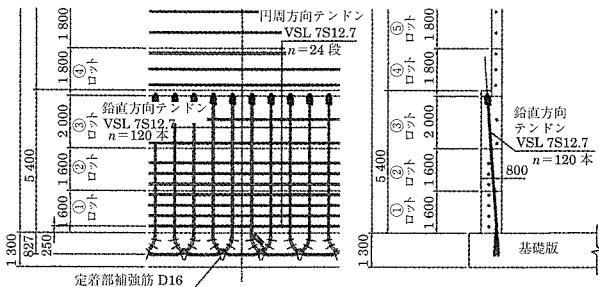


図 - 13 鉛直方向 PC シース

形状加工に加え、壁厚方向の曲げ加工も必要であるため、鋼管を用い、工場にて曲げ加工を行った。また、そのほかの箇所についてはスパイラルシースを用いた。

(5) 埋込み金物工事

埋込み金物工事は、内槽を支持するアンカストラップ（SUS304、全周 80 箇所）、側部外槽ライナ固定用のアングル（L 100、全周 85 m）、内外槽間の水抜き管（SGP100A、8 箇所）をそれぞれ据付架台によりセットした。アンカストラップの据付けは 0 ～ 15 mm の精度が必要である。



写真 - 4 アンカストラップセット状況

(6) コンクリート打設工事

基礎版のコンクリートは、ロングブームポンプ車 2 台を用いて一括打設を行った。図 - 14 のように打設ブロック割りを行い、各ブロックは 2 層打ちとした。ブロック割は、前層との打ち重ね時間が 60 分を超えないよう設定した。表面は木ゴテ→プロペラ→金ゴテの順に押さえ、中心から外

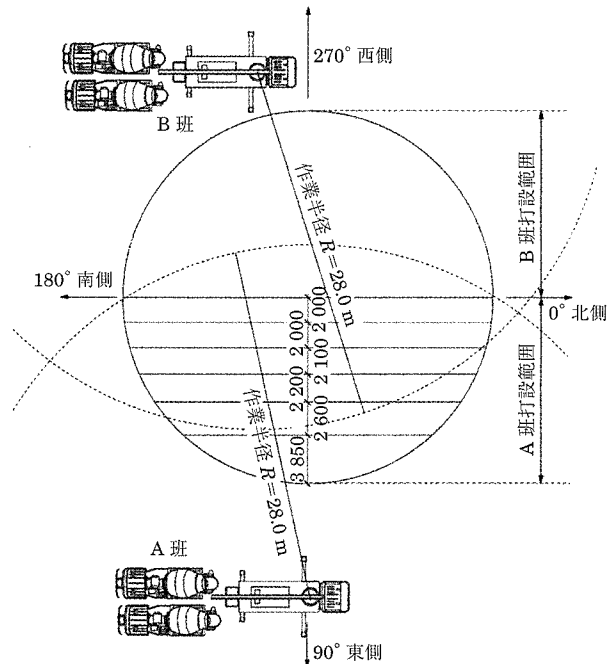


図 - 14 基礎版コンクリートの打設ブロック割

周に向け 0.5 % の水切勾配にて仕上げた。養生はマットおよび散水にて行った。基礎版を一括打設することにより、目地の無い高品質なコンクリートを打設することができた。

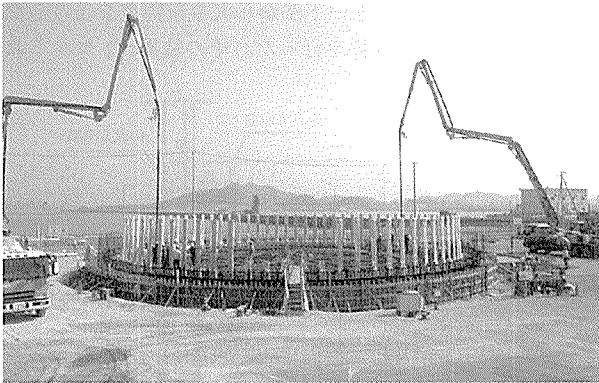


写真-5 基礎版コンクリートの打設状況

7.2 防液堤構築工事

(1) 概要

防液堤は、下部 800 mm、一般部 400 mm、頂部 900 mm の壁厚で、高さ 23.500 m の PC 構造である。構築は標準が 1 800 mm の全 13 ロットに分割して施工した。ロット割を図 - 15 に示す。足場については、外側は枠組総足場、内側は型枠兼用の自昇式足場とした。型枠は鋼製を標準とした。

使用セメントおよびコンクリート強度については、1～4 ロットはマスコン対策として低熱ポルトランドセメントを使用し材齢 91 日 $\sigma_{91} = 30 \text{ N/mm}^2$ とした。また、5～13 ロットについては高炉 B 種セメントを使用し材齢 28 日 $\sigma_{28} = 30 \text{ N/mm}^2$ とした。なお、1～2 ロットについては円周方向の PC シースを利用してパイプクーリングを行った。また、コンクリート数量は約 1 050 m^3 である。

防液堤構築工事の標準部の施工サイクルは図 - 16 に示すとおりである。鉄筋組立てからコンクリート打設まではおおそ 1 週間の施工サイクルであった。1～3 ロットおよび 13 ロットは、標準部との断面形状の違いにより 4 日程度施工サイクルが延びた。また、後述する自昇式足場の使用により、工程に影響なくコンクリートの養生期間を 10 日程度確保することができた。

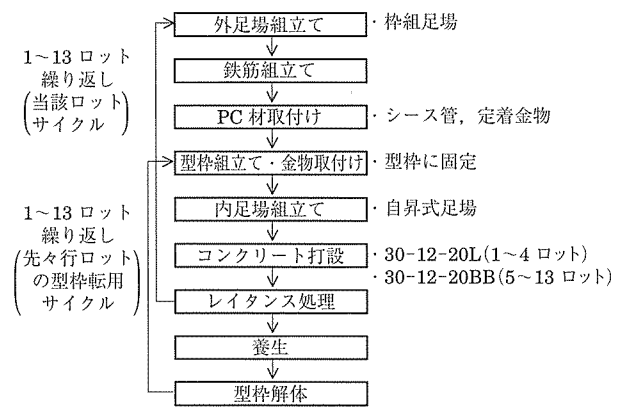


図 - 16 防液堤施工サイクル

(2) 型枠兼用自昇式足場の使用

防液堤構築において、防液堤外側は昇降設備を兼ねた枠組総足場とし、内側は型枠を兼ねた自昇式足場を用いた。

自昇式足場は、先行ロットに反力を取り、順次上部ロットへ盛り替えるものである。当該ロットの鉄筋組立ては内外両足場を使用して行い、先行ロットのコンクリート養生期間経過後に先々行ロットの型枠を解体し、当該ロットの型枠として使用する。また、足場部分はレバーブロックにて引き上げ所定の高さでボルト固定する (図 - 17)。

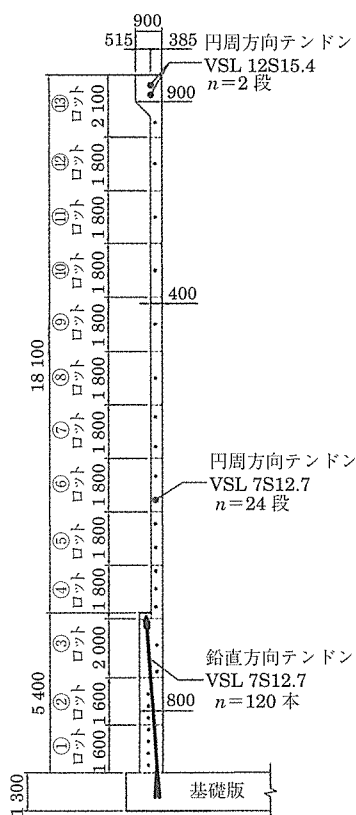


図 - 15 防液堤ロット割

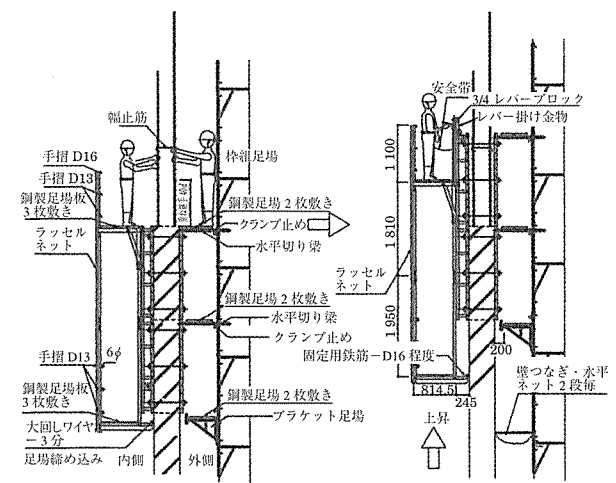


図 - 17 自昇式足場

(3) 鉄筋工事・PC シース設置工事

鉄筋およびPC シース管は、作業床にクレーンにて揚重し、外側鉛直筋→円周筋→PC シース→内側鉛直筋→円周筋の順に、内外両足場を使用し設置した。またPC シース端部の定着具には合板を使用しコンクリート流入防止措置を行った。



写真-6 鉄筋・PC シース組立て状況

(4) コンクリート打設工事

防液堤のコンクリート打設は、基礎版同様にロングブームポンプ車2台を使用して行った。打込み高さは1層60cmとし、かつ打上り高さは1m/h以上とならないように管理した。打継ぎ処理はハイウォッシャーにてレイタンス処理を行った。



写真-7 防液堤コンクリート打設全景

(5) 工事用開口

工事用開口部は図-18に示すように基礎版上面より550mmの位置に設けた。このため、荷受ステージを設置することなく、内槽工事の資機材取込み時の作業性が向上した。鉄筋およびPC シースは開口部閉鎖時に継手が可能な最小長さのみ突出させており、鉄筋の継手は機械式継手とした。開口部は内槽工事の資機材搬入出が終わった後に膨張コンクリートを打設し閉鎖する。

(6) マスコン対策

防液堤コンクリート打設後の水和熱による温度上昇は、

施工時のひび割れ発生の原因となる。LNG 地上式貯槽指針においては、PC 防液堤は施工段階においてひび割れ指数1.75を目標とするように記載されている。

防液堤は下端部においては基礎版から、また側壁変断面部においては壁厚が大きい下部から大きな拘束を受けるため、事前に温度応力解析を行った。その結果、1ロットお

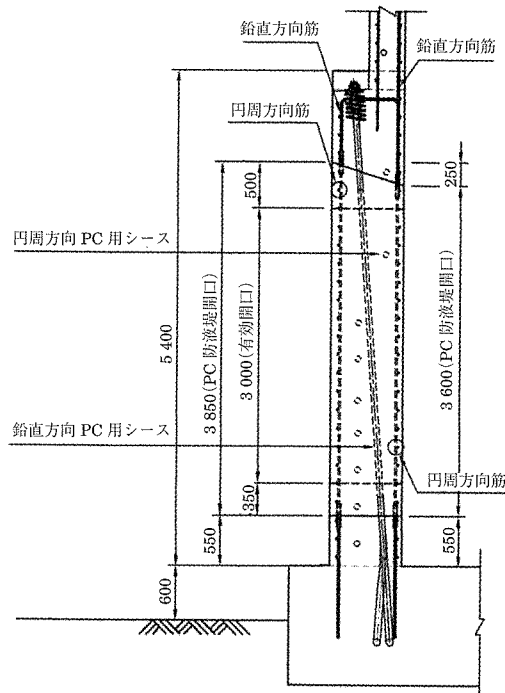


図-18 工事用開口部断面

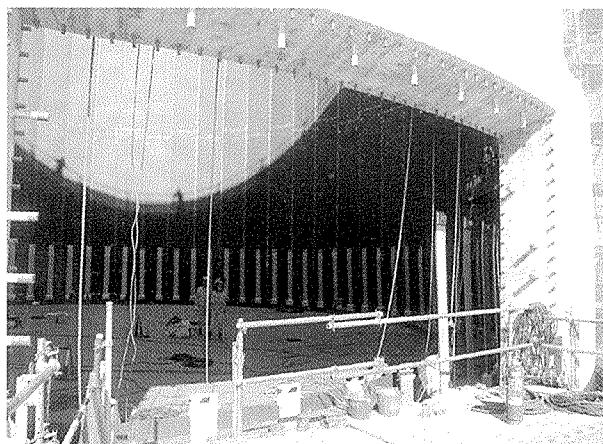


写真-8 工事用開口部

よび2ロットについては、パイプクーリングを行うことにより、目標とするひび割れ指数を確保することとした。

通水管は円周方向のシース管を用い、冷却循環装置を使用し通水温度を平均17℃で管理した。その結果、ひび割れは発生していないことが確認された。

(7) 頂部円周方向 PC 緊張工 (頂部2段)

現在、鋼製屋根架設の準備工として、鋼製屋根のスラスト力に抵抗するプレストレスを導入するため、円周方向頂

部 2 段 (12S15.4) は先行して緊張およびグラウト注入を完了している (図 - 12)。

図 - 12 のフローに示したように、そのほかの PC 鋼材緊張は、工事用開口部の閉鎖後に行う。

一般部も含め PC 鋼材は、ピラスターを 4 箇所設け、図 - 19 に示すように 180° 配置とし、定着する位置を交互に回転することで平均的にフープコンプレッションを作用させるよう配置した。また、緊張作業においても、180° 対角位置の 2 箇所を同時緊張することにより緊張力を均等化した。

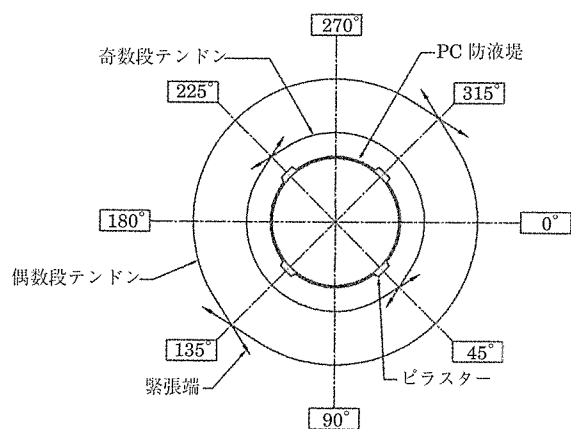


図 - 19 円周方向鋼材定着部

緊張用ジャッキは、12S15.4 用 (最大緊張力 2 800 kN) を 4 台使用し、最高圧力 70 Mpa の油圧ポンプ 4 台をジャッキに接続した。ジャッキなどの設置や盛替には 25 t ラフタークレーンを使用した。

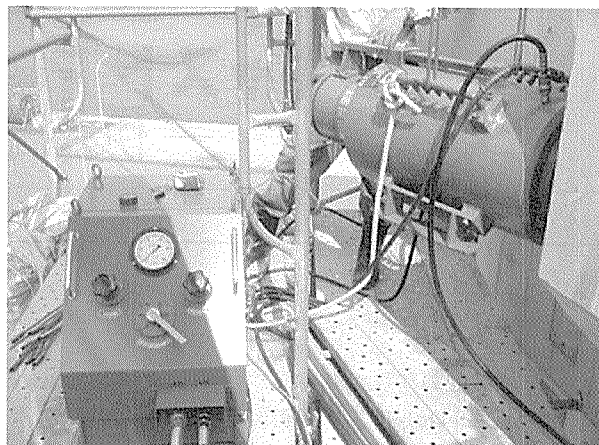


写真 - 9 緊張ジャッキ・ポンプ

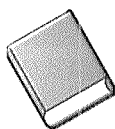
8. おわりに

新型 PCLNG 貯槽は、従来の PCLNG 貯槽に対し、壁厚変断面構造とすることにより、必要なところに必要な壁厚を設定し、また、必要なところに必要な PC 鋼材を配置するなど合理的な構造とすることができた。これにより、構造物の品質の向上、施工性、経済性などさまざまなメリットがもたらされる。これらのメリットを活かすため、今後さらに適用されることが期待される。

参考文献

1) 日本ガス協会：地上式 LNG 貯槽指針，2007

【2007 年 11 月 6 日受付】



刊行物案内

プレストレストコンクリート技士試験 講習会資料

平成 19 年度 PC 技士試験講習会

資料のほか、過去 3 年間の試験問題、正解および解説が掲載されています。
現金書留または郵便普通為替にてお申込みください。

(平成 19 年 6 月)

頒布価格：会員価格 5,000 円 (別途送料 500 円)

：非会員価格 6,000 円 (別途送料 500 円)

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会