

大型 PC 外槽式 LNG 地上タンクの 3 基同時設計・施工

若林 雅樹 *1・山下 幸一 *2・村上 岳彦 *3・秋山 洋 *4

1. はじめに

より安価で安定したエネルギー供給を目指して、堺 LNG (株) は大阪府堺市に堺 LNG センターを建設することとなった。同センターは LNG (Liquefied Natural Gas : 液化天然ガス) の受入、貯蔵、気化、送出を行う設備基地であり、関西電力 (株) の大阪湾岸沿いの 2 発電所 (南港、堺港、電源規模約 380 万 kW) に発電用燃料としての天然ガスを供給している。年間の LNG 取扱量は約 270 万 t であり、一般家庭約 300 万戸の年間使用電力を生み出す量に相当する。

工事は 2002 年 1 月に着手、2006 年 1 月に操業を開始したが、施設の中核をなしているのは 3 基の PC (プレストレストコンクリート) 外槽式 LNG 地上タンク (以下、PCLNG タンク) である。1 基あたりの容量は 14 万 kL、タンク外周を取り巻く PC 防液堤 (以下、PC 壁) は内径約 80 m、高さ約 34 m、ジャンボ機を 2 機重ねてすっぽり収めることができるほどの巨大タンクである。

PCLNG タンクの建設においては、合理的な設計・施工により既往の同型式のタンクと比べて低コスト、短工期を実現した。

以下に設計・解析面における主なポイントを示す。

- ① 基礎杭、基礎版、PC 壁など PC タンクを構成するすべての部材をモデル化した一体構造解析により、最適な PC 量、鉄筋量を算定し、より合理的な躯体構造設計を行った。
- ② 巨大地震 (レベル 2 地震動) に対して、タンク内槽、

PC 壁、基礎杭、地盤、内容液などをすべてモデル化した連成系解析を実施し、それらの動的相互作用の影響を評価し、構造安全性の確認を行った。

- ③ 3 次元熱伝導解析を行い、LNG 漏洩時に予想されるコンクリートの局部冷却を評価し、対策を講じた。
- 次に施工面における主なポイントを示す。
- ① 適材適所の考え方によって同一部材内でも最適なセメント種類、コンクリート強度を選定し、コストダウンと温度ひび割れ防止を両立した。
 - ② PC グラウトの充てん性を確認するために、水平・鉛直ともに実物大充てん性確認試験を実施し、配合、品

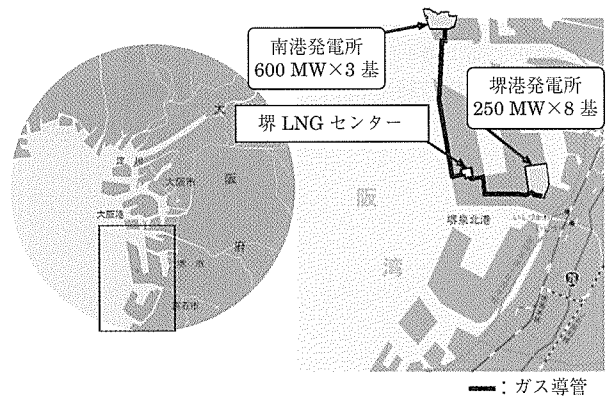


図 - 1 堺 LNG センター位置図

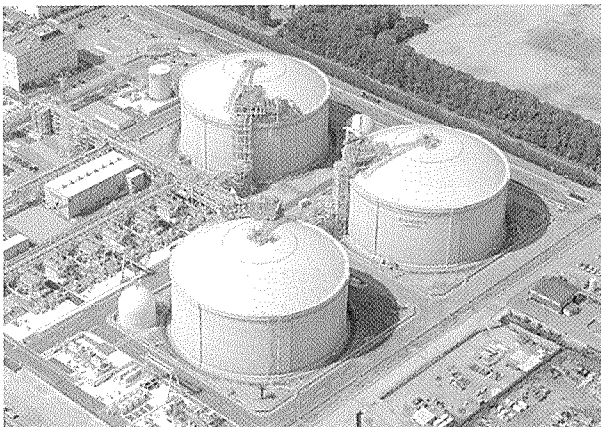


写真 - 1 堺 LNG センター PC 外槽式 LNG 地上タンク

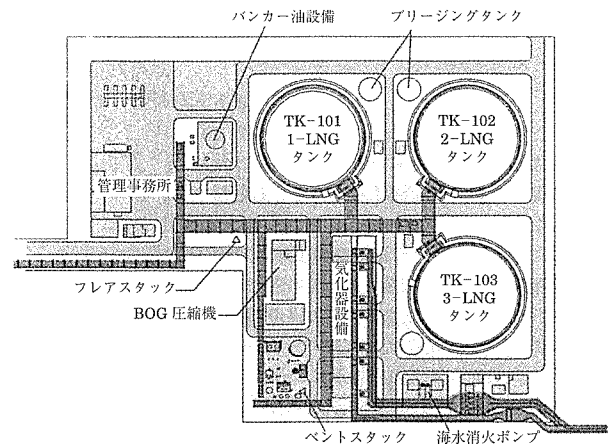


図 - 2 設備レイアウト

*1 Masaki WAKABAYASHI : 清水建設 (株) 土木技術本部 社会基盤統括部 グループ長
 *2 Kouichi YAMASHITA : 堺 LNG (株) 保修部
 *3 Takehiko MURAKAMI : 関西電力 (株) 土木建築室
 *4 Yo AKIYAMA : 三菱重工業 (株) 鉄構装置部

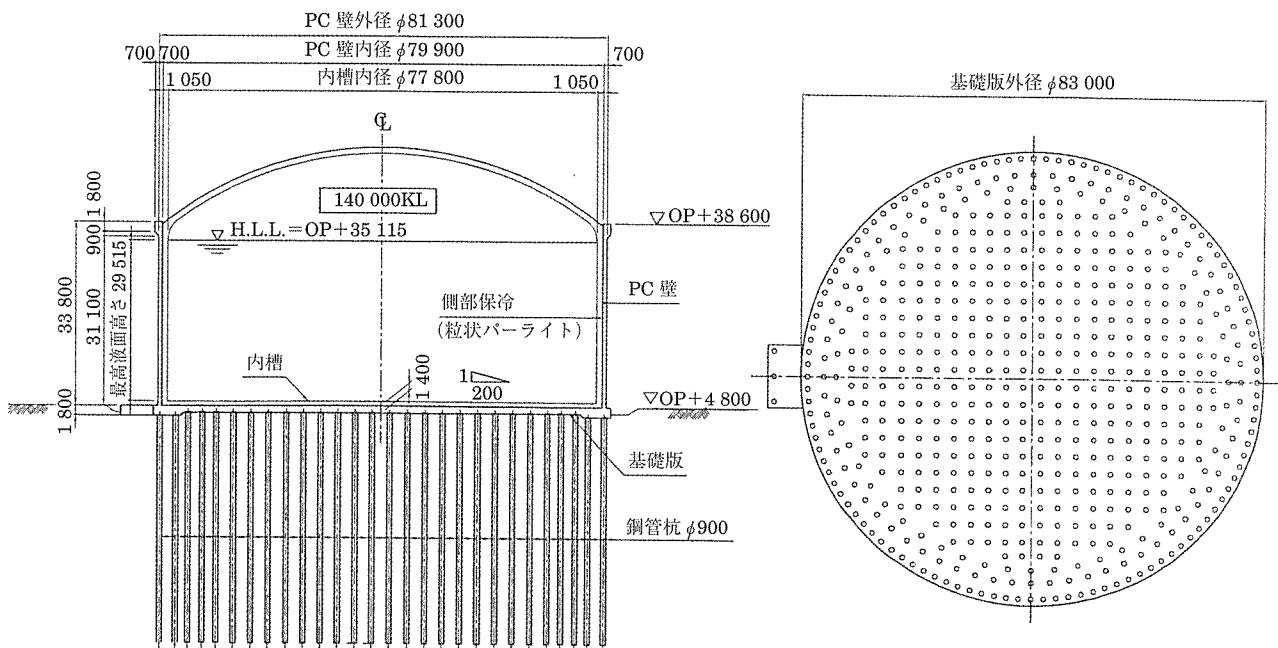


図-3 14万 KL LNG タンク一般構造図

表-1 工程表 (No1 タンク)

	2002年			2003年			2004年			2005年	
	4	8	12	4	8	12	4	8	12	4	8
土木工事	地盤改良	支持力確認		外周部～中央部～あと打部			鉛直			工事用開口部	
	鋼管杭打設	基礎版工		1～9ロット			水平2～7ロット			側部保冷	
機械工事	PC壁工	プレストレス工		PC壁5ロット完了			水張り・内槽耐圧試験			パーライト充てん	
	側部保冷工	基礎版・1ロット		エアレイズ			底部保冷			側部保冷	
			底部ライナ、側部ライナ			底部保冷			側部保冷		
			ナックルプレート、内外槽屋根			内槽側板・底板			側部保冷		

質管理基準を定めた。

その他の設計・施工上のポイントを含めて、工夫・改善点について述べる。

2. 工事概要

本タンクの工事概要は以下のとおりである。

工事名称：堺 LNG センター建設工事

地盤改良および PCLNG 地上タンク工事

施工場所：大阪府堺市築港新町 3-1-10

工期：平成 13 年 11 月 5 日～平成 18 年 1 月 11 日

発注者：堺 LNG 株式会社

一括受注者：三菱重工業株式会社

タンク土木工事設計施工：清水建設株式会社

設備能力：LNG 貯蔵量 公称 140 000 kL

基数：3 基

基本形式：内槽：平底円筒球面屋根付円筒貯槽

外槽：側部底部ライナープレート

屋根部：鋼製球面屋根

基礎版：底部ヒーター管付鋼管支持鉄筋

コンクリート製一重スラブ基礎

PC 壁：プレストレストコンクリート製

円筒型 (側部 PUF 付)

主要寸法：内槽内径 : $D = 77.800 \text{ m}$

液 深 : $H = 29.515 \text{ m}$

PC 壁内径 : $D = 79.900 \text{ m}$

PC 壁 高 : $H = 33.800 \text{ m}$

基礎版厚：一般部 $t = 1.220 \sim 1.400 \text{ m}$

外周部 $t = 1.800 \text{ m}$

PC 壁 厚：一般部 $t = 0.700 \text{ m}$

頂 部 $t = 1.400 \text{ m}$

3. 設計・解析面におけるポイント

3.1 全体構造解析

PCLNG タンクの内部構造を図-4 に示す。

基礎版、PC 壁、側部冷熱抵抗緩衝材 (以下、側部 PUF と称す) が土木所掌、それ以外が機械メーカー所掌である。なお、側部 PUF とは外槽ライナーの内面に設置され、漏液時の温度低下を防ぐ役割のポリウレタン断熱材である。

より合理的な躯体構造の設計を行うため、基礎版、PC 壁などの躯体と基礎杭すべてを一体としてモデル化した。躯体については細部構造まで表現できて精度の高い解析ができるソリッド要素を用い、基礎杭については梁要素を用い

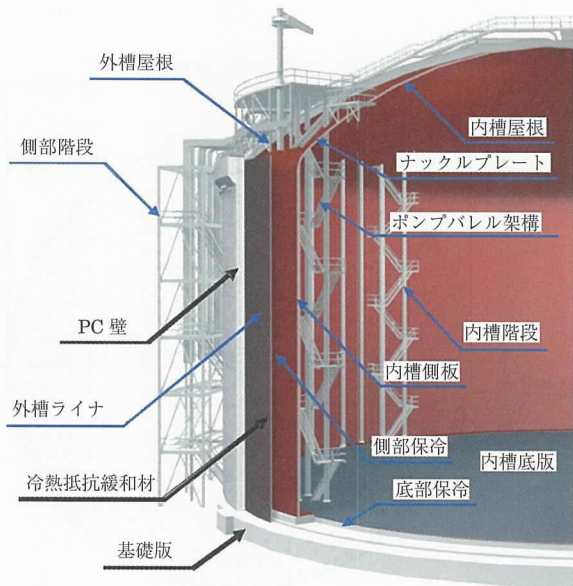


図 - 4 PCLNG タンクの構造



図 - 5 全体構造解析モデル

て、図 - 5 に示すように 21 万要素の一体解析を実施した。
 また、杭の支持層厚さが 5 m と薄く、その下に比較的剛性の小さい洪積粘性土層があるため、内容液の重量によって杭下端の支持地盤に生ずるたわみ変形が無視できないと考え、近隣で得られた実測値とのフィッティングにより精度を高めた沈下解析を行い、その結果を杭下端に強制変位として入力し、躯体に及ぼす影響を評価した。

3.2 レベル 2 地震時の動的相互作用に対する検討

近傍に存在する活断層（上町断層）を想定した直下型巨大地震（レベル 2 地震）に対し、基礎版、PC 壁といった躯体部分だけではなく、タンク内槽や地盤、杭などタンクを取り巻くすべての要素をモデル化し、内容液についても流体要素としてモデル化した。図 - 6 に示す解析モデルにより内容液～タンク内槽～タンク外槽～地盤の動的相互作用について評価し、構造安全性の確認を行った。

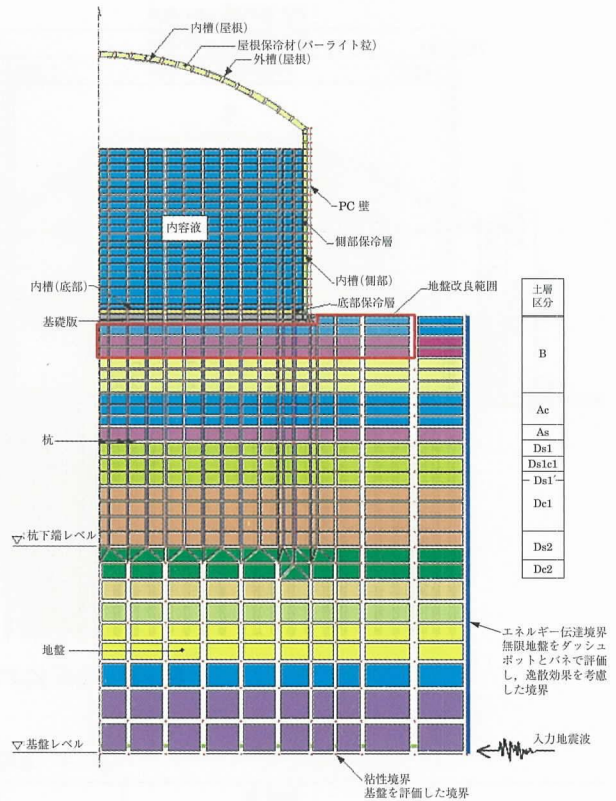


図 - 6 連成系解析モデル

3.3 3次元熱伝導解析

LNG 漏液時の温度応力を正確に求めるためには正確な熱伝導解析がその前提となる。タンク内槽を基礎版に固定する役割をもつ金属性のアンカーストラップが基礎版に埋め込まれている（図 - 7, 8）。

このアンカーストラップ部は、構造的に複雑で漏液時の正確な温度分布の把握が難しいので、局部冷却の影響を正しく評価するために 3 次元熱伝導解析を行った（図 - 7）。その結果、アンカーストラップ部の最低温度が -40°C を下回ることが分かった。 -40°C を下回ると低温鉄筋のグレードが上がってコストアップとなるため、コンクリート躯体の温度を -40°C 以上とする必要があった。そこで、機械メーカーにアンカーストラップ部の保冷構造の変更を提案し、それにより漏液時のコンクリート躯体の最低温度を -37.4°C に抑制した（図 - 8）。

3.4 プレストレスの分割導入

PC 壁 # 1 ロットに十分なプレストレスを導入するためには剛結合されている基礎版にもプレストレスを導入する必要があった。しかし、基礎版すべてを打設してからプレストレスを導入しても、基礎版内部の拘束によって # 1 ロットに必要なプレストレスが導入されないことが分かった。

当初は一括打設を目指していたが、以上の理由により従来の方法にならって基礎版を 3 分割打設とし、外周部と # 1 ロット打設→基礎版中央部打設→外周部と # 1 ロットにプレストレス導入→基礎版あと打ち部打設、という施工順序とした（図 - 9）。

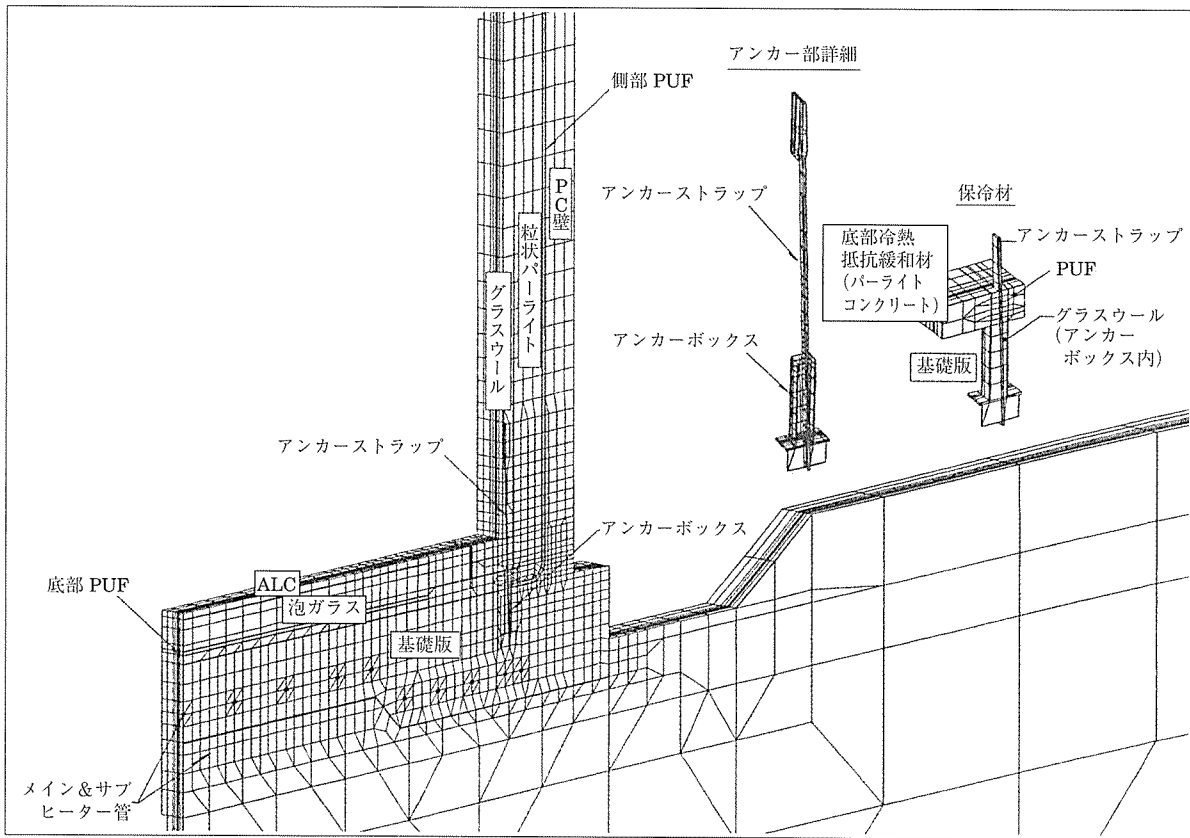


図 - 7 3次元熱伝導解析モデル

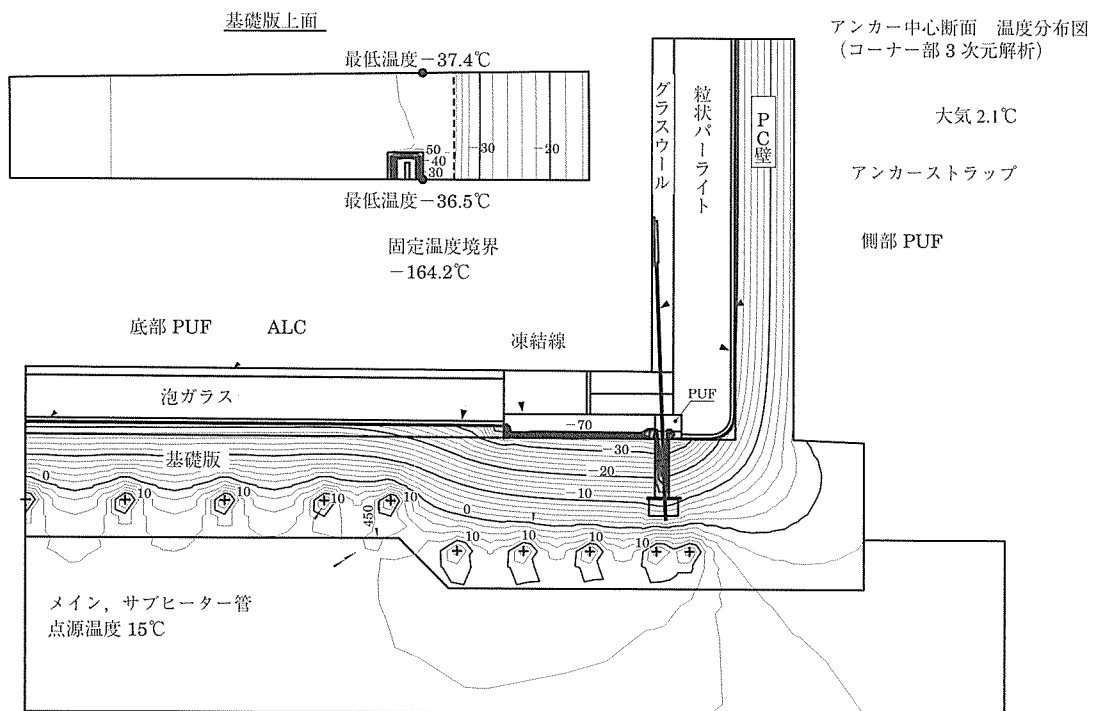


図 - 8 熱伝導解析による最低温度

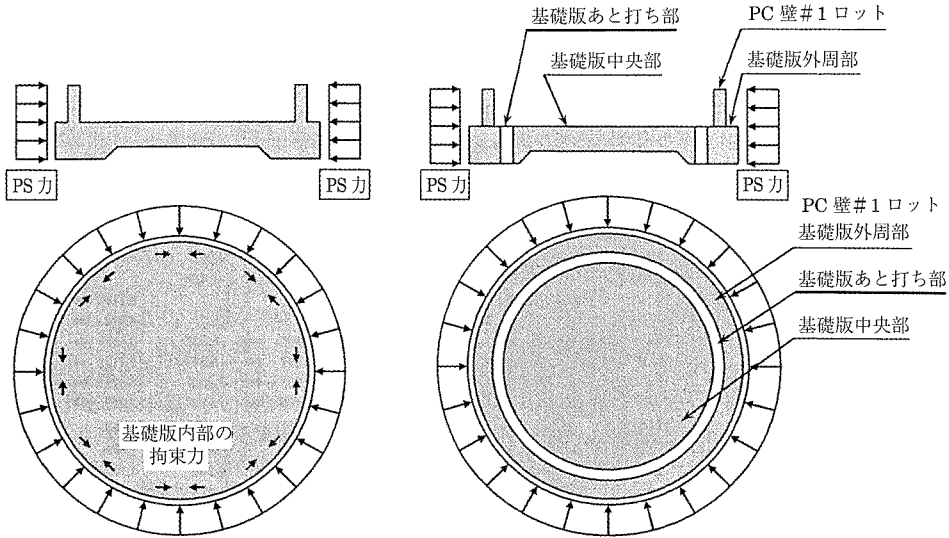


図-9 基礎版の分割打設とプレストレス導入

3.5 LNG 漏液時に対する設計

常時、レベル1地震時、レベル2地震時、漏液時など想定されるあらゆるケースについて検討を行ってコンクリート強度、配筋、PC配置を決定した。このとき、自重・液圧に加え、夏冬の外気温の変動も考慮した温度応力を算定し、これらを組み合わせて必要なプレストレス力を求めた。漏液時にはLNGの冷熱で内側から冷却されるため、躯体(PC壁や基礎版)内側の温度は外側に比べて低くなる。この躯体内外面の温度差(温度勾配)が温度荷重であり、この温度荷重により温度応力(内側引張り)が生じる。漏液時に作用する温度応力に対して貯液性を確保するため、躯体にプレストレスを導入し、断面内に圧縮領域を10cm以上確保³⁾した。

基礎版は通常運転時にタンク内槽を支える役割ももっているが、PC壁はとくに漏液時にLNGを外部に漏らさず内部に保持するために設置されるものである。したがって上記の残留圧縮領域を確保することはもっとも重要なポイントである。そのためには漏液時でも温度勾配が過度に大き

くならないように、PC壁と基礎版を一定以上の温度に保つ必要があり、図-10に示すように基礎版・PC壁とも側部PUFにより保護する構造とした。

4. 施工におけるポイント

4.1 基礎版コンクリート工事

鉄筋、PCシース、底部ヒーター管、埋設金物などの設置が完了した後、基礎版のコンクリート打設を行った。基礎版のコンクリートは外周部を先行し、続いてPC壁#1ロットを打設。打設後円周方向プレストレスを導入し、その後中央部、あと打ち部を打設する3分割施工とした。各部のコンクリートの配合を表-2に示す。

4.2 施工時温度ひび割れ対策

PCLNG地上タンクのコンクリート躯体(基礎版、PC壁)への要求性能として、『内槽タンク漏液時にLNGを外部に流出させないこと』が求められている。これに対し、プレストレスの導入により漏液時でも圧縮領域10cmを確保するとともに、施工時に対しても有害な温度ひび割れの発生を防止しなければならない。

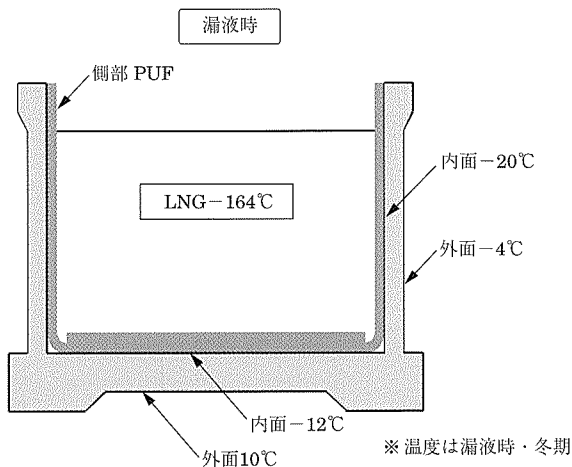


図-10 躯体各部の漏液時の温度

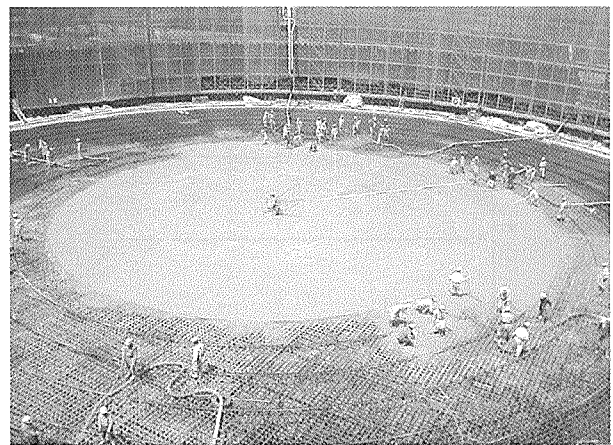


写真-2 基礎版中央部コンクリート打設状況

表-2 コンクリートの配合

		セメント種類	設計基準強度 (N/mm ²)	スランプ (cm)	水セメント (%)	混和材混和剤
基礎版	外周部	L	30	15	43	高性能 AE 減水剤
	中央部	BB	24	12	55	AE 減水剤
	後打部	BB	24	12	55	膨張剤, AE 減水剤
PC壁	1 ロット	L	60	55 (フロー値)	36	高性能 AE 減水剤
	2 ~ 8 ロット	L	30	21	55	高性能 AE 減水剤
	9 ロット	L	40	21	43	高性能 AE 減水剤

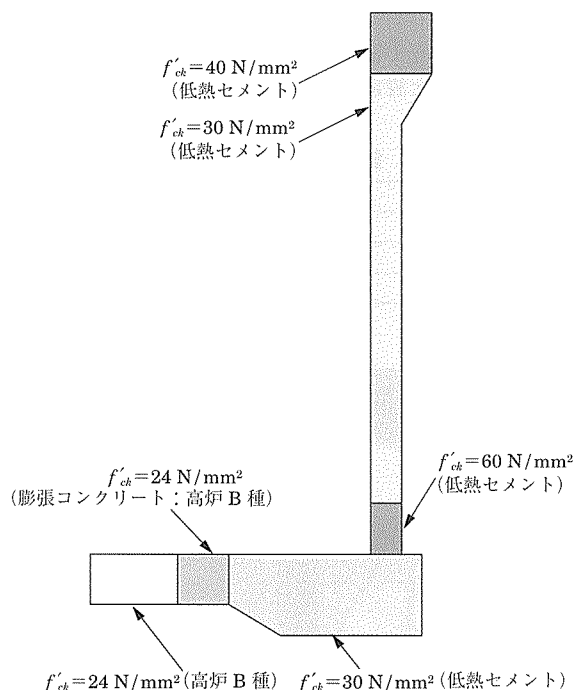


図-11 各部のコンクリート配合

従来の PCLNG タンクでは温度ひび割れを防止するための対策として、コンクリートのプレクーリングや、シーすを利用したパイプクーリングなどを行っていたが、高コストの要因となっていた。そこで、安価な温度ひび割れ対策を目指し、設計面、材料面、配合面、養生などの面から総合的な温度ひび割れ対策を行うこととした。

温度ひび割れの発生確率は 5% 以下、ひび割れ指数 1.75 以上を目標とし、以下の温度ひび割れ対策を実施した。

- ・ 設計面：強度が高くなればセメント量が増加し発熱も大きくなるため設計基準強度を部位別に必要最小値とした。
- ・ 材料面：高性能な低熱ポルトランドセメントと安価な高炉セメントを使い分けた。基礎版は養生による対策が可能であることから安価な高炉セメントとしたが、PC 壁は養生による対策が取れないことから低熱ポルトとした。
- ・ 配合面：外部拘束度の高いあと打ち部には膨張材を配合。
- ・ 養生面：基礎版は写真-3 に示すような空気膜養生を実施した。空気膜を打設翌日から敷設することにより、保湿・保温養生となり、乾燥収縮ひび割れや温度ひび割れの発生を防止できる。コンク



写真-3 基礎版空気膜養生

リート内の温度計測結果を解析し、必要に応じて空気膜の追加、撤去時期の検討などの養生管理を行った。

4.3 水平 PC グラウトの充てん施工性確認試験

PC 壁には合計 65 段の水平 PC テンドンが配置される。各段については円周方向を 2 分割しているため、1 系統あたりの延長は 134 m に及ぶ。プレストレス導入後に充てんされる PC グラウトは PC 鋼材の防錆とコンクリートとの一体化を目的とするため、シーす内に空隙を残すことなく密実に充てんする必要がある。とくに長大水平グラウトは、先流れによる充てん不良や充てん圧力不足によるシーす内閉塞等が懸念されるため、施工には十分な検討が必要となる。そこで本工事では、長大水平グラウトの充てん施工性を確認するために実大のグラウト注入試験を実施し、グラウトの充てん性能を事前に確認した。

実大モデルは、シーすの高低差、定着部、PC 鋼線を再現し、長さ方向は 134 m の実長を直線でモデル化した (写真-4)。また、シーす管の下り勾配部と一般部 10 m ごとに透明シーすを設置し、各所で先流れ現象が生じないか目視で観察した。

注入中のグラウトの流動性は $J_p = 15$ 秒台の規格値内で安定していた。注入中はいずれの透明シーす部においても先流れ現象は見られず、硬化後の充てん状況は、シーす内、定着部内ともに良好であった (写真-5)。

さらに、排出口から採取したグラウトの流動性も $J_p = 15$ 秒台であり、注入開始時の流動性を維持している結果となった。

また、注入前のグラウトと排出口のグラウトで強度比較

表-3 水平グラウトの基本配合例

項目	仕様
セメント	普通ポルトランドセメント
混和剤	GF1720：セメントの1%
W/C	42.5%



写真-4 長大水平グラウト実大試験体

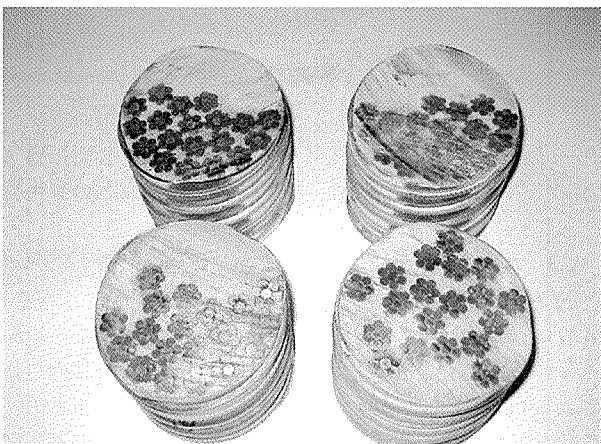


写真-5 長大水平グラウト充てん状況

を行ったが、双方ともに約 70 N/mm² となりばらつきは見られなかった。

さらに、グラウトの性状を安定させるには、配合と温度を管理することが重要であることが分かった。これらを重点的に管理して 134 m の片押しグラウト注入を中間排気口を設けずに施工し、一度も閉塞することなく 3 基合計 372 回の注入を完了した。

4.4 鉛直 PC グラウトの充てん施工性確認試験

鉛直 PC グラウト注入は、グラウトの上昇圧力で絞り出された水分が PC 鋼より線間の微小な隙間を伝わって上昇し、定着具付近に滞留して空洞が生ずる『ろうそく現象』と呼ばれる不具合が懸念されたため、加圧ブリージング試験さらに実長簡易モデル試験を経て実物大実証試験を実施し、配合ならびに注入方法を決定した。

高さ 34 m の実長簡易モデル試験の結果、高粘性グラウト GF1720 の標準配合では、グラウトの沈降や『ろうそく現象』による水泡や気泡による充てん不良が生じた。そこ

で、ろうそく現象を抑制するため、グラウトのさらなる高粘性化および注入速度の見直しを行った。さらに定着具付近に溜まる気泡・水泡をスムーズに排出するため、突き棒処理を行うこととした。その結果、実長簡易モデル試験、実物大実証試験（写真-6）とも良好な結果が得られた（写真-7）。

なお、標準配合を超える高粘性グラウトを使用することから、練り時間と JP 漏斗管理値の見直しが必要となり、標準管理値とは異なる独自の管理値を設定した。試験練りを繰り返し、均一な性状が得られる練り時間として 6 分（標準は 4 分）、JP 漏斗流下時間の管理値を 20～30 秒（標準は 14～23 秒）と設定した。

表-4 鉛直グラウトの基本配合例

項目	仕様
セメント	普通ポルトランドセメント
混和剤	GF1720：セメントの1～1.5%
W/C	43%

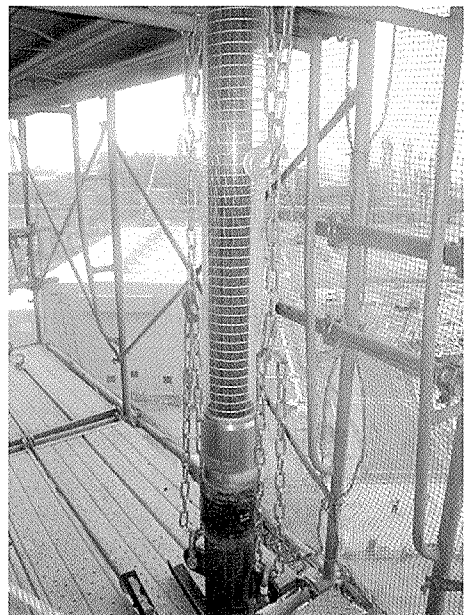


写真-6 鉛直グラウト実大試験体



写真-7 鉛直グラウト充てん状況

実施工に際しては、気温の変化の影響を受けて必要練り時間や粘性が変動する。しかし実大グラウト充てん性確認試験を季節ごとに行う訳にはいかない。そこで冷水タンクや電熱器を用いてグラウトの温度管理を行い、温度を一定範囲内に収めることにより、一定の品質の PC グラウトを製造し、一定の管理値を用いて施工した。

4.5 開口部閉塞工

内槽側板や底部保冷工事の搬出入口を目的として、開口部が設けられた。高さ 5.6 m × 幅 18.1 m の大工事口と高さ 3.1 m × 幅 5.6 m の小工事口の閉塞工事は、内槽の機械工事完了後に行った。

表 - 5 に開口部コンクリート配合表を示す。開口閉塞コンクリートの要求品質は、閉塞コンクリートと既設 PC 壁との密着性であるため、硬化時収縮にとくに配慮することが必要である。よって配合は、水和熱の低減や長期の収縮低下を補償するため、エトリンガイト系膨張剤添加（配合 A）を基本とし、さらにブリージングによる初期沈降が懸念される開口上面付近では、打継面の密着性の低下を防止することを目的として、アルミナ系膨張剤を追加すること

とした（配合 B）。配合 B については充てん性確認試験を実施して、開口部コンクリートと既設コンクリートとの打継部の充てん性が良好であること、および隙間が無いことなどを入念に確認した（写真 - 8）。

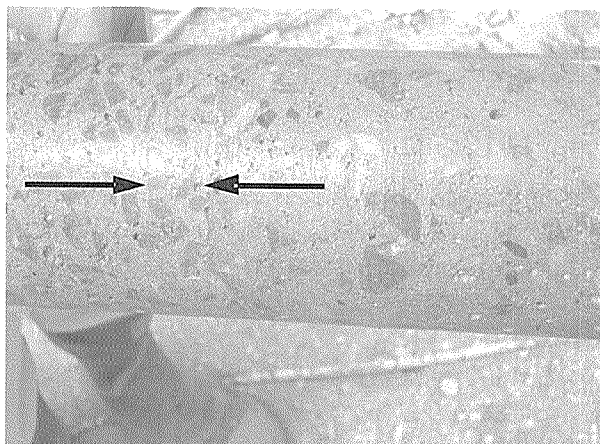


写真 - 8 コア抜きによる密着性確認

表 - 5 開口部コンクリート配合表

		配合 A	配合 B
配合の 目標	スランブ	21 cm	18 cm
	強度発現	—	膨張剤添加後：21 cm
W	単位水量	27 N/mm ² (28 日強度)	—
W/C	水セメント比	185 kg	180 kg
		55 %	49 %
C	セメント種類	最低水セメント比	PC 緊張時の強度確保
		低熱 ポルトランド セメント	低熱 ポルトランド セメント
	セメント量	316 kg	347 kg
Air	空気量	4.5 %	4.5 %
骨材	粗骨材 最大寸法	20 mm	20 mm
	粗骨材量	857 kg	844 kg
混和材	エトリンガイト系膨張材	内割	内割
		目的：収縮補償	目的：収縮補償
混和剤	アルミナ系膨張剤	なし	適量

5. おわりに

これらの結果、平成 14 年 9 月の杭打ち開始から 3 年 1 ヶ月後の平成 17 年 10 月、LNG の受入れが開始され、平成 18 年 1 月、大型 PCLNG タンクの 3 基同時施工が完了した。

今回得られたさまざまな知見は今後のタンク建設工事に展開され、より安価で安全性の高いエネルギー施設の建設に貢献していくものと思われる。

参考文献

- 1) 岡村謙作ほか：PCLNG タンクにおける長大水平 PC グラウトの充填施工性確認試験と施工実績，土木学会第 59 回年次学術講演概要集
- 2) 岡野高之ほか：PCLNG タンクにおける鉛直 PC グラウトの充填施工性確認試験と施工実績，土木学会第 60 回年次学術講演概要集
- 3) 社団法人日本ガス協会：LNG 地上式貯槽指針，p.301，2002 年 8 月

【2008 年 3 月 3 日受付】