

プレストレストコンクリート製大型LNGタンクの設計および施工 ——世界最大級の14万kl極低温タンク——

中島 一夫*1・北村 八朗*2・岡井 大八*3
宇梶 賢一*4・長谷川 拓男*5・鎌田 文男*6

1. まえがき

わが国のエネルギーの需給は、年平均4.4%（87～90年度）の高水準の伸び率で推移し、その中で液化天然ガス（LNG）は都市ガス・発電用に需要が増大している。LNGは一次エネルギー供給の10.0%（89年）を占め、2010年には12.2%の目標が示されているように、天然ガスはわが国の経済活動を支えるエネルギーとして重要な役割を担っている。クリーンで環境に優しいエネル

ギーとしても都市環境の向上に役だってきたLNGは、都市ガスの約55%、発電エネルギーの約19%をまかなう現状にある。

大阪ガスは近畿府県・約550万戸の客先に都市ガスを供給している。昭和50年より供給ガスの天然ガスへの転換を進め、平成2年すべての転換を完了した。このLNGをブルネイ、インドネシア、オーストラリアから導入しており、泉北製造所第一工場、同第二工場、姫路製造所に受け入れている（図-1）。

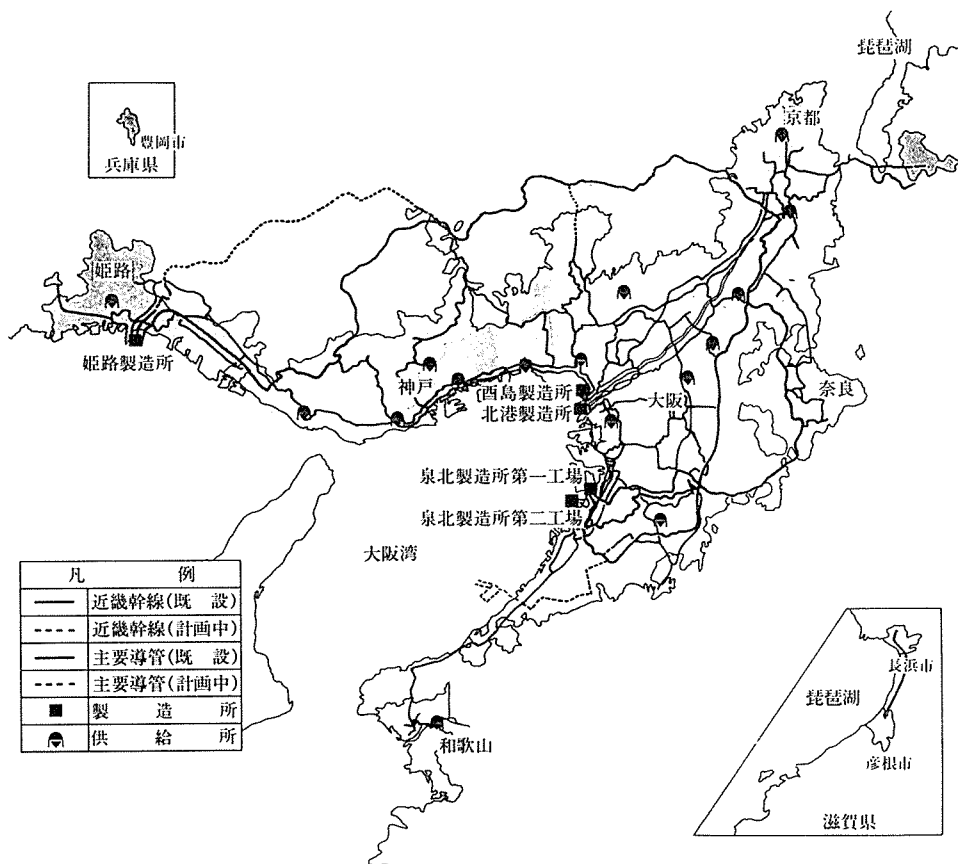


図-1 大阪ガス供給区域と泉北製造所位置図

*1 Kazuo NAKAJIMA : 大阪ガス(株) 技術部
*2 Hachirou KITAMURA : 大阪ガス(株) 技術部
*3 Daihachi OKAI : 大阪ガス(株) 技術部

*4 Kenichi UKAJI : (株)大林組 土木技術本部
*5 Takuo HASEGAWA : (株)大林組 本店土木工事部
*6 Fumio KAMATA : (株)大橋組 土木技術本部

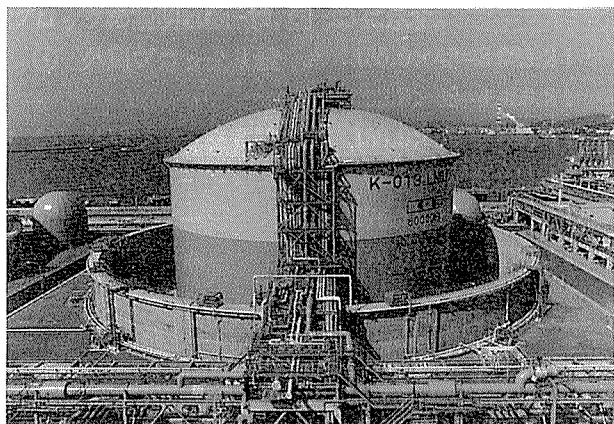


写真-1 80 000 kl 金属二重殻地上式タンク (外周は PC 製の防液堤, 姫路製造所)

LNG は大気圧下で -164°C の極低温に冷却して液化された, メタンを主成分とする液化ガスで, 専用タンカーにより海上を輸送し, LNG 基地に低温貯蔵される。LNG 基地の主要施設である LNG タンクはこれまでに 26 基が設置され, タンク形式の内訳は地下式タンク 1 基, 金属二重殻地上式タンク 25 基となっている(写真-1)。金属二重殻式タンクの周囲には, タンクから万一 LNG が流出したときを想定して, 貯液の全量を保持するために防液堤が設置されている。

かねてより, 保安レベルが高く経済性に優れ, 敷地の利用効率の高いタンクを目指して, PC LNG タンクの開発を進めてきた。このたびは 泉北製造所第二工場において, わが国初 PC LNG タンクの建設を平成 2 年 6 月に着手し, 平成 5 年末の完成を予定している。容量は 14 万 kl で世界最大級の LNG タンクである。

この報告は PC LNG タンクの構造設計一般, 極低温下における PC 材料・PC 部材の荷重抵抗性能試験とモデルタンクによる実証実験, 14 万 kl PC LNG タンクの設計および施工について報告する。

2. PC LNG タンクの一般構造

2.1 タンク構造の特徴

従来の金属二重殻式地上タンクは, 図-2 および写真-1 に示すように, LNG を保持する低温鋼 (9 % ニッケル鋼) の内槽, LNG への入熱を低減する保冷材, および保冷材を保持する外槽から構成され, その外周に防液堤を設置している。これに対して PC LNG タンクは, 図-3 および写真-2 に示すように, プレストレストコンクリート製の防液堤を金属二重殻タンクに近接して設置し, 両者を一体化したタンクの設計概念を特徴としている。

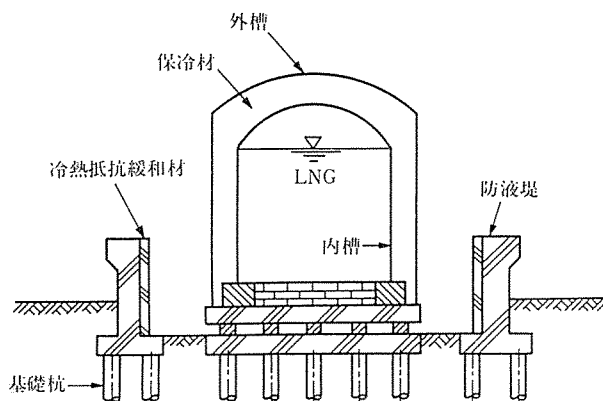


図-2 金属二重殻 LNG タンクの概念図

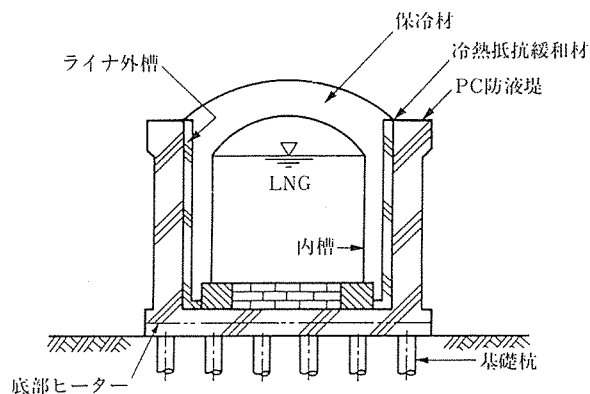


図-3 PC LNG タンクの概念図

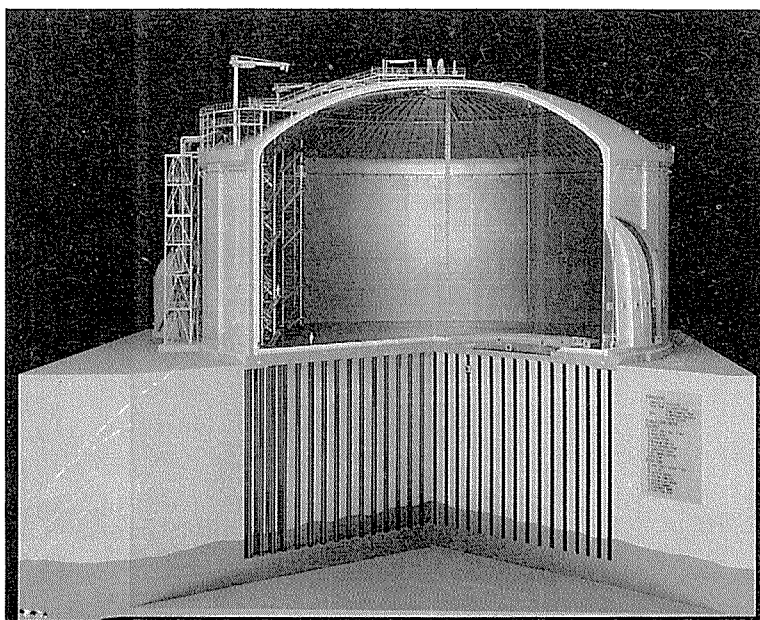


写真-2 14 万 kl PC LNG タンクの完成模型

低温性能に優れた PC 構造の特性を活かすことによって, 次のような長所を備えている。

- 1) 防液堤のスペースが不要となり, 敷地の利用効率が高くなる。
- 2) 万一 LNG が流出したとき, 流出範囲が局限化され, 保安レベルが高い。

3) タンクと防液堤の基礎が共有されるほか、外槽は自立式からライナ構造となるなど、合理的な構造形式となっている。

4) PC 構造は耐火性、冷熱衝撃に優れ、保守が容易である。

LNG タンクは -164°C の極低温液化ガスを貯蔵する重要な施設であり、タンク構造の低温靱性や耐震性のほか、液密性など保安面からの極めて高い安全性が要求される。

2.2 内 槽

内槽は従来と同じ金属製平底球面屋根付円筒形で、9% ニッケル鋼の溶接構造である。内槽は通常運転時や地震時に、LNG を安全確実に保持する構造強度と液密性能、気密性能を備えている。

2.3 保 冷 材

外部からの熱の伝達を抑制して、入熱による蒸発ガス (BOG) 量を小さく保つために、内槽と外槽の間に 1 m 程度の保冷材を設ける。側部と屋根部には粒状パーライトを充填し、底部はパーライトコンクリートと泡ガラスなどを用いる。保冷材部には窒素ガスを充填して、保冷材の吸湿を防止する。

2.4 外 槽

外槽は保冷材を保持し、外気の侵入を防ぐ気密構造で、通常運転時に低温に曝されることはないため、普通鋼で設計される。PC 防液堤に接して設ける外槽側部はライナ構造となり、ジベルアンカー等により PC 防液堤に固定される。

2.5 PC 防液堤および基礎版

9% ニッケル鋼製の内槽が破損する可能性はない。しかし、万一の LNG の内槽からの漏出に際しても、タンク外への拡大を確実に防止するため、基礎版と一体となった PC 防液堤は、極低温の LNG 全量を安全・確実に保持できる低温下の構造強度と液密性能を求められる。

事故拡大防止のため二次バリアとして内槽を補完する PC 防液堤は、内槽に準じた信頼性の高い優れた低温貯液機能を備えることが必要とされる。保安面を重視する低温タンクの設計と施工には、災害事象を熟知した多面的な技術検討が求められ、この点に一般の PC 構造と比べて異質な低温性能の実証や高品質化を必要とする背景がある。

2.6 冷熱抵抗緩和部

漏液後の PC 防液堤および基礎版に対する LNG の接液によって構造部材に生じる、急激な温度勾配とそれに伴う大きな温度応力を緩和するために、冷熱抵抗緩和部を設ける。断熱性能に優れた保冷材を、PC 防液堤内面に設けた外槽ライナに取り付ける。

3. 泉北製造所第二工場における PC LNG タンクの建設

3.1 プロジェクトの概要

泉北製造所は堺泉北臨海工業地帯に位置し、コンピュータをはじめ最新の技術を駆使した省エネルギー・省力化を実現した最新の都市ガス製造所である。第一工場には地下タンク 1 基、地上式タンク 3 基が稼働しており、第二工場にはこれまで 15 基の地上式タンクが建設されてきた。

泉北製造所第二工場の 16 号 LNG タンクに PC LNG タンク形式を採用し、敷地の利用効率を高められるというこの形式の特徴を最大限に生かして、容量を世界最大級の 14 万 kl とした。製造所の全景と着工当初の 16 号タンクの様子を写真-3 に示す。

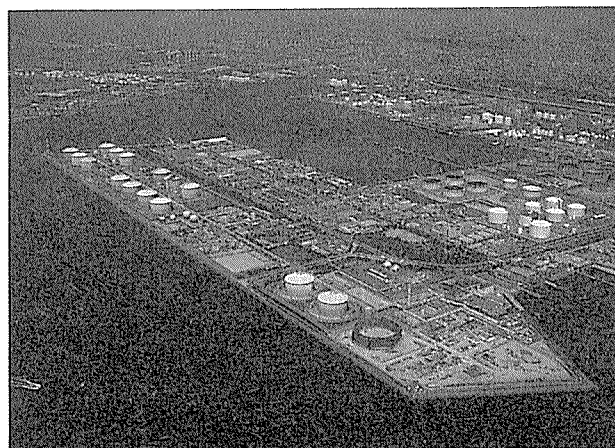


写真-3 大阪ガス、泉北製造所全景（手前建設中が PC LNG タンク）

3.2 構造概要

タンクの形状寸法を図-4 に、PC テンドンの配置を図-5 に示す。構造概要をまとめると次のようになる。

内 槽：9% ニッケル鋼製

液深 28.562 m 内径 79.0 m

屋根頂部高 GL+46.797 m

保 冷 材：側部および屋根部 粒状パーライト

底部 泡ガラスほか

PC 防液堤：プレストレストコンクリート製

内径 81.2 m 外径 83.0 m

壁厚 0.9 m 断面拡大部 1.8 m

基 礎 版：鉄筋コンクリート製

底部ブラインヒーター付き

外径 84.4 m

版厚 一般部 1.8 m, 周辺部 2.1 m

基 礎 杭：鋼管杭基礎

径 711.2 mm 長さ 31.0 m

1 255 本

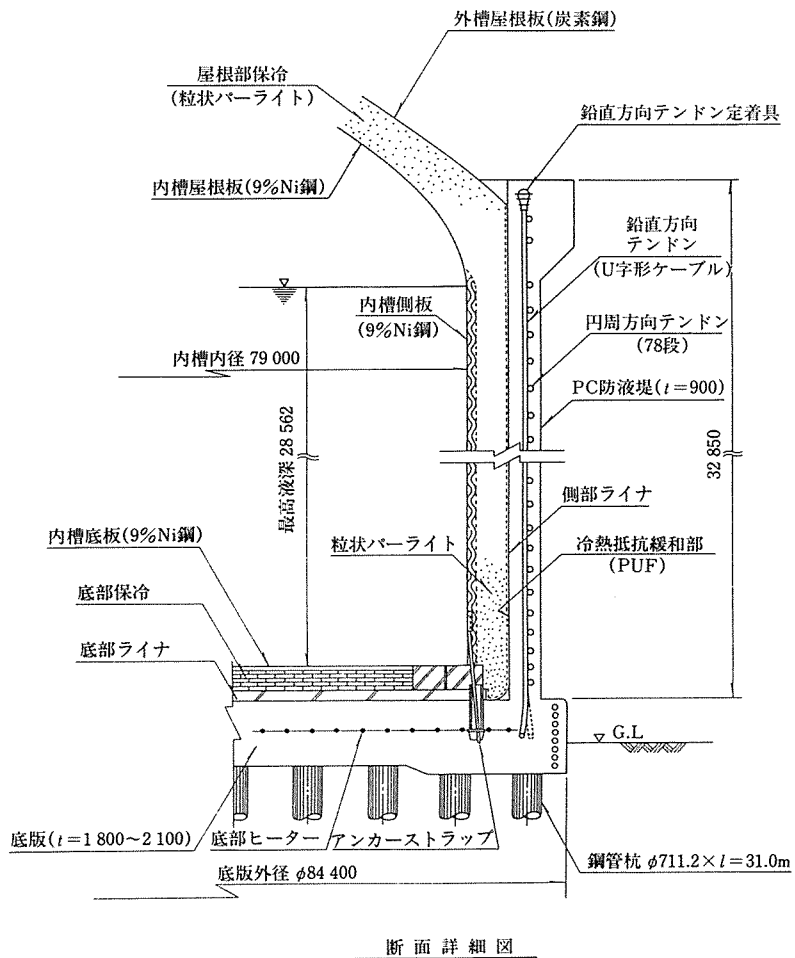
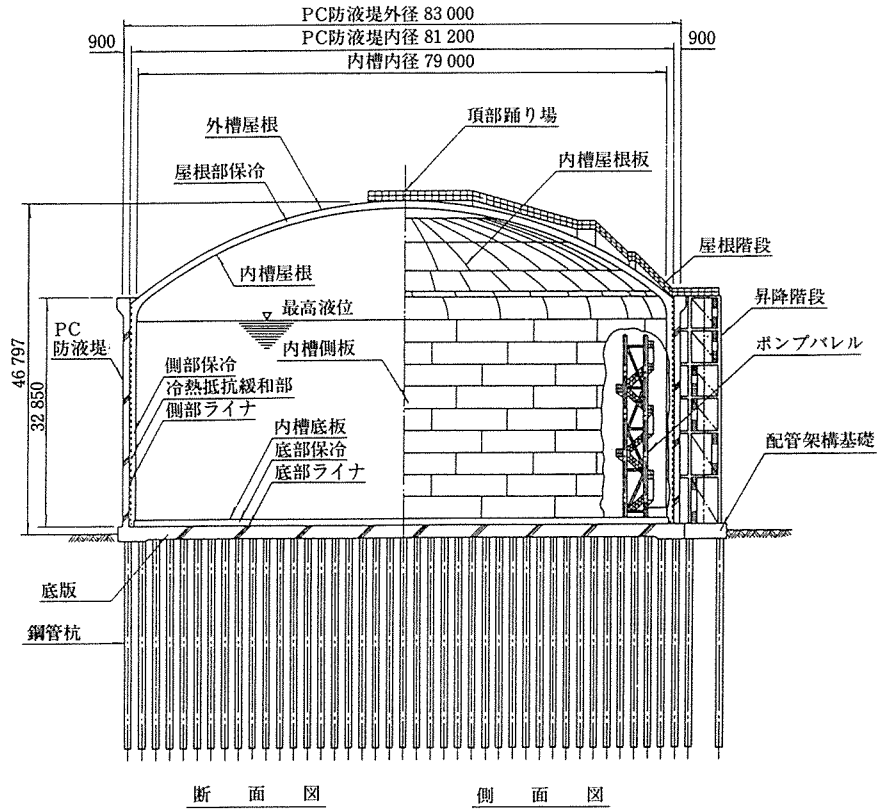


図-4 大阪ガス泉北製造所, 14万 kL PC LNGタンク構造図

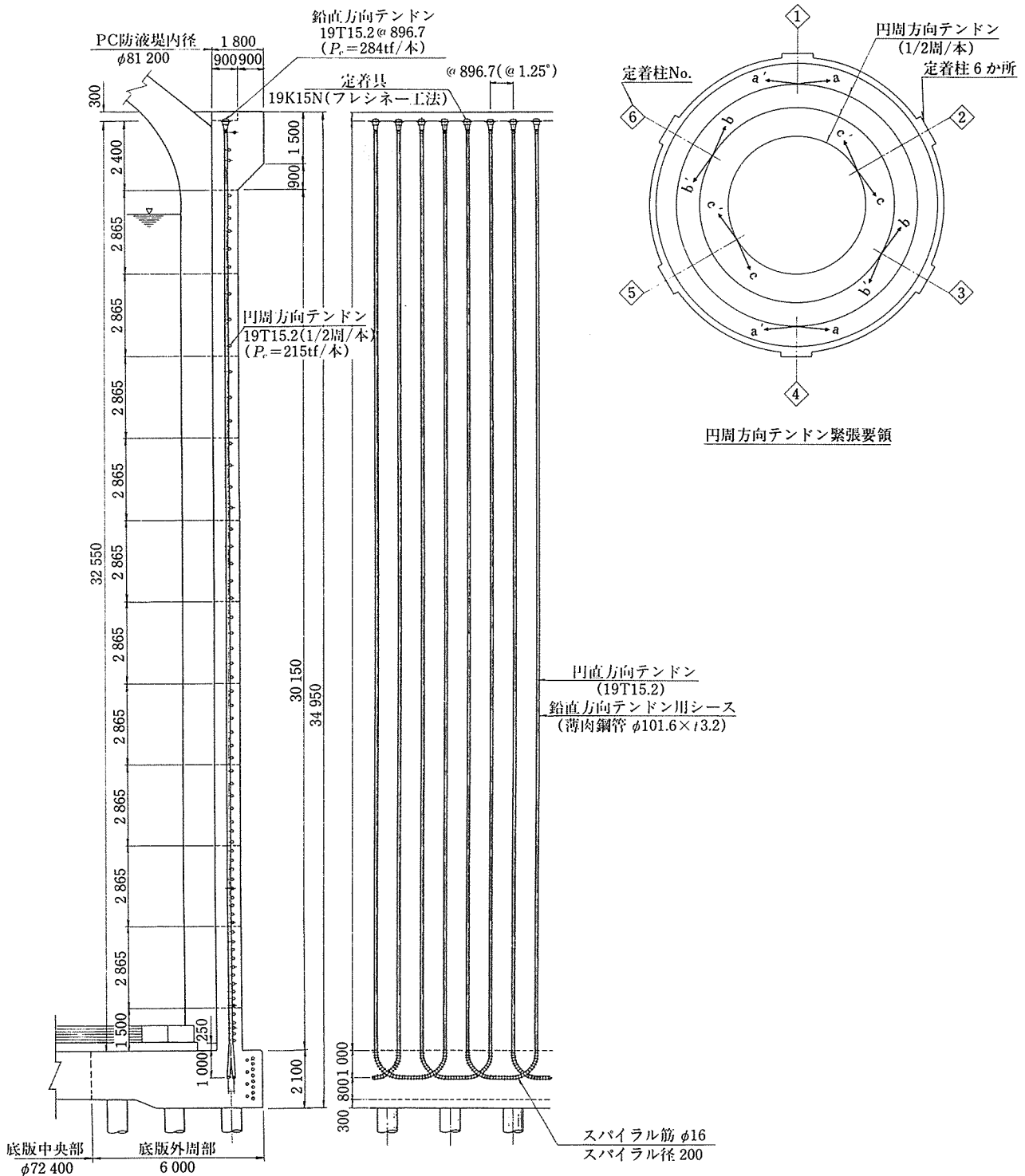


図-5 14万kL PC LNG タンクの PC テンドン配置図

冷熱抵抗緩和部：側部 ポリウレタンフォーム
 底部 パーライトコンクリート

4. PC LNG タンクの設計

4.1 設計手法

コンクリート構造の設計は限界状態設計法により行い、表-1 に示す各荷重状態に対して限界状態を検討している。使用限界状態として、通常運転時には曲げひび

われ発生限界を、漏液後には貯液限界を設定している。終局限界状態は断面破壊の限界状態を設定している。

荷重の種類は、自重、ガス圧、液荷重、保冷材圧力、温度荷重、積雪荷重、プレストレス力、乾燥収縮およびクリープ、地震荷重、風荷重、漏液圧、漏液後温度荷重、試験荷重などを考慮し、荷重の組合せによる荷重状態それぞれに対して安全な構造設計を行っている。

設計手順をフローチャートに示す(図-6)。

表-1 PC LNG タンクのコンクリート構造の限界状態設計法

項目	荷重状態		I		II	III		IV		照査荷重 載荷時
	記号		1	2	3	4	5	6	7	
	荷重時		施工時	試験時	通常運転時	積雪時	強風時	地震時	漏液後	
荷重	載荷形式									
	載荷期間		短期	短期	長期	短期	短期	短期	短期～ 比較的長期	短期
コンクリート構造の設計方法	使用限界状態 に対する検討	PC 防液堤	-	-	曲げひびわれ 発生限界状態 ($f_{td}=14.5$ kgf/cm^2)	-	-	-	貯液限界状態 (圧縮ゾーン ≥ 20 cm)	-
		基礎版	-	-	ひびわれ幅 ($W_{\alpha}=0.004$ C mm)	-	-	-	貯液限界状態 (圧縮ゾーン ≥ 20 cm)	-
	終局限界状態 に対する検討	PC 防液堤	○	○	○	○	○	○	○	○
		基礎版	○	○	○	○	○	○	○	○

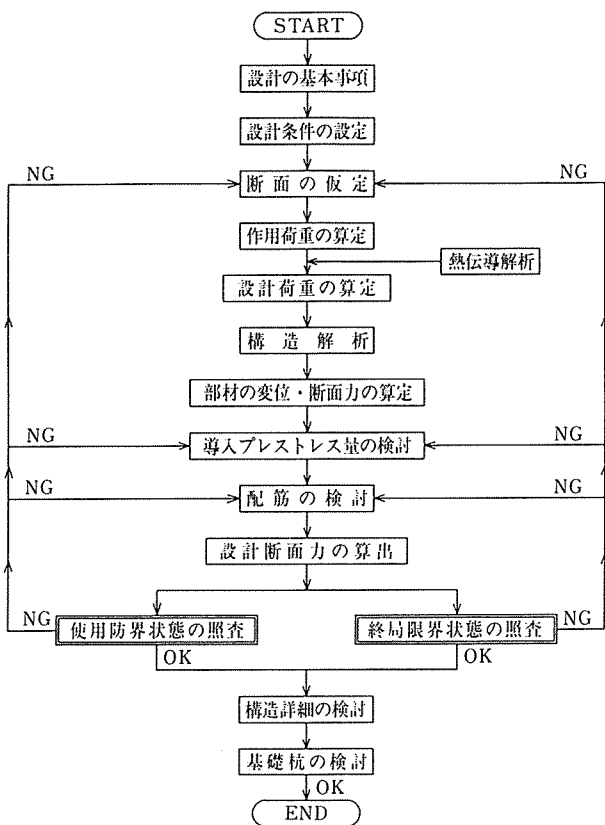


図-6 PC LNG タンクの設計手順フローチャート

4.2 基礎の設計

建設地点は臨海埋立地にあり、支持層となる洪積砂礫層は GL-28 m 付近に存在する。基礎に作用する鉛直荷重（約 8 万トン）と地震時水平力（約 2 万トン）を支持するため、1 255 本の鋼管杭（直径 711.2 mm、長さ 31 m）を打ち込み、杭頭固定の群杭基礎とした。

杭基礎に支持された鉄筋コンクリート基礎版は、上部構造からの荷重を支持し、杭基礎へ伝達する。漏液後には、側壁部を形成する PC 側壁と一体となって LNG 液を保持する。基礎版にブラインヒーターを配置して、内槽から伝達される低温によって生じる地盤の凍結を防止する。

4.3 PC 防液堤の設計

PC 防液堤と基礎版の結合部は剛結合で設計する。PC 防液堤の頂部は、一般部に比べて 2 倍程度の壁厚の頂部リングを形成し、ドーム屋根の支承反力を受け持つほか、座屈などに対する PC 防液堤の終局耐力を高める効果を持たせている。

構造解析は基礎版と PC 防液堤を一体構造として解析し、部材の断面設計はそれぞれ RC と PC の部材特性の違いに適合した考え方で設計する。プレストレス量と配筋量の決定に当たって重要なことは、貯液限界状態を満足するため、所定の圧縮応力ゾーンを（少なくとも 20 cm を）確保するように選定することである。16 号タンクでは圧縮応力ゾーンを 20 cm としたが、実用上は 10 cm で十分である。

5. 材料および構造の低温特性・貯液性能の実証試験

極低温の液化ガスを貯蔵する容器構造として、PC 防液堤が内槽に準ずる構造の信頼性を保有することを実証し、さらに、材料および設計の仕様を明らかにするため、PC 防液堤の材料と構造の低温靱性に着目した総合的な実証実験を行った。調査項目には、材料と構造の面から強度特性、変形特性、靱性、耐冷熱衝撃特性、貯液

性などを、設計面では解析法、シミュレーションの妥当性、貯液限界の評価法などを含めている。これら一連の実証試験から得られた知見を要約して、以下に報告する。

5.1 PC 材料の低温特性

PC 防液堤を構成する PC 鋼材 (PC ストランド)、定着具、および PC テンドンシステム (定着具によって定着されたシングルおよびマルチストランド) は、極低温下において、強度と変形能に優れた十分な靱性を備えた材料でなければならず、瞬時に破壊が進行する脆性的な挙動を示す材料であってはならない。この試験では、材料それ自体の低温靱性と定着されたテンドンシステムの低温靱性を評価している。

(1) PC 鋼材の強度変形特性

テンドンシステムを構成する PC 鋼より線 (SWPR 7 B, 15.2 mm) 1 T 15 を供試体として、常温、-20, -40, -80, -120, -164°C の各温度における静的載荷試験を行い、強度特性と変形特性を調べた。0.2 % 永久伸びに対する強度および破断強度は温度低下に伴い増加する (常温比の増加率は -164°C で 10 % 程度)。伸びは逆に低下するが (低下率は -164°C で 25 %), すべて常温の JIS 規格 (3.5 % 以上) を満足する。このとき絞りの低下は 10 % 程度であり、破面は完全延性である (図-7)。

(2) PC 鋼材の切欠き靱性

PC 鋼材の靱性は切欠き感受性により評価した。PC 鋼より線 1 T 15 のストランドの芯線を素線として取り出し、サイドノッチ (底半径 0.05 mm) をつけ、ノッチの深さを変えた供試体の低温引張試験を行った。ノッチ深さは 0.1, 0.5, 0.7, 1.0 mm の 4 段階とし、試験温度は常温、-40, -80, -120, -164°C の各温度で載荷試験を行い、破断応力と伸びを測定し、破断状況を観察した (図-8)。

母材の降伏強度以下で破断する、いわゆる低応力破壊が発生する限界温度を破断応力と温度の関係から推定すると、ノッチ深さ 1.0 mm で -40°C, 0.7 mm で -120

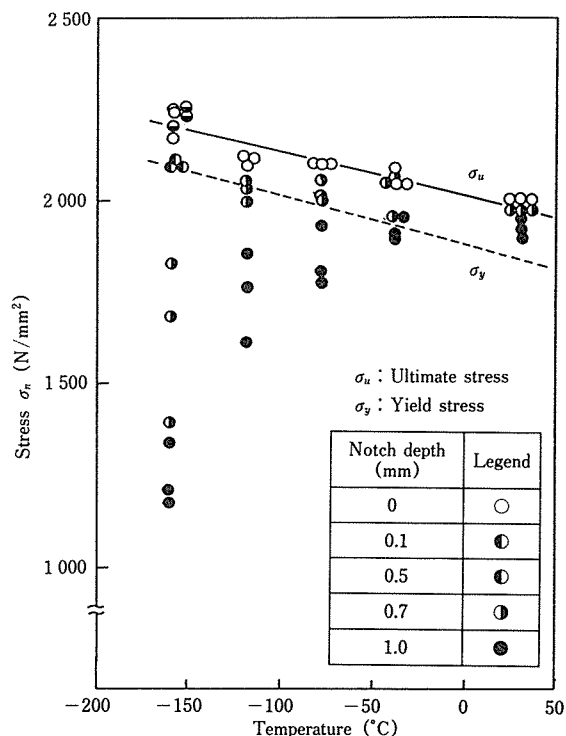


図-8 PC 鋼より線芯線のノッチ深さと低温破断応力 (SWPR 7 B, 15.2 mm)

から -130°C, 0.1~0.5 mm では -164°C である。LNG の液温度 -164°C において、コンクリート標準示方書による PC 鋼より線の引張応力度の限界値である規格破断強度の 70 % を下まわるのは、-164°C でノッチ深さは 0.8 mm 程度と推定される。

PC 鋼より線に生じる可能性のあるキズは、製造時に 0.1 mm 程度、定着部におけるウェッジ歯形により 0.4 mm 程度と想定され、いずれも十分安全側にある。PC 鋼材は -164°C まで引張特性は劣化しない、優れた切欠き靱性を備えた材料である。

(3) PC 定着具の低温靱性

PC 定着具は低温下において、PC テンドンの引張力を確実にコンクリート部材に伝達する健全性が求められる、このため、定着具を構成する各部材料は、それぞれの応力状態に適応する低温靱性を備えなければなら

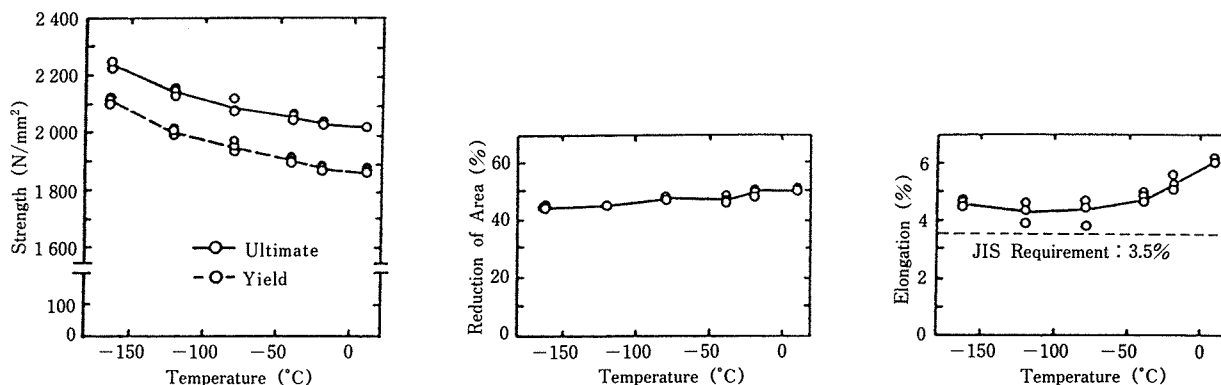


図-7 PC 鋼より線の低温引張特性 (SWPR 7 B, 15.2 mm)

◇工事報告◇

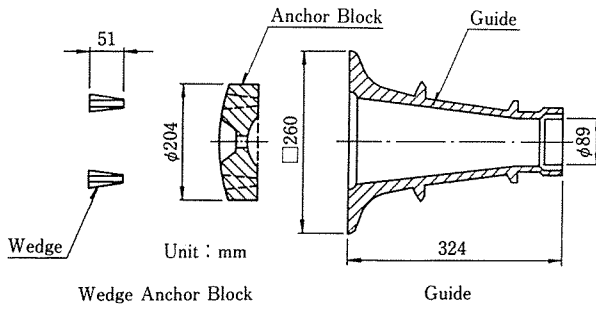


図-9 定着具の構造（フレシネー V システム 12 V 15/低温仕様）

い。フレシネー工法の V システムおよび K システム定着具はウェッジ、定着ブロック、ガイドの組合せで構成されている（図-9）。圧縮力が卓越するウェッジとガイドは試験対象から外し、ウェッジのくさび作用により大きな円周方向引張力と曲げを同時に受ける定着ブロックを対象に、低温靱性を評価した。

評価方法はシャルピー衝撃試験（JIS Z 2242, JIS B 7722）によるものとし、吸収エネルギー、脆性破面率および横膨出量を測定した。定着ブロックの靱性を判定するための評価基準を、WES（低温用圧延鋼板判定基準）および ASTM（SPECIFICATION A 20/A 20 M）を参考に次のように定め、この条件を満足する温度の下限値を靱性を有する限界温度と判定した。

- 1) 吸収エネルギーの平均値が 4.8 kgf・m 以上
- 2) 脆性破面率の平均値が 50 % 以下
- 3) 横膨出量の平均が 0.381 mm 以上

標準品に用いられる材質 S 55 C（JIS G 4051）では靱性の確保が困難なため、特殊用途合金鋼ボルト用棒鋼 SNB 24（JIS G 4108）の成分管理した高炉材を用いた低温仕様製品を対象に試験を実施した。

供試体は定着ブロックから採取した 4 号試験片（2

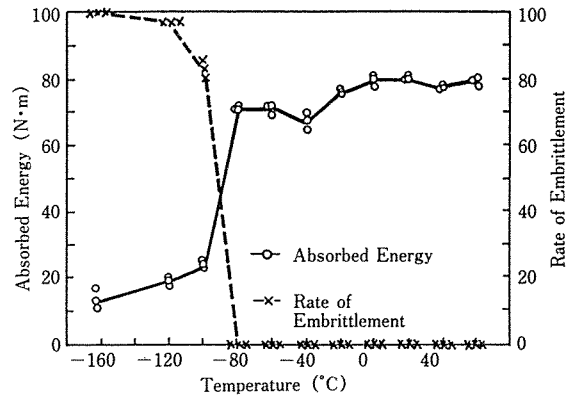


図-10 定着ブロックのシャルピー衝撃試験における吸収エネルギーと脆性破面率（フレシネー 12 V 15/低温仕様）

mmV ノッチ）とし、試験温度は常温から -164°C の間で試験を行った（図-10）。延性から脆性への遷移温度は -80°C 以下にあることを試験データは示しており、-80°C まで吸収エネルギーは 6 kgf・m 以上、脆性破面率は 0、横膨出量は 0.8 mm 以上であり、上記の判定条件を満足している。

（4）PC テンドンシステムの強度変形特性

低温下における PC テンドンシステムの健全性に関して FIP (Assesment of mechanical properties of structural materials for cryogenic applications) は、表-1 および図-12 に示す評価基準と載荷試験方法を規定している。テンドンシステムの載荷試験は常温、-40、-80、-120、-164°C の 5 段階の温度について、図-11 に示す載荷装置により、500 t または 1 000 t のセンターホールジャッキで載荷した。載荷装置は低温槽を兼ねており、試験体を全長にわたって均一な温度に保つため、低温槽各部への液体窒素（-196°C）の噴霧量をコントロールする装置としている。

載荷方法および順序を図-12 に、評価基準を表-2

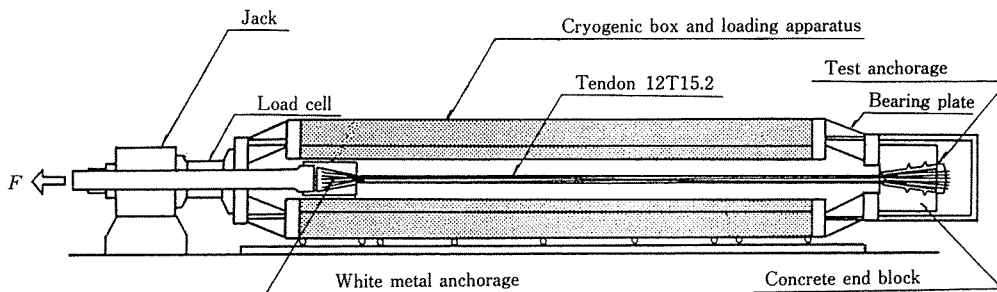


図-11 PC テンドンシステムの低温載荷装置（最大載荷重 1 000 t）

表-2 PC テンドンシステムの低温定着性能の評価基準

温度条件	強度特性（定着効率）	変形特性（破断時伸び）
常温	$\eta_A = \frac{\text{PC テンドンシステムの破断強度 } F_{TU}}{\text{PC 鋼材の規格引張強度 } \min F_{CU}} \geq 0.97$	$E_U \geq 2.3 \%$
低温	$\eta_B = \frac{\text{PC テンドンシステムの破断強度 } F_{TUO}}{\text{PC 鋼材の低温降伏強度 } F_{YO}} \geq 1.00$	$E_{UO} \geq E_{PO} (\max F_{PO} \text{ 時伸び}) + 2 \%$ かつ PC システムが降伏ひずみ以降の塑性ひずみ領域で破断すること

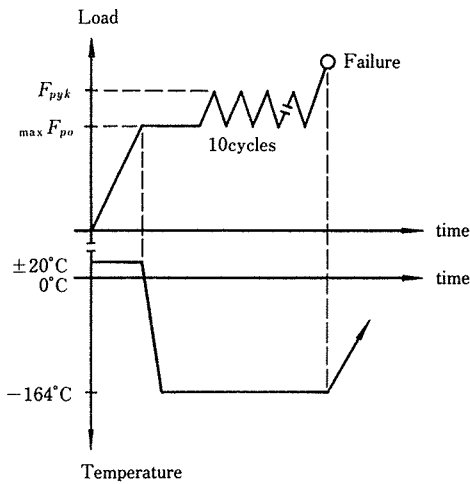


図-12 PC テンドンシステム定着性能の低温試験載荷方法

に、フレッシュ V システム 12 V 15 の試験結果を図-13 に示す。この試験から次の知見が得られた。

- 1) -164°C における tendon システムの破断強度は、鋼材の同温度の降伏強度に対する比で 1.01~1.02、破断伸びは 3 % 前後と、FIP の評価基準を満足した。
- 2) 伸びは、試験温度を下げても急激な低下はなく、

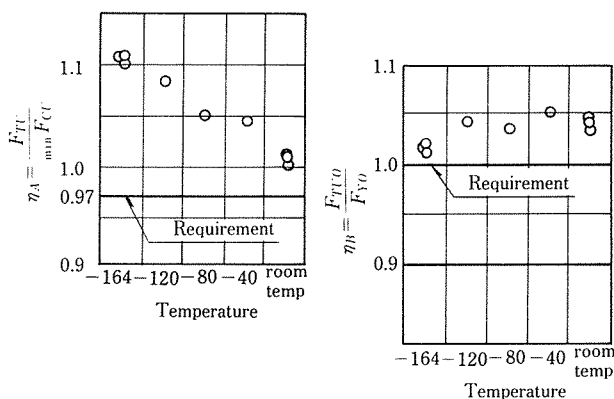
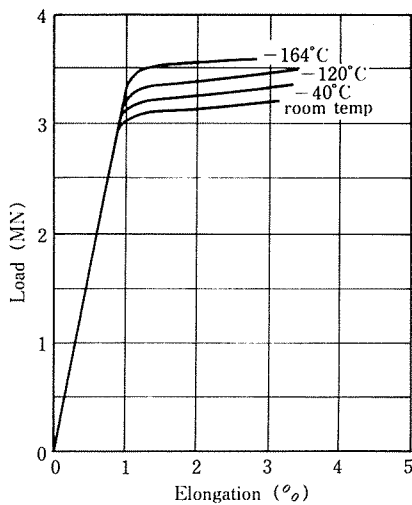


図-13 PC テンドンシステムの低温における荷重-伸び曲線と定着効率（フレッシュ V システム、12 V 15/低温仕様）

破断面はいずれも延性であり、すべて定着具のガイド内の位置で絞り破断していた。

- 3) PC 定着具は PC 鋼より線の破断まで異常は認められなかった。

この試験に用いた PC テンドンシステムは FIP の評価基準を満足し、破断性状においても不安定領域での破断は認められなかった。

(5) PC テンドンシステムの冷熱衝撃特性

緊張状態の PC テンドンシステム (12 V 15) に貯液が直接接触する、局部急冷却に対する健全性を確認するため、PC 梁部材の定着部と露出させた tendon (一部) を急冷し、PC 鋼より線と定着具の変形挙動を測定した。

液体窒素 (-196°C) を注ぐ冷熱衝撃に対して、PC 鋼より線 (露出長 20 cm) に発生した引張ひずみは約 350 μ 、定着ブロックに発生した円周方向引張ひずみは約 600 μ と、鋼材の降伏ひずみに対して十分小さいひずみレベルであった。温度が定常状態になるために要する時間は、Tendon で約 5 分、定着部で約 10 分であった。

5.2 PC 部材の耐低温特性

PC 梁部材を供試体に、低温下における PC 部材の耐荷力・変形能 (静的載荷試験)、衝撃荷重を受けた時の吸収エネルギーの大きさ (衝撃曲げ破壊試験)、および部材片側に極低温液化ガスを直接受けた時の温度応力の進展を含めた構造挙動の解明 (冷熱衝撃試験) を目的とした部材載荷試験を行った。

(1) PC 部材の静的・衝撃曲げ破壊特性

RC 部材と PC 部材 (幅 20 cm × 高さ 24 cm × スパン 180 cm) を供試体として、試験温度は常温、 -60°C 、 -120°C 、 -164°C の 4 段階、載荷速度は静的および衝撃載荷 (スパン中央の変位速度を 100 cm/sec に制御し荷重を測定) の 2 ケースとする静的・衝撃曲げ破壊試験を行った (写真-4)。

試験体の破壊状況はいずれも曲げ破壊を示し、スパン中央よりひびわれが発生して順次梁端部に向かって曲げ

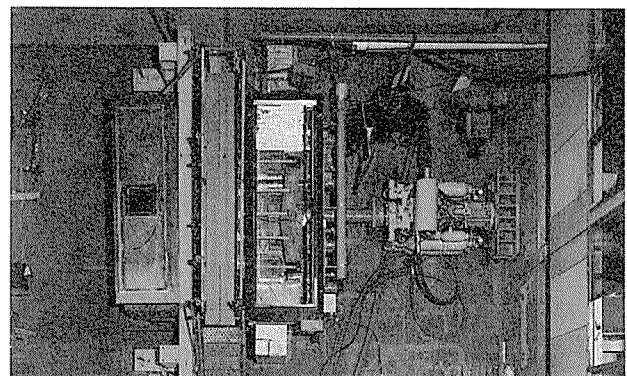


写真-4 PC 部材の低温衝撃曲げ試験の試験状況 (中央が低温槽、右側が変位速度制御の衝撃載荷装置)

◇工事報告◇

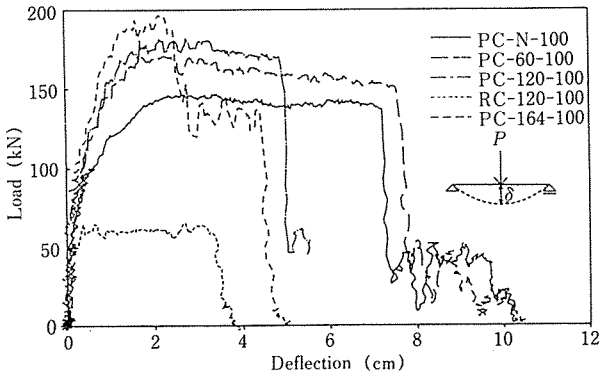


図-14 PC 梁部材の衝撃曲げ破壊試験における荷重-変位関係の温度依存

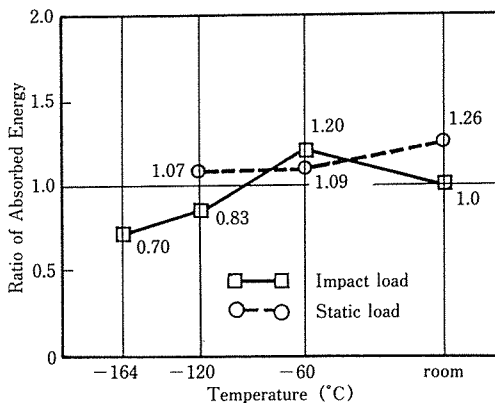


図-15 PC 梁部材の衝撃曲げ破壊試験における吸収エネルギーの温度依存

ひびわれと曲げせん断ひびわれが広がる。破壊時にはコンクリートの圧壊から PC 鋼より線、鉄筋の破断に至り、次いで耐力を喪失する破壊モードを示す。ひびわれの本数や深さなどは、静的載荷と衝撃載荷との間に大きな差異はなく、低温になるに従いひびわれ間隔が大きくなり、ひびわれ本数が少なくなる傾向を示す。

最大耐荷力は試験体温度の低下に伴い増加して、変位は減少する傾向を示す(図-14)。荷重-変位曲線をもとに最大変位時までの荷重履歴曲線のループ面積から求めた吸収エネルギーを、常温時のそれを基準とするエネルギー比で表して図-15 に示す。吸収エネルギーは低温になるに従い減少するが、 -164°C (LNG 温度) の衝撃試験においても常温時の 70 % の吸収エネルギーを確保できることが確認できた。

(2) PC 部材の冷熱衝撃特性

両端の曲げ変形を拘束した PC 梁部材 (幅 40 cm × 高さ 35 cm × 冷却域 120 cm × 支間 130 cm) の上面に液体窒素 (-196°C) を貯液し、低温による梁断面内温度分布の経時変化とそれによる温度応力の変化を測定した。試験体の温度分布が定常に達した後、断面内に軸引張応力を生じるように梁両端に引張力を加え、強制的に引張ひびわれを進展させて、漏液発生時の鉄筋ひずみと漏液

発生状況を調べた。試験体は引張鉄筋比を 0.55, 1.1 %, 導入プレストレス量を 10, 30 kgf/cm^2 とする組合せである。

温度分布が定常に至る過程では、温度ひびわれの発生は梁上部 (冷却部) に限られ、梁を貫通するひびわれや漏液は認められない。

低温による梁剛性の変化については、コンクリートと鋼材の低温物性を考慮した FEM 非線形解析と測定値はよく合う。各試験体の曲げ変形拘束モーメントの最大値を弾性解析値 (低温物性考慮) で除した、梁の剛性残存率は 0.40~0.65 の範囲にある。

軸引張荷重を載荷した強制的なひびわれ進展の試験では、PC 部材の貯液限界を漏液発生時の低温側鉄筋のひずみ量で評価すると、限界値は 2000 μ 前後と考えられる。

(3) 貫通ひびわれ幅と貯液性能

コンクリート部材の貯液性能に関して定量的な構造設計の指標を得るため、貫通ひびわれを有するコンクリート部材を対象に、ひびわれ幅と低温液および気化ガス漏出量の関係を実験とシミュレーションにより確認した。試験体上面には液体窒素を接液させ、液体窒素には実用上の貯槽の貯液圧に相当する最大 1.5 kgf/cm^2 の加圧を行った (図-16)。

貫通ひびわれを流路とする低温液体の流れのシミュレーションは、気体 (気相) と液体 (液相) とが混合した状態で流れる一次元気液二相流としてモデル化する必要がある。これに部材内の温度分布の経時変化とそれによる部材変形 (ひびわれ幅の経時変化) の相互作用を考慮する必要がある。貯液性能を確保するメカニズムは、次のようである。液が浸入する入り口では液体 100 % であったものが、流路を移動するにつれてコンクリートの熱を奪い、低温液は気化潜熱に見合う気化ガスを発生する。ひびわれ幅が小さく、そこを流れる低温液の量が少なければ、液から供給される冷熱よりもコンクリートから供給される熱の方が多くなり、ひびわれの出口へ向けて移動するにつれて気化ガスの割合は増加して、あるところから気化ガス 100 % の状態になり出口に至る。気化ガスは体積増加による圧力上昇を伴うため、低温液の浸入を抑制して、漏液を防止する。

シミュレーションでは、漏出ガス量の経時変化を実験値の 0.5~2 倍程度という、実用上十分な精度で予測できることを確認した (図-17)。

この試験を通して明らかになったことは、以下のとおりである。部材厚 25 cm で貫通ひびわれが 0.1 mm 以内であれば、通常の液圧に対して漏液が生じることはない。さらに、出口側ひびわれの閉塞や部材厚を増すことで、より高い貯液性能を得られる。これらのことから設

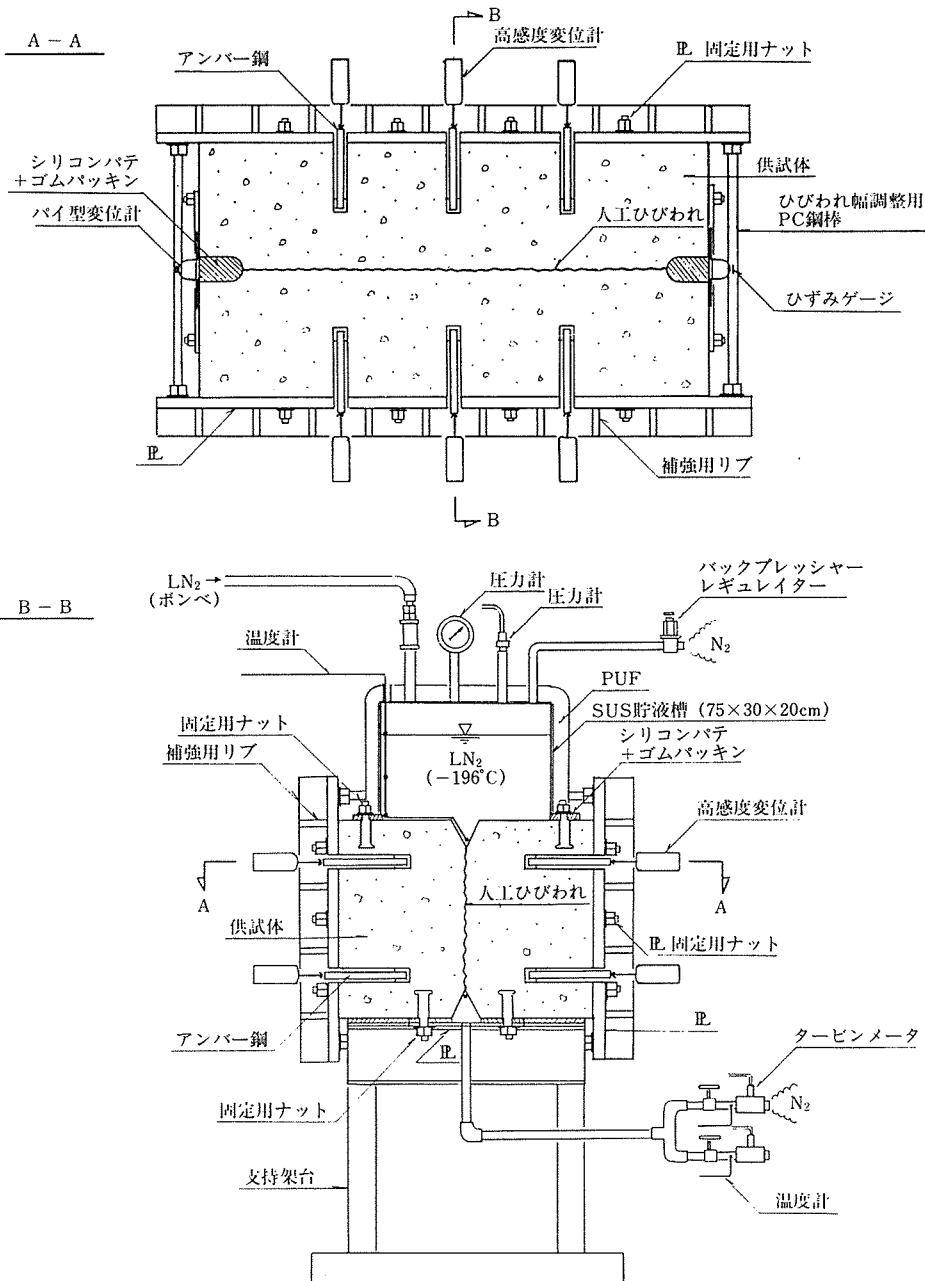


図-16 貫通ひびわれを有するコンクリート部材のガス漏出量試験装置

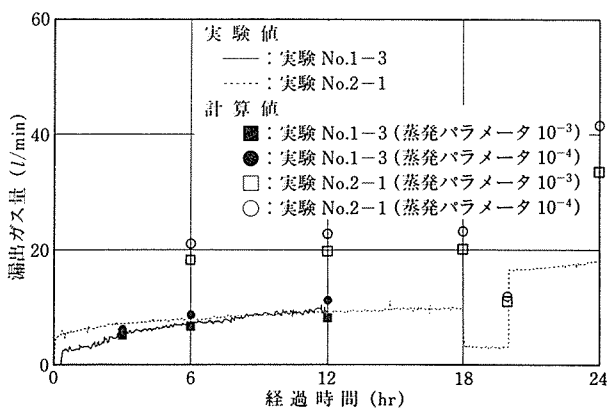


図-17 貫通ひびわれからの漏出ガス量の経時変化の実験値と解析値の比較

計において断面内にひびわれの生じていない領域(圧縮応力ゾーン)を残すことは、貯液性を確保するうえで有効な方法である。

5.3 モデルタンクによる実証試験

貯槽構造全体の低温による挙動と安全性を確認するため、液体窒素(-196℃)を用いて、容量50klのモデルタンクの貯液試験を行い、さらに、コンクリート構造のみでも貯液機能を有することを実証するRC円環モデル貯液試験を実施した。

(1) 50klモデルタンクによる確認

PC LNG タンクのコンクリート構造部分を内径5.0m、高さ3.0mの貯液容量50klのタンクにモデル化し

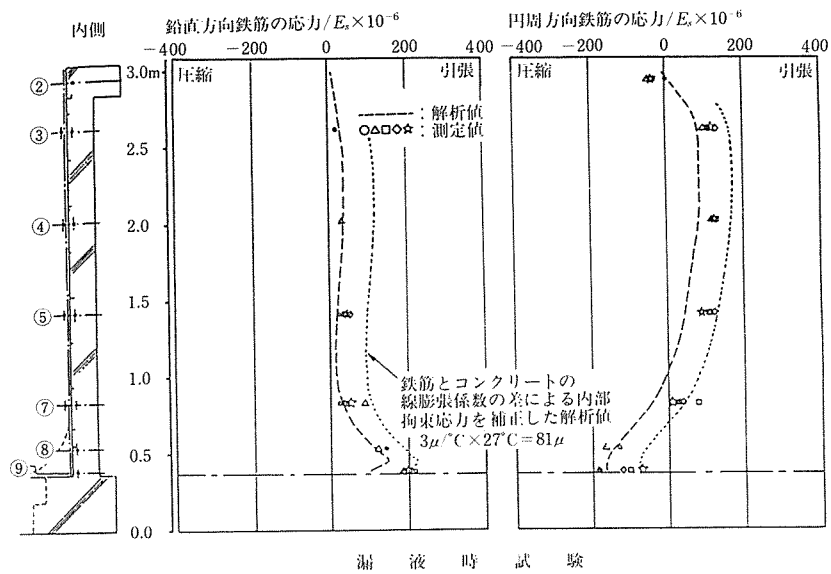
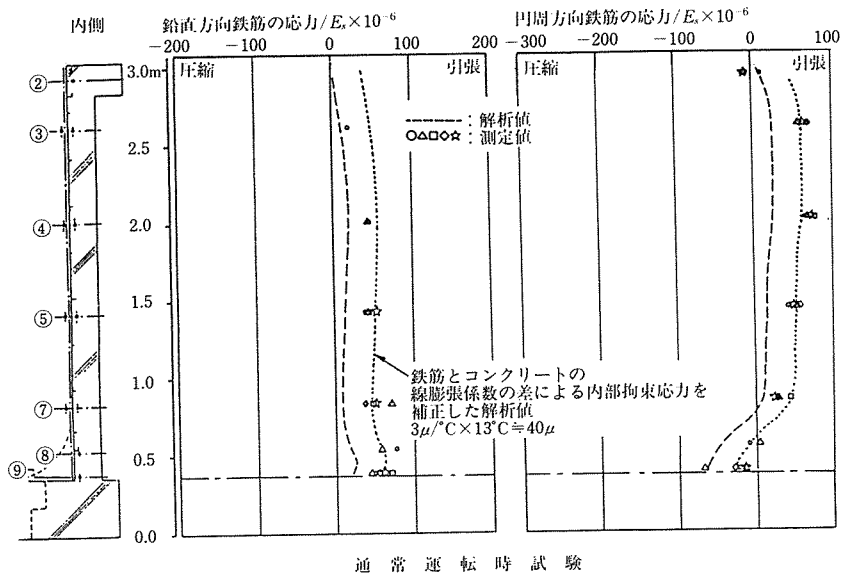
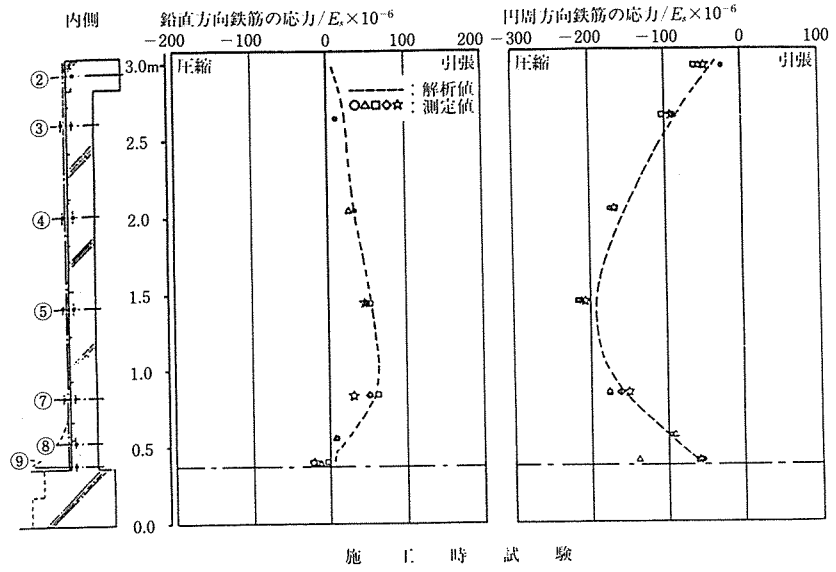


図-18 50 kIモデルタンクのPC壁の実験値と解析値の比較

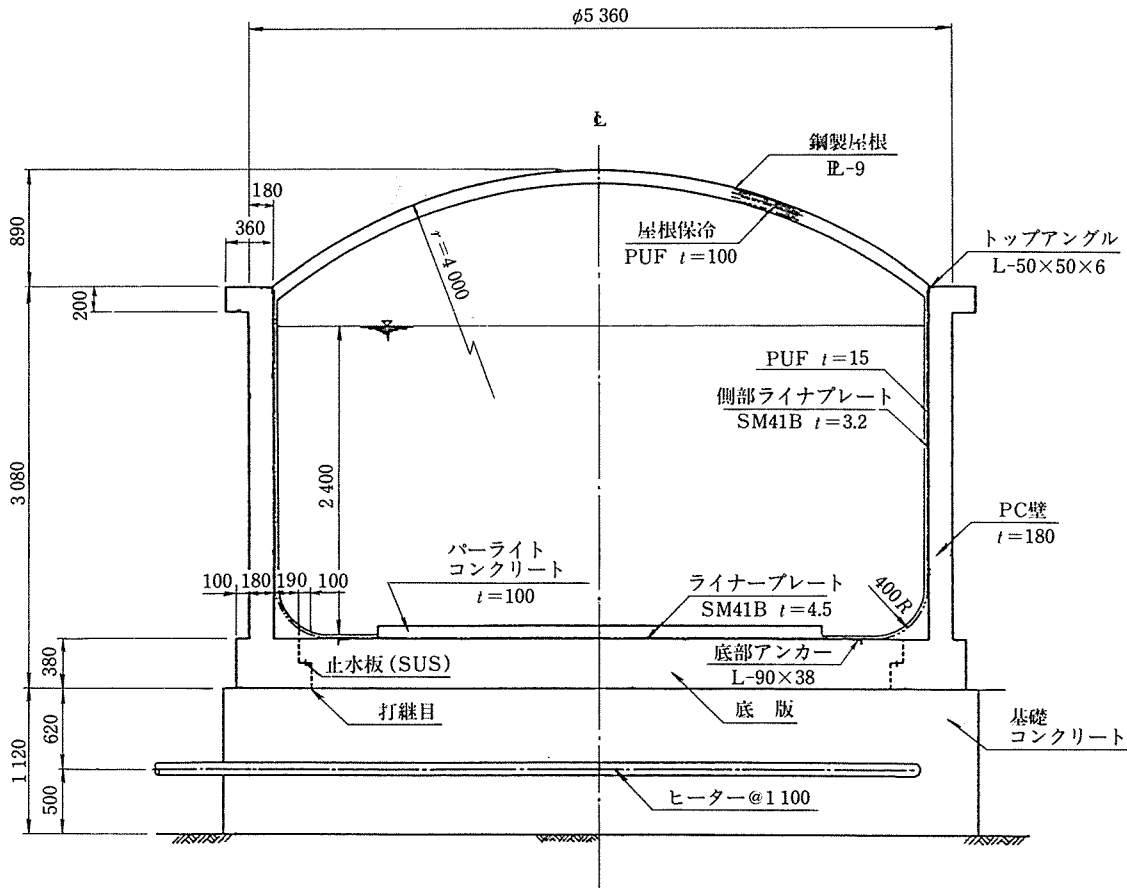


図-19 50 kLモデルタンクの構造

て、施工時、通常運転時および漏液時を想定した低温試験を実施した（図-18, 19）。

施工時を想定した試験は、外周底版と側壁を先行して構築してプレストレスングを行い、ライナープレート（厚さ 3.2 mm）と PC 側壁の挙動を調べた。円周テンションの一部を緊張することにより、PC 側壁下端部に設計解析で期待した円周方向圧縮力を導入できることを確認した。

通常運転時を想定した試験では -50°C までタンク内を冷却し、ライナープレートの健全性とポリウレタンフォーム (PUF) による冷熱抵抗緩和部の健全性・断熱性能を確認した。

漏液時を想定した試験では、液体窒素の直接投入によって PUF 表面は急激な温度低下を受けたにもかかわらず、PUF 背面のライナープレートおよび PC 側壁の温度分布に異常な低下はなく、解析値とも良く適合した。ウォームアップ後の内部検査でも、PUF 表面にマイクロクラックは認められるものの、断熱性能に影響するような損傷はなく、冷熱抵抗緩和部として十分にその機能を発揮することが確認された。

50 kL モデルタンクはすべての試験項目において健全であることが確認され、また、解析により予測した構造挙動と低温試験で観察したモデルタンクの挙動はよく一

致し、設計解析方法の妥当性についても確認された。

(2) RC 円環モデルによる確認

RC 円環試験体（内径 1.5 m × 厚さ 0.09 m, 鉄筋比 1.11 %, 0.53 %）に液体窒素を直接投入し、漏液を生じないことを調べた。貯液開始から温度定常となるまで試験体からの液漏出はなかった。コンクリート断面内の圧縮応力域の範囲は鉄筋ひずみから推測して、外表面から 3 cm よりやや内側までの範囲と考えられた。

50 kL モデルタンクで確認された貯液性能と同様に、コンクリート構造の優れた止液性が実証され、また、ひびわれの生じていない圧縮領域を残すことが、漏液防止および漏気の制限に有効なことが確認された。

6. PC LNG タンクの施工

6.1 工事概要

PC LNG タンク（16 号タンク）は平成 2 年 6 月に工事に着手した。土木工事の大部分は完了して（平成 4 年 8 月現在）、金属製内槽を中心とする機械工事に移り、平成 5 年初めにはプレストレスングの最終段階を行い、次いで、耐圧試験、保冷材工事をへて、平成 5 年 12 月完成の予定である。主要工事数量は次のとおりである。

鋼管杭：1 255 本（径 711.2 mm × 長さ 31.0 m）

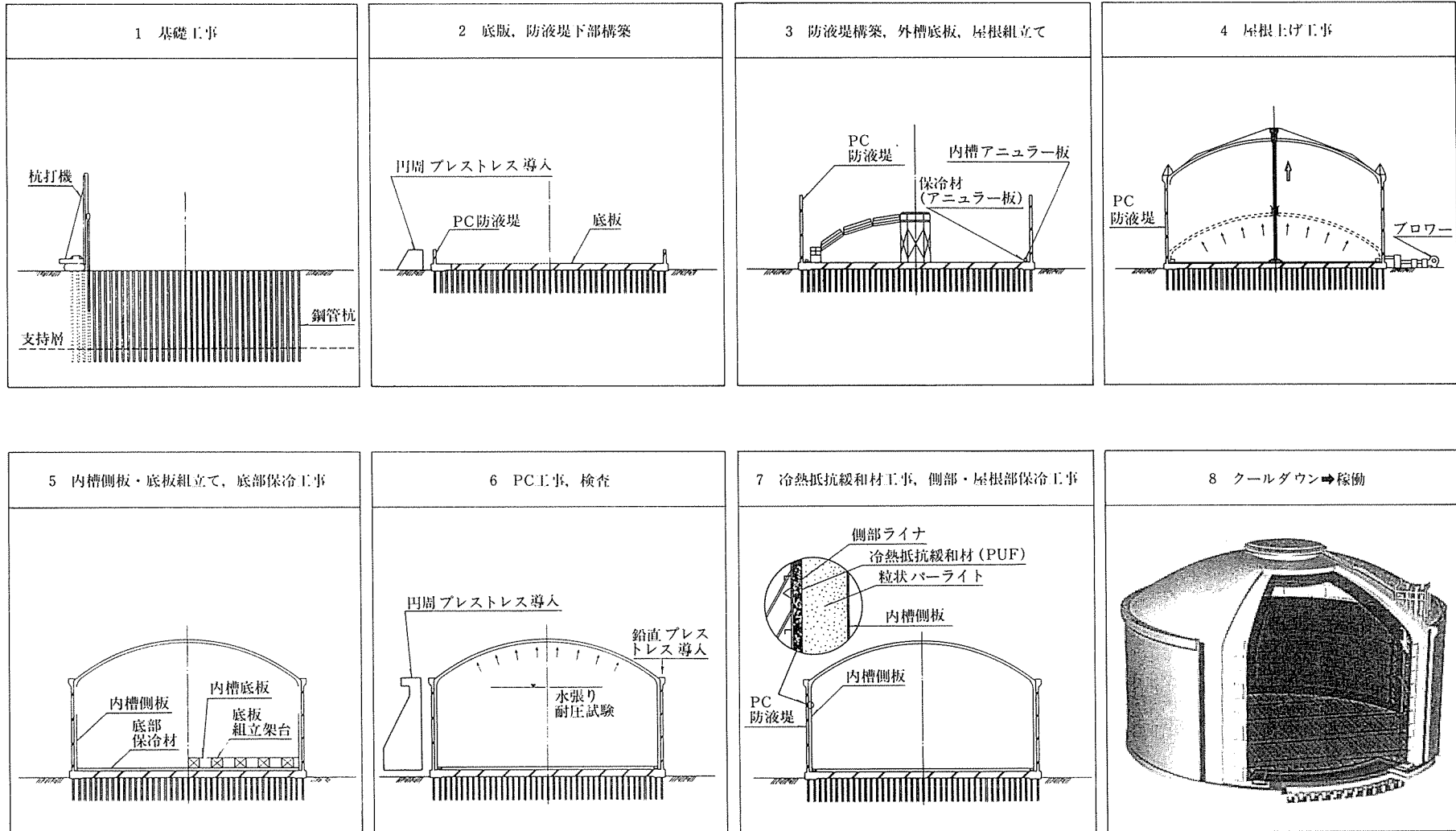


図-20 PC LNG タンクの施工順序

コンクリート：22 000 m³ (91 日強度 400 kgf/cm²)

鉄筋：4 080 t (SD 295)

PC 鋼材：約 700 t (PC 鋼より線 T 15.2)

なお、PC 定着具は低温仕様の 19 K 15 N を使用している。

PC 防液堤は強度、耐久性、液密性に優れた構造であることが機能上要求され、また、規模の大きな構造物であるため、施工精度を含め高品質化のための厳しい施工管理のもと合理的かつ安全なプロセスによる工事を進めている。

PC LNG タンクの施工順序は次のとおりである (図-20)。

基礎工事……鋼管杭を堅固な支持層まで打ち込んだのち、基礎版鉄筋の組立、底部ヒーター配管の設置、内槽を定着するアンカストラップの据付けを行う。

基礎版・防液堤下部構築……基礎版は外周部と中央部に分割し、基礎版外周部と防液堤下部とを先行して構築し、円周方向テンドンのプレストレスングを行う。その後、基礎版中央部のコンクリートを打設する。

防液堤構築・外槽底板・屋根組立……防液堤を 1 回の打ち上がり高さ約 2.9 m で順次構築する。並行して、基礎版上では底部ライナと敷設、アニュラー部の保冷材と内槽底板の設置、内槽と外槽の屋根組立を行う。

屋根上げ工事……防液堤の構築が完了した後、基礎版上で組み立てた屋根を空気圧により浮上させ、防液堤の頂部に据え付ける。

内槽側板・底板組立・底部保冷工事……屋根におおわれた良好な作業環境で、内槽の側板を組み立てる。並行して底部保冷材を設置し、内槽底板の組立を行う。

PC 工事・検査……防液堤のプレストレスングは、初めに鉛直方向、次いで円周方向の順序で行う。その後、水張り・耐圧試験・気密試験を行う。

冷熱抵抗緩和材工事・側部と屋根部保冷工事……防液堤の内面に冷熱抵抗緩和材 (PUF) を設置し、粒状パーライトを内槽と外槽の間に充填する。

クールダウン……内槽内を窒素ガスでパージし、LNG でクールダウンした後、タンクを稼働する。

6.2 コンクリートの温度ひびわれ対策

PC LNG タンクは内径 81.2 m、堤高約 33 m の円筒シェル構造で、設計基準強度は 400 kgf/cm²、壁厚 90 cm の高強度マスコンクリートである。このためセメン

トの水和熱に起因する温度ひびわれの発生が懸念された。特に、暑中に施工する部分については、温度ひびわれの危険が一層高いと予想されたため、液化窒素 (-196℃) を用いたプレクーリング (NICE クリート工法) も採用している。

PC 防液堤躯体コンクリートの配合を表-3 に示す。セメントは低発熱のセメントを採用し、水セメント比 40% とした。単位水量を極力少なくして水和熱と乾燥収縮を抑制するために、スランプロス低減型の高性能 AE 減水剤を用い、単位水量を 145 kg/m³ まで低減した。さらに、ブリージングの抑制・低減対策として石灰石粉を混和した。

側壁の打設高さは平均約 2.9 m のロット高さで施工し、高さ方向に 12 分割の円筒リング状に構築した。各ロットごとにコンクリート打設時期が変わり、気象条件が異なるため、ロット別に温度ひびわれのシミュレーションを行い、対策を実施した。打設ロット別のひびわれ制御対策を図-21 に示す。

コンクリートの引張強度を発生する温度応力で除して得られる温度ひびわれ指数は、1.5 を上回ることを条件にし、施工管理目標としては 2.0 とすることでひびわれ発生の防止に確実に期した。

防液堤躯体内には温度計、有効応力計を打設ロットごとに設置し、温度と応力の制御管理を行った。図-22 は第 8 ロットの管理グラフを示し、外気温度が最高 35℃ まで上昇した 8 月 23 日に打設したコンクリートの管理結果である。プレクーリングを行わない場合の打設後の温度上昇予測は 22℃ で、温度ひびわれ指数は 1.2 にとどまり、ひびわれ発生の防止に十分ではない。

打込み温度を 20℃ 以下となるようにプレクーリングを行えば、ピーク温度は 10℃ 低下して、温度ひびわれ指数は 2.0 以上を確保できる。実施ではプレクーリングに加えて、74 cm 間隔で配置されたシースを利用したパイプクーリングを併用した。

6.3 プレストレスング

円周方向テンドンの緊張は、STEP 1 から STEP 4 までの 4 段階に分けて実施する。STEP 1 は先行施工する基礎版外周部と PC 壁体下部を緊張して円周プレストレスを導入し、STEP 2 は基礎版中央部を打設したのち STEP 1 の追加プレストレスとして緊張する。

STEP 3 は PC 防液堤の頂部にプレストレスするもの

表-3 PC 防液堤躯体コンクリートの配合

設計基準強度 (kgf/cm ²)	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブの範囲 (cm)	空気量の範囲 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 S/a (%)	単用量 (kg/m ³)					
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和材料	
										混和材	混和剤
400	20	12±2.5	4.5±1.0	40	44.0	145	363	747	1 017	石粉 30	SP-9 HS (C+石粉) ×1.3~1.5%

◇工事報告◇

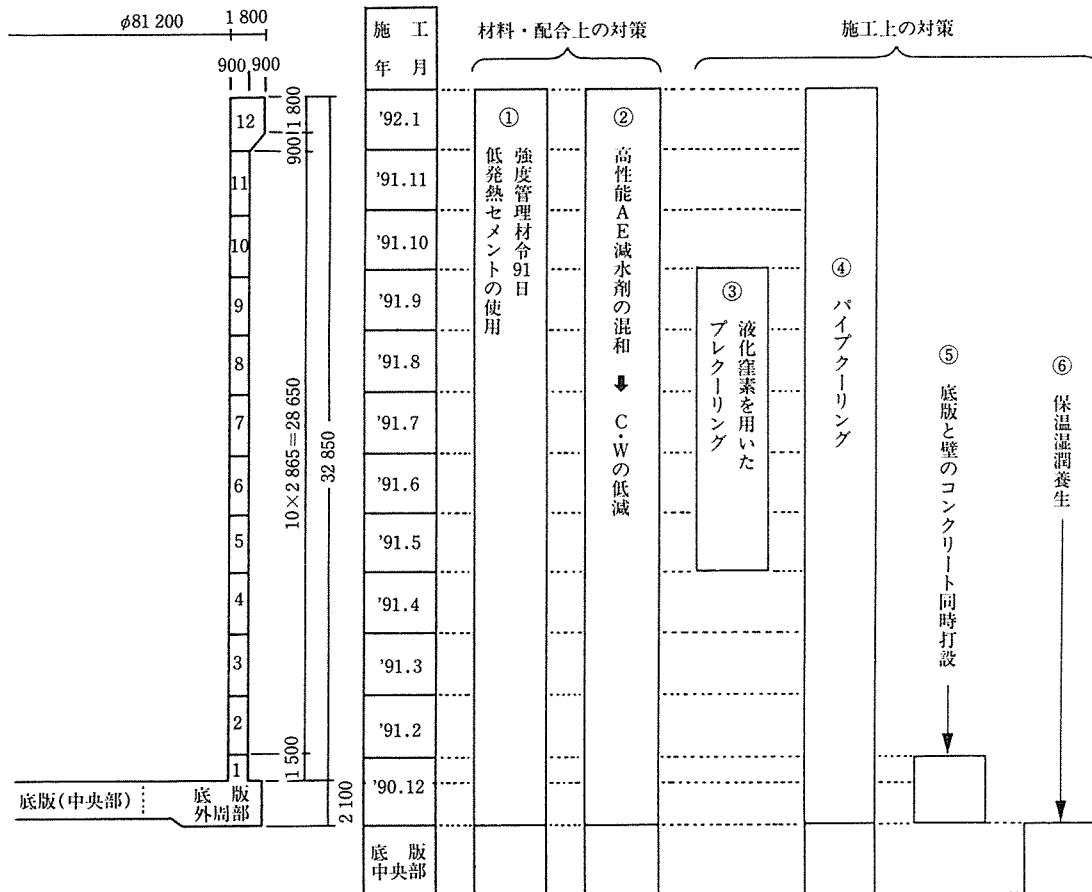


図-21 PC防液堤躯体の打設ブロック割りとひびわれ制御対策

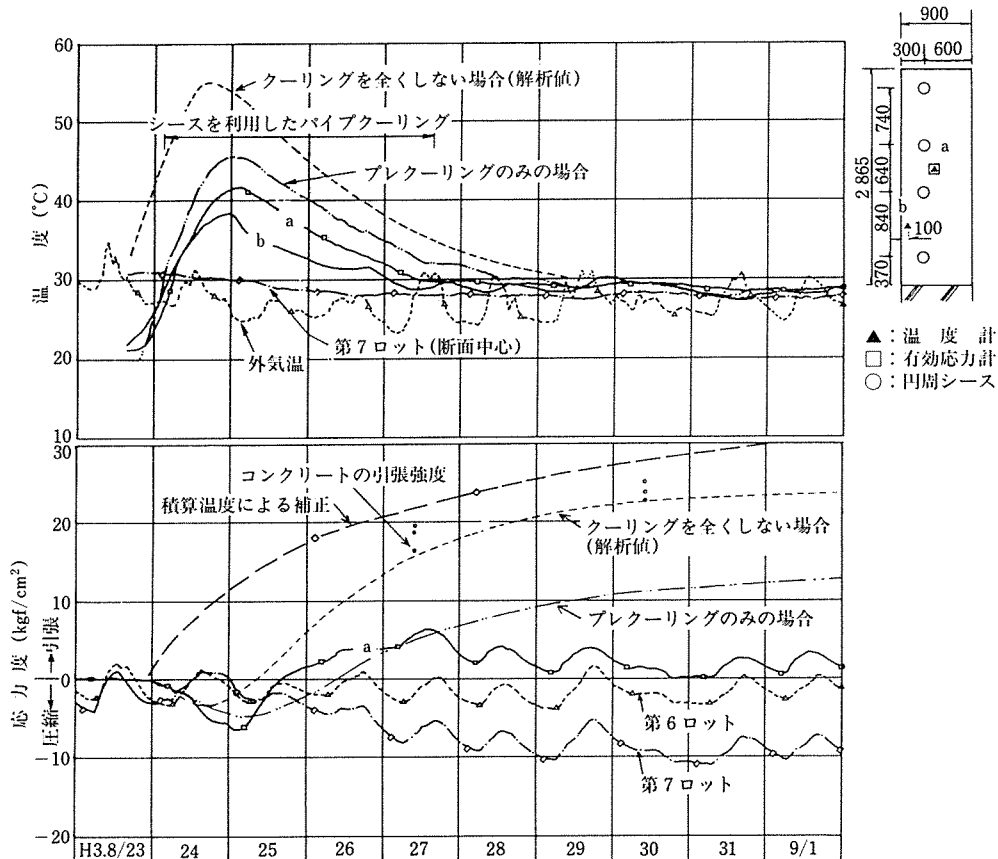


図-22 PC防液堤躯体の温度・コンクリート応力度管理グラフ (第8ロット, 平成3年8月23日打設)

で、屋根上げ前に実施する。STEP 4は構造系全体にプレストレス導入するもので、鉛直方向テンドンの緊張後に引き続いて行う。

現在はSTEP 3までのプレストレスングを完了し、機械工事終了後にSTEP 4を行うべく準備中である。

7. あとがき

PC LNG 貯槽は昭和 50 年代初めから調査・研究に取り組み、ここに報告した数多くの実験と技術開発を進め、姫路製造所における PC 製防液堤の設計施工を経て、今回ここに報告した泉北製造所における 14 万 kl の建設に至ったものである。この PC LNG タンクの開発・設計段階から建設まで終始ご指導頂きました横浜国立大学柴田碧教授、東京大学岡村甫教授、東京大学秋山宏教授に深甚の謝意を表します。

エネルギー供給に占める液化天然ガスの役割が重要性を増すなかで、保安レベルが高く、経済性と土地利用効率に優れた PC LNG タンクが、今後、広く活用されることを期待したい。

参 考 文 献

- 1) 頼 千元, 浅井邦茂, 杉尾栄行, 宇梶賢一: LNG 地上式タンクのプレストレスコンクリートの防液堤の建設, 土木学会論文集, 第 361 号 VI-3, 1985.9
- 2) 頼 千元, 北村八朗, 宇梶賢一: 液化ガス貯蔵用 PC 容器の材料および部材の低温特性に関する研究, 土木学会論文集, 第 396 号, V-9, 1988.8
- 3) 中島一夫, 西崎丈能: 液化天然ガスの PC 貯槽の開発, 土木学会誌, 1990. 10
- 4) T. Sagishima, N. Ishikura, K. Asai, H. Kitamura, D. Okai: Development of Prestressed Concrete Containment Structure under Extremely Low Temperature, Proc. of LNG-9, 1989.9
- 5) 岡村 甫, 前川宏一, 浅井邦茂, 北村八朗, 芳賀孝成, 黒坂敏正, 長谷川宏, 鎌田文男: 低温液化ガス用コンクリート部材の貯液特性に関する研究 (その 1, その 2), 土木学会年次学術講演会, 第 45 回, 1990.9

【1992 年 5 月 20 日受付】

◀刊行物案内▶

最 新 PC 橋 架 設 工 法

体 裁 : B 5 判 147 頁

頒布価格 : 3 000 円 (送料 : 350 円)

内 容 : PC 橋架設工法総論 <桁橋> 張出し工法概論/ディビダーク工法/FCC—PC 鋼より線を用いた片持ち張出し工法/P & Z 工法/架設桁を用いた場所打ち張出し工法/フリー・ワイズ・ワーゲン工法/逆片持ち架設工法/幅員が大きく変化する PC 橋の片持ち梁架設工法/プレキャストブロックキャンチレバー工法/押し出し工法概論/TL 押し出し工法/SSY 式押し出し工法/RS 工法/移動支保工架設工法概論/ゲリューストワーゲン工法/OKK 式大型移動支保工/FPS 式移動支保工/ストラバーク方式可動支保工/プレキャスト桁架設工法概論/固定支保工式架設工法概論 <アーチ橋> アーチ橋架設工法概論/ピロン・メラン張出し工法/トラス張出し工法/トラス・メラン併用工法/ロアリング式架設工法/CLCA 工法 (剛性アーチ巻立て工法) <斜張橋> 斜張橋架設工法概論/SLT 工法/ジャンピングステージ工法 (主塔施工用移動足場工法)/スウェーフト工法/埋込み桁を用いたキャンチレバー架設工法/主塔用クライミングフォーム工法/FRP 斜材外套管の架設工法/斜張ケーブルの被覆工法/複数集合斜材の架設・緊張工法/ π フレーム工法 <吊床版橋> 吊床版橋架設工法概論/吊床版懸垂架設工法/吊床版架設工法/吊床版橋のスライド式架設工法/吊床版橋の架設工法 <その他の橋梁> バイプレ工法/プレビーム工法/PC トラスの架設工法/PC 方杖ラーメン橋片持ち架設工法