

LNG 地上タンクのプレストレストコンクリート防液堤の建設

CONSTRUCTION OF PRESTRESSED CONCRETE DIKES FOR LNG ABOVE-GROUND TANKS

頼 千元*・浅井邦茂**・杉尾栄行***・宇梶賢一****

By Chimoto RAI, Kunishige ASAI, Hideyuki SUGIO and Kenichi UKAJI

The dike, a structure used to establish an impounding area, plays important roles for the safety of LNG storage refrigerated to -162°C , which structure should function even if extreme loading conditions arise. The three large post tensioned cylindrical concrete dike have been built for 80 000 kl LNG tanks at Himeji, Japan. Each dike has the dimension of 91 m in diameter with 14 m in effective storage depth. The post tensioned concrete dike is advantageous on structural strength, liquid tightness and economical construction of cryogenic structure in a highly seismic region. The paper covers the overall aspects of design and construction of the dikes.

はじめに

LNG はクリーンなエネルギーとして、その需要は増大しつつあり、わが国のエネルギー総需要の約7%をまかなう現状にある。LNG 依存率を都市ガスに限って言えば約55%、発電用エネルギーでは14%という、経済的、社会的に重要な役割を担っている。LNG (Liquefied Natural Gas) は大気圧下で -162°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あり、体積は約600分の1に縮小され、液比重は0.45~0.5である。わが国へのLNG輸入は、アラスカ、ブルネイ、アブダビ、インドネシア、マレーシアから導入されており、将来はオーストラリア、カナダなどの導入計画がある。

主要なエネルギー源であるLNGを長期にわたって安定して利用するには、LNG基地施設、とりわけLNG貯蔵施設の信頼性が注目されている。貯蔵施設は(地上式の場合)、金属二重殻平底円筒タンク、防液堤、および付属設備(配管、消防火設備など)から構成されている。タンクはLNGを低温で保持する保冷タンクになっており、低

温用鋼(9%ニッケル鋼またはアルミニウム合金)で作られた密閉自立型の内槽と、約90~100cmの保冷材を挟んで普通鋼で作られた外槽との二重構造である。この鋼製タンクは、耐震性をとくに考慮した鋼管杭基礎で支持されており、地盤の凍結防止のため基礎スラブは高床式としている。

防液堤は、万一のLNGの漏洩に際して、その影響を局限化する目的で設けるもので、タンク容量の全量を貯留する容積が要求される。したがって、防液堤は極低温のLNGを確実に保持する機能を発揮しなければならない。

本論文は、防液堤の耐力壁にプレストレストコンクリート構造を使用した建設に関するもので、どうして、どのようにこの新しい試みに取り組んだかを述べるものである。

1. PC 防液堤の採用

(1) 姫路製造所における防液堤建設

大阪ガス(株)は泉北製造所第一、第二工場に続いて、昭和56年に第三のLNG基地として姫路製造所の建設に着手し、昭和59年3月より稼働を開始した(写真1)。ここにLNGタンク(容量80000kl)を11基建設し、年間200万tfのLNGを受入れる計画である。これまでにLNGタンク2基が完成しており、5基が建設中である。

これらのうち最近着手した3基の防液堤は、従来の鉄

* 正会員 工修 大阪ガス(株) 技術部部長補佐
(〒541/大阪市東区平野町5-1)

** 正会員 工修 大阪ガス(株) 姫路製造所建設チーム課長
(〒672/姫路市白浜妻鹿地先)

*** 正会員 (株)大林組 大阪ガス姫路工事事務所所長
(〒672/姫路市白浜妻鹿地先)

**** 正会員 工博 (株)大林組 土木本部設計部設計課長
(〒101/東京都千代田区神田司町2-3)

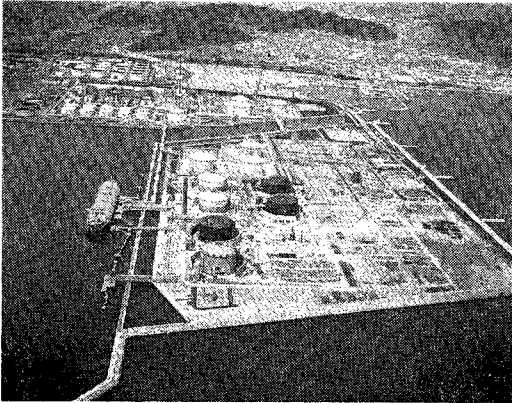


写真-1 大阪ガス(株)姫路製造所(手前3基にPC防液堤を採用した。1985年4月撮影)

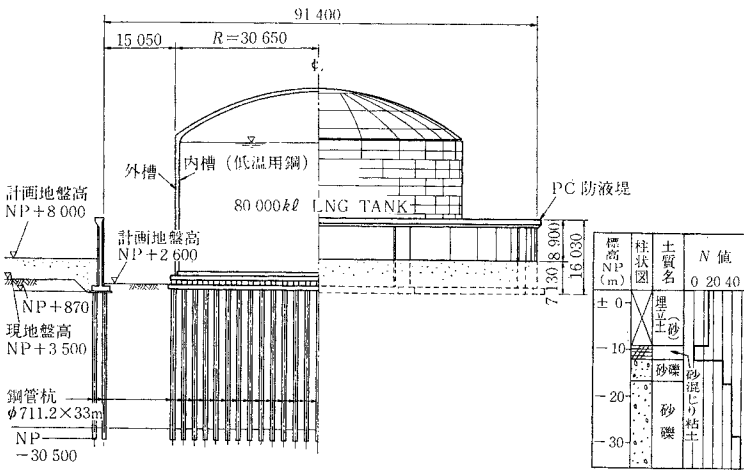


図-1 PC 防液堤と LNG タンク

筋コンクリート (RC) 構造とは異なり、プレストレストコンクリート (PC) 構造を採用している。これは、経済性と耐震性および将来の高防液堤、または PC タンクへの発展性に着目したことによる。

PC 防液堤 (図-1) は、直径約 91 m、堤高 14 m の規模をもち、PC 円筒構造物としては最大級のものであり、また LNG 貯蔵施設に PC 構造を採用するものが国で初めてである。

(2) PC 防液堤構造の特徴

円筒シェル構造の PC 防液堤は、漏液時に働く液圧荷重を、円環方向の軸方向力で抵抗する。したがって、擁壁形式の RC 防液堤はすべての荷重を鉛直曲げと鉛直せん断力で基礎に伝達する“鉛直方向の曲げ部材として断面設計する”のに対して、PC 防液堤では“水平の円環方向に軸引張力を受ける部材として断面設計する”もので、構造設計の考え方は基本的に異なる。

PC 防液堤の構造上の長所は、次のようである。

① 液荷重は PC 防液堤のフープテンションと釣合うため、基礎への水平荷重の伝達は少ない。

② 地震時に杭基礎に作用する荷重は、PC 円筒構造全体で荷重に抵抗するため、水平、鉛直方向ともに小さい。

③ 液荷重を受けた漏液時の PC 防液堤は、プレストレス導入による圧縮力と引張力が釣合うため、構造的には最も安定した状態にある (防災施設の機能上の目的に適している)。

計画上注意を必要とする事項は、次のようである。

① 大型円筒構造物のため、不等沈下に対する配慮を必要とする。

② 伸縮目地のない一体構造としなければならないため、コンクリートのひびわれに対する配慮を必要とする。

③ プレストレス導入による軸圧縮力に対し、常時の安定性 (座屈安定など) を確保するように、構造詳細を考えなければならない。

(3) コスト比較

試設計に基づく建設費について、建設コストと堤高の関係を指数化したものを図-2 に示す。

防液堤の建設コストは、14 m 以上になると PC 防液堤が経済的に有利な結果となっている。さらに詳細な設計に基づく工事費では、やや PC 防液堤の方が工事費低減につながるとの結論を得たため、PC 防液堤の採用に踏み切った。

(4) PC 防液堤建設において特に配慮した事項

金属二重殻タンクの内槽は、-162°C の低温で十分に

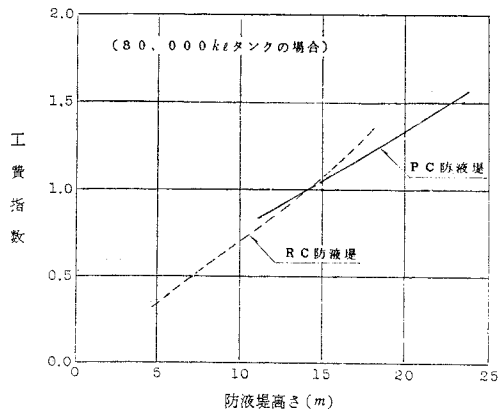


図-2 構造形式による防液堤のコスト比較

靱性を持つ材料を使用して厳しい品質管理のもとに製作されているため、漏液を生じる可能性はほとんどないと考えられる。しかしながら、貯蔵施設の安全性を確立するため、防液堤の機能条件として最も厳しい状況を想定する。

漏液時の想定としては、急速な LNG 液位の上昇と、それに続く躯体温度の変化を想定して、この状態で確実にその機能を発揮するよう防液堤を計画する。防液堤の構造仕様は、このような過酷な荷重状態で十分に安全であることを満足する要件として、通常の PC 構造に要求される事項のほかに、次の 2 点を考える。

① PC 構造とそれを構成する材料の低温特性の確認

② 施工における高品質化

これらの 2 項目および設計の考え方について以下に述べる。

2. PC 構造の低温特性の確認

PC 防液堤の構造は、冷熱抵抗部、冷熱緩和部（断熱材）および PC 耐力壁から構成されている。このため PC 耐力壁の低温条件は厳しくなく、常温構造物として構造設計上は対応可能と考えられる。しかし、タンクからの万一の漏液に際し、極低温の LNG を貯液する PC 耐力壁の機能を考えると、それを構成する材料とそれらを組合

表一 PC 構造の低温特性の確認試験

対象とする材料・構造	目的	試験項目	既往データの有無		確認試験実施項目
			常温	低温	
コンクリート	強度特性	圧縮強度、引張強度、曲げ強度、付着強度、衝撃強度	○	○	×
	変形特性	ヤング係数、ポアソン比、クリープ、乾燥収縮、線膨張係数	○	○	×
	熱特性・耐久性	熱伝導率・比熱、耐 LNG 性、透水性	○	○	×
鉄筋	強度特性	引張強度、降伏強度、衝撃強度	○	○	×
	変形特性	ヤング係数、伸び・絞り、線膨張係数	○	○	×
PC 鋼材	強度特性	引張強度、降伏強度、衝撃強度	○	○	○
	変形特性	ヤング係数、伸び・絞り、レラクセーション、線膨張係数	○	○	○
PC 定着具	定着具の強度特性	引張強度、硬度、シャルピー衝撃値	△	△	○
PC システム	PC システムの強度変形特性	引張強度、降伏強度、ヤング係数、伸び、定着具の変状観察	○	×	○
	冷熱衝撃特性	冷熱衝撃試験	○	×	○
PC 部材	衝撃荷重に対する構造特性	静的荷重に対する強度・変形特性、衝撃的荷重に対する強度・変形特性	△	×	○
	温度荷重に対する構造特性	温度ひびわれの発生、断面剛性、液蓄性能	△	×	○



写真-2 PC 防液堤の近景

せた PC システムや PC 部材について、その低温特性を確認しておくことが望ましい。これはまた将来の低温 PC 構造物への展開のための貴重なデータとなる。

こうした位置づけのなかで、今回の PC 防液堤の建設に当ってはこれらの低温特性に関する既往データの調査を行い、確認すべき項目を整理し、必要と考えられる項目について確認試験を実施中である（表一）。これらの結果から、より低温健全性の高い材料、PC システムの採用を目指している。これらの試験結果およびその対応についてはその詳細がまとまった段階で報告していく。

PC テンドンと定着具からなる PC システムの特性については、設計強度を満足しかつ十分な耐力を有することを確認するため、PC システム引張試験を行い、高い定着効率と優れた伸び特性を有することを目的とした定着具の改良を実施している。これは低温下においても、その特性が確保されるシステムであることも条件としている。PC 部材の低温特性については衝撃荷重作用による構造特性、冷熱荷重作用による温度応力の発生状況等を確認するための試験を実施中である。

3. 設計の合理化

(1) 防液堤構造の選定

(a) 形状寸法

基地全体の計画を考慮して、防液堤の高さを 14m、防液堤内径を 91.4m に設定した（写真-2）。なお、防液堤の外周を約 5m の高さに盛土したのは、土地の有効利用と防災活動の容易さを配慮したためである。

(b) 壁厚

表—2 PC 防液堤の荷重条件と断面設計

荷重状態	プレストレス導入直後	通常運転時		漏液時	照査用荷重時	
		定常	地震時 (外押し) (内押し)		(外押し)	(内押し)
荷重モデル						
主要荷重	<ul style="list-style-type: none"> 躯体自重 導入直後のプレストレス力 	<ul style="list-style-type: none"> 躯体自重 有効プレストレス力 常時土圧, 土重量 乾燥収縮 	<ul style="list-style-type: none"> 躯体自重 有効プレストレス力 土重量 乾燥収縮 躯体慣性力, 地震時土圧 または 地震時応答変位(外押し, 内押し) 	<ul style="list-style-type: none"> 躯体自重 有効プレストレス力 常時土圧, 土重量 乾燥収縮 漏液時液荷重 温度荷重 	<ul style="list-style-type: none"> 躯体自重 有効プレストレス力 土重量 乾燥収縮 漏液時液荷重 動液圧 躯体慣性力, 地震時土圧 または 地震時応答変位(外押し, 内押し) 	<ul style="list-style-type: none"> 躯体自重 有効プレストレス力 土重量 乾燥収縮 漏液時液荷重 温度荷重
断面設計	II 種	I 種	II 種		III 種	III 種
備考			設計修正震度: 壁体部 $\begin{cases} K_{MH}=0.480 \\ K_{MV}=0.240 \end{cases}$ 基礎部 $\begin{cases} K_{MH}=0.240 \\ K_{MV}=0.120 \end{cases}$		設計修正震度: 壁体部 $\begin{cases} K_{MH}=0.240 \\ K_{MV}=0.120 \end{cases}$ 基礎部 $\begin{cases} K_{MH}=0.120 \\ K_{MV}=0.060 \end{cases}$	

選定した耐力壁厚は, 次の点を考慮して余裕のある 70 cm を採用している。

- ① 直径が大きいため全体の円周方向の曲げ剛性を高める。
- ② 鋼材の腐食の影響を考慮してかぶりを十分とる。
- ③ テンドンのほか, 鉄筋などの補強鋼材もかなりのものとなるので, コンクリートの充填性の向上をはかる。

(c) 基礎スラブの構造

基礎スラブと壁部との接合方式は, スライド, ヒンジ, 剛結の 3 方式を比較のうえ, 次の理由で剛結を選定した。

- ① 接合部の液密性は確実である。
- ② 防液堤全体の剛性を高め, 耐震性および終局耐力の向上がはかれる。
- ③ 基礎スラブに接合した壁部への円周方向プレストレス導入効率低下することに対しては, 基礎スラブにもプレストレスを導入して壁へのプレストレス導入を補強すること, などで対応できる。

基礎スラブ幅を決定するうえで考慮したことは, 杭列数, 杭と基礎スラブを一体とした横方向剛性, 温度応力への幅の影響, の 3 点であった。漏液時, 照査用荷重時の応力・変形を照査して, ある程度余裕のある構造を目途に, 杭 2 列, 幅 8.3 m (杭を納める最小寸法) に決定した。

(d) 耐力壁頂部の補強

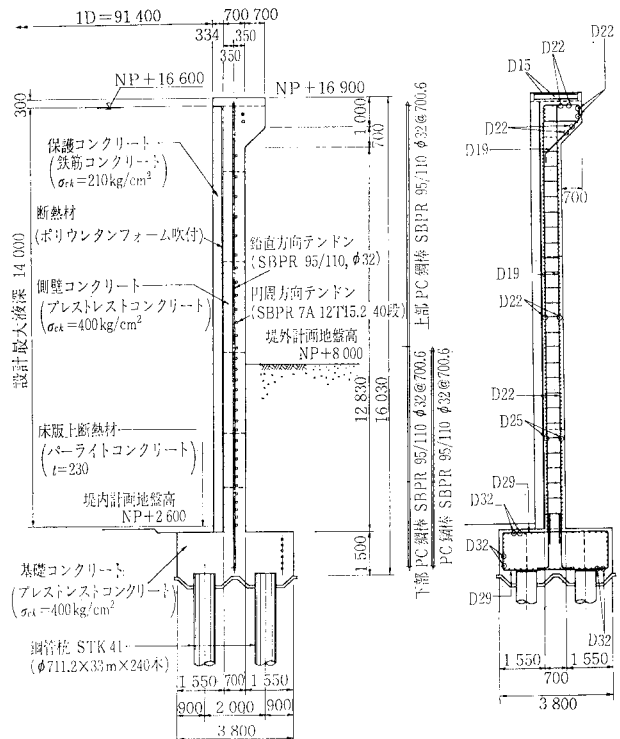
水平荷重や, 水平変位に対する耐荷力 (座屈安定を含む) を大きくするため, 耐力壁頂部を円環ばり (140 cm) で補強した。したがって, 耐力壁は上下端を頂部リングと基礎スラブとで補強された円筒

シェル構造である。

円周方向の鉄筋継手部はスパイラル筋で補強して, 曲げ変形性能の良い部材とした。

(e) テンドン容量

プレストレス導入量は, 漏液時に液圧を受けた状態で平均して 10 kg/cm² 程度の圧縮応力度を確保できるように設定した。これは液密性の向上を目的として決定したものである。



図—3 PC 防液堤の PC 鋼材と鉄筋配置

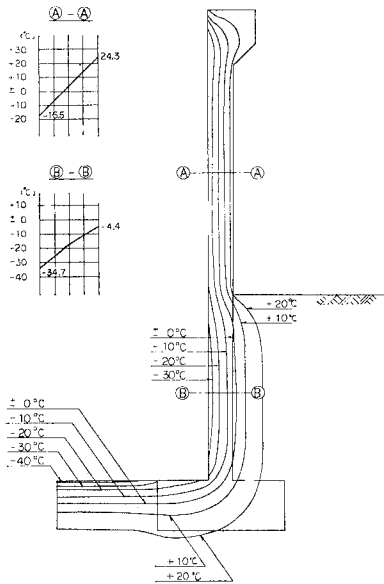


図-4 PC 防液堤の設計温度分布

大容量テンドンを使用することによる経済性に加えて、テンドンの本数を減らしコンクリートの充填を良くするため、12T15.2 (B種の場合の破断強度 319.2tf) を使用した。

(f) シース内処理

シース内はモルタルグラウトで充填し、PC 鋼材とコンクリート構造の間に付着効果のあるボンド方式を採用した。PC 鋼材の腐食を防ぐためにグラウトの配合と注入方法の改善を実施し、確実な充填を行ったことは後述のとおりである。

(2) 荷重条件と断面設計

(a) 荷重条件

防液堤の経験する荷重状態をプレストレス導入直後、通常運転時、漏液時に分類して、それぞれの状態をさらに細分して設計用、照査用荷重条件とする。構造部材の断面設計の方法は、荷重条件と構造挙動あるいは要求機能の関係から、PC 構造の種別をⅠ、Ⅱ、Ⅲ種のいずれを採用するか決定した。荷重条件と断面設計法は表-2に示すとおりである。構造図を図-3に、温度分布を図-4に示す。

(b) 通常運転時

長期的荷重のみが作用している定常時と地震を加えた地震時とについて、前者を引張応力を発生させないⅠ種構造で設計し、後者はひびわれを発生しない限度の引張応力 ($\sigma_{ck}=400 \text{ kg/cm}^2 \approx 25 \text{ kg/cm}^2$ 以下) を許すⅡ種構造とした。地震荷重の評価は、慣性力に基づく修正震度法を主とし、地盤の変位を考えた応答変位法を従とする設計とした。

(c) 漏液時

漏液直後に防液堤内が満液になる場合を想定する。長期荷重と液圧を受け温度分布が時間とともに変化する漏液時と、液圧と地震を受ける漏液地震時を想定する。地震は余震を考えている。

断面設計は漏液時直後をⅠ種、漏液時定常をⅢ種、照査用荷重時をⅢ種の設計とした。

4. 高品質化のための改善

(1) コンクリートの収縮ひびわれの低減

PC 防液堤の高品質化を目標に PC 鋼材、鉄筋コンクリート、施工方法の面で多くの改善を行った。その主なものを表-3に示す。これらのうち主な項目について以下に述べる。

(a) 低減の目的と対策

防液堤の周長は約 290 m あり、円筒シェル構造の特性から、そこに伸縮目地を設けることはできない。従来の経験では、類似構造物で約 12 m を超えるスパンでは温度ひびわれを生じる危険が出てくる。したがって、290 m の連続壁でひびわれの発生を防止する試みは、ひとつの挑戦である。

ひびわれの発生は、①液密性の信頼性、②鉄筋、PC 鋼材の腐食の可能性、③美観、などに影響を及ぼす。

コンクリートの収縮ひびわれを低減するため、防液堤のコンクリート打設のリフトスケジュールに合わせて、図-5に示す対策を行った。水と熱を低減する効果のあるものはすべてのリフトに適用し、拘束ひびわれを低減する効果を持つ対策は、それぞれの拘束を考慮してリフトを選別のうえ適用している。

(b) 配合の改善

打設後の温度上昇をできるだけ押え、乾燥収縮の少な

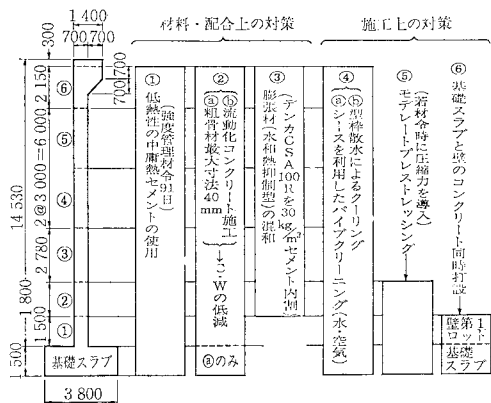


図-5 PC 防液堤コンクリートの収縮ひびわれ制御対策

表-3 PC 防液堤構造の高品質化のための改善対策

改善目標	目的	改善のための対策		
		PC 鋼材	コンクリート・鉄筋	施工方法
1. コンクリートの収縮ひびわれの低減	PC 耐力壁の耐力, 耐久性, 貯液機能の向上	・アンボンドケーブルによるモデルートプレストレッシング	・中庸熟セメントの使用 ・40 mm 粗骨材の使用 ・低スランブ (6.5 cm) 配合 ・流動化剤 (6.5→12.0 cm) の使用 ・水和熱抑制型膨張材の混和	・基礎スラブと壁立上りの一体打ち ・PC 用シースを利用した内部クーリング ・型枠散水を利用した外部クーリング ・コンクリート温度応力度の計画管理
2. コンクリートの品質向上	塩害やアルカリ反応による劣化を防止し, 耐久性を確保		・細骨材 (海砂) の塩化物含有量 0.04% 以下を徹底 ・強度で耐久的な粗骨材の選定 ・アルカリ反応性骨材を除外 ・鉄筋のコンクリートかぶりを確保	・生コンプラントへの立入り検査と練り混ぜ立会 ・生コンの現場到着時の塩化物含有量検査
3. PC シースの健全性	破損・変形の防止, 防錆, 止水性の確保	・板厚を 0.5 mm とする ・Z 27 相当の亜鉛メッキ ・シース継目に熱収縮チューブを現場施付		・シースを組立後, 通水により漏水試験を行い, 止水性確認 ・コンクリート打設中のビッグ通し試験を行い, ダクト形成を確認 ・長期放置期間中はダクト両端をグラウトキャップで密閉
4. PC グラウトの充填性	グラウトの充填を確実にし, プリージングによる空隙を生じないグラウト配合, 構造および注入方法を用いることにより, テンションの腐食を防止	・円周, 鉛直とも端部にグラウトキャップを取付けて加圧注入を容易化 ・鉛直シースの注入管 (下) とグラウト補給管 (上) をガス管とし溶接接続 ・鉛直支柱板にグラウト排出孔, 排出溝を切削加工してプリージング水を排出	・グラウトの改善 (1) プリージング率 2% 以下 (高性 能減水剤を使用, $W/C=34\sim 38\%$) (2) 流動性 30 分以上保持を目標 (3) 膨張継続時間を 1 時間目標	・鉛直シースのグラウトはプリージング水を良質グラウトで自動的に置換する方式により実施 ・練り混ぜたグラウトをできるだけ早く注入できる方法
5. PC 定着部のプレキャスト化	定着部コンクリートの品質をよくし, 据付精度をあげ, あわせて早期プレストレッシングを可能とする。		・コンクリートのリフトスケジュールに合わせて, プレキャストブロック製作し型枠と一緒に据付け, 後打ちコンクリートの型枠を不要とする形状にして省力化もねらう。	
6. 鉄筋・鋼材のプレファブ化	プレファブ化により組立精度の向上と施工を合理化する。	・円筒, 鉛直シースをブロック内に組み込む。 ・形状と精度保持のため形鋼によるメインブレイムを軸にしてシース等を支持。	・内外鉄筋とも一括してひとつのブロックに組み込む, 下ブロックと左右ブロックとの接合および据付精度はメインブレイムのジョイントで確保する。	
7. 円周鉄筋の継手部スバイラル補強	部材の重ね継手部のねばりを確保する。		・円周鉄筋の重ね継手部をスバイラル鉄筋で補強。	

表-4 PC 防液堤コンクリートの配合

区分	セメントの種類	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 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kgf/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	流動化剤
① 基礎スラブ	中庸熟	40	12±2.5	4.5±1	42.0	35.9	167	398	615	1132	—	Poz. No. 8 0.995	—
② 第1ロット	中庸熟	40	6.5±1.5 ↓ 12±2.5	4.5±1 ↓ 4.5±1	42.0	36.2	157	374	640	1155	—	Poz. No. 8 0.935	標準型
③ 第2~6ロット	中庸熟	40	6.5±1.5 ↓ 12±2.5	4.5±1 ↓ 4.5±1	$W/C+E=42.0$	36.0	157	344	605	1155	CSA10OR E=30	Poz. No. 8 0.935	標準型

いコンクリートを目指して, 次の方針で材料配合を設計した。

- ① 低発熱セメント (中庸熟) の使用
- ② 最大寸法 40 mm 粗骨材の使用→セメント量, 単位水量の低減
- ③ 低スランブ (6.5 cm) の使用→セメント量, 単位水量の低減, 打設時 12 cm に流動化
- ④ 膨張材の混和→水和熱抑制型膨張材による凝結後の膨張効果

コンクリートの配合は, 通常の試験練りと断熱条件における温度上昇試験を行い, 発熱特性と強度発現特性を

調べた。これに乾燥収縮, 耐久性などを加味し, 総合的に決定した (表-4)。

この配合を決定するとき, 施工チームから出された問題提起に, ① スランブ 12 cm の流動化コンクリートで充填できるか, ② 最大寸法 40 mm 粗骨材でポンプ圧送は可能か, ③ 均質, 密実なコンクリートができるか, などがあつた。こうした施工チームの疑問に対処するとともに打設方法の習熟を兼ねて, 防液堤と同じ断面寸法に鉄筋, 鋼材を配置した試験壁で, 試験打設を行った。

(c) シースを利用したクーリング

円周方向 PC シース (内径 80 mm) を利用した, パイプ

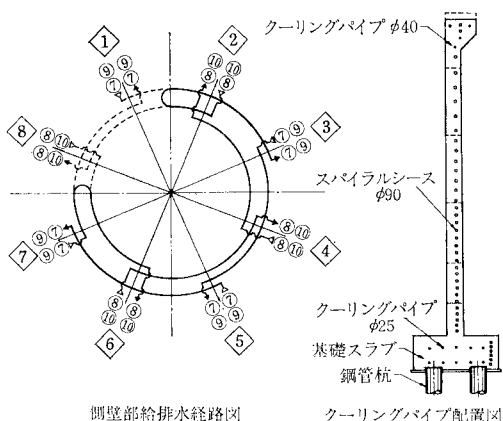


図-6 シースを利用した PC 防液堤コンクリートクーリングの概要

クーリングを行った。壁厚 70 cm の中に配置したシースは、ピッチの小さい壁下部（基礎スラブの拘束のため大きいひびわれを生じやすい）で約 25 cm、壁上部で約 60 cm である。相対的にシース配置が粗く、壁厚の大きい基礎スラブと頭部リングには、クーリング専用パイプを追加した。試験壁におけるクーリング効果の試験では予想以上の冷却効果を観測したため、主要なひびわれ低減対策のひとつとしてシースクーリングの採用に踏み切った。

パイプクーリングが一般に言われている以上の効果を示したのは、壁厚に対してシースの直径が大きく、収熱効果が優れていたためと推定される。

クーリング効果は、コンクリートの温度上昇初期にその効果が大きいことを試験の結果から確認した。このためクーリングの施工管理は次の方針で行うことにした。

- ① きめ細かい温度計測管理、② 通水開始までは通気（エアクーリング）および型枠散水との併用、③ 通水可能時期を把握するためのコンクリート凝結特性の確認。

クーリングパイプの給水および排水は図-6に示す系統図で実施した。型枠の外表面は霧状の散水を行い、外表面からの冷却を併用した。この型枠散水はともすれば現場での確実な実行を伴わない場合が多い。こうした弊害を取り除くため、簡単に確実に散水できる方法として、農業用散水ビニルホースを型枠にりめぐらせて、1ヶ所のバルブ張操作で散水できるようにした。

コンクリートの温度とコンクリート応力の計測値を第4リフトについて示す（図-7）。クーリング効果は、現場に同一寸法のモデル壁を作成して同時にコンクリートを打ち込み、温度履歴を比較することで判定した。図-7によるとコンクリートの打ち込み温度からの上昇は8℃に抑制されており、モデル壁との比較で15~20℃の低減効果

を確認した。

最終コンクリートを打設してからすでに1年を経過し、円周プレストレスを導入しない状態にあるにもかかわらず、目視によるひびわれ調査および発生応力度の計測結果（図-7および後述の図-8）からは、ひびわれの発生は認められない。こうした施工結果から見てパイプクーリングは、ひびわれ防止の効果的な対策のひとつであったと判断している。これには、本体構造として設置されているPCシースを活用して、経済的にクーリングできるという着想が発端になっている。

すでに約30年前（1954年）に、国鉄では初めてのポストテンションPC橋（30m）を信楽線第一戸川橋梁に架設し、コンクリートのひびわれ対策として、シースを利用した温度上昇の抑制を行った事実を記録している（土木学会論文集、第27号、1955年7月、仁杉 巖）。先覚者の研究熱意に敬意を表す次第である。

(d) 基礎スラブと壁の一体打ち

一体打ちの施工は、コールドジョイントの心配もなく良好な状態で施工できた。拘束ひびわれ防止の面では、壁部に比べてマッシュな基礎スラブの温度上昇は相対的に高くなり、このため温度降下期間の応力状態は、逆に壁が拘束側にまわるという理想的な状況が展開した（図-8）。絶対的な温度上昇量はパイプクーリングの効果により、低く押えることができた。

(e) モデレートプレストレスング

モデレートプレストレスングは、基礎スラブと壁1リフトに、約5 kgf/cm²の圧縮応力度の導入を目標として、埋設したアンボンドPC鋼線を緊張して若材令時に導入を行った。計測データから見る限り1日の外気温の変化の影響による応力度変化が激しく、導入前後の応力

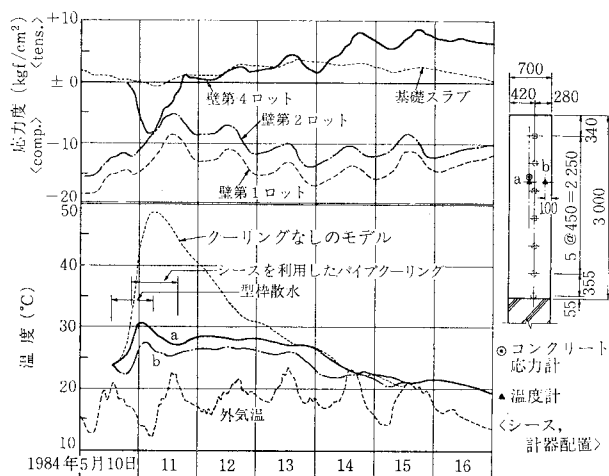


図-7 PC 防液堤コンクリートの温度と応力度の経時変化（壁第4ロット）

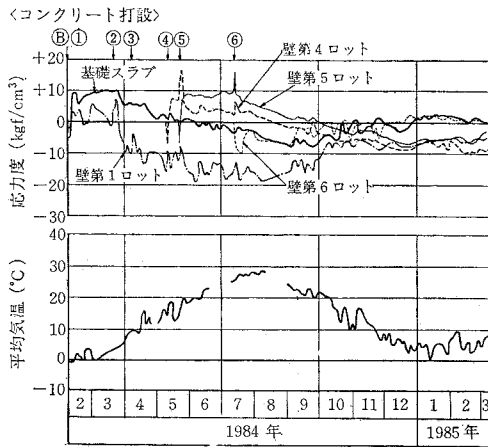


図-8 PC 防液堤コンクリート応力度の中へ長期変動

度の相対的な比較が困難であった。

(f) 発生応力度

発生応力度をみると (図-7), 温度降下が終了し, 引張応力度の上昇も止まった材令 5 日において 10 kgf/cm^2 を下回った。このときの材令のコンクリート引張強度は試験練りのデータから $20 \sim 25 \text{ kgf/cm}^2$ と推定されるため, ひびわれは十分な安全率をもって防止できたと考えられる。その他の打設リフトについても材令 5~7 日 (温度降下の終了時) において, 発生応力度は 10 kgf/cm^2 を下回った。

長期のコンクリート応力度の変動をみると (図-8), 外部拘束による影響がはっきり表われている。夏に向う気温が上昇する時期には圧縮側へ移行し, 冬に向かう気温が低下する時期には引張側へ移行している。

応力度の変動幅は, 材令の長期化とともに次第にある幅に収束する傾向にある。引張応力度の最大は 17 kgf/cm^2 に達したが, かなりの材令を経ているため, 強度は増進しており, ひびわれ発生に対しては十分安全であった。

(2) PC シースの健全性

(a) 改善の目的

円周方向シースはコンクリート打設したのちプレストレッシングを行うまで, 2年近い期間を放置するため, シースの防錆がきわめて重要な課題となった。錆を生じた場合, ① 耐力壁内の鋼材腐食の原因となること, ② プレストレッシング時の摩擦損失が大きく所定のプレストレス導入を果たせないこと, ③ グラウトとコンクリート面との間に確実な付着を期待できないこと, などが心配された。

PC シースの止水性の重要さは, ① コンクリート打設中にシース内にモルタル等が侵入しないように外圧に強いことが要求され, ② クーリングを早期に開始する

にはクーリング水のまだ固まらないコンクリート中への浸出を防ぐことが要求される。

このため, シースの防錆, シースの止水性およびダクト形成の確認を目標として改善を行った。

(b) シースの防錆

放置期間の長い円周方向シース ($\phi 80 \text{ mm} \times t 0.5 \text{ mm}$) については, 現地における曝露試験を行った。1.5年の試験期間で Z18 (JIS G 3302) の亜鉛メッキ付着量の供試体では局部的に発錆をみたため, より亜鉛メッキ付着量の多い Z27 相当を施したシースを使用することにした。シース両端の定着部にはキャップを被せて, シース空間を外気と遮断したうえ換気孔を設けた。

(c) 止水性の向上

シースジョイントの継目には, テープ巻きに代えて熱収縮チューブを現場焼付した。耐圧試験を行い漏水量を調べたところ, シース本体では 3 kgf/cm^2 , 継目では 0.2 kgf/cm^2 で漏水が始まることがわかった。通常のテープ継手の漏水を生じる圧力は, これらよりさらに小さい。

(d) ダクトの健全性確認

シースの組立て完了時には全シースに通水し, 漏水の有無をチェックし, 漏水部は修理のうえ再検査した。それでもコンクリート打設中に万一の破損によるモルタル侵入が心配されるため, コンクリート打設中および打設終了後ピグ通し検査を実施した。シース延長が長い場合パイプクーリングの開始時期とこの検査完了との時間調整に, 当初はかなりの困難を生じた。

シースへの通水開始は, コンクリート中への漏水を防止するため, コンクリートの凝結状態を確認して実施した。こうした背景からコンクリートの打設順序は, クーリングの給排水系統に基づいて計画した。

(3) PC グラウトの充填性

(a) 改善の目的

PC テンダンの腐食による耐久性の劣化の多くは, シース内に十分にグラウトが充填されていないことに起因するといわれている。こうした問題を改善するには, グラウト材料は充填性にすぐれ, ブリージングや沈下収縮のごく少ないものを使用することが不可欠と考え, グラウトの配合と鉛直テンダンのグラウト方法について改善を行った。

(b) グラウト配合

グラウトの配合と管理基準は, 表-5, 6 に示すとおりである。高性能減水剤を使用して水セメント比を $34 \sim 38\%$ まで低減し, 30分程度までの長時間にわたって流動性のよい, しかもブリージングの少ないグラウトを用いている (図-9, 10, 11)。

(c) グラウト注入口と排出部

グラウトの注入・排出部は、確実なグラウトを行うためとくに重要なものである。こうした考えから円周方向シースは両定着部にグラウトキャップを被せて定着部を包み、所要の圧力で注入できる構造とした。

鉛直方向シースの注入部はガス管を用い、鋼管シースに溶接接合した。排出部はグラウトキャップを頂部に設け、グラウト補給用ガス管を定着板から 15 cm 下方に取付けた (図-12)。鉛直鋼棒のグラウトが充填しにく

表-5 PC 防液堤の PC グラウト配合表

セメントの種類	水セメント比	高性能減水剤 (添加量)	膨張剤 (添加量)
普通セメント	W/C = 38%	ナフタレンスルホン酸 + 変性リグニン縮合物 (≦ C × 2.5%)	初期反応抑制処理アルミ粉末 (≦ C × 0.006%)

表-6 PC 防液堤の PC グラウト管理基準

流下時間 (JA ロート)	膨張率	ブリージング率	圧縮強度	グラウト温度
15~30 秒 (JA ロート)	7% (目標) ≦ 10%	最大値 ≦ 2%	$\sigma_{28} \geq 200 \text{ kgf/cm}^2$	$10^\circ\text{C} \leq T \leq 30^\circ\text{C}$

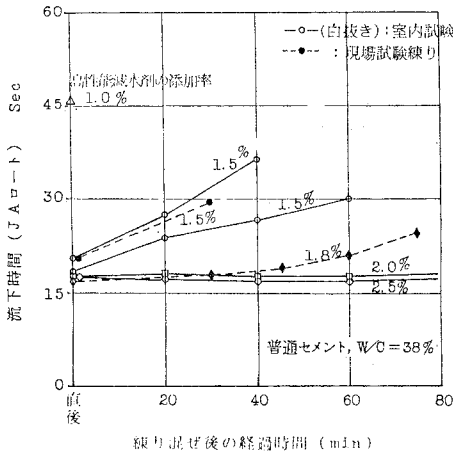


図-9 PC グラウトのコンシステンシーの経時変化

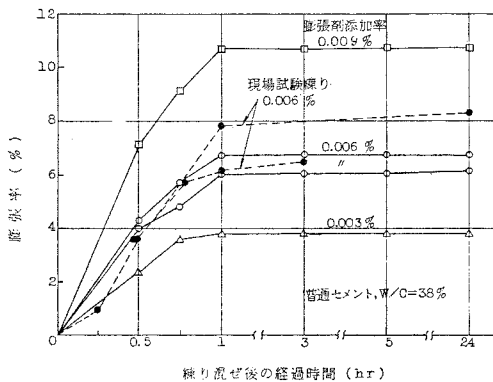


図-10 PC グラウトの膨張率の経時変化 (初期反応抑制処理アルミ粉末使用)

いと指摘される定着板直下の空気抜きのため、定着板グラウト排出孔と排出溝を切削加工している。

(d) 注入方法

ブリージングの影響の大きい鉛直テンドンの注入に採用した注入方法を述べる (図-12)。側壁天端から 1.5m 上方にグラウトの貯留容器 (6~8m 注入延長分の容積能力) を吊り下げ、その容器の底からグラウトキャップの頂部とグラウト補給管とに配管し連結する。シース下部からグラウトを注入し、貯留容器に所要高さまでグラウト面上昇したとき、注入を停止する。

シース内に生じるブリージング水はシース頂部に集まる。他方、比重差によってグラウト補給管からは貯留容器から良質なグラウトが流下して、ブリージング水を上へ押し上げる。この単純なメカニズムによって、貯留容器の底から下方は、ブリージングのないグラウトで常に満たされる。貯留容器の上部にはブリージング水が集められ、1本ごとのブリージングを確認できた。ブリージング率は 1.0% 以下で施工できた。

円周方向のシースについては実物模型を現地に作り、注入を行い、約 1m ごとに切断してその充填状況を確

(a) 定着部のプレキャスト化

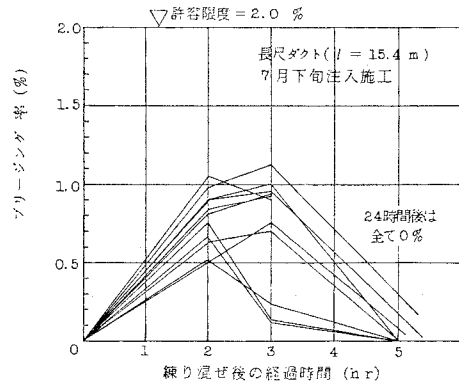


図-11 PC グラウトのブリージング率測定結果

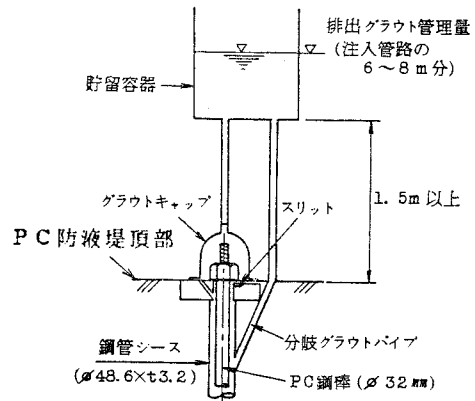


図-12 PC 防液堤の鉛直テンドングラウトの排出部の構造改善

認した。

(4) その他

円周テンダンの定着部はプレキャストコンクリートブロックをあらかじめ作成して、型枠建込みと同時に設置することにした。こうすることによる利点は、① 定着具背面のコンクリート品質は確実なものとなる、② 最大寸法 40 mm 粗骨材使用による充填不足の心配がなくなる、③ ひびわれ防止の早期プレストレッシングが可能になる、④ 据付精度が向上する、⑤ プレストレッシング後の後打ちコンクリート型枠を不要とするため美観がよい、などである。

(b) コンクリートの品質向上

施工では当然のこととして、コンクリートの耐久性を保証する目的で、海砂の塩化物含有量の厳守(砂の絶対重量比 0.04% 以下)、強硬で耐久的な粗骨材の選定、および反応性粗骨材の除外を重点項目として実施した。これら粗骨材の採取場調査をはじめ、コンクリート打設数日前から行う立入検査、および打設当日のプラント立会や抜取検査などは、生コンプラント側の全面的な協力をもって、はじめて実施できたものである。

(c) 精度の向上

出来上り構造寸法の真円度は、その規模からして、構造安定や偏心による局部的曲げ応力の発生などに無視できない影響がある。絶対位置の許容誤差を 2 cm と設定して、精度向上に多大な努力を払って施工を進めた。

壁部内面の位置の精度を円周上に 64 点、それを高さ方向に 6 断面で測定した結果は、真円からの位置のズレは最大で 15 mm、大部分は 5 mm 以内であった。PC テンション用のシース位置の精度もほぼ同様であった。

あとがき

欧米における低温液化ガスタンクへの PC 構造の応用

は、約 30 年前 (1952) から始まり、その液化ガスの種類は LNG (-162°C)、LPG (-45°C)、LN₂ (-196°C)、LO₂ (-183°C) と多様である。これらの建設実績と個々の研究報告とが示すように、PC 構造が低温液化ガス用の貯蔵構造として適したものであることは明らかである。他方、コンクリートおよび鉄筋コンクリートの低温下での強度特性については、わが国における LNG 地上タンク、地下タンクの建設に関連した研究によって十分明らかになっている。

しかし、低温 PC 構造物へ適用するには、PC システムや PC 部材の低温特性の確認方法や評価基準については確立したものはなく、また技術情報も限られている。したがって、現在実施中の PC 構造の低温特性確認試験の成果と、ここに記述した PC 防液堤の設計・施工技術を踏まえて、PC 構造の LNG 貯蔵施設へのより一層の展開を目指して行きたい。

最後に、PC 防液堤の開発、設計、施工の全般に携った感想を述べさせていただくと、建設過程の全般にわたって目標と対策を明確にし、地道な品質の確認の積み重ねによってのみ、はじめて信頼性の高い構造物が建設できる、という感慨である。

この PC 防液堤の実現は東京理科大学 樋口芳朗教授のご指導によるものであることを記し、深く謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 浅井邦茂：大阪ガス、「LNG 地上タンクの PC 製防液堤」を建設、土木学会誌、Vol. 69, No. 8, 口絵および pp. 86~89, 1984 年 8 月。
- 2) 浅井邦茂・隈野哲郎・宇梶賢一：PC 製 LNG 防液堤の設計と施工、土木学会第 39 回年次学術講演会概要集、Vol. 5, pp. 511~512, 1984 年。
- 3) 資源エネルギー庁：LNG 地上式貯槽指針、1981 年 12 月。

(1985.7.15・受付)

●ご案内●

論文集第 6 部門編集小委員会では、情報化施工、海外工事、施工システム、施工マネジメント、技術情報、先端技術、パブリックアクセプタンス (AP)、建設労務、契約・積算、建設諸法、などの土木技術や技術開発の論文を募集しております。

さらに、上述のほかにも、工事の企画から調査・設計を経ての積算・施工、あるいは検査・補修技術、品質・コスト・安全・工程などの管理手法や環境・公害対策など、また、新素材や機械に関するもの、そして業界的に発展する新技術開発とその商品化など一般のニーズに応える業績を幅広く募集しております。