

PCLNG貯槽建設工事の合理化研究と 実構造物への適用

西崎丈能¹・岡井大八²・近松竜一³・奥立 稔⁴・鎌田文男⁵

¹正会員 工博 大阪ガス株式会社 技術部 (〒541-0046 大阪市中央区平野町4-1-2)

²正会員 工修 大阪ガス株式会社 技術部 (〒541-0046 大阪市中央区平野町4-1-2)

³正会員 工修 (株)大林組 技術研究所 土木材料研究室 (〒204-8558 清瀬市下清戸4-640)

⁴正会員 大林組・鴻池組JV 大阪ガス姫路工事事務所 (〒672-8024 兵庫県姫路市白浜町灘浜1)

⁵正会員 (株)大林組 土木技術本部設計第二部 (〒108-8502 東京都港区港南2-15-2 品川インダ-ティB棟)

従来の金属二重殻構造のLNG地上式貯槽とPC製の防液堤を一体化したPCLNG貯槽は、これまでに8基の実績があり、地上式LNG貯槽の標準型式として定着しつつある。現在、大阪ガス姫路製造所に建設中のPCLNG貯槽では、これまでの経験、計測実績などに基づいて設計および施工の合理化研究を進め、自昇式足場・型枠工法と高強度自己充填コンクリートを組み合わせた急速化・省力化施工、情報技術を活用した品質管理など、新技術を積極的に採用している。ここではこれらの合理化研究の概要、実構造物に適用した結果について述べる。

Key Words : LNG, cryogenic, prestressed concrete container, self-compacting concrete, high-strength, mass concrete, shrinkage, cracking control, quality control, information technology

1. はじめに

わが国は、エネルギー資源の80%以上を海外に依存しており、経済成長とエネルギーの安定供給、環境保全というトリレンマの克服に対応するため「脱石油」を柱とするエネルギー源の多様化が進められている。

天然ガスを大気圧下で -162°C の極低温に冷却して液化したLNGは、クリーンで環境に優しいエネルギーとして都市ガスや発電用の需要が増大しており、わが国の一次エネルギーの12.3%(1998年度)を占める重要な基幹エネルギーと位置付けられている。このLNGを安定利用する上で、貯蔵施設には高い安全性と信頼性が求められる。そこで、大阪ガスでは、保安レベルが高く、経済的で敷地の利用効率の高い貯槽を目指し、二次容器にプレレストコンクリート構造を適用したPCLNG貯槽の開発を進め、実用化した¹⁾。

このPCLNG貯槽は、金属二重殻式貯槽とPC製の防液堤を一体化した新しいコンセプトで、EEMUA指針²⁾あるいは英国規格BS 7777³⁾の低温液化ガス貯槽型式の定義で最も高い安全性と信頼性を有する Full Containment Tank に相当する。万一、内槽からLNGが漏洩した場合にも流出範囲が局限化され保安レベルが高いこと、防液堤スペースが不要となり敷地の利用効率が低いこと、タンクと防液堤の基礎が共有でき外槽も

ライナ構造になることなど、合理的な構造型式である。

PCLNG貯槽の実用化1号機は、従来の7.5万 m^3 容量の貯槽と同じ敷地面積で14万 m^3 まで大容量化され、1990年に建設に着手された⁴⁾。引き続き同容量の2号機の建設が1993年に開始された。3号機は、内槽の9%ニッケル鋼板の厚板化とその溶接施工・検査技術の開発により容量を世界最大の18万 m^3 とされ、高強度の自己充填コンクリートを採用して1997年から2000年に建設された⁵⁾。これらは大阪の泉北製造所第二工場に建設され(写真-1)、順調に稼働し、供用後それぞれ8年、5年、1年を経過している。また、大阪ガスの他に4つのガス事業者(建設地点:鹿児島、佐世保、岡山、高松)にも採用され、8基の実績(うち、建設中3基)がある。容量は18万 m^3 から数千 m^3 まで幅広く適用され、地上式のLNG貯槽の標準型式として定着し普及しつつある。

1999年以降、ガスおよび電気事業に関する規制緩和が進んでエネルギー間競争が激しさを増し、タンク建設にはより一層のコストダウン、運転開始までのリードタイムの短縮が求められている。そのような中で、姫路製造所に建設中のPCLNG貯槽では、既往の実績に基づいて設計および施工の合理化研究を進め、高強度・自己充填コンクリートと自昇式足場・型枠工法を組み合わせた省力化・急速化施工、情報技術を活用した品質管理など、新技術の採用を積極的に行っている。ここではこれら

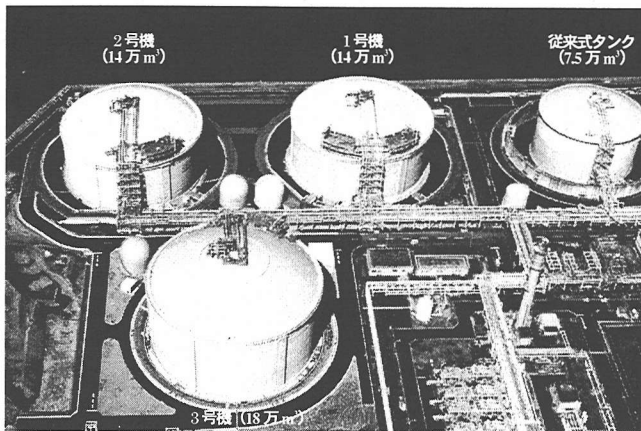


写真-1 PCLNG貯槽1~3号機(泉北製造所)

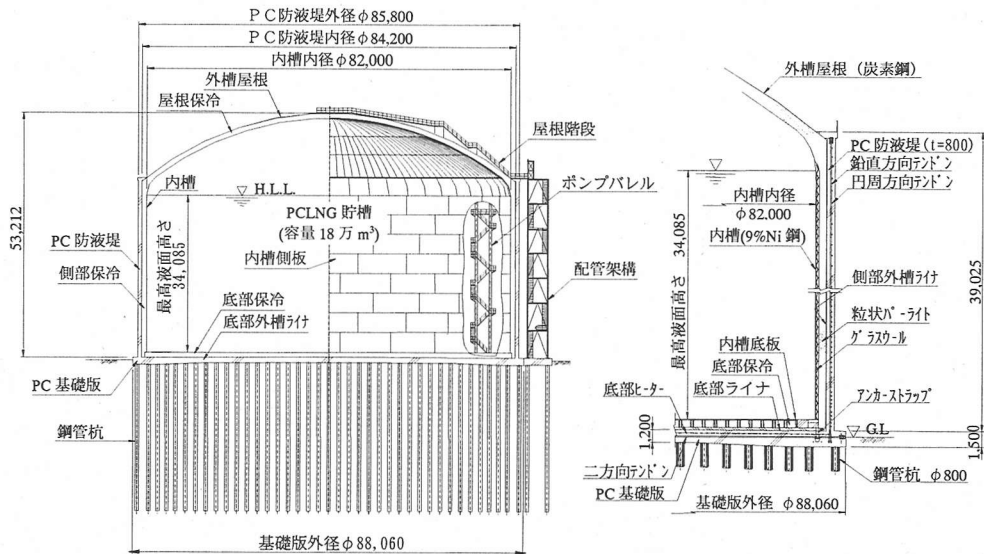


図-1 大阪ガス姫路製造所に建設中のPCLNG貯槽4号機の構造

理化研究の概要と実構造物への適用結果について述べる。

2. 最新のPCLNG貯槽建設工事の概要

姫路製造所に建設中のPCLNG貯槽(4号機)は、3号機と同容量の18万 m^3 で、2000年に着工し2003年に完成予定である⁶⁾。その構造の概要を図-1に示す。

(1) 防液堤構築の急速化施工

既設の3号機までの防液堤の構築には、大型クレーンを用いて足場と型枠のそれぞれを上昇させるジャンプ

フォーム工法を採用してきた。3号機では(2)で述べるように自己充填コンクリートの長を活かして打設リフトを従来の約1.5倍、4.4mまで大きくし、約4ヶ月の工程短縮を実現した。それをなお一層短縮するために、過去に拘ることなく根本に立ち戻って検討を行うこととした。

従来は型枠を取り外して地上に降ろし、せき板表面を清掃した後に剥離材を塗布していた。それは型枠の盛替えごとに繰り返される。足場についても大型ブロック化して数量を減らしているとはいえ内・外の両側で相当数となり、個々に上方に盛替えしていくにはそれ相当の時間を要することになる。作業時間を分析してみると、これらの足場と型枠の盛り換えに要する時間は、全体の作業

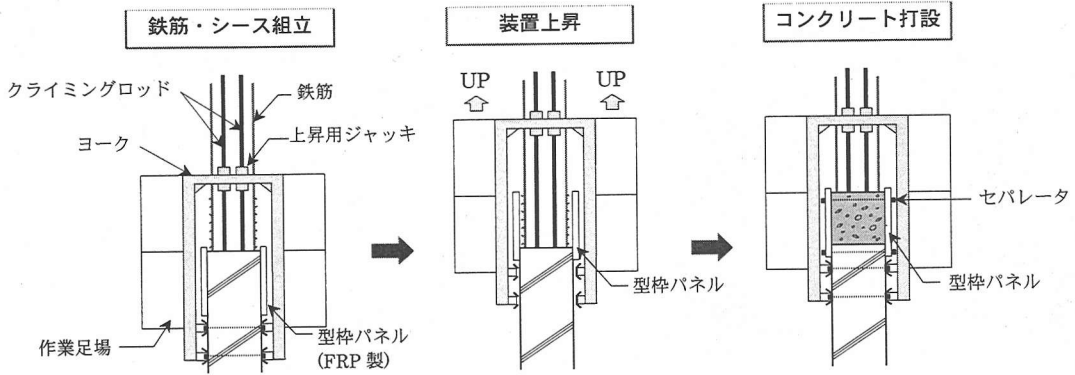


図-2 自昇式足場・型枠工法による防水堤構築手順

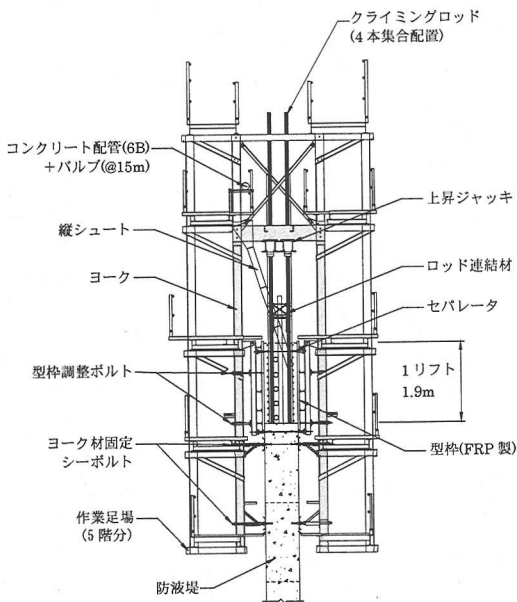


図-3 自昇式足場・型枠装置断面図

表-1 防水堤構築の施工サイクル (標準リフト)

工種	日数	1	2	3	4	5	6
コンクリート打設		450m ³					
PC tendon用がけ外形成		内側					
鉄筋組立			外側				補強材取付
クライミングロッド組立			総戻し		上昇		
装置上昇・調整, 他				型枠調整・固定			

サイクルの約50%を占めていることが明らかになった。

サイロや煙突、橋脚などの急速化施工技術としてスリップフォーム工法があり、これを適用できれば大幅な工期短縮が可能となる。しかし、型枠を揺動させながら連続的に上昇させることによる表面部の仕上がりや品質、構造体コンクリートの温度ひび割れや長期の耐久性への影響、ライナ取付用埋込み金物の取付精度の確保、などが施工上の課題となる。

そこで、型枠はある期間存置させ、これをスリップフォーム工法のように足場もろとも上昇させる施工法(図-2)を考案した。いわば2つの工法の長所を生かし短所を補うように組み合わせた技術で、それが実用化できれば従来に比べて工程の大幅な短縮が見込めることになる。実用化のキーポイントは、特別な処置なしで繰り返し使用できるせき板材料、上昇装置の構造と施工性、および型枠存置期間(早期脱枠)の影響の3つであった。

a) せき板の繰返し使用

数種類のせき板候補材の中で、繊維補強プラスチック(FRP)材は繰返し使用の回数が増えても表面の劣化度が低く、剥離剤なしでも十分転用できることが確認された。ただし、繰返し回数の増加に伴い、せき板表面への付着物が徐々に増える傾向が認められたので、補助手段として鉄筋のかぶり部分の狭い空間でせき板の洗浄ができる装置を開発した。

なお、FRP製のせき板は、半透明であるため照明がなくても型枠内が明るく、コンクリートの充填状況の確認が容易になるという付加的効果も認められた。

b) 上昇装置の構造

クライミングロッドは、上昇作業時に足場と型枠の全重量を負担する部材であり、座屈や横荷重による曲げに対して十分な安全性を確保する必要がある。型枠や足場の高さを高くすればロッドの負担は増加し、それを単にロッドの断面諸元を大きくすることで対応しようとする

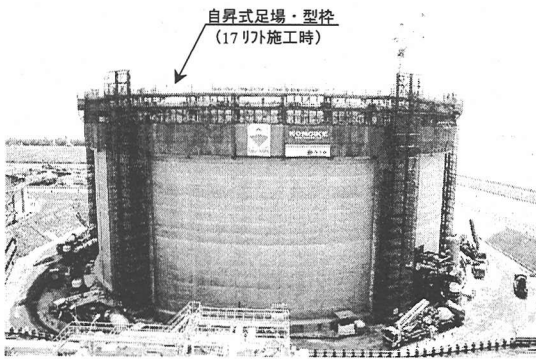


写真-2 PCLNG貯槽4号機 (01.5撮影)

と、コンクリートの断面欠損が大きくなり、コストの増大も招く。また、上昇用の門形フレーム部材（ヨーク）についても、スリップフォーム工法では通常1.5～2m程度の間隔で配置されるが、ヨーク配置間隔が狭いと鉄筋やシースなどの組立てに継手箇所が多くなり、作業の効率・速度の低下や数量の増加を来す。これらに対する対策として、クライミングロッド4本を集合配置し、ヨークの配置間隔を約7.5m（10°）まで広げるとともに、4本のロッドを相互に連結して剛性と耐力の向上を図ることとした。

c) 自昇式足場・型枠を用いた防液堤の構築

工事に用いた足場は、鉛直方向の鋼材の組立作業性等を考慮して5階建て構造（図-3）とした。1回の打設リフト高さは、型枠の転回回数と製作コストの関係、フォームタイの取り付け作業性などを勘案して1.9mを採用し、これによりリフト総数は20となった（写真-2）。

防液堤1リフトの構築要領は次のようになる（表-1）。

- ①コンクリート打設後に次リフトの円周・鉛直シースを接続する。この円周・鉛直シースは、前リフト上昇時に定規用の仮設フレーム内に組み込んだ状態で予め建込んでおく。
- ②並行して、内側および外側の鉄筋の組立、クライミングロッドの継ぎ足しを行う。
- ③上昇の準備作業として、ヨークを防液堤に固定しているボルトを外し、型枠をコンクリートから剥離させて20mmほど離し、足場・型枠の全てがクライミングロッドのみに支持された状態とする。
- ④上昇は、型枠と足場を一緒にして全周一斉で行う。上昇用ジャッキのストロークは40mmで、1リフト分1.9mの上昇に要した時間は2.5～3時間であった。
- ⑤上昇作業が終了したらヨークを防液堤にボルト固定する。型枠の鉛直度、内径等の精度を確保する微調整を行って固定した後、上昇した高さ分のコンクリート配管の継ぎ足しを行って、次リフトのコンクリ

ート打設に備える。

防液堤の構築は、1サイクルが実働6日、休日を挟んで週1回のペースで行った。同容量の3号機では防液堤の施工を1リフト4.4mとし、1リフト当たり約1ヶ月のペースで全10リフトの構築に11ヶ月を要した。これに対して4号機では7ヶ月で終了し、4ヶ月工期を短縮した。工事期間が短くなることや大型クレーンが不要になること等の効果により、防液堤の構築コストは結果として約2割削減できた。

自昇式足場・型枠を上昇させるに当たっては、防液堤全周にわたって平面を保持するよう、全てのヨークを同時かつ同様に上昇させる必要がある。そこでコンピュータと各種センサを用いてヨークの垂直精度・高さ・ねじれを常時・集中計測し、その結果をもとに調整管理を行った。その結果、防液堤の構築精度は約1/2100となり、管理目標（1/1700）以内に十分収めることができた。

d) 型枠の存置期間

標準の施工サイクルにおいて、型枠の存置期間を次リフトの鋼材の組立などに要する最小の時間とすれば、作業が手待ち状態にならない。それは計画上、最短で3日となった。当該工事には低発熱セメントを用いた高強度コンクリートという特殊な材料・配合を採用するため、型枠存置期間がコンクリートの品質に及ぼす影響について実験的検討を行った。

実際に模擬した壁モデル（冬期で72時間後に脱枠）から採取したコアでは強度の低下は少なく、91日以降の長期材齢においても強度の増進が認められた。また、早期に脱枠して直射日光や風にさらされる条件とした場合の耐久性への影響について各種の促進試験を実施した結果、コンクリートの水分の逸散を防止した養生を72時間以上行えば、70mmのかぶりを持つ鋼材が50年経過した時点においても中性化や塩化物イオンの浸透による腐食劣化を引き起こす可能性は低い、という予測結果が得られた。ただし、これは脱枠後に20℃、60～80%RHで気中養生した供試体での結果であり、実施工では環境条件がさらに厳しくなることも想定される。

コンクリート構造物の耐久性を確保するために1号機から実施してきた土木学会指針⁷⁾に基づく耐久設計での耐久指数の値としてみても、養生期間の短縮に伴う減少分（約10ポイント）を他の評価項目で補うことは困難、あるいは大幅なコストアップとなる。そこで、脱枠後もコンクリート表面からの水分の逸散を防止できる養生対策を検討し、構造物の表面に粘着剤付きのフィルムを貼付する養生工法を開発し、実工事に適用した⁸⁾。

(2) 高強度・自己充填コンクリートの適用

PCLNG貯槽の1,2号機では工事用開口部の閉塞

表-2 高強度・自己充填コンクリートの配合条件と示方配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	設計基準強度 (N/mm ²)	U型充填高さ ^{a)} (mm)	自己充填性ランク	スランブフロー (mm)	○漏斗流下時間 (sec)	空気量 (%)	塩化物イオン量 (kg/m ³)
20	60	≥300	2 ^{b)}	600~700	10~15	4.5	≤0.25

水結合	水粉体	空気量	単位粗骨材	単位量 (kg/m ³)						SPA	
材比 (%)	容積比 (%)	(%)	絶対容積 (m ³ /m ³)	P						(P×%)	
				W	C	EX	LS	S	G	BP	
32.1	92.9	4.5	0.300	170	515	15	50	770	786	0.5	1.2

注 *a) 障害条件; D13×3本

*b) 最小鋼材あき 60~200mm程度の条件で自己充填性を有する性能 (土木学会 高流動コンクリート施工指針)

凡例

C: 低熱ポルトランドセメント

EX: 膨張材 (CSA系),

LS: 石灰石微粉末

S: 海砂, G: 砕石 2005

BP: 増粘剤 (β-グルカン系),

SPA: 高性能A/E減水剤 (ポリカルボン酸系)

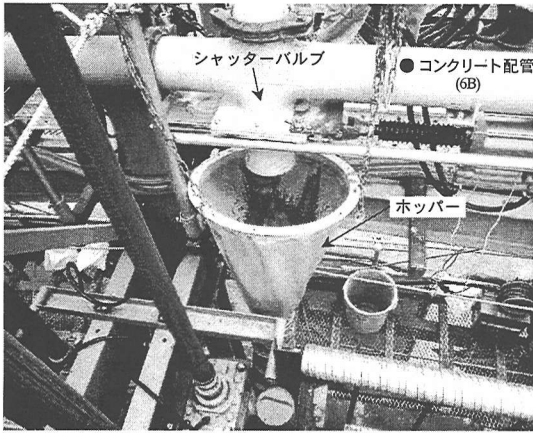


写真-3 コンクリート打設状況

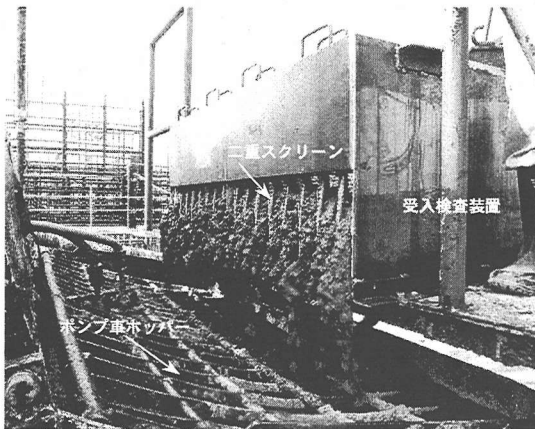


写真-4 SCCの全量受入れ検査状況

に自己充填コンクリート(SCC)を適用した^{9),10)}。3号機では防液堤の躯体1.2万m³の全てにSCCを採用した。締固め不要の効果だけではコストアップとなるが、配合上で必要な粉体量の全量をセメントとして高強度化し、コンクリートの設計強度を従来の1.5倍の60 N/mm²まで高めることにより、部材断面の縮小による材料コストの縮減が図れ、同時に基礎の負担軽減により基礎工事費も

低減できる。また、締固めが不要であれば1回の打設高さに制限が無くなることに着目し、型枠・支保工の制作費と転用効率の兼ね合いで仮設費が最小となる打設高さ4.4m (=従来の約1.5倍)を採用することにより工程を約4ヶ月短縮し、それに伴い仮設資機材費の縮減効果も得た。このようにして14万m³から18万m³に大容量化したときの建設コストの増加と工期の長期化を抑止した^{11),12)}。

4号機の防液堤にも同様に高強度SCCを採用し、使用骨材の違いに対応しての配合を調整した。また、構築方法に対応して打設方法も変更した¹³⁾。

a) コンクリートの材料・配合

高強度SCCの配合条件および示方配合を表-2に示す。セメントは発熱が低く自己収縮の小さい高ピーライト系の低熱ポルトランドセメント(C₂S量63%)を用い、硬化過程の収縮を補償する目的でCSA系の膨張材を15 kg/m³混和した配合¹⁴⁾とした。なお、細骨材に用いる海砂の粒度をはじめとした材料の品質や骨材の表面水率の変動によるSCCの品質のバラツキを抑制するため、増粘剤を併用した。混和剤は、ポリカルボン酸系の高性能A/E減水剤を採用し、練上りから打込みまで所要の流動性が保持されるように温度条件に応じて高性能A/E減水剤のタイプを選定し、使用量を調整した。

b) 高強度SCCの打設管理

防液堤躯体のSCCの打設は1回当たり約450m³で、全周約270mを均等に打ち上げることを前提に、計画打設速度を150m³/hrと設定した。SCCを製造する生コン工場に関しては、製造設備、現場までの運搬時間、品質管理状況等から5社の生コン工場を選定し、実機ミキサでの試し練りにより練混ぜの方法、時間などを設定した。

SCCの高さ最大40mへのポンプ圧送に関しては、数値解析技術¹¹⁾によるシミュレーションを行い、必要ポンプ車台数(6台)および圧送配管を径6B、足場上の水平配管長を40mと定めた。型枠内を流動させることによる材料分離の影響を抑制するために、流動距離は10m程度以内に抑えることとし、上部水平配管に15m間隔でシャッターバルブを設けた。コンクリートは、バルブ先端からホッパーと縦シュートを配して粗骨材の分離や余分な空気の巻き込みを防止すると共に、円周方向テンドン用

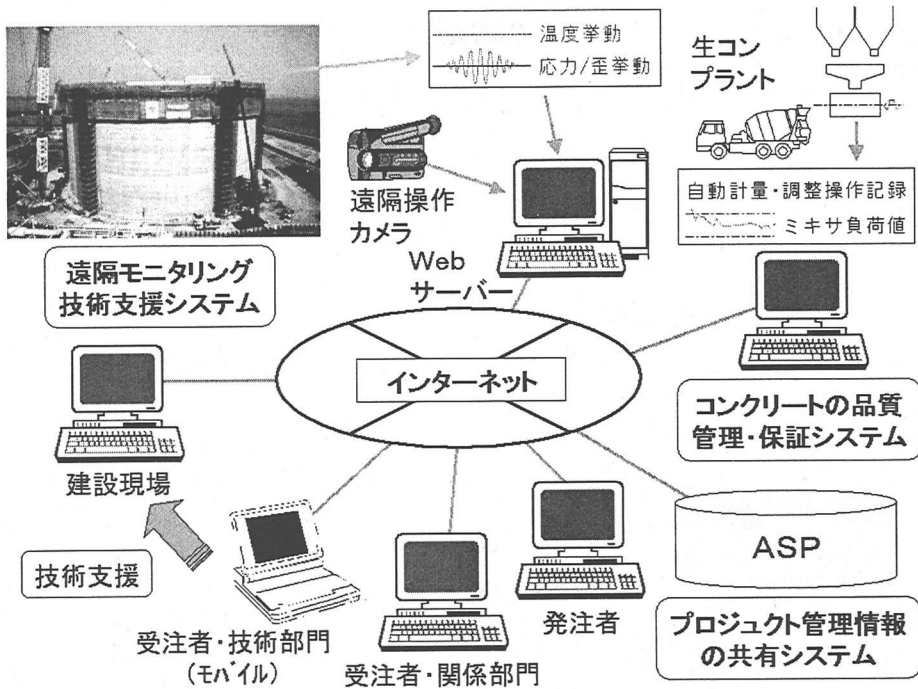


図-4 パーチャルオフィス概念図

のスパイラルシースにSCCが直接当たって損傷させることの無いようにした(写真-3)。SCCは概ね1/20程度の流動勾配で型枠内を充填して行くが、そのままでは打設天端付近に数十cmの高低差が生じることになる。これをコンクリート上部に揺動を与えたり横移動、小運搬などによって均すことは大変な作業であるため、中間に3.75m間隔で手動開閉式のバルブを配置した。打ち込みは、生コン車1台4.5m³毎にバルブ位置を切替える方法で行い、打足し時間が30分程度以内となるようにした。

打設中は総合司令室において6台全てのポンプ車の圧送状況とポンプ車のホッパー手前に設置した障害物通過性判定装置(写真-4)をモニタ画面で常時監視し、品質の最終確認と打設速度の集中管理を行った。

打設は、朝から開始してほぼ午前中に終了した。SCCはノンブリーディングであるため天端露出面にプラスチック収縮ひび割れを生じやすいので、打込み後の初期養生に膜養生剤を用いた。水平打継ぎ面の処理として打設当日の夕方から夜半にかけてワイヤブラシを用いて表面を削った後、天端に5cmの湛水を行った。

3. 情報技術を活用した高強度SCCの品質管理

4号機の建設工事では、発注者と受注者が共同で情報

技術(IT)の活用による建設現場の改革を狙い、インターネットを介して多くの工事関係者が仮想(バーチャル)オフィスという新しい組織形態(図-4)の中で、現場情報を統合的に一元管理して共有化・活用する情報化施工に取り組んだ¹⁵⁾。その結果、業務レベルの向上、省力化、品質確保と生産性向上、更にはコスト縮減に効果を上げた^{16),17)}。実施した情報化項目は、次の4つに大別される。

- ①ASP(Application Service Provider)の活用によるプロジェクト管理情報の共有
- ②現場の映像と各種計測データの遠隔モニタリング・技術支援システム
- ③コンクリートの品質管理・保証システム
- ④4次元CADによる施工技術支援システム

ここでは、SCCの品質管理を対象に開発したシステムの概要と実工事への適用結果を以下に述べる。

(1) 管理システムの開発

3号機の建設工事では、練混ぜ終了時のミキサ負荷電流値を指標とし、この値と細骨材表面水率の設定値を計量印字記録とともに荷卸し時に確認した。またポンプ車のホッパー手前に障害物通過性判定装置(写真-4)を配置し、SCCの自己充填性を全量検査した。これによりSCCの品質管理は実用上問題なく行えるようになり、

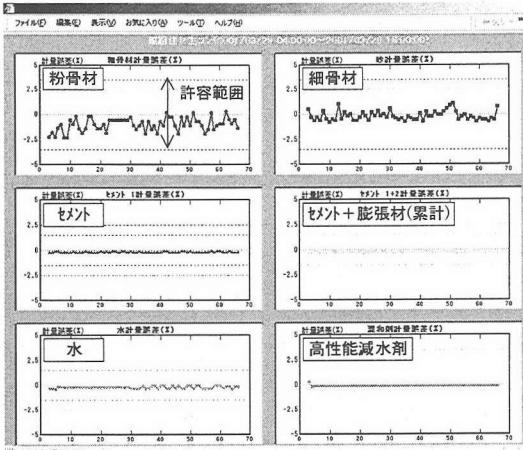


図-5 コンクリート材料の計量誤差（履歴表示）

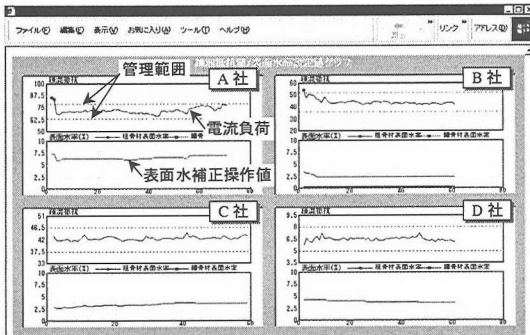


図-6 練混ぜミキサの電流負荷と骨材の表面水補正

防液堤コンクリート 1.2 万 m^3 を 10 回に分けて打設した¹⁸⁾。ただし、この方法では、製造データの記録を生コン車と一緒に伝達し、電子情報に変換していたため、トラブル等への対応に遅れが生じ、製造側と打設現場間で情報が錯綜することもあった。

最新の IT を活用すれば、空間の制約がなく情報をリアルタイムで共有できる。そこで、3号機の工事において実施したデータ伝達、品質管理情報への変換、共有を人手を介さないでインターネット上で瞬時にできるようにした。これにより打設現場の品質管理者や発注者側の検査担当者、更には遠隔地のエキスパート等が共有・監視することが可能になった。

具体的には、各生コン製造プラントにおける全ての練混ぜバッチの製造データ（材料計量値、練混ぜ終了直前の電流負荷値、骨材表面水率の補正操作値および練混ぜ時刻等）を図-5、図-6 のような履歴グラフに変換した。これらの SCC 製造情報に加えて、ウェブカメラにより打設現場の全量試験装置を通過する状況の映像を入手・確認することで、SCC の専門家は遠隔地からでも的確な技術指導・支援を行うことができるようになる¹⁹⁾、20)。

(2) 実工事への適用と効果の評価

SCC の製造管理で最も気を遣うのは、円滑に製造を開始し、その後安定した品質を維持することである。このシステムを活かして、最初の製造バッチは意図的に骨材の表面水補正を過大に見積り・調整操作を行なってミキサ負荷の大きめの SCC を練混ぜ、次の 2 バッチ目では逆に過少に調整操作をしてミキサ負荷の変動幅を確認すれば、3 バッチ目は容易にミキサ負荷値を管理幅の中央に調整することができる。それ以降は、履歴グラフで変動傾向を把握・確認しながら調整操作を行うことにより安定した品質を維持するのはそれほどむずかしいことではない。なお、1、2 バッチ目のミキサ負荷値が仮に管理範囲を外れても、両者を加えて平均化させることで管理範囲内のものとなる管で、品質を確認した上で出荷すれば不良品として処分することなく、資源の有効利用にも繋がる。

開発システムを 4 号機の建設に適用し、総計 9,300 m^3 の防液堤躯体を 20 回に分けて打設した。従来、SCC を採用した工事では十分な知識・経験を有する専門技術者が生コンプラントあるいは打設現場において直接監督・指示を行っていたが、当該工事では第 1 回目の打設に確認のために立会ったほかは、打設当日に現場に不在であっても支障は全くなかった。

このシステムは、製造・打設したコンクリート全量に対して品質の証しを提示するという、従来の抜き取り検査ではできない本質的な管理を可能にする。これは、単にフレッシュ状態のコンクリートのみならず、硬化後の品質の検査と保証を同時に行ったことになり、コンクリート構造物の信頼性向上にも大きく寄与すると考えられる。このようにコンクリートの製造管理情報を公開することが普及すれば、責任の所在が明確な品質管理・保証が実施されることになり、また、蓄積・加工して構造物の維持管理に役立てることも可能と考える。

4. 運用実績・計測実績の反映による建設の合理化

新しい PCLNG 貯槽の実用化を目指して 1987～1988 年に技術開発を実施した際、コンクリート構造の設計法として前年(1986 年)に土木学会・コンクリート標準示方書に取り入れられたばかりの限界状態設計法を採用することとした。限界状態設計法を積極的に導入した背景には、PCLNG 貯槽がこれまでとは異なる新しい構造型式で、その要求性能を従来の許容応力度設計法では定量的に照査することができないこと、過去に実績のない PCLNG 貯槽であっても合理的な設計を行うことが可能で、かつ技術の進歩を容易に取り組みすることができる

表-3 LNG貯蔵用PC容器の建設に使用したセメント

構造物名称 (建設年)		セメントの種類 (C kg/m ³)	水和熱(cal/g)			鉱物組成(%)			
			7日	28日	91日	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
一般構造物 (比較)		N	76.8	90.3	95.8	55	20	9	9
PC 防液堤 (1983~1988)	1号機	M (344+30)	63.2	76.3		46		5	
	3号機	M (374)	59.4	71.6		42		5	
PCLNG タンク (1980~2003)	1号機	LHB (363)	47.2	54.3	63.5	—	—	—	—
	2号機	M (380)	57.1	72.6	81.2	36	42	4	12
	3, 4号機	LC (515+15)	40.0	52.6	64.5	19	63	3	9
規格 (JIS R 5201)		M	≤70	≤83		≤50		≤8	
		LC	≤60	≤70		≤35	≥40	≤6	

M: 中庸熱ポルトランドセメント

LHB: 低熱高炉セメントB種 (低熱クリンカー+高炉スラグ微粉末)

LC: 低熱ポルトランドセメント

ことなどを配慮したことによる²¹⁾。LNGを貯留する容器としての機能を発揮するためのコンクリート部材の限界状態を設定するために、確認実験および数値シミュレーション^{22), 23), 24)}を実施して漏液時の限界状態(貯液限界状態)を定め、限界状態設計法によるPCLNG貯槽の設計技術を確立した。

実用化したPCLNG貯槽を実施に移すに当たり、施工段階から完成して稼働を開始した後も、部材に生じるひずみ、応力、温度等を継続して計測し、その挙動から構造物の安全性および施工管理の妥当性を確認することとした。計測は、それぞれの貯槽について同様の測定内容とし、期間は建設のスタート時点から運転開始1年後まで約4年間を自動で継続的に行ってきた²⁵⁾。これらの建設・運用実績、計測実績を分析・評価し、得られた最新の技術知見はその都度、設計あるいは施工に反映してきた。その主要な幾つかを以下に示す。

(1) 収縮ひび割れ制御管理への反映

PCLNG貯槽の防液堤は半無限長さの壁状構造物であり、高強度の富配合コンクリートを使用するために、大型のタンクでは側壁断面がマッシブとなって温度ひび割れの発生する可能性が高くなる。壁状構造物ではセメントの水和熱による初期温度ひび割れや収縮、中～長期的な温度変化などに起因した収縮ひび割れは、部材断面を貫通することが多く、一旦発生したものは後からプレストレスを導入しても閉じることはできず乾燥などの影響により時間の経過と共にその幅が増大する傾向があり、構造物の機能に対する信頼性、部材の耐力や耐久性、美観などに有害な影響を及ぼす。そのため、PCLNG貯槽の開発・実用化には温度ひび割れを確実に防止できる技術の確立が必須であった。

a) コンクリートの低発熱化・低収縮化

マスコンクリートの初期温度ひび割れは、水和熱によって上昇した温度が降下していく過程で内部・外部の拘

束を受けて引張応力が発生し、それが引張強度を超えることにより生じるのであり、大元の原因であるコンクリートの発熱を抑制できればひび割れの防止が可能になる。そこで、材料・配合面での温度低減対策を徹底的に追求した。

単位水量、単位セメント量の削減を図るため、流動化コンクリート施工はPC防液堤1号機(1983年)から、また、高性能AE減水剤はPCLNG貯槽1号機(1990年)から採用した。

円筒シェル構造のコンクリート容器は、橋梁などのコンクリート構造物と比べると強度を必要とする材齢を比較的長く採ることが可能である。その構造特性を活かして、強度管理材齢を通常の28日から91日まで長期化し、セメントの低発熱化を指向した。その方向は現在に至るまで変わっていない。これまでに建設したLNG貯蔵用PC容器とそれに用いたセメントを表-3に示す。

PC構造物には現在でも早強ポルトランドセメントが多く用いられているが、1983年着工のPC防液堤1号機の工事から中庸熱ポルトランドセメントを採用し、1985年のPC防液堤3号機の工事では発熱特性を現行の低熱ポルトランドセメントの規格レベルに近づけている。

その後、1980年代後半に本州四国連絡橋などの大規模構造物を対象としたセメントの低熱化に関する開発・実用化が積極的に進められた。その成果を取込み、1990年に着工したPCLNG貯槽の実用化1号機では高ピーライト系低熱ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末を混合した低熱高炉B種を採用した^{4), 26)}。高炉スラグ微粉末の混合は、セメントの低熱化のほかに塩害などによるコンクリートの早期劣化の抑止効果も期待したことによる。

この低熱高炉B種セメントは、表-3の発熱特性に見るようにコンクリートの温度上昇の大幅抑制を可能にした。工事においてはパイプクーリングなどの対策を組合せることによりピークから安定温度までの温度降下量を概ね10℃以下に制御できた。温度上昇量をそこまで抑制しよ

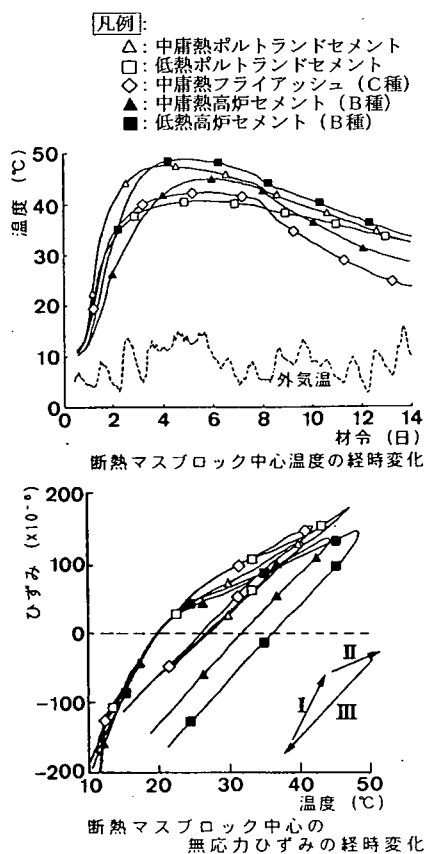


図-7 早期材齢におけるコンクリートの収縮挙動
 — 無応力ひずみと併設温度計の履歴特性

うとした狙いは、後述する残留応力制御を目指したことによる。しかし、温度上昇量が低い割りに収縮挙動による引張応力の発生が大きいく(図-10(a)参照), 並行して研究を進めていた仮設の工事開口部の逆打ち用自己充填コンクリートにおいても、早期～中期における収縮の補償に苦慮していた²⁷⁾。

この原因を解明するために現場において複数の低熱セメントを用いたコンクリートの比較実験を実施した²⁸⁾。得られた典型的なデータを図-7に示す。これは断熱マスブロック中心部に埋設した無応力計による測定ひずみと併設した温度計の変化を示している。コンクリートの硬化が進行する比較的初期の温度が上昇していく過程(図中のⅡの段階)での温度上昇に伴う膨張ひずみの発生割合は小さい。これに対して、温度降下の過程(図中のⅢの段階)では、ひずみ-温度関係の勾配が使用した材料・配合でのコンクリートの熱膨張係数値($8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)に近付いている。ただし、時間が経過して温度が十分に低下した時点でも高炉スラグを混合したものは混合しないものに比べて勾配がやや急である。従来、これらの体積

変化は若材齢時における熱膨張係数の時間依存性として取り扱われていたが、上述のⅡやⅢの過程におけるひずみ挙動が結合材の種類で異なることから、これは熱膨張係数に他の要因、即ち硬化の進展に伴う体積収縮の影響が加わったものと考えられる。低熱あるいは中庸熱などのポルトランドセメント単体のものに比べて高炉スラグを混合したセメントでは硬化初期に収縮の発生が大きく、しかもかなり長期にわたり継続することになる。一連の試験から、高炉スラグ微粉末によるコンクリートの収縮の増加は、粉末度やスラグ混合割合、水結合材比などによっても異なることも確認された²⁹⁾。

これらの調査結果から、高性能減水剤を採用してセメント含有量の多い低水セメント比の配合としたことにより硬化の進展に伴う体積変化(自己収縮)が顕在化し、更に高炉スラグ微粉末を混合することで特に収縮が大きく現れたことが明らかになった。また、早期材齢のひび割れ防止のためにはコンクリートの発熱だけでなく収縮の特性も配慮して使用材料、特にセメントの選定を行うことが肝要であることが分かり、引き続いて建設を行った2号機(工期1993～1996年)では、低熱化した中庸熱ポルトランドセメント(現行のJIS規格では低熱ポルトランドセメントの範疇に入る)を採用した。その後に建設した3号機(1997～2000年)、および現在建設中の4号機(2000～2003年)においては、高強度SCCを採用して一層セメント量が増加することに対応するためにピーライト量を63%程度まで高めた低熱ポルトランドセメントを採用している^{11), 12)}。

以上のように発熱特性、収縮特性に配慮して改善を進めたときに、実構造物の挙動にどの程度の差異として現れるかを図-8に示す。これは、1～4号機の防液堤のほぼ同じ高さに埋設した鉛直方向の鉄筋計で検出した応力をヤング係数で除した値(壁体内の内・外側の平均)で、1号機と2号機との差の主たる要因は高炉スラグ微粉末の混合である。それによる影響としては、約100μの収縮ひずみの増加が認められ、これをコンクリートの温度変化量に換算すると12℃相当となる。高強度SCCを採用した3、4号機では、結合材の単位量が2号機の1.4倍(530kg/m³)の低水セメント比配合であるにもかかわらず、収縮ひずみの大きさは下回る結果となっている。CSA系膨張材量は打設後の約1ヶ月の収縮補償を目指した15kg/m³程度であり、収縮ひずみの低減効果の大半は高ピーライト系の低熱ポルトランドセメントの材料特性によると考えられる。なお、図中のいずれの曲線にも季節変動に似た中期的なうねりが見られるが、これは鉄筋計とコンクリートの熱膨張係数の差によるものである。計測データをマクロ的に見ると、収縮ひずみの発生は、材料、配合により発熱や自己収縮の大きさに差異があっ

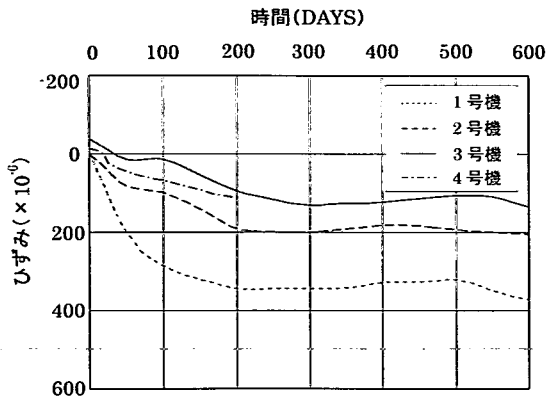


図-8 防液堤コンクリートの鉛直方向の収縮ひずみ
—— 鉄筋計による計測値 / Es

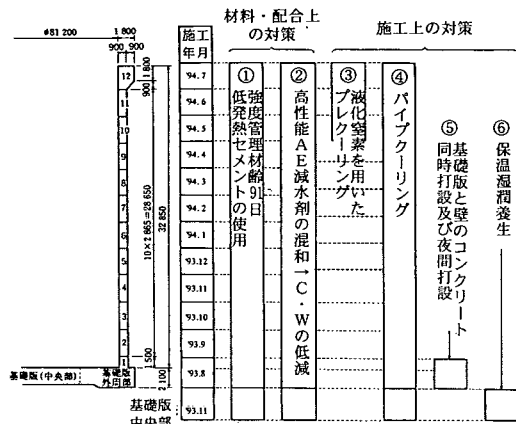


図-9 温度ひび割れ制御対策の組合せ
(PCLNG貯槽 2号機の場合)

でも、打設してから概ね200日辺りまでの間に大きく生じ、その後は僅かである。

b) 実工事におけるひび割れ制御の管理結果

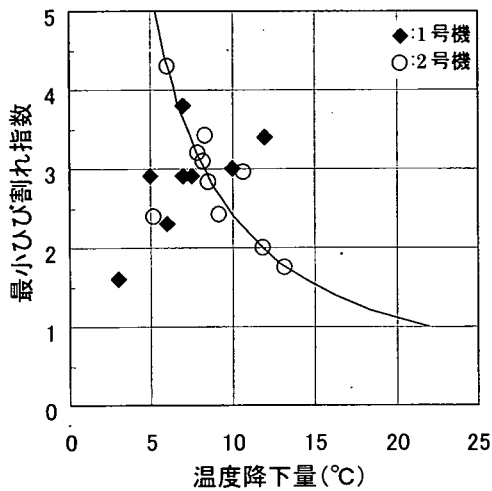
コンクリートの低発熱化をはじめとする材料・配合上の対策にポストクーリングなどの施工上の対策を効果的に組み合わせることにより、温度ひび割れを確実に防止できる技術を確認した。PCLNG貯槽1, 2号機(壁厚90cm, $f_{ck}=40\text{N/mm}^2$)で採用した収縮ひび割れ制御対策の組合せを図-9に示す。

これらの対策を用いたひび割れ制御の管理結果として、コンクリートのピーク温度から安定温度までの温度降下量と計測値から求めた温度ひび割れ指数の最小値との関係を防液堤の各施工部位ごとにプロットしたものの図-10(a)に示す。自己収縮や日射、外気温の日変動などの影響を含んだ実測値に対する評価値として、いずれの施工においてもひび割れ指数が1.6以上の十分な安全性を有

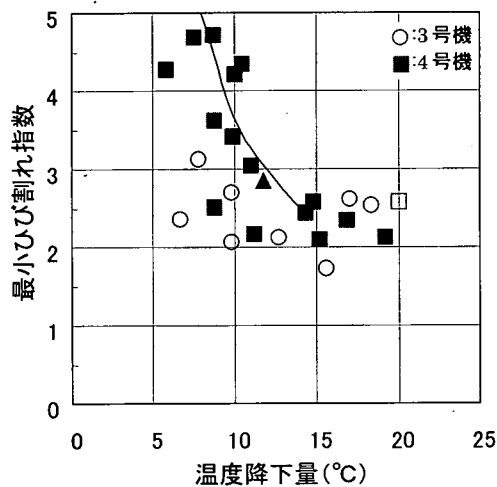
する結果となっている。1号機では前述のように高炉スラグ混合セメントによる自己収縮が大きい影響で、温度降下量が小さい時でもひび割れ指数が小さな値となっている。同図(b)は、 $f_{ck}=60\text{N/mm}^2$ の高強度SCC、壁厚80cmの3, 4号機の制御管理結果を示したものである。セメントの低熱化により発熱速度が緩やかとなることから、それまで暑中施工の場合に採用していた液化窒素(-196℃)によるプレクーリングを用いなくともパイプクーリングで十分に対応できるようになった。同図(a)と比べてプロットしたデータは全体的に上方、すなわち同じ温度降下量のときのひび割れ指数が大きくなる方向にシフトしている。これは、主にCSA系膨張材を混和した効果によるものと考えられる。図中の曲線は解析による温度ひび割れ指数と温度降下量の関係を表したものであるが、温度降下量が小さい領域でこの曲線を大きく下回るものがある。これは打設後に外気温が上昇したときに現れるパターンで、温度降下量は小さくなるが、拘束体となる既に構築した部分の温度が上昇して体積膨張することにより、被拘束体に発生する引張応力が大きくなることによる。他方、曲線より上側にプロットされ、温度降下量の割りに温度ひび割れ指数の値が大きいものは、逆に打設後に外気温が降下するケースで、温度降下量は大きくなるが拘束体の温度が下がって体積収縮することにより、被拘束体に発生する応力が緩和されるためと考えられる。

c) 残留応力の制御管理

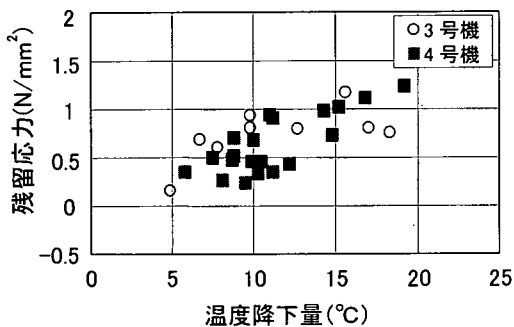
以上のように、高強度のマスコングクリートの温度ひび割れの防止が確実にできるようになり、実質的に3号機以降の工事では温度ひび割れを発生させない管理から初期残留応力(温度応力)を制御する管理へと移っている。それは、長期計測により防液堤の構築過程で生じた温度応力は完成後においても残留することが確認され(図-11)、稼働状態における耐久性の確保(曲げひび割れ発生限界)に直接影響が及ぶと考えたことによる。この残留応力は水和反応に起因した温度応力と自己収縮、その他の影響が合わさった結果であるが、それがひび割れ発生の限界状態に及ぼす影響は無視し得ないとして、既設PCLNG貯槽の設計上では寸法効果とは別にコンクリートの材料係数 $\gamma_c=1.3$ を考慮する形で対応している。最近の破壊力学的アプローチによる研究報告³⁰⁾によれば、寸法効果の中には温度応力や収縮の影響が含まれているとの指摘がある。その影響は定量評価するまでに至っておらず、従って単純に比較することはできないが、3号機および4号機における防液堤のコンクリート温度がピーク温度から安定温度まで降下したときの初期残留引張応力は図-10(c)のように1~1.5 N/mm^2 程度以内で³¹⁾、設計で曲げひび割れ発生限界を設定する際にコンクリート



(a) 1,2号機 ($f_{ck}=40\text{N/mm}^2$, $t900\text{mm}$)



(b) 3,4号機 ($f_{ck}=60\text{N/mm}^2$, $t800\text{mm}$)



(c) 温度降下量と残留応力

図-10 PCLNG貯槽の収縮ひび割れ制御管理結果

の設計引張強度として引張強度の特性値から[寸法効果+材料係数 $\gamma_c=1.3$]により引き下げた分 (1.7N/mm^2) 以内に収まる管理結果となっている。

このような計測実績と研究の積重ねから現象、挙動に対する影響要因とその影響度が明確にされ、それを確実に実現できる施工管理技術を適用すれば近い将来、温度ひび割れの照査は温度ひび割れ指数という安全率に置き換えた評価から、発生する引張応力と引張強度とを直接的に比較・評価することも可能になると考えられる。

(2) 設計へのフィードバック

得られた構造物の挙動計測データを設計の実務に直接フィードバックさせることは、初期の段階では稀であった。しかし、形状寸法が同一、ないしは多少違う構造物を同一構内に順次建設して行き、それぞれ着工から稼動開始一年後までの長期計測を継続して実施したことで、計測データを比較、分析することにより多くの貴重な情報が得られた。その幾つかを以下に示す。

a) 基礎版の寸法精度管理と構築方法

LNG貯槽の内槽用アンカストラップの据付には高い精度が要求される。従来の地上式金属二重殻タンクでの経験——半径30mの円盤状スラブが打設一ヶ月後に約5mm程度縮む事例が多かった——から、水和熱による温度上昇などの要因で体積変化を生じるので予めその分を見越して管理する必要があることは分かったが、PCLNG貯槽は配合条件や部材厚が異なり、更にプレストレス導入・それに伴うクリープの影響も加わるため、定量的な目安にはなり得なかった。

1号機の工事では、比較的早期に大きな体積変化が測定された。結果的には、コンクリートの温度上昇を当初計画以下に抑制できたこと、プレストレスによるクリープ変形を大きめに評価していたことなどによって問題は生じなかったが、経時挙動として見たときに当初予測と実際との間で大きな乖離があった。図-12は3号機におけるアンカストラップ位置の移動量を4ヶ月の間に4回測量して度数分布として表し、それを経時変化として捉えたものである。低発熱・低収縮化した高ピーライト系の低熱ポルトランドセメントを用いても、高強度のSCCを暑中打設する条件では基礎版外周部のコンクリート温度の降下量は引渡し検査までの3.5ヶ月間に 35°C 生じ、これによりアンカー位置はコンクリート打設前を基準にして約7mm中心側に移動したと分析される。この間の自己収縮は、事前の使用セメントを用いた室内試験などから約 70μ と想定され、この分の約3mmを加えると10mmとなる。これらの移動変位に対して基礎杭や地盤による拘束の影響は僅かであり、杭頭部に若干の曲げ応力が生じる程度であった。このようにコンクリートの

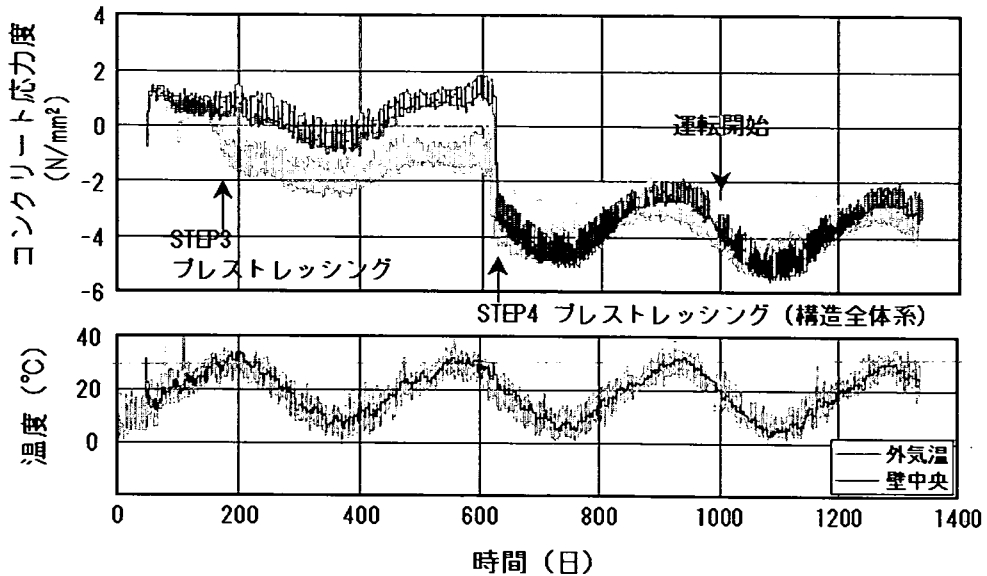


図-11 PCLNG貯槽の長期計測データ — 防液堤の円周方向応力と温度の履歴

温度変化と自己収縮による移動量は事前評価と実際とが良好な対応を示すまでに至ったが、基礎版外周部に導入した円周方向プレストレスによる移動量は、弾性収縮に加えてクリープ収縮が相当に早い進行速度で生じると考えなければ説明できない経時変化を呈している。

以上のように基礎版の温度変化、自己収縮による体積変化とプレストレスによる収縮挙動を把握できるようになったことから、それをベースにしてPC製容器の基本的な構築方法、構造を変更するまでに至った。1～3号機では基礎版を外周部と中央部とに分割し、基礎版外周部と防液堤下部とを先行構築して円周方向にプレストレスを導入した後、基礎版の中央部のコンクリートを打設する施工順序を採用してきた。これは大規模なコンクリート製容器の建設において、温度変化や乾燥などの要因によるコンクリートの体積変化の大きさとその影響が未解明の状況で、海外における類似の事例^{32), 33)}なども参考にして、防液堤下端部に所要の円周方向圧縮応力を確実に導入できる構築方法として採用したものである。

現在建設を進めている4号機では、3号機までの経験と計測実績を基に基礎版をPC版構造として版厚を約 $2/3$ に減じ、分割せず一体打設している。防液堤の外部拘束体となる基礎版に $r \cdot \theta$ 二方向のプレストレスを導入して収縮させることにより、防液堤下端部付近に所要の円周方向の圧縮応力を導入するという施工方法である。それを採用したのは、構築過程での防液堤の収縮ひび割れ防止としての効果があること、基礎版自体についても打継ぎ目のない一体打設による品質の向上や打ち継ぎ部工事費の削減が可能となることに加えて、体積変

化・収縮によるひび割れ対策の費用の削減が可能となり、かつ、PC版とすることにより構造の合理化、コストダウンも図れるなどの利点を評価したためである。

b) 水張試験時の基礎版の時間依存性変形

設計上の構造解析の結果と計測データとの間に大きな乖離があったのは水張試験時における基礎版の応力-変位挙動であった。水張試験は、内槽、特に側板-アニュラープレート継手部付近等の信頼性をより高い精度で確認するために設計液頭圧の1.5倍以上に相当する水位まで水を貯留する試験で、貯蔵容量が $14 \sim 18$ 万 m^3 のタンクともなれば最高水位に到達するまでに3～4週を要する。大阪湾岸地域は更新世の海成粘土層が卓越した地盤において、直径80m余りの基礎に超高層建物の接地圧に相当する $300KN/m^2$ 前後の載荷を行うと、支持地盤の地中応力分布に起因した圧縮・圧密沈下によって基礎版は皿状変形を生じ、タンク中心と外周部の相対沈下量は数十mmレベルとなる。これを瞬時の荷重作用として構造解析すると、基礎版下縁の応力は引張強度を大きく上回るが、基礎版の断面の上・中・下位に埋設したコンクリート応力計の指示値は直線分布を保ち、かつ、引張強度以内に収まる大きさであった。基礎版の沈下測定による変形から逆解析すると、応力緩和率(リラクゼーション率)は約 $0.4 \sim 0.5$ 程度となる挙動が全ての既設タンクで観測された(図-13)。

コンクリートのクリープは、外力が作用したときにコンクリート内のセメント硬化体中に形成された空隙に存在する空隙水も抵抗するが、コンクリート内部に空隙水圧勾配が生じると空隙水圧が徐々に消散してセメント硬

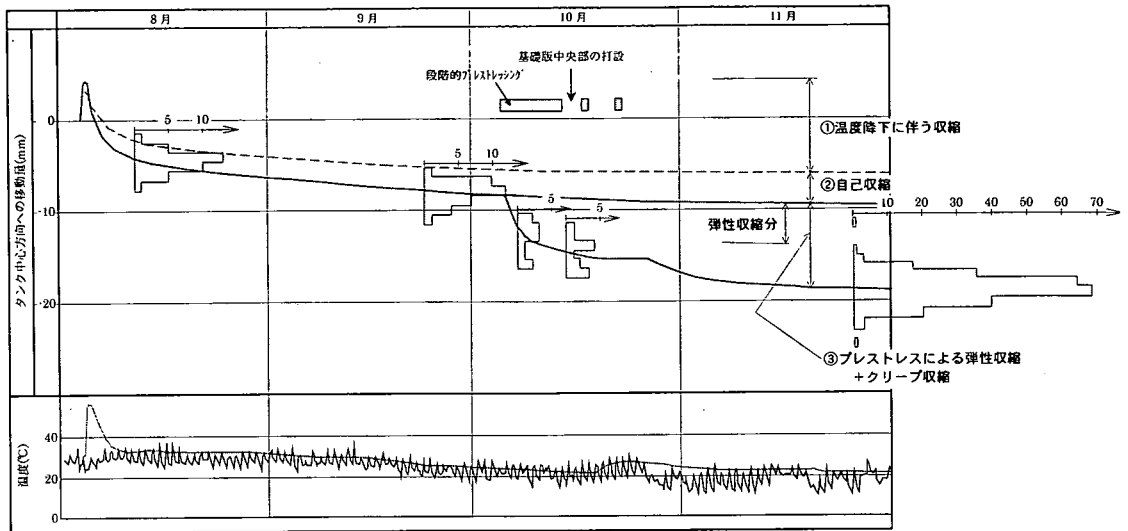


図-12 基礎版の半径方向の収縮挙動

化体の負担が増加することによりひずみ・変形が増加するメカニズムとして捉えられている³⁴⁾。基礎版は、その下面に防水膜が施工され、実質的に外部からの水の補給が無く、水和反応の進行と共に細孔中の相対湿度の低下（自己乾燥）が進んでいると考えられる。その基礎版に水張試験時に発生する応力は圧縮強度の数%のレベルで、クリープ試験で一般に採用されている載荷応力（圧縮強度の30%前後）よりも1オーダー小さい。しかも、載荷速度が実測で1日当たり $0.1 \sim 0.2 \text{ N/mm}^2$ （ひずみ速度としては数 μ /日）の極めてゆっくりとしたものであり、かつ軸応力ではなく曲げ応力として作用するという条件である。過去に行われた一軸圧縮の条件下におけるクリープ挙動の実験および数値シミュレーションの報告³⁵⁾によると、クリープひずみが載荷の初期に急激に生じて

いるときのひずみ速度は $100 \sim 150 \mu$ /日、載荷の1日後以降の緩やかに増加するときで数 μ /日となっている。これより、基礎版内では水張試験時に間隙水圧が上昇することなく消散していたものと推測する。張出し架設中のPC橋の張出し先端変位が時間経過に伴って増加していく挙動が計算よりも速い（大きい）、という報告³⁶⁾があるが、これも同様のメカニズムによると考えられる。

以上のように水張試験時の基礎版の挙動は、載荷によるひずみが瞬時ではなく暫時的に増加することによってクリープによる応力緩和効果が大きく生じ、その結果、それまで設計上の支配的な荷重条件の1つであった水張試験が、実質的に残留変形によって発生する付加的な応力を考慮するだけのものとなった。

外気温の季節変動による影響も図-11をマクロにみれば約半年で約 30°C （ひずみに換算して $240 \sim 300 \mu$ ）変化しているが、同様のクリープによる応力緩和は生じず、圧縮強度の1/3に対応するヤング係数を用いた線形解析に近い応力変動値が計測されている。その違いは、外気温の影響は80cm厚さの防液堤の断面内で同図に見るように毎日、応力の全振幅にして $1.0 \sim 1.5 \text{ N/mm}^2$ の変動が生じており、コンクリート中の間隙水圧が消散するのに十分な時間がないことによると考えられる。

5. まとめ

(1) 工程短縮は、主に急速化施工を特長とするスリップフォーム工法と、養生・美観を特長とするジャンプフォーム工法のそれぞれの長所を生かし短所を補うように

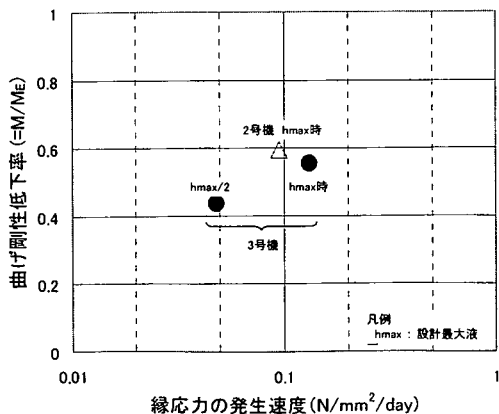


図-13 基礎版の曲げ応力に対するリラクセーション

組み合わせた新しい自昇式足場・型枠工法の開発効果によるものである。コスト縮減は、高強度のSCCと自昇式足場・型枠工法を組合せて、省力化した急速化施工を実現したこと、計測実績の分析・評価による最新の技術知見を活かして基礎版のPC化を始めとした構造の合理化、構築方法の改善などを積極的に実施したことによる。工期、コスト以外にも作業安全性の向上や作業員の平準化などの付加的効果も得られている。

(2) バーチャルオフィス(仮想の現場組織)という概念を4号機の建設現場に適用し、情報を公開して共有・活用するシステムにより施工管理を実施した。その結果、変革は個人の意識、業務形態、更には事業形態にも及ぶこと、ITの活用度が技術力と相乗して企業競争力の格差を押し広げることを実感として体験した。ここに報告した品質管理・保証システムが普及すれば、コンクリート構造物の信頼性向上に繋がると考えられる。

(3) PCLNG貯槽の技術的發展を振り返ってみると、容器の機能として前提となる初期温度ひび割れの防止、それを更に進めた残留応力の制御を目指したことが、セメントの低発熱・低収縮化を推し進め、構造物の実際の挙動的確な把握に繋がりが、構造や構築方法にまで波及するという好循環を引き起こしている。

その根拠となっているのが長期にわたる計測データであり、温度応力や自己収縮、あるいは水張試験時の変形のようなコンクリート構造物の時間依存性の変形やひび割れの問題に対して適切に対処するためには、構造物の実挙動の計測を建設開始時点から分析・評価することが肝要となる。

6. おわりに

PCLNG貯槽1~4号機は、単純な繰り返しとして建設したものではなく、常に新技術、改良技術の採用により建設の合理化を図ってきている。特に最新の4号機の建設に関しては、これまでの建設・稼働実績、計測実績をもとにした設計・施工の更なる合理化検討を行い、3号機と比べて土木工工程の4ヶ月短縮、コスト面でも約2割の縮減を実現する見通しである。

PCLNG貯槽は、容量の大きさに拘わらず合理的かつ経済的に適用できることを実績が示している。今後はLNG以外の低温液化ガス(LPGやLEGなど)にも、また、国内に限らず海外においても、広く活用されていくと考えられる。

謝辞：PCLNG貯槽の開発段階から現在建設中の4号機の建設に至るまで継続してご指導を賜っている高知工科大学 岡村 甫教授・東京大学 前川宏一教授、自己充填コンクリートの検査システムについてご指導いただいた東京大学 小澤一雅助教授・高知工科大学 大内雅博助教授、ならびに急速化施工で養生期間を短縮したときの影響評価についてご指導いただいた京都大学 宮川豊章教授をはじめ、技術開発や工事にご指導・ご協力を戴いた関係者各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 中島一夫, 西崎丈能: 液化天然ガスのPC製貯槽の開発—わが国初のPCLNG地上貯槽の建設—, 土木学会誌, Vol.75, No.10, pp.14-16, 1990.10.
- 2) *Recommendations for the Design and Construction of Refrigerated Liquefied Gas Storage Tanks*, The Engineering Equipment and Materials Users Association (EEMUA) 1986.
- 3) BS 7777: *Flat-bottomed, Vertical, Cylindrical Storage Tanks for Low Temperature Service*, British Standards Institution, 1993.
- 4) 北村八朗, 西崎丈能, 園 淳生, 鎌田文男: わが国初の14万kl PCLNGタンクの建設, コンクリート工学, Vol.31, No.4, pp.42~56, 1993.4.
- 5) 西崎丈能, 奥立 稔, 近松竜一, 川島宏幸: 高強度・自己充填コンクリートによるPCLNG貯槽の建設, コンクリート工学, Vol.37, No.10, pp.40~44, 1999.10.
- 6) Nishizaki, T., Nakatani, M., Miyagawa, K., Kubo, N., Kamada, F., Okudate, M., Nakagawa, K. and Odahara, S.: Largest Aboveground PCLNG Storage Tank in the World, Incorporating the Latest Technology, PS6-4, *13th International Conference on LNG*, Soul, 2001.5.
- 7) 土木学会: コンクリート構造物の耐久設計指針(試案), コンクリートライブラリー-65, 1992.8.
同・指針(案), コンクリートライブラリー-82, 1995.11.
- 8) 近藤紀人, 中嶋智史, 近松竜一: コンクリートの乾燥防止用養生テープの開発, 土木学会第56回年次学術講演会講演集, V-501, pp.1002-1003, 2001.10.
- 9) Chikamatsu, R., Kitamura, H., Nishizaki, T., Kamada, F. and Sogo, S.: Study on Practical Use of Non-shrinkage Type High Performance Concrete for Inversaly Casting Method, *ACI International Conference on High Performance Concrete*, Singapore, 1994.11.
- 10) 北村八朗, 西崎丈能, 十河茂幸, 鎌田文男, 近松竜一: 逆打ち用ハイパフォーマンスコンクリートの実用化研究と実構造物への適用, 材料, Vol.43, No.491, pp.956~962, 1994.8.

- 11) Kitamura, H., Nishizaki, T., Ito, H., Chikamatsu, R., Kamada, F. and Okudate, M. : Construction of Prestressed Concrete Outer Tank for LNG Storage Using High-Strength Self-Compacting Concrete, *International Workshop on Self-compacting Concrete*, pp.262~291, Kochi, 1998.8.
- 12) Nishizaki, T., Kamada, F., Chikamatsu, R. and Kawashima, H. : Application of High-Strength Self-Compacting Concrete to Prestressed Concrete Outer Tank for LNG Storage, *RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, Stockholm, 1999.9.
- 13) 岡井大八, 西崎丈能, 牛田智樹, 近松竜一, 川島宏幸 : 世界最大の地上式LNGタンクの建設, セメントコンクリート, No.658, pp.12~20, 2001.12.
- 14) 竹田宣典, 松永篤, 近松竜一, 十河茂幸 : 低熱ポルトランドセメントと膨張材を用いた低収縮コンクリートに関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.997~1002, 1998.
- 15) 本多 昭 : ASP利用による現場施工管理の変革, 土木学会誌, Vol.86, No.3, pp.42~45, 2001.3.
- 16) 鎌田文男, 奥立稔 : 情報通信技術を活用した現場施工管理の変革, 近畿地方整備局平成 13 年度管内技術研究発表会論文集, 技術開発部門 No. II-23, 2001.7.
- 17) 岡井大八, 川崎浩司, 徳永正博, 五十嵐治世, 井上貞文, 鎌田文男 : LNGタンク建設工事に見る現場IT化, 建設機械, Vol.37, No.10, pp.42~48, 2001.10.
- 18) 川島宏幸, 岡田 茂, 西崎丈能, 近松竜一 : PCLNG貯槽における高強度・自己充填コンクリートの製造・施工管理, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.421~426, 1999.6.
- 19) 高橋寛, 宮川公一, 近松竜一, 川島宏幸 : ITを活用した高流動コンクリートの品質管理システムの開発, コンクリート工学年次論文集, No.2, [施工 I] 2193, pp.1153~1158, 2001.7.
- 20) Okai, D., Nishizaki, T., Kawasaki, K., Kamada, F. and Okudate, M. : Development of a Quality Control System for Self-Compacting Concrete by Using Information Technology, *Proc. of the Second International Symposium on Self-Compacting Concrete*, pp.729~736, Tokyo, 2001.10.
- 21) 北村八朗 : PCLNG貯槽の設計と施工について, 土木学会平成9年度全国大会, 研究討論会 10, コンクリート構造物の次世代設計法のゆくえ, pp.16~21, 1997.9.
- 22) 岡村甫, 前川宏一, 北村八朗, 芳賀孝成, 黒坂敏正 : 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), 土木学会第45回年次学術講演会講演概要集, V-139, pp.304~305, 1990.9.
- 23) 前川宏一, 岡村甫, 浅井邦茂, 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2), 土木学会第45回年次学術講演会講演概要集, V-139, pp.306~307, 1990.9.
- 24) Maekawa, K., Hasegawa, H., Kurosaka, T., Asai, K. and Kitamura, H. : Gas-Liquid Two Phase Flow Through a Crack in Concrete, *East Asian Confer. on Structural Engineering and Construction*, Shanghai, 1991.4.
- 25) Okai, D., Kitamura, H., Hasegawa, H. and Kamada, F. : Computer-based Construction Techniques Applied to Prestressed Concrete Dike for LNG Storage, *FIP Symposium '93*, pp.1299~1306, Kyoto, 1993.10.
- 26) 西崎丈能, 鎌田文男, 入矢桂史郎, 十河茂幸 : PCLNG地上式貯槽の温度ひびわれ制御対策とその効果, 土木学会第47回年次学術講演会講演概要集, V-247, pp.524~525, 1992.9.
- 27) 北村八朗, 西崎丈能, 十河茂幸, 鎌田文男 : 逆打ち用ハイパフォーマンスコンクリートに関する基礎研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.1, pp.101~106, 1992.9.
- 28) 十河茂幸, 近松竜一, 鎌田文男, 仙名宏 : 各種低発熱セメントを用いたコンクリートの硬化に伴う体積変化, 土木学会第47回年次学術講演会講演概要集, V-452, pp.934~935, 1992.9.
- 29) 近松竜一, 竹田宣典, 鎌田文男, 十河茂幸 : 結合材の種類がコンクリートの硬化収縮に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.1, pp.543~548, 1993.6.
- 30) 内田裕市, 六郷恵哲, 小柳治 : コンクリートの曲げ強度の寸法効果に関する破壊力学的検討, 土木学会論文集, No.442, V-16, pp.101~107, 1992.2.
- 31) 岡井大八, 西崎丈能, 鎌田文男, 高橋寛 : PCLNG貯槽における体積変化に起因した残留応力の制御 : 土木学会第57回年次学術講演会, V-668, pp.1335~1336, 2002.9.
- 32) Cherezy, M. : Example of Construction and Design of LNG Storage Tanks, *First International Conference on Cryogenic Concrete*, England, 1981.3.
- 33) Bilderbeek, D.W. : Construction of LPG Storage Tanks in Prestressed Concrete, *Dow Chemical Terneuzen, Second International Conference on Cryogenic Concrete*, Amsterdam, 1983.10.
- 34) 土木学会コンクリート委員会 : コンクリートのクリープおよび乾燥収縮, コンクリート技術シリーズ, No.24, 土木学会, 1997.10.
- 35) 原口晃, 河角誠, 田辺忠顕, 岡沢孝雄 : 黒田ダム嵩上げ工事におけるコンクリート打設計画の検討(その1) -コンクリートの力学的, 熱的性質の実験検討-, 電力中央研究所報告, No.375561, 1976.
- 36) 土木学会コンクリート委員会 : コンクリート構造の時間依存性変形・ひび割れ評価-現状と今後の課題-, コンクリート技術シリーズ, No.38, pp.56~59, 土木学会, 2000.9.

(2002.2.19 受付)

**RATIONALIZATION STUDY ON CONSTRUCTION TECHNIQUES OF
PRESTRESSED CONCRETE OUTER TANK FOR LNG STORAGE AND
EVALUATION ON PRACTICAL APPLICATION**

**Takeyoshi NISHIZAKI, Daihachi OKAI, Ryuichi CHIKAMATSU,
Minoru OKUDATE and Fumio KAMADA**

Prestressed concrete tank for LNG Storage, a new containment type uniting the traditional aboveground double metal wall tank and prestressed concrete dike, has passed 12 years since development and the first practical application. Up to now, we have proceeded eight tanks in Japan and gradually derived one of the standard types of LNG aboveground tank. Now the newest tank, being constructed at Himeji Terminal, aggressively uses the innovative and progressive technology, such as the design based on previously monitoring evidences and the experience so far, rationalization study on construction method and adoption of high strength self-compacting concrete and slip-form framework. The report will elucidate the content of rationalization study briefly and result of application on the real work.