Concrete and Cryogenics (コンクリートと低温工学)

F.H. TURNER

A Viewpoint Publication Cement and Concrete Association 1979

山 根 昭

佛竹中工務店東京本店 東京都中央区銀座 8-21-1

(1983年3月22日受理)

Sho YAMANE

Takenaka Komuten Co., Ltd. 8-21-1.
Ginza, Chuo-ku, Tokyo

(Received March 22, 1983)

はじめに

本書の解説に当って、はじめに依頼を受けたのは文献紹介であったが、一読した結果、極低温コンクリートの領域で広い範囲で丁寧にまとめた叢書がわが国では見られないこと、各章を取上げるとそれぞれの分野の専門家にとっては十分でないにしても他の分野についての概括的かつ基本的な知見を持つ意味で十分参考となること、また実務において管理面からも役立つことなどの点から、全訳ではないが書の要点を整理して見た。読者の興味をそそることができ、また設計者の手元資料となればこの上ないと考ええる。

本書は、LNG(液化天然ガス)など極低温用貯蔵タンクに、プレストレストコンクリートを使用する場合の基礎的な知識、背景および概要について、読みやすくまとめられたいわばコンクリート叢書である。簡明な記述を旨として、設計者に役立つように、概論的によくまとめられており、いわば指針をわかりやすく解説したものと考えよう。

序 章

導入として液化ガスの効用を述べており、もしもロンドン・キャナビストリートで、液化炭酸ガスでプラスチックの床にくっ付いたガムを剥がしたと、同様にカーペットの場合も液化窒素のスプレーでガムが剥がれること。医者局の局部麻酔や止血に低温

を利用し、また死体の保存のための低温利用は周知であること、極低温下で電気抵抗が失われることから、コンピューター設計者や送電線技師が極低温セルを検討している(注:最近超LSIの開発では新素材に切り換えられている)ことなどを挙げて、極低温領域の特殊性を表現している。

全体の構成;極低温の液体及びガスの特性から始まり、低温～極低温の液体の貯蔵、設計上のコンクリート及びプレストレストコンクリート(以下PCと記す)、及び鋼材の極低温下の諸性質、貯蔵タンクの実施設計と仕様、内外タンクの構造設計、その他の適用、例えばパイプラインなどで結んでいる。巻末には附録としてデザインデーターを載せており、諸単位の換算表があるほか、諸液化ガスの物理的性質、液化温度と圧力、安全性検討に必要な諸元等を提供している。度量衡を除く換算表と液化ガスの諸性質を附録として末尾に Chart 6～8, 10～14に示した。これらの諸章は著者の緒言にもあるように、ガイドラインあるいはアウトラインを示すものではあるが、一応洩れなくカバーしており、幅広く読める書である。

1 章

極低温下の液体及びガスの性質を述べている。低温技術は主として液体でガスを扱うことは周知であるが、輸送及び貯蔵時に液体であれば、液化天然ガス(以下単に LNG と記す)の場合、常温常圧下の容積の

Figure 1.1(c) Thermal instrumentation. (温度調節設備)

約 1/630 であり、実用的かつ経済的であるからとしている。この章では、附録の物性表と対比して、ガスの液体と臨界温度及び圧力と潜熱、比重・比熱・熱容量及び容積変化等、物理的性質の概要を述べている（末尾の附録 Charts 6～14参照）。LNG 及び LPG（ここでは天然または副産物としての液化石油ガス）の取扱い上の性質についても述べられている。例えばタンクの冷却に伴う地盤の凍結の保護、蒸発または反転現象とガス圧解放、及び回収のためのレターンパイプによる漏洩防止、タンクの内外温度差が 200°C に及ぶ場合の構造体の動き、例えば直径 50m のタンクの約 100 mm 程度の収縮及びコンクリートの通常の立方体強度の約 1.5 倍に及ぶ熱応力、等が提起されている。液体ガスを 1 次しゃへいのみでコントロールすることは困難であるため、2 次的な圧力解放バルブ等による設備上の配慮が必要であること、荷重に対する考慮及至は試験を必要とすること、等が 2～3 の図を示して述べられている (Fig. 1.1(c))。

タンクの安全性についてもこの章に述べられている。ただし実際の安全対策上の諸策についてではなくて、この章では主としてタンクからの液の大量の洩れと火災について知られている 10 数件の事故の中で、代表的な米国での 2 例が紹介されている。1 つはオハイオ州クリーブランドで 1944 年に起った鋼製タンクの大火事で、約 5.5m^3 の LNG が漏洩したもので、火災により第 2 のタンクも部分的崩壊を伴った。漏洩した LNG は市の下水道に流入し、火災と爆発によって死者 100 人、負傷者 300 人をこえ、10 箇所のプラントと

80 戸の住宅、200 台の自動車及び市の下水道システムが被災し、その範囲は 12 ヘクタールをこえ、損害は当時で約 30 億円にも上ったとしている。事故の原因はタンクの設計の悪さ、延性の少ない金属の使用、適正な事前調査検討の不足などの複合であったと説明している。今 1 つの事故は、1973 年 2 月 10 日に起こったニューヨーク、ステートン島、テキサス・イースタン社の PC タンクの事故で、ナイロン・アルミニウム・コンポジットのフレキシブル・ライナー製で、ガス圧によりメンブレンより次第にリークして断熱材に充満し、ついには緩やかな爆発とフラッシュオーバーを誘発し、コンクリートの屋根ドームが破壊して約 40 人の作業員が死亡したという。このような事故の教訓から、安全性について詳細な仕様が作られており、かつ二重外殻を設けるなど二次の漏洩防止対策等、多くの厳密な安全対策を考慮する必要があるとしている。この辺はむしろ LNG 等貯蔵タンクの安全を計るための厳密な設計と仕様を遵守すべき警告として、また低温液化ガス取扱いの根本として強調されているものと思われる。

2 章

極低温液体の貯蔵について、設計概念図、メンブレン、断熱材及び災害防止堤防の概要が図示して説明されている (Fig. 2.1 参照)。まず、安全に関する基本は、1) 液の漏洩のないこと、2) 液体に侵入する熱を最小にすること、3) ガスに対して浸入または透過の両方向に気密であること、であるとし、さらに 4)

Fig. 2.1 Components of tank. (タンクの構成)

(b): Internal membrane.

Fig. 2.2 Membranes. (メンブレン)

いかなる理由であれ、破損または崩壊した場合、その被害を最小にとどめることとしている。このことは一次及び二次の安全性を考慮する必要性を示している。

極低温の液体を収納する内部タンクは、漏洩はもちろん、極くわずかに起る蒸発現象時のしみ出しなどがあってはならない。このため極低温下でぜい性とならず、温度変化による伸縮に追従する材料で、かつ外部タンク内で暴れることのない(変形の少ない)構造を要求している。例えば金属性では高ニッケル鋼やアル

Fig. 2.3 Inherently flexible stainless steel membrane. (柔軟なステンレス製メンブレン)

ミニウム合金が経済的ではあるが万全ではないこと、P Cコンクリートでは極低温下の液体の浸透性のため、さらにメンブレンを要することを説明し、図によりP Cコンクリートに使用するメンブレンの設け方を例示し、解説されている(Figs. 2.2 & 2.3)。

断熱材(保冷材とも云う)の性能について、1) 高い遮熱効果と経済性、2) 液体及びガスに対して不活性であること、3) 適用温度範囲に対して物理的に安定であること、4) 引火性または爆発性液体の場合は非焰性で

Fig. 2.9 LNG tanks at Staten Island, New York (Distrigas).
(ニューヨーク、ステートン島のデイストリガス社 LNG タンクの例)

あることなどを基本としている。材料として粒状パーライトを推奨し、その他発泡ガラスを取上げているが、説明にもあるようにステートン島の事故からウレタンフォームを忌避しているように思われる。ちなみにわが国では、硬質ウレタンフォーム、発泡ガラス、合板及び塩化ビニールフォームなどが支圧保冷部分に、ロックウール及びグラスウール等が非支圧部に用いられている。なお、本書では保冷材の施工中に雨水や湿気の透過による効果の半減を防ぐために、内部タンクの完成後に行なうことを推奨しているのは適切である。

外部タンクについては、軟鋼製タンクを推奨している。一般に金属性タンクでは完成よりも施工中に弱点があり、突風時に被害を受けやすい。チェスシャイアのパーディントンでは、2万t LNG タンクの外部タンクの工事中に1973年2月の暴風時に崩壊したという。その点コンクリートタンクはその心配がなく、さらにき裂つを防止するためプレストレス構造とすべきだとしている。

安全堤防または防壁については、主として液化ガスの漏洩による二次災害としての流出及び火災を封じ込める目的のもので、万が一の事故の拡大を防止する。壁体は1回限りで解体されるがそれで十分であり、さらにPCとすることが望ましいとしている。特にアンモニア及び塩素など毒性のある危険物に対しては取扱い上の制限と封じ込めを対策としているが、それ以上の策については触れていない。

その他 LNG 貯蔵タンクの開発の歴史について、初期には金属製タンクに関連する溶接技術の改良、次いで出現したPC貯蔵タンクの開発等が述べられている。この章の終りには世界各国のタンクの実施設計の5例が図解されており、それぞれのデザインが異なっていて興味深い。特にステートン島ディストリガス社のツインタンクは容量144,000m³、世界最大(1979年)で、市の委員会の要請で「最大の安全性」を基本として建設された(Fig. 2.9 参照)。

3 章

PC(プレストレストコンクリート)構造のコンクリート及びPC鋼材の極低温下の性質について述べられている。極低温下で要求される延性はコンクリート自身は持っていないので、高い引張強度を持つ高炭素鋼のPC鋼棒またはPC鋼線との複合でPC構造物が成り立つ。

設計原理として、溶接を伴う金属性タンクまたは

ライナーの延性の必要性について、金属の溶接部の応力解除後に負担すべき引張応力に耐えるためには十分な延性が必要であること、シャルピーの衝撃試験時に見られるようなぜい性的破壊をなくすためにも延性が必要であるとしている。この点PC構造では温度に拘わらずインシヤル・プレストレス応力がある後の引張応力を上回るのでコンクリートに引張応力を生ずることはなく、またプレストレス鋼線が多数のより線から成っているので、成長するき裂等々の損傷を起こす危険がなく、極低温タンクとして貯蔵すべき液の種類を問わず最適であるとしている。しかし、実際のタンクとしては主として金属性メンブレンを用いて、保冷材あるいは躯体のコンクリートへの液の浸入を阻止し、二重・三重の安全を考慮する姿勢からは、金属製メンブレンは絶対に必要であり、著者のPC製タンクの強調はややオーバーにも思える。

コンクリートについて、PCタンクの材料となるコンクリートの物理的性質については、アメリカン・ガス協会(AGA)、B.E. Eakin らの1963年の地下タンクの報告にある、アメリカ・ポートランド・セメント協会(PCA)、G.E. Monfore らの実験報告によるデータをそのまま引用している。コンクリートの圧縮強度、引張強度、弾性係数、ポアソン比、低温収縮、などであり、他の文献の例または対比については考慮されていない。もともと G.E. Monfore らの実験報告は、それ以前の吉田, Saemon J.C. らに次いで古いが、広範囲に亘って現在も支持されているもので、Monfore 以後の Moskvina ら, Tognon, Wischers ら, 小谷ら, Radjy, Marechal, Litvan ほかの報告は上記 Monfore らの報告を補足するものであり、多少のデータの狂いは止むを得ないとしても、1960年代以後の研究の基本的なものとして周知になっている。欲を云えばもう少し上記の報告とも合わせて傾向的に示すべきではなかったかとも思われる。

コンクリートの極低温下の強度性状について G.E. Monfore の結果を要約すると、圧縮強度は極低温下では温度の低下に伴って大きく増加し、-150°C では常温時の約3~5倍に達し、富調合よりも貧調合の方がその増加率が大きい。引張強度も極低温下で増加し、-60°Cで極大に達するが、圧縮強度よりも倍率はやや小さく常温時の約2.5倍程度にとどまる。これらの性質はコンクリート中の自由水の凍結に関係しているもので、湿潤・気乾及び絶乾の供試体を比較すると、湿潤供試体は常温時の約240%も増加するが、50

Fig. 3.2 Effect of moisture content on strength of concrete (Mix 2 at various temperatures)
(コンクリートの強度に及ぼす含有水分の影響, Monfore & Lentz の文献)

Fig. 3.5 Permeability to methane of oven-dried concrete. (絶乾コンクリートの場合のメタンの透気性)

% RH の養生による気乾状態では約 8 %, 絶乾状態ではほとんど増加しない (Fig. 3.2)。ポアソン比は温度にほとんど影響されない。

長さ変化については、軽量コンクリートでは -18°C $\sim -59^{\circ}\text{C}$ でやや膨張する。しかし他の湿潤コンクリートでは、ほとんど変化がない。熱膨張率は、 $24 \sim 157^{\circ}\text{C}$ の範囲で $6.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 程度であるが、軽量コンクリートでは 8.1×10^{-6} 前後である。熱伝導率は常温から 0°C までは温度の低下に伴って低下するが、 0°C で反転して 1 たん大きくなり、さらに温度の低下に伴って増加する。

透気性については、米国ガス工学研究所の実験結果が示されており、湿潤状態の供試体ではメタンガスは浸透しないが、50% RH で養生した気乾状態では、 -73°C で常温の約38%、 -130°C で約67%であり、温度が低下すると透気性が増加する。また絶乾状態では低温で減少するとしている (Fig. 3.5)。

なお、コンクリートの物性に関する上記のデータは基礎的な知見としては満足しているが、設計にとっては十分とは云えないので、担当者はもう少し幅広く文献を見ておく必要があると考えられる (解説者注)。

Table 3.5 プレストレス・ワイヤーの極低温下の性質

項 目	物 性 値
引 張 強 度	+20℃に対して-196℃で約8%増加する。 25%まで増加するというレポートもある。
断面減少(絞り)	+20℃で30~40%に対して、-196℃では23~33%
伸 び	-196℃で25~50%に減少
弾 性 係 数	+20℃に対して-196℃では約6%増加
収 縮 率	+20℃~-100℃まで $11 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ +20℃~-196℃まで $10.3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
シャルピー値	+20℃に対して-196℃で約60%減少

Table 3.6 プレストレス鋼棒（マッカロイ社）の極低温下の性質

項 目	物 性 値
引 張 強 度	+20℃に対して、-196℃で約16%以上増加する。
断面及び伸び	ばらつく、塑性破壊やぜい性破壊が見られる。
弾 性 係 数	+20℃に対して、-196℃でわずかに増加する。
収 縮 率	+20℃~-100℃で $11 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
シャルピー値	極低温下で小さい

Fig. 3.6 Schematic diagram of anchor for 7-wire strand. (7本より線のアンカー部分 (くさび方式))

PC鋼材について；
いくつかの例外はあっても、全般にはほぼデータは揃っているとしている。
PC鋼線（ワイヤー）及びPC鋼棒について標準的な値について表示している（Table 3.5 及び3.6）。PCワイヤーの引張強度については、わが国の場合よりもややシビヤになっている。
PC鋼より線については、センターワイヤーと円周ワイヤーが配置される7本より線の一般的な図示がな

され、くさびに鋸状の歯どめをかけたくさび型アンカーを示している。またこれの荷重-歪曲線を示し、+20℃と比較し-196℃で引張強度が大きく増加し、弾性係数もわずかに増加することを示している(Figs. 3.6~3.7 参照)。
なお、金属の薄層剝離（いわゆるラミネーション）、溶接時のきず、含有物及び気泡について触れ、これらの欠陥がいわばノッチ効果となるとして警告している。

Fig. 3.7 Load-strain curves for Briden 'Dyform' 13mm drawn 7-wire strand. (7本より線に引いたブリドンの13mm異形筋の荷重-歪曲線)

プレストレスのシステムについて、1)鋼線、鋼棒または引抜きストランドで構成されるテンドンは、通常のものより線を優先すべきであること、2)単線、鋼棒または引抜きより線は、複数鋼線などが与えられるテンドンでは、複数ワイヤーを優先すること、3)直接アンカー方法が採用される場合は、くさび型アンカーを優先することなどの点を強調している。しかしこの項では通常用いられる工法の仕様まで掲載すべきであったと思われる。

4 章

実施設計について述べられている。通常は設計施工で、最適かつ経済的な設計が要求される。一般の構造物の場合よりも厄介で、慣れないことが多く、次章の構造設計と分離して此处に載せている。

設計仕様について示されている項目をまとめると表1のようになる(解説者注)。

なお、一般に設計仕様の適正でないものが多く、このためにも巻末に附録を添付したとしている。

主要寸法の説明では、設計者が保冷材の表面積が最小となるタンクの規模は、必要貯蔵量 V が示されれば、半径は $r = (V/2\pi)^{1/3}$ 、高さは $n = V/\pi r^2 = 2r$ で求められるとしている。

保冷材についても、仮定した保冷材の必要厚さを、内外温度差及び保冷材の熱伝導率から、単位面積あたりの熱負荷を計算して求める方法を説明している。

以下に保冷材の熱負荷の計算例を示す。

[保冷材の熱負荷の計算例]

1) 通常の貯蔵タンクで、1日あたりの蒸発損失(ボイルオフ)は0.04%と仮定、

$$0.04 \times 10^{-2} \times 20,000 = 8 \text{ (英) ton/day} \\ = 8.131 \text{ tonnes/day}$$

LNG の蒸発潜熱は 488 kJ/kg で与えられるので、許容熱取得は

$$8.131 \times 1,000 \times 488 = 3,968,000 \text{ kJ/day}$$

2) 基礎に対して

Fig. 4.2 の断面寸法から

泡ガラスの厚さ: 0.65m

温度降下: $165 + 25 = 190\text{K}$

熱伝導率: 0.145 kJ/mKh

表1 4.1 節 Design specification (設計仕様)

項 目	仕 様
種類及び容量	液化メタンまたは LNG 20,000 t
設 計 項 目	内・外タンク、保冷、配管及びバルブ設備
ボイル・オフ	0.04%/日をこえない
容 積	45,000m ³ をこえない
液 面 の 高 さ	タンク上端より 0.5m 以下
試 験 の 遂 行	外タンクのカス圧力テスト
液 体 の 温 度	-165°C、ただし外部温度は+25°Cと仮定
液 体 の 比 重	0.5 kg/l
液 体 の 潜 熱	448 kJ/kg (210 Btu/lb)
タンクの圧力	外タンクの最大内圧 140 mbar, 最大真空度10 mbar

Fig. 4.2 Sketch of insulation below wall of inner tank. (内タンク下部の断面)

Fig. 4.4 Temperature gradient through tank wall. (タンクの壁体を通じての温度勾配)

従って熱取得は

$$0.145 \times \pi \times 19^2 \times \frac{1}{0.65} \times 190 \times 24 = 1,154,000 \text{ kJ/day}$$

パーライトコンクリート：厚さ 0.65m

熱伝導率：0.34 kJ/mKh

従って熱取得は

$$0.34 \times \pi \times (21^2 - 19^2) \times \frac{1}{0.65} \times 190 \times 24 = 600,000 \text{ kJ/day}$$

従って基礎を通過する全熱取得は

$$1,154,000 + 600,000 = 1,754,000 \text{ kJ/day}$$

壁及び屋根を通じて許容される熱取得は

$$3,968,000 - 1,754,000 = 2,214,000 \text{ kJ/day}$$

壁と屋根の合計面積は

$$\begin{aligned} \pi \times 20^2 &= 1,257 \text{ m}^2 \\ 2\pi \times 20 \times 40 &= 5,027 \text{ m}^2 \\ \text{計} &= 6,284 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

1 m²あたりの熱取得は

$$\frac{2,214,000}{6,284} = 353 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{day}$$

3) パーライト粒の部分

パーライト粒の熱伝導率は 0.1 kJ/mKh であるから、

$$\frac{0.1}{t} \times 190 \times 24 = 353$$

$$\therefore t = 1.292 \text{ m}$$

通常は安全を見て壁の保冷材の厚さは 1.5m (パーライト粒) とする。

4) 外タンク・保冷材・内タンクの合計

$$\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} + \dots = \frac{1}{k} \text{ より}$$

$$\left(\frac{0.25}{12.5} + \frac{1.5}{0.1} + \frac{0.5}{12.5} \right)^{-1} \times 190 \times 24 = 302.8 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{day}$$

コンクリート壁体の効果を 0 とすれば、パーライト粒の保冷層では

$$\frac{0.1}{1.5} \times 190 \times 24 = 304 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{day}$$

従って各構成材を通過する温度変化は

$$\text{外壁では, } 12.5 \times \frac{1}{0.25} \times 24 \times T_1 = 302.8 \text{ より}$$

$$T_1 = 0.25^\circ$$

パーライト粒の保冷層では

$$0.1 \times \frac{1}{1.5} \times 24 \times T_2 = 302.8 \text{ より}$$

$$T_2 = 189.25^\circ$$

$$\text{内壁では } 12.5 \times \frac{1}{0.5} \times 24 \times T_3 = 302.8 \text{ より}$$

$$T_3 = 0.50^\circ$$

全温度変化は

$$189.25 + 0.50 + 0.25 = 190^\circ$$

となる。

外周防護壁についても、漏洩を考慮した主タンクとの間隔及び高さを提示し、これらの漏洩が液体の満た

ん時に起こることが多いことから、計算以上とすべきだとしている。

基礎については、地下水の処理及び凍結防止についてやや簡単に説明しており、ヒート・パイプまたは空隙による対策に触れてはいるが、物足りない点が見られる。

タンクの荷重分布は液体とタンク躯体及び保冷材を加えて、高さ40mで重量約20 t/m²と考えられ、圧力テストは26 t/m²とすべきだとしている。もちろんタンク壁体の基礎はさらに増加し、コンクリートの厚さ0.5mで壁体の重量は1 mあたり、48 t/m、厚さ0.25 mの場合は35 t/mを見るべきだとしている。この液体圧力及び重量の分布をいくらかでも差を縮めるため

に版としての曲げ及び地耐力の影響を考慮して内部タンクの厚さを2 mにする必要があるという。その他、火災時の焰の温度は1,350℃で、火陥からの距離と空気温度が表示されている。

実施すべき試験では、液に対する漏洩検査としての湛水試験、空気圧試験を必要としている。水の場合は設計荷重の1.25倍、ガスまたは空気圧の場合は1.2倍の値を採用することなどとしている。

5 章

タンクの構造設計について述べられているが、経験ある設計者にとっては大して困難なものではないとしている。

Fig. 5.3 Determination of pitch of tendons. (プレストレス・テンダンのピッチ計算図表)
注：crs；ピッチ（間隔）

Fig. 5.4 Movement sequence at bottom of tank wall. (タンク下部の動きと支持の過程)

Table 5.1 円筒及び底盤における変形と応力の求め方

円筒容器内の比重 w の液体の圧力の影響；
無拘束壁底部における半径方向の移動は、

$$E\delta = wh \frac{R^2}{t}$$

ピン状態壁底部の反力は、単位長さにつき

$$V_0 = 2D\lambda^3 \cdot wh \frac{R^2}{t}$$

円筒底部の単位長さあたり半径方向反力 V_0 の影響；
底部の半径方向の移動は、

$$E\delta = \frac{V_0}{2D\lambda^3}$$

底部での傾斜角は、

$$E\theta = \frac{V_0}{2D\lambda^3} = \lambda \times E\delta$$

$$\text{最大曲げモーメント} = 0.3225 \frac{V_0}{\lambda}$$

……底盤の上 $\frac{\pi}{4\lambda}$ の高さにおいて

底盤の縁における半径方向反力 V_0 の影響；
半径方向の移動は、

$$E\delta = \frac{RV_0}{t}(1-\nu)$$

注； $D = \frac{t^3}{12(1-\nu^2)}$ ， $\lambda = \left(\frac{3(1-\nu^2)}{R^2 t^2} \right)^{1/4}$ ，
 ν ：ポアソン比， E ：弾性係数

Table 5.2 鉛直方向 P C 鋼材

底盤からの高さ (m)	0	10	20	30	40
設計用曲げモーメント (kNm/m)	186 (基礎の拘束)	111 (合成力)	97.0 (温度応力)	97.7 (温度応力)	97.7 (温度応力)
曲げ応力度 (N/mm ²)	4.46	2.66	2.34	2.34	2.34
所要合圧縮力度 (N/mm ²)	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
全応力度 (N/mm ²)	5.16	3.36	3.04	3.04	3.04
死 (固定) 荷重 (N/mm ²)	0.96	0.72	0.48	0.24	0
所要残留プレストレス力度 (N/mm ²)	4.20	2.64	2.56	2.80	3.04
摩擦ロス 3%/10m	0.50	0.38	0.25	0.13	0
損失前のプレストレス力度 (N/mm ²)	4.70	3.02	2.81	2.93	3.04
損失前の実プレストレス力度 (N/mm ²)	4.70				4.70
その他の損失 (N/mm ²) (11.93%)	0.50				0.50
イニシャルプレストレス (N/mm ²)	5.20				5.20

イニシャルプレストレス力 (kN)	$5.2 \times \frac{1,000}{1,000} \times 500 = 2,600 \text{ kN/m}$
40 mm bar におけるイニシャルプレストレッシング	875 kN/m
ダブル配筋のピッチ	$2 \times 875 / 2,600 = 0.675 \text{ m}$
ジングル配筋のピッチ	0.338 m

Fig. 5.5 Moment at base of wall (pretress only).
(壁下部の曲げモーメント, プレストレスのみの場合)

Fig. 5.6 Moment at base of wall (fluid pressure only). (壁下部の曲げモーメント, 液圧のみの場合)

設計の基本について、極低温用コンクリート・タンクの規準は特にはないが、C P 110 及び B S 5337 の規格があり、鋼製タンクには、 -50°C までの B S 4741 と -197°C までの B S 5387 の規格が参考となるとしている。

内部タンク；

円周方向の引張力は、液の比重と高さと半径の積で求められ、壁の最小合圧縮力は最小合成圧縮応力度と壁厚との積で求められ、壁の最下部のプレストレス損失後の圧縮応力は上の2つの和となる。初期プレストレス力はコンクリートの強度特性値と弾性係数を仮定し、鋼より線の場合またはポストテンション鋼棒の場合の損失を計算する。同様に鋼より線及びポストテンション鋼棒の初期プレストレス力と P C 鋼材のピッチが求められる。

P C 鋼材の配置には、高さとプレストレス力との関係図から、使用する P C 鋼材の直径に対するピッチを求める計算図を示して便利である。

鉛直方向のプレストレスについて、基礎と壁の打継ぎ部ではスライド方式を採用し、プレストレス導入時に壁がスライドすることによって、打継ぎ部に大きな応力を発生しないよう考慮されており、これを分かりやすく図解している (Fig. 5.4)。導入以後はピン支持

とし、変位を防ぎ、わずかな回転のみを許すものとなる。また、プレストレスの導入による曲げ応力と同時に、使用時の温度こう配による曲げ応力が、壁と基礎の接合部の拘束によって生ずることの注意を喚起している。

構造解析において、曲げモーメント及びせん断力については、チモシェンコ、フリューガー、ロック、デン・ハルトック他の文献をまとめて Table 5.1 に示されている。なお、この表ではポアソン比が含まれているが実際にはあまり重要でないので、単に 0.2 としてよいとしている。

さらに、円周方向プレストレス、液圧、プレストレス導入時の曲げ応力、温度こう配による曲げ、鉛直方向合成応力及び P C 鋼材の決定について計算例を示している。

しかし、わが国における地震時の安全性を考慮した水平力を計算に入れるとやや複雑なものとなるので、上記の解にさらに横力を入れた検討が必要である。

外部タンク；

通常はイニシャルコストが低いので、外部タンク及び屋根ドームは炭素鋼で造られる。この章では外部タンクをコンクリートで造る場合についてのみ触れられている。

Fig. 5.7 Effects of winding stress.
(捻り応力の影響)

Fig. 5.8 Bending due to thermal gradient.
(温度差による曲げ変形, 半径方向膨張)

Table 5.3 Membrane forces and deformations. (メンブレンの荷重と変形)

Table 5.3: Membrane forces and deformations.

	Loading (荷重)			
	半径方向圧力 p	自重 p_s	等分布荷重 p_h	中心点荷重 P
荷重表示	(単位表面積あたり)	(単位表面積あたり)	(単位表面あたり)
	$\frac{pa}{2}$	$\frac{psa}{1 + \cos\phi}$	$\frac{p_h a}{2}$	$\frac{P}{2\pi a} \times \frac{1}{\sin^2\phi}$
	$\frac{pa}{2}$	$pa \left(\cos\phi - \frac{1}{1 + \cos\phi} \right) = p_s a' \cos\phi - N_\phi$	$p_h a (\cos^2\phi - \frac{1}{2}) = p_h a \cos^2\phi - N_\phi$	$-\frac{P}{2\pi a} \times \frac{1}{\sin\phi}$
	$\frac{pa^2}{Eh} \times \frac{\sin\phi}{2}$	$\frac{pa^2}{Eh} \times \sin\phi \left(\cos\phi - \frac{1}{1 + \cos\phi} \right)$	$\frac{p_h a^2}{Eh} \times \sin\phi (\cos^2\phi - \frac{1}{2})$	$-\frac{P}{2\pi Eh} \times \frac{1}{\sin\phi}$
回転 ϕ	0	$\frac{p_s a}{Eh} \times 2\sin\phi$	$\frac{p_h a}{Eh} \times 3\sin\phi \cos\phi$	0

Table 5.4 Membrane stresses and deformations for a thin dome. (薄肉ドームの場合のメンブレンの応力と変形)

	荷 重				
	半径方向圧力	半径方向圧力	自 重	等分布荷重	中心点荷重
	+1 kN/m ²	−14 kN/m ²	+3.6 kN/m ²	+1 kN/m ²	+50 kN
円 周 応 力 N_{ϕ} (kN/m)	+23.96	−335.39	+91.44	+23.96	0.75
リ ン グ 応 力 N_{θ} (kN/m)	+23.96	−335.39	+60.44	+13.27	−0.75
水 平 変 位 δ (m)	$\frac{+3586}{E}$	$\frac{-50204}{E}$	$\frac{+9067}{E}$	$\frac{+1198}{E}$	$\frac{+113}{E}$
廻 転 ϕ (rad)	0	0	$\frac{+1080}{E}$	$\frac{+397}{E}$	0
	最大圧縮力		最大引張力		
N_{ϕ} (kN/m)	+130.11		−243.20		
N_{θ} (kN/m)	+96.72		−275.70		

Table 5.5 Membrane forces and deformations for a thick dome. (厚肉ドームの場合のメンブレンの応力と変形)

	荷 重				
	半径方向圧力	半径方向圧力	自 重	等分布荷重	中心点荷重
	+1 kN/m ²	−14 kN/m ²	$\frac{+7.2 \text{ kN/m}^2}{(\text{on inner dome})}$		+50 kN
N_{ϕ} (kN/m)	+23.96	−335.39	+182.88	+23.96	+0.75
N_{θ} (kN/m)	+23.96	−335.39	+120.88	+13.27	−0.75
δ	$+1793/E$	$-25102/E$	$+9067/E$	$+599/E$	$+57/E$
ϕ	0	0	$+1080/E$	$+199/E$	0

最大圧縮力: 221.55 kN/m. 最大引張力: 211.26 kN/m.

屋根ドームは浅い円弧形シェルで、内圧に耐えかつ耐火性を持たせるため、鉄板の上にコンクリートでライニングしたものが用いられる。スパンに対する高さの比は6〜10程度である。計算方法は多くの参考書にあるので、ここでは単に引用したとしている。

力と変形の公式は、半径方向圧力、自重、積載荷重及び中央集中荷重とこれに対応する軸力、水平方向変位及び回転について表示されているほか、薄肉及び厚肉ドームの計算例が表示されている。

その他壁、基礎についても一応の計算が示されている。ただし前にも述べたように耐震的な計算がなされていないので、わが国で用いる場合にはこれに地震時

の解析を加える必要がある。

防護壁について、災害時に液が動き出した時の速度、 $\sqrt{2gh}$ から壁に掛かる圧力の計算が示されている。また、火災時の温度の推定が図示されていて参考となる (Fig. 5.22)。

透気性について；液体が多孔性物質を通過する場合は、表面積、透過する深さまたは壁厚、液体の圧力及び粘度、並びに抵抗によって決まり、ダルシィの法則に従うとしている。即ち通過割合 $Q(\text{cm}^3/\text{s})$ は $kAp/\nu l$ で表わされる。ここに k は物質の透過係数 (cm^2)、 A は表面積(cm^2)、 p は壁を通過する圧力の差(bar)、 ν は粘度 (センチポアズ) 及び l は壁厚を示す。この抵

Fig. 5.22 Effects of fire on guard wall. (防護壁に及ぼす火焰の影響)

抗を増すためには、コンクリートを湿潤にしておくのがよいとしている。

6 章

その他の適用について簡単な箇条書きで述べられているほか、コンクリート船について“コントランスター”及び“ダイタム”の断面が載せられている (Fig. 6.2)。

付録では、主として使用する力、粘度、温度、熱、仕事量、エネルギー等の単位の換算表、低温工学において特に使用する潜熱、比熱、熱伝導率の単位の換算表、天然ガスの組成例、液状及び気体としての容積の換算表が最初にある。液化ガスの物理的性質、液化臨界温度と圧力、ガス体及び保冷材の性質、蒸発量並びに保冷材の性質等が、設計資料として載せられていて便利である (末尾 Charts 6~14参照)。

あとがき

以上本書の概要を紹介した結果を以下にまとめる。

液化ガス、特に LNG 貯蔵タンクにプレストレスト・コンクリートを採用する場合に有用であり、かなり広範に触れられている参考書として他に類がない。内容的に不足な点はあるが、これは各専門分野にとって個々に必要な文献を調査すべきで、各方面の掛わり合いを知るためには本書の通読によって他の専門分野の範囲まで知るには手頃な手引書である。なお、構造設計面では耐震的配慮がなされていないので、例えば日本建築学会で審議中の「容器構造設計指針(案)」が参考となろう。また本書では主として地上タンクについて述べられており、地下タンクについては触れられていないので、この辺については日本瓦斯協会の「LNG 地下式貯槽指針」を閲読することが望ましい。しかし LNG 全般についての理解を深め、多角的に経済性、安全性を検討するには、本書が十分役立つ技術叢書として推奨されると考える。

Fig. 6.2 Details of 'Dytam' LNG carrier. (LNG タンカー "ダイタム" 号の詳細)

Chart 6: Conversion factors for specific heat. (比熱換算表)

	1 J/kg °C =	1 kJ/kg °C =	1 cal/g °C =	1 Btu/lb °F =
J/kg °C	1	1 × 10 ³	4.19 × 10 ³	4.19 × 10 ³
kJ/kg °C	1 × 10 ⁻³	1	4.19	4.19
cal/g °C	239 × 10 ⁻⁶	0.239	1	1
Btu/lb °F	239 × 10 ⁻⁶	0.239	1	1

Chart 7: Conversion factors for thermal conductivity. (熱伝導率換算表)

	1 W/m °C (or 1 J/m °C s) =	1 W/mm °C (or J/mm °C s) =	1 kcal/m h °C (or 1 cal/mm h °C) =	1 Btu ft/ft² h °F =	1 Btu in/ft² h °F =
W/m °C (or J/m °C s)	1	1 × 10 ⁻³	1.163	1.731	0.1442
W/mm °C (or J/mm °C s)	1 × 10 ⁻³	1	1.163 × 10 ⁻³	1.731 × 10 ⁻³	144 × 10 ⁻⁶
kcal/m h °C (or cal/mm h °C)	0.8598	859.8	1	1.488	0.1240
Btu ft/ft² h °F	0.5778	577.8	0.6720	1	0.0833
Btu of/ft² h °F	6.933	6.933 × 10 ³	8.064	12	1

Chart 8: Some compositions of natural gas. (天然ガスの組成例)

Constituents	Source							Typical design range
	North Sea	Algeria	Libya	USA	Alaska	Sakhalien	Lacq	
Methane: CH ₄	94	84—88	67—70	89	95.6	97.4	98.8	83—99
Ethane: C ₂ H ₆	4	8—11	15—20	6	2.3	1.5	0.9	1—13
Propane: C ₃ H ₈	1	2.4—3	8.7—10	1	1.3	0.1	0.1	0.1—3
Butanes: C ₄ H ₁₀	1	0.8—1.1	3—3.5	0	0.1	0	0	0.2—1
Pentanes: C ₅ H ₁₂	1	0.1—0.7	0.5—0.7	1	0	0	0	0—1
Nitrogen: N ₂	1	0.3—0.7	0—0.9	3	0.6	1.0	0.2	0—1

- 注 1) 単位は容積%
2) 組成は前処理後の結果を示す
3) 値は公表されている文献にある分析値である
4) どの出所のガスも時として組成の大きなばらつきを示す
5) 重いガスの成分が高いものは反転 (roll over) 傾向が増す

Chart 10: Physical properties of liquefied gases. (液化ガスの物理的性質)

Substance 液化ガス	Formula 化学式	Critical temperature 臨界温度		Critical pressure 臨界圧力	Density of liquid 液の比重		Melting point 融点		Boiling point 沸点		Latent heat of boiling 蒸発潜熱
		(°C)	(K)		at boiling point 沸点	(tonne/m³)	(°C)	(K)	(°C)	(K)	
Acetylene (ethylene) (アセチレン)	C ₂ H ₂	35.2	308.4	61.4	0.621	—	— 81.0*	192.2	+ 84.0	189.2	651
Ammonia (アンモニア)	NH ₃	132.4	405.6	112.8	0.682	0.610	— 77.7	195.5	— 33.4	239.8	1369
n-Butane (n-ブタン)	C ₄ H ₁₀	152.0	425.2	38.0	0.602	0.579	— 138.4	134.8	— 0.5	272.7	385
iso-Butane (イソブタン)	C ₄ H ₁₀	135.0	408.2	36.5	0.595	0.557	— 159.6	113.6	— 11.7	261.5	366
Carbon dioxide (炭酸ガス)	CO ₂	31.0	304.2	73.8	0.178	0.775	— 111.2†	162.0†	— 78.5	194.7	† 571—solid to vapour 364—liquid to vapour
Carbon monoxide (一酸化炭素)	CO	— 140.2	133.0	35.0	0.789	—	— 207.0	66.2	— 191.5	81.7	216
Ethane (エタン)	C ₂ H ₆	32.3	305.5	48.8	0.547	—	— 183.2	90.0	— 88.6	174.6	489
Ethylene (エチレン)	C ₂ H ₄	9.2	282.4	50.3	0.568	—	— 169.1	104.01	— 103.7	169.5	483
Hydrogen (水素)	H ₂	— 240.2	33.0	12.9	0.071	—	— 259.2	14.0	— 252.8	20.4	446
Methane (LNG) (メタン)	CH ₄	— 82.6	190.6	46.0	0.422 (pure) to 0.48 (LNG)	—	— 182.5	90.7	— 161.5	111.7	510
Methanol (メタノール)	CH ₃ OH	239.4	512.6	81.0	0.747	0.789	— 97.7	175.5	+ 64.7	337.9	1100
Nitrogen (窒素)	N ₂	— 147.0	126.2	33.9	0.810	—	— 210.0	63.2	— 195.8	77.4	199
Oxygen (酸素)	O ₂	— 118.6	154.6	50.4	1.141	—	— 218.8	54.2	— 183.0	90.2	213
n-Pentane (n-ペンタン)	C ₅ H ₁₂	196.5	469.7	33.7	0.610	0.626	— 129.7	143.5	+ 36.0	309.2	357
iso-Pentane (イソ-ペンタン)	C ₅ H ₁₂	187.2	460.4	33.8	0.612	0.620	— 159.9	113.3	+ 27.9	301.1	342
Propane (プロパン)	C ₃ H ₈	96.7	369.9	42.5	0.583	0.501	— 187.7	85.5	— 42.1	231.1	426
Propylene (プロピレン)	C ₃ H ₆	91.8	365.0	46.2	0.614	0.514	— 185.3	87.9	— 47.7	225.5	438
Water (水)	H ₂ O	374.0	647.2	220.5	0.958	0.998	0	273.2	+ 100.0	373.2	2257

注 1) * 印アセチレンの融点は3重点を示し、固相及び液相が共存する。

2) † 印炭酸ガスは固相から直接気化。すなわち昇華する。融点と潜熱の双方が示されている。臨界温度及び圧力を除く値は圧力 1 bar について示されている。

Chart 11: Physical properties of gases and liquefied gases. (ガス及び液化ガスの物理的性質)

	比 熱 (定圧下) (kJ/kg °C)	発 熱 量 (MJ/m³)	相 対 蒸 気 密 度†		容積減小率*	粘 度	
			沸 点	常 常 温 圧		常 常 温 圧 (Ns/m²)	沸 点 (Ns/m²)
Acetylene (ethyne)	1.66	55.0	1.364	0.899	1/560	9.35×10^{-6}	approx 140×10^{-6}
Ammonia	2.08	16.2	0.704	0.588	1/950	9.18×10^{-6}	174×10^{-6}
n-Butane	1.63	121.8	2.112	2.006	1/250	approx 8.5×10^{-6}	241×10^{-6}
iso-Butane	1.62	121.4	2.203	2.006	1/240	approx 8.5×10^{-6}	239×10^{-6}
Carbon dioxide	0.833	—	2.240	1.519	1/630	14.0×10^{-6}	138×10^{-6}
Carbon monoxide	1.04	12.0	3.400	0.967	1/670	16.6×10^{-6}	171×10^{-6}
Ethane	1.71	66.4	1.707	1.038	1/430	9.1×10^{-6}	162×10^{-6}
Ethylene	1.51	59.7	1.640	0.968	1/480	9.70×10^{-6}	125×10^{-6}
Hydrygen	14.3	12.1	0.985	0.070	1/830	8.35×10^{-6}	12.3×10^{-6}
Methane (LNG)	2.21	37.7	1.424	0.554	1/620 (pure) 1/630(LNG)	10.3×10^{-6}	142×10^{-6}
Methanol	1.35	(32.3)	0.940	(1.106)	—	—	* 600×10^{-6}
Nitrogen	1.04	—	3.588	0.967	1/690	16.7×10^{-6}	141×10^{-6}
Oxygen	0.916	—	3.515	1.104	1/800	19.2×10^{-6}	166×10^{-6}
n-Pentane	1.62	149.7	2.312	(2.490)	—	—	* 205×10^{-6}
iso-Pentane	1.60	149.4	2.375	(2.490)	—	—	* 216×10^{-6}
Propane	1.62	93.9	1.891	1.522	1/310	8.0×10^{-6}	216×10^{-6}
Propylene	1.48	87.1	1.849	1.452	1/350	8.3×10^{-6}	approx 200×10^{-6}
Water	1.86	—	0.479	(0.652)	—	—	* 1000×10^{-6}

注 1) ことわりのない限り、常温・常圧 (STP) での乾燥ガスとしての値を示す；STP 15°C, 1013.25 mbar
2) * 印容積減小率は、常温常圧下のガスの密度に対する沸点の液の容積比率を示すメタノール、ペンタン、及び水は常温、常圧下の値を示す。
これらの液体の粘度は常温常圧下の値で示されている。
3) † 印相対蒸気密度は常温常圧下の空気の密度に対する比で示されている。
実際の比重は表の値に1,293を乗じて得られる。

Chart 12: Relationship between liquefaction temperature and pressure of cryogenic liquids.
(極低温下の液化温度と圧力の関係)

Chart 13: Properties of insulants. (保冷材 (断熱材) の性質)

Properties	発泡ガラス	パーラ イト粒	パーライト コンクリート	発泡ポリスチレン		発 泡 ポ リ ウ レ タ ン	
密 度 (kg/m³)	144	30—50	720	16	28	30	300
平 均 熱 容 量 (W/m °C)	0.04	0.029	0.092	0.04	0.04	0.025	0.05
圧 縮 強 度 (N/mm²)	0.69	—	1.20	0.08	0.25	0.20	2.30
引 張 強 度 (N/mm²)	0.45	—	0.10	0.22	0.24	0.35	2.40
曲 げ 強 度 (N/mm²)	0.52	—	0.21	0.17	0.31	0.38	3.40
熱 膨 張 率 (strain/°C)	8.3×10^{-6}	—	—	72×10^{-6}	72×10^{-6}	—	—

注 ; 1) 値は代表的なものを示す。他のデータはメーカーの資料で得られる。
2) コンクリートの熱伝導率は約 3.5W/m°C (=3.0 kcal/m h °C)。
3) 氷の熱伝導率は約 6 W/m °C (=5.2 kcal/m h °C)。
4) W/m °C を kJ/m °C h に換算するには表の値を 3.6 倍する。

Chart 14: Data for safety assessment.

蒸発量 (LNG)

1 m³の乾燥した土で	1 m³
1 m³の湿った土で	3 m³
1 m³の水で	4 m³
1 m³の空気常 (温常圧)	100×10 ⁻⁶ m³

- 土またはコンクリートの上に洩れた LNG は、最初に約 2.5m³/min/m² (表面) の割合で蒸発し、安定状態で0.25m³に減少する。
- LNG の燃焼割合は安定状態で深さ 5～15 mm/min である。

Properties of gases (ガスの性質)

Substance (ガ ス)	Relative vapour density* 比 重 比	Explosive limits (% by volume) 爆発限界 (% vol)		Flash point (°C) 引 火 点	Ignition temperature (°C) 燃 焼 温 度	Maximum allowable concentration (parts per million) 最大濃度(1/10 ⁶)
		Lower	Upper			
Acetaldehyde	1.52	4	55	- 38	185	200
Ammonia	0.588	14	28	Indefinite	652	50
Butadiene	1.88	2	11.5	- 60	450	1000
Butane	2.01	1.8	8.5	- 60	406	Not applicable
Ethylene	0.968	2.7	28.5	Very low	450	5500
Ethylene oxide	1.52	3	100	- 57	429	50
Methane	0.554	5.3	14	Very low	595	Not applicable
Methanol	1.106	6	36.5	+ 10	470	1000
Propane	1.522	2.1	9.5	-105	470	Not applicable
Vinyl chloride	2.20	4	22	- 78	472	500

注：* 関係比重は常温常圧の空気に対するガスの比重比率，真比重は上の値を1.293倍する。