

プレストレスト コンクリート LNG タンカーの試設計について*

通商産業省鉱山石炭局
液化天然ガス研究委員会

1. 緒 言

昭和 46 年度液化天然ガス研究委員会において、現在の LNG コストの主部分部分を占める海上輸送費を合理化するために、現在のタンカー形式にとらわれることなく、トータル・システムの中での新しい輸送方式を開発する道を示唆できるような幅広い考えのもとに、将来の海上輸送方式について夢を追いかけることを試みた。

その結果、PC（プレストレスト コンクリート）で LNG タンカーあるいは LNG バージを造り、これを集団で無線繰縦する方式が最も有利であろうという結論に達した。しかし、本方式は技術的に否定的な欠陥はないが、これを実現するためには、この種の技術の安全性確保という本質から考えて、今後多数の基礎研究の実施と同時に、段階的実物実験あるいはモデルテストによる実証の過程を踏むことが必要であること、およびこれらの実験、テストは一企業でよくなしうるものではないので国家的見地より採り上げられるべき問題であろうと思考された。

2. プレストレスト コンクリートを LNG タンカーに採用した理由

前年度の委員会でも報告されているように、PC を LNG タンカーに採用した場合に次のような多くの利点がある。

1) 従来のコンクリート船は、船体自体の重量が大で、載貨重量が制限されるという短所があるが、LNG は比重が小さい (0.43) 容積型カーゴであるから、LNG タンク本体あるいは船体自体をもコンクリートで造っても載貨重量が制限されるような心配はない。特に従来の RC (鉄筋コンクリート) 構造と異なって、PC は格段の強度を有するため、軽くすることができ、コンクリート船の持つ一般的な短所は完全に補うことができる。

2) RC ではひび割れを解決できなかったが、PC に

おいてはひび割れを防止することが可能となり、各種の液体貯蔵タンクが造られるようになった。水タンクとして最大なものは、Washington に直径 120 m のものが、LNG タンクとしては New York に直径 86 m のものがある。

3) 船舶は陸上タンクと異なり、航行中波浪により船体に繰返し荷重を受けるが、このような繰返し荷重に対しても、PC は鉄道橋梁、鉄道まくらぎ等の構造物としての実績が豊富にある。

4) 設計許容応力あたりのコストは、PCの方が鋼より安価である。

5) PC は現在多くの陸上タンクに使用されているように、低温脆性がないため、PC で船体を造った場合は、既存の LPG タンカーのように、船体自体を 2 次障壁 (2 次障壁とは 1 次障壁であるタンクから低温の LNG がもれた場合に、これが船体を冷却して船体が低温脆性により破壊しないように安全のために設ける 2 次タンクである) とすることが可能で、現在 LNG タンカーの船価の最大要因の一つとなっている独立した 2 次障壁は不要となり、かなりのコストダウンが期待される。

6) 船体ならびにタンクを PC で造る場合は、特殊金属の溶接等の必要がなく、コンクリートは容易に打継ぎができるので、高度な技能を有する作業員を必要とせず、所要工数もはるかに少なくすむ。

7) PC タンカーを建造するには、必ずしも造船所のような重装備の船台やドックを使用しなくてもよく、建造場所の制限が少ない。

8) コンクリートは海水に対して、大きい耐久性を有し、古くから多くの海洋構造物に使用されてきている。

9) 海外でも、PC タンカーに関する計画がある。

文 献

- 1) R.G. Morgan : Concrete Ships, Federation Internationale de la Precontrainte Symposium on Concrete Sea Structure.
- 2) The Marine Transportation and Storage of Cryogenic Liquids, The International Gas Storage and Transport Co.

* 昭和 47 年度液化天然ガス研究委員会報告より抜粋

3. PC の低温特性と海洋構造物および LNG タンクへの応用例

本項については、文献の抄訳により紹介する。

(1) PC の低温特性

文 献

- 3) B.E. Eakin, W.G. Bair, J.J. Closner, R. Maroti : Below Ground Storage of LNG in Prestressed Concrete Tanks, Institute of Gas Technology Report No. 8, July, 1963.

a) コンクリートの低温特性について

- 1) ヤング率は、水分を含んでいると 24°C ~ -157°C 間で 50% 増加するが、乾燥状態では変化しない。
- 2) 線膨張係数は 24°C ~ -157°C 間で $8.1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ で 9% Ni 鋼の 9×10^{-6} , アルミニウムの 2×10^{-5} より小さい。
- 3) 湿ったコンクリートでは、-157°C で圧縮強度は常温の 3 倍、引張強度は 2 倍となる。乾燥したコンクリートではほとんど変化しない。
- 4) 熱伝導率は、34°C ~ -107°C 間において、氷点で最低値 $2.4 \text{ kcal/m}\cdot\text{hr}\cdot^{\circ}\text{C}$ となり、-107°C で最大値 $3.1 \text{ kcal/m}\cdot\text{hr}\cdot^{\circ}\text{C}$ となる。

b) 鋼線の低温特性について

- 1) 鋼線の引張強度は表-1 のとおりで (単位: kg/mm^2), 温度の影響やノッチの有無による変化はないとみてよい。

表-1

	常 温	-196°C
ノッチなし	170	169
ノッチあり	195~233	170~247

- 2) 鋼線の衝撃強さは、高張力高炭素鋼線でみると、常温で $0.285 \text{ kg}\cdot\text{m}$ であるのに対して、-196°C では 0.163 kg と低下している。

しかし、PC の中では鋼線はコンクリートで覆われているので、PC 構造物に衝撃力が加わっても緩和され、鋼線自体には衝撃力として働かない。

また、たとえ鋼線が切れても、各鋼線は互いに独立しているので、近接した鋼線に応力集中を生ずることはないから、鋼板のようなクラックの伝播現象はない。

文 献

- 4) A.F. Milovanov : Prestressed Concrete Structure under Extreme Temperatures, FIP Proceedings of the Sixth Congress 1970

コンクリートおよび PC 鋼線について低温時の性質は次のようである。

- a) コンクリート 圧縮強度は -60°C までの温度低下で増加する。20°C のときの圧縮強度を 1.0 とする

と、-30°C, -60°C でそれぞれ 1.3, 1.5 程度となる。引張強度も温度低下とともに増大し、-60°C では 20°C のときの引張強度の約 2.2 倍となる。

弾性係数は -60°C では 20°C での値の約 1.3 倍となる。低温時のクリープひずみは、常温での値より小さくなる。

- b) PC 鋼線 -30°C 程度までの範囲では、PC 鋼線の機械的性質の低下は特に認められない。これ以下の温度では引張強度および降伏応力の増加が認められるが、破断伸びは減少する。-196°C で PC 鋼線および PC 鋼より線の引張強度は、それぞれ 23%, 12% 増加したが、伸びは常温時 10% のものが、-196°C では 7% に低下した。

- c) PC 構造物挙動 -30°C までの温度は、PC 構造物の強度、ひび割れ強度、変形等に対して特別な影響は与えない。-40°C, -60°C まで冷却しても、PC 構造物の強度、ひび割れにはまったく影響は認められないが、曲げ部材の曲げ剛性は、常温時に比較して 10% 増となる。

-5°C ~ -60°C 間での温度変化は凍結融解と同じく、非可逆性ひずみ増加を生じマイクロクラックを生ぜしめる。コンクリートと鋼材との温度ひずみ差による応力が生じコンクリートかむりを損傷させたり、PC 鋼材に沿ってコンクリートにマイクロクラックを生ぜしめたりする。

-40°C, -60°C まで冷却し、常温で融解させると、曲げ強度、ひび割れ荷重、曲げ剛性が、それぞれ 5%, 20% および 10% 低下する。

PC 構造物の挙動に対する低温の影響を減少させるためには、温度条件、環境条件を考慮に入れて、ひび割れ発生、ひび割れ幅についての検討を実施する必要がある。強度、ひび割れ、変形等を計算するに当たって、材料強度の変化、ヤング率の変化および温度ひずみ等凍結時および融解時について十分考慮しなければならない。

文 献

- 5) 榎戸源則 : LNG タンク, コンクリートジャーナル Vol. 10, No. 6. 1972.

- a) 圧縮強度および引張強度 低温時コンクリートの圧縮強度、引張強度はともに増加し、-130°C で圧縮強度は常温時の約 3 倍、引張強度は約 2.5 倍になる。

- b) 弾性係数 温度低下に伴う弾性係数の増加傾向は、強度の場合とほとんど同じである。

- c) 線膨張係数 温度低下により線膨張係数は低下する。-5°C ~ 160°C では約 $7.7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ である。

- d) コンクリートクリープ -10°C 以下の温度では、載荷後 7 日目に 20°C における値の約 80% のク

報 告

リーブを生じ、その後はほとんど進行しない。極低温時のコンクリートクリープは常温時のそれと本質的に相違はないものと考えられる。

(2) PC の応用例

文 献

- 6) F. Hansen (General Reporter): Utilization for Structures in and under the Sea, FIP Symposium on Concrete Sea Structures, Tbilisi, 1972.

Turner, Corlett の論文は、LNG の運搬と貯蔵とに関するものであって、PCバージと曳船との組合せが最も経済的であるとの結論を得ている。バージは運搬目的のために設計されたものであるが、必要があれば海上の貯蔵用タンクとしても利用可能である。4000 マイルを往復する場合、20000 t 積みのバージ2隻と、8000 PS の曳船1隻の組合せが提示された例の中で最もよい結果を与えている。

船体は二重船殻構造であって、設計には同じ寸法の鋼船に対して仮定される曲げモーメントとねじりモーメントをもとにして計算が進められている。PCの設計では、海中部分に対しては引張応力が起らないように、あるいは、まれにしか起らないような応力状態で、上甲板には 35 kg/cm^2 の引張応力を許容している。

船体はそれぞれ 1.86 m^2 のプレキャスト プレテンションパネルをドックにおいてポストテンション方式で結合することで建造される。

船体は多くの分割された貯蔵タンクからなり、断熱材およびライニング材がこれに内張りされる。船体が完成するとドックから出され、次の船体の建造が始められる。バージのドック内工事は約10か月に1隻の割合で進められ、あらゆる艤装工事を含めて18か月で完成すると仮定されている。

文 献

- 7) Ben C. Gerwick, Jr. (General Reporter): Considerations and Problem Areas in Design and Construction of Concrete Sea Structure, FIP Symposium on Sea Structures, Tbilisi, 1972.

海水に対する耐久性について多くの論文が提出され、最大の問題はコンクリート自体よりも、酸素と塩素イオン侵入による鋼材の電気化学的腐食であるとされている。コンクリートの海水に対する抵抗は3-カルシウム・アルミネート含有量に関係があり、これを5~6%に制限するのがよいとされている。Cornet は酸化クロム (CrO_3) 添加剤の効果について論じている。

Kudzis は、プレストレスト ポリマーコンクリートについて述べ、水溶性ポリマーの添加によりコンクリートの耐久性などを改善できると報告している。この種の新しいコンクリートでは、圧縮強度 1200 kg/cm^2 、引張強度 120 kg/cm^2 の強度のものまで造られ、水密性にもす

ぐれており、海水に対する耐久性も非常に大きいものである。

○ 陸上 LNG タンクの文献

- 8) W.F. Morse : LNG Storage in Buried Prestressed Concrete Tank, American Gas Journal, Dec. 1962.
9) LNG Growth Prospects Look Better, The Oil and Gas Journal, Dec. 16, 1963.
10) V. Aagaad: Liquefied Natural Gas Storage, Barcelona, Preload, Bulletin T-39.
11) J.J. Closner : LNG Storage with Prestressed Concrete : The First International Conference on LNG, 1968.
12) J.J. Closner : Very Large Prestressed Concrete Tanks for LNG Storage : The Second International Conference on LNG, 1970.
13) G.H. Ewing, E.L. Smith : Design, Construction and Operation at a LNG Peakshaving Plant (出所は文献12)と同じ).
14) A.R. Khan, B.E. Eakin : 液化天然ガス貯蔵方式の最近の発展, 石油と石油化学, 第10巻2月号.
15) Prestressed Concrete for LNG Storage and Protection Systems, Preload Technology Incorporated.

○ その他の文献

- 16) LNG Information Book, July 1968
17) G.E. Monfore, A.E. Lentz : Physical Properties of Concrete at Very Low Temperatures : Journal of the PCA Research and Development Laboratories, May 1962.
18) R.G. Morgan : Concrete in Shipbuilding : Proceedings of the International Marine & Shipping Conference, 1969, Inst. Marine E.
19) A.J. Harris : Seadrome : Report of Harris & Sutherland (127 Victoria St. London, SW 11), 1970.
20) B.C. Gerwick : Prestressing at Sea, Construction News, July 23rd, 1970, pp. 18~20.

4. プレストレスト コンクリート LNG タンカーの基本設計

PC-LNG タンカーの試設計の方針としては、一応計算上載貨容積約 130000 m^3 程度、垂線間長 (L_{pp}) 約 260 m 、航海速力約 16 ノット の3項目だけを初期条件とし、その他の主要目はPCの強度、板厚、比重を考慮して適宜決定することとした。最終的な数値は次のとおりである。

$$L_{pp} \times B \times D = 260.00 \text{ m} \times 42.40 \text{ m} \times 23.50 \text{ m}$$

構造配置に関しては、LNG という危険物の運搬船であることを考慮して船尾機関とし、貨物タンクの前後端に空所(コファダム)を配置した。この点に関してはPCが漏洩ガスに対して有効なガス障壁となりうるかどうか未解決であるので、当面はタンク内面に金属性薄板(メンブレン)を設ける必要があると思われる。

船殻構造については下記事項を配慮した。

- 1) 船底部、船側部は二重船殻構造とする。

2) 二重船殻の幅は、① 耐衝突・耐座礁、② アクセシビリティ(点検・交通)に対して充分なものとする。

この点に関しては、IMCO(政府間海事協議機構:国連の下部組織)が目下検討中であるガスタンカー統一規則案(DE IX/4/3)中の Type II Ship(LNG 運搬船はこのタイプに相当する)で規定している船側の幅 760 mm 以上、二重底高さ B/15 あるいは 2m のうち小さい方以上という数値およびコンクリートの厚さを考慮して

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{船側の幅} = 1500 \text{ mm} \\ \text{二重底高さ} = 2500 \text{ mm} \end{array} \right.$$

とした。ただし同コード案は、船首部 0.3L 間では二重底高さを B/15(本船の場合約 2800 mm)以上とす旨提案されているので、PC-LNG タンカーが実際に建造される段階においては、No. 1 および No. 2 タンク部分の二重底は高くする必要がでてくるかも知れない。

3) Stability: タンク幅が 36.4 m と相当大きいので、自由表面による GM の見掛けの減少を抑制するため、および横強度の維持のため、上甲板はアーチ型とし、その下方に Swash Platings を設けることとした(船体中心線上に縦隔壁を設ける方法も有効である)。

4) タンク長さに関しては、液体貨物の動揺と船体運動の同調を避けるため、 $0.15L = 39.00 \text{ m}$ 以下を考えて、1 タンク約 36.00 m とし、5 タンクとした。

船殻構造強度(静的強度)については、以下に述べる手法で検討した。上記 1)~4) の諸点を考慮して適当にコンクリート厚さを決定し、船殻重量を推定し吃水を求めた後、NK(日本海事協会)で規定している海象条件に対して縦曲げモーメントおよびせん断力を計算した。

これらの外荷重のもとに、船底水圧、船側水圧および上甲板荷重(いずれも NK 規則をベースとした)を考慮して横強度を検討し、コンクリート板の厚さを修正した。

この方法を繰返して最終的に図-4 に示す構造寸法を得た(吃水 $d = 20.00 \text{ m}$ 、方形肥瘠係数 $Cb = 0.95$)。Cb はコンクリートブロック工法を考慮して大き目の値とした。

その他の強度、すなわち座礁および衝突に対する崩壊強度、疲労強度、局部強度、衝撃強度に対しては、PC 製の大型船による実績が皆無であることから、今後材料テスト、モデルテスト、プロトタイプテスト等により充分解明していく必要がある。

なお、本船の乾げん(上甲板上面から満載吃水線までの垂直距離)は約 3.5 m であるが、この値は規則に定められる乾げんを確保する必要がある。さらにこの乾げんの値は、前述 2) 項の IMCO コードが制定された時点において、かなり過酷な損傷時復元性が規定されるも

のと思われるので、船の深さを現状より増す必要が生じるかも知れない。

以下、基本設計に当たって考慮すべき事項、すなわち、配置、強度、乾げん、復元性等ひととおり検討したが、海上輸送システムとしての安全評価は何も行っていない。

この点に関しては、現在 IMCO および各船級協会(NK 等)で想定している鋼製 LNGT と比較して少なくとも同じレベルの安全性を維持する必要があると思われる。将来の課題であろう。

5. プレストレスト コンクリート LNG タンカーの船体構造設計

本設計の目的は、LNG タンカーの船体を PC によって建造する可能性を確かめるために行ったものである。

したがって、船体の断面については、図-1, 2 に示されるそれぞれ曲げモーメントとせん断力について検討するとともに、図-3 に示す荷重に対して、横方向の応力度の検討を行って、断面形状を定めたものである。現状においては、コンクリート船の設計基準は全くないので、断面の検討は下記の条件と許容応力度を設定して弾性計算により実施した。図-4 は、これによる試設計図

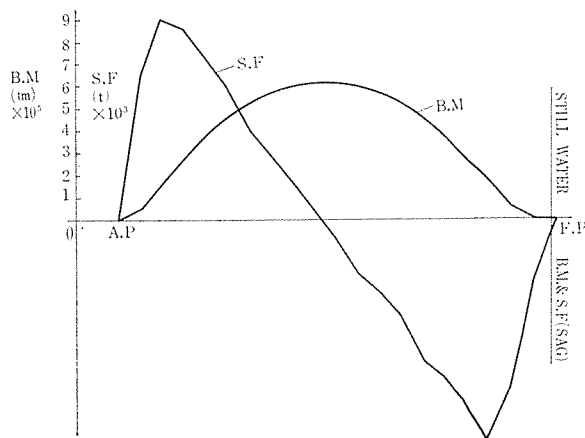


図-1 静水中の縦曲げモーメントならびにせん断力図

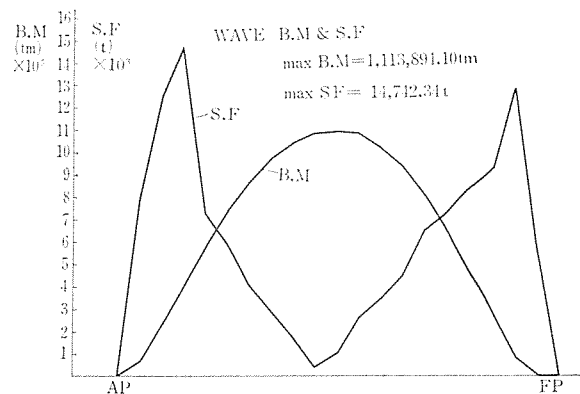


図-2 波浪中の縦曲げモーメントならびにせん断力図

報 告

であり、図-5 は建造ドックを示す。

1) プレストレッシングの度合：図-1, 2 の断面力、
図-3 の荷重に対してフルプレストレス

2) 使用材料規格と許容応力

材 料	規 格	許 容 応 力 度
コンクリート	$T28=400 \text{ kg/cm}^2$	130 kg/cm^2 (圧 縮) 0 kg/cm^2 (引 張) 9 kg/cm^2 (斜 引 張)
鉄 筋	SD 35 (JIS)	1 600 kg/cm^2
P C 鋼 材	SWPR 7 B (JIS)	11 400 kg/cm^2

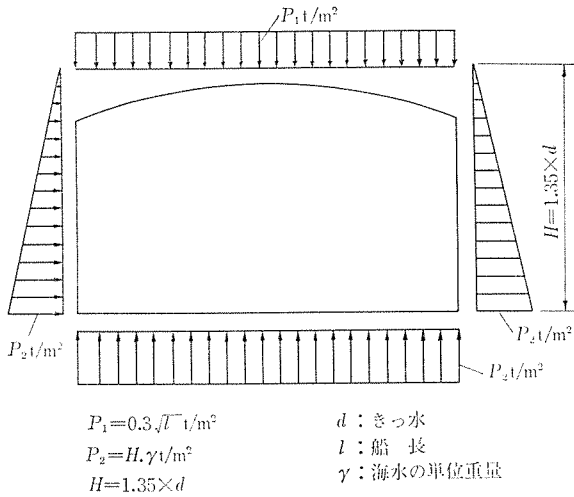


図-3 横荷重分布図

3) コンクリートのクリープ、乾燥収縮、P C 鋼材の
リラクゼーションその他については、土木学会プレスト
レスト コンクリート設計施工指針を準用した。

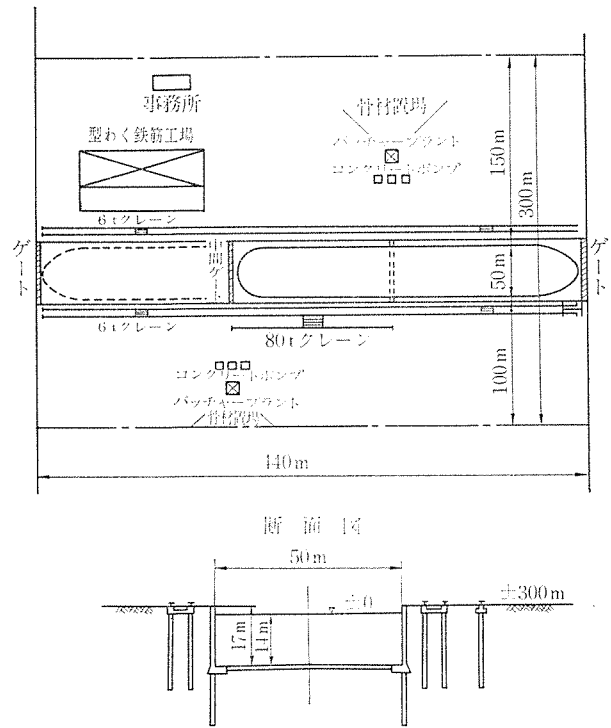


図-5 ドック概略配置図

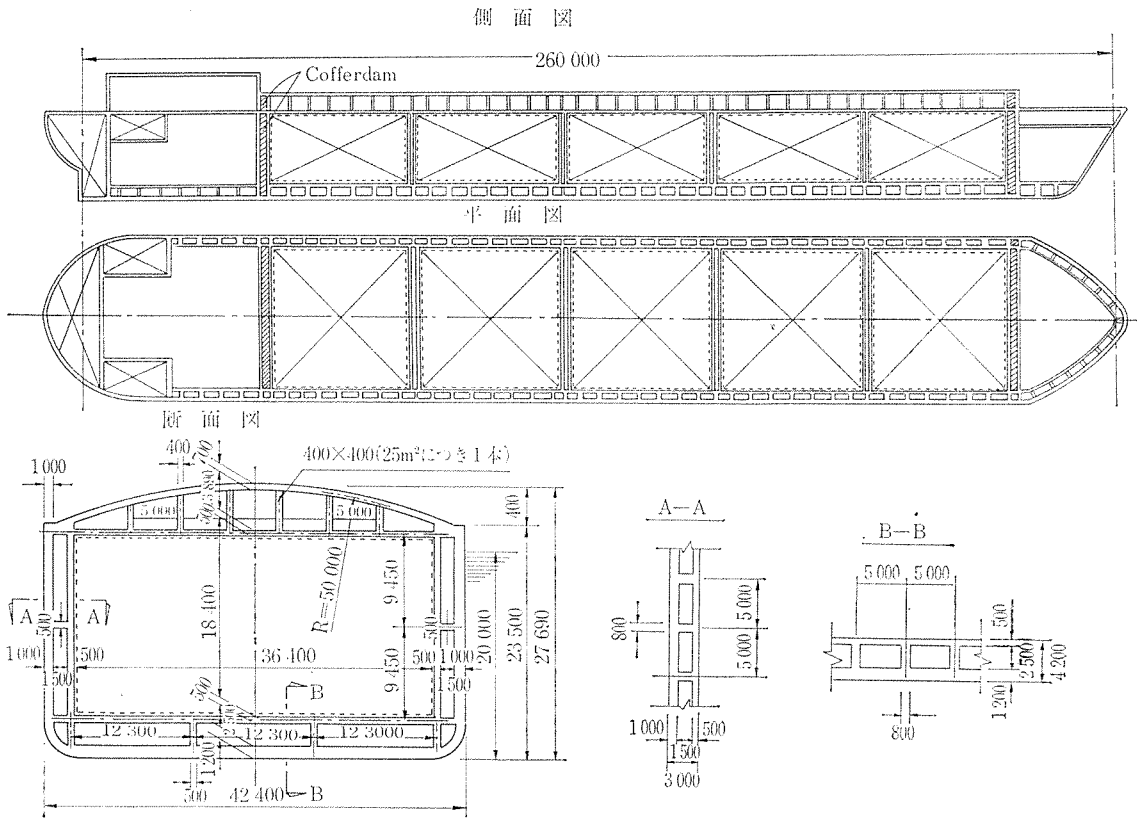


図-4 概略配置図

6. プレストレスト コンクリート LNG タンカーの建造費

前記の試設計に従って PC 船体の建造費を試算すると、表-2 に示すようになる。

また、船全体としての見積りは、船の竣工時期を 1976 年として、過去 5 年間の物価、賃金の上昇が続くものとして算出し表-3 に示す。

表-3 の値は、建造ドック等の使用料も含んでいるが、

表-2 PC 船体概略建造費

船体直接費 (1 隻当り現在価格)

型 々 々	120 000 m ²	2.4 億円
コ ン ク リ ー ト	60 000 m ³	6.0 "
鉄 筋	6 000 t	3.6 "
P C 鋼 材	4 800 t	19.2 "
足 場 支 保 工	250 000 空 m ³	1.3 "
雑工 (注、排水その他)	一 式	3.0 "
小 計		35.5 "
諸 経 費	25%	8.8 "
計		44.3 億円

表-3 PC-LNG タンカーの建造費

コンクリート船体	約 49 億円
一 般 艀 装 (推進機関、電装を含む)	42 "
特 殊 艀 装 (ポンプ、配管、電装を含む)	40 "
経 費 (設計、用役、検査、管理費、販売費、予備費等)	40 "
開 発 費	9 "
計	180 億円

表-4 建造ドック設備費

ド ッ ク (クレーン基礎を含む) 1 基	53.0 億円
海 水 ポ ン プ	1 台 2.0 "
ゲ ー ト	2 基 4.0 "
中 間 ゲ ー ト	1 基 1.0 "
80T ジブクレーン	1 基 5.0 "
6T タワークレーン	4 基 2.4 "
パッチャープラント	2 基 0.8 "
コンクリートポンプ	6 台 0.6 "
型わく鉄筋工場(諸設備を含む) 3 000 m ²	2.5 "
事務所、工員住宅	5.0 "
計	76.3 億円

参考までに PC-LNG タンカー建造の目的で図-5 に示すようなドックを造るとすると、表-4 に示すような建造費となる。

7. プレストレスト コンクリート LNG タンカーの問題点

LNG タンカーに PC を用いることは十分に可能性があり、コストも低廉であろうことは予想されるが、PC は、一般的には船殻材料として使われた経験がないので、主として船舶工学的な研究開発が必要である。

前記の試設計において、下記の項目が未検討のまま残っている。

- 1) 船首、船尾の強度
- 2) 局部強度、衝撃に対する検討
- 3) 座礁、衝突時の検討
- 4) PC 緊張材、鉄筋の配置、その他の構造細目
- 5) 施工上の構造細目、継手その他
- 6) LNG の貯蔵、積荷、揚荷の設備との関連
- 7) 推進機関その他船としての設備との関連
- 8) 施工方法の具体的な検討
- 9) 低温時疲労強度
- 10) LNG が漏洩してコンクリート壁面を局部的に冷却したときの応力状態の解析
- 11) コンクリート壁のガスタイトの方法

また、根本的なものとして、前記の試設計や見積りは内部防熱材が直接 LNG に触れるものとしたが、このような材料の開発の進捗いかんによっては、断熱材の内側にメンブレンを張る必要があり、これが約 10~15 億円のコストアップになる。

8. プレストレスト コンクリート LNG タンカーの開発に対する今後の態勢

すべてのものがそうであるように、現在稼働中の LNG タンカーも歴史的に見れば、小型のものからスタートして、漸次大型化してきた。本件もまったく同じように小型の実物実験から始める必要があり、一企業のみで取り上げる問題ではないので、国家的事業として取り上げるのでなければ、せつかくの魅力ある計画もその前進は期待できない。

1973.11.20・受付