

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

BEHAVIOUR OF PRESTRESSED CONCRETE CONTAINMENT STRUCTURE UNDER EXTREMELY LOW TEMPERATURE

頼 千元*・北村八朗**・宇梶賢一***

By Chimoto RAI, Hachirou KITAMURA and Kenichi UKAJI

Prestressed concrete has been recognized as an excellent containment structure for storages of low temperature liquid such as LNG (-164°C). The study was conducted to evaluate mechanical properties of prestressing steel, prestressing tendon systems and prestressed concrete for cryogenic applications. Emphases were laid on the evaluation of material and structural behaviours in terms of ductility and liquid tightness. The experimental research was divided into five phases. Phase 1 tested and evaluated the notch sensitivity of prestressing wire, while Phase 2 examined the ductility of anchorage materials. In Phase 3, full size prestressing tendon systems of 12T15.2 were subjected to static and cyclic loading under low temperature conforming to the FIP recommendation. Phase 4 examined the structural behaviour of prestressed concrete beams under the impact loading at low temperature. Phase 5 tests the response of prestressed concrete beams subjected to various axial stresses and temperature gradient. Prestressed concrete and its steel materials have shown superior mechanical properties for cryogenic storage structure.

Keywords: prestressed concrete, containment structure, mechanical properties at cryogenic temperature, cryogenic thermal load, impact load, liquid tightness, ductility

1. ま え が き

液化天然ガス (LNG, -164°C) をはじめとする液化ガスの需要増加に伴い、貯蔵容器の建設が進められてきた。このような中で、可燃性ガスを大気圧下で液化し、低温状態で貯蔵するための容器の建設にあたっては、重要構造物として高い安全性が要求されてきた。特に設計の立場では、貯蔵容器としての機能を確保するとともに、構成材料は低温下においても急激に破壊が進む脆性的挙動に対して抵抗性の大きいもの、すなわち低温靱性のすぐれた材料を選ぶことが重要であるとされている。

プレストレストコンクリート (PC) 構造が低温液化ガスの貯蔵容器に初めて適用されたのは 1952 年 (液化酸素: -183°C) で、以後、LNG 貯蔵容器だけでも 26 基の建設が報告されている。これらの建設に伴って、PC 構造の低温特性に関する研究が進められてきているが、PC 構造または構成材料の安全性確認のための試験方法および評価基準については、国際的に確立されたも

のではなく、唯一 FIP (国際プレストレストコンクリート連合) が PC 構成材料の一部について試験方法と評価基準を提案しているだけである¹⁾。

そこで本研究は、PC 製低温液化ガス貯蔵容器の建設を目的として、貯蔵容器として要求される機能に着目し、PC 構成材料および複合体について常温から極低温領域まで各種試験を実施し、その結果に基づき PC 構造の低温使用における低温特性の評価を試みるものである。

2. PC 低温容器に求められる性能およびその 試験方法と評価基準

(1) 構造型式

PC 構造を応用した低温液化ガス貯蔵容器の構造型式は、欧米における実績を例にとると、図-1 に示す次の 2 タイプに代表される²⁾。

① PC 構造を一次貯液体として使用……液密・気密性をもつメンブレンを使用し、PC 壁にメンブレンおよび内圧の保持と、メンブレン破損時の貯液体として内・外力に抵抗する機能をもたせるタイプ。

② PC 構造を二次貯液体として使用……二重殻構造として、自立する 9% ニッケル鋼板からなる内槽と、構造体として外力に抵抗し、内槽の破壊時に二次貯液体

* 正会員 工修 大阪ガス(株)近畿圏部専門部長
(〒541 大阪市東区平野町5-1)

** 正会員 大阪ガス(株)技術部副課長(同上)

*** 正会員 工博(株)大林組土木本部設計部次長
(〒101 千代田区神田司町2-3)

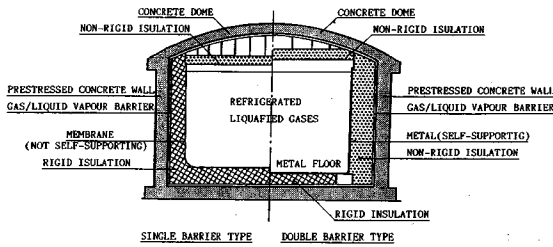


図-1 PC製低温液化ガス貯蔵容器の模式図²⁾

としての機能を有するPC外壁からなるタイプ。

(2) PC構造に求められる性能

低温液化ガス貯蔵容器として安全に内容液を保持するために要求される性能は、容器に作用する内・外力に対して構造体として抵抗する性能と、内容液を漏液することなく貯液する性能である。

a) PC構造体の荷重抵抗性能

PC構造体の荷重に対する抵抗性能は、強度によるものと、変形能によって抵抗する要素に分類される。構造物が十分な耐力を有するには、この両要素が低温になっても確保されることが要求される。さらに、瞬時に破壊が進行する脆性破壊を防ぐには、強度と変形エネルギーで評価される靱性が大きくなければならない。また、PC構造に低温液体が直接作用した場合の冷熱衝撃に対する健全性も性能として求められる。

b) PC構造体の貯液性能

低温液体を漏液することなく保持するために、PC構造体そのものに貯液性を期待する場合と、PC構造とメンブレン、シール金属等の止液性のある材料を組み合わせることで貯液性能を確保する場合が考えられる。ここではPC構造が低温液化ガスを保持する状況を想定し、低温下の作用荷重に対して漏液することなく貯液できる能力をPC構造体そのものに期待して、貯液特性を調べる。

(3) 求められる性能の確認方法

PC構造は、PC鋼材、PC定着具、鉄筋、コンクリートからなる複合体であるため、必要性能を確認するには、個々の構成材料の低温特性の確認、PC鋼材とPC定着具を組み合わせたPC tendonシステムの特長、および、鉄筋コンクリートとの複合体であるPC部材について確認試験を行う必要がある。確認項目と試験方法は、低温液化ガス貯蔵容器のみならず広く低温使用のPC構造物にも適用できるようにするため、PC構造のもつ基礎的な低温特性を把握すること、特に低温下における脆性破壊に対する評価を目的としている。実際のPC部材に作用する温度は、その属する構造物の寸法、形状、保冷材の性能などの条件により異なると思われるが、本研究では試験温度範囲を、起こり得る可能性のある最低温度としてLNG液温度に相当する -164°C までとし

た。鉄筋、およびコンクリートの低温特性については、すでに鉄筋コンクリート製のLNG地下式貯槽の建設に関連した数多くの結果が報告³⁾されている。そこで、ここではPC鋼材、PC定着具、PC tendonシステムと鉄筋コンクリート部材の複合体に関して低温特性を確認する。

PC構造体の性能の確認項目と試験方法、ならびに評価方法をまとめて表-1に示す。

a) 低温における強度特性と変形特性

低温液化ガス貯蔵容器に作用する荷重を想定し、各PC構成材料の使用目的を考慮して試験条件を定め、強度特性と変形特性を確認する。緊張材に使用するPC鋼材としては、一般的によく使用されている7本より線について引張試験を破断まで行い、強度、伸びの測定のほか破断状況も観察する。定着具の機能は緊張材端部の定着であるので、PC定着具の強度・変形特性はPC tendonシステムの試験で確認する。PC tendonシステムの試験は、FIPが提案している試験方法を参考にして、システムとしての強度、伸びを測定し、定着効率を求める。PC部材は、はり部材として中央に集中荷重を破壊まで作用させ、部材の耐荷力、変形量を測定し、破壊過程、破壊機構、破断状況も観察する。

b) 脆性破壊に対する安全性

脆性破壊に対する安全性の確認は、PC構造を構成しているPC鋼材、PC定着具、PC tendonシステムおよびPC部材について、それらの構造特性を考慮して、以下に示す各試験によって行う。

① PC鋼より線……PC鋼材の構造特性として、板材と異なり溶接がないこと、引張材として使用されるために拘束による曲げ・せん断による影響が非常に小さいこと、さらにはコンクリートによって防護されているので直接衝撃荷重を受けないことなどが挙げられる。したがって、素線(芯線)にノッチをつけた引張試験により、破断応力の測定、破面観察を行う。

② PC定着具……PC定着具がPC tendonを定着した状態における発生応力を考慮して、曲げと引張応力が作用する部品についてVノッチシャルピー衝撃試験を行い、吸収エネルギー、脆性破面率などから遷移温度を求める。

③ PC tendonシステム……FIPが提案している、繰り返し载荷によりPC tendonの定着部に生ずる可能性のあるキズに対して感受性を高め、そののち破断まで引張る試験方法を採用し、破断時の荷重伸びの測定、破断位置、破断状況の観察を行う。

④ PC部材……载荷速度をパラメーターとした衝撃荷重を破壊まで载荷し、最大耐荷力、破壊時の変位を測定し、破壊過程、破壊状況を観測する。

表一 PC 構造の低温特性に関する確認項目、確認方法および評価基準

PC 鋼材	荷 重 抵 抗 性 能			貯 液 性 能		
	強 度 特 性	変 形 特 性	韌 性			
PC 鋼材 (PC 鋼より線)	確認項目	0.2%伸びに対する強度、引張強度	伸び、絞り量	0.2%伸びに対する強度、引張強度	発生応力、ひずみ量、健全性	
	確認方法	P C 鋼より線の引張試験		ノッチをつけた芯線の引張試験	PC テンドンシステムの冷熱衝撃試験	
	評価基準	常温～低温まで常温における JIS の規格強度値以上	常温～低温まで常温における JIS の規格伸び (3.5%) 以上	低温まで低応力破断がないこと	発生ひずみが降伏ひずみ以下で、健全性が確保されること	
PC 定着具	確認項目	定 着 性 能		吸収エネルギー、脆性破断面率	発生応力、ひずみ量、健全性	
	確認方法	P C テンドンシステムの引張試験		V ノッチシャルピー衝撃試験	PC テンドンシステムの冷熱衝撃試験	
	評価基準	PC 鋼より線の引張強度以上	PC 鋼より線の変形特性が十分發揮できる定着構造	遷移温度、最低使用温度	発生ひずみが降伏ひずみ以下で、健全性が確保されること	
PC テンドンシステム	確認項目	降伏点強度、引張強度	伸び、絞り量	破断位置、破面状況、伸び、絞り量	上記構成材料の測定	
	確認方法	P C テンドンシステムの引張試験			繰返し載荷後の引張試験	PC テンドンシステムの冷熱衝撃試験
	評価基準	定着効率：常温 $\eta_A \geq 0.97$ 低温 $\eta_B \geq 1.00$	常温 2.3%以上の伸び 降伏伸び $\geq 1\%$ 以上の伸び	PC 鋼より線の破断面が延性的であり不安定破断がないこと	PC テンドンシステムの健全性が確保されること	
PC 部材	確認項目	最大耐荷力	変形量、ひびわれ性状	破壊過程、破断状況、吸収エネルギー	温度応力、拘束曲げモーメント	
	確認方法	集 中 荷 重 に よ る 曲 げ 破 壊 試 験		衝撃荷重による曲げ破壊試験	冷 熱 衝 撃 試 験	
	評価基準	低温において常温の強度以上	最大耐荷力発揮後破壊するまでの変形能が確保されること	吸収エネルギーの確保 鋼材に不安定破断がないこと	ひびわれ発生による漏液がないこと、特異な挙動を示さないこと	

c) 冷熱衝撃に対する健全性

緊張状態にある PC テンドンシステムに局部的に冷熱を作用させ、PC 鋼より線と PC 定着具に発生するひずみ量の測定を行い、挙動を観察する。PC はり部材の一面に極低温の液体を急激に注ぐことにより、発生する温度応力の変化を測定し、挙動を観察する。

d) 貯液性能

PC はり部材を用いて、貯液性を部材の漏液性状で確認する。はり部材の上面に極低温の液体を貯液し、温度勾配が一定になった後に引張荷重を載荷し、強制的にひびわれを進展させて、漏液発生時における鉄筋のひずみ量の測定、漏液性状の確認を行う。

(4) 評価基準

PC 構造の低温特性に関する評価基準としては、PC テンドンシステムに関する FIP の提案のほかには現在のところ明確なものはないため、本研究では FIP の指針、JIS の常温における規格、WES⁷⁾、ASTM⁸⁾ などの規定を参考にして評価基準を作成した。

各構成材料はさまざまな特性を有するが、ここではできるだけ基礎的な特性を評価することを目標に基準を設定している。また、構造設計にあたっては、常温の基準値を用いた常温設計法を考えているので、常温での基準値をもとに評価する項目が多くなっている。以下に PC 鋼材、PC 定着具、PC テンドンシステムおよび PC 部材について、強度・変形特性・韌性、耐冷熱衝撃性、貯液性に関するそれぞれの評価基準を示す。

① PC 鋼材……強度・変形特性は、低温下において JIS の規格値 (常温) と同等の強度と伸びが確保されること、緊張状態での冷熱衝撃に対して健全であることを評価基準とする。韌性は、切り欠き韌性試験で想定される切り欠きに対して破断面が延性で、低応力破断が生じないことを評価基準とする。

② PC 定着具……強度・変形特性は PC テンドンシステムの試験における定着効率で評価する。脆性破壊に

対する安全性の評価は、シャルピー衝撃試験値から求める遷移温度と、最低使用温度を比較することにより評価する。冷熱衝撃に対しては、健全性を確保することを要求する。

③ PC テンドンシステム……FIP の評価基準に従い、強度・変形特性を定着効率と伸びから評価する。韌性については、PC 鋼材に不安定破断がみられないこと、降伏点を越える十分な伸びが確保されることを評価基準とする。

④ PC 部材……強度は最大耐荷力として評価する。常温における強度設計方法を基本とするには、低温下においても強度が常温と同等以上であることが求められる。変形特性は、部材が最大耐荷力を発揮した後、破壊するまでの変形能を低温下においても有することを評価基準とする。また韌性は、荷重-変位曲線を積分して求める量を吸収エネルギーとし、低温下においても常温と同等程度の値が確保されること、破壊機構が脆性的挙動を示さないこと、鋼材の破断面が延性であることにより評価する。冷熱衝撃に対しては、PC 部材が特異な挙動を示さず、健全性が保たれることを評価基準とする。貯液性については、急冷により漏液が発生しないことを評価基準とする。貯液性が確保される限界 (貯液限界) については、評価するためのデータがほとんどないため、今回の試験で漏液発生時の鉄筋ひずみ量に関する基礎資料を得ることとした。

3. PC 鋼材の低温特性

(1) PC 鋼材の強度・変形特性確認試験⁴⁾

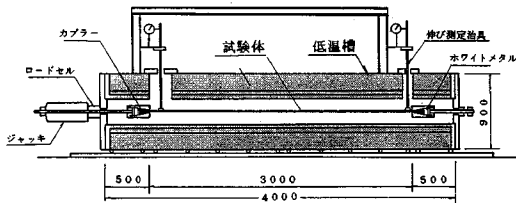
a) 試験体

試験体には、径 15.2 mm の 7 本より線 (JIS G 3536, SWPR 7B) を用いた。試験体がかみ部で破断するのを防止するため、端部はより線をほぐし、ホワイトメタルを鑄込んで定着した。使用材料の品質と JIS 規格を表一2に示す。試験体は、常温、-20、-40、-80、-

表—2 PC鋼材の試験体の品質とJIS規格

種類	呼び名	記号	断面	標準径	公称断面積	単位重量
7本より線 B種	7本より 15.2mm	SWPR 7B		15.2mm	138.7mm ²	1.101kg/m

	0.2%永久伸びに 対する荷重	引張荷重	破断時の 伸び	リフトオン
JIS規格値	22,600kg ^{gf} 以上	26,600kg ^{gf} 以上	3.5%以上	3%以下(10 ^{hr})
試験成績	25,650	27,600	6.2%	0.54%(10 ^{hr})



図—2 PC鋼材の強度・変形特性試験の装置

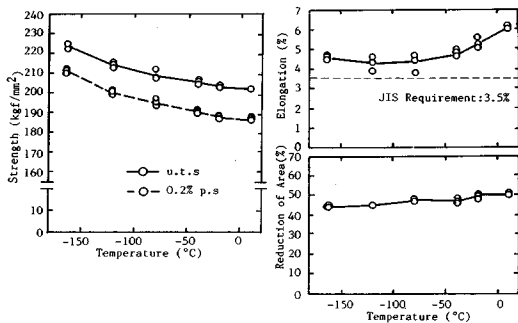
120, -164°Cの6温度段階につき各3体である。

b) 試験方法

試験体の長さは3m、伸び測定の特定点間距離は2.7mとし、図—2に示す試験装置を用いて静的に引張荷重を載荷して、破断までの強度、伸び、絞りを測定した。冷却は、冷却槽内に液化窒素(-196°C)を霧状に送入して行った。

c) 試験結果 (図—3)

- 引張強度、および0.2%永久伸びに対する強度は、温度低下につれて増加し、-164°Cでは常温に比べてそれぞれ11%、13%増加した。
 - 2.7mの特定点間距離における伸びは、温度の低下に伴って減少傾向を示し、-164°Cでは常温より25%低下しているが、すべて常温におけるJISの規格値(3.5%以上)を満足する。
 - 絞りは、温度による影響が少なく、常温と比較して-164°Cでの低下率は10%にとどまっている。
 - 破断後の破面は、-164°Cまで完全延性であった。
- 以上のように、試験に用いたPC鋼より線は、常温



図—3 PC鋼より線の引張特性と温度の関係

から-164°Cまで強度、伸び(標点間距離2.7m)ともJISの規格値を十分上まわり、常温設計を基本としても強度・変形特性上問題のない材料であることが確認できた。

(2) PC鋼材の切り欠き靱性試験

a) 試験体

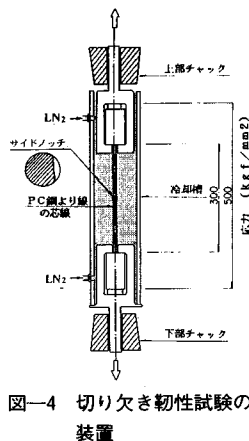
試験体は、強度・変形特性試験と同じ径15.2mmの7本より線の芯線を用いた。試験体の全長は500mm、中央母材は300mmとした。ノッチは、底半径が0.05mmを目標としたサイドノッチとし、深さを0.1mm、0.5mm、0.7mm、1.0mmとした。

b) 試験方法

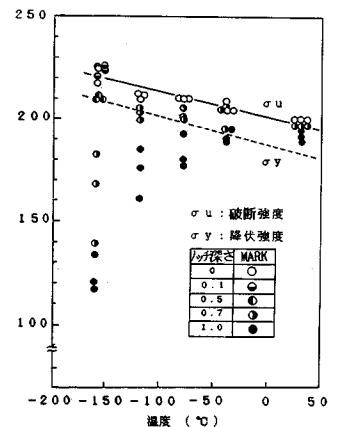
図—4に示す試験装置を用いて、常温、-40、-80、-120、-164°Cの各温度で静的に引張荷重を載荷し、破断応力と伸びを測定し、破断状況(破断位置、破面形態)を観察した⁵⁾。

c) 試験結果

- 図—5に示す破断応力と温度の関係より、降伏強度以下で破壊する、いわゆる低応力破壊が発生する限界温度を推定すると、ノッチ深さ1.0mmでは-40°C、0.7mmでは-120°C~-130°C、0.1mm~0.5mmでは-164°C程度である。
 - 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0.8mm程度と考えられる。
- 以上の結果から、PC鋼より線は、製造時に生ずる可能性のある最大深さ0.1mm程度のキズや、定着部でのウエッジの歯形による深さ0.4mm程度のキズが存在していても、-164°Cまで引張特性が劣化せず、すぐれた靱性を有する材料であることが確認された。



図—4 切り欠き靱性試験の装置



図—5 PC鋼より線の芯線の破断応力と温度の関係

4. PC 定着具の低温特性

くさび型定着具の一種であるフレシネー V システム (12V15) を試験対象とした。V システムは、図-6 のようにウエッジ、定着ブロック、ガイドで構成される。

(1) PC 定着具の低温靱性確認試験⁶⁾

a) 試験体

PC テンドンに定着した状態において、ウエッジとガイドは主たる作用力が圧縮力のため、ここではウエ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受ける定着ブロックについてののみ低温靱性を確認、評価することとした。

一般向けの製品の材質は S55C (機械構造用炭素鋼 JIS G 4051) であるが、低温使用を考慮して材料面の検討を行い、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ることとした。

試験体は、製品より切削した金属材料衝撃試験片 (JIS G 2202) の 4 号試験片 (2 mm V ノッチ) とした。

b) 試験方法

試験は、金属材料衝撃試験方法 (JIS Z 2242) に基づき、ひょう量 30 kgf のシャルピー衝撃試験機 (JIS B 7722) により行い、吸収エネルギー、脆性破面率、横膨出量を測定した。評価基準は、WES⁷⁾、ASTM⁸⁾ を参考にして次のように定めた。

- 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 横膨出量の平均値が 0.381 mm 以上

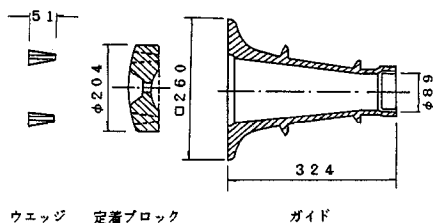


図-6 試験対象の PC 定着具 (フレシネー V システム, 12V15)

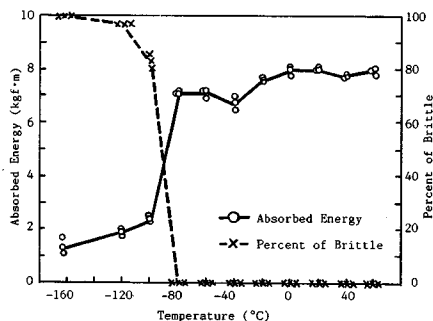


図-7 吸収エネルギー、脆性破面率と温度の関係

①~③のいずれかが各温度で満足されれば、その温度における靱性が確保されていると評価する。

c) 試験結果

図-7 に吸収エネルギーと脆性破面率の温度による変化を示す。このグラフから靱性-脆性遷移温度は -80°C 以下にあり、 -80°C まで吸収エネルギーは 6 kgf・m 以上、脆性破面率は 0 % で、横膨出量も 0.8 mm 以上であった。これらの結果から、今回の試験に用いた PC 定着具は、 -80°C まで十分な靱性を有するものであるといえる。

5. PC テンドンシステムの低温特性

PC テンドンシステムは、12 本の PC 鋼より線 (7 本より線, 15.2 mm, SWPR 7 B) と PC 定着具 (フレシネー V システム, 12V15) を組み合わせたものを試験対象とし、前述の試験によって確かめられたものを使用した。

(1) 強度・変形特性、靱性試験⁴⁾

a) 試験体

試験体は、常温と -164°C についてはそれぞれ 3 体、 -40 、 -80 、 -120°C については各 1 体とした。PC テンソンが緊張端のつかみ部で破断するのを避けるため、端部はホワイトメタルで鑄込んで定着した。定着側はコンクリートブロック内に PC 定着具のガイドを埋設し、定着ブロックを取り付けて PC テンソンをウエッジにより固定した。

b) 試験方法

図-8 に試験装置、写真-1 に試験の全景を示す。

載荷方法は、図-9 に示す FIP により提案されている載荷ステップを採用した。この載荷方法は、上限値

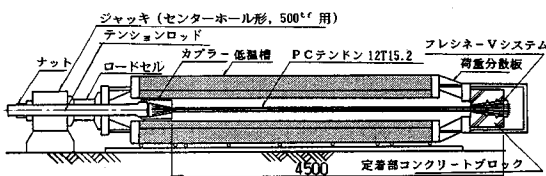
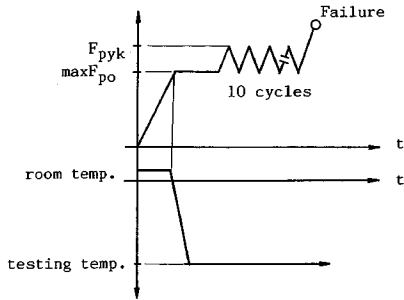


図-8 PC テンドンシステム試験装置



写真-1 PC テンドンシステムの定着性能試験の状況



図—9 PC tendonシステム定着性能試験の荷重方法

表—3 PC tendonシステムの定着性能の評価基準⁹⁾

温度条件	強度特性 (定着効率)	変形特性 (破断時伸び)
常温	$\eta_A = \frac{F_{T_{100}}}{F_{T_{1000}}}$ PC tendonシステムの破断強度 $F_{T_{100}} \geq 0.97$ PC 鋼材の規格引張強度 $F_{T_{1000}} \geq 0.97$	$E_{100} \geq 2.3\%$
低温	$\eta_B = \frac{F_{T_{100}}}{F_{T_{1000}}}$ PC tendonシステムの破断強度 $F_{T_{100}} \geq 1.00$ PC 鋼材の低温降伏強度 $F_{T_{1000}} \geq 1.00$	$E_{100} \geq E_{100}(\text{max } F_{T_{100}} \text{ 時伸び}) + 1\%$ かつ PC tendon が降伏ひずみ以降の塑性ひずみ領域で破断すること

$$\eta_A = \frac{F_{T_{100}}}{F_{T_{1000}}}$$

$$\eta_B = \frac{F_{T_{100}}}{F_{T_{1000}}}$$

F_{pyk} (鋼より線の降伏強度) と、下限値 F_{p0} ($0.9 \times F_{pyk}$) の間を 10 回繰り返して荷重して、システムに潜在的欠陥とか定着部の影響などに対して感受性を高め、その後破断まで荷重する方法である。

試験体の長さは 4.5 m、伸び測定の間隔は 2.7 m とし、破断までの荷重と伸びを測定し、破断位置、断面状況、定着具の挙動を観測した。

c) 評価基準

FIP の提案する PC tendon システムの定着性能の評価基準を表—3 に示す。

d) 試験結果 (図—10, 図—11)

① 常温での PC tendon システムの破断強度は、PC 鋼材の規格引張強度に対して 1.00~1.01 で、PC tendon システム破断時の PC 鋼材の伸びも 3.1~3.9 % となり、FIP の評価基準を満足した。

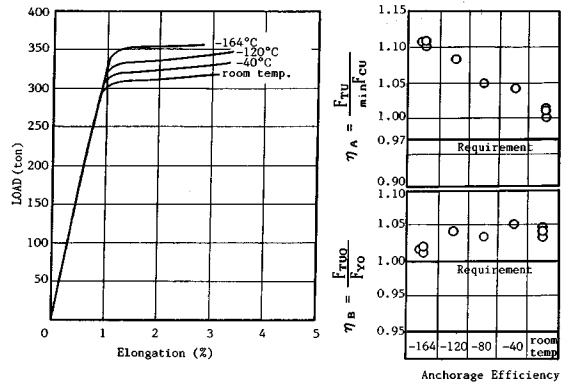
② -164°C での、PC tendon システムの破断強度は、同一温度の鋼材の降伏強度に対して 1.01~1.02 の値で、破断時の PC tendon の伸びも 3 % 前後を示し、FIP の評価基準を満足した。

③ 試験温度が低くても伸びの急激な減少はなく、破断面の観察から破面はいずれも延性であり、不安定破壊は認められなかった。

④ PC 鋼より線は、すべて定着具のガイド内で絞り破断していた。これは PC 鋼より線がガイドに接触し、横方向に力が作用したためと考えられる。

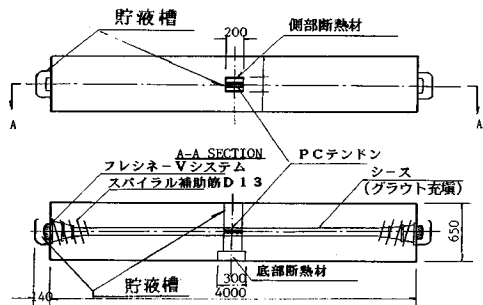
⑤ PC 定着具は、全試験体において PC 鋼より線の破断まで異常は認められなかった。

以上のように、FIP の提案する荷重方法で PC tendon



図—10 荷重-伸び曲線

図—11 定着効率



図—12 PC tendon システム冷熱衝撃試験の試験体

システムの定着性能試験を行った結果、今回試験に用いた PC tendon システムはすべて評価基準を満足し、また破壊性状においても不安定領域での破壊は認められなかった。

(2) PC tendon システムの冷熱衝撃試験

a) 試験体

試験体は、図—12 に示す PC tendon システムとコンクリートとの複合体で、PC 鋼より線と定着具は前述と同様のものを使用した。鉄筋は SD 30、コンクリートは設計基準強度が 400 kgf/cm^2 の配合とし、十分養生した後に PC tendon (12T15.2) に規格引張強度の 60 % の引張力を導入した。

b) 試験方法

PC 鋼より線および定着部に設けた貯液槽に、液化窒素 (-196°C) を瞬時に満たすことにより冷熱衝撃を与え、このときに発生するひずみの経時変化を測定し、挙動を観察した。

c) 試験結果

① PC 鋼より線と定着具は、冷熱衝撃を与えた後、ともになめらかに温度が低下し、それぞれ約 5 分後と 10 分後に定常状態に達した。

② 冷熱衝撃により、緊張された PC 鋼より線には軸方向の引張ひずみが約 350μ 、定着ブロックには円周

方向の引張りずみが約 600 μ 発生したが、いずれも鋼材の降伏ひずみに対して十分小さく、また、PC 鋼より線、定着具とも何ら変状は認められず、PC テンドンシステムの健全性が確認された。

6. PC 部材の低温特性

(1) PC 部材の曲げ破壊試験¹⁰⁾

a) 試験体

試験体は、試験温度と載荷速度をパラメーターとする 8 体 (図-13) で、導入するプレストレス量は、PC 鋼材の降伏応力の 50% 程度となるように設定した PC はり部材である。このうち、1 体は PC 鋼材を配置しない RC 部材とした。PC 鋼より線は前述と同じ仕様のものを用い、コンクリートは表-4 に示す配合とした。

試験体は、コンクリート打設後 5 日目に脱型して材令 7 日まで散水養生し、その後は試験を実施するまで (材令 \geq 60 日) 室内で気中養生を行った。

b) 試験方法

冷却は液化窒素 (-196 $^{\circ}$ C) を冷却槽内で噴射・攪拌する方法で行い、載荷中も温度を一定に制御・管理した。載荷は単純ばり形式による中央点集中載荷とし、静的載荷の場合は一方向漸増載荷により最大抵抗荷重を確認した後、PC 鋼より線の破断まで載荷した。衝撃載荷の場合は、地震による最大ひずみ速度を目標¹¹⁾に、一定変位

速度 100 cm/s 入力のもとに部材を破壊に至らしめた。写真-2 に試験全景を示す。

c) 試験結果

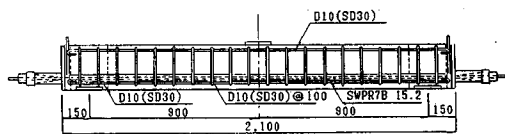
① 写真-3 に各供試体の破壊状況を示す。いずれも曲げ破壊を示し、スパン中央部よりひびわれが発生し、順次端部に向かって曲げひびわれ、曲げせん断ひびわれが拡がっている。破壊はコンクリートの圧壊、PC 鋼より線、鉄筋が破断して耐力を喪失するパターンとなっている。ひびわれの本数、深さなども静的と衝撃試験とで大差ないが、低温になるに伴い、ひびわれ間隔が大きくなり、ひびわれの本数は少なくなる傾向を示す。

② 図-14、図-15 にそれぞれ静的および衝撃試験の荷重-変位曲線を示す。常温、-60 $^{\circ}$ C、-120 $^{\circ}$ C の各試験温度において、静的、衝撃のいずれの載荷方法でも立ち上がり領域からひびわれ発生、最大耐力まで、ほぼ同様の挙動を示す。

表-4 PC 部材試験体のコンクリート配合

粗骨材 最大 寸法	スランブ	空気量	W/C	粗骨材率	単位数 kg/m ³				
					W	C	S	G	A E 減水剤
25mm	12cm	4%	44.0%	48.3%	183	370	723	1078	0.862

呼び強度：370 kgf/cm² セメント：普通ポルトランドセメント
骨材：川砂利、川砂



No.	試験体名	温度	変位速度
1	PC-N-0	常温	静的 100 cm/s
2	PC-60-0	-60 $^{\circ}$ C	
3	PC-120-0	-120 $^{\circ}$ C	
4	PC-N-100	常温	
5	PC-60-100	-60 $^{\circ}$ C	
6	PC-120-100	-120 $^{\circ}$ C	
7	RC-120-100	-120 $^{\circ}$ C	
8	PC-184-100	-184 $^{\circ}$ C	

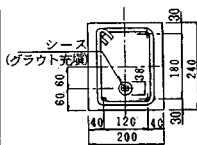


図-13 PC 部材曲げ破壊試験の試験体

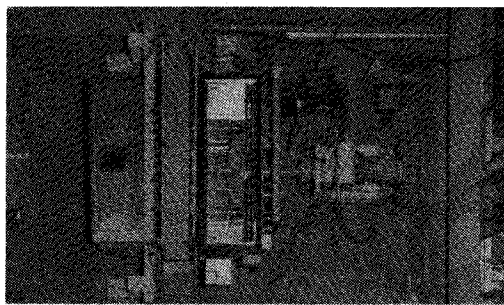


写真-2 曲げ破壊試験 (衝撃荷重) 全景

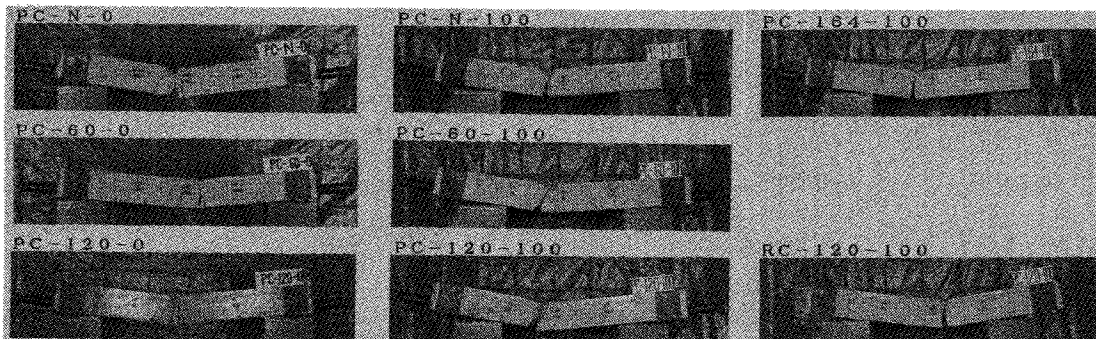


写真-3 PC 部材曲げ破壊試験の各試験体の破壊状況

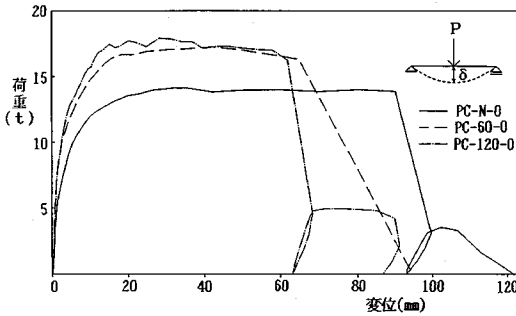


図-14 静的載荷における荷重-変位曲線

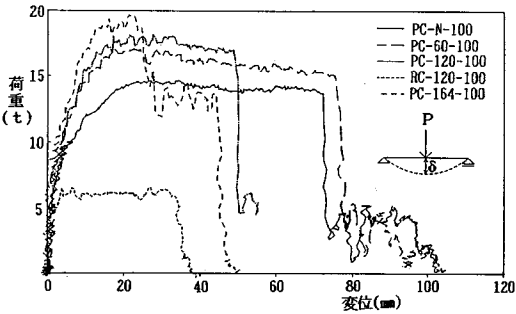


図-15 衝撃載荷における荷重-変位曲線

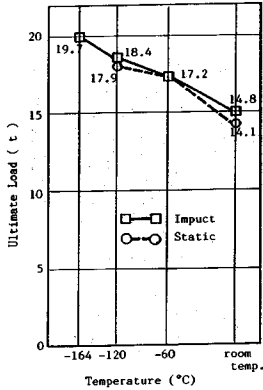


図-16 最大耐力と温度の関係図

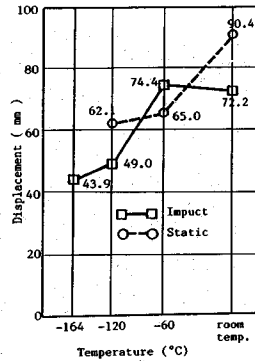


図-17 最大変位と温度の関係

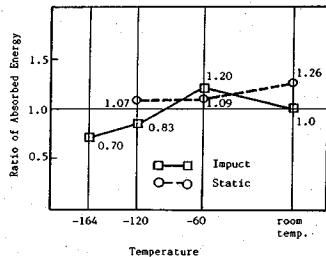


図-18 吸収エネルギー比と温度の関係

③ 図-16, 図-17 に最大耐力, 変位と温度との関係を示す。静的, 衝撃のいずれの載荷方法においても, 試験体温度が低くなるほど最大耐力は増加し, 変位は減少する傾向を示す。

④ 荷重-変位曲線より, 最大変位時までの荷重履歴のループ面積から求めた吸収エネルギーを, 常温時を基準としたエネルギー比で表わしたものを図-18 に示す。同図から, 吸収エネルギーは低温になるにつれて減少する傾向を示すが, -164°C の衝撃試験でも常温の 70% が確保されることが確認できた。

今回の載荷速度と温度をパラメーターとした試験では, 載荷速度よりも試験温度による影響が大きいことがわかった。しかしながら, PC 部材は, -164°C まで吸収エネルギーが確保されること, 破壊性状は脆性でなく, 鋼材も延性で破断していることなどから, 低温においてもすぐれた靱性が期待できると考えられる。

(2) PC 部材の冷熱衝撃・貯液性能確認試験¹²⁾

a) 試験体

試験体は, 鉄筋比と導入プレストレス量をパラメーターとした表-5 に示す 4 体である。図-19 に形状寸法と配筋を示す。試験体側面は断熱材で囲い, 外気と遮断している。PC 鋼より線はこれまでに確認されたもの, 鉄筋は SD 30 を使用し, コンクリートは設計基準強度が 400 kgf/cm^2 の配合とした。

b) 試験方法

冷熱衝撃は, 試験体上面に設置した貯液槽に直接液化窒素 (-196°C) を注ぎ貯液することによって与えた。

表-5 PC 部材の冷熱衝撃・貯液機能確認用試験体

No	試験体名	引張鉄筋比 As/bh (%)	導入プレスト レス量 (kgf/cm ²)	配筋
1	S 5-P10	0.55	10	2-T12 2 2-D22 2
2	S10-P10	1.10	10	4-T12 2 2 2-D22 2
3	S 5-P30	0.55	30	2-T12 2 2 2-D22 2
4	S10-P30	1.10	30	4-T12 2 2 2-D22 2

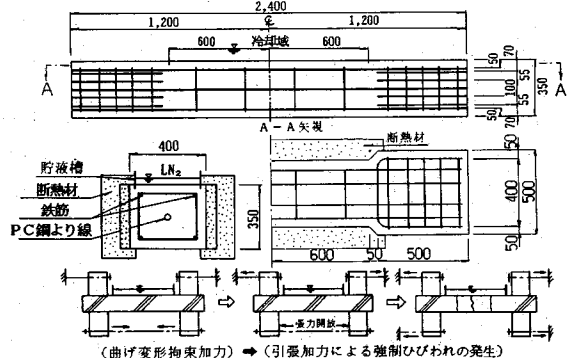


図-19 試験体の構造・鋼材の配置, 載荷方法

試験体の温度分布が定常に至る過程では、温度荷重による曲げ変形を拘束する偶モーメントを試験体の両端に作用させた。この曲げ変形拘束モーメントを測定して、発生する温度応力の大きさと変化を求め、冷熱衝撃作用時における PC 部材の挙動の確認を行った。

試験体の温度分布が定常に達した後に、加力方法を断面内に軸引張応力が生ずるように切り替え、強制的にひびわれを進展させて、漏液発生時の鉄筋のひずみの測定、および漏液性状の確認を行った。漏液の確認は、下面に設置した熱電対による温度測定と目視観察で行った。

c) 試験結果

① 冷熱衝撃により上部は急激に温度低下し、その後熱伝導により断面内の温度は図-20のように線形分布に近づく。コンクリート上部には拘束により温度ひびわれが発生したが、漏液や特異な挙動は認められなかった。

② 図-21に曲げ変形拘束モーメント、図-22に鋼材のひずみを示す。低温物性を用いた FEM 非線形解析結果と試験値とは比較的良好に合っている。試験値の方がやや大きくなっているが、これは試験ではひびわれが分散して発生し、ひびわれ間のコンクリートが寄与すると考えられるのに対し、解析では一様にひびわれが発生すると仮定していることによると思われる。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で除した値（剛性残存率）を求めると、低温物性を考慮した場合は 0.40~0.65 となり、引張鉄筋比および導入プレストレス量が大きいほど剛性残存率は大きくなる傾向を示す。

③ 引張荷重により強制的にひびわれを進展させたときの、下段鉄筋のひずみと試験体下面の温度の関係を図-23に示す。この図に示す S-5-P10 の試験体では、下段鉄筋のひずみが約 2500 μ のときに下面の温度に変化がみられ、2600 μ 付近から急激な温度降下が生じ、その直後に目視で漏液を確認した。S-5-P30 の試験体でも同様の測定結果で、下面の温度変化は下段鉄筋のひずみが 1900 μ 付近で認められた。引張鉄筋比が 2 倍の S-10 シリーズの試験体では 2200~2500 μ 付近で幾分

温度変化が認められたが、急激な温度降下を生ずる前に断面変化部で降伏・破壊に至った。

これらの試験結果より、PC 部材の貯液限界を漏液発生時の鋼材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。

7. PC 構成材料および部材の低温特性の評価

(1) PC 構造の荷重抵抗機能

① PC 鋼より線は、引張試験により常温から -164 $^{\circ}$ C まで JIS 規格を強度、伸びとも上まわることを確認した。また、ノッチを付けた芯線の引張試験の結果でも、想定されるキズに対して -164 $^{\circ}$ C まで引張特性が劣化せず、すぐれた靱性を有しており、低温使用材料として信頼できるものであることが確認できた。

② 試験に用いた PC 定着具は、シャルピー試験の結果より靱性-脆性遷移温度が -80 $^{\circ}$ C 以下にあり、それ以上の温度ではすぐれた靱性を有することがわかった。

③ PC 鋼より線と PC 定着具からなる PC テンドンシステムの定着性能試験を FIP の提案する試験方法で行った結果、今回の試験に用いた PC テンドンシステムは常温から -164 $^{\circ}$ C まで基準値を満足することが確認

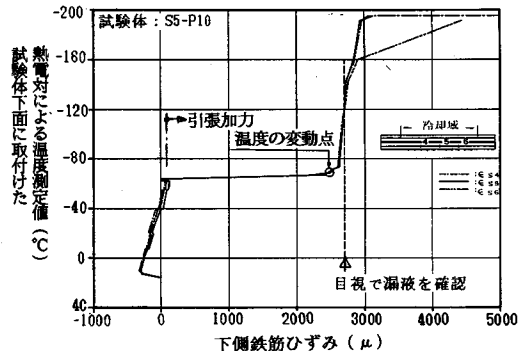


図-23 下段鉄筋のひずみと試験体下面に取り付けた熱電対の温度変化

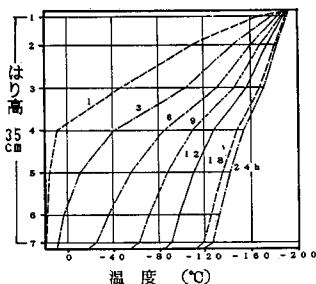


図-20 試験体の温度の経時変化

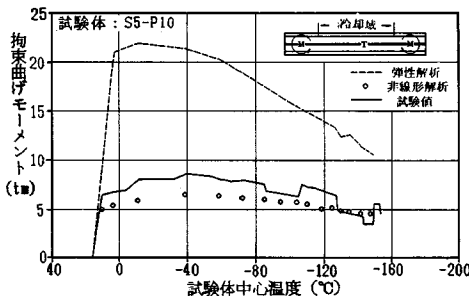


図-21 曲げ変形拘束モーメント

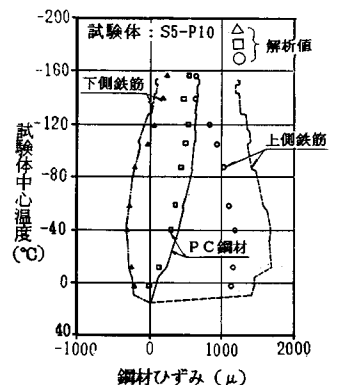


図-22 PC 部材内の鋼材のひずみ

された。

④ PC 部材の曲げ破壊試験を載荷速度と温度をパラメーターとして行った結果、最大耐荷力は低温になるに従い増加するが、変形量は低下した。しかし、破断はすべて部材が最大耐荷力を発揮してから起こり、変形能は確保されていることが確認できた。衝撃荷重に対する PC 部材の抵抗能力（吸収エネルギー）は -164°C でも常温の 70% の能力が確保され、破壊過程・破断状況から脆性的な挙動はみられず、PC 部材は -164°C まですぐれた靱性を有していると評価される。

⑤ PC テンドンシステムの冷熱衝撃に対する抵抗性を、定着・グラウトした PC 鋼より線、PC 定着具に液体窒素を直接注いで確認した。その結果、今回の試験に用いた PC テンドンシステムは急激な温度変化に対して健全性が確保されていることが確認された。

⑥ 曲げ変形拘束の条件で PC 部材の一面に冷熱衝撃を与える試験では、温度応力によりひびわれが発生するが漏液や特異な挙動は認められなかった。温度応力による PC 部材の挙動は、有限要素法を用いた非定常温度解析、非線形応力解析で推定できることが確認された。

(2) PC 構造の貯液性能

PC 部材の貯液限界を、温度勾配がある PC はり部材の強制引張加力により確認したところ、漏液の発生は鉄筋のひずみが約 2000μ 前後で確認され、設計において積極的に貯液機能を確保するための基礎的資料が得られた。

8. あとがき

欧米においては、PC が極低温液化ガス貯蔵容器の材料としてすぐれていることが認知され、建設実績も報告されているが、PC 構造の低温特性を評価するための技術情報は少ない現状である。

そこで、本研究は貯蔵容器として要求される機能に着目して、PC 構造の常温から極低温までの特性を実験結果をもとに、設定した基準による評価を行った。その結果、今回用いた PC 構成材料、PC 部材は、いずれも常温から極低温領域まで十分な荷重抵抗能力を示し、また、すぐれた靱性を有していることが確認できた。貯液機能は貯液限界としての基準値を把握できた。

ここで評価した PC 構造の低温特性は、貯蔵容器に限らず広く低温使用の PC 構造物にも適用できると思われる。

今回の研究で得られた結果は、すでに LNG 貯蔵用施設に PC 構造をわが国で初めて適用した PC 防液堤の建設¹³⁾に反映させており、今後は極低温液化ガス容器へのより一層の展開を目指して、容器を含めた貯蔵システム全体の検討を進めていきたい。

参考文献

- 1) FIP STATE OF ART REPORT : Cryogenic Behaviour of Materials for Prestressed Concrete, 1982.
- 2) FIP GUIDE TO GOOD PRACTICE : Preliminary Recommendations for the Design of Prestressed Concrete Containment Structures for the Storage of Refrigerated Liquefied Gases, 1982.
- 3) 日本ガス協会 : LNG 地下式貯槽指針, 1979.
- 4) 中島一夫・直井彰秀・園 淳生・境 恭宏 : PC 鋼材および PC システム低温特性試験, 土木学会第 41 回年次学術講演会概要集, 第 5 部, pp. 211~212, 1986.
- 5) 青木 満・木内 晃・小林真人・池田一夫・表面切り欠きを有する丸棒の脆性破壊強度評価, 鉄と鋼, 第 68 巻 13 号, pp. 156~164, 1982.
- 6) 北村八朗・岡井大八・宇梶賢一・鎌田文男 : 低温用 PC 定着具の開発, 土木学会第 41 回年次学術講演会概要集, 第 5 部, pp. 205~206, 1986.
- 7) WES : 低温用圧延鋼板判定基準, 1983.
- 8) ASTM : SPECIFICATION A 20/A 20 M
- 9) Rostasy, F. S. : Prestressing Steels and Systemes for Storage Tank for Refrigerated Liquefied Gases, 10th FIP CONGRESS, pp. 1~10, 1986.
- 10) 浅井邦茂・北村八朗・大内 一・納多 勝 : 衝撃荷重を受ける低温 PC 部材の構造特性, 第 41 回年次学術講演会概要集, 第 5 部, pp. 209~210, 1986.
- 11) 小谷俊介 : 鉄筋コンクリートに於る載荷速度の影響, コンクリート工学, Vol. 21, No. 11, pp. 23~34, 1983.
- 12) 浅井邦茂・中島一夫・小島克朗・野村敏雄 : 冷熱衝撃と引張荷重を受ける PC 部材の挙動, 第 41 回年次学術講演会概要集, 第 5 部, pp. 207~208, 1986.
- 13) 頼 千元・浅井邦茂・杉尾栄行・宇梶賢一 : 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, 土木学会論文集, 第 361 号 / VI-3, pp. 47~56, 1985.

(1987. 11. 4・受付)