

氏 名	初 崎 俊 夫
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	平成元年12月13日
学位授与の根拠法規	学位規則第5条第2項
最 終 学 歴	昭和41年3月 早稲田大学大学院理工学研究科建設工学専攻 修士課程修了
学位論文題目	PC二重殻低温液貯槽の開発に関する基礎的研究
論文審査委員	東北大学教授 三浦 尚 東北大学教授 佐武 正雄 東北大学教授 尾坂 芳夫 東北大学教授 倉西 茂

論 文 内 容 要 旨

現在、日本のLNG、LPGなどの低温液貯蔵タンクは金属二重殻タンクが主流であるが、都市近傍にあっては地下式の鉄筋コンクリート製タンクも多くつくられている。これは、地上式タンクが、地下式タンクに比べて、工期が短い、建設コストが安い、維持管理が容易等の利点がある一方、防液堤を設置する必要があり、広い用地が必要になることによると考えられる。

しかし、金属製をプレストレストコンクリート製にすると外槽が防液堤を兼ねることが出来、タンクの周囲には防液堤を設置する必要がなくなり、建設コスト低減につながる。さらに、コンクリートは飛来物等に対する耐衝撃性に優れた耐火材料であり、タンク全体が耐火構造になる。コンクリートは耐久性にも優れていることから、メンテナンスフリーになる等のメリットも考えられる。

このプレストレストコンクリート製二重殻低温液貯槽を設計するには、その構造材をなすコンクリート、鉄筋及びPC鋼材、特に極低温下での性質、低温時のPC部材の特性、内槽又は外槽としての全体挙動等を十分に把握しておかなければならない。

この論文は、プレストレストコンクリート製二重殻低温液貯槽の設計に必要な、コンクリートの透気性、常温からLNG温度までの静的及び動的引張試験による鉄筋の破断挙動、低温時のPC部材の特性、内槽及び外槽の挙動について、主として実験による基礎的な研究を行なった結果をまとめたものである。

本論文を要約すれば、以下の通りである。

第1章 緒 論

プレストレストコンクリート製二重殻低温液貯槽開発の重要性を示し、関連する既往の研究を概観し、その問題点と本研究の持つ意義について述べた。

第2章 低温液貯槽に用いるコンクリートの透気・透水性

コンクリートの透気性は、養生条件、特に含水率に大きく左右されるといわれている。ここでは始めに常温下におけるコンクリートの種類が透水性及び透気性におよぼす影響を調べるとともに、実物大の部分模型によって施工法の影響を調べた。

次に極低温下における透気性及び、常温と極低温をくり返し受けたコンクリートの透気性を調べ、さらに大型モデルタンクを作って、これらの結果を総合的に確認した。

得られた結果の主なものは次の通りである。

- (1) 各種コンクリートにおける水の拡散係数は、水セメント比が小さいほど小さくなること、膨張剤やスチールファイバーを用いた場合にはむしろ拡散係数の値が大きくなる可能性があること、ダブルミキシングによって若干ではあるが拡散係数が小さくなること等がわかった。
- (2) 常温における各種コンクリートの透気係数は、圧縮強度が大きいものほど小さくなる傾向にあるが、透水性の結果と異なり、熱衝撃を受けた場合にはスチールファイバーコンクリートの透気係数をもっとも低くなる。
- (3) 低温時及び冷却のくり返しを受けたコンクリートの透気係数は、常温時に比べて同等か僅かに低下する程度であり、3サイクルの冷却のくり返しでは、殆んどくり返しの影響はない。
- (4) 配筋、シース配置等をしたコンクリートでは、打継ぎがない場合、透気係数は 10^{-10} cm/sec オーダーであるが、打継ぎがある場合、1オーダー高く、 10^{-9} cm/sec のオーダーであった。

第3章 低温下において動的引張载荷された鉄筋の破断挙動

鋼材の破断形態は、荷重速度あるいはひずみ速度に依存するといわれている。

ここでは -162°C までの鉄筋の力学的挙動を明らかにするため、普通鉄筋(SD35)ならびに低温用に作られた低温鉄筋(制御圧延異形棒鋼)について、常温からLNG温度までの間で静的及び動的引張試験を行なった。

得られた結果の主なものは、次の通りである。

- (1) 鉄筋の種類、载荷方法の如何を問わず、鉄筋の降伏点及び引張強さは低温になるにつれて増大する。
- (2) 動的引張試験は、応力-ひずみ曲線に大きな影響を与える。室温から -162°C までの静的引張試験、及び普通鉄筋で温度が -70°C 以上の動的引張試験に関しては、降伏点に達した後、より大きな引張強さを示して破断する。しかし、 -70°C 以下の動的引張試験では、降伏点に達した後、ひずみの増大とともに、その応力度は降伏点以下を示したまま破断する。
- (3) 静的引張試験の場合、普通鉄筋の破断伸びは室温時のものと比較し -162°C で約10%低下するが、低温鉄筋についてはほとんど低下しない。

- (4) 破断絞りは温度の低下とともに減少する傾向があるが、静的及び動的引張試験とも -162°C において、普通鉄筋ではほぼ40%以上、低温鉄筋ではほぼ60%以上の値を示した。しかし、動的引張試験を行った冷間加工した普通鉄筋では、 -162°C で他と比べて特別小さな値を示すものがみられた。

第4章 片面から冷却されたPC部材の変形挙動

プレストレストコンクリート製二重殻低温液貯槽の外槽は、内槽から万一の漏洩に対して防液堤の役割を果たさなければならない。

ここでは、プレストレストコンクリート製二重殻貯槽の外槽壁部材の一部を想定した梁状の実大供試体を用いて、梁の片面を急冷することにより断面方向に温度勾配を与えながら、曲げ変形拘束、軸変形拘束及び曲げ変形と軸変形の両者拘束の実験を行ない、プレストレス量、鉄筋比、拘束条件、冷却方法、冷却温度の違いが部材剛性、終局耐力におよぼす影響について検討した。

得られた結果の主なものは次の通りである。

- (1) 曲げ変形を拘束して温度荷重（約 200°C の温度差）のみを賦与した時の剛性残存率は、プレストレス量、鉄筋比により異なり、プレストレスがない場合あるいは鉄筋比が小さい（0.5%）場合には小さい値（それぞれ0.43, 0.44）を示したが、他の場合は0.6~0.7程度であった。
- (2) プレストレス $30\text{kgf}/\text{cm}^2$ 、鉄筋比1%の供試体で、軸方向の変形を拘束した場合の軸剛性残存率及び軸方向の変形、曲げ変形の両方を拘束した場合の軸剛性残存率、曲げ剛性残存率はいずれも $1/3$ 程度であった。
- (3) 常温とLPG温度（ -45°C ）の温度差の温度勾配では、微小なひび割れ（0.04mm程度）が発生しただけであり、剛性残存率は0.9と剛性の低下はほとんどみられなかった。
- (4) プレストレストコンクリート部材に温度勾配が生じた場合の強度特性をより高い精度で評価するには、温度分布を正確に把握して、コンクリートの引張応力、低温域にある鉄筋の降伏応力の増加を考慮した非線形応力解析を行なう必要がある。

第5章 プレストレストコンクリート製低温液貯槽の挙動

プレストレストコンクリート製二重殻低温液貯槽は、常温極低温状態にあるPC低温液貯槽、その外側にあり防液堤機能を有するPC外槽及び、内外槽間の保冷材から成り、飛来物等に対する安全性、耐久性はもとより、経済性にも優れた構造物である。

ここでは実用タンク（ $80,000\text{kl}$ LNGタンクを想定）の $1/15$ 縮尺のプレストレストコンクリート製モデルタンク（内径4.0m、液深1.9m、タンク容量 24m^3 ）を製作し、LNGの模擬液として液体窒素（ LN_2 ）を用いて、クールダウン時、貯液時、断熱材異常時を想定した実験を行ない、その挙動を調査した。

得られた結果の主なものは次の通りである。

- (1) 低温液貯槽のクールダウン時、貯液時には、部材厚の大きい隅角部において、断面的に大きな温度差がつくことがわかった。したがって、クールダウンは、隅角部の温度差に注意しながら行

う必要がある。

- (2) 常温ではほとんど問題にならない鉄筋とコンクリートの線膨張係数の差が、極低温になると大きな鉄筋ひずみとなって表われて、貯液時においては、約 800×10^{-6} の引張ひずみが発生している。

線膨張係数差による鉄筋ひずみ ϵ_s は次式により推定することができる。

$$\epsilon_s = \frac{(a_s - a_c)}{1 + P \times N} \times \Delta T$$

a_s, a_c : 鉄筋及びコンクリートの線膨張係数

ΔT : 常温からの温度降下

P : 鉄筋比

N : ヤング係数比

- (3) 材料定数及び境界条件を正しく設定することにより、2次元軸対称モデルの有限要素法で得られた解析結果が実測値とほぼ一致しており、熱伝導解析は有効であることを示している。

第6章 プレストレストコンクリート製低温液貯槽の外槽の安全性

外槽の重要な役割は、防液堤としての機能をもつことである。

外槽は、通常状態では常温にあるが、内槽が何らかの原因で破損した場合、低温液による急激な温度変化を受ける。

ここでは、第5章で述べたモデルタンクを使用し、LNGの模擬液として液体窒素を急激に貯液させて、躯体の温度分布、ひずみ、ひび割れ発生状況等を調査し、検討した。得られた結果の主なものは次の通りである。

- (1) 防液堤として機能するための熱衝撃作用時を想定した急冷実験では、コンクリートの熱伝導率が鋼に比べて約 $1/50$ と小さいことから、躯体コンクリートは、タンク内側表面部のコンクリートが急冷されるが、残りの部分は緩い温度勾配になっている。又、タンク外表面には霜がつき、あたかも断熱材を取付けた効果をもつことにより、外表面コンクリート温度勾配は急激な勾配とはならない。
- (2) タンク内表面は水分が乾燥する直前に、亀甲状の微細ひび割れがみられたが、乾燥後はほとんど目視出来ない程度のものであった。そして側壁下端部の外表面には、鉛直方向の微細ひび割れが発生し、貫通しているひび割れもあったが、液密性能にはなんら問題はなく、十分な防液堤の機能をもっていることが明らかになった。

第7章 結 論

LNG、LPG等の極低温液を貯蔵するプレストレストコンクリート製二重殻貯槽を安全でかつ経済的に設計するためには、コンクリートの液密、気密性や鉄筋の性質さらに、PC部材の変形挙動及び極低温液貯槽の挙動を明らかにすることがきわめて重要である。

本研究は主として実験によって基礎的な研究を行なったもので、まず、常温及び -196°C のコンクリートの透気性を明らかにした。次に常温から -162°C までの静的、動的引張荷重による鉄筋の性質を明らかにし、さらに、液体窒素(-196°C)で片面から冷却したPC部材、又、液体窒素を貯液する等の方法でプレストレストコンクリート製貯槽の内槽及び外槽について主要な性質を調べたものである。

この研究の結果は、LNG、LPC用のコンクリートバージその他の関連構造物をコンクリートで作る場合にも、より安全で経済的な設計、施工に大いに役立つものと思われる。

審 査 結 果 の 要 旨

近年我が国においてはエネルギー源として液化天然ガス、液化プロパンガス等の低温液体が多く使われるようになって来た。それに伴い、低温液を貯蔵するための大規模貯槽の需要も増えている。低温液の貯槽は、部材の一部も低温にさらされるため、その建設材料は低温下において十分安全なものではなければならない。現在作られている低温液貯槽は地下式と地上式の2種類に分けられるが、その内の地上式のもはこのようなことから低温に強い特殊な鋼で作られる場合が多い。一方、コンクリートは安価でありながら低温下においても優れた強度特性を持っているため、地上式の低温液貯槽もコンクリートで作られることが期待されている。本論文は液化天然ガス等の低温液を対象としたPC（プレストレストコンクリート）製低温液貯槽として、常時の貯液用の内槽と非常時の流出防止機能を持つ外槽とからなる二重殻貯槽を開発することを目的として行った研究をとりまとめたもので全編7章よりなる。

第1章は緒論である。

第2章では低温液貯槽に用いるコンクリートの透気・透水性について述べている。膨張剤やスチールファイバーを用いると透気係数が大きくなる可能性があること、コンクリートのダブルミキシングによって若干これを小さくすることができること、コンクリートの打継目部は重大な弱点になること、コンクリートがくり返し冷却されても透気係数に与える影響は小さいこと等を明らかにしている。

第3章では低温下において動的引張載荷された鉄筋の破断挙動を調べている。そして低温液貯槽に使用する鉄筋は低温下における耐衝撃性を考えて選ぶ必要があることを示している。

第4章では片面から冷却されたPC部材の変形挙動を調べ、これによってPC貯槽に低温液が入れられた際に発生する応力の解析に必要な各種データを得ている。

第5章では15分の1縮尺のモデルタンクによって、低温液が貯槽に入れられた時の応力について計算結果と測定結果との比較を行い、提案した計算法の問題点を明らかにしている。

第6章ではモデルタンクによってPC製の外槽の安全性を確認している。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、PC二重殻低温液貯槽の開発を目的として、それに必要な低温下におけるコンクリートや鉄筋の性質を解明し、構造物の常時に対する構造解析法を確立し、さらに非常時の構造物全体としての安全性を確認したもので、土木工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。