

## LNG地下式貯槽へのプレストレス力入り中空PC鋼棒の適用に関する性能確認実験

オリエンタル白石 (株) 正会員 ○大谷 悟司  
 清水建設 (株) 永島 三雄  
 清水建設 (株) 土屋 雅徳  
 高周波熱錬 (株) 田中 典男

### 1. はじめに

近年、LNG 地下式貯槽の外槽躯体は、側壁と底版の結合部に構造目地を設けたヒンジ結合タイプから、側壁と底版を一体的に構築する剛結合タイプに移行している。剛結合タイプの躯体の場合、結合部には大きな曲げが作用するため、ハンチ構造の採用、鉄筋の高強度化、鉛直プレストレスの導入等の対策が取られている。また、LNG 地下式貯槽は-164℃の低温液体を貯蔵する設備であり、建設にあたっては、使用する材料の性能がその使用される温度条件下にて確保されていなければならない。

今回、筆者らが設計・施工にあっている貯槽では、剛結部への鉛直プレストレス導入にあたり NAPP 工法を採用した。本稿は、NAPP 工法の採用にあたって実施した NAPP ユニットの定着性能確認実験および低温性能確認実験について報告するものである。

### 2. 実験の背景および目的

図-1に、NAPP 工法を適用した LNG 地下式貯槽の主要構造寸法を示す。LNG 地下式貯槽は、主として土水圧に抵抗し、地下に大空間を保持するための鉄筋コンクリート製躯体と、貯液機能を担う鋼製メンブレンおよび鋼製屋根からなる。躯体は側壁と底版を一体とした剛結合タイプとなっている。

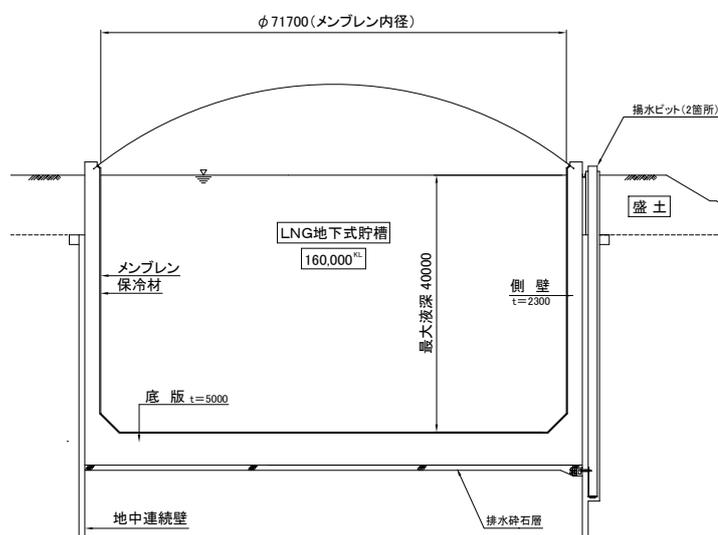
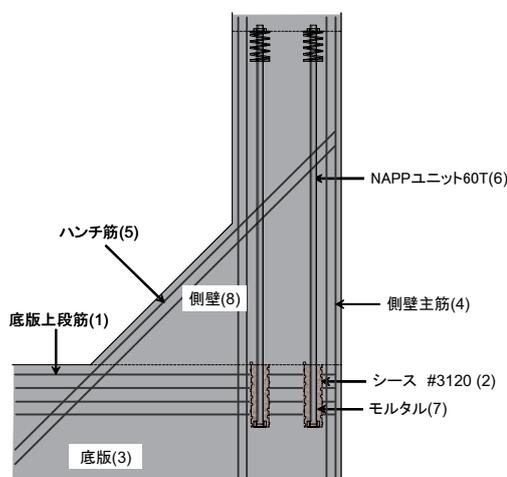


図-1 主要構造寸法

#### 2. 1 定着性能確認実験

図-2に結合部の構造概要を示す。結合部は、土水圧の作用による大きな曲げモーメントに耐えうる構造とするとともに、鉄筋組立て時の作業性やコンクリートの充填性を確保するため、内外に太径の主鉄筋を2段配置し、不足分は鉛直プレストレスの導入により補う設計とした。

プレストレスの導入は、1)現場におけるプレストレス導入作業が容易で工期短縮が可能であること、2)側壁の鉄筋組立に影響を与えないことから、プレテンション方式の NAPP 工法を採用し、側壁の鉄筋組立が完了した後に NAPP ユニットを配置することとした。このため、NAPP ユニット下端側の定着は、先行して構築される底版にシースを用いて定着に必要な長さの箱抜きを作っておき、その中に NAPP



( )内の数字は施工順序を表す。

図-2 結合部の構造概要

ユニットを建て込んだ後、無収縮モルタルを充填して固定する方法とした。

定着性能確認実験の目的は、このようなモルタル、シースを介した定着方式における定着性能を、実機に用いるのと同じ材料を用いて確認することである。

2. 2 低温性能確認実験

LNG 地下式貯槽の運用が開始されると、LNG の冷熱により躯体の温度は低下する。図-3は、軸対称熱伝導解析により求めた定常運転時の結合部付近の温度分布である。この図より、NAPP ユニットは-40℃~-10℃の低温下に置かれることがわかる。

低温性能確認実験の目的は、このような低温下におけるNAPP ユニットの中空 PC 鋼棒の機械的性質（引張強さ、靱性）を引張試験により確認することである。なお、靱性の評価には、BS7777 : Part3 : 1993<sup>1)</sup> に規定されている塑性伸びおよび切欠き感受性比を指標とする評価基準を適用した。

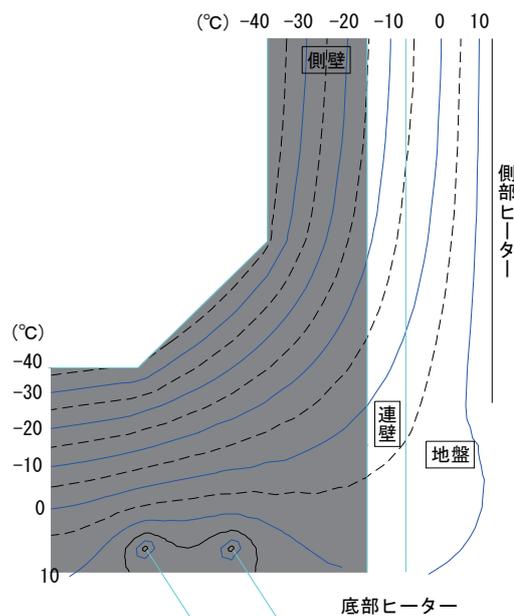


図-3 接合部の温度分布

3. 供試体概要および実験方法

3. 1 定着性能確認実験

供試体は、実構造物における NAPP ユニットの実際の配置間隔および定着長から、断面寸法 400×400mm、高さ 880mm の角柱とし、引抜用の中空 PC 鋼棒は、実際に用いる NAPP ユニット 60T の中空 PC 鋼棒（外径 43mm、肉厚 7.2mm<sup>2)</sup>）とした。

実験要因は、定着部の補強仕様とし、NAPP 工法の標準であるスパイラル筋を配置した場合、シースを取り囲んで配置されている底版上段筋（図-2参照）相当の補強鉄筋を配置した場合の2種類とした。また、NAPP ユニットの施工から側壁コンクリート打設までに NAPP ユニットの発錆を防止するため防錆剤を塗布することを想定して、前述の后者に防錆剤を塗布した NAPP ユニットを用いた場合についても定着性能の確認を行った。表-1に供試体の種類および実験要因を、写真-1に供試体の配筋状況を示す。

引抜実験は単調荷重とし、供試体に反力プレートを設置し、シース部の周辺を拘束して、油圧ジャッキにて中空 PC 鋼棒に鉛直方向に荷重を与えた（荷重速度は毎分 50N/mm<sup>2</sup><sup>3)</sup>）。引抜荷重は、定着部に配置したロードセルによって管理し、変位はエンドホルダーに接触させた変位計によって計測した。

表-1 供試体の種類と実験要因

供試体 No.	定着部の補強仕様	設計基準強度		備考
		コンクリート	モルタル	
		N/mm <sup>2</sup>		
S1	スパイラル筋（標準工法）	24	50	—
T1	底版上段筋			—
T2	相当の鉄筋			防錆剤塗布



(S1) (T1 および T2)

写真-1 供試体

### 3. 2 低温性能確認実験

引張試験の対象は、中空 PC 鋼棒の母材部およびねじ部とした。母材部の試験片は、母材部において確実に破断するように、NAPP ユニット 60T に用いる中空 PC 鋼棒 (外径 43mm, 肉厚 7.2mm) を外径 37mm, 肉厚 4.2mm に加工して用いた。また、切欠きありの試験片は、加工後に深さ 1.0mm, 角度 45 度の V ノッチを設けた。ねじ部試験片は、外径 43mm の中空 PC 鋼棒に M45×3 のねじを転造加工したものとした。引張試験は、試験開始時の温度条件を約 -50℃ に設定し、熱電対にて試験片の温度を測定しながら実施した。試験片の冷却は、-30℃ の低温庫で 20 時間冷却した後、中空部にドライアイス

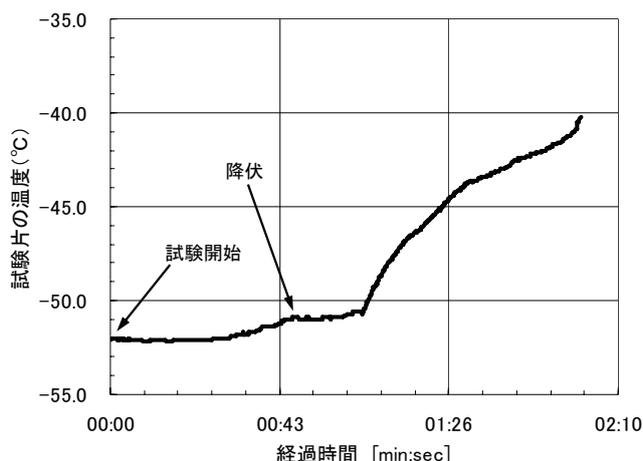


図-4 試験時の温度履歴の一例

(昇華温度: -79℃) を充填することで温度を保つこととした。図-4に、試験時の温度履歴の一例を示す。

## 4. 実験結果および考察

### 4. 1 定着性能確認実験

NAPP ユニットの定着性能は、NAPP ユニット 60T に用いる中空 PC 鋼棒のねじ部の引張荷重 (830kN<sup>2</sup>) を作用させた場合に、定着部が抜け出さないことを確認することにより行うこととした。図-5に引抜荷重-変位の関係を示す。

図-5より、いずれの供試体とも NAPP ユニット 60T に用いる中空 PC 鋼棒のねじ部の引張荷重まで、急激な変位の増加はなく、モルタルおよびコンクリートの破壊、モルタルとシースの界面およびシースとコンクリートの界面の大きなずれは生じなかった。また、いずれの供試体とも、ねじ部引張荷重における変位は同じ結果であった。

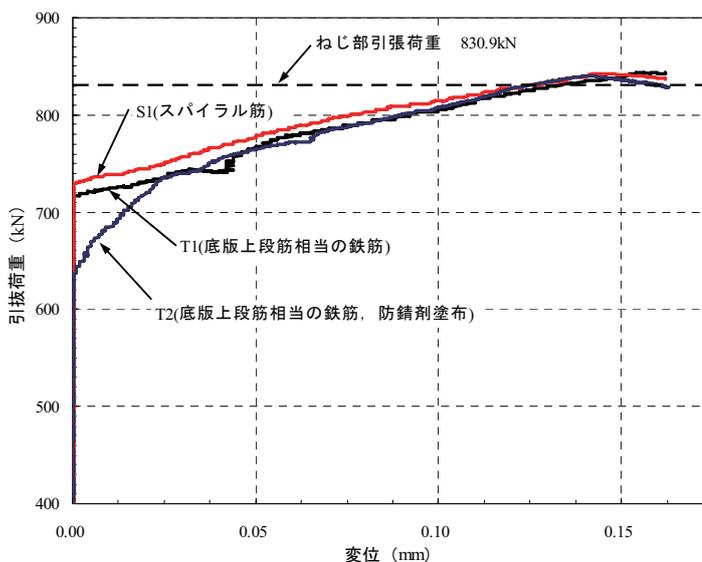


図-5 引抜荷重-変位の関係

S1 (スパイラル筋を配置した供試体) と T1 (底版上段筋相当の鉄筋を配置した供試体) は同様な挙動を示しており、底版上段に配置された鉄筋のみでスパイラル筋を用いる場合と同等の定着性能を確保できることがわかる。T1 と T2 (防錆剤を塗布した中空 PC 鋼棒を用いた供試体) を比較すると、変位が始まる荷重は T2 の方が小さくなっている。このことから、防錆剤の塗布により中空 PC 鋼棒とモルタルの付着力は低下すると考えられるが、変位量 0.025mm 以降の挙動は同じであり、終局的な定着性能は防錆剤を塗布しない場合と同等になる。

### 4. 2 低温性能確認実験

中空 PC 鋼棒の破断形態は、母材部 (切欠きなし)、母材部 (切欠きあり)、ねじ部とも常温と同じように伸びと絞りをともなった延性破壊を示した。写真-2に破断後の試験片の状況を示す。

引張強さについては、鋼材の一般的な低温特性と同様、低温下では常温に比べて増加する傾向が見られ、

JIS 規格値を問題なく満足した。靱性は、以下に示す BS7777:Part3:1993 の基準により評価を行った。

- 1) 切欠きなし試験片における塑性伸び (破断位置より 2d 以上離れた 100mm 以上の標点間距離における伸び) が 3% 以上であること
- 2) 切欠き感受性比 (NSR) が 1.0 以上であること  
NSR=切欠きあり試験片の引張強度/切り欠きなし試験片の 0.2%耐力あるいは降伏強度
- 3) 切欠きあり試験片における塑性伸びが 1% 以上であること

上記による評価結果を、母材部は表-2 に、ねじ部は表-3 に示す。ここで、ねじ部については、それ自体が切欠きありの試験片であるとみなし、上記の 2) および 3) による評価のみを行った。母材部、ねじ部とも、結果は全て BS7777 : Part3 : 1993 の靱性評価基準を満足した。

5. まとめ

定着性能確認実験にて以下のことが確認できた。

- 1) 全ての供試体において、十分な定着性能を有することが確認できた。
- 2) 定着部の補強仕様は、底版上段筋のみで十分であることがわかった。このため、実機ではスパイラル筋を配置しないこととした。
- 3) 防錆剤により中空 PC 鋼棒とモルタルの付着力は低下するが、定着性能への影響はないことがわかった。

低温性能確認実験にて、NAPP ユニット 60T に用いる中空 PC 鋼棒は低温下において十分な強度および靱性を有していることが確認できた。

以上より、NAPP 工法は、LNG 地下式貯槽の躯体に十分に使用できることが確認できた。

最後に、本実験を実施するに当たって、モルタルの検討および提供して頂いた太平洋マテリアル株式会社の方々に深く感謝致します。

6. 参考文献

- 1) BRITISH STANDARD, Flat-bottomed, vertical, cylindrical storage tanks for low temperature service, British Standards Institution, 1993
- 2) NAPP 法設計・施工マニュアル, NAPP 工法技術研究会技術部会, 平成 15 年 1 月
- 3) 引抜き試験による鉄筋とコンクリートとの付着強度試験方法 (JSCE-G 503-1999), 社団法人土木学会, コンクリート標準示方書 [基準編], 2005 年 3 月



母材部 (切欠きなし)



母材部 (切欠きあり)



ねじ部

写真-2 破断状況

表-2 母材部

試験体 No.	伸び		切欠きあり	切欠きなし	NSR
	切欠きなし	切欠きあり	引張強度	0.2%耐力	
	%		N/mm <sup>2</sup>		
No. 1	4.8	2.2	1293	1222	1.06
No. 2	4.2	2.1	1288	1204	
No. 3	5.0	2.1	1293	1206	
平均値	4.7	2.1	1291	1210	1.06
基準値	3.0以上	1.0以上	—	—	1.0以上

表-3 ねじ部

試験体 No.	伸び	引張強度	0.2%耐力	NSR
	%	N/mm <sup>2</sup>		
No. 1	3.2	1218	1222	1.01
No. 2	4.1	1220	1204	
No. 3	4.8	1238	1206	
平均値	4.0	1225	1210	1.01
基準値	1.0以上	—	—	1.0以上

注) 表中の「0.2%耐力」は、表-2の「切欠きなし」の値を用いた。