

LNG地下タンクへのNAPP工法の適用

永島 三雄¹・土屋 雅徳²・大谷 悟司³

¹正会員 清水建設株式会社 土木東京支店土木第2部(〒105-8007 東京都港区芝浦1-2-3)

²正会員 清水建設株式会社 土木技術本部社会基盤統括部(〒105-8007 東京都港区芝浦1-2-3)

³正会員 オリエンタル白石株式会社 施工・技術本部土木技術部(〒102-0093 東京都千代田区平河町2-1-1)

LNG地下タンクの外槽に相当する鉄筋コンクリート製躯体は、近年、側壁と底版の間に構造目地を設けたヒンジ結合タイプから、側壁と底版を一体とした剛結合タイプに移行している。剛結合タイプの躯体では、土水圧の作用によって結合部に生じる大きな曲げに抵抗するため、ハンチ構造の採用、鉛直プレストレスの導入といった対策がとられている。

現在、筆者らが設計・施工にあたっているLNG地下タンクにおいては、このような剛結合部への鉛直プレストレス導入の目的でプレテンション工法の一つであるNAPP工法を適用した。本稿は、NAPP工法適用の利点について述べるとともに、適用にあたって実施した確認実験および実機における施工結果について報告するものである。

キーワード：LNG地下タンク, NAPP工法, 工期短縮

1. はじめに

LNG地下タンクは、 -162°C の極低温液体であるLNG(液化天然ガス)を大量かつ安全に貯蔵することを目的とした設備であり、その大部分が地下に構築され、貯蔵液の最高液面が地盤面以下であるということにより定義付けられるものである。このため、万一の際にもLNGが地表に流出することがなく、本質的に安全であるとともに、地上への突出部分が低いこと周囲の景観への負荷が小さいという特長を持つ。

LNG地下タンクの主たる構成部材は、液密・気密性を有し貯液機能を担う鋼製メンブレン・鋼製屋根、主として土水圧に抵抗し地下に大空間を確保するための鉄筋コンクリート製躯体、メンブレンと躯体の間に設置されるLNGの極低温を保持するための保冷材である。メンブレン・屋根・保冷材は機械メーカーにより、躯体は土木メーカーにより建設されるのが通例である。

図-1に、本稿の対象となっているNAPP工法を適用したLNG地下タンク(以下、対象地下タンク)の構造寸法を示す。タンクの貯蔵容量は16万kLであり、メンブレン(内槽)の内径は71.7m、最大液深は40mである。鉄筋コンクリート製躯体は内径72.19m、底版上面から側壁頂部までの高さは42.218mであり、部材の厚さは側壁2.3m、底版5.0mという巨大なものである。

躯体の構造には、近年、大きな変化が見られる。すなわち、図-2(a)に示すように、従来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が主流であっ

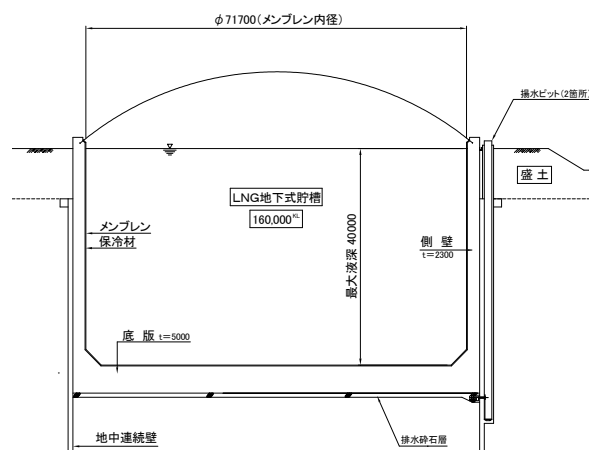


図-1 対象地下タンクの構造

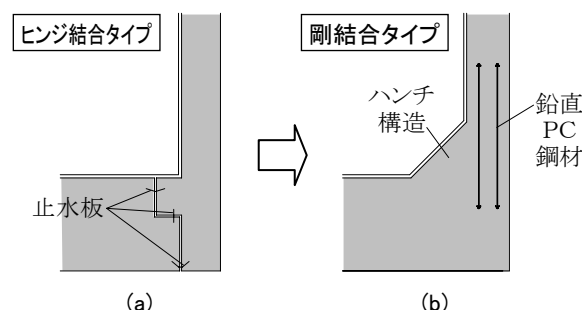


図-2 側壁～底版結合構造の変遷

たが、近年は同図(b)に示す側壁と底版を一体とした剛結合タイプに移行している。ヒンジ結合タイプの場合は、躯体内への地下水の侵入を防ぐため、目地部に2～4重

の止水対策を施す必要があったが、剛結合タイプではその必要はない。このように継ぎ目がなくなることは、容器構造物にとって本質的に好ましい方向への変化であるといえるが、一方で、剛結構造とすることで結合部には土水圧の作用による大きな曲げが発生することとなり、如何にしてこれに耐えうる構造とすることが設計上の課題であった。

3次元固体要素を用いた構造解析技術等の進歩により、この課題に対して、1)ハンチ構造の採用、2)高強度・太径鉄筋の適切な配置、3)結合部への鉛直プレストレスの導入、といった解決策が見い出され、剛結合タイプが採用されるに至った。なお、最初の剛結合タイプ地下タンクが運転を開始したのは、2003年のことである。

図-3に対象地下タンクの剛結合部分の構造概要を示す。結合部には高さ3m×幅3mのハンチを設けている。また、側壁下端部の主筋(網筋)は内外各2段ずつとし、鉛直方向については、不足分をプレストレスの導入により補う構造とした。当該部分の鉛直筋はD38～D51を200mmピッチで配筋している。鉛直筋を3段配置としプレストレスを導入しない構造も考えられたが、1)コンクリートの充填性が低下する懸念があること、2)ハンチ斜め筋等、側壁の網筋を貫通して配置される鉄筋の施工が困難になること等の理由により、鉛直プレストレスを導入する構造を採ることとした。

設計上、プレストレスが必要となるのは、側壁下端部の6mの区間である。このような局所部分へのプレストレス導入に対し、対象地下タンクでは、通常のPC鋼棒を用いたポストテンション工法に代えて、NAPP工法を採用することとした。

以下、剛結合タイプのLNG地下タンクにNAPP工法を適用することの利点、適用に際して実施した確認実験の内容および実機におけるNAPP工法の施工について述べる。

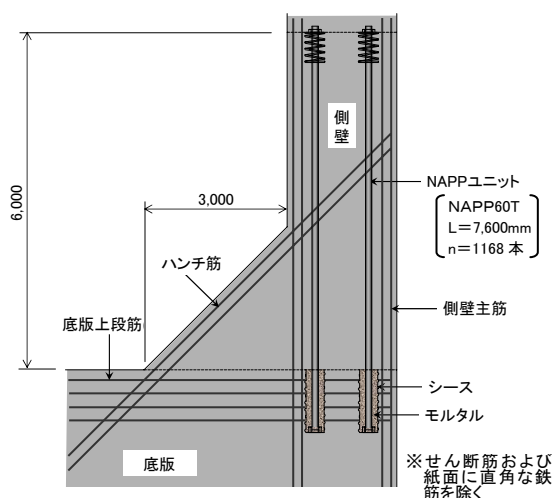


図-3 剛結部の構造概要

2. NAPP工法の概要と利点

(1)NAPP工法の概要¹⁾

NAPP工法(Non Abutment Pretensioning Prestressing Method)は、あらかじめ緊張された状態の中空PC鋼棒を型枠内に配置し、コンクリートの打込み・硬化後に緊張力を解放して部材にプレストレスを導入する一種のプレテンション工法である。

NAPP工法では、PC鋼棒は図-4に示すユニット(以下、NAPPユニット)の形で現場に搬入される。NAPPユニットは、主材である中空PC鋼棒(SBPR930/1080)と、これに緊張力を与えるための反力PC鋼棒、NAPPホルダー、エンドホルダー等で構成されている。

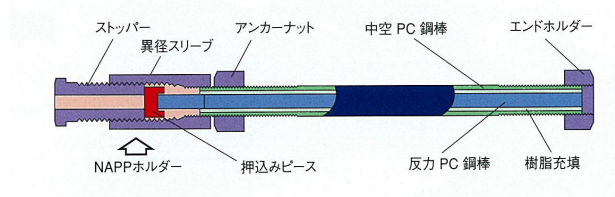


図-4 NAPPユニットの構造・各部名称

緊張力導入は図-5に示すように、アンカーナットに反力をとらせて反力PC鋼棒を押し込むことにより行う。反力PC鋼棒はストップバーで元の長さに戻らないように拘束される。なお、一連の緊張力導入・保持の作業は、専門の工場にて厳密な管理の下に行われるため、現場での緊張管理は原則不要である。

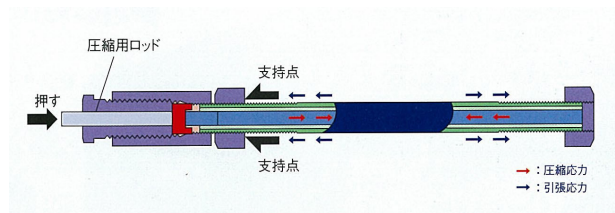


図-5 中空PC鋼棒への緊張力導入

NAPPユニットを型枠内の所定の位置に設置した後、コンクリートを打ち込む。コンクリートが所定の強度に達した後、専用の解放機器を用いてストップバーを緩めることで、コンクリート部材にプレストレスが導入される(図-6)。

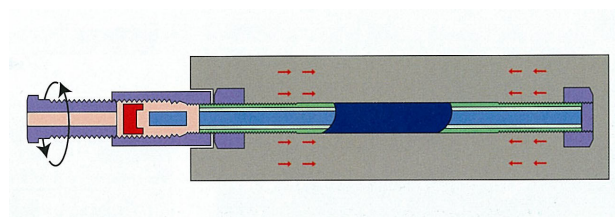


図-6 緊張力解放によるプレストレス導入

中空PC鋼棒と反力PC鋼棒の間には遅延硬化型の樹脂が充填されており、解放後のグラウト等は不要である。また、コンクリートへの力の伝達は、通常のプレテンション工法と同様、PC鋼棒とコンクリートとの付着を介して行われる。PC鋼棒両端のアンカーナット・エンドホルダーには、万一付着力が低下した時に、支圧定着により部材の急激な耐力低下を防ぐ役割が与えられている。

(2)NAPP工法の利点

上記の工法原理から、NAPP工法は、現場におけるプレストレス導入作業が通常のPC鋼棒を使用するポストテンション工法に比べて容易であり、グラウト等の後作業もなく、プレストレス導入に関わる工期が大幅に短縮できるという利点を有する。

対象地下タンクにおいても躯体構築の工程は厳しいことが想定され、工程確保優先の観点から、ポストテンション工法との比較検討の結果、NAPP工法を適用するに至った。

また、NAPP工法を適用した理由として、工期短縮の他に、図-7に示すような施工手順をとることにより、NAPPユニット建て込みを側壁主鉄筋組立の後に行うことができるため、作業足場の確保やユニットの固定が容易になるという点が挙げられる。

この施工手順では、先行して構築される底版にNAPPユニットを建て込むための箱抜きをPC用シースを使って予め仕込んでおく点がポイントである。このようにしておくことで、NAPPユニット建て込み時期に自由度ができ、側壁鉄筋工との干渉も最小限に抑えることができる。NAPPユニットは、箱抜き内にエンドホルダー側を挿入した後、無収縮モルタル充填により固定される。

3. 箱抜き定着部の性能確認実験

(1)実験の背景および目的

NAPP工法の設計・施工マニュアルによれば、「NAPPアンカー工法」として、既存のコンクリートを削孔した穴にNAPPユニットのエンドホルダー部を挿入し、無収縮モルタルを充填して定着させる工法（主として既設構造物の補強もしくは改良に使用される）は規定されているが、今回のようにあらかじめシースを用いてNAPPユニットを挿入するための箱抜きを作って定着部とした事例はない。

そこで、このようなシースおよびモルタル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とした。

(2)供試体および実験方法

供試体は、実機におけるNAPPユニットの実際の配置間隔および定着長を考慮し、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）とした。

実験要因は定着部の補強仕様とし、NAPP工法の標準仕様であるスパイラル筋を配置した場合と、シースを取り囲んで配置されている底版上段筋相当の補強鉄筋を配置した場合の2種類とした。また、NAPPユニット建て込みから側壁コンクリート打設までの期間の鋼棒の発錆を防止する目的で防錆剤を塗布することを想定して、前述の后者の定着部仕様において防錆剤を塗布した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に供試体の定着部補強状況を示す。

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 ²		
S1	スパイラル筋 (標準工法)	24	50	—
T1	底版上段筋 相当の鉄筋			—
T2				防錆剤塗布

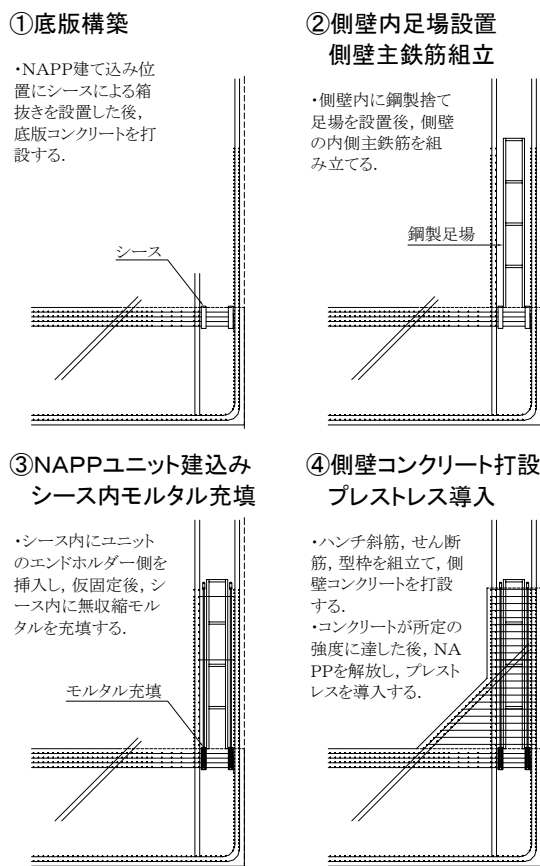


図-7 剛結部構築手順

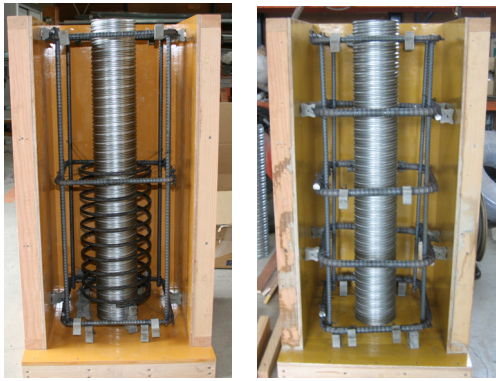


写真-1 供試体

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、シーす部の周辺を拘束して、油圧ジャッキにて中空PC鋼棒に鉛直方向の荷重を与えた。荷重速度は毎分50N/mm²とした。引抜荷重の測定は、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。

(3)実験結果および考察

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耐力(830.9kN、NAPP工法設計・施工マニュアル¹⁾より)を作用させた場合に、定着部が抜け出さなければ十分な定着性能が確保されていると考えられる。

図-8に、実験で得られた引抜荷重－変位の関係を示す。

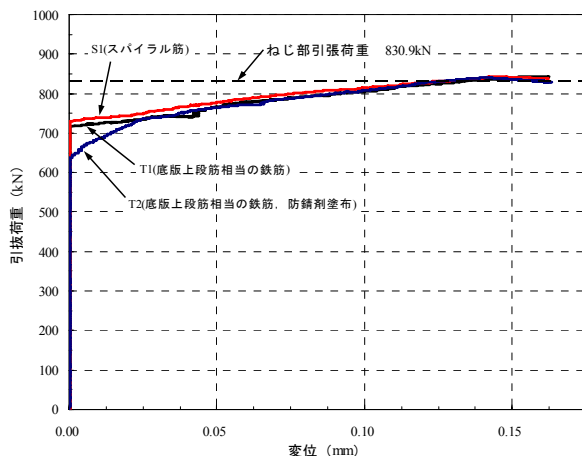


図-8 引抜荷重－変位の関係

図-8より、いずれの供試体ともNAPPユニット60Tに用いる中空PC鋼棒のねじ部引張耐力まで急激な変位の増加はなく、シーす内のモルタルおよびシーす周辺のコンクリートの破壊は生じなかった。また、モルタルとシーすの界面およびシーすとコンクリートの界面に大きなずれは生じなかった。さらに、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。

スパイラル筋を配置した供試体S1と底版上段筋相当の鉄筋を配置した供試体T1は同じ挙動を示しており、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。この結果に基づいて、実機ではスパイラル筋を省略した。

また、T1と防錆剤を塗布した中空PC鋼棒を用いた供試体T2と比較すると、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鋼棒とモルタルの間の付着力は低下すると考えられるが、変位量0.025mm以降については挙動は同じであり、終局的な定着性能への影響はないことがわかった。

4. 中空PC鋼棒の低温性能確認実験

(1)実験の背景および目的

LNG地下タンクが液を受け入れ、運用を開始すると、LNGの冷熱により躯体の温度は徐々に低下する。図-9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を示したものである。本図から、NAPPユニットが配置される領域の温度は、-40℃～-10℃になることがわかる。

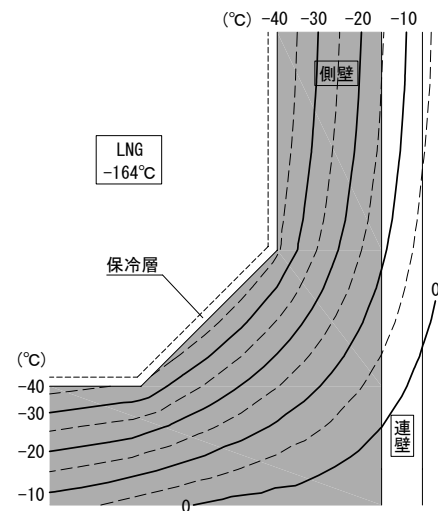


図-9 結合部の温度分布

LNG地下タンクに使用する材料は、このような低温状況下においても、性能の低下や脆性的な破壊を生じないことが求められる。

そこで、NAPP工法を採用するにあたって、実験により、低温下におけるNAPPユニット用中空PC鋼棒の機械的性質(引張強さ、靱性)を確認することとした。なお、靱性の評価には、BS7777:Part3:1997²⁾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。

(2)供試体および実験方法

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（昇華温度-79℃）を充填することで温度を保つこととした。図-10に、試験時の温度履歴の一例を示す。

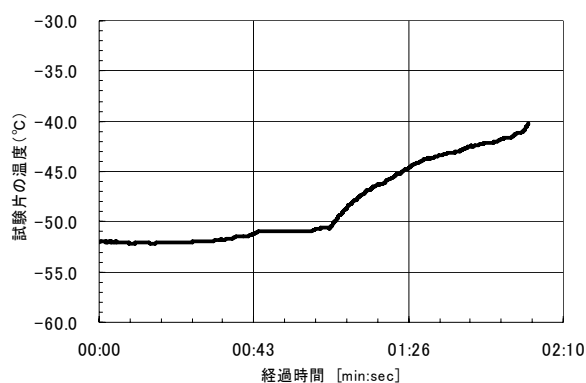


図-10 試験時の温度履歴の一例

(3)実験結果および考察

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め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。

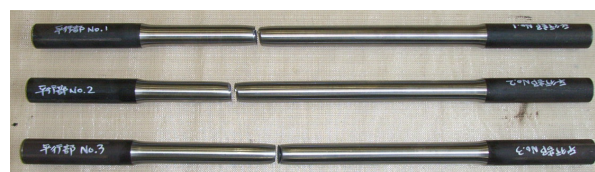
引張強さについては、鋼材の一般的な低温特性と同様、低温下では常温に比べて増加する傾向が見られ、JIS規格値を問題なく満足した。

靱性は、以下に示すBS7777:Part3:1997の基準により評価することとした。

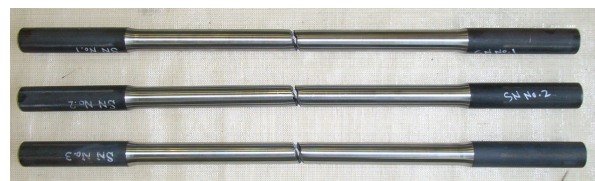
- 1) 切欠きなし試験片における塑性伸び（破断位置より2d以上離れた100mm以上の標点間距離における伸び）が3%以上であること
- 2) 下式により定義される切欠き感受性比（NSR）が1.0以上であること

$$NSR = \frac{\text{切欠きあり試験片の引張強度}}{\text{切欠きなし試験片の0.2\%耐力あるいは降伏強度}}$$

- 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



(a) 母材部（切欠きなし）



(b) 母材部（切欠きあり）



(c) ねじ部

写真-2 破断状況

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、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の靱性評価基準を満足した。

表-2 母材部の評価結果

試験体 No.	塑性伸び		引張強さ		0.2%耐力	NSR
	切欠き なし	切欠き あり	切欠き なし	切欠き あり	切欠き なし	
	%		N/mm ²			
No.1	4.8	2.2	1303	1293	1222	1.06
No.2	4.2	2.1	1297	1288	1204	
No.3	5.0	2.1	1299	1293	1206	
平均値	—	—	—	1291	1210	
基準値	≥3.0	≥1.0	≥1080	—	—	≥1.0

表-3 ねじ部の評価結果

試験体 No.	塑性伸び	引張強さ	0.2%耐力	NSR
	%	N/mm ²		
No.1	3.2	1218	1222	
No.2	4.1	1220	1204	
No.3	4.8	1238	1206	
平均値	—	1225	1210	1.01
基準値	≧1.0	—	—	≧1.0

注) 表中の「0.2%耐力」は、表-2の「切欠きなし」の値とした。

以上より、NAPPユニット用中空PC鋼棒は、LNG地下式貯槽の躯体に使用するPC鋼材として、低温下においても十分な強度ならびに靱性を有するものと判断できる。

5. NAPP工法の施工

(1) シース設置～NAPPユニット設置

第2節で述べたとおり、NAPP施工の最初のステップは底版へのシースの設置である。写真-3に、シース設置状況を示す。NAPPユニットの位置はシースで決まってしまうため、設置にあたってはシースの位置・間隔・レベルの管理を重点的に行った。また、底版コンクリート打設時にシースが浮き上がることがないように、シースの下面側を底版内に設置された架台等に固定した。

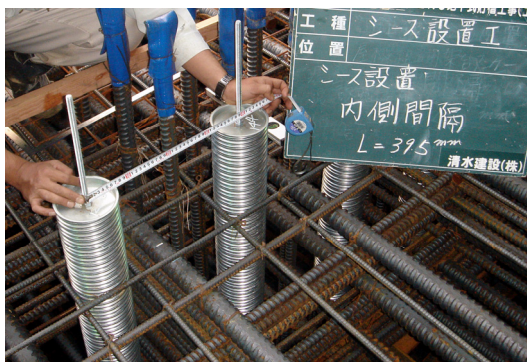


写真-3 シース設置状況

底版コンクリート打設および側壁主筋組立の後、NAPPユニットの建て込みを行った。建て込みは2班体制で行い、写真-4に示すように専用の吊り治具を用いて一度に4本ずつユニットをタンク内に投入し、シース内に設置後、無収縮モルタルを充填した。ユニット建て込み時には、ユニットに強い衝撃を与えないことと、鉛直度の確保に留意した。

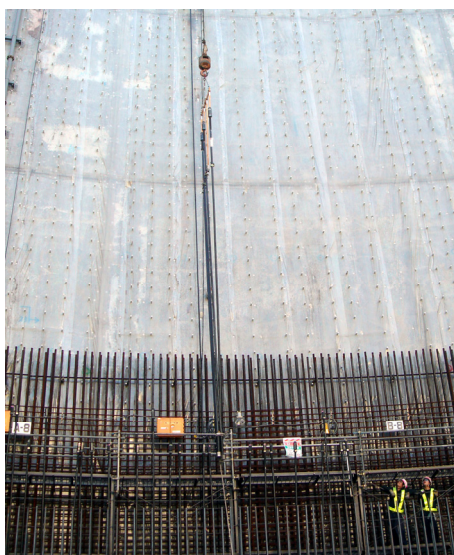


写真-4 NAPPユニット投入状況

(2) NAPP解放

NAPPユニットを建て込んだ後、ハンチ筋・せん断筋

の取り付け、型枠の組立を行い、側壁コンクリートを打設した。コンクリートの強度が所定の30N/mm²に達したことを確認しNAPPの解放を行った。写真-5にNAPP解放状況を示す。

解放は、2班体制とし、2班を対角位置に配置し、その関係を保ったまま同時に時計回りの方向に進むようにした。また、解放には専用の機器を用いるため、緩めたストッパーや反力PC鋼棒が飛び出すことは原則起こりえないが、万一を考え、NAPPユニットの直上には体を入れないことを安全管理上のポイントとした。

写真からもわかるように解放機器は1人で持ち運ぶことが可能で、1本当りの解放に要する時間も3～4分程度と短い。1168本の解放に要した期間は、2班体制で4日であった。これにより、通常のポストテンション工法を用いる場合に比べ、約半月の工期短縮が実現できた。



写真-5 NAPP解放状況

6. おわりに

本稿を通じて、LNG地下タンクへのNAPP工法の適用性を明らかにするとともに、工期短縮という命題に対して、NAPP工法が有効に活用できることを確認した。

現在、エネルギー需給は石油を中心に世界的に逼迫の様相を呈しており、LNGも例外ではない。このような情勢のもと、安価で安定したガスの供給のためには、貯蔵設備のタイムリーな拡充が不可欠な要素となっており、タンク建設には一層の工期短縮が求められている。本稿が、その一助となれば幸いである。

参考文献

- 1)NAPP工法技術研究会技術部会：NAPP工法設計・施工マニュアル，1993
- 2)British Standards Institution: BRITISH STANDARD, Flat-bottomed, vertical, cylindrical storage tanks for low temperature service, 1993