

報告 スリップフォーム工法による大容量LNG貯槽のPC防液堤の施工

近松 竜一^{*1}・桜井 邦昭^{*2}・大西 俊輔^{*3}・西崎 丈能^{*4}

要旨: 大容量 LNG 貯槽の PC 防液堤の構築に際してスリップフォーム工法を適用し、総量 1 万 m³ のコンクリートを 20 日間連続施工した。本報告では、薄層で広範囲に打ち込める高い流動性、若材齢時で脱枠した際に自立できる強度、供用期間中の塩害や中性化による鋼材腐食に対する抵抗性を有するコンクリートの仕様、製造および品質管理結果を示し、防液堤の急速化施工に対し有用な工法となることを明らかにした。

キーワード: LNG 貯槽, PC 防液堤, スリップフォーム, 流動性, 強度発現特性, 耐久性

1. はじめに

天然ガスを-162℃の極低温で液化した LNG は、クリーンで環境に優しいエネルギーで、都市ガスや発電用に需要が増大している。この LNG を安定供給するうえで、貯蔵施設には高い安全性と信頼性が求められている。

PCLNG 貯槽は、金属二重殻式貯槽（内槽）と PC 製防液堤を一体化した構造で、万一、LNG が内槽から漏洩しても外側のコンクリートで貯留できる。地上式 LNG 貯槽の標準的な形式として既に数多くの施工実績がある¹⁾。

近年では、エネルギー需要の増大に伴い、貯槽の大容量化や工期短縮が強く求められている。そこで、一層の合理化を推進するために、PC 防液堤の構築にスリップフォーム工法を適用し、施工の急速化を図ることとした。

スリップフォーム工法は、型枠を滑動・上昇させながらコンクリートを打ち込み、躯体を構築する工法である。煙突やタワーなどの縦長で円筒状の構造物を構築する工法としてこれまでに多くの実績がある。近年では東京スカイツリーの芯柱の構築にも採用されている²⁾。しかし、本工事対象の LNG 貯槽の防液堤は直径が約 90m あり、このような大型の円筒状構造物への適用は前例がない。

スリップフォーム工法により防液堤を構築するうえで、コンクリートには薄層で広範囲に打ち込める高い流動性、若材齢時で脱枠した際にも自立できる強度の発現性が求められる。併せて、供用期間の長期にわたる耐久性を確保する必要がある。

前報³⁾では、これらの要求を確保するためのコンクリートの仕様を実験的に検討し、使用材料や配合を選定するとともに基礎的物性について検証した。本報告は、これらのコンクリートを現場に設置したバッチャープラントにおいて 1 日あたり約 500m³、20 日間連続で総量 1 万 m³ 製造した際の品質管理結果、スリップフォーム工法による PC 防液堤の施工管理結果を示すものである。

2. スリップフォーム工法による施工概要³⁾

2.1 PC 防液堤の概要

対象とする LNG 貯槽の概要を図-1 に示す。貯槽の容量は 23 万 m³ である。防液堤は、内径 89.2m、高さ 43.6m、壁厚 80cm で、設計基準強度は高さ方向に 3 水準（60、40 および 30N/mm²）に分かれている。この防液堤のうち、高さ 40m の区間にスリップフォーム工法を適用した。

PC 防液堤が平面的に大型の円筒状構造物であること、コンクリートの打込み作業と鉄筋や PC シースの組立作業を並行して行うこと等を考慮し、スリップフォーム装置の上昇速度を 1 日あたり 2m に設定し、20 日間で構築する計画とした。

防液堤を高さ方向に 3~4m ごとのリフトに分割し、順次構築していく在来工法では約 10 か月の工期が必要であり、本工法の採用により工期を大幅に短縮することができる。

2.2 スリップフォーム工法による構築手順

スリップフォーム装置のイメージを図-2、この工法による防液堤の構築手順を図-3 に示す。

スリップフォーム装置は、型枠、型枠を保持するヨーク（鋼製の門型フレーム）、装置全体を上昇させる油圧ジャッキ、装置が上昇するための反力支持材（クライミングロット）、コンクリートを打込み箇所へ水平搬送するレールおよび搬送用バケット（容量 0.5m³）などから構成されている。

スリップフォーム装置は、90 分毎に約 15cm 上昇させることを標準とした。コンクリートは薄層で打ち重ねながら打ち込み、これに合わせて鉄筋や PC シース管を順次組み立てる計画とした。なお、コンクリートは昼夜を問わず 24 時間連続的に供給する必要があることから、現場にバッチャープラントを設置し、コンクリートを供給することとした。

*1 (株)大林組 技術本部 技術研究所 生産技術研究部 主席技師 博士(工学) (正会員)

*2 (株)大林組 技術本部 技術研究所 生産技術研究部 副主任研究員 工修 (正会員)

*3 大阪ガス(株) エンジニアリング部 副課長 工修 (正会員)

*4 大阪ガス(株) エンジニアリング部 シニアエンジニア 博士(工学) (正会員)

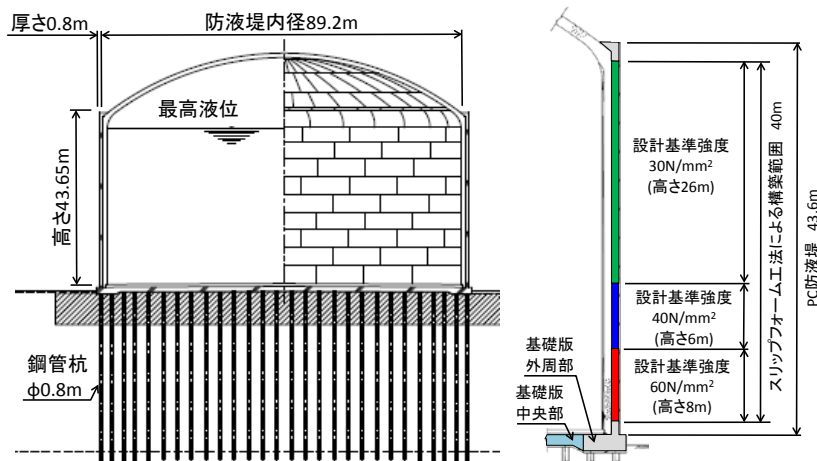


図-1 LNG貯槽のコンクリートの概要



図-2 スリップフォーム装置のイメージ

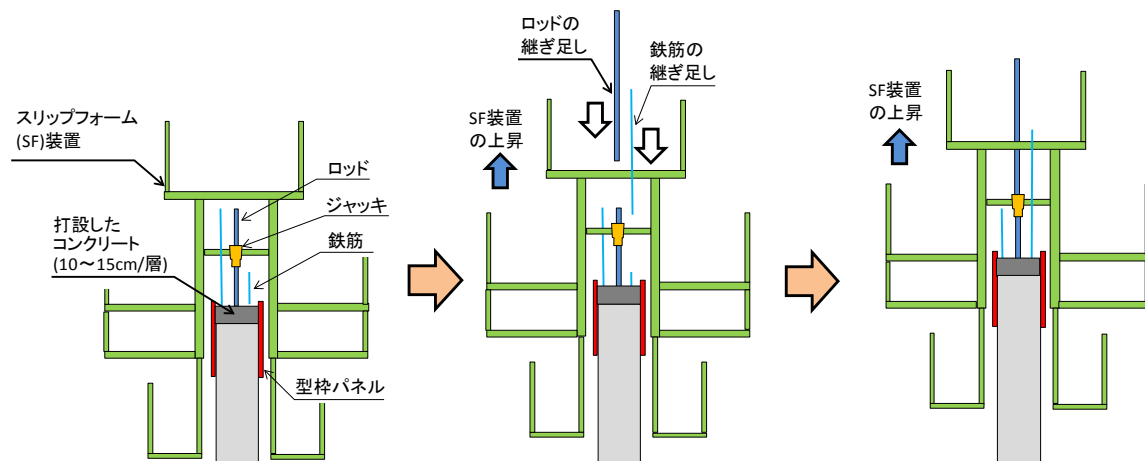


図-3 スリップフォーム工法による防液堤の構築イメージ

3. コンクリートの仕様および製造・品質管理結果

3.1 コンクリートの仕様

使用材料および防液堤に用いた各種コンクリートの配合の概要を表-1および表-2に示す。

(1) フレッシュコンクリートの流動性

打上りの1層の高さは約15cmで、全周長約280mを薄層で均等に打ち込むため、スランブフローで流動性を管理し、打込み時に補助的に締めめを行う加振併用型の高流動コンクリートを採用した。目標スランブフローは50cmとした。所要の流動性を付与するために高性能AE減水剤(SP)を用い、特に30N/mm²の配合には増粘成分を含有したタイプ(VA)を使用し、流動性に見合う材料分離抵抗性を確保した。

表-1 使用材料の概要

分類	記号	種類、物理的性質など
セメント	BB	高炉セメントB種、密度3.04g/cm ³
	M	中庸熱ポルトランドセメント、密度3.22g/cm ³
細骨材	S1	海砂(除塩対策済み) 表乾密度2.57g/cm ³ 、吸水率2.24%
	S2	砕砂、表乾密度2.58g/cm ³ 、吸水率1.60% 粗粒率2.87
粗骨材	G1	砕石2010、表乾密度2.62g/cm ³ 吸水率0.95%、実積率59.3%
	G2	砕石1505、表乾密度2.61g/cm ³ 吸水率0.92%、実積率58.6%
混和剤	SP	高性能AE減水剤(ポリカルボン酸系)
	VA	高性能AE減水剤(増粘剤一液タイプ) (減水成分:ポリカルボン酸系、増粘剤成分:グリコール系)
	R	遅延剤(脱枠時強度調整剤)

表－２ 防液堤に使用した各種コンクリートの配合の概要

コンクリートの種類	設計基準強度 (N/mm ²)	セメント種類	目標スランプフロー (cm)	目標空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						混和剤 (C×%)
							W	C	S1	S2	G1	G2	
30-50-20BB	30	BB	50	4.5	45.0	49.4	175	389	662	166	431	429	0.90 (VA)
40-50-20M	40	M	50	4.5	40.0	49.5	170	425	664	167	431	429	1.10 (SP)
60-50-20M	60	M	50	4.5	33.0	47.2	170	515	607	152	431	429	1.05 (SP)

表－３ モデル試験体のコアの促進試験結果に基づく中性化速度係数および塩化物イオン拡散係数の検討結果

コンクリートの種類	促進試験による中性化速度係数 (mm/√週)	実環境での中性化速度係数*1 (mm/√年)	所要とされる中性化速度係数 (mm/√年)	塩化物イオン濃度*2 (塩分浸漬 3ヶ月) (kg/m ³)					促進試験による塩化物イオン拡散係数 (cm ² /年)	所要とされる塩化物イオン拡散係数 (cm ² /年)
				0-20	20-40	40-60	60-80	80-100		
30-50-20BB	1.3	0.73	8以下	9.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.35	0.42以下
40-50-20M	0.7	0.40		10.2	0.5	0.5	0.5	0.4	0.39	0.57以下

*1 促進中性化試験(期間3か月)における中性化速度係数を文献(4)に準じて換算
*2 コンクリート表面からの距離ごとの測定値

(2) 型枠の取外し時におけるコンクリートの強度

打ち込んだコンクリートが型枠に接している段階では型枠の滑動に支障が生じないように硬化を抑制し、コンクリートが型枠から外れた時点で自立する強度が必要である。このため、型枠の上昇速度 (10cm/h) とコンクリートが接する型枠高さ (1.2m) から定まる型枠の取外し材齢 (12 時間) における圧縮強度を 0.1~0.3N/mm² に設定し、コンクリート温度に応じて所定の範囲内に強度発現を制御する目的で遅延剤を使用した。

(3) 耐久性

LNG 貯槽は耐用年数 50 年で、供用期間中は塩害や中性化による鋼材腐食を防止することが求められる。また、防液堤は高強度のマスコンクリートで、海岸に隣接していることから、温度ひび割れや塩害に対する配慮が必要とされる。そこで、2 種類のセメントを使い分け、60 および 40N/mm² の高強度の部位は中庸熟ポルトランドセメント、30N/mm² の部位は高炉セメント B 種を使用することとした。

表－２に示す 2 種類の配合 (30-50-20BB および 40-50-20M) について、実際の施工条件を模擬したモデル試験体を製作し、採取したコアを用いて促進中性化試験および塩分浸漬試験を行った。これらの試験から得られた中性化速度係数および塩化物イオン拡散係数をもとに耐久性に関する照査を行い、早期に脱枠した場合でも供用期間において鋼材腐食を抑制できることを確認した。

(表－３参照)

表－４ コンクリートの各種品質管理結果

試験項目	項目	単位	コンクリートの種類		
			60-50-20M	40-50-20M	30-50-20BB
スランプフロー	試験回数	回	17	12	50
	平均値	cm	51.6	50.5	47.9
	標準偏差	cm	2.5	1.9	2.3
空気量	試験回数	回	17	12	50
	平均値	%	4.6	4.4	4.7
	標準偏差	%	0.3	0.2	0.3
若材齢の圧縮強度 (12時間)	試験回数	回	9	7	27
	平均値	N/mm ²	0.23	0.24	0.26
	標準偏差	N/mm ²	0.04	0.07	0.07
材齢91日圧縮強度	試験回数	回	17	12	50
	平均値	N/mm ²	87.3	71.1	65.6
	標準偏差	N/mm ²	2.7	1.6	2.3

3.2 コンクリートの製造および品質管理結果

コンクリートは、現場に設置したバッチャープラントにおいて、強制二軸練りミキサ (容量 2.5m³) を用いて製造した。1 バッチの練混ぜ量は 2m³ とし、スリップフォーム装置の上昇に合わせて、約 24m³/h のペースで練り混ぜた。

練混ぜに際しては、コンクリートの練上がり温度に応じて遅延剤の添加量を適宜調整するとともに、1日2回、材齢 12 時間の圧縮強度を測定した (端面の整形は石膏でキャッピング)。また、細骨材の表面水率を 2 時間毎に測

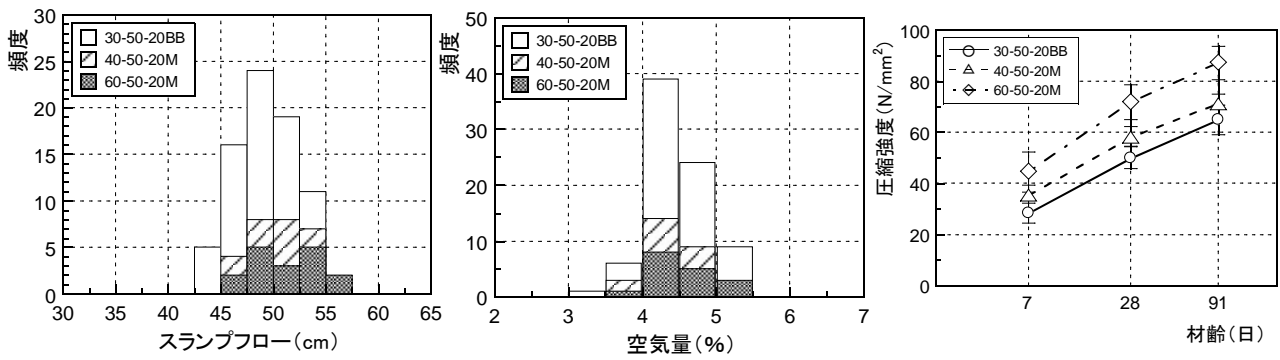


図-4 スランプフロー、空気量および圧縮強度の品質管理結果

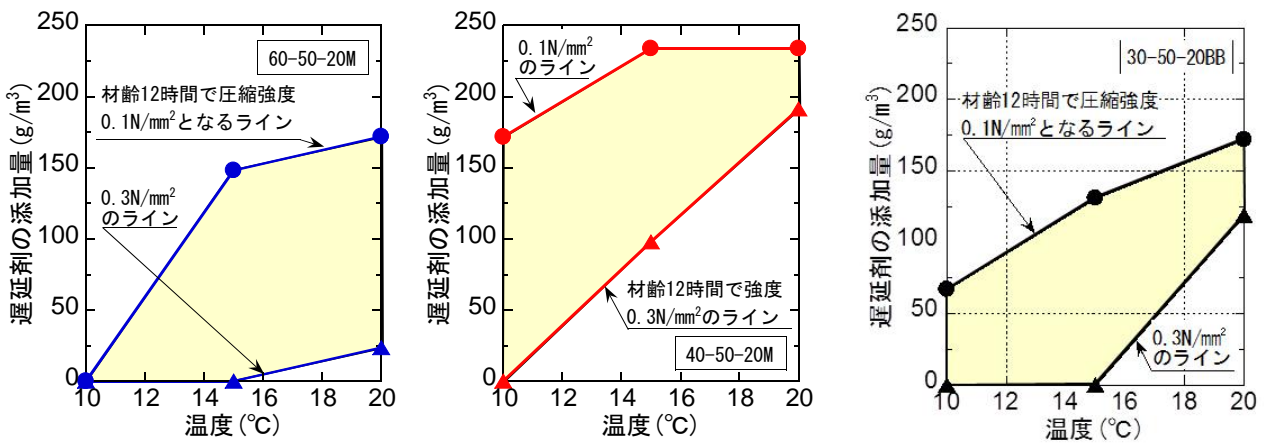


図-5 コンクリート温度と遅延剤の添加量

定し、表面水補正に反映させるとともに、50m³毎にフレッシュコンクリートの品質管理試験を実施した。コンクリートの各種品質管理結果の一覧を表-4に示す。また、これらのうち、スランプフロー、空気量および圧縮強度の管理結果を図-4に示す。いずれも目標の範囲内であればつきを小さく管理することができた。なお、若材齢時の強度発現を制御するために、図-5に示すようにコンクリート温度と遅延剤の添加量の関係を配合毎に実験により検証し、実施工時の脱枠時強度の管理の目安とした。その結果、温度条件に応じて遅延剤の添加量を調整することで、材齢12時間の圧縮強度を目標の範囲に制御することができた。

4. PC防液堤の施工管理結果

4.1 施工概要

スリップフォーム工法によりPC防液堤を構築するにあたり、それぞれの作業を効率良く、遅滞なく計画どおりに実施できるよう、管理の体制や指示・連絡方法などを事前に詳細に検討した。施工体制としては、周長280mを4分割し、それぞれの範囲で鉄筋・PCシース管の組立とコンクリートの打込みを担うよう4班構成とした。また、工事指揮者の下に、



写真-1 専用治具による鉛直鉄筋の吊上げ状況



写真-2 水平鉄筋の設置状況



写真-3 コンクリートの荷卸しおよび揚重バケットによる運搬状況



写真-4 搬送用バケットによる運搬およびシュートによる打込み状況



写真-5 コンクリートの流動および締固め状況

スリップフォーム装置の管理者、コンクリートの製造・品質管理者および4つの施工班長を配置する体制とし、それぞれの作業状況を工事指揮者に集約し、相互に連携をとりながら工事を進めた。

4.2 鉄筋・PC シースの設置

鉛直鉄筋は、地上にて専用の吊り上げ治具に20本取り付け、クレーンで吊り上げて設置する手法を採用し、荷揚げ回数の低減および装置上での組立作業を簡略化した(写真-1参照)。一方、水平鉄筋およびPCシース管

を効率良く設置するために、これらの作業に支障となるヨークの間隔を4mとし、水平鉄筋は8m、PCシース管は4mの長尺物で設置できるようにした(写真-2参照)。

4.3 コンクリートの打込み

バッチャープラントで製造したコンクリートは、アジテータ車(4m³積載)により約5分かけて貯槽ヤードまで運搬し、揚重バケット(容量1m³)に移した。その後、この揚重バケットをクレーンで吊り上げ、スリップフォーム装置上に設置した搬送用バケットにコンクリートを



写真-6 スリップフォーム工法によるPC防液堤の構築状況（左：5日目，中：15日目，右：20日目）

移し替え，打込み箇所まで運搬した。そして，搬送用バケットの底面に設置した開閉口からシュートを介して打ち込んだ（写真-3，写真-4参照）。この搬送用バケットは，各班2台ずつ設置し，1台が45度（約35m）の範囲の打込みを分担させることで，防液堤の全周にわたってコンクリートが均等に打ち上がるように配慮した。

コンクリートの流動状況を写真-5に示す。コンクリートの高い流動性により薄層でも型枠の隅々まで広範囲に流動し，補助的に締め固めることで充填できた。

今回の施工では打ち上がりの1層の高さが15cm程度と薄層で打ち込むため，層間の打重ね管理が重要であった。事前に確認した結果，コールドジョイントが発生するとされる貫入抵抗の限界値（ $0.1\text{N}/\text{mm}^2$ ）⁵⁾に対し，各配合を用いた場合の許容打重ね時間間隔は6時間程度で，計画上の標準的な想定値（90分）に対し十分に余裕があった。しかし，実施工では，打ち込んだコンクリートのごく表層が風や日射の作用によって乾燥し，こわばる現象が認められることもあった。そこで，このような場合には，下層のコンクリートをレーキや棒などで突いてこわばりをほぐしてから打ち重ねる対策を講じた。

PC防液堤の施工実績を図-6に，構築状況の一例を写真-6に示す。施工期間中（2013年4月），強風（秒速15m以上），降雨（3mm/h以上）等の影響で，一時的に数時間の中断はあったが，1日平均で約2m，20日間の連続施工により当初の計画どおり構築を完了できた。

5. まとめ

本報告の範囲内で得られた知見を以下に示す。

- (1) スランプフローを指標とする加振併用型の高流動コンクリートを用いることで，薄層で広範囲に均等にコンクリートを打ち込むことができる。
- (2) 高性能AE減水剤と遅延剤を併用し，温度条件に応じて遅延剤の添加量を調整することで，若材齢時の強度発現を制御できる。
- (3) 薄層でコンクリートを打ち込む場合，層間の一体性を確保するうえで，打重ね時間間隔の管理とともに

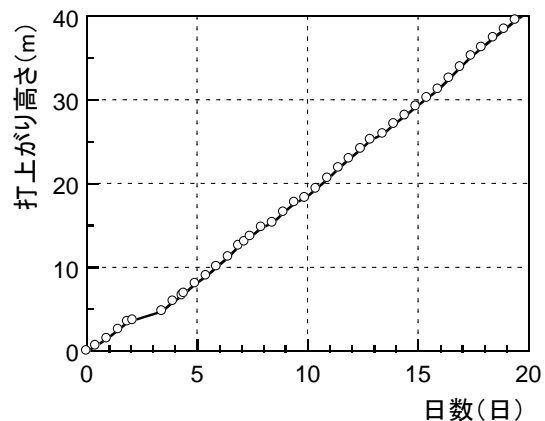


図-6 PC防液堤の施工実績

- (4) 風や日射などの影響による表層のこわばりに対して配慮する必要がある。
- (5) スリップフォーム工法の採用により，PC防液堤の構築期間が在来工法に比べて大幅に短縮できる。

参考文献

- 1) 西崎丈能，岡井大八，近松竜一，奥立稔，鎌田文男：PCLNG 貯槽建設工事の合理化研究と実構造物への適用，土木学会論文集 No.728/VI-58，pp.141-156，2003.3
- 2) 坂井利光，矢島雄一，神代泰道，江村勝：東京スカイツリーにおけるスリップフォーム工法による芯柱の構築，コンクリート工学，Vol.50，No.8，pp.677-682，2012.8
- 3) 近松竜一，桜井邦昭，大西俊輔，西崎丈能：大容量LNG貯槽のPC防液堤を対象としたスリップフォーム工法用コンクリートの基礎的性質，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，2013
- 4) 日本建築学会：高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針（案）・同解説，p.87，1991.7
- 5) 土木学会：コンクリートライブラリー103 コンクリート構造物のコールドジョイント問題と対策，pp.7-20，2000