

報告 大規模 LNG 地下式貯槽の高密度な配筋や閉鎖空間を有する側壁における高流動および中流動コンクリートによる施工

桜井 邦昭*1・前田 敬一郎*2・佐々木 高士*3・林 孝弥*4

要旨：大規模な LNG 地下式貯槽の側壁を構築するにあたり、高密度な配筋や閉鎖空間を有する部位に高流動コンクリートおよび中流動コンクリートを適用した。施工条件を考慮した配合を選定した後に、実物大モデルによる試験施工を行い、充填不良の防止や均質性の確保に必要となるフレッシュコンクリートの品質条件、打込み・締固めの具体的な方法を選定して実施工に反映した。その結果、充填不良等の不具合を生じることなく施工を完了した。

キーワード：LNG 地下式貯槽，側壁，高流動コンクリート，中流動コンクリート，試験施工

1. はじめに

LNG 地下式貯槽(以下、地下タンクという)は、LNG(液化天然ガス、-162℃)を効率良く安全に貯蔵できる円筒形の地下構造物である。東邦ガス(株)知多緑浜工場では、現在 3 基目の地下タンクを建設中である。本工事で構築する地下タンクの概要を図-1 に、基本形式および主要工事数量を表-1 に示す。

側壁は厚さ 2.1m、高さ約 52.5m の部材であり、高さ方向に 7 ロットに分けて構築する計画とした。このうち、ハンチ部分の 1 ロットは底版との剛結構造であり、鉄筋が高密度に配置され、作業員が内部に入って締固めを行うことが困難であることから、自己充填性を有する高流動コンクリートを適用した。一方、最上段の 7 ロットは鋼製屋根を固定する鋼材を巻き込んで構築する必要がある、コンクリートが充填しにくい閉鎖空間があることから、部分的に補助的な締固めで充填できる中流動コンクリートを適用した。

このような難易度の高いコンクリート部材を施工欠陥なく構築するには、単に流動性や充填性に優れたコンクリート配合を適用するだけでなく、施工時に想定される不具合を抽出し、それを防止するための具体的な施工および管理方法を検討することが重要である。

そこで、本工事では、過去の施工実績やコンクリートの供給体制等を踏まえた施工条件にもとづきコンクリートの仕様を設定して配合を選定した後、実物大モデルを用いた試験施工を行い、具体的な施工および管理方法を検討して、実施工に反映した。

本報告では、側壁 1 および 7 ロットにおけるコンクリートの配合選定、試験施工による施工方法の検討、およびそれらにもとづき実施した施工の結果について述べる。

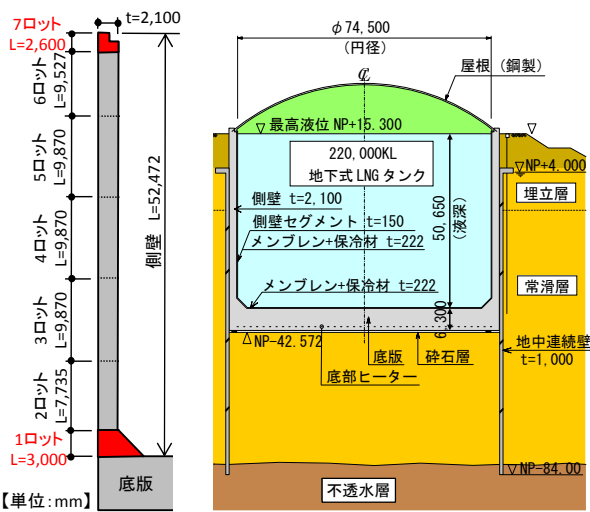


図-1 地下タンクの概要と側壁のロット割り

表-1 地下タンクの基本形式と主要工事数量

基本形式	屋根	鋼製、ドームルーフ型リングプレート形式
	底版・側壁	鉄筋コンクリート構造
主要工事数量	地中連続壁	鉄筋 2,000t、コンクリート 24,000m ³
	底版	鉄筋 5,500t、コンクリート 31,500m ³
	側壁	鉄筋 5,700t、コンクリート 28,900m ³

2. 側壁 1 ロットの施工（高流動コンクリート）

2.1 コンクリート配合の選定

側壁 1 ロットの断面図を図-2 に示す。また、過去の施工実績¹⁾やコンクリートの供給体制から立案した当初計画における施工条件の概要を表-2 に示す。

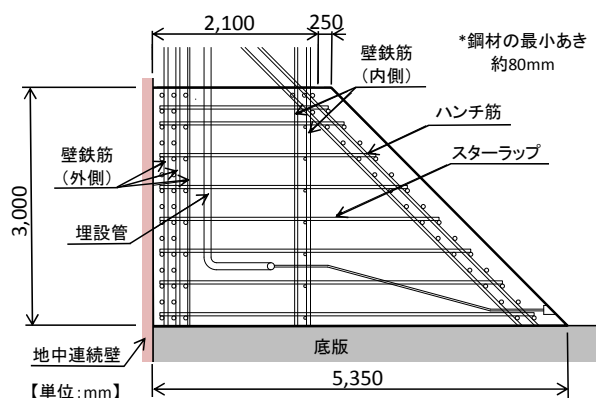
施工条件から設定したコンクリートの仕様を表-3 に示す。指針²⁾を参考に、自己充填性はランク 2 とし、目標スランプフローを 65cm に設定した。また、施工に伴う温度ひび割れの発生を抑制するため、低熱ポルトランドセメントを用い、高い流動性に応じた材料分離抵抗性

*1 (株)大林組 技術本部 技術研究所 生産技術研究所 副主任研究員 博士(工学) (正会員)

*2 (株)大林組 名古屋支店 東邦ガス緑浜工事事務所 工事長 修士(工学) (正会員)

*3 東邦ガス(株) 技術部 緑浜増設プロジェクト 係長 修士(工学)

*4 東邦ガス(株) 供給管理部 幹線グループ 係長 修士(工学)



図－２ 側壁１ロットの断面図

表－３ 施工条件により設定したコンクリートの仕様

項目	単位	要求性能および 目標とした品質	備考
設計基準強度	N/mm ²	36	管理材齢91日
水セメント比	%	55以下	水密性の確保
自己充填性	—	ランク2	指針 ²⁾ に準拠
スランプフロー	cm	65±7.5	荷卸し時(ただし、線上がりから 120分間以上、左記の範囲を満足 すること)
空気量	%	5.0±1.5	

表－２ 側壁１ロットの施工条件	
項目	数量・内容
断面寸法	高さ3.0m, 厚さ: 上面2.35m, 底面5.35m, 周長約240m
コンクリート数量	2,650m ³
計画施工時間	約15時間
出荷(供給)能力	出荷工場数: 5工場, 出荷(供給)能力: 200m ³ /h
作業班	6班(各班の担当範囲: 約40m)
施工層数	12層(20～35cm/層)
打込み間隔	5m
打重ね時間間隔	120分以内(施工トラブルを見込み75分以内で計画)

工場 名	W/C (%)	W/P (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					混和剤* ⁵ (C×%)
				W	P		S* ³	G* ⁴	
					C* ¹	LS* ²			
A	53.0	33.0	47.4	175	330	200	770	936	1.15
B	53.0	33.0	47.4	175	330	200	776	936	1.08
C	53.0	33.0	47.3	175	330	200	740	939	1.03
D	53.0	31.8	47.8	175	330	220	752	930	1.05
E	53.0	34.3	48.1	175	330	180	757	841	1.03

*1 低熱ポルトランドセメント, *2 石灰石微粉末, *3 陸砂, 砕砂, スラグ細骨材を混合使用(工場毎に混合比は相違), *4 砕石2005, *5 高性能AE減水剤(添加量は実機試験時の値) なお, 1, 2, 5は, 全工場で同じ銘柄を使用

表－５ 側壁１ロットの試験施工における検討項目と判定結果

検討項目	想定される不具合	検討方法	試験施工による判定結果
① スランプフローの目標範囲	材料分離, 充填不良	目標範囲の中心, 上限, 下限での流動・充填状況の確認	設定した目標範囲は妥当
② 圧送に伴う流動性の低下	閉塞, 充填不良	圧送前後でのスランプフロー試験の実施	圧送に伴う低下は小さい
③ 打込み間隔	充填不良, 均質性の低下	打込み後に, 各所から試料を採取し均質性を検証	打込み間隔5mは妥当
④ 端部や高密度配筋部の充填	充填不良, 均質性の低下	脱型後に試験片を切り出し, 充填状況を目視確認	端部・高密度配筋部も確実に充填
⑤ 打重ね時間間隔	コールドジョイント	打重ね時間間隔を変化させて実験. 脱型後, 一体性を確認	120分間隔でも一体性を確保
⑥ ハンチ面の表面状態	過大な表面気泡, 表面段差	透水性シートや気泡抜き取り器具の有無. 段差の有無を確認	通常の施工で気泡防止. 段差も発生しない

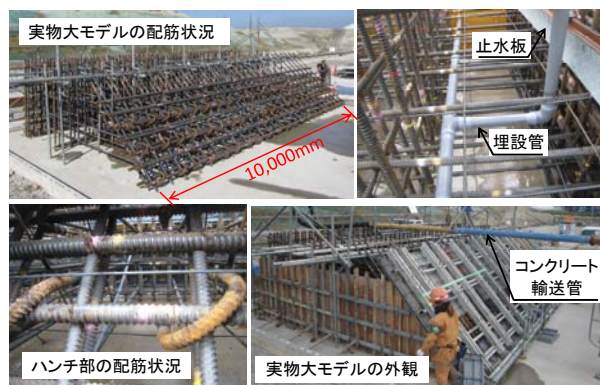
を確保するため石灰石微粉末を用いた。なお、配合選定後に温度応力解析を行い、目標としたひび割れ指数 1.45 以上(2007 年制定コンクリート標準示方書設計編に準拠)を満足することを確認した。

施工数量と各工場の供給能力を考慮して現場周辺の 5 工場から出荷することとし、室内および実機試験練りを行い、表－３の条件を満足する配合を選定した(表－４)。

2.2 実物大モデルによる試験施工

側壁１ロットは、鉄筋が高密度に配置され、作業員が内部に入って締固めを行うこと、打込み後の充填状況を確認することが困難と想定された。そこで、躯体の端部まで均質な状態でコンクリートを充填させるための品質条件および施工方法を決定することを目的として試験施工を行った。試験施工における検討項目を表－５に、実物大モデルの外観を写真－１に示す。

躯体形状および配筋条件は実構造物と同じとし、打込み時にコンクリートの流動を阻害する要因と想定される埋設管や止水板も同様に設置した。なお、過去の施工実績では打込み間隔を 5m に設定したことから、モデル延長は 10m とし、コンクリートが均質に充填できる距離を検証した上で打込み間隔を定めることにした。



写真－１ 試験施工に用いたモデルの外観(側壁１ロット)

打込みにはコンクリートポンプを用い、実施工と同様の配管径(5B)、圧送距離(水平換算距離 40m) とした。打込み速度や 1 層の打上がり高さも実施工と同様に、それぞれ 35m³/h, 30～35cm/層とした。

各項目の検討結果を以下に示す。

① スランプフローの目標範囲

スランプフローを目標範囲の中心 65cm, 上限 72.5cm, 下限 57.5cm 程度とした場合の流動状況を目視確認した。いずれのスランプフローでも鉄筋や埋設物の間隙を通して、型枠の隅々まで充填することを確認した(写真－２)。

②圧送に伴う流動性の低下

圧送前後で試料を採取してスランプフロー試験を行い、圧送に伴う低下は2～3cmと小さいことを確認した。

③打込み間隔

打込み間隔を5m(半径2.5m)とすることで、均質に充填できることを検証するため、打込み箇所から0, 2および3.3mの位置で試料を採取して洗い分析試験を行い、試料中に含まれる粗骨材量を調べた。結果を図-3に示す。測定した範囲では流動に伴う粗骨材量の低下は認められず、均質な状態で充填できることを確認した。また、各層の流動勾配は1/20～1/35であり、高流動コンクリートの使用によりほぼ水平に打込みが行えることも確認した。

④型枠端部や高密度配筋部での充填性

底版との取合いとなるハンチ下端部や地中連続壁側の高密度配筋部は、充填が困難な箇所である。そこで、試験施工後にこれらの部位を切り出し、充填状況を確認した。切り出した試験片の外観を写真-3に示す。ハンチ下端部や高密度配筋部においても、隅々までコンクリートが充填していることを確認した。

⑤打重ね時間間隔

コールドジョイントを防止する観点から、打重ね時間間隔を60, 90および120分で変化させた。脱型後の状況を写真-4に示す。いずれの時間間隔で打ち重ねた場合でも、コールドジョイントは認められず、一体性を確保できることを確認した。

⑥ハンチ面の仕上がり

ハンチ面は抑え型枠のため、型枠の浮き上がりに伴う段差や、過大な表面気泡が生じることも懸念された。そこで、施工時と同様の条件で型枠支保工やセパレータを設置するとともに、ハンチ面の型枠の一部分で透水性シーートの設置、櫛型の気泡抜き取り器具の使用およびそれらを用いない場合で試験した。脱型後に表面の仕上がり状況を観察したところ、特別な対応を行わずとも過大な径の気泡は生じないこと、今回用いた型枠支保工により段差のないハンチ面を構築できることを確認した。

2.3 実施工の状況と結果

1 ロットの施工時の状況を写真-5に示す。作業班は円周方向に分割した6班集体とした(担当範囲は約40m/班)。コンクリートは地上にて荷卸しを行い、配管にて底版上部の中継ポンプのホッパーまで圧送して、そこからはブームにて打ち込む方法とした。打込み口は5m間隔(9箇所/班)とし、コンクリートの流動および充填状況を確認するための検査窓をハンチ面に約2.5m間隔で2段設置した(27個/班)。コンクリートの流動・充填状況に応じて適宜、長尺の鋼製棒で締固めの補助を行った。

1層の打込み高さは、試験施工の結果、コンクリートの出荷能力(200m³/h)、許容打重ね時間間隔(120分以内)



写真-2 コンクリートの流動・充填状況（試験施工）

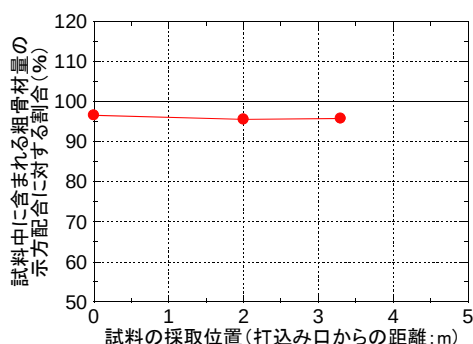


図-3 打込み間隔の妥当性の検討結果

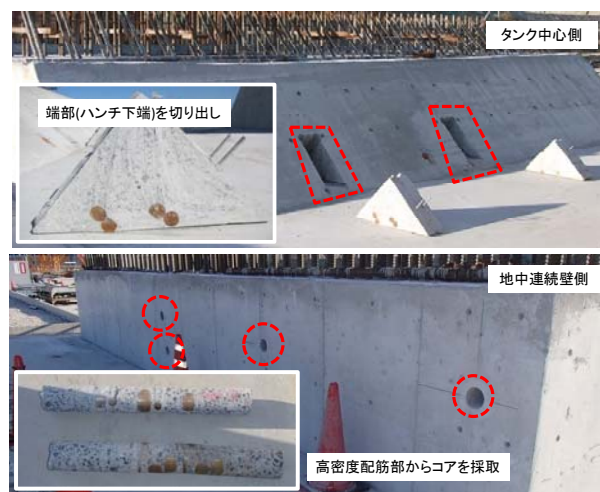
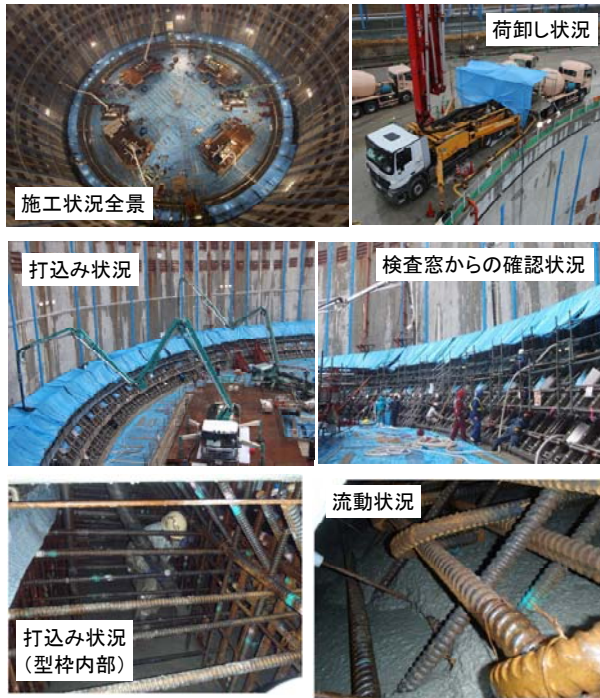


写真-3 脱型後の外観（端部、高密度配筋部の充填）



写真-4 脱型後の外観（打重ね時間間隔の確認）

および突発的な施工トラブル(1層あたり45分の余裕を見込む)を考慮して、約75分で打込みが完了できるように0.2～0.35m/層に設定した。



写真－５ 側壁１ロットの施工状況

表－６ １ロット施工時のコンクリートの品質試験結果

工場名	試験回数	スランプフロー (65±7.5cm)		空気量 (5.0±1.5%)		試験回数	91日圧縮強度 (設計基準強度36N/mm ²)		
		平均値	標準偏差	平均値	標準偏差		平均値	最小値	標準偏差
A	6	68.5	1.0	5.0	0.4	4	51.2	49.4	1.5
B	6	65.8	2.8	4.9	0.4	4	52.4	49.5	2.9
C	6	68.8	2.6	5.0	0.4	4	54.9	53.8	1.2
D	6	65.0	1.0	5.0	0.3	4	50.0	48.3	1.8
E	6	68.0	1.6	5.0	0.2	4	48.2	46.6	1.7
全体	30	67.2	2.4	5.0	0.3	20	51.3	—	2.9

コンクリートは、写真－５に示すように、均質な状態で鉄筋間隙を通過し型枠の端部まで充填できていた。

荷卸し時の品質試験結果を表－６に示す。スランプフロー、空気量および圧縮強度とも目標とする品質を安定的に満足していた。

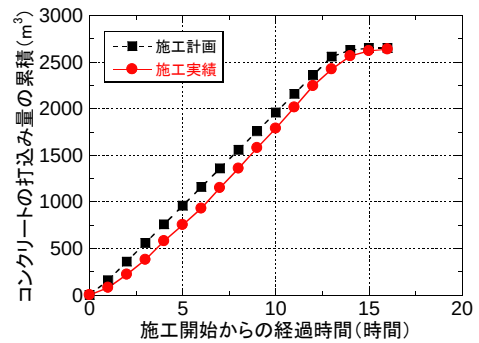
施工時には、既報³⁾と同様に、練上がりから打込み完了までの時間、各班の進捗状況および許容打重ね時間に関する情報を一元的に管理した。その結果、全てのコンクリートが120分以内に打込みを完了できたとともに、打重ね時間間隔は60～75分/層の範囲であった。施工実績を図－４に示す。施工数量が約2,650m³の大量施工であったが、ほぼ計画通りに完了できた。

脱型後の１ロットの外観を写真－６に示す。充填不良や施工に起因した温度ひび割れは認められず、良好な仕上がりであった。

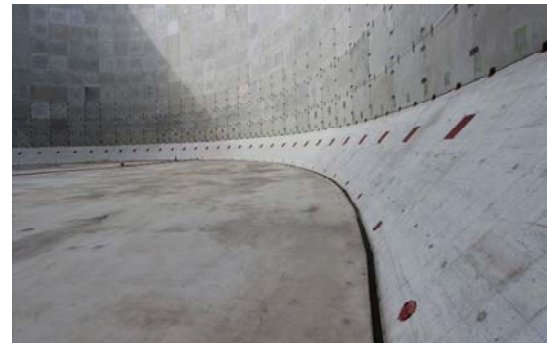
3. 側壁７ロットの施工（中流動コンクリート）

3.1 コンクリートの配合選定

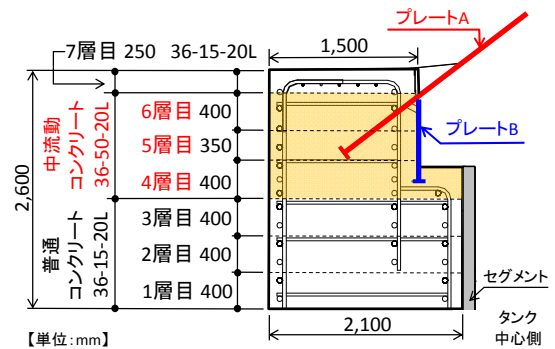
側壁７ロットの断面図を図－５に、施工条件を表－７に示す。７ロットは鋼製屋根との接合のため、プレート



図－４ 側壁１ロットの施工の進捗実績



写真－６ 側壁１ロットの施工完了後の外観



図－５ 側壁７ロットの断面図

表－７ 側壁７ロットの施工条件

項目	数量・内容
断面寸法	高さ2.6m、厚さ:上部1.5m、下部2.1m (鋼製屋根の固定プレートを一体で施工)
コンクリート数量	約1,200m ³ (中流動:480m ³ 、普通:720m ³)
配合種類	中流動コンクリート:36-50-20L、普通コンクリート:36-15-20L
計画施工時間	約11時間
出荷工場数、能力	4工場、180m ³ /h
作業班	6班
施工層数	全7層(25～40cm/層) 中流動:4～6層目、普通:1～3、7層目
打込み間隔	4.2m
打重ね時間間隔	120分以内(型枠支保工の剛性より、90分以上120分以内)

AおよびプレートBを巻き込んで構築する。プレートAには打込み口とパイプレータの挿入口を設ける計画であるが、2つのプレートの交差する隅角部やタンク中心側の変断面部に確実に充填させるには、高い流動性を有し、補助的な締固めにより充填できるコンクリートが必要となる。そこで、4～6層目の施工に中流動コンクリートを用いることとした。

なお、他の層(1～3および7層目)は、任意の位置から

表－８ 中流動コンクリートの仕様

項目	単位	要求性能および 目標とした品質	備考
設計基準強度	N/mm ²	36	管理材齢91日
水セメント比	%	55以下	水密性の確保
スランプフロー ^{*1}	cm	50±10	荷卸し時(ただし、線上がり から120分間以上、左記の 範囲を満足すること)
空気量	%	5.0±1.5	
充填高さ ^{*1}	cm	20以上	障害条件:ランク2
ブリーディング率 ^{*1}	%	2.5以下	

*1 指針⁴⁾を参考に設定

表－１０ 側壁７ロットの試験施工における検討項目と判定結果

検討項目	想定される不具合	検討方法	試験施工による判定結果
① スランプフローの目標範囲	材料分離、充填不良	目標範囲の中心、上限での流動状況の確認	設定した目標範囲は妥当
② 打込み・締固めの方法	材料分離、充填不良	コンクリートの流動方向、材料分離の有無を確認 打込み間隔、締固めの間隔・時間を検討 充填確認の方法を検討	孔ごとに打込み・締固めが必要。 →流動方向は一樣とする(片押し施工) →締固めは5～10秒間を標準(6層目は、孔bからの吹き上がり確認)
③ 閉鎖空間内での充填	充填不良	脱型後に、充填状況を目視確認	閉鎖空間内を確実に充填
④ 打重ね時間間隔	コールドジョイント	実施工と同じ打重ね時間間隔(90分)で試験	90分間隔でも一体性を確保

打込み・締固めが行えるため、スランプ 15cm の普通コンクリートで施工した。

中流動コンクリートの仕様を表－８に示す。指針⁴⁾に基づき、スランプフロー50cm、JSCE-F511の充填試験(ランク 2)における充填高さ 20cm 以上、ブリーディング率 2.5%以下とした。また、施工に伴う温度ひび割れの発生を抑制するため、セメントに低熱ポルトランドセメントを用い、単位セメント量を低減するため混和剤には高性能 AE 減水剤(増粘剤一液タイプ)を用いた。なお、1 ロットと同様に、配合選定後に温度応力解析を実施し、目標としたひび割れ指数 1.45 以上を満足することを確認した。

施工数量および各工場の供給能力を考慮して、現場周辺の 4 工場からコンクリートを出荷することとし、室内および実機試験練りを行い、先述の条件を満足する配合を選定した(表－９)。また、配合選定に合わせて、普通および中流動コンクリートを混合した供試体を作成し、所要の圧縮強度が十分確保できることも確認した。

3.2 実物大モデルによる試験施工

7 ロットでは、2 つのプレートの交差する閉鎖空間内および変断面部にコンクリートを確実に充填することが課題となるため、中流動コンクリートで施工する部位(実施工における 4～6 層目)を模擬したモデルを用いた。試験施工における検討項目を表－１０に、モデルの外観を試験施工の状況と合わせて写真－７に示す。

プレート A を模した鋼材には、打込み口とパイプレータ挿入口を兼用した孔 a (φ 150mm)を 0.8m 間隔、プレート B を模した合板との交点付近に空気抜きの孔 b (φ 50mm)を 0.4m 間隔で設けた。

コンクリートの打込みは、実施工を想定し、コンクリートポンプのブームにより行い、1 層の打上がり高さは 35～40cm/層、打重ね時間間隔は 90 分とした。

なお、試験施工に合わせて、中流動コンクリートの実

表－９ 選定した中流動コンクリートの配合

工場名	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				混和剤 ^{*4} (C × %)
			W	C ^{*1}	S ^{*2}	G ^{*3}	
A	46.1	49.8	175	380	897	980	1.15
B	46.1	49.8	175	380	858	980	1.25
C	46.1	52.9	175	380	944	921	1.25
D	43.8	51.2	175	380	866	850	1.00

*1 低熱ポルトランドセメント、*2 陸砂、砕砂、スラグ細骨材を混合使用(工場毎に混合比は相違)、*3 砕石 2005、*4 高性能 AE 減水剤(増粘剤一液タイプ)
なお、1 および 4 は、全工場で同じ銘柄を使用



写真－７ 試験施工に用いたモデルの外観と実験状況

機試験も行い、練上がりから 120 分まで目標とするスランプフローおよび空気量を満足すること、ブリーディング率は最も多い工場でも 2%以下であることを確認した。

試験施工における検討結果を以下に示す。

① スランプフローの目標範囲

スランプフローが目標範囲の中心および上限の場合における流動状況を目視確認した。いずれも材料分離を生じることなく、鉄筋間隙を通過することを確認した。

② 打込みおよび締固めの方法

コンクリートは φ 150mm の孔 a から打ち込んだ。コンクリート自体による流動が停止した後、隣り合う孔 a から φ 50mm の棒状パイプレータで 5～10 秒間締め固めた。



写真－８ 試験施工の用いたモデルの脱型後の外観

表－１１ ７ロット施工時の品質試験結果

工場名	試験回数	スランブフロー (50±10cm)		空気量 (5.0±1.5%)		試験回数	91日圧縮強度 (設計基準強度36N/mm ²)	
		平均値	標準偏差	平均値	標準偏差		平均値	最小値
A	4	54.0	2.0	4.9	0.5	2	57.4	57.4
B	4	52.4	2.3	4.5	0.1	2	57.0	56.8
C	4	51.6	2.9	5.0	0.3	2	54.9	54.8
D	4	54.8	2.1	4.8	0.1	2	56.7	56.2
全体	16	53.2	2.3	4.8	0.3	8	56.5	—

この作業を孔 a ごとに順次繰り返すことで、閉鎖空間内および変断面部の隅々まで充填できることを確認した。

なお、試験施工の結果、コンクリートの流動方向を一样にしないと、充填できない部位が生じるおそれがあると想定されたため、実施工では隣り合う施工班が同時に各層の打込みを開始し、片押し施工とすることにした。

また、6 層目は、コンクリートの打上がり面が孔 a より高くなるため、空気抜き孔 b からパイププレートを挿入して締固めを行い、流動先端方向の別の孔 b からコンクリートがあふれ出ることを目視で確認することとした。

③閉鎖空間内での充填状況および④打重ね時間間隔

コンクリートは実施工と同様に 90 分間隔で打ち重ねた。脱型後のモデルの外観を写真－８に示す。実施工では閉鎖空間となるプレート B を模した合板も取り外して確認した。2 つのプレートの閉鎖空間内に密実にコンクリートが充填されていること、コールドジョイントは認められず一体性が確保できていることを確認した。

3.3 実施工の状況と結果

試験施工で採用した方法により、閉鎖空間内を確実に充填できることが確認できたことから、実施工も同様の方法で打込み・締固めを行った。

荷卸し時の品質試験結果を表－１１に示す。各試験項目とも目標とする品質を安定的に満足していた。

施工状況を写真－９に、完成後の外観を写真－１０に示す。コンクリートは、閉鎖空間内を容易に流動し、孔 a および孔 b から適宜締固めを行うことで充填できていることを確認した。また、脱型後の外観を調査したところ、充填不良や温度ひび割れは認められず良好な仕上がりであった。

4. まとめ

大規模な LNG 地下式貯槽の側壁のうち、高密度な配筋や閉鎖空間を有する部位の施工に高流動および中流動



写真－９ 側壁 7 ロットの施工状況



写真－１０ 側壁 7 ロットの施工完了後の外観

コンクリートを適用した。一連の試験施工および実施工を通して得られた知見を以下に示す。

- (1) コンクリートの仕様は、過去の施工実績、指針および供給体制等を踏まえた施工条件に基づいて設定し、その妥当性を事前に検証する必要がある。
- (2) 高密度な配筋や閉鎖空間を有する部材にコンクリートを確実に充填させるには、単に流動性や充填性の高いコンクリートを用いるだけでなく、打込みおよび締固めの具体的な方法を試験施工により確認し、その結果を実施工に反映することが重要である。

参考文献

- 1) 小林且典, 深田敦宏, 大隅充浩, 柳井修司: 大規模・大深度 LNG 地下タンクのコンクリートの施工, コンクリート工学, Vol.46, No.3, pp.38-45, 2008.3
- 2) 土木学会: コンクリートライブラリー136, 高流動コンクリートの配合設計・施工指針[2012 年版], 2012
- 3) 桜井邦昭, 前田敬一郎, 佐々木高士, 林孝弥: 大規模 LNG 地下式貯槽工事における 31,500m³の底版コンクリートの一括施工, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1231-1236, 2015
- 4) (財)沿岸開発技術センター: 加振併用型充てんコンクリートマニュアル, pp.9-19, 2004.2