報告　大規模 LNG 地下式貯槽工事における 31,500m^3 の底版コンクリートの一括施工

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 地下式貯槽の構築において，厚さ 6.3m，数量 31,500m^3 の底版コンクリートを一括施工するにあたり，施工条件を考慮して設定した要求性能を満足するコンクリート配合を選定するとともに，温度ひび割れ抑制対策を講じた。また，コンクリートの供給および打込みに関する情報を集約して管理した。その結果，ほぼ計画通りにコンクリート施工を行うことができたとともに，適切な保温養生を講じることで温度ひび割れの発生を抑制できた。

キーワード：LNG 地下式貯槽，底版コンクリート，許容打重ね時間間隔，温度ひび割れ，情報管理

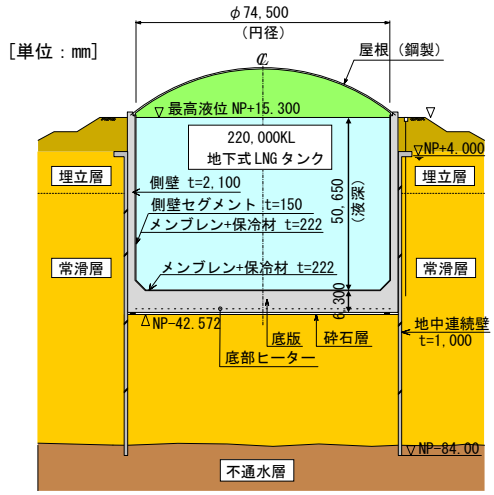
1. はじめに

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℃)を効率よ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。側壁内径は 74.5m，液深は 50.65m で, 容量 22 万 kL と世界最大級の地下タンクである。地下タンクは，鉄筋コンクリート製の躯体と鋼製の屋根で構成されている。このうち，躯体の底版は，地下水圧が上向きに作用するため部材厚さが大きくなるとともに，水密性を確保する観点から 1 回で構築する必要がある。今回，総量 31,500m^3 の底版コンクリートを一括施工した。

施工時は，多数の工場から時間当たり数百 m^3 のピッチでコンクリートが供給されるとともに，タンク内各所では常時 100 人以上の作業員が打込み作業に従事する。このため，事前にコンクリートの供給量と施工量のバランスを考慮した詳細な施工計画を立案した上で，施工時は計画通りに施工が進捗していることをリアルタイムに把握することが重要となる。

底版コンクリートの性能としては，①効率よく打ち込むために必要な流動性を長時間保持できること，②過度なブリーディングが生じないこと，③コールドジョイントの発生を防止するため，施工計画で設定する打重ね時間間隔に対して十分に安全となる許容打重ね時間間隔を有すること，④施工に伴う温度ひび割れの発生を抑制できることなどが求められる。

本報告では，底版コンクリートの施工計画と施工に関する情報管理，施工条件に基づき設定した性能を満足するコンクリートの配合選定および品質管理，ならびに温度ひび割れ抑制対策の概要を示す。



図－１　本工事で構築する地下タンクの概要図

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. 底版コンクリートの施工計画と施工時の情報管理

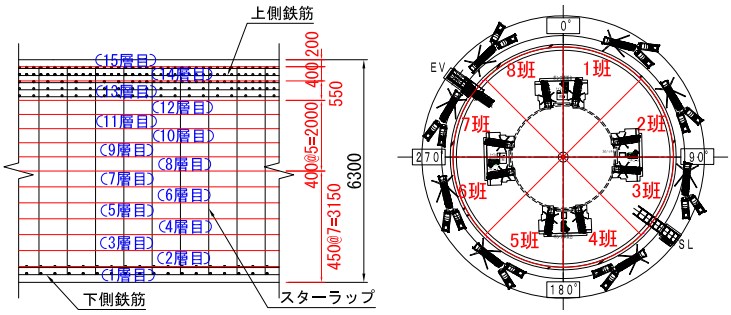
2.1 底版コンクリートの施工計画の概要

底版コンクリートの施工計画の概要を**図－２**および**表－２**に示す。底版コンクリートは，厚さが 6.3m，面積が約 5,000m^2 である。広範囲を均等に打ち上げるため，作業班の受け持つエリアを扇状に分割した 8 班体制とした。また，１層あたりの打上がり高さは，埋設物や配筋条件などを考慮して 20～55cm とし，15 層で打ち上げる計画

*1　(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　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)
*3　東邦ガス(株)　技術部　緑浜増設プロジェクト　主任　修士(工学)
*4　東邦ガス(株)　技術部　緑浜増設プロジェクト　主任　修士(工学)

表－２　底版コンクリートの施工計画の概要

項目	数量・内容
形状	厚さ6.3m，直径79.5m
コンクリート数量	31,500m^3
計画施工時間	約100時間
時間当たりの計画打設量	250～400m^3(平均310m^3)
出荷工場数	8工場
作業班	8班
コンクリートの施工層数	15層（20～55cm/層）
打重ね時間間隔	最大8.9時間



図－２　底版コンクリートの施工概要図（左：断面，右：平面）

とした。

一方，施工現場に供給可能なレディーミクストコンクリート工場として知多緑浜工場周辺の 8 工場を選定した。各工場の安定的な製造能力を考慮して，時間当たりのコンクリートの供給量を 250～400m^3(平均 310m^3)に設定し，約 100 時間で構築する計画とした。

2.2 コンクリートの打込み方法

施工時のコンクリートポンプの配置状況を**写真－１**に示す。地上部にコンクリートポンプを設置し，輸送管によりタンク底部まで圧送した。タンク底部には，ディストリビュータとしてのコンクリートポンプ車を配置し，ブームの筒先を各作業班エリアに設けた打込み口(38 箇所/班，約 3.5m 間隔で設置)に順次移動して，コンクリートを打ち込んだ。

底版コンクリートは躯体厚さが 6.3m と厚く，自由落下高さが大きくなることから，打込み口には，サニーホースを設置しコンクリートの分離を抑制した。1 層の打込みが終わるごとにホースを順次切断した(**写真－２**)。なお，施工を通して，輸送管内での閉塞や急激なスランプ低下，過度なブリーディングの発生等は認められなかった。

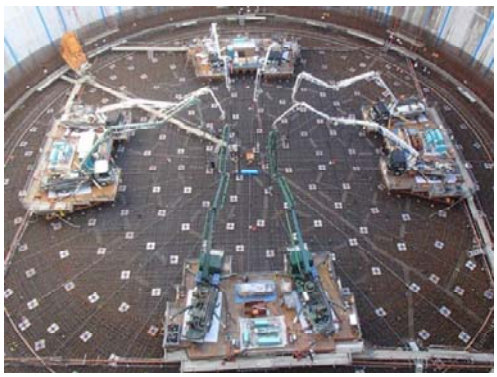
2.3 施工に関する情報の一元化管理

底版コンクリートの施工では，レディーミクストコンクリート工場 8 工場から，250～400m^3/h のピッチでコンクリートを供給し，8 箇所にて荷卸した後，作業班ごとに 38 箇所で打込み作業を行った。

本工事のように，大量のコンクリート施工を広範囲で，かつ多くの関係者により行う際には，以下のような施工に関する情報を集約し，施工計画通りに進捗していることをリアルタイムに把握することが重要である。

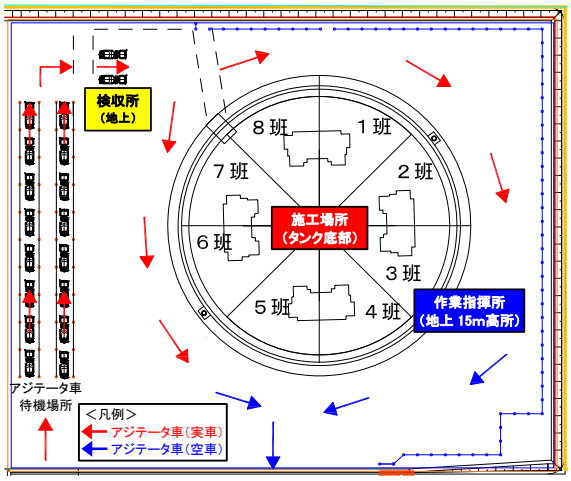
(1) 各工場からのコンクリートの供給状況
(2) アジテータ車ごとのコンクリートの練混ぜから打込み完了までの時間(目標 120 分以内)
(3) 作業班ごとの進捗状況の差異(荷卸し量の偏り，トラブルによる打込み作業の遅延の有無)
(4) 各層のコンクリートの打重ね時間間隔

そこで，本工事では，上記の情報を一元化して管理した。具体的な情報の収集方法は以下の通りである。各工場から来たアジテータ車は，検収所にて納入伝票を渡す。検収所では納入伝票に記載された，工場名，累積数量，出荷時間および現着時間を記録する。作業指揮所にいる



写真－１　施工時のコンクリートポンプ配置状況
（上：地上部，下：タンク底部）

写真－２　底版内におけるコンクリート施工状況



図－３　施工時の各担当の位置関係

＊7層目の打込みを完了した箇所が水色，8 層目の打込みを完了した箇所が紫色で表示されている

図－４　コンクリートの供給･打込み状況の表示画面例

指揮者は，検収所にアジテータ車の荷卸しする作業班の番号を指示する。一方で，底版内で打込み作業を行っている各作業班の班長は，定期的に打込みの状況を指揮者に報告する。施工時の各担当の位置関係を**図－３**に示す。

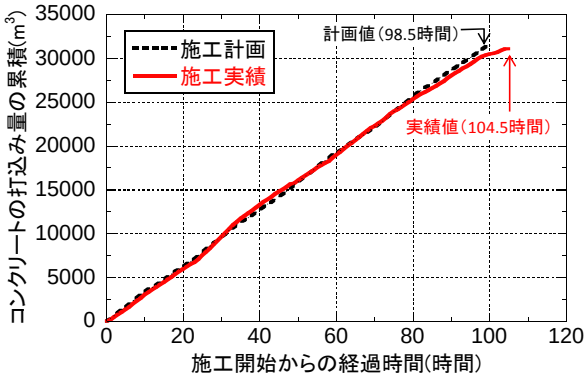
この施工情報は現場内の無線 LAN を経由して現場職員の携帯するタブレット端末等にて確認できる。**図－４**に示すように，班ごとの打込み作業の進捗状況や，許容打重ね時間間隔内に打重ねが行えていること等を瞬時に把握できる。

2.4 施工管理結果

底版コンクリートの施工は，2014 年 1 月 28 日～2 月 1 日にかけて実施した。コンクリート施工の進捗実績を**図－５**に示す。施工開始の約 50 時間後から，5 時間程度にわたり雨天となったものの，特段のトラブルもなく，約 100 時間で無事に施工を完了した。施工に従事した作業員は延べ 1,210 人であった。

作業班ごとに荷卸ししたコンクリート数量の割合を**表－３**に示す。ほぼ等量の割合で荷卸しされており，偏りなくコンクリートが打ち込まれていたことを裏付ける結果が得られた。また，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，施工時の打重ね時間間隔の最大値は 8.5 時間で概ね計画通りであった(**図－６**)。

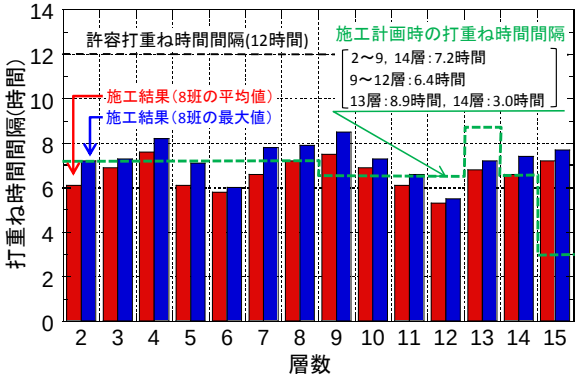
なお，これらの情報を活用すれば，どの工場から出荷されたコンクリートが底版コンクリートのどこに打ち込まれたかを追跡することが可能であり，トレーサビリティーの観点からも有益である。



図－５　コンクリート施工の進捗実績

表－３　作業班ごとに荷卸ししたコンクリートの割合

作業班	1	2	3	4	5	6	7	8
割合(%)	12.5	12.1	12.8	12.9	12.4	12.5	12.3	12.4



図－６　各層の打重ね時間間隔の施工結果

3. 底版コンクリートの配合選定および品質管理

3.1 コンクリートの要求性能および目標品質の設定

底版コンクリートの要求性能および目標とした品質を**表－４**に示す。

設計基準強度 36N/mm^2 に対し，製造時の変動係数 10%(割増し係数 1.2)を見込み，配合強度を 43.2N/mm^2 とした。

水セメント比は水密性確保のため 55%以下とした。

スランプは，既設の 2 基の地下タンクの施工実績 [1]から，打込み時の最小スランプを 12cm とし，圧送に伴うスランプの低下 3cm とスランプの許容差 2.5cm を考慮して，荷卸し時の目標スランプは 18cm に設定した。

空気量は，耐凍害性を確保する観点から 5.0%とした。

表－４　底版コンクリートの要求性能および目標品質

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
配合強度	N/mm^2	43.2	割増し係数1.2
水セメント比	%	55以下	水密性の確保
スランプ	cm	18±2.5	荷卸し時（ただし，練上りから120分間以上，左記の範囲を満足すること）
空気量	%	5.0±1.5	
ブリーディング率	%	5以下を目安	過度なブリーディング防止
許容打重ね時間間隔	時間	12	・施工計画の最大値8.9時間に対し約3時間の余裕を見込む ・指針[2)]に準拠

表－５　選定したコンクリート配合

工場名[*1]	S混合比(%)			G混合比(%)		W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m^3)				混和剤[*3] (C×%)
	S1	S2	S3	G1	G2			W	C[*2]	S	G	
A (28)	ス 30	山 35	砕 35	砕 100		48.0	43.5	170	354	779	1102	1.05
B (35)	ス 30	山 35	砕 35	砕 100		48.0	45.0	170	354	804	1072	1.00
C (27)	山 70	ス 30	－	砕 50	砕 50	48.0	47.0	170	354	805	1014	0.95
D (33)	山 70	ス 30	－	砕 70	砂 30	46.0	45.2	165	359	777	960	1.00
E (28)	山 70	砕 30	－	砕 50	砕 50	48.0	46.0	170	354	783	946	1.00
F (53)	山 70	川 30	－	砕 30	砕 70	48.0	45.0	170	354	758	963	1.00
G (54)	山 70	ス 30	－	砕 100		48.0	47.0	170	354	835	1034	0.95
H (68)	山 100			砂 100		46.0	45.0	165	359	757	941	0.95

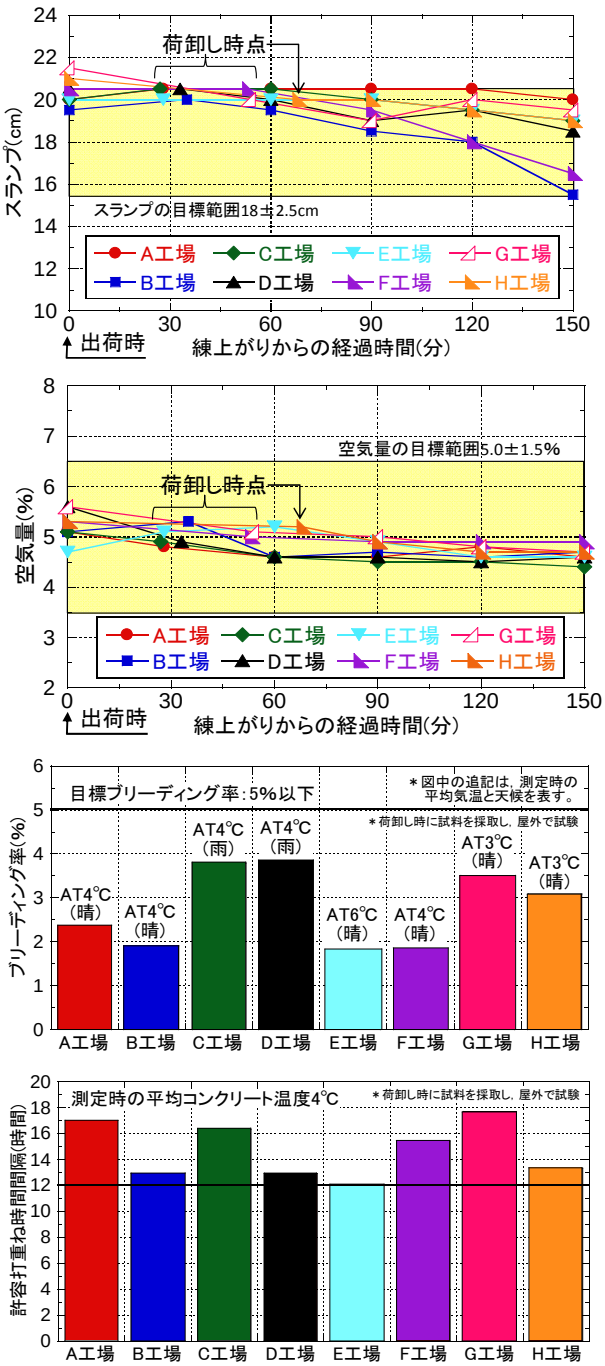
*1　（ ）内の数値は，実機試験時の出荷から荷卸しまでの経過時間(分)
*2　フライアッシュ混入中庸熱高炉セメント(MBFセメント)
*3　AE減水剤(高機能タイプ，遅延形)　添加量は直前実機試験時の値
*細骨材Sの種類　ス：高炉スラグ細骨材，山：山砂，砕：砕砂，川：川砂
*粗骨材Gの種類　砕：砕石，砂：山砂利
*セメントおよび混和剤は全工場で同じメーカの材料を使用

ブリーディングが過度に生じると，排水作業が繁雑となり，打込み作業に支障をきたす要因となるとともに，底版の水密性が低下する要因となるため，ブリーディング率の目安を 5%以下に設定した。

許容打重ね時間間隔は，前章に示した施工計画上の最大値(8.9 時間)に対し，レディーミクストコンクリート工場の故障による供給量低下や施工機械のトラブルによる遅延が生じた場合にもコールドジョイントの発生を防止できるように，12 時間に設定した。なお，許容打重ね時間間隔は，指針 [2)]を参考にプロクター貫入試験における貫入抵抗値が 0.1N/mm^2 に達する時間とした。

3.2 コンクリート配合の選定

コンクリートの配合選定は次の 3 ステップで実施した。まず，施工の 1 年前に，**表－４**の要求品質を満足する配合を室内試験練りにて選定した。次に，実機ミキサでも所要の品質を有するコンクリートが製造できることを確認するため実機試験練りを行った。更に，実施工時の温度条件における，所定のスランプおよび空気量確保のための混和剤の使用量や時間経過に伴う品質変化の把握，目標とするブリーディング特性ならびに許容打重ね時間



図－７　直前実機試験でのコンクリート品質の試験結果

間隔を確保できることを確認するため，施工 2 週間前に再度，実機試験練り(直前実機試験)を行った。

選定したコンクリートの配合を，各工場の使用骨材と合わせて**表－５**に示す。工場間によるフレッシュコンクリート品質の差異が小さくなるように，単位水量やセメント量はほぼ同等とした。ただし，粗骨材に山砂利を用いている D および H 工場は，単位水量を 5kg/m^3 少なく，強度確保の観点から水セメント比を 2%小さく設定した。

直前実機試験での各品質試験結果を**図－７**に示す。いずれの工場でも，目標とするスランプおよび空気量を荷卸し時点から練上がり 150 分後まで確保できること，ブ

リーディング率は最大 4%程度で目標とした目安以下であること，許容打重ね時間間隔は 12 時間を十分に満足できることを確認した。遅延形の混和剤の使用や，各材料の単位量を適切に設定できたためと考えられる。

3.3 施工時のコンクリートの品質試験結果

施工時の品質試験結果を工場別に整理して**表－６**に示す。スランプおよび空気量試験は 140 回，圧縮強度試験は 110 回実施した。荷卸し時のスランプと空気量は全て目標範囲を満足していた。圧縮強度も設計基準強度を十分に確保していた。ばらつきが小さく，安定した品質のコンクリートが施工に供されていたことを確認できた。

4. 底版コンクリートの温度ひび割れ制御対策

4.1 温度ひび割れ抑制に対する目標性能

施工に伴う温度ひび割れの発生を抑制する観点から，2007 年制定コンクリート標準示方書【設計編】に示される「ひび割れの発生をできる限り制限する場合」に相当するひび割れ指数 1.45 以上を目標値に設定した。そのため，セメントには，水和発熱が小さく，長期的な強度増進効果が得られるフライアッシュ混入中庸熱高炉セメント(MBF セメント)を採用し，管理材齢は 91 日とした（**表－４**および**表－５**参照）。

4.2 温度ひび割れ解析による養生方法の選定

コンクリート配合を選定した後，施工に起因した温度ひび割れの発生を抑制する養生方法を選定するために温度応力解析を実施した。解析条件を**表－７**に示す。

配合選定に合わせて，コンクリートの断熱温度上昇試験，圧縮強度，引張強度およびヤング係数の測定を行い解析に反映させた。なお，本工事の底版コンクリートは，15 層に分けて，約 100 時間かけて施工する計画であることから，解析においても，施工条件に合わせて，順次，コンクリートを打ち重ねていく条件とした。温度応力解析は市販の専用ソフトを用いた軸対象モデルによる擬似 3 次元 FEM により行った。解析条件や算定式は，2007 年コンクリート標準示方書【設計編】および日本コンクリート工学会「マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008」[3)]等を参考に設定した。

解析結果を**表－８**に示す。躯体を貫通するひび割れが生じる可能性は小さい一方，エアバック(シート付き)を 2 枚設置した条件では，表面ひび割れが生じる可能性がある結果となった。底版は巨大なコンクリート構造物であり，周辺地盤による外部拘束の影響を受けにくい一方で，躯体厚さが厚く躯体の内外温度差が大きくなり，内部応力に起因したひび割れが生じ易くなるためと推察された。

そこで，エアバック(シート付き)の設置枚数および設置期間をパラメータとした温度応力解析を実施した。なお，エアバック(シート付き)による保温効果は，指針[3)]および文献[4)]を参考に，設置枚数に応じて熱伝達率を変化させることで考慮した。

解析結果をひび割れ指数と躯体の内外温度差の関係で整理して**図－８**に示す。表面ひび割れの発生を抑制するには，躯体の内外温度差を 32℃以下に制御しなければならず，エアバック(シート付き)を 3 枚重ねとして，1.5 ヶ月間以上設置する必要がある結果となった。

一方で，底版コンクリートの施工は，冬期に行うため，降雪や寒波に伴い想定以上に外気温が低下する可能性も

表－６　施工時のコンクリートの品質試験結果

工場	試験回数	スランプ(cm)（18±2.5）		空気量(%)（5.0±1.5）		試験回数	91日圧縮強度(N/mm^2)（36N/mm^{2}以上）		
		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	22	19.4	0.8	5.0	0.3	20	47.7	43.5	1.8
B	16	19.7	0.5	4.8	0.3	14	44.7	43.2	0.8
C	19	19.7	0.7	4.8	0.3	17	50.2	47.6	1.3
D	21	19.2	1.0	4.8	0.3	11	46.5	45.0	1.1
E	18	19.3	0.4	4.8	0.3	16	41.0	39.4	0.9
F	12	19.4	0.7	5.0	0.4	10	44.8	40.6	3.2
G	20	19.3	1.2	4.8	0.3	18	49.6	47.0	1.2
H	12	18.8	0.9	4.9	0.2	4	44.2	42.5	1.5
全工場	140	19.4	0.8	4.8	0.3	110	46.5	39.4	3.4

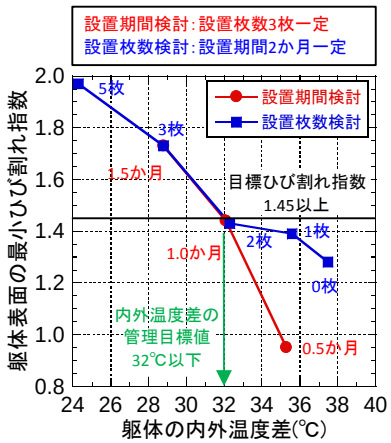
表－７　温度応力解析結果に用いた解析条件の概要

項目	算定式および条件
施工日，時間	2014年1下旬～2月上旬　100時間
外気温	気象庁HP「知多地区」の気温データ(日変動考慮)
打込み温度	10℃
熱伝導率	2.7W/m℃
比熱	1.15kJ/kg・℃
密度	2400kg/m^3
凝結特性	試験練りでの実測値（始発17-20，終結24-25）
断熱温度上昇特性	断熱温度上昇試験結果を以下の式で近似 $T(t)=K\cdot\{1-\exp(-\alpha\cdot t)\}$ K：終局断熱温度上昇量50.4℃ α：断熱温度上昇速度に関する係数0.251 ＊上記，K，αは打込み温度10℃の値
圧縮強度	試験練りでの実測値 ＊強度発現性は有効材齢で考慮
引張強度	試験練りでの実測値を圧縮強度との関係式で考慮
有効ヤング係数	試験練りでの実測値を示方書に示される圧縮強度との関係式で考慮 ＊クリープによる低減効果はJCI指針に準拠
自己収縮ひずみ	セメントメーカの技術資料に準拠
線膨張係数	10×10^{-6}(1/℃)
養生条件	上面をエアバック(シート付き)を2枚重ねで2ヶ月間養生する条件，熱伝達率6W/m℃

表－８　温度応力解析結果の概要

部位	打込み温度(℃)	温度解析結果		応力解析結果		
		最高温度(℃)	材齢*1（日）	引張応力*2(N/mm^2)	材齢*3（日）	最小ひび割れ指数
躯体の中心部	10	55.9	12	1.25	184	2.92
躯体の表面部		30.9	5	1.51	13	1.43

＊1　最高温度に達する材齢
＊2　最小ひび割れ指数の到達時点にコンクリートに生じる引張応力
＊3　最小ひび割れ指数に達する材齢



エアパックシートの設置枚数	熱伝達率 (W/m℃)
0	14
1	10
2	6
3	4.14
5	2.93

図－８　躯体の内外温度差とひび割れ指数の関係

想定された。そこで，実際の施工では，エアバック(シート付き)を 5 枚重ねで 2 ヶ月間以上設置するとともに，躯体の中心部と表面部に温度計を埋設し，躯体の内外温度差が 32℃以下に制御できていることを継続的に監視することにした。

また，施工後に計測した温度データを用いた温度応力解析を行い，養生材を取り外してもひび割れが生じないことを確認した上で撤去作業を行う計画とした。

4.3 養生管理結果

コンクリートの施工後，計画通りにエアバック(シート付き)を 5 枚重ねとした保温養生を行った。養生期間中の躯体の内外温度差の実測値(温度差が最大となった計測点のデータ)の推移を，事前解析により得られた内外温度差の計画値，養生期間中の外気温の実測値および気象庁 HP に示される施工現場周辺の過去 30 年間の平均気温の推移と合わせて**図－９**に示す。

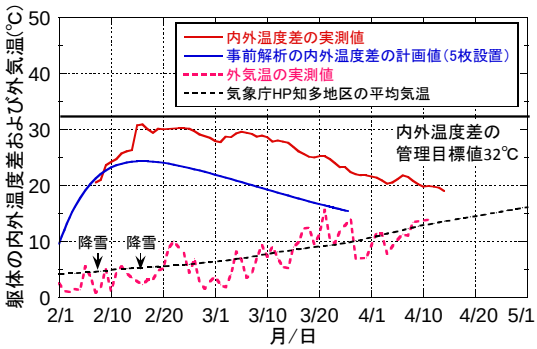
施工完了直後の 2 月中に 2 回の積雪があり，過去の平均的な気温に比べ低い日にちが多かったが，天候不順を想定しエアバック(シート付き)の設置枚数を増加させた効果もあり，躯体の内外温度差を目標範囲内(32℃以下)で制御することができた。なお，計画値に対して実測値の内外温度差が大きくなったのは，降雪に伴い表面に雪や冷水が堆積した影響と考えられる。

養生材を取り外しても，温度ひび割れが生じる可能性がないことを確認し，材齢 4 ヶ月後に撤去した。撤去後の底版コンクリートの外観を**写真－３**に示す。温度ひび割れはほとんど認められず，良好な仕上がりであった。

今回の結果を踏まえると，事前に使用するコンクリートの発熱特性や強度特性を考慮した温度応力解析を行うとともに，養生期間中の天候不順等も勘案した養生方法を選定することが重要と考えられる。

5. まとめ

大規模な LNG 地下式貯槽の底版を施工するに当たり，



図－９　躯体の内外温度差の実測値の推移

写真－３　養生完了後の底版コンクリートの外観

施工に関する情報管理，施工条件に基づき設定した性能を満足する配合の選定と品質管理ならびに温度ひび割れ抑制対策を行った。得られた知見を以下に示す。

(1) コンクリートの供給や打込みに関する情報を集約して管理することで，コールドジョイント等の不具合を生じることなく，計画通りに大量のコンクリート施工を行うことができる。

(2) 施工条件に応じてコンクリートの目標性能を設定し，それを満足する配合を用いることで，効率良くコンクリートを打ち込むことができる。

(3) 使用するコンクリートの断熱温度上昇特性や強度特性を反映した温度応力解析を実施するとともに，養生時の天候不順も考慮した養生方法を採用することで，温度ひび割れの発生を制御できる。

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

3) 日本コンクリート工学会：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008

4) 江渡正満ほか：マスコンクリートの保温養生に用いる養生材の効果に関する実験的検討，土木学会第 53 回年次学術講演会概要集，V-360，pp.720-721，1998.10