

報告 フライアッシュセメント C 種の実構造物への適用

服部 直^{*1}・宮下 将典^{*2}・山口 裕和^{*3}・桜井 邦昭^{*4}

要旨：容量 23 万 kl の PCLNG 地上式貯槽の基礎版コンクリートの施工にあたり、コンクリートには耐用期間 50 年を満足する耐久性と漏液防止の観点からの止水性が求められた。そこで、これらの要求性能を満足することに加え、産業副産物の有効利用を目的としてフライアッシュの使用を検討し、結合材の 30%をフライアッシュで置換するフライアッシュセメント C 種相当とした。フライアッシュの使用量を 30%まで高めたセメントを実構造物に適用した実績は非常に少ない。そこで、実配合による耐久性試験および温度ひび割れ抑制効果の検討を行い、フライアッシュセメント C 種の有効性について確認を行った。

キーワード：フライアッシュ、フライアッシュセメント C 種、耐久性、温度ひび割れ

1. はじめに

北海道電力（株）では、既設の火力発電所の経年化に対応するとともに燃料種の多様化を図るため、石狩湾新港に総出力約 171 万 kW（約 57 万 kW×3 機）の液化天然ガス（以下、LNG と称す。）を燃料とする火力発電所の建設を行っている。その発電用燃料設備として、石狩 LNG 基地に国内最大級の容量 23 万 kl となる PCLNG 地上式貯槽（以下、No.4 貯槽と称す。）を建設中である。

No.4 貯槽は、 -162°C の液体である LNG を貯蔵する内槽、冷熱を保持する保冷材、気密を保持する外槽からなる機械構造と、内槽からの万一の LNG 漏液に備え液圧・冷熱に対する耐荷性能、および液密性能を有する防液堤、貯槽全体の荷重を支える基礎版、鋼管杭からなる土木構造の複合構造である。No.4 貯槽の構造図を図-1 に示す。

このうち、土木構造の防液堤はプレストレストコンクリート構造、基礎版は鉄筋コンクリート構造となり、使用するコンクリートには、耐用期間 50 年を満足する耐久性および漏液防止の観点からの止水性が求められた。

そこで、基礎版のコンクリートを施工するにあたり、耐久性の確保および止水性を確保するために温度ひび割れの防止を目的とし、さらに産業副産物の有効利用の観点から、普通ポルトランドセメントの 30%をフライアッシュで置換したフライアッシュセメント C 種を使用した。本稿では、基礎版に用いたフライアッシュセメント C 種を用いたコンクリートの配合設計および温度ひび割れ抑制効果について詳述し、あわせて施工結果について述べる。

2. 対象構造物の概要

対象とした No.4 貯槽の基礎版は、図-1 に示すように、

外径は 91.9m、厚さが中央部 1.2m、外周部 1.8m である。また、防液堤は、高さは 44.05m、厚さが 0.8m となる。土木工事における主要工事数量を表-1 に示す。

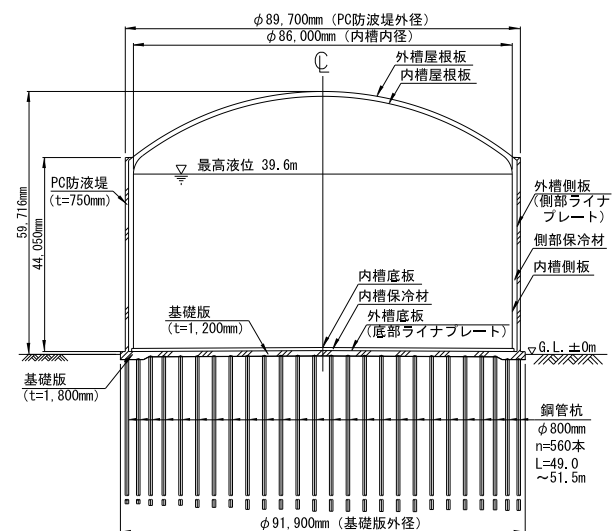


図-1 No.4 貯槽構造図

表-1 土木工事の主要工事数量

材料	単位	数量	備考
鋼管杭	本	560	φ 800mm, L=49m~51.5m
コンクリート (基礎版)	m ³	9,200	$f'_{ck}=30\text{N/mm}^2$
コンクリート (防液堤)		9,680	$f'_{ck}=30\sim60\text{N/mm}^2$ ※
鉄筋	t	3,200	SD490, SD345
PC 鋼材	t	970	鉛直 SWPR7BL, 19S15.2 円周 SWPR7BL, 27S15.2

※一部、低熱ポルトランドセメントを使用

*1 北海道電力株式会社 石狩湾新港火力発電所建設所 基地土木建築課 工修（正会員）

*2 北海道電力株式会社 石狩湾新港火力発電所建設所 基地土木建築課 副長 工修（正会員）

*3 株式会社大林組 札幌支店 石狩 LNG 4 号タンク工事事務所 工事長

*4 株式会社大林組 技術本部 技術研究所 課長 工博（正会員）

3. 配合設計

3.1 要求性能と目標品質の設定

No.4 貯槽の基礎版コンクリートの要求性能と目標品質を表-2に示す。本工事で構築するNo.4貯槽の設計耐用期間は50年であり、供用期間中にわたり塩分や中性化に伴う鋼材腐食に対する抵抗性、および凍結融解に対する抵抗性が求められる。また、施工に起因した温度ひび割れの発生を防止することも必要である。

配合強度は、材料や製造時の品質変動を見込み、割増し係数を1.2とし36N/mm²とした。管理材齢は、コンクリート打設後から長期間(1~3年)経過後に設計荷重を受けることから91日とした。

基礎版は、施工面積が約6,600m²と広く、外周に配置したポンプ車のブームに輸送管(5B)およびフレキシブルホースを接続して打ち込む方法とした。また、大量施工のため連続的にコンクリートを打ち込む必要がある。そこで、打込み時の最小スランプを12cmに設定し、許容差2.5cmおよび圧送に伴う低下3cmを見込んで荷卸し時のスランプは18cmとした。空気量も、圧送に伴う低下を見込み、かつ耐凍結融解の観点から5.0%に設定した。

コンクリート打込み時に、ブリーディングが過度に生じると、水替えに時間を要し施工遅延の要因となる。また、コールドジョイントの発生を防止するには、使用するコンクリートの許容打重ね時間間隔を把握して、実施施工時にはその時間内に打ち重ねできるような施工計画とすることが必要である。そこで、試験練りに合わせてブリーディング率および許容打重ね時間間隔も測定した。

表-2 要求性能と目標品質

項目	要求性能 および目標品質	備考
設計基準強度	30N/mm ²	管理材齢91日
配合強度	36N/mm ²	割増し係数1.2
温度ひび割れの防止	ひび割れ指数 1.85以上	4章で検討
耐久性の確保	設計耐用年数 50年	中性化、塩害、 凍結融解
スランプ	18±2.5cm	—
空気量	5.0±1.5%	—

3.2 フレッシュコンクリート品質と圧縮強度

試験練りは出荷予定の6工場で行った。セメントは、3工場(A~C)では普通ポルトランドセメントとフライアッシュ(ほくでんフライアッシュ、苫東厚真発電所4号機産JISⅡ種適合品)を質量比70:30で混合して用い、残りの3工場(D~F)ではフライアッシュセメントC種(混合されるフライアッシュは上述と同じ)を用いた。骨材は、いずれも道内産で、細骨材は陸砂、粗骨材は最大寸法20mmの碎石を用いた。混和剤は工場によらず同一銘柄の高機能タイプのAE減水剤を用いた。

試験練りにより選定した配合を各種の品質試験結果と合わせて表-3に示す。なお、水セメント比は、事前に工場ごとに、水セメント比を3水準変化させた配合で試験練りを行い、目標強度を満足できる水セメント比に設定した。また、単位水量は使用する混和剤の添加量が、メーカーの推奨する範囲(0.6~1.5%)の中央値付近で目標スランプが得られるように設定した。

ブリーディング率は、工場によらず3~4%と小さい値であった。また、指針りに従いプロクター貫入抵抗値が0.1N/mm²に達する時間から許容打重ね時間間隔を求めたところ、概ね6時間であった。生コン工場の製造設備やポンプ車の故障等により、供給遅延や打重ねに若干の時間を要する事態が生じても、コールドジョイントを生じることなく打重ねできる配合であることを確認した。

4. 耐久性の照査

中性化や塩害に伴う鋼材腐食に対する抵抗性および凍結融解抵抗性の照査は、セメント(粉体)の銘柄が異なる工場から出荷数量の多い2工場(AおよびD)を抽出して行った。耐久性の試験は表-3に示す配合に加え、水セメント比を±3%変化させた配合でも行った。

4.1 中性化に対する抵抗性

JIS A 1153に準じてCO₂濃度5%で3ヶ月間の促進試験を行った後、中性化深さを測定し中性化速度係数を算出した。得られた中性化速度係数を実環境の条件(CO₂濃度0.03%)で換算して実環境における中性化速度係数を求めた。水セメント比との関係で整理した測定結果を

表-3 コンクリートの配合と品質試験結果

工場名	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					WR (B× %)	品質試験結果						
			W	B		S	G		スランプ (cm)	空気量 (%)	ブリーディング率 (%)	許容打重ね 時間間隔 (h-m)	圧縮強度(N/mm ²)		
				C	FA								材齢 7 日	材齢 28 日	材齢 91 日
A	47.0	47.4	152	227	97	862	954	1.00	18.5	4.7	2.8	6-00	19.9	30.8	40.3
B	45.0	43.1	160	249	107	758	1017	1.00	20.5	5.6	3.7	5-45	20.9	31.1	40.7
C	45.0	45.4	160	249	107	801	977	1.30	18.5	5.0	2.1	5-45	18.0	27.9	39.7
D	43.0	47.9	153	356	-	857	920	1.10	19.0	5.4	3.0	6-10	21.7	32.1	41.3
E	42.0	44.5	160	381	-	779	975	1.20	18.0	5.3	3.8	6-15	23.2	30.1	39.7
F	45.0	47.0	155	344	-	846	952	1.00	18.0	4.7	3.0	6-15	22.1	33.3	44.0

S: 陸砂, G: 碎石 2005, WR: AE 減水剤

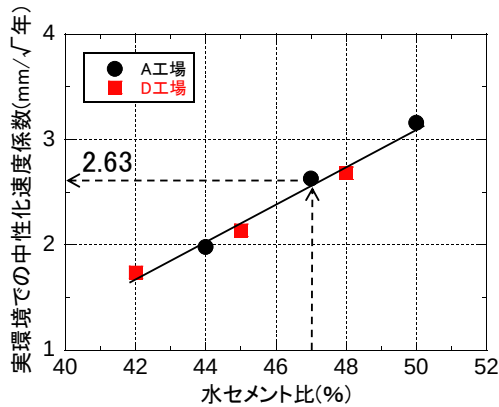


図-2 水セメント比と中性化速度係数

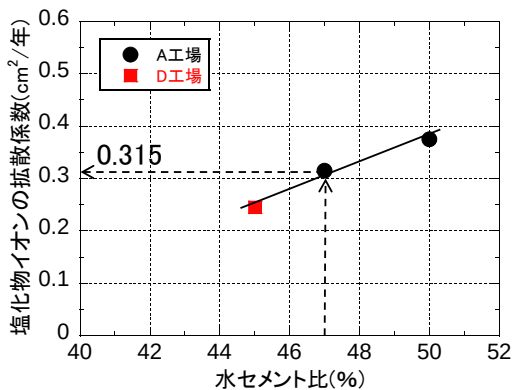


図-3 水セメント比と塩化物イオンの拡散係数

図-2 に示す。表-3 に示す配合のうち、水セメント比の最大値は 47% であり、このときの実環境における中性化速度係数は 2.63 (mm/√年) と推定された。

基礎版コンクリートの設計かぶりの最小値は 116mm であり、中性化残り (25mm) を考慮すると中性化に伴う鋼材腐食発生限界深さは 91mm となる。一方で、試験により得られた中性化速度係数を用い、コンクリート標準示方書設計編²⁾ (以下、示方書設計編と称す。) に従って 50 年後の中性化深さを推定したところ 45mm となった。選定した配合は、中性化に対する十分な抵抗性を有することが確認できた。

4.2 塩害に対する抵抗性

JSCE-G572 に準じて濃度 10% の塩化ナトリウム水溶液に 3 ヶ月間浸漬した後、JIS A 1154 に従い表面から 20mm ごとの位置での塩化物イオン量を測定し、見掛けの拡散係数を求めた。測定結果を図-3 に示す。表-3 に示す配合中で水セメント比の最大値は 47% であり、このときの見掛けの拡散係数は 0.315(cm²/年) と推定された。

得られた見掛けの拡散係数を用いて、示方書設計編に従って鋼材位置における塩化物イオン量を推定した。推定結果を耐用期間との関係で整理して図-4 に示す。50 年後の鋼材位置における塩化物イオン量の推定値は 1.74kg/m³ であり、示方書に示されるフライアッシュセメント B 種 (W/C=47%) の鋼材腐食発生限界塩化物濃度

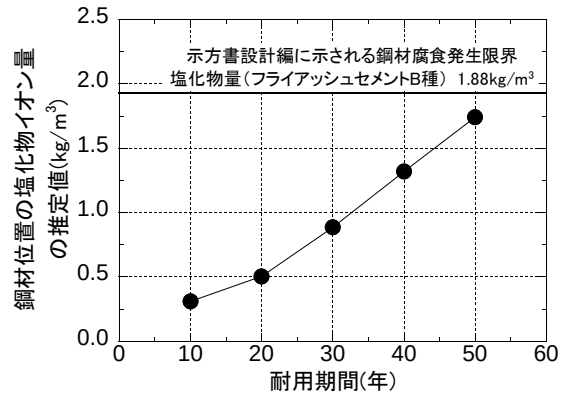


図-4 鋼材位置における塩化物量の推定結果

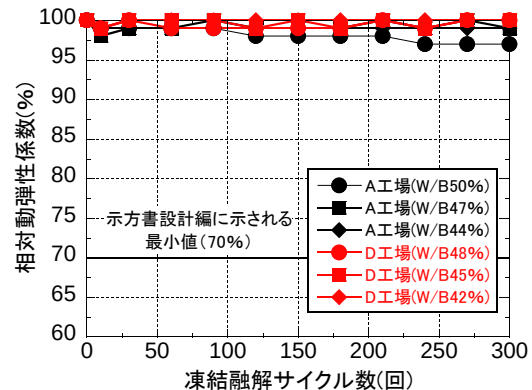


図-5 凍結融解試験結果

(1.88kg/m³) よりも小さな値であった。選定した配合が、塩害に対する抵抗性も有していることを確認できた。

4.3 凍結融解に対する抵抗性

JIS A 1148 に従い凍結融解試験を行った。試験結果を図-5 に示す。いずれの配合も凍結融解 300 サイクル後の相対動弾性係数は 97~100% の範囲にあり、示方書設計編に示される凍害に関するコンクリート構造物の性能を満足するための凍結融解試験における相対動弾性係数の最小値 (本工事の条件の場合 70%) を十分に満足する結果であった。

以上の結果から、表-3 に示す配合が中性化、塩害および凍結融解に対する抵抗性を有することが確認できた。

5. 止水性の照査

5.1 温度ひび割れの評価手法および要求性能

止水性を確保するために温度ひび割れについて要求性能を設定している。温度ひび割れの発生の可能性については、温度応力解析により、示方書設計編に基づき、ひび割れ指数を用いて評価した。

基礎版コンクリートの温度ひび割れに対する要求性能は、止水性能の確保であることから、目標とするひび割れ指数は、ひび割れ発生確率 5% の 1.85 以上とした。

5.2 解析手法

温度応力解析には、汎用ソフトの ASTEA MACS

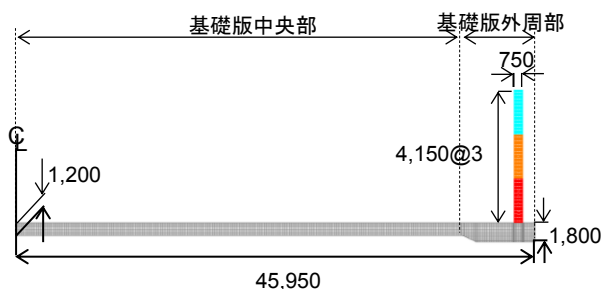


図-6 解析モデル (単位 mm)

表-4 コンクリート配合

配合	水結合材 比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)				
			W	C	FA	S	G
FC	44.0	46.8	152	243	103	843	954
OPC	47.0	—	160	340	—	—	—

Ver8.0.3 を用いた。解析モデルは、2 次元軸対象とし、検討対象とした基礎版に加え、基礎版下部の地盤および上部の PC 防液堤 1~3 ロットについてもモデル化した。躯体部分の解析モデルを図-6 に示す。

5.3 検討配合

温度ひび割れの検討に用いたフライアッシュセメント C 種を使用したコンクリート（以下、FC と称す。）の配合は、出荷予定の 6 工場のうち、コンクリートの出荷数量が最大となる表-3 の A 工場の材料を使用し、単位セメント量が 6 工場の単位量の平均値と同等なる配合とした。温度ひび割れの検討に用いた配合を表-4 に示す。

また、表-4 には、比較用として普通ポルトランドセメントを単体で使用するとして仮定したコンクリート（以下、OPC と称す）の水セメント比、単位水量および単位セメント量についても示す。なお、OPC 使用時の水セメント比は、示方書設計編に準拠し FC と同等の圧縮強度および耐久性を満足する最大値とし、単位水量は FC の配合を基にフライアッシュの使用による単位水量低減効果を差引いた値とした。

5.4 解析条件

FC を用いた温度応力解析における基礎版コンクリートの各種物性は、表-4 に示した配合および A 工場の材料を使用した実測値を用いることを基本とした。解析に用いた基礎版コンクリートの主な物性を表-5 に示す。

(1) 断熱温度上昇量

表-4 に示した配合および A 工場の材料を使用して測定した断熱温度上昇量の測定結果を図-7 に示す。

なお、断熱温度上昇量測定時のコンクリートの打込み温度は、基礎版コンクリートの打込み温度の予測値（16℃）と同値となるよう調整した。

また、比較用として、表-4 に示した OPC を用いた場合の断熱温度上昇量についても図-7 に示す。OPC

表-5 基礎版コンクリートの物性

項目	単位	値および算定式	出典
比熱	kJ/kg・℃	1.05	LNG 地上式 貯槽指針
熱伝導率	W/m・℃	2.56	
熱膨張係数	μ/℃	7.3	実測値
熱伝達率	W/m ² ・℃	上面：8（湛水） 側面：4（断熱）	示方書 設計編
断熱温度 上昇量	℃	5.4 (1) 参照	実測値
圧縮強度	N/mm ²	積算温度を用いた近似式	実測値
有効 ヤング係数	N/mm ²	圧縮強度を用いた近似式 $E_c(t) = \phi(t) \times \alpha \times f_{c0}(t)^b$ $\phi(t)$: クリープ係数 温度上昇時 : 0.42 温度下降時 : 0.65 $a \cdot b$: 定数 a : 8623 b : 0.339	実測値
引張強度	N/mm ²	圧縮強度を用いた近似式 $f_t(t) = \alpha \times f_{c0}(t)^b$ $a \cdot b$: 定数 a : 0.256 b : 0.667	実測値
自己収縮 ひずみ	μ	5.4 (2) 参照	実測値
ポアソン比	—	0.2	示方書 設計編

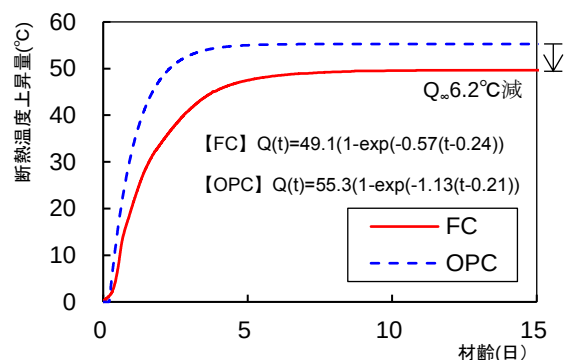


図-7 断熱温度上昇量

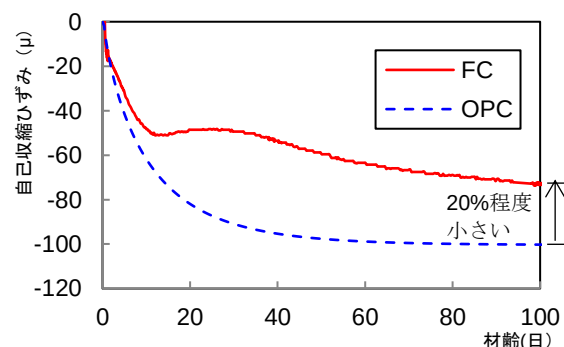


図-8 自己収縮ひずみ

の断熱温度上昇量は、マスコンクリートのひび割れ制御指針³⁾に準拠し算出した。

FC の断熱温度上昇量は、OPC に比べ終局断熱温度上昇量（ Q_{∞} ）で 10%程度低下し、温度上昇速度（ γ ）はおおよそ 50%程度まで小さくなる結果を示した。

FC は OPC に比べ、特に温度上昇速度が小さくなることから、FC を比較的薄肉の部材に適用した場合、OPC に比べ温度上昇量の低減効果が期待できると考えられる。

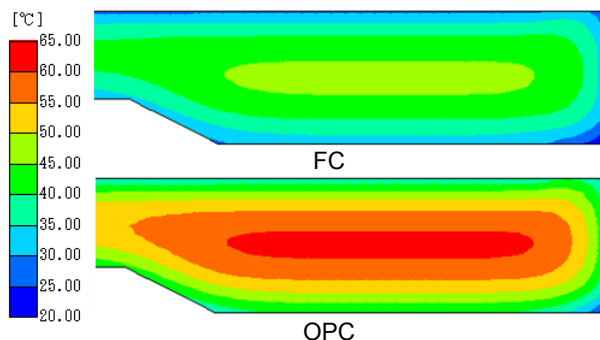


図-9 最高温度分布図

(2) 自己収縮ひずみ

自己収縮ひずみの実測値を図-8に示す。

自己収縮ひずみは、20℃・60%の恒温恒湿室で封かん養生した供試体（100×100×400mm）の中央に設置した低弾性型の埋込型ひずみ計を用いて計測した。

図-8には示方書設計編に準拠して算出した OPC の計算値も参考として示す。

FC の自己収縮ひずみは OPC に比べ、最大値で 20%程度小さい値を示した。

5.5 解析結果

基礎版外周部において、材齢に関わらず各節点の最高温度を抽出した最高温度分布図を図-9に示す。温度は、部材厚が厚い基礎版外周部の中心部で最高の値を示した。

最高温度は、FC 使用時は 46.0℃だったのに対し、OPC 使用時は 61.0℃となり、OPC に替えて FC を使用することにより、打込み温度（16℃）からの温度上昇量で 50%程度の低減が可能となっている。

基礎版外周部において、材齢に関わらず各要素の最小ひび割れ指数を抽出した最小ひび割れ指数分布図を図-10に示す。応力解析でも、温度上昇が大きかった基礎版外周部の中心部で、ひび割れ指数が最小となった。

最小ひび割れ指数は、OPC 使用時は 1.60 となり、目標とする 1.85 以上を満足できなかったのに対し、FC 使用時では 2.15 となり、1.85 を上回る結果を示した。最小ひび割れ指数は、OPC に替えて FC を使用することにより、35%程度大きくなる結果を示した。

6. 実施工

6.1 施工計画

基礎版コンクリートの施工計画の概要を表-6に示す。

コンクリートの打込みは、基礎版を 36° 毎に扇形に分割した 10 班で行う計画とした。作業員は昼夜 2 交代制とし、各班 17 名、総勢 400 人態勢とした。

コンクリートの打重ねは、図-11のように基礎版中央部から外周部へ俵状に行い、許容打重ね時間間隔に対して余裕を持たせた計画とした。

使用するアジテータ車は延べ 2,300 台となり、常時約

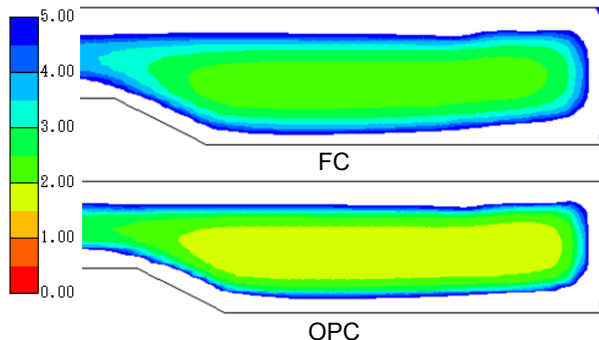


図-10 最小ひび割れ指数分布図

表-6 基礎版コンクリート施工計画の概要

項 目		内 容
形 状	厚さ	中央部 1.2m, 外周部 1.8m
	直径	91.9m
コンクリート数量		9,200m ³
計画施工時間		24 時間
時間当たりの計画施工量		330～480m ³
出荷工場数		6 工場
作業班		10 班
コンクリートの施工層数	中央部	3 層(下から 50,35,35cm)
	外周部	5 層(下から 30,30,50,35,35cm)
打重ね時間間隔		2 時間 30 分

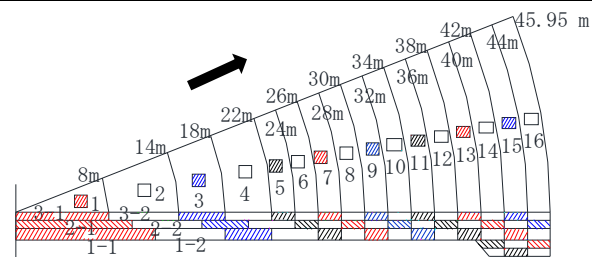


図-11 打込み計画図



写真-1 アジテータ車運行管理システム操作画面

30 秒に 1 台の間隔で搬入されることになる。

そこで、アジテータ車の各ポンプ車への配車、打設量および各班の打重ね時間の管理、各プラントへの出荷量の指示を適切に実施するため、GPS を使用した運行管理システムを活用し（写真-1）、検収所での集中管理を行った。また、出荷速度が打設速度を上回った場合に備え、一般道でのアジテータ車の滞流を防止するため、工事ヤード内に最大 40 台のアジテータ車待機場所を確保した。さらに、出荷工場名をアジテータ車に明示することに



写真-2 コンクリート施工状況

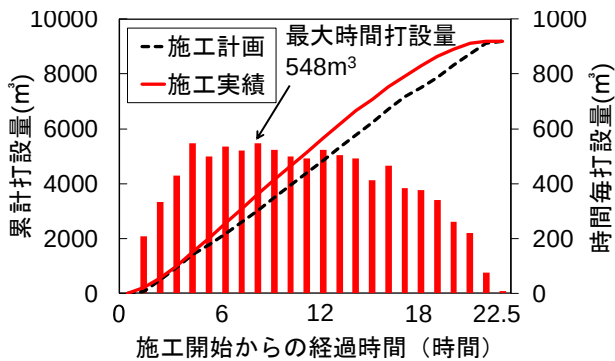


図-12 コンクリートの打込み実績

より、運搬時間がより長い工場のアジテータ車が、待機場所に管理時間を超えて留まらないよう必要に応じて打込みの順番を繰り上げる計画とした。

6.2 施工概要

基礎版コンクリートの打込みは平成 29 年 5 月 13 日午前 7 時に開始し、約 22.5 時間をかけて翌日の 14 日午前 5 時 30 分に終了した（写真-2）。全出荷工場でトラブルなく、1 時間当たり打込み量は計画最大 480m³ に対して、実績では最大 548m³ に達し、ほぼ計画通りに完了した。コンクリートの打込みの実績を図-12 に示す。

品質管理は、6 工場で 58 回の受入試験を実施し、フレッシュ性状のばらつきも少なく、スランプ、空気量、塩化物含有量、および圧縮強度について全て目標範囲を満足した。また、全ての班・ブロックにおいて、許容打重ね時間間隔内で施工することができた。

温度ひび割れ検討結果の検証のため、基礎版コンクリートの外周部中心と中央部中心で熱電対による温度計測を行った。実施工時のコンクリート打込み温度は、基礎版内周部で 19℃、基礎版外周部で 14℃となった。

コンクリートの打込み温度と外気温に実測値を使用して再解析を行った温度解析結果のうち、基礎版外周部についての実測値との比較を図-13 に示す。

温度上昇時の傾向が一致し、最高温度がほぼ同等であることから、解析値は実測値をよく反映していると考えられる。この温度解析結果を用いて応力解析を実施した結果、最小ひび割れ指数は 2.09 となり、実施工においても目標とするひび割れ指数 1.85 以上を満足する結果を示した。

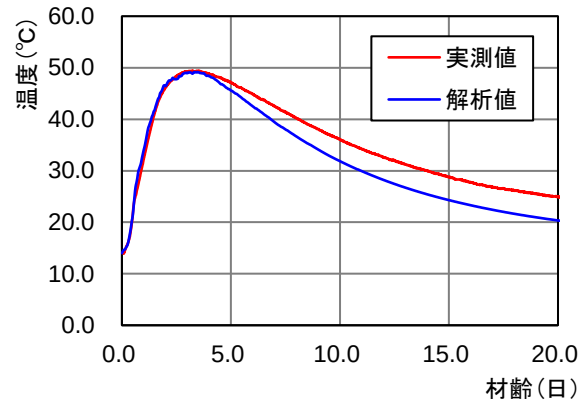


図-13 温度の実測値と解析値の比較（基礎版外周部）

7.まとめ

現在建設中の国内最大級（容量 23 万 kl）となる PCLNG 地上式貯槽の基礎版コンクリートに 30%をフライアッシュで置換したフライアッシュセメント C 種を使用するに当たり、配合および温度ひび割れの検討を行った。その結果、明らかとなったことを以下に示す。

- (1) JIS 等に定められた試験を行い、フライアッシュを大量に置換したコンクリートであっても、設計耐用期間 50 年にわたり、中性化、塩害および凍結融解に対する抵抗性を確保できることを照査した。
- (2) フライアッシュセメント C 種を基礎版に適用することで、普通ポルトランドセメントを使用した配合に比べ、温度上昇量を 50%程度低減でき、ひび割れ指数は 35%程度改善し、最小ひび割れ指数は目標とする 1.85 以上を満足した。
- (3) フライアッシュセメント C 種を用いた配合で基礎版を施工した結果、現状ひび割れの発生は認められていない。したがって、ひび割れ指数 1.85 以上を満足できれば概ねひび割れを防止できると考えられる。
- (4) コンクリートの大量施工に際し、配車、打込み箇所・順序および打重ね時間等の施工管理計画を適切に立案し実施することで、計画通りに施工を完了した。

No.4 貯槽は、平成 32 年 10 月の竣工に向け、現在防液堤の構築中である。今後も安全を第一に心がけ、品質管理、施工管理、工程管理に万全を尽くす所存である。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート構造物のコールドジョイント問題と対策、コンクリートライブラリー103, pp.7-20, 2000
- 2) 土木学会：2012 年制定 コンクリート標準示方書 設計編, 2013
- 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 2016, 2016