

富山新港火力発電所 LNG 1 号機新設工事 PC 防液堤にフライアッシュ高流動コンクリートを適用

藤木 豊*1・谷口 達彦*2・原 拓也*3・桜井 邦昭*4

本工事は、富山県射水市において、富山新港火力発電所に供給する LNG（液化天然ガス）を貯留する地上式 LNG タンク（容量 18 万 m³）などを新設する工事である。長期的なアルカリシリカ反応抑制対策として、LNG タンクの PC 防液堤の一部にフライアッシュを用いた高流動コンクリートを適用した。本稿では、フライアッシュを適用するに至った経緯、フライアッシュを用いた高流動コンクリートの配合選定ならびに施工の結果について報告する。

キーワード：地上式 LNG タンク、PC 防液堤、フライアッシュ、アルカリシリカ反応

1. はじめに

北陸電力(株)では、平成 30 年度の運転開始に向けて、LNG を燃料とする富山新港火力発電所 LNG 1 号機コンバインドサイクル発電の建設を進めている。本工事は建設工区を 3 工区に分割して行われており、このうちの基地工区では、LNG を貯留する地上式 LNG タンクのほか、取水口、冷排水路および配管・機器基礎などを建設している。

本工事で構築する地上式 LNG タンクの概要を図 - 1 および表 - 1 に示す。このうち、PC 防液堤は、高さ約 40.5 m、厚さ 0.75 m、周長が約 250 m であり、1 ロットの高さを約 3.5 m として一般部を 12 ロットに分割し、頂部を 13 ロットとして施工した。PC 防液堤の設計基準強度は、各荷重状態における作用荷重（液圧）に応じて高さ方向に 3 種類の強度（30、40 および 60 N/mm²）に分かれている。

本工事は、施工時の温度ひび割れを防止するため、LNG タンクの全部で水和発熱の小さい低熱ポルトランドセメントを用い、PC 防液堤の一部に膨張材を併用した。また、設計基準強度 60 N/mm² の部位では、鉄筋や PC シース管が過密に配置されていることから高流動コンクリートとし、さらに北陸地方のアルカリシリカ反応による被害報告^{2,3)}を踏まえ、フライアッシュを用いたコンクリートを適用した。

本稿では、フライアッシュを適用するに至った経緯、高流動コンクリートの試験練りおよび施工の結果を報告する。

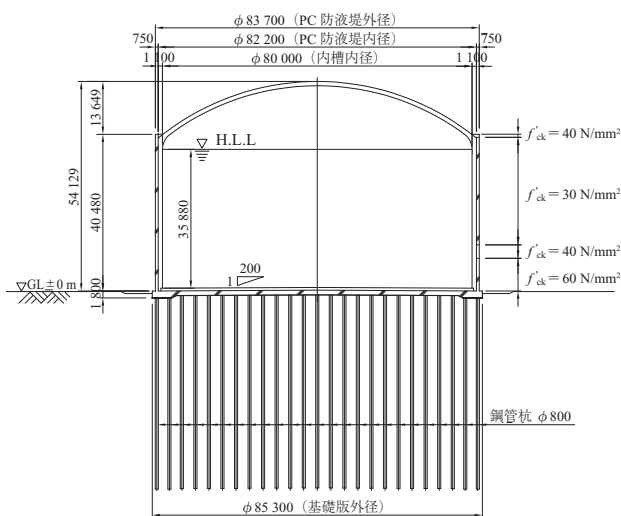


図 - 1 本工事の LNG タンクの概要

表 - 1 本工事の LNG タンクの仕様

形式	PC 防液堤・外槽一体型平底球面屋根付円筒堅形貯槽
容量	18 万 m ³ 、内径：80.0 m、高さ：54.129 m
基礎杭	鋼管杭 512 本（支持層：沖積砂層） 杭径：800 mm、厚み：11～18 mm、長さ：49.5～50.0 m
基礎版	RC 構造、外径：85.3 m、厚さ：1.8 m（外周部）・1.2 m（中央部）
防液堤	PC 構造、高さ：40.48 m、厚さ：0.75 m



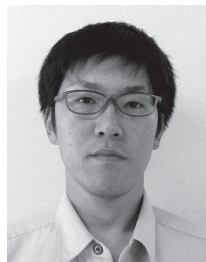
*1 Yutaka FUJIKI

北陸電力(株)
富山新港火力発電所建設所



*2 Tatsuhiko TANIGUCHI

北陸電力(株)
富山新港火力発電所建設所



*3 Takuya HARA

(株)大林組 北陸支店
北電富山 LNGJV 工事事務所



*4 Kuniaki SAKURAI

(株)大林組 技術研究所
生産技術研究所

2. フライアッシュの適用に至った経緯

2.1 北陸地方におけるアルカリシリカ反応の発生状況

北陸地方（富山・石川・福井）は、全国的にもアルカリシリカ反応の発生割合が高いといわれている。北陸電力（株）においても富山県内の51%の発電所では、発電所のいずれかの設備でアルカリシリカ反応が確認されている³⁾。

2.2 骨材のアルカリシリカ反応性の試験結果

(1) コンクリート標準示方書に準じた照査

コンクリート標準示方書施工編では、①コンクリート中のアルカリ総量規制（ 3.0 kg/m^3 以下）、②アルカリ骨材反応抑制効果をもつ混合セメントの使用、③アルカリシリカ反応性試験で無害と判定された骨材の使用のうち、いずれか1つの対策を講じることでアルカリシリカ反応に対する耐久性は満足されたものと見なすことができるとしている。

そこで、本工事でコンクリートを供給する現場近郊のレディーミクストコンクリート工場の骨材について、JIS A 1145「骨材のアルカリシリカ反応性試験方法（化学法）」での試験結果を調査した。細骨材の調査結果を図-2に示す。いずれの工場で使用している細骨材とも、上記の試験方法に準じると「無害」の判定結果であった。

(2) JR 東日本の判定基準による照査

JR 東日本では、アルカリシリカ反応について独自の判定基準を定めている。試験方法は、上記の化学法と同じであるが、判定区分を「E有害」、「準有害」、「E無害」の3段階としており、それぞれ表-2に示す対応策を講じることとしている^{4,5)}。図-2の調査結果をJR 東日本の判定区分で整理すると図-3のようになり、ほぼすべての骨材が「準有害」に区分される結果となった。

また、先述のように、富山県内の既設発電所の半数以上でアルカリシリカ反応が確認されていることから、何らかの抑制対応策を講じる必要があると判断した。

2.3 アルカリシリカ反応の抑制対策方法の選定

本工事では施工時の温度ひび割れを防止する観点から低熱ポルトランドセメントを用いる計画であり、混合セメントを用いることは困難であった。このため、表-2に従うと、アルカリシリカ反応を抑制するにはアルカリ総量を 2.2 kg/m^3 以下に規制する必要がある。

事前に選定した配合のコンクリートのアルカリ総量を調べたところ、設計基準強度 60 N/mm^2 に用いる配合は 2.15 kg/m^3 、設計基準強度 $30 \sim 40 \text{ N/mm}^2$ に用いる配合は 1.61 kg/m^3 であった。JR 東日本の基準も満足する結果であったが、長期的なアルカリシリカ反応を抑制する観点から、設計基準強度 60 N/mm^2 の部位（1～3ロット）に使用するコンクリートは、フライアッシュを混入することにした。

一般に、フライアッシュの混入によりアルカリシリカ反応を抑制するには、ポルトランドセメントに対する置換率を15%以上とする必要があるが⁶⁾、あらかじめフライアッシュを細骨材容積の7%置換したコンクリート試料で促進モルタルバー法（JIS A 1146）による試験を行ったところ、膨張率が十分に小さいことが確認された⁷⁾。そこで、フライアッシュの混入率を上記の2種類（単位粉体量の15%

置換と細骨材容積の7%置換）とした場合で試験練りを行い、配合を選定することにした。

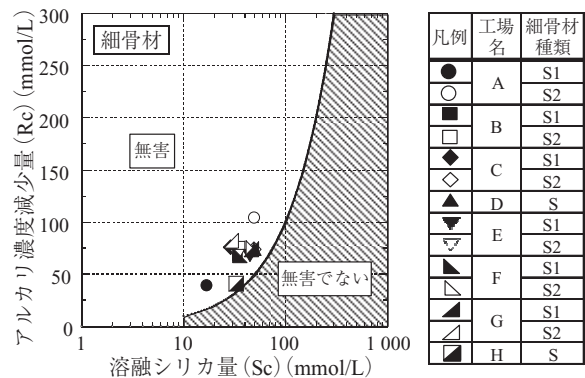


図-2 細骨材のアルカリシリカ反応性試験（化学法）の結果

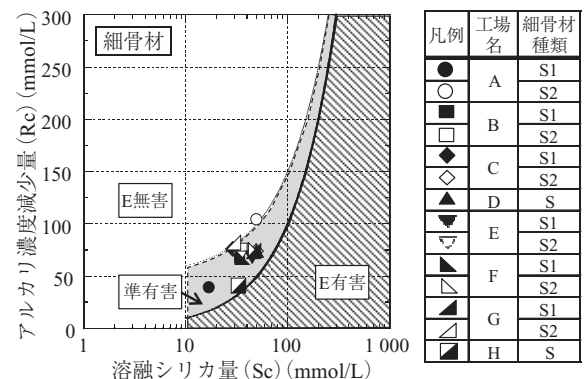


図-3 化学法の試験結果をJR 東日本の区分で分類した結果

表-2 JR 東日本における判定種別と対策^{4,5)}

骨材のアルカリシリカ反応判定種別	対策
E 有害	混合セメント等による対策
準有害	アルカリ総量を 2.2 kg/m^3 に規制する対策もしくは混合セメント等による対策
E 無害	無対策

表-3 高流動コンクリートの目標とした品質

項目	準拠規準など	目標とした品質
スランプフロー	JIS A 1150	$60 \pm 10 \text{ cm}$
空気量	JIS A 1128	$4.5 \pm 1.5 \%$
500 mm フロー到達時間	JSCE-F516	3～15 秒
充填高さ（ランク2）	JSCE-F511	30 cm 以上
漏斗流下時間（O漏斗）	JSCE-F512	7～13 秒

表-4 使用材料（A工場）

種類	記号	物理的性質など
セメント	C	低熱ポルトランドセメント、密度 3.24 g/cm^3
混和材	EX	膨張材、密度 3.09 g/cm^3
	FA	フライアッシュ、JIS II種適合品、北陸電力産、密度 2.40 g/cm^3
細骨材	S1	早月川産砂、表乾密度 2.60 g/cm^3
	S2	海老坂産砂、表乾密度 2.57 g/cm^3
粗骨材	G1	早月川産砂利 2 505、表乾密度 2.66 g/cm^3
混和材	SP	高性能 AE 減水剤（ポリカルボン酸系）
	AE	空気量調整剤

表 - 5 高流動コンクリートの配合と試験結果 (A 工場, 室内試験練り)

フライアッシュの混入の概要	W/P (%)	W/(C+EX) (%)	FA/(C+FA) (%)	s/a (%)	単体量 (kg/m ³)							混和剤		スランブフロー (cm)	500 mm フロー到達時間 (秒)	空気量 (%)	漏斗流下時間 (秒)	U 型充填高さ (ランク 2) (cm)	コンクリート温度 (℃)
					W	P			S		G	減水剤 SP	助剤 AE						
						C	EX	FA	S1	S2									
なし	33.0	33.0	0.0	48.3	165	485	15	0	520	275	873	1.00	2.5A 2.0T	68.0	4.8	4.5	7.2	35.1	23
細骨材容積の 7% を FA で置換	30.0	33.0	9.3	46.6	165	485	15	50	484	257	873	0.95	8.0A 2.0T	67.5	5.2	4.8	7.5	34.6	23
単位粉体量の 15% を FA で置換	28.2	33.0	15.1	48.3	165	485	15	86	458	244	873	0.85	14.0A 2.0T	64.5	6.1	4.3	9.5	34.3	24

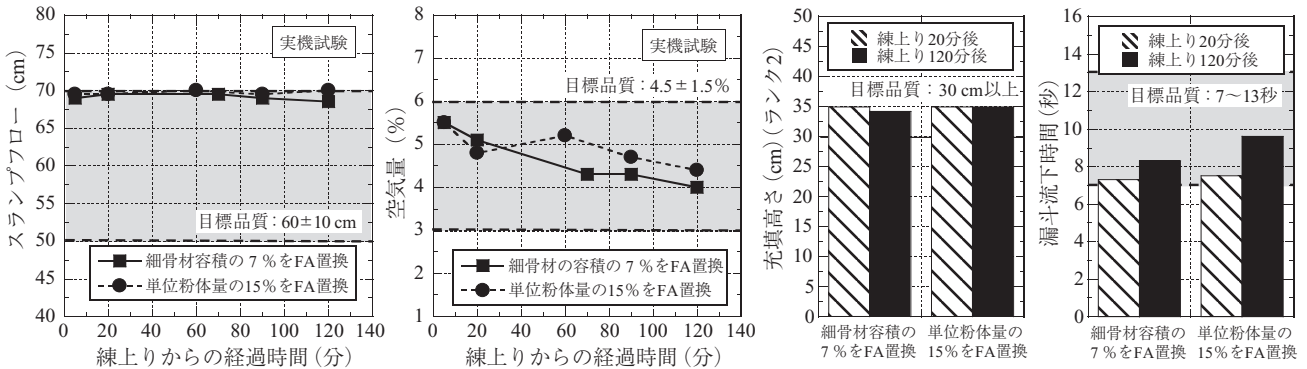


図 - 4 フライアッシュを混入した高流動コンクリートのフレッシュ品質試験結果 (A 工場, 実機ミキサ)

3. フライアッシュを混入した配合の選定

フライアッシュを混入した高流動コンクリートの配合を選定するため、出荷予定の3工場で試験練りを行った。高流動コンクリートの目標品質を表-3に示す。また、A工場で用いた使用材料を表-4に、試験配合および試験結果を表-5に示す。いずれの配合でも良好な性状を確保でき、フライアッシュの混入がフレッシュコンクリート品質に及ぼす影響はほとんどないことを確認した。他工場でも同様の試験を行い良好な性状を有する配合が選定できた。

その後、実機ミキサによる試験練りを行った。試験結果を図-4に示す。フライアッシュを混入した2種類の高流動コンクリートは、いずれも長時間にわたり、所要の流動性、空気量および充填性を満足できることを確認した。

配合選定後、温度応力解析を行ったところ、フライアッシュを単位粉体量の15%混入した場合には、粉体量が増加した影響により一部のロットでひび割れ指数1.85が満足できず、施工時に温度ひび割れが生じるおそれがある結果となった。そこで、本工事では、フライアッシュを細骨材容積の7%混入した配合を用いることにした。

4. 実施工の結果

4.1 施工概要

PC防液堤コンクリートの施工は、受けもち範囲を周方向で6分割(担当範囲:約40m/班)とした6班体制とし、コンクリートポンプも6台配置した。高流動コンクリートはレディーミクストコンクリート工場3工場から出荷した。運搬時間はおおむね20分程度であった。

1層あたりの打込み高さは70cmとし、5層で打ち上げることにした。層ごとの打重ね時間間隔が約1.5時間となるような施工計画とし、約7時間で施工した。また、高流動



写真 - 1 PC 防液堤コンクリートの施工状況

コンクリートではあるが、PCシース管や鉄筋が高密度に配置されているため、適宜、棒状バイブレータによる締め固めを行った。なお、あらかじめ工場ごとに高流動コンクリートの許容打重ね時間間隔を試験により確認したところもっとも短い工場でも4時間であり、上述の打重ね時間間隔に対して十分な余裕があるコンクリートであることを確認した。

施工状況を写真-1に示す。コンクリートは、高い流動性を有しており、型枠内を容易に流動し、充填できていた。

4.2 品質試験結果

フライアッシュを用いた高流動コンクリートの品質試験結果の一例を図-5に示す。いずれの試験項目とも安定した結果が得られ、品質の安定した高流動コンクリートが継続的に出荷・供給できていたことを確認した。

4.3 温度計測結果および仕上がり

施工時には、躯体中心部に熱電対を設置してコンクリートの温度推移を測定した。測定結果の一例を図-6に示す。

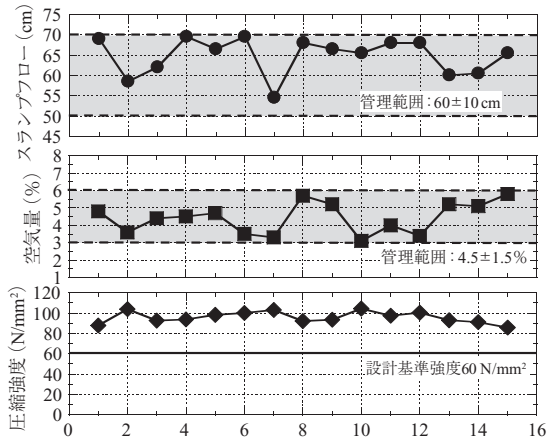


図 - 5 実施時の品質試験結果

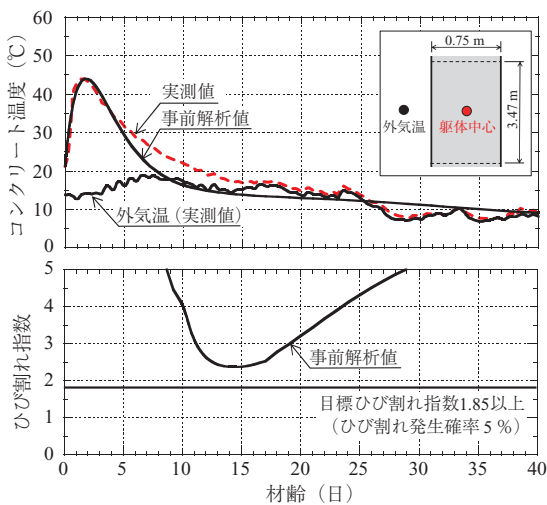


図 - 6 PC 防液堤コンクリートの温度計測結果 (2 ロット)

図には、事前の温度応力解析におけるコンクリート温度の推移、およびひび割れ指数の推移を併記している。測定の結果、温度が上昇する過程におけるコンクリート温度の実測値の推移は、事前の解析値とほぼ一致していた。一方、温度降下の上速度は実測値の方が緩やかであり、事前解析のひび割れ指数の推移を踏まえると、温度ひび割れの発生を防止できているものと推察された。

脱型後の PC 防液堤の外観を写真 - 2 に示す。充填不良やひび割れは認められず、良好な仕上がりであった。

5. おわりに

本稿では、アルカリシリカ反応の発生リスクを低減する観点から、地上式 LNG タンクの PC 防液堤の一部にフライアッシュを用いた高流動コンクリートを適用した事例を紹介した。本工事で構築した LNG タンクの完成後の外観を写真 - 3 に示す。本稿が類似工事の参考になれば幸いである。

なお、北陸地方ではアルカリシリカ反応の抑制対策としてばかりでなく、「地域資源の有効活用」、「CO₂削減」、「コンクリート構造物の長寿命化」といった観点からもフライ



写真 - 2 PC 防液堤コンクリートの脱型後の外観



写真 - 3 構築した LNG タンクの外観

アッシュを積極的に活用している⁸⁾。今後、フライアッシュがさらに活用されることを期待したい。

最後に、本工事の施工では、レディーミクストコンクリート工場、セメントメーカー、混和剤メーカーなど多くの方々にご協力いただきました。記して御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 西田勝幸, 藤木豊, 北川朝恵: 富山新港火力発電所 LNG 1号機建設工事の概要, 電力土木, No.376, pp.53-57, 2015.3
- 2) 久保哲司, 参納千夏男, 蟹谷真生: 北陸地方におけるフライアッシュコンクリートの標準化に向けた取組み-「ASR 解決」の視点から-, 電力土木, No.380, pp.115-119, 2015.11
- 3) 鳥居和之, 野村昌弘, 南善導: 北陸地方の川砂のアルカリシリカ反応性とアルカリ溶出性状, セメントコンクリート論文集, No.60, pp.390-395, 2006
- 4) 社団法人日本鉄道施設協会: 土木工事標準仕様書 東日本旅客鉄道株式会社編, 2010.11
- 5) 森野奎二: アルカリ骨材反応の基礎シリーズ II アルカリ反応性骨材の判定試験方法と試験結果例, 骨材資源, 通巻 No.173, pp.7-20, 2012
- 6) たとえば, 土木学会: フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針 (案), コンクリートライブラリー 94, p.8, 1999
- 7) 久保哲司, 佐野朝恵, 参納千夏男, 鳥居和之: 砂のアルカリシリカ反応性評価と建設工事における ASR 抑制対策, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.901-906, 2017
- 8) 「北陸地方におけるコンクリートへのフライアッシュの有効利用促進検討委員会」報告書 (富山・石川・福井版), 2013.6

【2017年8月28日受付】