

フライアッシュⅣ種を有効利用した低発熱高流動コンクリートの適用

鹿島建設(株)	正会員	○瀬戸謙一郎	鹿島建設(株)	正会員	岡 史浩
鹿島建設(株)	正会員	江頭 正之	鹿島建設(株)	正会員	中村 翔
鹿島建設(株)	正会員	松野 恭洋	鹿島建設(株)	正会員	渡邊 賢三

1. はじめに

宮城県東部の牡鹿半島に位置する東北電力(株)女川原子力発電所では、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震(東日本大震災)において震度6弱を観測し、津波はO.P.+13.0mまで達した(発電所工事用基準面O.P.は、東京湾平均海面T.P.に対し-0.74mである)。発電所内の重要施設はO.P.+14.8m以上の高さに設置してあったため、地震により半島全体が約1m沈下したものの、津波による大きな被害を受けることはなかった。その後、緊急安全対策としてセメント改良土盛土による高さ3mの防潮堤(O.P.+17.0m)を構築したが、新規制基準の適合性審査の過程で、津波高さの想定をO.P.+24.4mに引き上げ、防潮堤をO.P.+29.0mまでかさ上げすることが計画された。

防潮堤は、鋼管式鉛直壁(以下、鋼製遮水壁と称す)によるかさ上げ区間(延長約680m)と、セメント改良土による盛土の区間(延長約120m)に分けられる(図-1参照)。このうち鋼製遮水壁は岩盤部と一般部に分けられ、岩盤部では岩盤から遮水壁が突出する構造に対し、一般部は当初計画では一部のみ岩着した岩盤支持杭とし、その他は改良地盤に支持させた杭による構成としていた。30~40m間隔で設置される2本の岩盤支持杭の杭天端を結ぶ頂部梁を設置することで、岩盤ではなく改良地盤に支持される杭について下部の地盤が1m程度沈下した場合でもO.P.+29.0mまでの津波に抵抗できる設計思想であった。これらの工事は、鋼管杭および遮水壁の設置、改良土盛土などの大部分において完了間近であった。

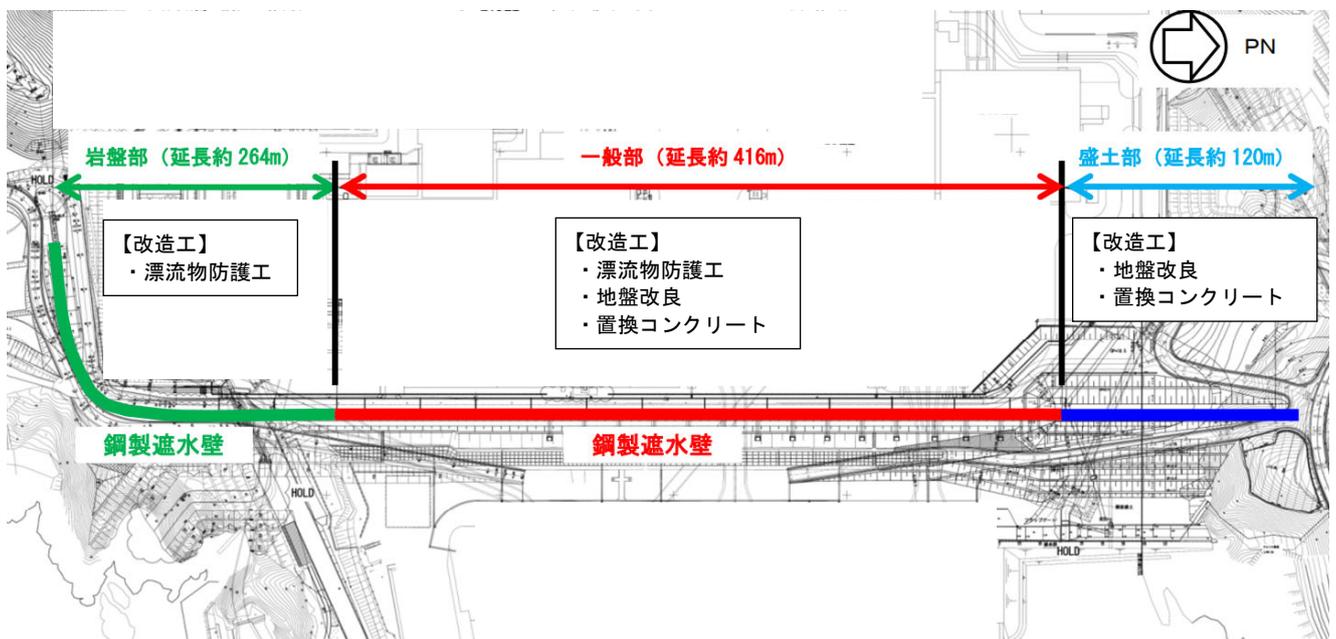


図-1 防潮堤かさ上げの全体平面図

しかしながら、新規制基準の適合性審査において、原子力規制委員会から排除可能なリスクは極力排除すべきとの指摘があり、以下の観点を考慮した設計の見直しが必要となった。

- ・杭直下の未改良の盛土層、旧表土層の存在による当初想定以上の沈下
- ・鋼管杭前面の盛土層、旧表土層にすべり面が形成された場合の転倒
- ・津波漂流物(車両、船舶等)が鋼製遮水壁前面に衝突することによる遮水壁の損傷

キーワード 女川原子力発電所、防潮堤、低発熱高流動コンクリート、フライアッシュⅣ種、有効利用

連絡先 〒980-0802 宮城県仙台市青葉区二日町1-27 鹿島建設株式会社東北支店 TEL022-261-7111

その結果¹⁾、杭直下の未改良部の地盤改良工（JETCRETE、以下 JC 工）、杭前面の盛土および旧表土のコンクリートへの置換、鋼製遮水壁前面への漂流物防護工の設置が追加となった（図-2 参照）。

置換コンクリートについては、鋼管式防潮堤の前面および盛土防潮堤の下部を C_M 級岩盤の深度まで全てコンクリートで置換する工法が採用された。今回、防潮堤の前面やその下部を開削工法によって掘削し、掘削床が C_M 級岩盤であることを確認してから、置換コンクリートの打設を行った。置換コンクリートには、一般的に需要の低いフライアッシュIV種を用いた低発熱高流動コンクリートを使用しており、本稿では、149,000m³に及ぶ大量なコンクリートの施工において、短期間かつ品質トラブルなく施工するために工夫した点、得られた知見について述べる。

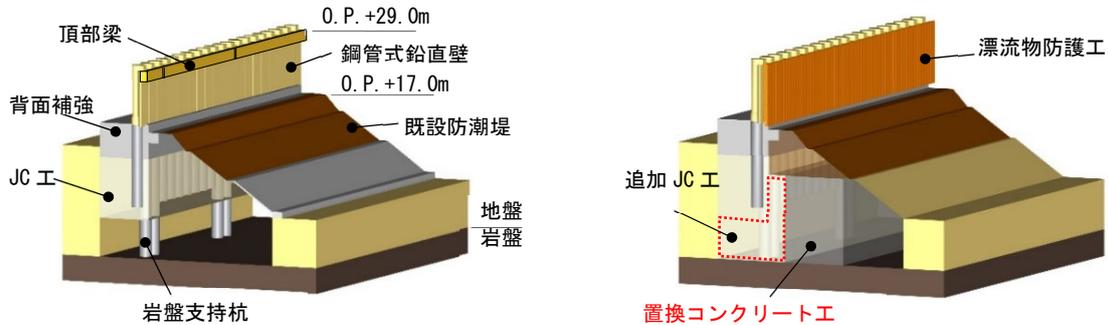


図-2 防潮堤の改造概要
(左図：当初計画 右図：改造概要)

2. 工事概要

(1) 全体工事概要

工事名：女川原子力発電所防潮堤かさ上げ工事

発注者：東北電力株式会社

施工者：鹿島建設株式会社

工事場所：宮城県牡鹿郡女川町塚浜字前田1

工期：2011. 5. 20～2024. 3. 29

主要工事数量：表-1参照

置換コンクリートは幅12.65m×延長420m×最大深さ27.8mの一般部と幅26.25m×延長102m×最大深さ19.5mの盛土部の2つのエリアに大きく分けられる。図-3～7に全体平面図、縦断面図、断面図を示す。なお、置換コンクリートの範囲の掘削には、前述したように開削工法を採用した。

表-1 主要工事数量

工種	仕様	単位	数量	備考	
鋼管式防潮堤	掘削	改良土、普通土、軟岩	m ³	99,063	
	吹付	モルタル、t=7cm	m ²	9,108	
	ディーブウエル	Φ400mm	本	4	L=16.0～21.5m
	親杭打設	H700×300×13×24	本	80	L=16.0～23.0m
		H800×300×14×26	本	30	L=23.0～24.5m
		H900×300×16×28	本	53	L=28.0～29.5m
		H400×300×16×28	本	17	L=15.5m
	鋼矢板打設	SP-V ₁ 型	m	49.5	L=16.0～22.0m
	地盤改良工(JC工)	Φ4.5m	本	26.0	L=8.5～11.5m
	腹起設置		t	766	
切梁設置		t	1,139		
置換コンクリート	30-55-20MFC	m ³	123,697		
盛土防潮堤	掘削	改良土、普通土、軟岩	m ³	31,413	
	吹付	モルタル、t=7cm	m ²	1,987	
	ディーブウエル	Φ400mm	本	1	L=18.0m
	親杭打設	H800×300×14×26	本	18	
	鋼矢板打設	SP-V ₁ 型	m	105	L=12.0～25.0m
	腹起設置		t	298	
	グラウンドアンカー		本	238	
	置換コンクリート	30-55-20MFC	m ³	26,094	

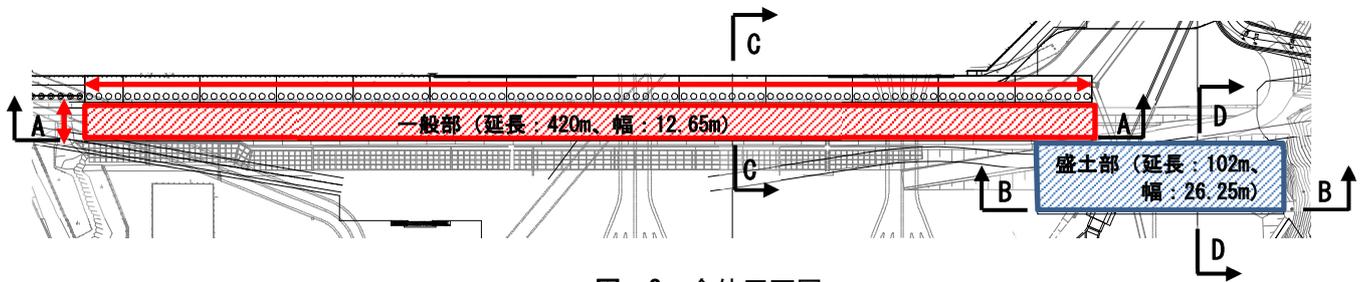


図-3 全体平面図

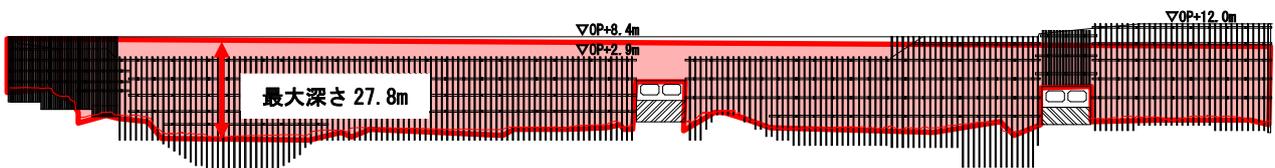


図-4 縦断面図(一般部)A-A断面

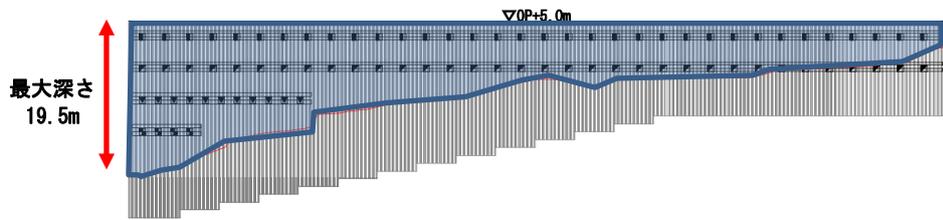


図-5 縦断面図(盛土部)B-B断面

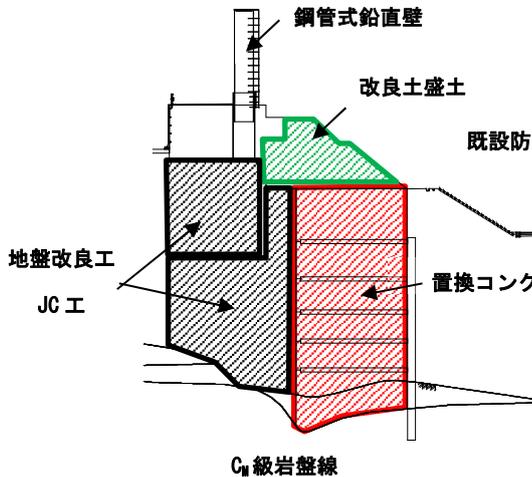


図-6 C-C断面

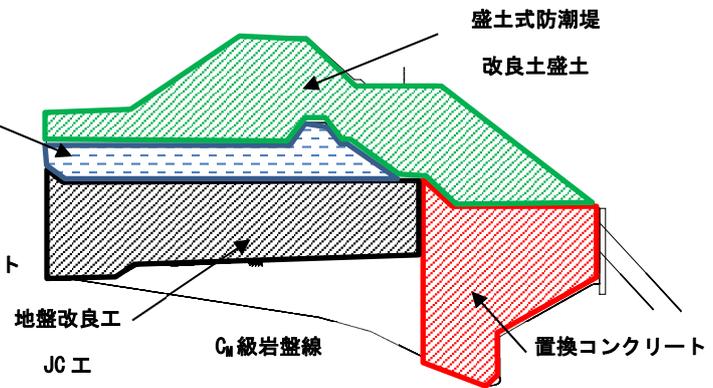


図-7 D-D断面

(2) 施工課題と解決策の提案

a) 工程上の課題

2021年12月から開始した置換コンクリートの施工は、発電所の再稼働工程を遵守するためには149,000m³のコンクリートの施工を12か月間で完了させる必要があった。全体工程への影響を最小限にするために、掘削が完了した箇所から随時打設を開始したが、施工エリアが限られていたため、最初の5か月は10,000m³/月、掘削完了後の7か月間で15,000m³/月の打設を行う必要があった。また、防潮堤の工事だけでなく、原子力発電所全域で安全対策工事が最盛期を迎えており、作業人員も限られていたことや、昨今の時間外労働削減の観点から、打設時の省力化が必要であった。そこで、締固め作業を不要にし、それにより打設足場の設置も不要にできる高流動コンクリートを使用する計画とした。

b) 品質上の課題

置換コンクリートはマスコンクリートであり、ひび割れを防止するために、ひび割れ指数を1.0以上にすることが発注者より求められていた。そこで、温度応力を低減させるために中庸熟ポルトランドセメント及びフライアッシュを使用する計画とした。温度応力解析の結果、1層のリフト高の上限が700mmとなったため、前項の高流動コンクリートの打設量を達成するために1回の施工範囲を流動距離に応じて適切に決定することや、合理的に打設エリアを分割できる型枠の選定が必要になった。

c) 使用材料の課題

当初、秋田県の能代火力発電所で発生するフライアッシュII種を使用する予定であったが、供給側の製造能力により、当工事の打設量を満足する供給量が確保できないことが計画の段階でわかった。代替として、十分な供給量を確保できる福島県の原町火力発電所のフライアッシュIV種を有効利用することを検討した。フライアッシュIV種は、II種と比較してコンクリートでの使用実績が少ない他に、一般に粒子が粗く、強度発現に劣る等の特徴がある。しかし、今回検討したフライアッシュIV種は、表-5に示すように活性度指数以外はフライアッシュII種相当であったことから、複数回の試験練りを経て採用することにした。

以上より、フライアッシュIV種を使用した低発熱高流動コンクリートを採用することにした。

3. 施工計画

(1) 配合

a) 使用材料および配合

最初に、コンクリートの要求品質を表-2に示す。次に、コンクリートの使用材料と配合を表-3、4に示す。また、使用したフライアッシュIV種の試験成績表を表-5に示す。なお、材料分離抵抗性を向上させるために、増粘成分を有する高性能AE減水剤を使用した。

表-3 使用材料一覧表

使用材料	摘要
セメント	宇部・三菱 中庸熟ポルトランドセメント 密度3.21g/cm ³ ブレーン値3,630cm ² /g
混和材	原町火力発電所 フライアッシュIV種 表-5参照
細骨材	砕砂 宮城県女川町小乗浜産 表乾密度2.67g/cm ³ F.M. 3.20
	山砂 宮城県黒川郡大郷町産 表乾密度2.56g/cm ³ F.M. 2.20
粗骨材	砕石2005 宮城県女川町小乗浜産 表乾密度2.71g/cm ³ F.M. 6.50 実積率58.0%
高性能AE減水剤	ボゾリス MG6500 I種 標準形 増粘剤一液タイプ
AE剤	ボゾリス MA202 I種

表-4 配合表

配合名 30-55-20MFC 単位量 (kg/m³)

水	セメント ※1	混和材 ※2	細骨材		粗骨材	混和剤	
			砕砂	山砂		MG6500	MA202
175	273	85	646	266	840	5.37	14.32
水結合材比		W/B=48.9%		細骨材率		s/a=52.7%	

※1:中庸熟ポルトランドセメント ※2:フライアッシュIV種

b) 強度特性

試験練りでの圧縮強度試験の結果を図-8に示す。能代火力発電所のフライアッシュII種と比べて大きな差異は見られなかった。一方、強度発現は遅くなるものの、発注者と協議のうえ、保証材齢を91日とすることで、設計基準強度30N/mm²を満足させることとした。

c) 性状

打込みはポンプ車を使用することとした。一般部は切梁が5mピッチで配置されているため、打込み間隔が5mになる。そこで、打込み間隔5mの妥当性を確認するために、流動性実験を実施した。高さ5.8mの位置にホッパーを取り付け、そこにポンプ車から圧送したコンクリートを流し込んだ。ホッパーにはサニーホースを取り付け、ホースの口から打設底面までの高さが1.0mになる位置に取り付けた。筒先から水平方向0.5m毎にコンクリートの天端高さを測定した。また、2.5m毎の位置で試料を採取し、粗骨材含有量を計測した。実験状況を写真-1、流動性実験の結果を図-9に示す。試験実験から5m離れた位置において、仕上がり高さと粗骨材含有率に差異が無いことから、筒先の配置間隔が5mであっても問題無いことを確認した。

d) 温度特性

表-2 コンクリートの要求品質

試験項目	規格値
設計基準強度	30N/mm ²
スランプフロー	55±5cm
空気量	4.5±1.5%
最小ひび割れ指数(目標値)	1.0以上

表-5 フライアッシュIV種の試験成績表

項目	単位	原町火力 FaIV種	(参考) FaII種 規格値
二酸化けい素含有物	%	54.3	45.0以上
水分	%	0.1	1.0以下
強熱減量	%	1.6	5.0以下
密度	g/cm ³	2.24	1.95以上
粉末度	45μmふるい成分	50	70以下
	比表面積	cm ² /g	2500
フロー値比	%	100	90以上
活性度 指数	材齢28日	74	80以上
	材齢91日	87	90以上
メチレンブルー吸着量	mg/g	0.52	-

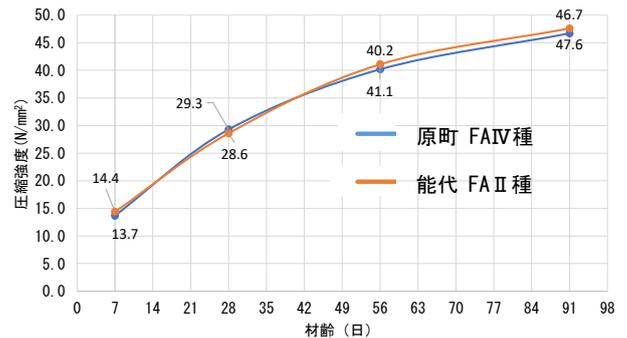


図-8 圧縮強度試験の結果



写真-1 流動性実験状況

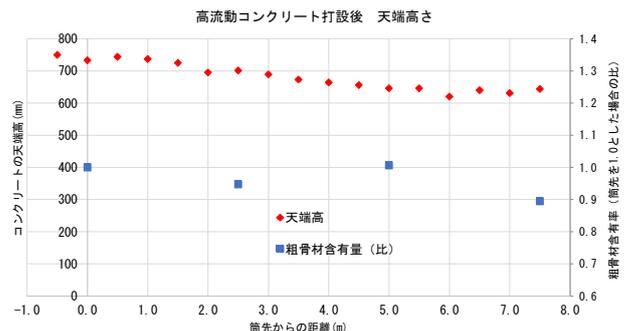


図-9 流動性実験の結果

簡易断熱温度上昇試験の結果を図-10に示す。原町火力発電所のフライアッシュIV種を用いたコンクリートの温度上昇量は当初採用しようとしていた能代火力発電所のフライアッシュII種を用いたコンクリートよりも8.4℃低減する結果となった。これは、原町火力発電所のフライアッシュIV種の活性度が低いことに起因すると考えられ、ひび割れ抑制に有効と考えられた。取得した温度特性を用いて温度応力解析を実施した結果、1層のリフト高を700mmにすることで、ひび割れ指数1.0以上を確保する計画とした。

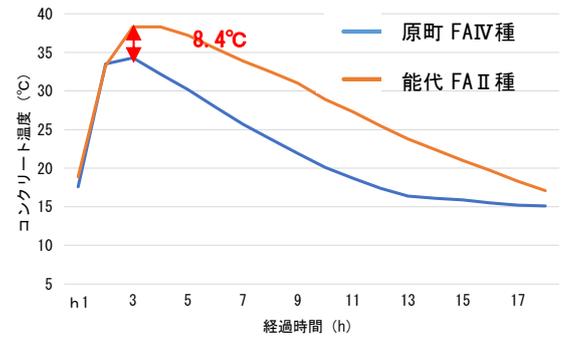


図-10 簡易断熱温度上昇試験の結果

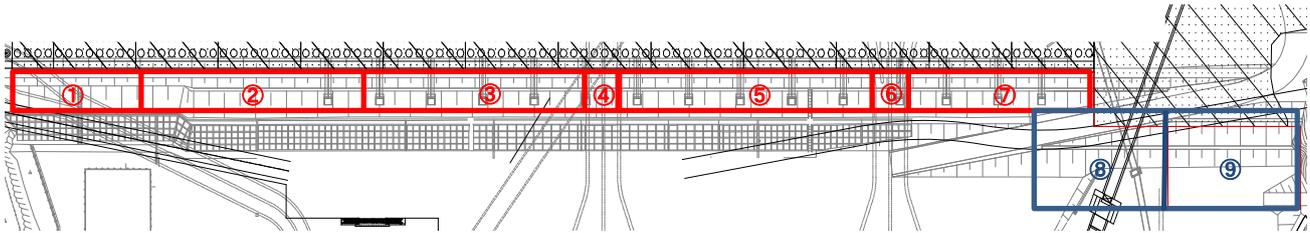


図-11 打設エリア

(2) 棲枠による打設エリアの分割

置換コンクリートの打設エリアを、一般部で7エリア、盛土部で2エリアに分割した(図-11参照)。棲枠には、設置手間の簡略化と脱型の手間を省略するために残置可能なラス網と安価かつ現地加工が容易な鉄筋D13、D16を採用した。写真-2に鉄筋とラス網からなる棲枠の設置状況を示す。1回の打設延長が最大で100m程度となることから、15m毎に棲枠を設置する計画とした。15m毎に700mmの打設を完了させることでポンプ車の段取り替えの頻度を最小限とする計画とした。



写真-2 棲枠設置状況

(3) 冬季養生

写真-3に冬季養生の状況を示す。1回の打設エリアの面積が最大で1,200㎡になるため、通常のシート養生では時間とコストの課題があった。そこで、腹起しと切梁を利用した架台にジェットヒーターを設置し、熱風を送ることで、コンクリートと外気の間には暖かい空気の層を形成し、外部からの冷気侵入を抑制する計画とした。



写真-3 冬季養生の状況

4. 施工実績

(1) 工程

図-12に月当りのコンクリート施工量を示す。掘削作業との並行期間である12月～4月は平均して計画通り10,000m³/月の打設を実施していた。しかし、施工中の2022年3月16日に福島県沖を震源とする震度6強の地震が発生した。この地震により、フライアッシュの供給元である原町火力発電所が被災し、フライアッシュの供給が4月末から1か月程度中断された。これに対し、被災を免れた能代火力発電所にフライアッシュIV種が十分にストッ

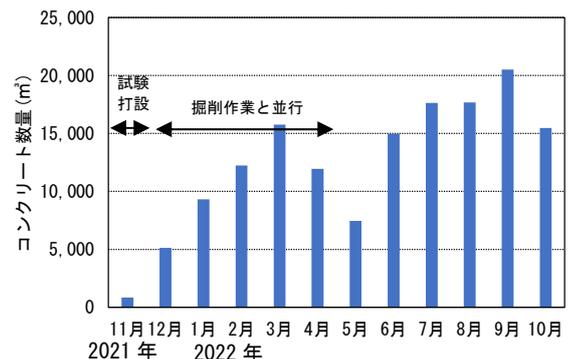


図-12 月当りのコンクリート施工量

クされていることが確認できたため、能代火力発電所のフライアッシュⅣ種を用いた高流動コンクリートの試験練りを即座に実施し、配合を決定して使用した。その結果、1日の施工量を制限しながらも工事を中断することなく継続して施工することができた。その後、地震の影響による遅れを挽回するために、一般部と盛土部の一部を同時に打設する等を行い、1日の施工量を1,150m³まで増やした。そして、最終的には20,000m³/月の打設量を達成することができ、予期せぬ地震による遅れもあった中、当初予定した12か月で施工を完了することができた。

(2) 品質

表-6に品質管理試験結果のばらつきを示す。フレッシュ性状において、スランプフローの平均値は54.4cmで変動係数が4.2%であった。また、空気量は変動係数が16.8%という結果であった。次に、圧縮強度については、材齢28日及び材齢91日において標準偏差、変動係数ともにバッチャープラントの管理値を満足する結果となり、材齢91日の圧縮強度試験において設計基準強度となる30N/mm²を下回ることは一度も無かった。フレッシュ性状、圧縮強度ともに、品質管理試験の規格値を全て満足する結果となった。

施工時に測定したコンクリートの温度上昇量は、打込み温度25℃で17.3℃であった。また、懸念されたひび割れは、打継面の一部に表面ひび割れの発生が若干見られたものの、有害なひび割れの発生はなかった。図-13に冬季養生時のコンクリート表面付近温度を示す。ジェットヒーターの効果でコンクリート表層付近の温度が0℃を下回らず、初期凍害を防止することができた。

写真-4にレイタンス処理状況を示す。高流動コンクリートのため表層部における骨材の沈降が少なく、またフライアッシュⅣ種は強度発現が遅いために、夏期の施工においても凝結遅延剤を散布することなく高圧洗浄水のみによるレイタンス処理が可能であり、当初の施工サイクルを維持しながら施工をすることができた。

5. おわりに

今回、女川原子力発電所の防潮堤かさ上げ工事における置換コンクリートの施工に、フライアッシュⅣ種を有効利用した低発熱高流動コンクリートを適用した。149,000 m³に及ぶ大量のコンクリート打設を12か月にわたり継続して実施したが、フレッシュ性状や硬化後の品質も安定しており、トラブルもなく完了させることができた。また、廃棄される予定であったフライアッシュⅣ種を大量に有効利用できたことで、環境負荷低減に対して大いに貢献できたと考える。

フライアッシュⅣ種の有効利用については、これから実績を積み上げ、知見を広げていく必要があり、今後の更なる技術開発を期待する。

参考文献

- 1) 岩館 礼・橋本 澄明・田村 雅宣：女川原子力発電所における防潮堤の設計、電力土木 No. 418、P69、2022

表-6 品質管理試験結果

試験項目	サンプル数	平均値	標準偏差	変動係数(%)	
スランプフロー(cm)	960	54.4	2.28	4.2	
空気量(%)	960	4.5	0.75	16.8	
圧縮強度(N/mm ²)	7日	960	11.2	1.90	17.0
	28日	960	27.2	2.87	10.6
	91日	960	44.7	3.34	7.5
BP 圧縮強度管理値			3.50	10.9	

※原町火力発電所、能代火力発電所 フライアッシュⅣ種

※BP・・・バッチャープラント

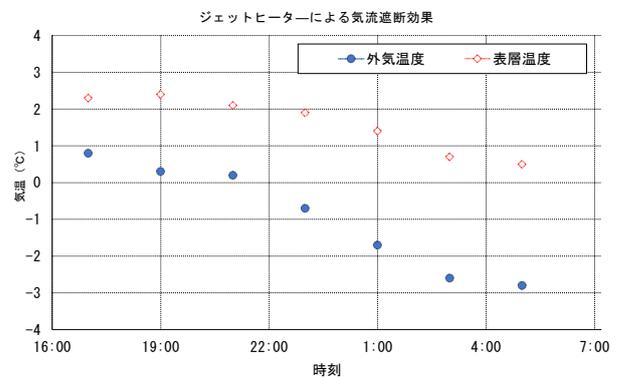


図-13 冬季養生時のコンクリート表面付近温度



写真-4 レイタンス処理状況