

[1229] 原子力発電所におけるマスコンクリートの施工と品質管理について

御手洗泰文^{*1}・安達 稔^{*2}・園 洋一^{*3}・坂口 徹^{*4}

1. はじめに

九州電力㈱が佐賀県東松浦郡玄海町に建設中の玄海原子力発電所3・4号機（加圧水型軽水炉、単基電気出力 118万kW, 以下玄海3・4号機と呼ぶ）では、単基容量の大型化にともない、原子炉格納容器にプレストレストコンクリート製格納容器（以下PCCVと呼ぶ）を採用している。PCCVに用いるコンクリートは、設計基準強度420kgf/cm²、部材厚寸法1.1~1.3mの高強度マスコンクリートである。このように、原子力発電所における高強度マスコンクリートの施工にあたっては、施設に要求される性能を確保するために十分な施工計画を立案するとともに的確な品質管理を行う必要があった。

本稿は、玄海3号機建設工事のうちPCCVの建設に重点を置いて、高品質かつ信頼性の高いコンクリートの実現にむけて採用した各種工法について報告するものである。

2. 発電所工事およびPCCVの概要

表-1、図-1に玄海3・4号機の概要を示す。玄海3号機のコンクリート工事では、昭和63年6月の基礎工事着手以来、平成5年4月竣工までの5年間にわたって約34万m³のコンクリートを打設した。このうち、PCCVには1万1500m³のコンクリートを使用している。

PCCVは脚部が円筒型、上部（ドーム部）が半球型の形状で、厚さ6.4mmのライナープレートの外側をプレストレスを与えたコンクリートで包む構造になっており、内側と外側の鉄筋の間にPCC鋼線の束（テンドン）を挿入するためのシースが配置されている。PCCVは施設の

表-1 発電所工事概要

位 置	佐賀県東松浦郡玄海町今村			
用地面積	約87万m ² (1・2号機を含む)			
電気出力	3・4号機 118万kW×2基			
原子炉型式	加圧水型軽水炉 (PWR)			
建屋名称	1次系		2次系	
	原子炉建屋	原子炉補助建屋	タービン建屋	
構造規模	原子炉周辺建屋 (R/B)	原子炉格納容器 (PCCV)	(A/B)	(T/B)
	鉄筋コンクリート造 一部鉄骨鉄筋コンクリート造 地上1階 地下3階	プレストレストコンクリート造 内径43.0m 内高64.5m	鉄筋コンクリート造 一部鉄骨造 地上1階 地下4階	鉄骨造, 基礎部鉄筋コンクリート造 地上2階 地下1階
最高高さ	G.L.+約22m	G.L.+約50m	G.L.+約10m	G.L.+約30m
地下深さ	G.L.-約26m	—	G.L.-約32m	G.L.-約25m
建築面積	1万500m ²	3100m ²	5900m ²	1万2500m ²
延床面積	3万6800m ²	3100m ²	3万3100m ²	3万2100m ²
主要工程	3号機原子炉建屋基礎マット着手：昭和63年6月 4号機原子炉建屋基礎マット着手：平成4年7月 3号機運転開始予定：平成6年3月 4号機運転開始予定：平成9年7月			
	コンクリート：約60万m ³ 鉄筋：約7万9000t 鉄骨：約1万2000t PCC鋼線：約3000t			

*1 九州電力㈱ 玄海原子力発電所建設所 建築課（正会員）

*2 九州電力㈱ 玄海原子力発電所建設所 建築課長

*3 九州電力㈱ 玄海原子力発電所建設所 建築課副長

*4 九電玄海大林・清水・竹中共同企業体工事事務所 品質保証部

安全性を保証する上で、耐圧・漏えい防止・遮へい体としての3機能を具備する必要がある。耐圧に対してはコンクリートにプレストレスを導入することで、漏えい防止には内側にライナープレートを設置することで、遮へい体としては厚さ1.1m（ドーム部）～1.3m（円筒部）のコンクリート壁によって機能する設計となっている。図-2にその概要を示す。

3. 品質確保のための基本計画

3.1 高強度マスコンクリート実証実験

計画当初、PCCVについては我が国における建設の経験が乏しかったこともあり、施工までの準備期間には人念な事前検討を重ねた。とくに、暑中環境下における高強度マスコンクリートの施工にあたっては、コンクリート構造体内部の温度上昇にともなう温度ひびわれ対策に加え、構造体コンクリート強度の確保等についても検討する必要があったことから、その問題点を明確にし、的確な品質管理を行うための実証実験を行った[1], [2]。実験ではPCCVを想定した模擬試験体を製作し、コンクリートの打込み温度をパラメータにして構造体の温度履歴や強度発現性状等を調査した。その結果、打込み温度の差は構造体内の最高温度の差として明瞭に現れ、プレクーリングによって打込み温度を低減することは温度ひびわれを抑制するうえで有効であるとともに、暑中の強度発現を改善できることを確認した。

3.2 温度ひびわれ対策

温度ひびわれに対しては、コンクリート打込み後の内部温度上昇をできるだけ低く抑えることを主眼とし、表-2に示す対策を採用した。プレクーリング採用の根拠は前節で述べたとおりであるが、PCCVの施工にあたっては事前に温度応力の解析を行ってひびわれ発生の危険性を調査し、プレクーリングの必要性を再確認するとともに、打込み高さ等計画の妥当性を検討したうえで施工した。また、採用したプレクーリングの効果については、PCCV施工時の温度および温度応力を実測することによって評価した[3]。温度応力測定の概要については後述する。

3.3 コンクリートの仕様と調合

原子力発電所施設のコンクリート構造物に要求される性能は、その立地条件や原子炉の型式等によって異なるものの、所要の強度・耐久性に加えて耐震性・遮へい性等一段と高度なものとな

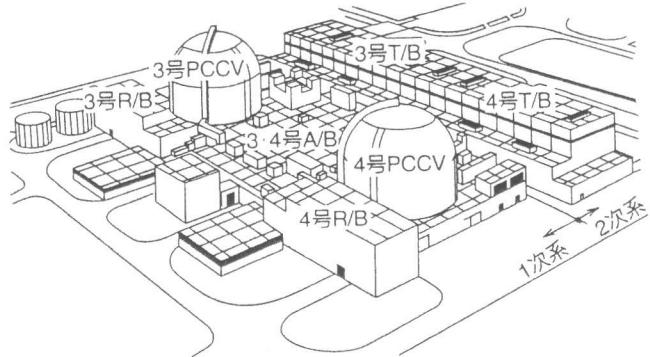


図-1 発電所内の建屋配置図

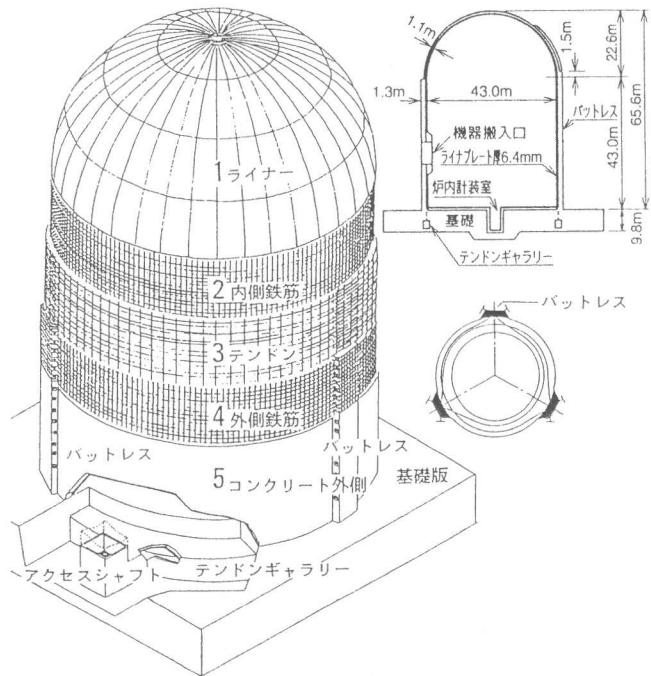


図-2 PCCV構造概要図

る。このため、材料の選定からコンクリートの仕様決定にかけては事前に十分な調査・検討を行った。コンクリートの仕様は最大寸法の大きい粗骨材の採用や低スランプを基本とし、単位水量の少ない密実なコンクリートを得ることに重点を置いて品質の向上を目指した。表-3にPCCVコンクリートの仕様を、表-4に基本調合を示す。コンクリート調合は、室内試験練りによって基本物性を把握した後、実機ミキサを用いた試験施工を行って決定した。

4. コンクリートの製造設備

4.1 製造設備の概要

計画総量60万m³（3・4号機合計）もの膨大なコンクリートの品質確保と安定供給を図るため、発電所構内に専用の生コンクリート製造プラントを設置した[4]、[5]。表-5にプラントの設備概要を示す。プラントの主な特徴は、①練りませ設備に、コンクリートの均

質性と生産性が十分確保できるとともに、単位水量の低減効果が期待できる階層式ミキサ（上段モルタル・下段コンクリートミキサ）を採用したこと、②コンクリートをプレクーリングするためのアイスプラント（冷水・製氷設備）を搭載したこと、③海砂の除塩設備（水洗い）と、除塩後の表面水安定化を図るため、洗い砂を必要期間貯溜できる上屋付き水切り建屋（水切ヤード：下部排水方式）を設置したことなどである。

4.2 プレクーリング設備

プレクーリングについては、暑中の打込み温度が25°C以下（全構造体）、冷却コンクリート量が約20万m³、1回の最大打設量が1600m³という計画条件のもとで温度管理の確実性・冷却材の生産性等を検討し、練りませ水に冷水と氷を併用する方法を採用した。

製氷は、強制冷却した円筒型の製氷ドラム周辺に冷水を噴出し厚さ約2mmで氷結させて行われる。ドラムに付着した氷は、ドラム回転時に側面のナイフエッジで搔き落とされ、フレーク状（写真-1）となって製氷機下の貯氷庫にストックされるようになっている。プレクーリング設備はミキシングプラントと一体配置されており、クーリング制御はコントロール室からの遠隔操作により行っている。コントロール室では、材料ビンおよびミキサ直下に設置した温度センサーによって材料温度や練り上がり温度の管理ができるようになっている。

5. PCCVのコンクリート工事

5.1 施工概要

PCCVは円筒部15リフト、ドーム部11リフトに分割してコンクリートを打設した。円筒部1

表-2 温度ひびわれ対策

1) 中庸熱ポルトランドセメントの採用
2) 混和材としてフライアッシュの使用
3) AE減水剤遅延型の使用
4) 低スランプの採用
5) 強度管理材齢の長期化
6) 打設ブロック割りの計画
7) セメント受入れ温度の制限（50°C以下）
8) 練りませ水の冷却
9) フレークアイスによるプレークリング

表-3 コンクリートの仕様

設計基準強度 (kgf/cm ²)	管理材齢 (日)	スランプ (cm) 10 (一部流動化後15)	空気量 (%)	乾燥単位容積質量 (t/m ³)	コンクリート温度 (°C) 20以下 (夏期目標)	セメントの種類 中庸熱セメント	混和材 フライアッシュ	粗骨材の 最大寸法 (mm)
420	91		4	2.18				25

表-4 コンクリートの基本調合

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)					(注) *1: フライアッシュを内割りで20%ブレミックス *2: 海砂(80%)+山砂(20%) *3: 上段岩野産 ($\rho=2.88$), 下段石原産 ($\rho=2.78$) 期間による使い分け
		セメント*1	水	細骨材*2	粗骨材*3	AE減水剤	
43	43.0	351	151	758	1135 1095	0.878	

リフト当たりの打設量は約 550m^3 (リフト高さ約3m)、ドーム部については約 300m^3 である。打込みにあたっては円周を4工区に分けて配管し(ポンプ車1台当たり 90° ピッチの分担)、打込みには全体を層状かつ均等に打上げるためのゲートバルブを使用した。ゲートバルブは円周壁に沿わせた配管に3mピッチで配置し、直下には自由落下高さを抑えるためのシートを設けた(写真-2)。ゲートバルブの開閉は側圧や打継ぎ時間間隔等を考慮して計画的に行った。

5.2 プレクーリング実績

円筒部およびドーム部合計26リフトのうち、平均気温が 18°C を超える5月から10月初旬の間に打設した11リフトのコンクリートについてプレクーリングを実施した。なお、その際のコンクリート温度は荷卸時で 20°C 以下(PCCV以外は 25°C 以下)を目標とし、 $30\sim70\text{kg/m}^3$ のフレークアイスを練りませ水の一部に使用した。表-6に3号機で行ったプレクーリングの実績を示す。PCCVに使用したフレークアイスの量は330t、冷却コンクリート量は 5500m^3 であり、PCCV総打設量の48%に相当する。

6. コンクリートの品質管理

6.1 品質管理結果

コンクリート品質管理はJASS5N(日本建築学会:原子力発電所施設における鉄筋コンクリート工事標準仕様書)に準拠して行った。品質管理結果は図-3に示すとおりであり、所要の品質確保はもとよりバラツキの少ないコンクリートを施工できた。なお、遮へいコンクリートの比重管理は、打込み直前のコンクリートの単位容積質量によって行った。コンクリートの単位容積質量管理値は、事前に確認試験を行い、乾燥単位容積質量が所要値(2.18t/m^3)以下とならないよう下限

表-5 コンクリートプラントの設備概要

設備名	仕 様
ミキシングブ ラント設備	デュアル式ミキサ: 公称能力 $110\text{m}^3/\text{hr} \times 2$ 基 (パン型階層式 2m^3 : 上段モルタル、下段コンクリート)
骨材輸送設備	ベルトコンベア: 総延長 370m
骨材貯蔵設備	コルゲートサイロ: 有効貯蔵量 $800\text{m}^3 \times 8$ 基 (φ: 11m × h: 12.1m)
冷水供給設備	水冷式チーリングユニット: 冷却能力 283000kca l/hr , 冷水量 950l/min
製氷設備	製氷機: $25\text{t/day} \times 2$ 基, 貯氷庫: $70\text{t} \times 1$ 基
セメント貯蔵 設備	セメントサイロ: $300\text{t} \times 2$ 基, $200\text{t} \times 4$ 基 ペストンサイロ: $60\text{t} \times 1$ 基
混合剤貯蔵設 備	AE減水剤遅延型: $8000\text{l} \times 2$ 基 補助AE剤: $4000\text{l} \times 2$ 基
生コン濁水処理 設備	処理能力 10t/hr (完全クローズドシステム)
海砂除塩設備	除塩能力 $60\text{m}^3/\text{hr}$
海砂洗浄排水 処理設備	処理能力 $60\text{m}^3/\text{hr}$
海砂輸送設備	水切ヤード: $800\text{m}^3 \times 2$ 区画 ベルトコンベア: 総延長 90m



写真-1 フレークアイス

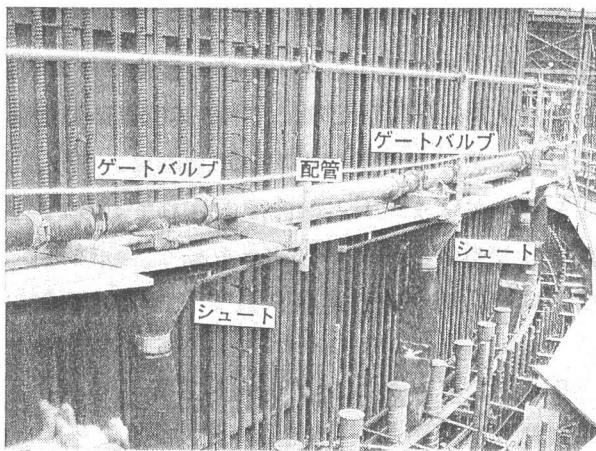


写真-2 ゲートバルブの配置状況

値を設定した。

コンクリート温度については図-4に示すとおりであり、外気温が30°Cを超えるような暑中の打設にもかかわらず、プレクーリングの実施によって目標とする温度を満足できた。図-5には材料・練り上がりコンクリート温度の計測等、クーリング期間中の温度管理の一例を示す。同図に併記した推定コンクリート温度(θ)とは、JASS5提案(14.2)式をベースに、フレークアイスの融解熱(79.6kcal)・重量(Wi)、および練りませ時に発生する機械熱(978.89kcal: プラント電動機や練りませ時間をもとに算出)を考慮した式(1)から求めている[4]。これより、コンクリート温度をある程度の精度で近似(推定)できることがわかる。

$$\theta = \frac{0.2\theta cW_c + 0.2\theta aW_a + \theta mW_m - 79.6W_i + 978.89}{0.2W_c + 0.2W_a + W_m + W_i} \quad (\text{°C}) \quad (1)$$

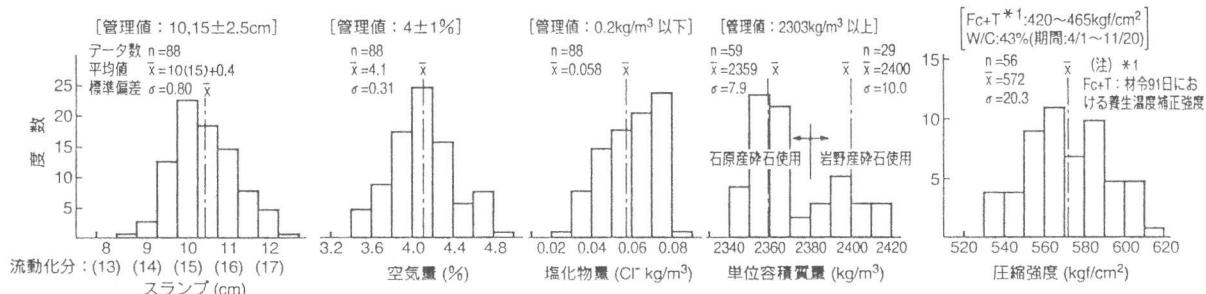


図-3 PCCVコンクリートの品質管理結果

6.2 温度応力測定結果

コンクリート打込み後の構造体の温度および温度応力の実測例として、図-6にPCCV円筒部1リフトの断面中心部における温度実測結果を、図-7に有効応力計による応力実測結果を示す。また図中には、シミュレーションによる温度および応力解析値と、プレクーリングを実施しなかった場合の解析値を併せてプロットした。なお、解析はPCCVの基本形状を考慮した軸対称回転体とし、2次元有限要素法を用いた。また、境界モデルや熱・力学的特性値等の解析条件については既往の研究をもとに仮定した[6]、[7]。コンクリート打設後の温度分布は非定常熱伝導方程式を時間ステップ法で解析し、温度応力は弾性係数の経時変化および若材齢クリープを考慮した応力の重合させによる時間区分増分法を用いている。

この結果から、実測値と解析値は比較的よく対応していることがわかる。さらに「プレクーリ

表-6 プレクーリングの実績(3号機)

対象	全コンクリート数量 (m³)	冷却コンクリート数量 (m³)	冷却数量の割合 (%)	フレークアイス使用量	
				全使用量 (t)	平均使用量 (kg/m³)
PCCV	1万1500	5500	48	330	60
全建屋	33万8600	11万900	33	4820	43

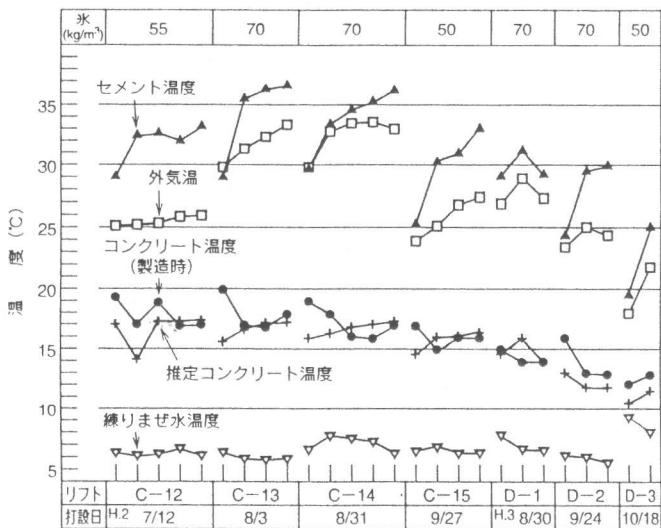


図-5 コンクリート温度の実測値と推定値
(円筒部12~15・ドーム部1~3リフト)

ング無し」との対比から、プレクーリングを実施することによってコンクリート内部温度の上昇を抑えることができ、かつ、発生する温度応力を 10kgf/cm^2 程度低減できることがわかり、プレクーリングの効果が顕著に認められた。なお、打設後の目視観察ではひびわれの発生は認められていない。

7.まとめ

玄海3・4号機の建設工事にあたっては、構造物の健全性を保証するための事前検討を繰り返し行ったうえで、全構造体のコンクリートを対象にしたプレクーリング計画等、とくに温度ひびわれ対策に重点を置いた。また、施工時には実構造体の温度応力を測定し、フレークアイスによるプレクーリングが温度ひびわれ対策として極めて有効であることを定量的に確認できた。

品質管理面の評価としては、当初要求された条件を十分満足するとともに、バラツキの少ないコンクリートを施工できることから、品質の向上・安定化を目指した諸検討が確実に反映されたものと考えている。

【参考文献】

- 1) 井上勝弘ほか：冬期における高強度マスコンクリートの積算養生温度と強度発現、第8回コンクリート工学年次講演会論文集、pp. 321~324、1986
- 2) 井上勝弘ほか：夏期における高強度マスコンクリートの強度発現とプレクーリング効果、第8回コンクリート工学年次講演会論文集、pp. 325~328、1986
- 3) 御手洗泰文ほか：PCCV用高強度マスコンクリートの品質管理に関する実験的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集（東北）、pp. 889~890、1991. 9
- 4) 井上勝弘ほか：フレークアイスによるコンクリートのプレクーリング、セメント・コンクリート、No.505、pp. 8~19、1989. 3
- 5) 安達 稔ほか：原子力発電所設備のコンクリート、コンクリート工学、Vol. 31, No. 3, pp. 61~66、1993. 3
- 6) 川口 徹ほか：マスコンクリートの温度応力評価に及ぼす材料特性の数値モデル化の影響、第7回コンクリート工学年次講演会論文集、pp. 29~32、1985
- 7) 川口 徹ほか：高強度マスコンクリートの部材強度特性に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集（中国）、pp. 267~268、1990. 10

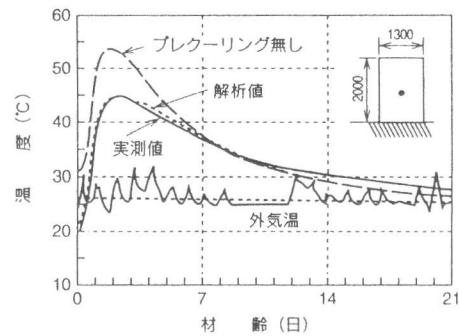


図-6 円筒部1リフト中心部の温度履歴

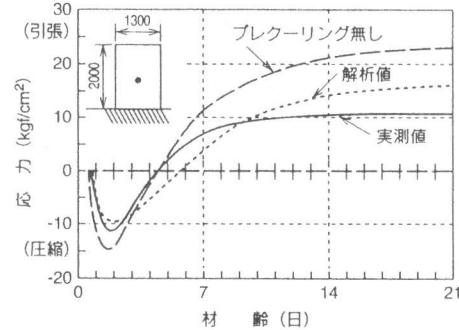


図-7 円筒部1リフト中心部の応力履歴