

V-199

各種クーリング法による温度ひびわれ対策の効果

大阪ガス（株） 技術部 正会員 北村 八朗
 （株）大林組 土木技術部 正会員 ○若松 岳
 （株）大林組 土木技術部 佐藤 哲司

1. はじめに 大阪ガス姫路製造所内に建設された、PC製 LNG防液堤は水密性と高耐久性が求められることから、温度ひびわれ防止対策として、材料や配合面での対策の他に、暑中コンクリートには液体室素を用いたプレクーリング、その他の時期には、PCテンドン用の円周シースを利用したパイプクーリング、さらに補助的に、鋼製型枠面への散水を実施し、温度ひびわれを防止した。本報告は、この施工結果のシミュレーション解析を行ない、クーリング効果の定量的把握を行なうものである。

2. 工事概要 防液堤の形状は、高さが約14m、内径91.4mの円筒形構造物である。耐力壁となる躯体コンクリートの全高を図-1に示すように、6分割して施工し、表-1に示すクーリングを実施した。壁厚は、第1～5ロットが0.7m、第6ロットが0.7～1.4mである。この躯体コンクリート（設計基準強度400kgf/cm²）は、中庸熱ポルトランドセメントを使用し強度管理材令を91日とする、流動化コンクリートとする等、配合上のひびわれ対策を行なっている。表-2に配合を示す。

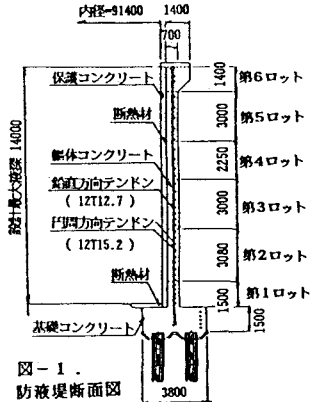


表-1 各ロットのクーリング対策

躯体 ロット	打設月	クーリング工法		
		プレ	パイプ	散水
1~4	9,4~6	—	○	○
5~6	7~8	○	—	○

表-2 コンクリートの配合

Gmax (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (kg)	単位量 (kg/m ³)						Adm. AE減水剤	Pl. 流動化剤
					W	C	S	G	Adm.	Pl.		
40	6.5 12.0	4.5 4.5	42	36	157	374	638	1151	0.94	3.0		

3. 解析概要 3.1 解析手法およびモデル

2次元軸対称モデルのFEMによる温度応力解析を行った。解析モデルは、液体室素によるプレクーリングを行なった第5、6ロットと、パイプクーリングを行なった第3ロットの2ケースとし、各ロットより下部は既設ロットとして基礎コンクリートまでをモデル化した。パイプクーリングの解析では、内径8cm、間隔30～39cmを、熱対流境界とした。

3.2 検討ケース

各クーリング工法の組合せによる検討ケースを表-3に示す。

表-3 検討ケース

解析 Case	クーリング対策			
	ロット	プレ	パイプ	散水
(1)	5	○	—	○
(2)	6	○	—	—
(3)	6	—	○	—
(4)	6	—	○	○
(5)	3	—	○	○
(6)	3	—	○	—
(7)	3	—	—	—

3.3 解析定数

解析定数を表-4に示す。発熱関数は、各ロット打設時のコンクリート簡易断熱温度上昇試験（1m³立方体、10cm厚の発泡スチロール養生）および、同一断面厚のダミー壁（長さ1.5m）のシミュレーション解析結果から求めた。圧縮強度、弾性係数は、試験結果の回帰式によった。どちらも、積算温度に基く有効材令を考慮した。

4. シミュレーション解析結果 Case(1),(5)の温度応力シミュレーション解析結果を図-2に示す。第6ロットのハンチ部を除き、各ロットとも解析値と実測値は良く一致している。

エンゲットの熱定数	比熱: 0.22 kgf/cm ² 、単位体積重量: 2320 kg/m ³ 、 熱伝導率: 2.0 kcal/m·hr、熱膨張係数: 10×10 ⁻⁶ 1/°C
	発熱関数: T °C, t 日 打設温度 (第5ロット): T= 37.6 [1-e ^{-2.20(t-0.21)}]...28.3°C " T= 36.4 [1-e ^{-1.55(t-0.25)}]...20.6°C (第6ロット): T= 40.2 [1-e ^{-1.70(t-0.29)}]...28.6°C " T= 39.3 [1-e ^{-1.26(t-0.25)}]...19.5°C (第3ロット): T= 30.6 [1-e ^{-1.75(t-0.42)}]...21.0°C
エンゲットの強度定数	圧縮強度: f _c kgf/cm ² , M: 積算温度 °C·hr (第5ロット): f _c = 108 2.8 M=636 kgf/cm ² (第6ロット): f _c = 82 2.8 M=442 kgf/cm ² (第3ロット): f _c = 113 2.8 M=739 kgf/cm ²
	引張強度: f _t = 1.4 f _c ^{1/2} kgf/cm ² 弾性係数: E=4.37×10 ⁴ f _c ^{0.33} kgf/cm ² クリープ係数: CEB-FIP code、ボアソン比: 0.167
境界条件	熱伝達率 (鋼製型枠): 12...無養生時、40...型枠散水時 (木製型枠): 4...無養生時、7...天端散水時 kcal/m ² (エンゲット面): 12...無養生時、40...天端散水時 °C (シース): 250...通水時
	杭拘束 (φ711,t=16): 1.6×10 ⁵ kgf/cm ² 木 水平バネ定数

5. ケーススタディ解析結果

表-5 および図-3, 4に、解析結果を示す。なお、第5、

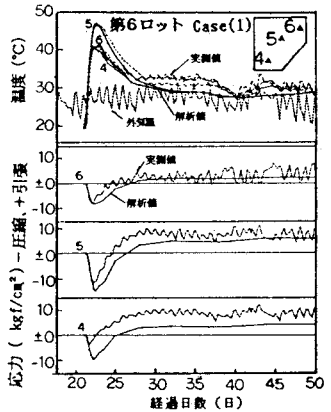
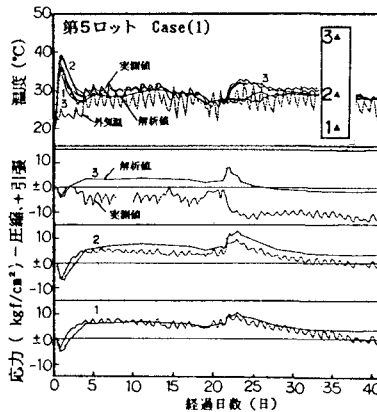
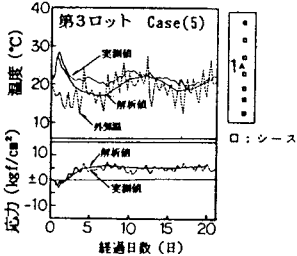


図-2 温度応力シミュレーション解析結果

第6ロットの冷却前のコンク

リート温度の最大値は、各々30℃、32℃であり、Case(2),(4)の関係から、最小温度ひびわれ指数は、各々1.37,1.27 となった。

5.1 プレクーリングの効果 Case(2),(4)の関係から、表-6に示すように、冷却量10℃当り、最高温度が8℃、最大引張応力が7kgf/cm²低減し、最小温度ひびわれ指数が1.0~1.2 増加することが分った（増加率=82~75%）。型枠散水を、プレクーリングと併用した場合、最高温度は低減するが、断面内の温度差が増加するために、最大引張応力や最小ひびわれ指数への影響は小さい。

表-6 プレクーリングの効果（10℃冷却に換算）

項目	打設温度℃	最高温度℃	最大引張応力kgf/cm ²	最小温度ひびわれ指数
5	変動量 -10	-8.2	-6.5	+1.2
対策前	28.1	47.7	15.3	1.6
6	変動量 -10	-7.5	-6.9	+1.0
対策前	28.6	55.5	17.0	1.8

表-5 各クーリング対策による解析結果

クーリング対策 (解析 Case)	打設温度 ℃	最高温度 ℃		最大引張 応力 kgf/cm ²	最小温度 ひびわれ 指数
		中央	約 10cm		
第5 ロット	(1) プレ+散水	20.6	38.6 33.1	10.3	2.48
	(2) プレ		41.5 37.0	10.4	2.55
	(3) 散水		44.2 36.0	15.2	1.57
	(4) 無対策		47.7 42.0	15.3	1.61
	無対策	30.0	=冷却前の最大値		1.37
第6 ロット	(1) プレ+散水	19.5	46.7 37.5	11.0	2.52
	(2) プレ		48.7 40.7	10.7	2.50
	(3) 散水		53.3 38.5	17.4	1.53
	(4) 無対策		55.5 45.1	17.0	1.61
	無対策	32.0	=冷却前の最大値		1.27
第3 ロット	(5) バイブ+散水		27.4 23.5	5.8	2.81
	(6) バイブ	21.0	28.6 26.5	5.7	2.30
	(7) 無対策		36.0 31.8	10.7	1.73

*パイブ近傍：通水時のシースから30cm

○—○ 5日 散水無し、△—△ 6日 散水無し
●—● 5日 散水有り、▲—▲ 6日 散水有り

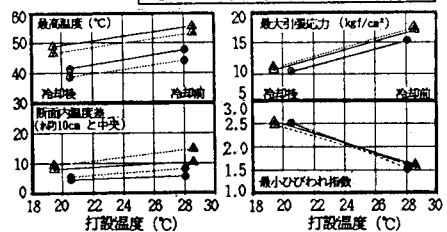


図-3 プレクーリングの解析結果（Case(1)~(4)）

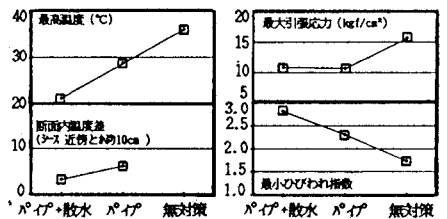


図-4 バイブクーリングの解析結果（Case(5)~(7)）

6. まとめ 本解析により、ひびわれ対策上のクーリング効果として、次のことが分かった。①. 10℃のプレクーリングにより、最小温度ひびわれ指数が70%程度改善する。②. 内径8cm, 間隔35cm程度のシースを利用したパイブクーリングは、8℃のプレクーリングと同等である。液体素寒を用いたプレクーリングは、このように改善効果が大きく、さらに大幅な冷却が可能であるとともに、自由に冷却量を設定できるため、品質および経済的にも非常に優れたクーリング工法であることが認められた。