

## PC 貯油槽のひび割れ抑制対策

くれよしうらねんりょう  
— 呉吉浦燃料タンク —

西日本支社	広島支店	岩井利裕
技術本部	開発メンテナンス部	阪上徳行
西日本支社	広島支店	高取広
西日本支社	広島支店	坂田秀生

**概要**：呉吉浦燃料タンクは、内径 84.900m、壁高 9.486m の底版・側壁・屋根版を有する PC 構造の 40,000kl の貯油タンクである。施工に際して、セメントの水和熱による温度ひび割れの発生が懸念されたため、種々の検討および対策を行った。

**Key Words**：貯油タンク，温度ひび割れ，仮緊張，摩擦係数

## 1. はじめに

呉吉浦燃料タンクは、広島県呉市に位置する容量 40,000kl の地中式燃料タンクである。構造寸法は、内径 84.900m、壁高 9.486m であり、厚さ 450～800mm の底版、350～750mm の側壁、300～500mm の屋根版からなり、それらは全て PC 構造である。施工に際して、

- ・各部材は PC 構造であることから富配合のコンクリートを使用すること
- ・底版はその下の均しコンクリートから、側壁は底版あるいは旧リフトの側壁から拘束を受けること
- ・底版の施工が夏季にわたること

などの理由から、セメントの水和熱による温度ひび割れの発生が懸念され、マスコンクリートに準じた対策が必要であると考えられた。そこで、施工に先立って温度応力解析を実施し、種々のひび割れ抑制対策を行った。本文では、そのひび割れ抑制対策について報告する。

## 2. 工事概要

表-1 に本タンクの工事概要および主要緒元、図-1 に本タンクの平面図および断面図を示す。本タンクは、既設の貯油タンクの一部を撤去し、その中に新しく貯油タンクを構築するものである。

表-1 工事概要および主要緒元

工事名	呉(17)吉浦燃料施設整備土木工事	各部の緒元	底版		側壁	
工事場所	広島県呉市	構造形式	円形スラブ (PC)		下端固定円筒形シェル (PC)	
施主	中国四国防衛局	部材寸法	版厚 [m]	0.450 ~ 0.800	壁厚 [m]	0.350 ~ 0.750
構造種別	地中式PC製円筒形貯油槽		直径 [m]	85.612	壁高 [m]	9.486
容量	40000 [kL]	コンクリート	設計基準強度 36 [N/mm <sup>2</sup> ]		設計基準強度 36 [N/mm <sup>2</sup> ]	
内径	84.900 [m]	PC鋼材	縦方向・横方向		円周方向	鉛直方向
外径	85.612 [m]		記号	SWPR7BL		SWPR19L
有効深さ	7.187 [m]	構成線径	12S12.7		①1S28.6	φ32
高さ(中心)	10.342 [m]				②1S21.8	



岩井利裕



阪上徳行



高取広



坂田秀生

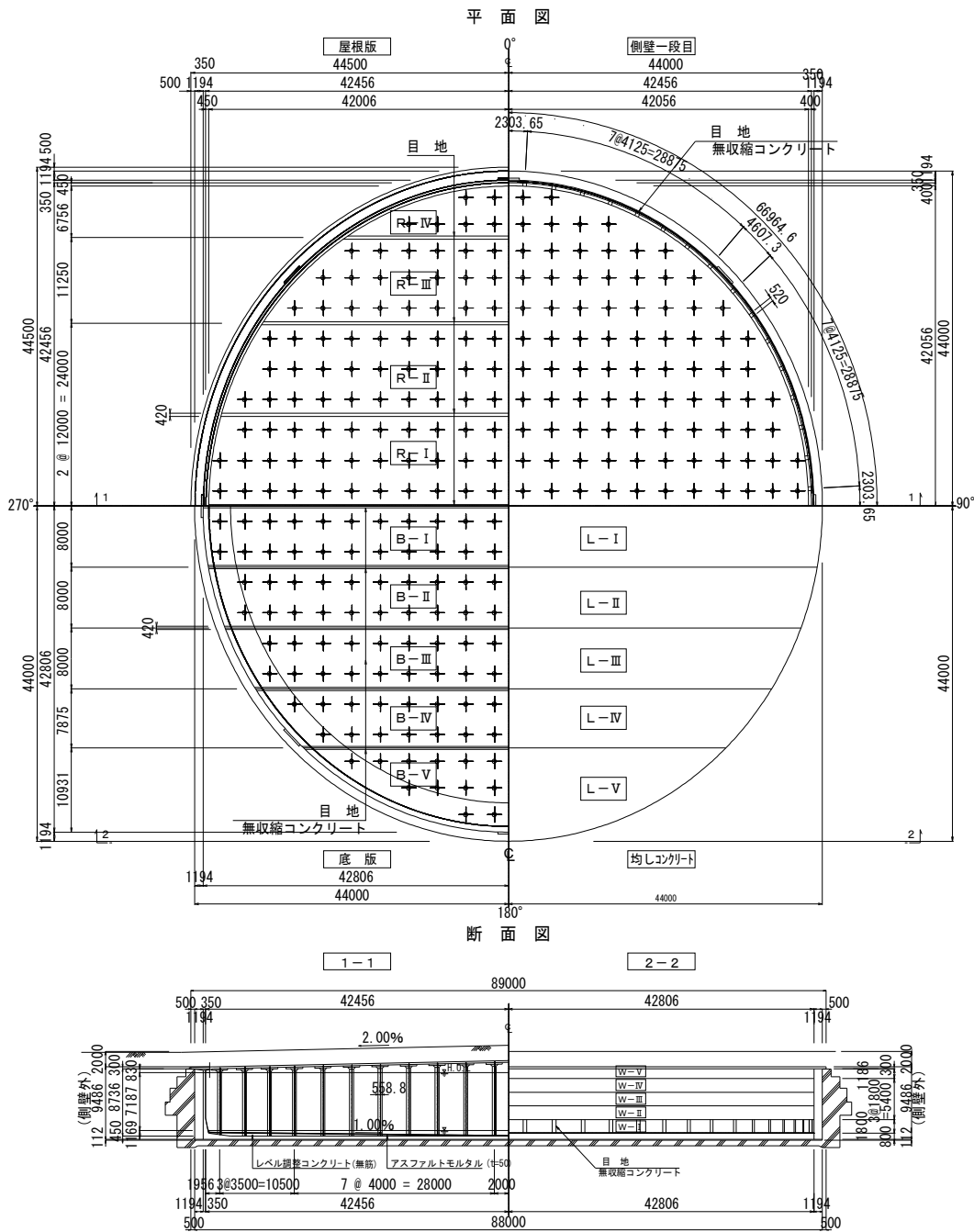


図-1 平面図および断面図

### 3. 底版のひび割れ抑制対策

#### 3.1 温度応力解析

##### 3.1.1 解析条件

底版のひび割れ抑制対策の検討に先立ち、温度応力解析として三次元 FEM 解析を行った。解析プログラムには「ASTEAMACS」(計算力学研究センター製)を使用した。図-2に底版の解析モデルを示す。発注図書では、底版は8分割であったが、生コンクリートの供給量の制限により、それを10分割に変更している。施工は、既設コンクリートの上に厚さ100mm程度の均しコンクリートを打設し、その

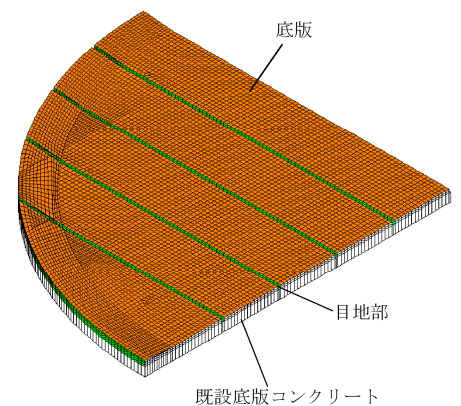


図-2 底版の解析モデル

上にポリエチレンフィルムを3枚敷設し、底版コンクリートを打設する。ブロック間には幅420mmの目地を設け、10ブロックの施工完了後、目地部に無収縮コンクリートを打設し底版を完成させる。

表-2にコンクリートの材料および配合を示す。混和剤には高性能AE減水剤(遅延形I種)を使用し、底版目地部については収縮補償を目的とした膨張材を添加することとした。

表-2 コンクリートの材料および配合

施工箇所	セメントの種類	混和剤の種類	呼び強度	単位セメント(結合材)量	水セメント(結合材)比	細骨材率
底版	普通ポルチメント*	高性能AE減水剤遅延形I種	36[N/mm <sup>2</sup> ]	398[kg/m <sup>3</sup> ]	42.0[%]	44.4[%]
底版目地	普通ポルチメント*+膨張材	高性能AE減水剤遅延形I種	36[N/mm <sup>2</sup> ]	398[kg/m <sup>3</sup> ]	42.0[%]	44.4[%]

外気温およびコンクリートの打ち込み温度は、それぞれ、気象庁発表の呉地域の月別平均気温、生コンクリート工場の出荷実績の過去3年間の平均温度とした。表-3に月別平均気温、表-4に月別平均コンクリート温度を示す。

表-3 月別平均気温

月					単位[°C]				
月	2003年	2004年	2005年	平均	月	2003年	2004年	2005年	平均
1月	5.1	5.4	6.0	5.5	7月	24.4	28.3	26.4	26.4
2月	6.6	7.7	5.3	6.5	8月	26.8	27.7	27.4	27.3
3月	8.4	9.9	8.5	8.9	9月	24.9	24.7	25.4	25.0
4月	14.9	15.4	15.3	15.2	10月	18.0	18.7	19.8	18.8
5月	19.0	19.6	18.8	19.1	11月	15.1	14.5	13.4	14.3
6月	21.9	23.2	23.7	22.9	12月	8.8	9.8	5.3	8.0

表-4 月別平均コンクリート温度

月								単位[°C]							
月	2003年		2004年		2005年		平均	月	2003年		2004年		2005年		平均
	最高	最低	最高	最低	最高	最低			最高	最低	最高	最低			
1月	12.0	8.0	11.0	6.0	13.0	7.0	9.5	7月	31.0	25.0	33.0	28.0	30.0	(22.0)	29.4
2月	13.0	6.0	14.0	8.0	14.0	8.0	10.5	8月	32.0	27.0	34.0	29.0	32.0	27.0	30.2
3月	16.0	8.0	17.0	9.0	16.0	8.0	12.3	9月	31.0	24.0	32.0	24.0	32.0	24.0	27.8
4月	25.0	13.0	23.0	14.0	23.0	14.0	18.7	10月	29.0	20.0	26.0	17.0	26.0	16.0	22.3
5月	29.0	21.0	28.0	21.0	27.0	22.0	24.7	11月	24.0	11.0	21.0	15.0	21.0	13.0	17.5
6月	29.0	23.0	29.0	25.0	29.0	23.0	26.3	12月	16.0	8.0	17.0	10.0	15.0	8.0	12.3

( )内は除外した。

表-5に底版施工時期、図-3に底版分割図を示す。

表-5 底版施工時期

打設箇所	打設時期	養生期間	
1回目	B-V	06/ 8/22	7日
2回目	B-IV	8/29	7日
3回目	B-III	9/ 5	7日
4回目	B-II	9/12	7日
5回目	B-I	9/20	7日
6回目	B-I'	10/ 2	7日
7回目	B-II'	10/10	7日
8回目	B-III'	10/19	7日
9回目	B-IV'	10/26	7日
10回目	B-V'	11/ 2	7日
目地コンクリート	11/ 7	7日	

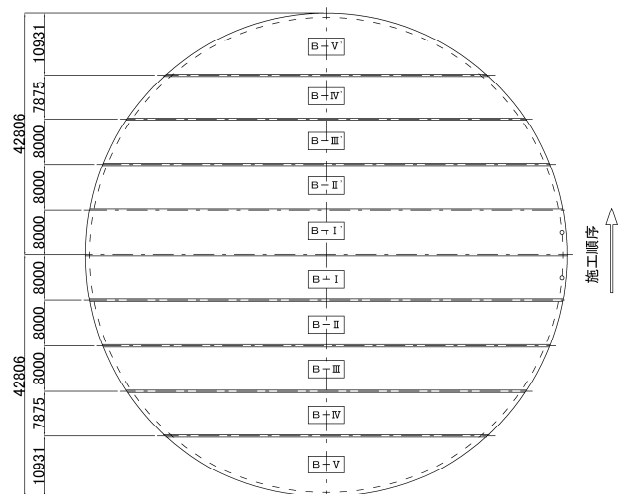


図-3 底版分割図

表-6, 表-7にコンクリートの力学的特性, 熱特性, 表-8に熱伝達率を示す。

表-6 コンクリートの力学的特性

項目	単位	値/計算式
密度	kg/m <sup>3</sup>	2400
ポアソン比	-----	0.1667
材齢t日の圧縮強度*1	N/mm <sup>2</sup>	$f'c(t) = t / (a + bt) \times d(i) \times f'c(28)$ a: 定数 4.5 (普通セメント), b: 定数 0.95 (普通セメント) d(i): 定数 設計基準強度の基準材齢, f'c(28): 材齢28日の圧縮強度 36[N/mm <sup>2</sup> ]
材齢t日の引張強度*1	N/mm <sup>2</sup>	$f_t(t) = c \times \sqrt{f'c(t)}$ c: 定数 0.44
材齢t日の有効ヤング係数 *1	N/mm <sup>2</sup>	$E(\phi) = \phi(t) \times 4700 \times \sqrt{f'c(t)}$ (有効弾性係数法) $\phi(t)$ : ヤング係数の補正值 (3日まで0.733, 5日以上1.000, 3~5日は直線補間)
乾燥収縮 *2	-----	$\epsilon'cs(t, t_o) = [1 - \{0.108(t - t_o)^{0.56}\}] \cdot \epsilon'_{sh}$

\*1 コンクリート標準示方書 施工編 2002年制定

\*2 コンクリート標準示方書 構造性能照査編 2002年制定

表-7 コンクリートの熱特性

項目	単位	値/計算式
比熱 *1	kJ/kg°C	1.15
熱伝導率 *1	W/m°C	2.7
断熱温度上昇量 *2	-----	$Q(t) = K \{1 - \exp(-\alpha t)\}$
線膨張係数 *3	-----	膨張材なし: $10 \times 10^{-6}$ , 膨張材添加: $7 \times 10^{-6}$

\*1 コンクリート標準示方書 施工編 2002年制定

\*2 終局断熱温度上昇量  $K = aC + b$  (C: 単位セメント量)

温度上昇速度  $\alpha = dC + e$  (C: 単位セメント量)

a, b, d, eは定数であり, セメントの種類, 打ち込み温度により変化するため, 使用するセメント会社の技術資料を適用した。

セメント種類	K <sub>20</sub> = a × C + b		α <sub>20</sub> = d × C + e	
	a	b	d(×10 <sup>-5</sup> )	e
N	0.0935	21.6	4.09	-0.3733
M	0.0611	26.9	2.58	-0.2831
L5	0.0643	22.4	2.75	-0.4129
L	0.0606	22.1	1.20	-0.0806

C: 単位セメント量(kg/m<sup>3</sup>)

\*3 膨張材添加コンクリートは, 膨張材メーカーの実験結果を適用した。

表-8 熱伝達率

項目	単位	場所	養生方法	値	備考
熱伝達率 *1	W/m <sup>2</sup> °C	内枠	鉄板	14	-----
			合板型枠	8	-----
		表面	湛水+養生マット	5	底版上面・側壁第5リフト上面
			湛水	8	側壁第1~4リフト上面
			露出面	13	-----

\*1 コンクリート標準示方書 施工編 2002年制定

### 3.1.2 解析結果

図-4 に温度履歴, 図-5 にひび割れ指数を示す. コンクリートの最高温度は部材端部の中段 (底版と側壁の接合部である node21244) で 69.2°C となった. 全体的に部材厚の大きい端部のコンクリート温度が高くなる傾向となった. ひび割れ発生の安全係数の参考値はコンクリート標準示方書<sup>1)</sup>の「ひび割れの発生をできるだけ制限したい場合」の 1.45 以上としたが, 最小ひび割れ指数は, 底版ハンチ部 (node31822) の 1.69 となり, 目標値以上の結果となった.

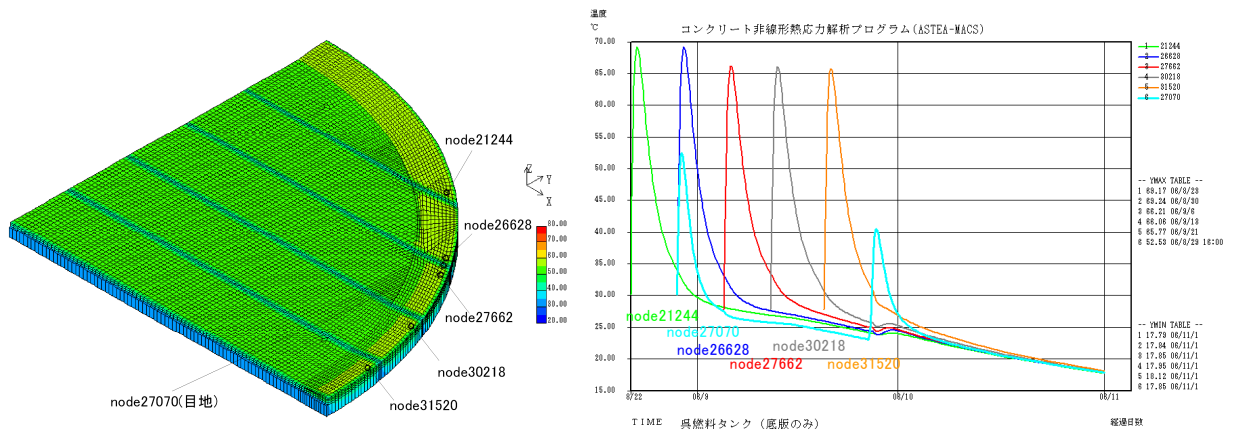


図-4 温度履歴

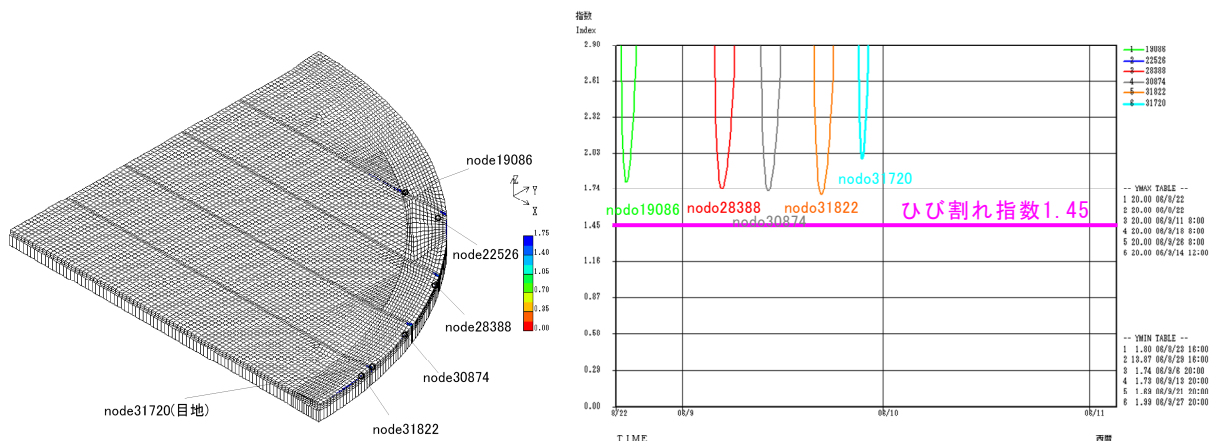


図-5 ひび割れ指数

### 3.2 底版のひび割れ抑制対策

前項の温度応力解析より得られた温度ひび割れ指数は, 目標としたひび割れ指数 1.45 以上となった. しかし, 施工が夏季にわたること, 底版コンクリート打設からプレストレスを導入するまでの期間が約 2.5 ヶ月と非常に長くなることなどの理由から以下に示すひび割れ抑制対策を実施することとした.

#### 3.2.1 仮緊張の実施

図-6 に仮緊張の施工順序を示す. コンクリートの材齢初期 (1~2 日) に仮緊張を実施し, 0.5~1.0N/mm<sup>2</sup> 程度の 1 次プレストレスを導入した. 1 次プレストレス量は, コンクリート道路橋施工便覧<sup>2)</sup>を参考とした.

ただし, 若材齢でのプレストレス導入であり, 過大なプレストレスは定着具近傍にひび割れを発生させる可能性がある. したがって, 仮緊張時に円柱供試体による圧縮強度試験を実施し, その実圧縮強度が

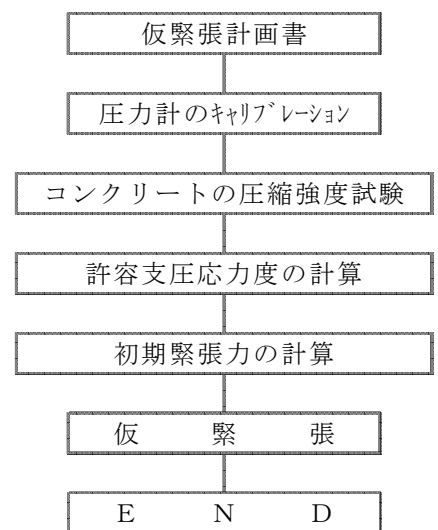


図-6 仮緊張の施工順序

ら計算した許容支圧応力度を用いて PC 鋼材の初期緊張力を決定することとした。写真-1に仮緊張実施状況を示す。



写真-1 仮緊張実施状況

### 3.2.2 コンクリート温度の計測

温度応力解析より、コンクリート温度は約 70°C まで上昇すると予想されたため、施工時に温度計測を実施し、解析の妥当性を確認することとした。計測には熱電対を使用し、B-V、B-IV、B-Iの3ブロックを対象とした。計測位置は底版と側壁の接合部とし、1ブロックあたり両端2箇所とした。また、1箇所当たりで底版の上段、中段、下段の3点で計測した。

### 3.2.3 コンクリートひずみの計測

コンクリートのひずみを確認しながら仮緊張の時期を決定すること、および、実際に導入したプレストレス量をコンクリートのひずみより算出することを目的として、底版コンクリート内にひずみゲージを埋め込み、コンクリートひずみを測定した。

計測にはダミーの鉄筋に貼り付けたひずみゲージ (2mm) を使用し、B-IV、B-Iの2ブロックを対象とした。縦方向ひずみの計測位置は、[縦方向5列]×[横方向4列]の合計20箇所とし、中央の2箇所は、上段、中段、下段の3点で計測した。一方、横方向ひずみは、部材中央付近の合計8箇所とした。なお、外気温およびひずみ計測位置を代表した5箇所のコンクリート温度も計測した。図-7に底版の計測位置図を示す。

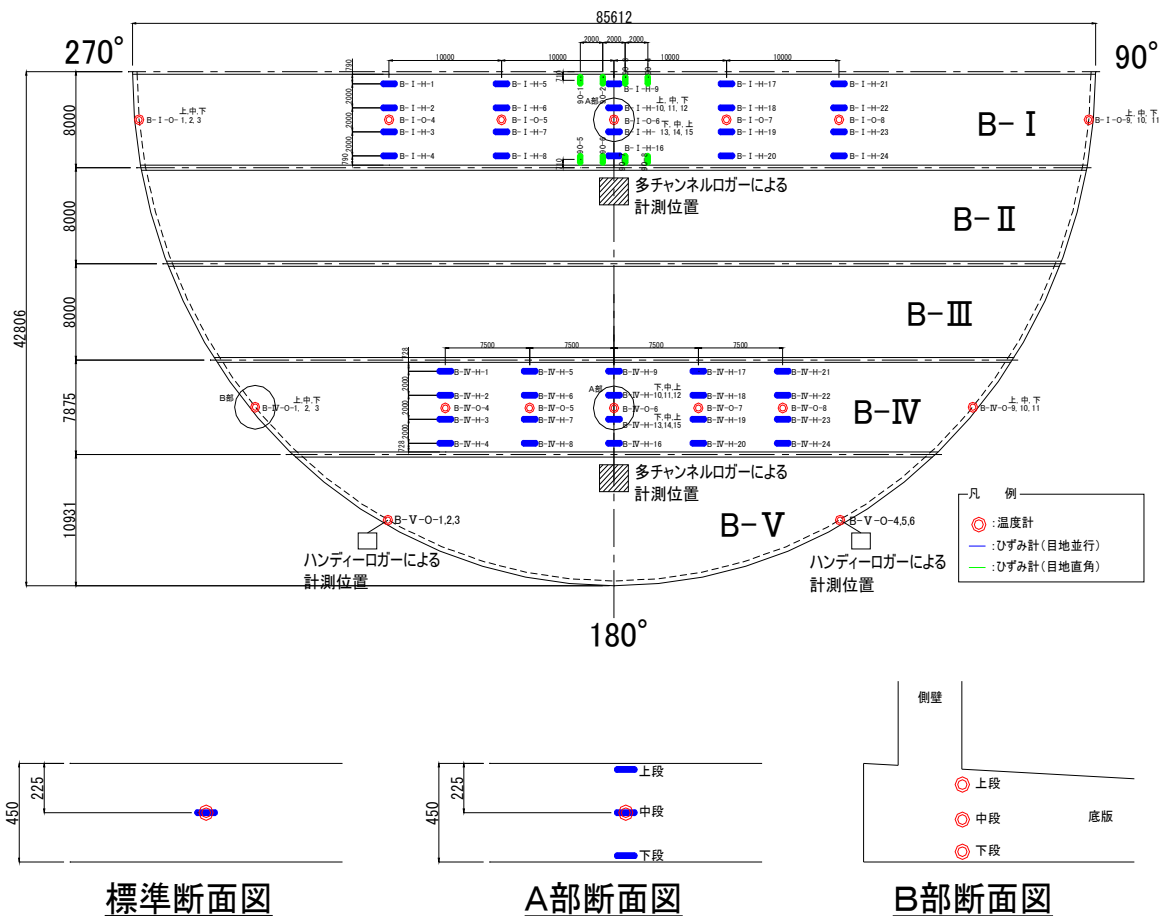


図-7 底版の計測位置図

### 3.2.4 目地部コンクリートの仮緊張の実施，膨張材の添加

目地部コンクリートは，すでに施工された底版コンクリート部に収縮拘束されることから，ひび割れが発生する可能性が高い．したがって，コンクリートに膨張材を添加し，初期収縮の低減を図るとともに，目地部に配置された PC 鋼材 1 本とその両側の 2 本について仮緊張を実施し，発生引張応力度の低減を図った．

## 3.3 底版の計測結果および考察

### 3.3.1 底版の温度

温度応力解析では，諸条件を仮定して検討しているが，実際の施工段階では相違することがあり，事前に計画された温度と大きく相違する場合には，温度ひび割れの制御が困難となる．したがって，以下において，環境条件（外気温）およびコンクリートの打ち込み温度，温度履歴の解析値と計測値の比較を行い，温度応力解析の妥当性を検証する．

表－9 に，外気温およびコンクリートの打ち込み温度を示す．表中の外気温の計測値は打設開始から材齢 7 日までの平均気温，打ち込み温度は受け入れ検査の値を示す．

表－9 外気温およびコンクリート打ち込み温度の解析値と計測値の比較

打設箇所	打設日		外気温[°C]			打ち込み温度[°C]				
	解析値	計測値	解析値	計測値	差	解析値	計測値	差		
1回目 B-V	06/ 8/22	06/ 8/25	27.3	90° 側	27.7	0	30.2	午前	29	0
				270° 側	27.4			午後	31	
				平均	27.6			平均	30	
2回目 B-IV	06/ 8/29	06/ 9/ 1	27.3	中央	25.3	-2	30.2	午前	26	-4
								午後	---	
								平均	26	
5回目 B-I	06/ 9/20	06/ 9/28	25.0	中央	21.9	-3	27.8	午前	26	-2
								午後	26	
								平均	26	

B-V の外気温の計測は，日射の影響を考慮して部材の両端（90° 側，270° 側）で実施したが，材齢 7 日間の平均気温は同等であり，計測位置による大きな差は生じなかった．また，B-V および B-I の打設は，午前から午後にわたったため，受け入れ検査は午前と午後の 2 回実施したが，それらの計測値は同程度であり，打設時刻による大きな差は生じなかった．

計測値と解析値の比較では，外気温の計測値は解析値に対して 0～3°C 低く，また，コンクリートの打ち込み温度の計測値も解析値に対して 0～4°C 低いことから，温度ひび割れの制御に有利に働いたと考えられる．

以上より，温度応力解析における外気温及びコンクリートの打ち込み温度の仮定値は妥当であったと考えられる．

### 3.3.2 コンクリートの温度履歴

表－10 に，各計測位置の最高温度を示す．表中の L は部材中央からの単位距離を示す．

表－10 外気温およびコンクリート打ち込み温度の解析値と計測値の比較

打設箇所	解析値 [°C]	90° 側 ← 計測値 [°C] → 270° 側							差 [°C]	
		計測位置 部材厚 [mm]	端部	-2L	-L	CL	L	2L		端部
1回目 B-V	69.2	上段	56.9	(中段)					55.6	-4
		中段	64.9	---	---	---	---	64.9		
		下段	55.2	平均 ----					55.1	
2回目 B-IV L=7.5[m]	69.2	上段	53.2	(中段)					53.5	-8
		中段	59.1	55.4	54.4	56.3	55.2	54.1	61.4	
		下段	52.3	平均 55.1					52.8	
5回目 B-I L=10[m]	65.8	上段	50.1	(中段)					47.0	-6
		中段	59.6	52.0	51.5	49.4	52.7	50.3	57.4	
		下段	54.0	平均 51.2					50.9	

各ブロックの部材厚および計測高さが等しい箇所では、最高温度のばらつきは最大 3°C程度と小さく、計測位置による大きな差は生じなかった。部材厚が最大となる両端部では、中段の最高温度が、上下段に対して 7~10°C高く、450mm 区間の平均値に対しては 4~8°C高い値となった。以上のように、各ブロックの最高温度地点は、解析結果と同様に、部材厚が最大となる端部の中段となり、解析値に対しては 4~8°C低い値となった。

図-8 に、部材端部の計測高さ毎のコンクリート温度および外気温の温度履歴を示す。各計測位置のコンクリート温度は材齢 0.5~1 日程度で最高温度に達し、材齢 7 日にかけて緩やかに降下した。また、材齢 3~4 日までは常に中段が高い傾向を示した。上段の温度降下域は、外気温に同行して昇降を繰り返すものの、全体としては同様な傾向を示した。

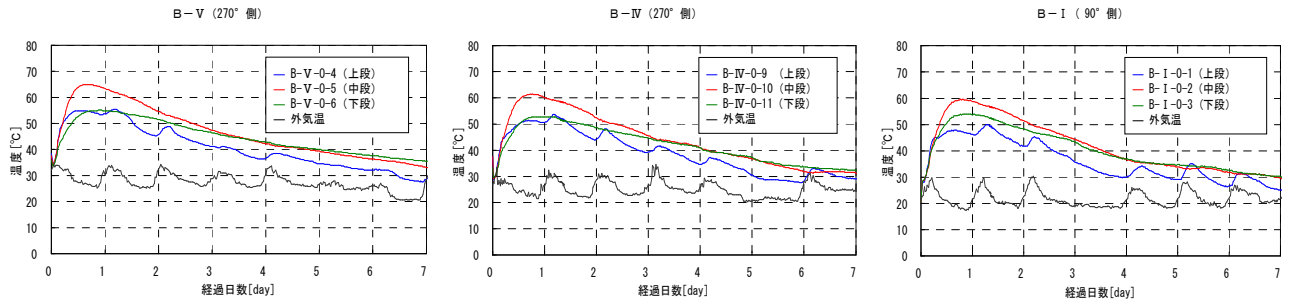


図-8 端部の計測高さ毎のコンクリート温度および外気温の温度履歴

図-9 に、両端部中央のコンクリート温度の計測値と解析値（各ブロックで最高温度となった地点）の温度履歴を示す。打設開始から最高温度までの温度上昇速度は、解析値と同等以下であり、最高温度は 4~8°C 低く抑えることができた。また、最高温度以降の温度下降速度は、解析値に対して緩やかであり、温度ひび割れの制御に有利に働いたといえる。

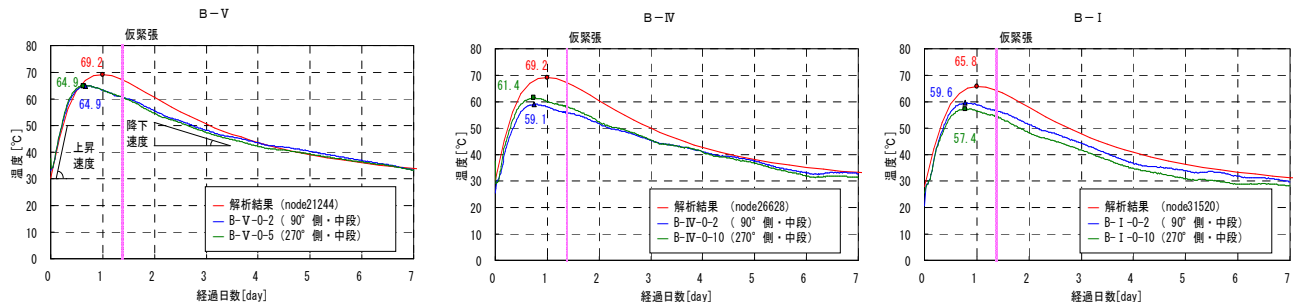


図-9 両端部中段コンクリート温度の計測値と解析値の比較

以上により、コンクリートの温度履歴は、解析値と同等以上の温度ひび割れの制御に有利な傾向を示しており、温度応力解析は妥当であったと考えられる。

### 3.3.3 コンクリートひずみ

図-10 に、コンクリートの縦方向ひずみおよび温度の履歴を示す。縦方向ひずみは、部材中央からの距離が等しい中段横方向 4 列の平均値であり、[+]は引張、[-]は圧縮を示す。

打設開始から最高温度までの温度上昇域では、縦方向ひずみの変化は圧縮方向となった。これは温度変化によるコンクリートの膨張側の体積変化が均しコンクリートから拘束されたためであると考えられる。一方、最高温度以降の温度下降域では、体積変化が縮小側へ移行するのに伴い、縦方向ひずみも引張側へ移行し、材齢約 1.5 日で圧縮ひずみが最小となった。

各ブロックの縦方向 PC 鋼材の仮緊張は、0~数 10 $\mu$  の圧縮ひずみを残した最適な時期に施工することができ、温度ひび割れの抑制に有効であったといえる。



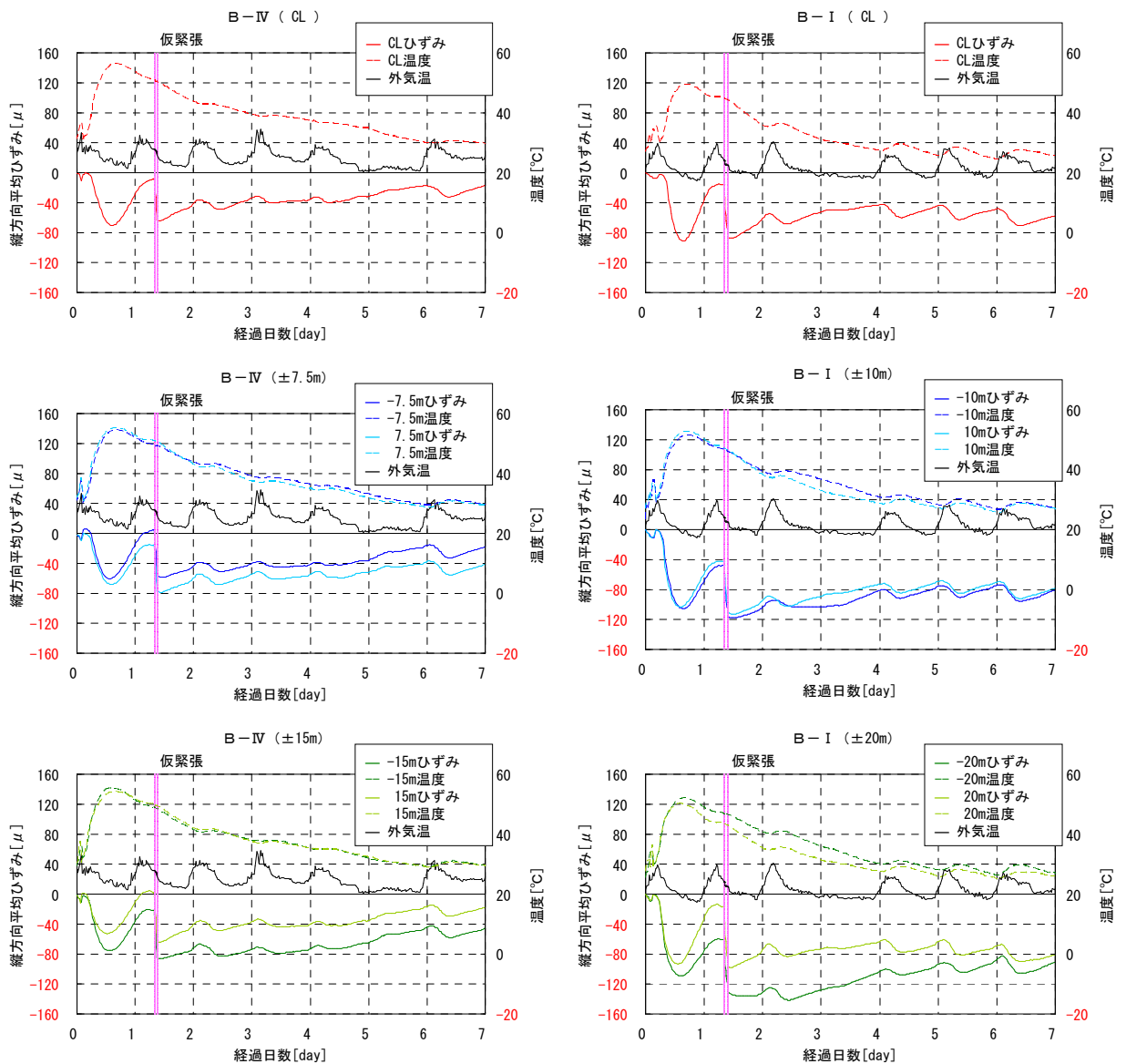


図-10 コンクリートの縦方向ひずみおよび温度の履歴

仮緊張以降の領域では、縦方向ひずみは緩やかに引張方向へ推移したが、温度降下と同行したと考えられる。図-11に、仮緊張以降の縦方向ひずみの温度補正例を示す。補正ひずみ量は、仮緊張直後から材齢13日までの縦方向ひずみとコンクリート温度の相関関係から線形補間により求めた。図より、仮緊張により導入された圧縮ひずみは、その後も安定して部材に作用していることが確認できる。

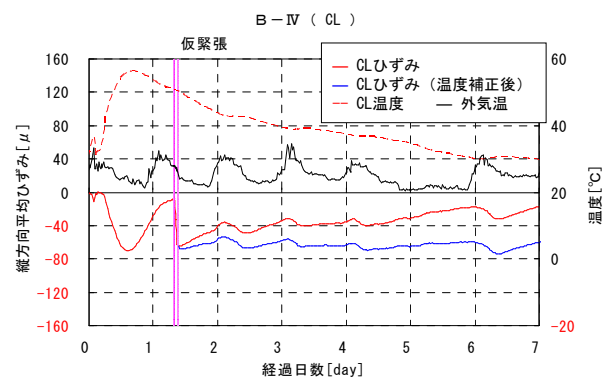


図-11 仮緊張以降のコンクリートひずみの温度補正例 B-V(CL)

### 3.3.4 仮緊張による導入プレストレス量の推定

表-11に、仮緊張時のコンクリートの圧縮強度およびヤング係数を示す。圧縮強度試験は、現場空中養生した円柱供試体(φ100×200-3体)を用いて、仮緊張直前に実施した。圧縮強度の試験値は、実材齢および設計基準強度を用いて算出した推定値を上回り、強度の発現性は良好であった。なお、ヤング係数は、圧縮強度の試験値から推定式を用いて算出した。

仮緊張により部材中央に導入されたプレストレス量は、仮緊張前後の縦方向ひずみの差に、表-1-1で求めたヤング係数の推定値を乗じて算出できる。縦方向ひずみの差には、温度変化によるコンクリートの体積変化分も含まれるが、仮緊張に要した時間が約1.5時間と短く、その間の温度変化は0.5℃程度と小さいため無視した。

表-1-2に、仮緊張による導入プレストレス量(部材中央)を示す。縦方向ひずみの「-」は圧縮を表し、導入プレストレス量の計算には横方向4列の平均値を用いた。

計算の結果、目標とした0.5~1.0N/mm<sup>2</sup>程度以上のプレストレスを導入できたと推定され、ひび割れ抑制対策として有効であったと考えられる。

表-1-1 仮緊張時のコンクリートの圧縮強度およびヤング係数

打設箇所	材 齢 [day]	圧縮強度 [N/mm <sup>2</sup> ]	ヤング係数 [N/mm <sup>2</sup> ]
2回目 B-IV	1.32	11.0 (9.2 *1)	17478 *2
5回目 B-I	1.34	13.3 (9.3 *1)	18620 *2

\*1 材齢t日の圧縮強度推定式より算出

$$f'c(t) = t / (a + bt) \times d(i) \times f'c(28)$$

a: 定数 4.5 (普通セメント), b: 定数 0.95 (普通セメント)

f'c(28): 材齢28日の圧縮強度 36[N/mm<sup>2</sup>]

(コンクリート標準示方書 施工編 2002年制定)

\*2 ヤング係数の推定式(NewRC式)より算出

$$E = k_1 \times k_2 \times 33500 \times \left(\frac{v}{2.4}\right)^2 \times \left(\frac{\sigma_B}{60}\right)^{1/3}$$

k1: 定数 1.0 (その他の粗骨材)

k2: 定数 1.0 (混和材を使用しない場合)

v: 単位容積質量 [t/m<sup>3</sup>]

σ<sub>B</sub>: 圧縮強度 [N/mm<sup>2</sup>]

(建設省総プロ 平成4年度高強度コンクリート分科会報告書)

表-1-2 仮緊張による導入プレストレス量(部材中央)

打設箇所	仮緊張前後の縦方向ひずみ差		ヤング係数 [N/mm <sup>2</sup> ]	導入プレストレス量	
	測点	計測値 [μ]		推定値 [N/mm <sup>2</sup> ]	目標値 [N/mm <sup>2</sup> ]
2回目 B-IV	H-9	-55.8	17478	0.97	0.5~1.0 程度
	H-11	-53.6			
	H-14	-51.8			
	H-16	-59.9			
5回目 B-I	H-9	-73.2	18620	1.31	
	H-11	-71.0			
	H-14	-70.6			
	H-16	-65.8			

### 3.4 底版摩擦係数の推定

底版は、前述にもあるように、均しコンクリートとの間にポリエチレンフィルムを3枚敷設し、それらの摩擦を低減させる構造となっている。発注図書の設計計算書では、過去の実績から摩擦係数を0.5として摩擦損失を算出しているが、その根拠が不明確であり、試験データが整備されていない。したがって、小試験体により摩擦係数の確認試験を行い、その摩擦係数から、摩擦損失、導入プレストレス量を算出するとともに、実構造物においても仮緊張時の摩擦係数を算出するものとした。

#### 3.4.1 小試験体による底版摩擦係数

##### 確認試験

図-1-2に底版摩擦係数確認試験概要図を、写真-2、写真-3にそれぞれ供試体製作状況と試験状況を示す。架台上に、均しコンクリートを打設し、ポリエチレンフィルムを3枚敷きで敷設し、その上に底版を模したコンクリート製の供試体を打設した。それを反力台に取り付けたジャッキに

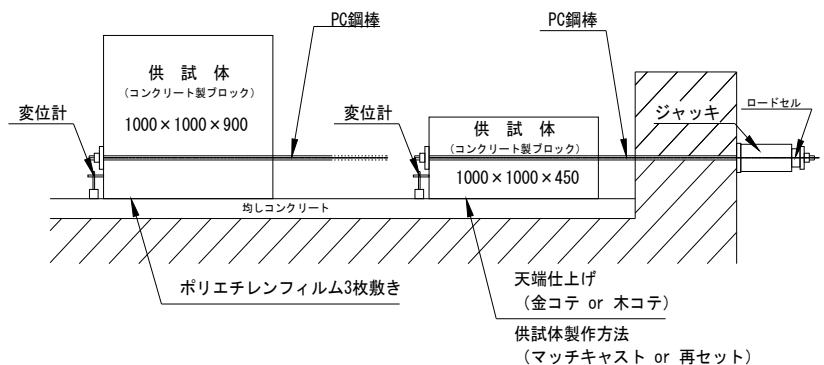


図-1-2 底版摩擦係数確認試験概要図

より PC 鋼棒を介して引張り, そのときの荷重と変位の関係から摩擦係数を算出するものである. なお, 変位は均しコンクリート上に設置した変位計により, また, 引張荷重はジャッキに取り付けたロードセルによりそれぞれ 1 秒ごとに自動計測を行った. パラメーターは, 現場の施工状況を考慮し, (1)均しコンクリート天端を木コテおよび金コテ仕上げとしたこと, (2)底版厚が変化するため, その設置圧を考慮し供試体を厚さ 450mm と 900mm (450mm を 2 段重ね) の 2 種類としたこと, (3)実施工時の天候や養生水を考慮し, 均しコンクリート天端を乾燥状態と湿潤状態としたこと, (4)ポリエチレンフィルムと底版コンクリートのなじみを考慮し, 供試体製作方法をマッチキャストとそれを再セットしたものを用意したことである.

表-13 に試験結果を示す. なお, 摩擦係数は, ロードセルで検知した引張荷重を供試体重量で除した値と

した. また, 供試体に引張荷重を与え, それが動き出したときの荷重を使用したものを静止摩擦係数とし, その後, 引張荷重が一定となったときの荷重を使用したものを動摩擦係数とした.

(1) 均しコンクリート天端の仕上げ方法による影響

均しコンクリート天端の仕上げ方法による影響については, 設置圧による多少のばらつきはあるものの, 金コテ仕上げの場合の摩擦係数のほうが木コテ仕上げのものより小さくなり, 天端の仕上げ方法が摩擦係数に及ぼす影響を確認することができた (試験ケース 1, 2 をそれぞれ 5, 6 と比較). また, 金コテ仕上げだけでなく, 木コテ仕上げの場合においても本構造物の設計で使用されている 0.5 よりも小さい結果が得られた.

(2) ポリエチレンフィルム間の乾湿状態の影響

ポリエチレンフィルム間の乾湿状態の影響については, 静止摩擦係数に若干のばらつきはあるものの, ほぼ同程度の結果が得られ, 乾湿状態が摩擦係数に及ぼす影響は小さいものと考えられる. ただし, 図-13 に試験ケース 2 と 4 の試験結果を示すが, ポリエチレンフィルム間が湿潤状態の場合, 乾燥状態と比較して最大摩擦係数からの下降勾配が緩い傾向が見られ, 摩擦係数の持続性が高まる可能性が考えられる. 実構造物における施工では, 作業期間が長期にわたるため, 雨天等によりポリエチレンフィルム間の乾燥状態は湿潤状態と考えられるが, そのことが摩擦係数に及ぼす影響は小さく, 摩擦係数も 0.5 以下であることが確認できた.

(3) 供試体製作方法による影響

供試体製作方法による影響については, 明らかに異なる挙動が確認できた (試験ケース 1~8 をそれぞれ, 9~18 と比較). マッチキャストで製作した供試体の場合, 図-13 にもあるように, 静止摩擦係数が大きく, 徐々に摩擦係数が小さくなり, 最後にほぼ一定値 (動摩擦係数) となる. 一方, マッチキャスト外供試体の場合はそれらがほぼ同値であり, マッチキャスト供試体と比較して小さい結果となった. このことから, 本



写真-2 供試体製作状況



写真-3 試験状況

表-13 試験結果

	供試体製作方法	均しコンクリートの天端仕上げ	ポリエチレンフィルム間の乾湿状態	接地圧	静止摩擦係数	動摩擦係数	
1	マッチキャスト	金コテ仕上げ	乾燥	部材厚 0.450m	0.18	0.12	
2				部材厚 0.900m	0.29	0.15	
3			湿潤	部材厚 0.450m	—	—	
4				部材厚 0.900m	0.34	0.15	
5		木コテ仕上げ	乾燥	部材厚 0.450m	0.48	0.26	
6				部材厚 0.900m	0.41	0.23	
7			湿潤	部材厚 0.450m	—	—	
8				部材厚 0.900m	0.45	0.25	
9	マッチキャスト外 (再セット後、放置せずに試験を実施)	金コテ仕上げ	乾燥	部材厚 0.450m	0.05	0.10	
10				部材厚 0.900m	0.08	0.10	
11			湿潤	部材厚 0.450m	0.10	0.12	
12				部材厚 0.900m	0.09	0.11	
13		木コテ仕上げ	乾燥	部材厚 0.450m	0.14	0.16	
14				部材厚 0.900m	0.15	0.17	
15			湿潤	部材厚 0.450m	0.09	0.14	
16				部材厚 0.900m	0.16	0.18	
17		マッチキャスト外 (再セット後、1週間放置)	金コテ仕上げ	湿潤	部材厚 0.900m	0.05	0.06
18			木コテ仕上げ		部材厚 0.900m	0.20	0.16

構造物のように現場内で底版を施工する場合、マッチキャスト以外で製作した供試体を用いて摩擦係数試験を実施すると、摩擦係数を過小評価し、危険側の設計となる可能性があることが考えられる。

(4) 供試体とポリエチレンフィルム間のなじみの影響

供試体とポリエチレンフィルム間の時間的ななじみの影響について比較を行うと、1週間放置した後に試験を実施した供試体(試験ケース 17, 18)は、放置しない場合(試験ケース 12, 16)よりも、静止摩擦係数が、動摩擦係数と比較してやや大きくなる傾向があることが考えられる。特に、木コテ仕上げの場合にその傾向が大きくなっており、供試体と均しコンクリートの境界面が粗いほうが、その傾向が大きくなるものと考えられる。

なお、参考のために、ポリエチレンフィルムを敷設せずに同様の試験を行った。試験条件としては、「製作方法：マッチキャスト外」、「設置圧：部材厚 0.900m」であるが、それらの動摩擦係数は、金コテ仕上げの場合：0.45、木コテ仕上げの場合：0.55で、ポリエチレンフィルムを設置した場合と比較して約3倍以上となり、ポリエチレンフィルムの効果を確認することができた。

実施工においては、底版コンクリートをポリエチレンフィルム上に直接打設すること、天端仕上げとして金コテ仕上げを行うこと、雨天の影響により湿潤状態であることを考えると、試験ケース 4 に相当すると考えられる。また、仮緊張は短時間で終わるため、静止摩擦係数に相当すると考えると、その値は 0.34 程度になることが予想される。しかしながら、種々の不確定要素も含まれること、すべての試験結果が 0.50 を下回ることから、プレストレス量の算出には過去の実績に示されるとおり、0.50 を使用するものとした。

3.4.2 実構造物における底版摩擦係数の推定

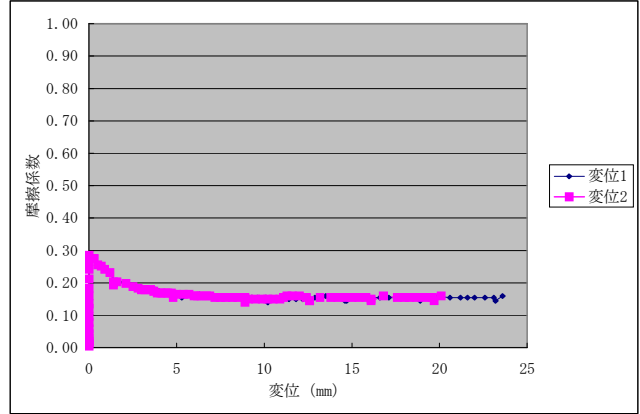
前項では、小試験体による試験を行い摩擦係数の推測を行ったが、本項では、実構造物において摩擦係数の推定を行うこととする。その方法としては、仮緊張時のモノメータ示度から部材端緊張力を算出し、これに PC 鋼材とシーすとの摩擦による損失、定着具のセットによる損失、底版と均しコンクリートとの摩擦による損失、コンクリートの弾性変形による損失を控除した部材中央部の導入緊張力が、その断面に導入されたプレストレス量に等しいと仮定し算出した。なお、中央断面に導入されたプレストレス量は、底版に埋め込んだひずみゲージの緊張前、後のひずみ差より算出した。式(1)~(5)にその算出式を示す。

(1) 部材端緊張力の算出

$$P_i = \sigma_m \times A_j \times \left(1 - \frac{\gamma}{100}\right) / 1000$$

$\sigma_m$	: マノメータ示度	11.0 (B-IV), 12.0 (B-I) [MPa]
$A_j$	: ジャッキの受圧面積	25839 [mm <sup>2</sup> ]
$\gamma$	: ジャッキ内部の摩擦損失	3.0 [%]

ケース2：マッチキャストー金コテ仕上げーポリエチレンフィルム間：乾燥ー2段



ケース4：マッチキャストー金コテ仕上げーポリエチレンフィルム間：湿潤ー2段

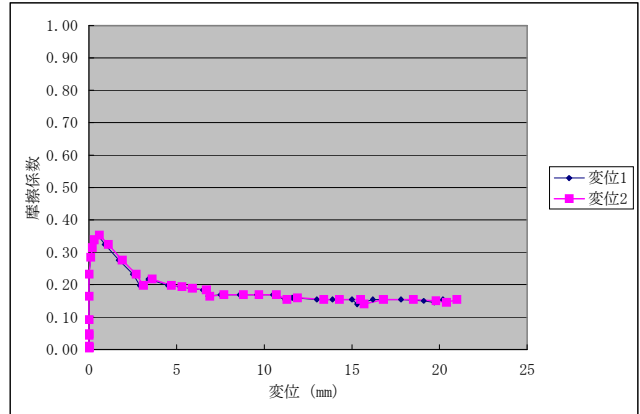


図-13 試験ケース 2, 4 の試験結果

## (2) PC 鋼材とシーストとの摩擦による損失

$$P_{i1}' = P_i \times e^{-(\mu\alpha + \lambda)}$$

$\mu$	: 角変化 1rad あたりの摩擦係数 (試験緊張結果)	0.046
$\alpha$	: 角変化	10 [deg] = 0.17453 [rad]
$\lambda$	: PC 鋼材 1[m]あたりの摩擦係数 (試験緊張結果)	0.004
l	: PC 鋼材の緊張端から部材中央までの長さ (平均値)	32.476 [m] (B-IV), 42.671 [m] (B-I)

## (3) 定着具のセットによる損失

$$P_{i2}' = \text{図解法により算出}$$

$\Delta l$	: セット量	5 [mm]
$E_p$	: PC 鋼材のヤング係数	200000 [N/mm <sup>2</sup> ]

## (4) 底版と均しコンクリートとの摩擦による損失

$$P_{i3}' = P_{i2}' - \Delta P_1$$

$$\Delta P_1 = (B \times H \times L \times w) \times k$$

B	: 部材幅 (PC 鋼材間隔)	0.375 [m]
H	: 部材厚 (標準部)	0.450 [m]
L	: 部材長 (平均値)	32.455 (B-IV), 42.649 (B-I) [m]
w	: コンクリートの単位重量	24.5 [kN/m <sup>3</sup> ]
k	: 底版摩擦係数	0.50, 0.13

## (5) コンクリートの弾性変形による損失

$$P_i = P_{i3}' - \Delta P_2 = \varepsilon_c \times E_c \times B \times H / 1000$$

$$\Delta P_2 = \frac{1}{2} \times n \times \sigma_{cpg} \times A_p / 10^6 = \frac{1}{2} \times \frac{E_p}{E_c} \times \frac{P_{i3}'}{B \times H} \times A_p / 10^6$$

$\varepsilon_c$	: 仮緊張前後のコンクリートひずみ差	55.3 (B-IV), 70.1 (B-I) [ $\times 10^{-6}$ ]
$E_c$	: 仮緊張時のコンクリートのヤング係数	17478 (B-IV), 18620 (B-I) [N/mm <sup>2</sup> ]
$A_p$	: PC 鋼材の断面積	1184.52 [mm <sup>2</sup> ]

表-14に実構造物における底版摩擦係数の推定結果を示す。表中の導入緊張力 Pt は、部材端緊張力 Pi から、それぞれの損失量を控除した値であり、また、前述の表-12の導入プレストレス量の推定値から算出した値と同値となるように底版摩擦係数 k の繰り返し計算を行った。結果として、底版摩擦係数の平均値が 0.31 となり、前項の小試験体による底版摩擦係数確認試験における試験ケース 4 の静止摩擦係数 0.34 に近い値となった。しかし、各ブロックによってその値が 0.50, 0.13 と差がある。均しコンクリートの平滑具合による施工誤差やひずみの計測誤差、ヤング係数の推定における誤差、緊張計算における誤差などから摩擦係数の推定値にばらつきが見られる。したがって、設計計算においてはそれを 0.50 程度とするのが安全といえる。

表-14 実構造物における底版摩擦係数の推定結果

打設箇所	部材端緊張力 Pi [kN]	ケーブル摩擦考慮後 Pt' 1 [kN]	定着具セット考慮後 Pt' 2 [kN]	底版摩擦損失量 $\Delta P_1$ [kN]	弾性変形損失量 $\Delta P_2$ [kN]	導入緊張力 Pt [kN]	底版摩擦係数 k [---]	
							各ブロック	平均値
2回目 B-IV	275.7	240.2	237.0	67.2	6.8	163.1	0.50	0.31
5回目 B-I	300.8	251.5	251.5	22.5	8.6	220.4	0.13	

## 4. 側壁のひび割れ抑制対策

### 4.1 温度応力解析

#### 4.1.1 解析条件

側壁のひび割れ抑制対策の検討に先立ち、温度応力解析として三次元 FEM 解析を行った。解析プログラムは底版と同様である。側壁は、底版あるいは旧リフトの側壁から外部拘束を受けやすく、温度ひび割れの発生が懸念される。このため、第1リフトの打設方法3ケースについて比較検討を行った。なお、1リフト当りの高さを1800mm程度以下に制限するため、当初設計の4リフトから5リフトに変更した。図-14、図-15、図-16に各ケースの第1リフト概要を、図-17に解析モデルを示す。

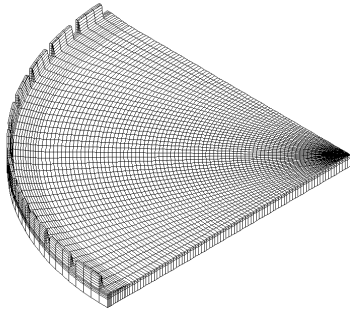


図-14 第1リフト概要図(ケース1)

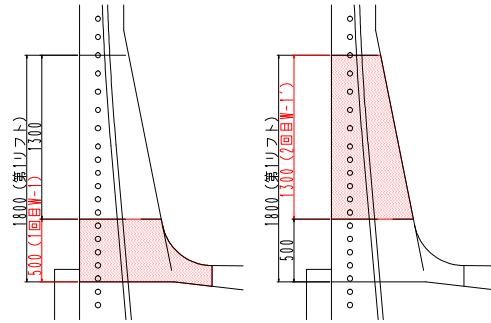


図-15 第1リフト概要図(ケース2)

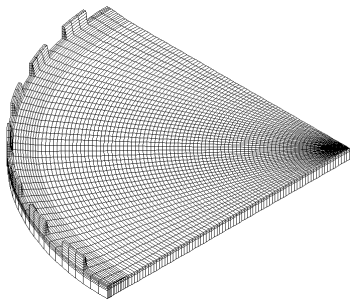


図-16 第1リフト概要図(ケース3)

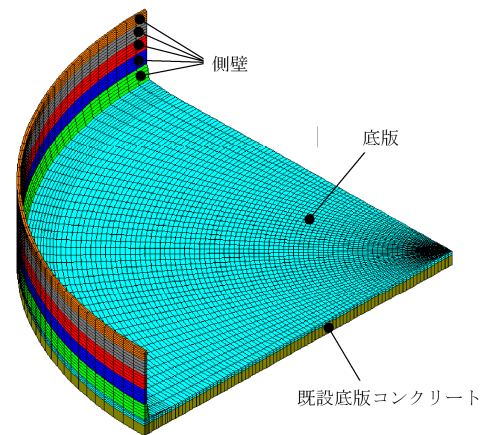


図-17 側壁の解析モデル

図-14の第1リフト概要図(ケース1)は発注図書に示される打設方法であり、幅520mmの目地を残して第1リフトの打設を行い、その後目地部に膨張材添加のコンクリートを打設するものである。目地を設けることで、底版による外部拘束を低減させる方法である。図-15の第1リフト概要図(ケース2)は、目地を設けずに高さ500mmを打設し、その後残りの1300mmを打設する方法である。また、全てのコンクリートに膨張材を添加することとした。目地を設けていないため、円周方向に仮緊張を行うことができ、コンクリートの充填性に優れるのが特徴である。図-16の第1リフト概要図(ケース3)は、形状はケース1と同様だが、第1リフトのブロックを千鳥状に打設(ブロックを1つおきに2回打設)し、ケース1よりもさらに外部拘束を低減させる方法である。また、ケース2と同様に、全てのコンクリートに膨張材を添加することとした。

表-15に、側壁の施工時期を、表-16に側壁コンクリートの材料および配合を示す。月別平均気温や月別平均コンクリート温度は、それぞれ、前述の表-3、表-4と、コンクリートの力学的特性および熱特性、熱伝達率は、それぞれ、前述の表-6、表-7、表-8と同様である。

表-15 側壁施工時期

打設箇所	打設時期	養生期間
第1リフト1回目	W-I 07/ 1/15	9日
第1リフト2回目	W-I' 1/25	9日
第2リフト	W-II 2/10	9日
第3リフト	W-III 2/28	9日
第4リフト	W-IV 3/10	9日
第5リフト	W-V 3/28	9日

※ 底版は平均材齢の9月施工とする。

表-16 側壁コンクリートの材料および配合

施工箇所	セメントの種類	混和剤の種類	呼び強度	単位セメント (結合材)量	水セメント (結合材)比	細骨材率
側壁	普通ポルトランド +膨張材	高性能AE減水剤 遅延形I種	36[N/mm <sup>2</sup> ]	398[kg/m <sup>3</sup> ]	42.0[%]	44.4[%]

4.1.2 解析結果

図-18, 図-19, 図-20に, それぞれ各ケースの解析結果を示す.

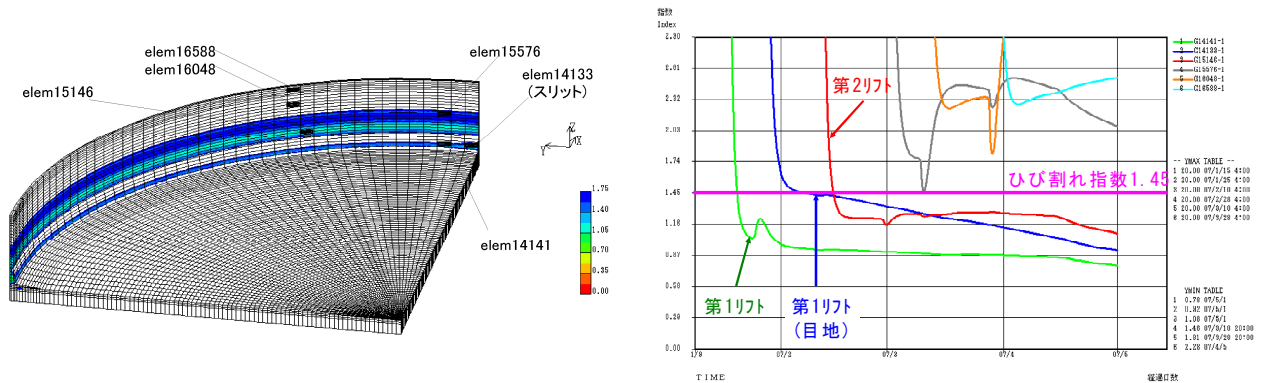


図-18 解析結果(ケース1)

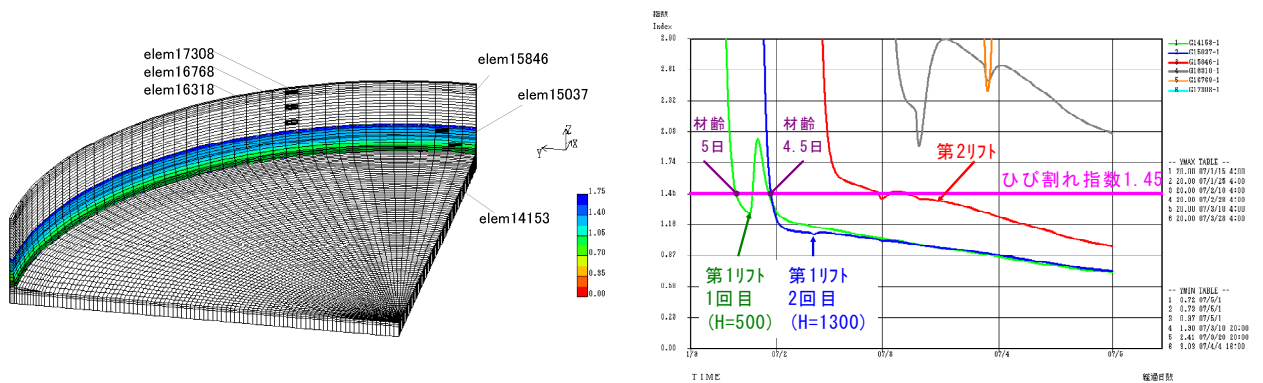


図-19 解析結果(ケース2)

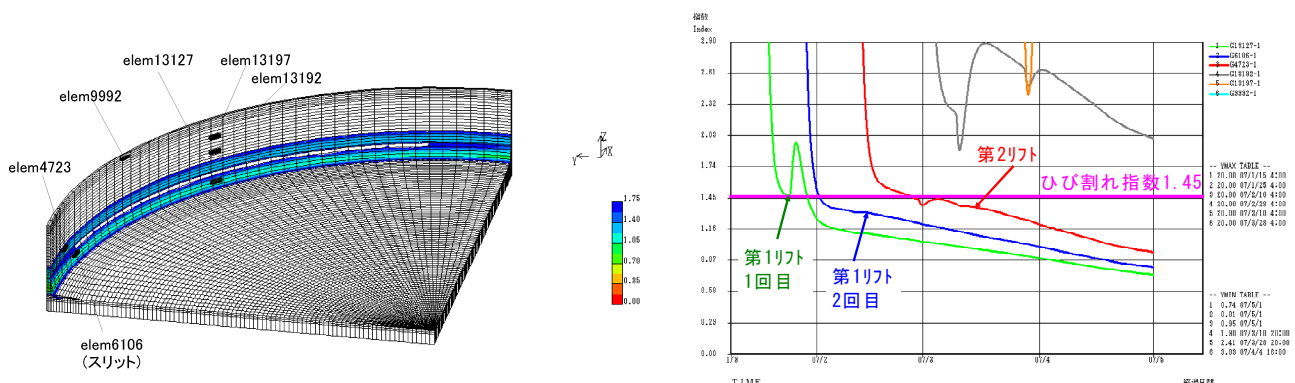


図-20 解析結果(ケース3)

ケース1に関しては, 目地部コンクリート打設前に, 第1リフトコンクリートのひび割れ指数が目標の1.45以下となり, 別途ひび割れ抑制対策が必要と考えられる. また, 目地部の施工が煩雑であり, 目地部打設前の仮緊張は不可能である.

ケース2に関しては, 第1リフトの1回目, 2回目とも, ひび割れ指数が1.45以下となり, 別途ひび割れ

抑制対策が必要と考えられる。また、他ケースと異なり目地を設けなため、比較的施工性に優れるといえる。

ケース3に関しては、第1リフトの1回目のひび割れ指数は、2回目のコンクリートが打設される前までは1.45程度となったが、2回目コンクリートと一体化した後に1.45以下となるため、別途ひび割れ抑制対策が必要であると考えられる。また、ケース1と同様に、目地部の施工が煩雑であり、目地部打設前の仮緊張は不可能である。

ここで、ケース2の温度履歴を図-21に示す。

第1リフトのコンクリートの最高温度は、部材中心で、1回目：23.5℃、2回目：27.4℃であり、低い温度となった。

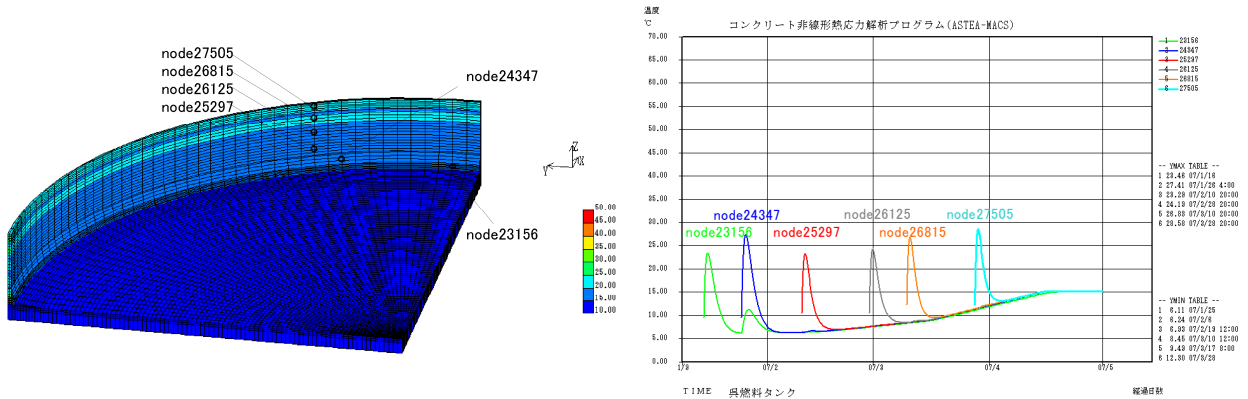


図-21 温度履歴(ケース2)

#### 4.2 側壁のひび割れ抑制対策

温度応力解析の結果および施工性から、第1リフトの施工方法はケース2の方法とした。ケース2の施工方法は、目地を設けずに第1リフトを上下方法に分割し、さらに全てのコンクリートに膨張材を添加する方法である。ただし、上下方向の分割高さは、施工性の理由によりH=700mm+1100mmへ変更した。第1リフト～第2リフトのひび割れ指数は、本工事で目標としたひび割れ指数の1.45を下回るため、以下のひび割れ抑制対策を行った。

##### 4.2.1 膨張材の添加

前述にもあるように、若材齢時のひび割れ指数を向上させるため、コンクリートに膨張材を添加した。なお、膨張材を添加することにより、乾燥収縮によるひび割れの抑制が図れることから、第1リフト～第5リフトの全リフトで膨張材を添加した。

##### 4.2.2 補強鉄筋の追加

温度応力および乾燥収縮によるひび割れを抑制するため、側壁外側に補強鉄筋を追加配置した。補強鉄筋の径はD13とし、当初設計の鉄筋間隔200mmの間に1本ずつ配置することとした。図-22に補強鉄筋配置図を示す。

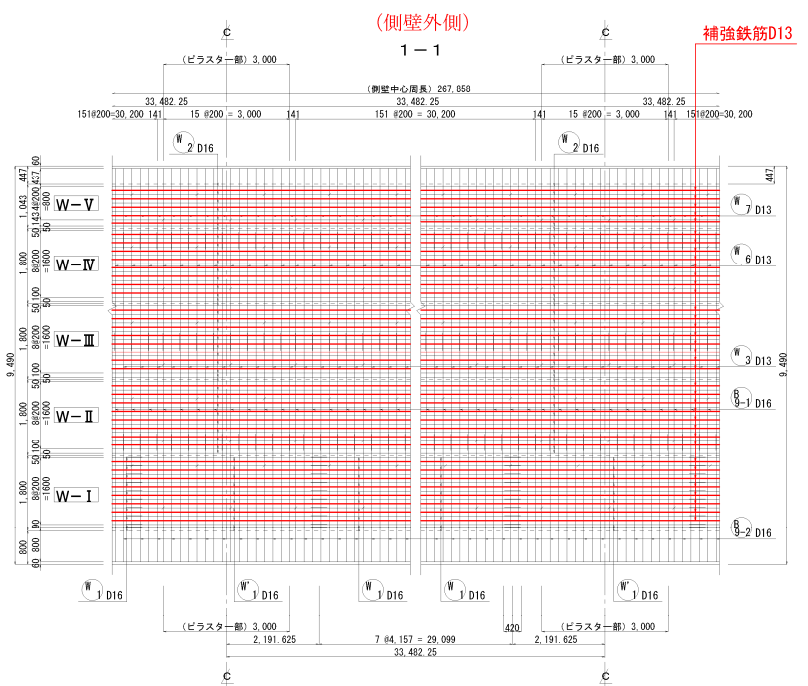


図-22 補強鉄筋配置図



### 4.2.3 仮緊張の実施

底版と同様の目的から、全リフトで円周方向の仮緊張を実施した。

### 4.2.4 コンクリート温度の計測

温度応力解析より、コンクリート温度は低いと予想されたが、第1リフトの最大部材厚が750mmと比較的大きいため、施工時に温度計測を実施し、解析の妥当性を確認することとした。

計測には熱電対を使用し、W-I (第1リフト1回目, H=700mm), W-I' (第1リフト2回目, H=1100mm)を対象とした。

計測位置は、高さ方向に[W-I × 1段] + [W-I' × 3段]とし、部材厚の大きい下側2段は、厚さ方向に内側、中央、外側の3箇所計測した。図-23に側壁の計測位置図を示す。

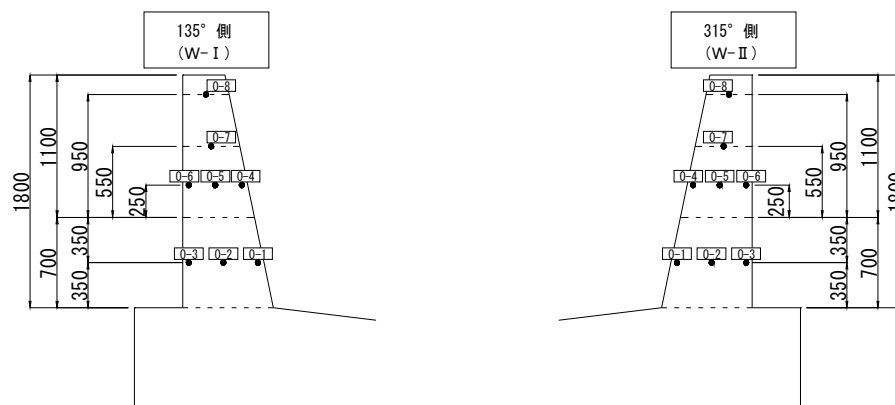


図-23 側壁の計測位置図

## 4.3 側壁の計測結果および考察

底版と同様に、側壁の環境条件（外気温）およびコンクリートの打ち込み温度、温度履歴の解析値と計測値の比較を行い、温度応力解析の妥当性を検証する。

### 4.3.1 側壁の温度

表-17に、外気温およびコンクリートの打ち込み温度を示す。表中の外気温の計測値は打設開始から材齢7日までの平均気温、打ち込み温度は受け入れ検査の値を示す。

表-17 外気温およびコンクリート打ち込み温度の解析値と計測値の比較

打設箇所	打設日		外気温 [°C]			打ち込み温度 [°C]				
	解析値	計測値	解析値	計測値	差	解析値	計測値	差		
第1リフト 1回目 W-I	07/ 1/15	07/ 2/ 1	5.5	135°側	8.1	3	9.5	午前	8	1
				315°側	9.2			午後	12	
				平均	8.6			平均	10	
第1リフト 2回目 W-I'	07/ 1/25	07/ 2/13	5.5	135°側	8.7	4	9.5	午前	9	3
				315°側	9.5			午後	15	
				平均	9.1			平均	12	

外気温の計測は、日射の影響を考慮して対象な位置（135°側、315°側）で実施した。両リフトとも315°側が1°C程度高くなったが、その差は軽微であった。受け入れ検査時のコンクリート温度は、午前と午後で4~6°C程度の差があり、打設時刻による差が大きくなった。計測値と解析値の比較としては、外気温の計測値は解析値よりも3~4°C程度高く、また、コンクリートの打ち込み温度の計測値も解析値に対して1~3°C程度高くなった。外気温の差については、冬季施工におけるコンクリート強度の発現性を考慮して、側壁内側を全面シートで覆い、ジェットヒーターによる給熱養生を実施したためと考えられる。一方、打ち込み温度は、生コンクリート工場の2月度実績値の最高温度程度である。

以上より、温度応力解析における外気温およびコンクリートの打ち込み温度の仮定値は、計測値に対して若干の差が生じたといえる。

表-18に、各計測位置の最高温度を示す。なお、最高温度地点は解析値、計測値ともに各リフトの部材中心となった。

表-18 各計測位置のコンクリートの最高温度

打設箇所	解析値			計測値				差 [°C]		
	リフト高 [mm]	部材厚 [mm]	温度 [°C]	リフト高 [mm]	部材厚 [mm]	温度 [°C]				
第1リフト 1回目 W-I	500	最小	650	23.5	700	最小	610	135°側	28.0	6
		最大	750			315°側	31.7			
		平均	700			平均	29.9			
第1リフト 2回目 W-I'	1300	最小	390	27.4	1100	最小	390	135°側	36.9	10
		最大	650			315°側	38.1			
		平均	520			平均	37.5			

表より、135°側と315°側の計測値の比較では315°側が1~4°C高く、日射の影響を受けたと考えられる。また、温度は低いが、計測値と解析値との比較では、計測値が解析値に対して6~10°C程度高くなった。

以上より、コンクリートの最高温度についても解析値との差が見られることや、リフト高の設定も異なることから、温度応力解析と再実施することとした。

#### 4.3.2 温度応力解析の再検討

温度応力解析の再検討にあたり、以下の解析条件の見直しを行った。

外 気 温：135°側と315°側の計測値の平均（温度履歴）を使用した。

打ち込み温度：打設時に計測した値の平均値として、W-I = 13.7°C、W-I' = 16.2°Cを使用した。

リフト高：解析モデルの要素分割の都合上、W-Iを740mm、W-I'を1060mmに設定した。

表-19に再検討結果を示す。W-Iの解析結果と計測値の差は1°Cであり、ほぼ一致したといえる。また、W-I'はW-Iと同様の改善が見られ、その差は6°Cとなった。誤差の要因としては、表面の大部分を占める型枠面の熱伝達率（境界条件）の誤差等が考えられる。

表-19 各計測位置のコンクリートの最高温度（再検討結果）

打設箇所	解析値（再実施）			計測値				差 [°C]		
	リフト高 [mm]	部材厚 [mm]	温度 [°C]	リフト高 [mm]	部材厚 [mm]	温度 [°C]				
第1リフト 1回目 W-I	740	最小	602	28.7	700	最小	610	135°側	28.0	1
		最大	750			315°側	31.7			
		平均	676			平均	29.9			
第1リフト 2回目 W-I'	1060	最小	390	31.8	1100	最小	390	135°側	36.9	6
		最大	602			315°側	38.1			
		平均	496			平均	37.5			

図-24に再検討後の第1リフトのひび割れ指数を示す。温度ひび割れ指数は事前に実施した温度応力解析と同様に1.45以下となったが、コンクリート温度が若干上昇しているため、1.45まで低下する材齢が約半日早まった。ただし、側壁のひび割れ抑制対策は全てこの材齢以内に施されており、抑制効果は高いと考えられる。

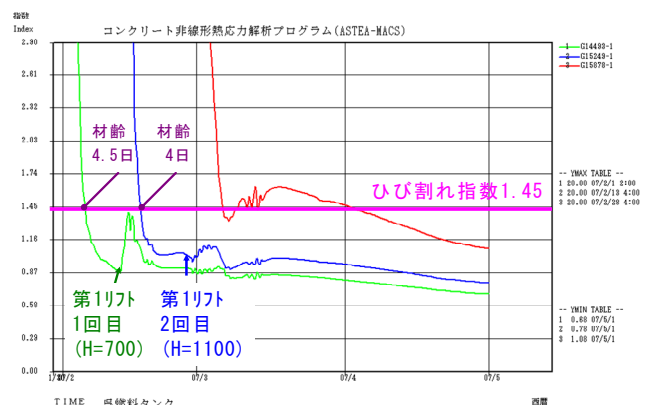


図-24 再検討後のひび割れ指数

## 5. まとめ

本貯油タンクの施工では、温度ひび割れの発生が懸念されたため、温度応力解析や仮緊張、補強鉄筋の追加など、様々なひび割れ抑制対策を行った。各施工段階においてひび割れ調査を行ったが、底版、側壁に有害なひび割れは発見されず、ひび割れ抑制対策が有効であったと考えられる。

また、緊張時のプレストレス量算出のために、ポリエチレンフィルムを敷設した均しコンクリートと底版コンクリートの摩擦係数について、小試験体による確認試験や現場計測による推定を行ったが、発注図書の設計計算書に用いられている0.50を超えることは無かった。しかし、種々の要因による誤差やばらつきがあるため、今後も摩擦係数を0.50として検討を行うのが安全であるといえる。

今回行ったひび割れ抑制対策の手法や底版と均しコンクリートの摩擦係数などが、今後の同種工事の施工において一助となれば幸いと考える。

## 参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書〔施工編〕，2002年制定
- 2) 日本道路協会：コンクリート道路橋施工便覧，平成10年1月