

## 卵形消化槽のマスコンクリート対策検討

大阪支店 伊藤祐一

概要：マスコンクリートとは、広がりのあるスラブについては厚さ 80～100cm 以上、下端が拘束された壁では厚さ 50cm 以上の構造物であり、卵形消化槽のリング基礎および側壁はマスコンクリートに該当すると考えられる。マスコンクリートに該当した場合、コンクリート標準示方書（施工編）によれば、セメントの水和熱による温度応力および温度ひび割れに対する十分な検討を行わなければならないことになっている。本稿では卵形消化槽のリング基礎・側壁に対し温度応力解析を行ってセメントの種類が温度応力に及ぼす影響について検討したので報告する。

キーワード：マスコンクリート，温度解析，温度ひび割れ，低熱ポルトランドセメント

### 1. 検討対象

検討対象とした卵形消化槽の概要は以下の通りである。図 - 1 に構造図を示す。

有効容量：10000 m<sup>3</sup>  
 タンク最大内径：24.490 m  
 タンク高さ：38.832 m  
 リング基礎厚み：1.800 m

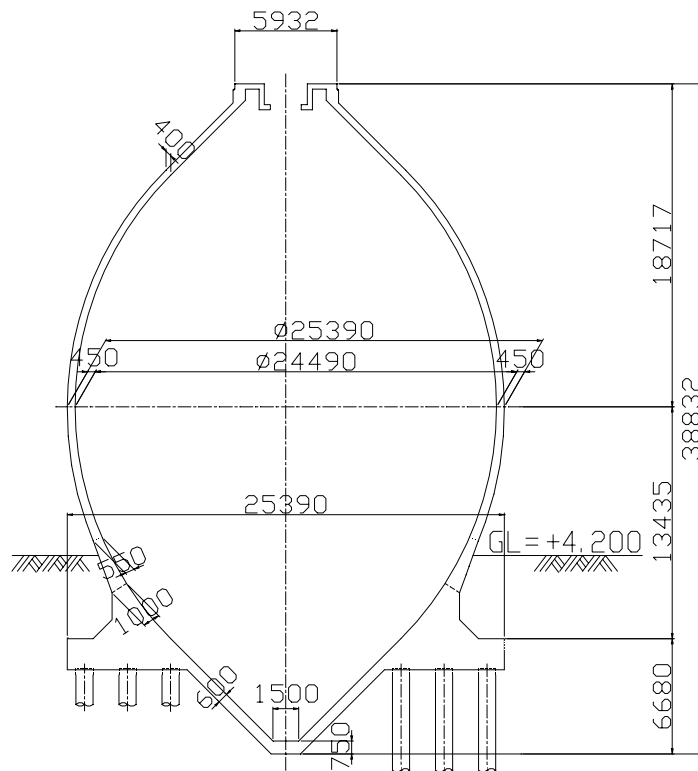


図 - 1 構造図



伊藤祐一  
 PC事業部  
 技術部

## 2. 温度応力解析

### (1) 解析モデル

既往の施工事例よりひび割れが多く発生しているリングビームに着目して側壁第1リフトまでモデル化し、実施工を想定して施工ステップを底版、リング基礎、リングハンチ、側壁第1リフトに分割した。また、卵形消化槽は軸対象構造物であるので1/4円モデルとし、基礎杭についてはバネ要素とした。図-2に解析モデルを示す。なお、各施工ステップの打設間隔、養生条件は(2)解析条件に示している。

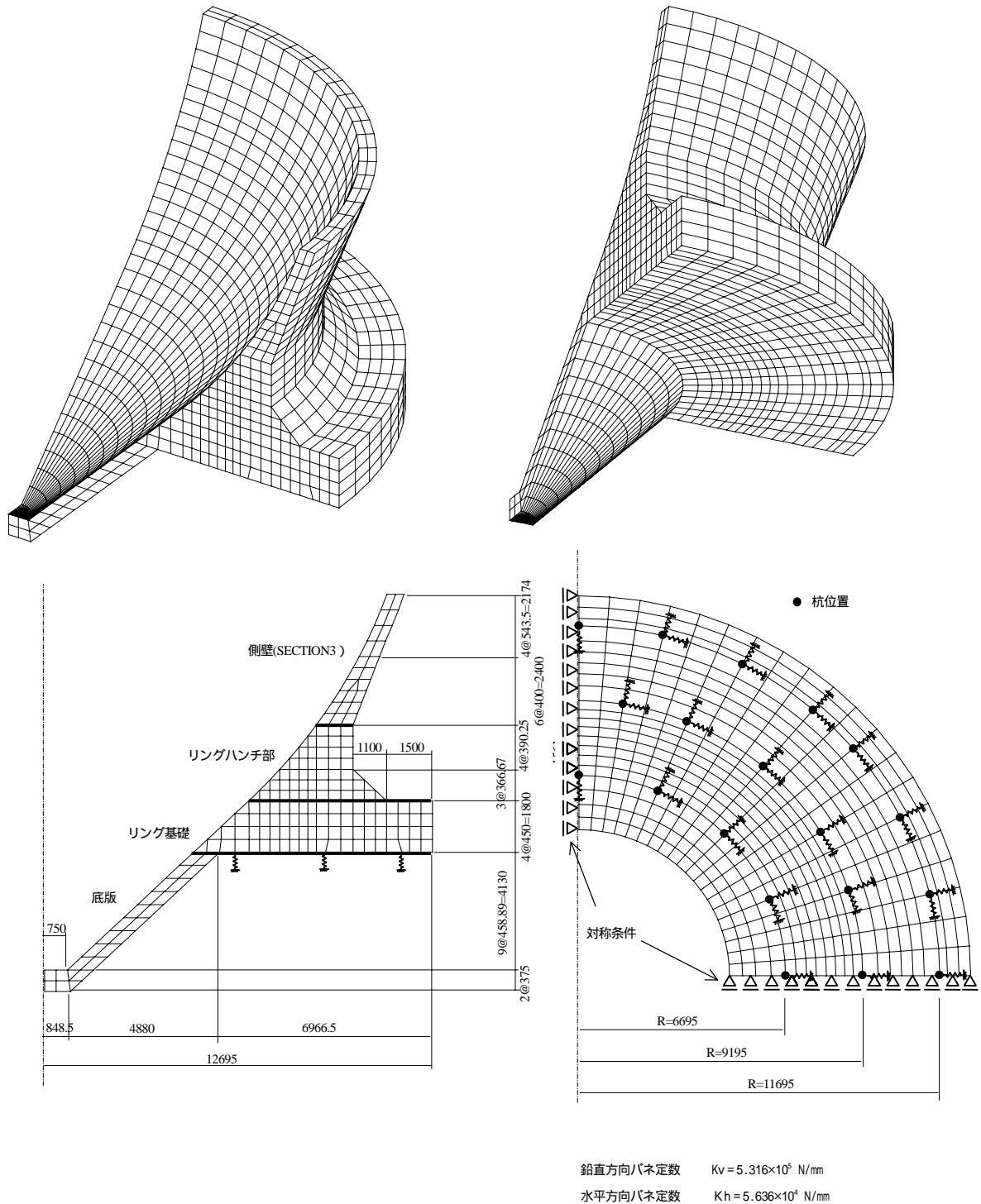


図 - 2 解析モデル

(2)解析条件

a)セメントの種類

温度解析に用いるセメントの種類は高炉セメント B 種（以下高炉セメント）および低熱ポルトランドセメント（以下低発熱セメント）とした．表 - 1 にセメントの配合および物性を示す．

表 - 1 セメントの配合および物性

		高炉セメント	低発熱セメント
設計基準強度 ( ck )	N/mm <sup>2</sup>	36	36
W/C	%	39	53
単位セメント量	kg/m <sup>3</sup>	469	343
単位水量	kg/m <sup>3</sup>	183	183
熱伝導率	W/m	2.6	2.6
密度	kg/m <sup>3</sup>	2400	2400
比熱	KJ/kg	1.15	1.15
ポアソン比		0.18	0.18
熱膨張係数	μ /	10	10

高炉セメントの配合は既往の施工事例を参考に設定した．低発熱セメントの配合は，高炉セメントの配合と単位水量を同一とし，材齢 91 日で高炉セメントの配合強度 (  $f_{91} = 42.7\text{N/mm}^2$  ) となるように設定した．

b)断熱温度上昇特性

高炉セメントの断熱温度上昇式を式 - 1 ，低発熱セメントの断熱温度上昇式を式 - 2 に示す．また，表 - 2 に式 - 1 ，式 - 2 における係数を示す．

$$Q(t) = Q_{\infty}(1 - e^{-t}) \quad \text{式 - 1}$$

$$Q(t) = Q_{\infty}(1 - e^{-t^B}) \quad \text{式 - 2}$$

表 - 2 式 - 1 ， 2 における係数値

セメント種類	Q = a × C + b			= g × C + h		= m × C + n	
	a	b	Q	g	h	m	n
高炉セメント	0.10	15.00	61.9	0.0035	0.332	-	-
低発熱セメント	0.09	11.60	43.84	0.00054	0.555	0.00028	0.573

c)コンクリートの力学特性

コンクリートの圧縮強度推定式を式 - 3 ，引張強度推定式を式 - 4 に示す．ただし，低発熱セメントの圧縮強度は表 - 4 に示す各材齢における圧縮強度を補間して任意材齢の圧縮強度を近似した．

また，91 日以降の圧縮強度については 91 日と同値とした．なお，引張強度は表 - 4 から求まる圧縮強度から式 - 4 を用いて算出した．

$$f'_{ck}(t) = \frac{t}{a + bt} df'_{ck}(28) \quad \text{式 - 3}$$

$$f'_{tk}(t) = c\sqrt{f'_{ck}(t)} \quad \text{式 - 4}$$

$f'_{ck}(t)$  : 材齢 t 日のコンクリート圧縮強度 ( N/mm<sup>2</sup> )

$f'_{tk}(t)$  : " 引張強度 ( N/mm<sup>2</sup> )

$f'_{ck}(28)$  : 設計基準強度 ( N/mm<sup>2</sup> )

表 - 3 式 - 3 ， 4 における係数値

	a	b	d	c
高炉セメント	6.2	0.93	1.15	0.44

表 - 4 低発熱セメントの圧縮強度

	材齢(日)			
	7	28	56	91
圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	11.9	29.0	39.2	42.7

d) コンクリートの収縮特性

コンクリートの収縮として、側壁については乾燥収縮を考慮した。なお、乾燥収縮は脱枠後開始すると仮定した。また、高炉セメントを使用した場合については自己収縮を考慮した。自己収縮は全部材考慮することとし自己収縮特性はJCIの実験式(式-5)を用いた。

$c(t) = c_0(t)$  式-5

$c_0 = 3070 \times e^{-7.2(W/B)}$

$c(t) = 1 - e^{-a(t-t_0)^b}$

$t_0$ : 凝結の始発(日)

0.1153日

W: 単位水量(kg/m<sup>3</sup>)

183.0 kg/m<sup>3</sup>

b1: 単位セメント量(kg/m<sup>3</sup>)

281.4 kg/m<sup>3</sup>

b2: 単位スラグ量(kg/m<sup>3</sup>)

187.6 kg/m<sup>3</sup>

: 係数

1.0

t,  $t_0$ は、JSCEの有効材齢補正を行う。

$B = b_1 + b_2$

a, b: 自己収縮の進行特性を表す係数

W/C50%以上はa=0.03, b=0.8

e) 施工ステップおよび養生条件

図-3に施工ステップおよび養生条件を示す。また、表-5に各養生条件の熱伝達係数を示す。経過日数は底版打設日を0日とした累加日数である。

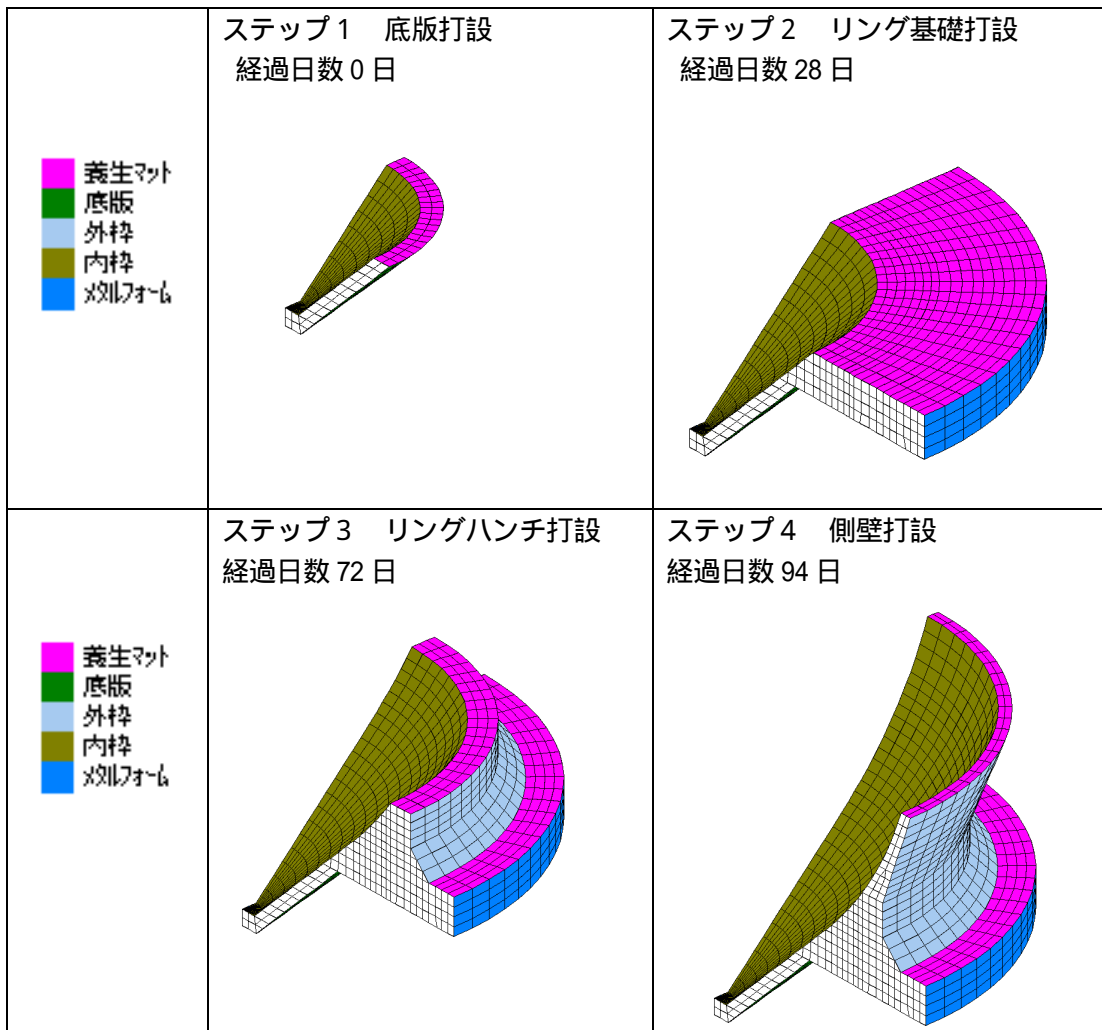


図 - 3 施工ステップおよび養生条件

型枠の種類 : 合板、メタルフォーム  
 養生方法 : 養生マット  
 養生期間 : 4日  
 脱枠 : 打設後30日で脱枠

表 - 5 各養生条件の熱伝達係数

	養生面 (養生マット)	型枠			底板
		外側枠	内側枠	メタルフォーム	
熱伝達率 (W/m <sup>2</sup> )	5	8	6	14	10

### 3. 温度応力解析結果の評価<sup>1)</sup>

温度応力を評価する指標としてひび割れ指数がある。ひび割れ指数とはコンクリートの引張強度と引張主応力の比として定義されており、土木学会コンクリート標準示方書ではコンクリートに有害なひび割れを発生させないためには式 - 6 を満足する必要があるとしている。

$$I_{cr}(t) < \gamma_{cr} \quad \text{式 - 6}$$

$I_{cr}(t)$ : ひび割れ指数

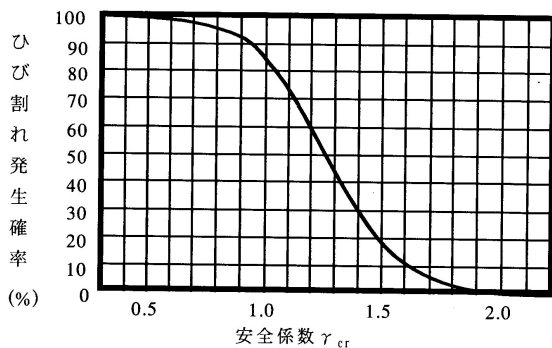
$\gamma_{cr}$ : ひび割れ発生確率に関わる安全係数

ひび割れを防止したい場合  $\gamma_{cr} = 1.75$

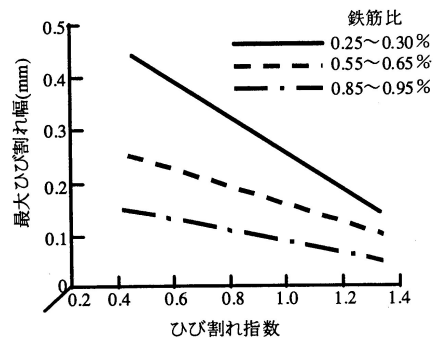
ひび割れの発生をできるだけ制限したい場合  $\gamma_{cr} = 1.75$

ひび割れの発生を許容するが、ひび割れ幅が過大とならないように制限したい場合  
 $\gamma_{cr} = 1.0$

図 - 4 に安全係数  $\gamma_{cr}$  とひび割れ発生確率の関係を示す。また、各鉄筋量に応じてひび割れ指数と最大ひび割れ幅の関係が示されており(図 - 5)、ひび割れ幅を制限したい場合は計算で得られたひび割れ指数に応じて図 - 5 により鉄筋量を設定することができる。



解説 図 4.2.1 安全係数  $\gamma_{cr}$  とひび割れ発生確率



解説 図 4.2.2 最大ひび割れ幅とひび割れ指数との関係

図 - 4 安全係数  $\gamma_{cr}$  とひび割れ発生確率の関係

図 - 5 最大ひび割れ幅とひび割れ指数との関係

### 4. 解析結果

#### (1) 最高温度

図 - 6, 7 に経験値最高温度を示す。高炉セメントを用いた場合はリング基礎内部で 94℃, リングハンチ内部で 90℃, 側壁で 76℃ まで達するが、低発熱セメントを使用することによりリング基礎内部で 66℃, リングハンチ内部で 62℃, 側壁で 50℃ となり、高炉セメントを用いた場合に比べて 25~30℃ 程度低くなった。なお、最高温度に達する材齢は低発熱セメントを用いた場合は高炉セメントを用いた場合に比べ若干遅くなった。

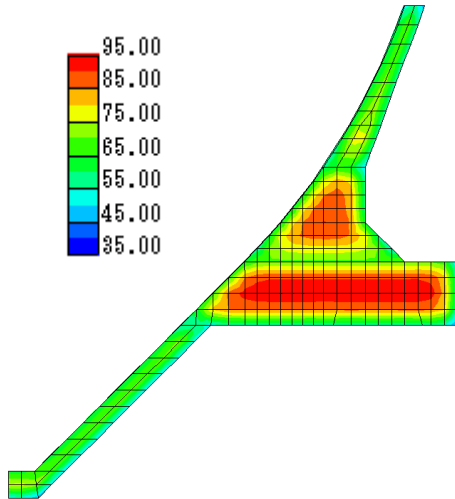


図 - 6 経験値最高温度 (高炉セメント)

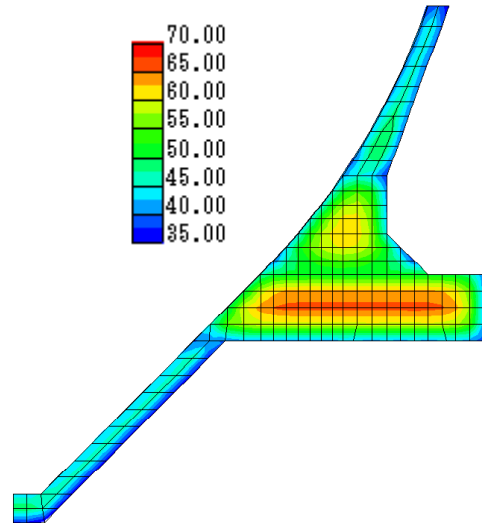


図 - 7 経験値最高温度 (低発熱セメント)

表 - 6 経験値最高温度 ( )

		リング基礎		リングハンチ		側壁	
		内表面	内部	内表面	内部	内表面	内部
最高温度	高炉	80.8(0.8)	94.1(1.7)	77.1(1.0)	90.1(1.8)	76.5(1.0)	76.5(1.0)
	低熱	55.0(1.0)	65.9(2.5)	51.0(1.5)	62.0(3.0)	49.5(1.2)	49.5(1.2)

( )内は材齢(日)を示す

(2) 最大主応力

図 - 8, 9 に経験値最大主応力を示す。高炉セメントを用いた場合はリング基礎内部で  $5\text{N}/\text{mm}^2$ 、リングハンチ内部で  $7\text{N}/\text{mm}^2$ 、側壁で  $4\text{N}/\text{mm}^2$  程度主応力が発生している。一方、低発熱セメントを用いることによりリング基礎内部で  $3\text{N}/\text{mm}^2$ 、リングハンチ内部で  $3\text{N}/\text{mm}^2$ 、側壁で  $1\text{N}/\text{mm}^2$  程度となり高炉セメントを用いた場合より  $2\sim 4\text{N}/\text{mm}^2$  程度最大主応力は緩和された。最大主応力発生材齢はいずれのセメントを用いた場合もリング基礎、リングハンチの部材内部はコンクリート打設後長時間経過してからであり、内表面については比較的若材齢である。

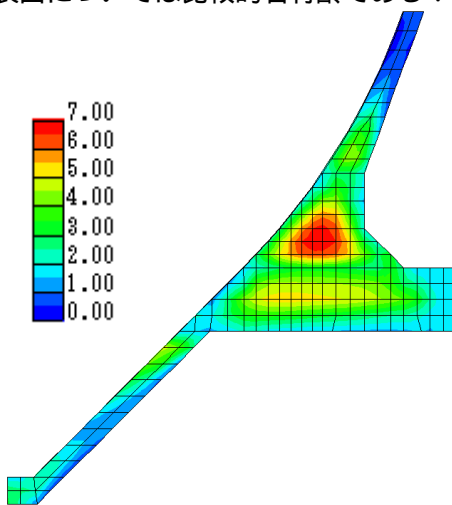


図 - 8 経験値最大主応力 (高炉セメント)

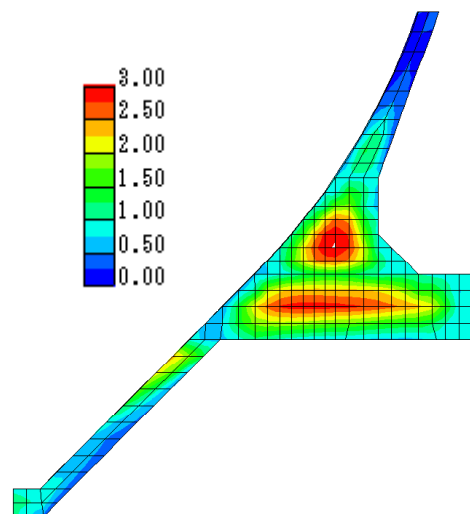


図 - 9 経験値最大主応力 (低発熱セメント)

表 - 7 経験値最大主応力

		リング基礎		リングハンチ		側壁	
		内表面	内部	内表面	内部	内表面	内部
最大主応力 N/mm <sup>2</sup>	高炉	1.82(2.7)	5.05(45.2)	2.02(1.3)	6.88(23.2)	4.07(11.0)	4.17(10.0)
	低熱	0.40(1.2)	2.82(45.3)	1.02(2.0)	2.95(24.0)	0.58(1.0)	1.22(14.0)

( )内は材齢(日)を示す

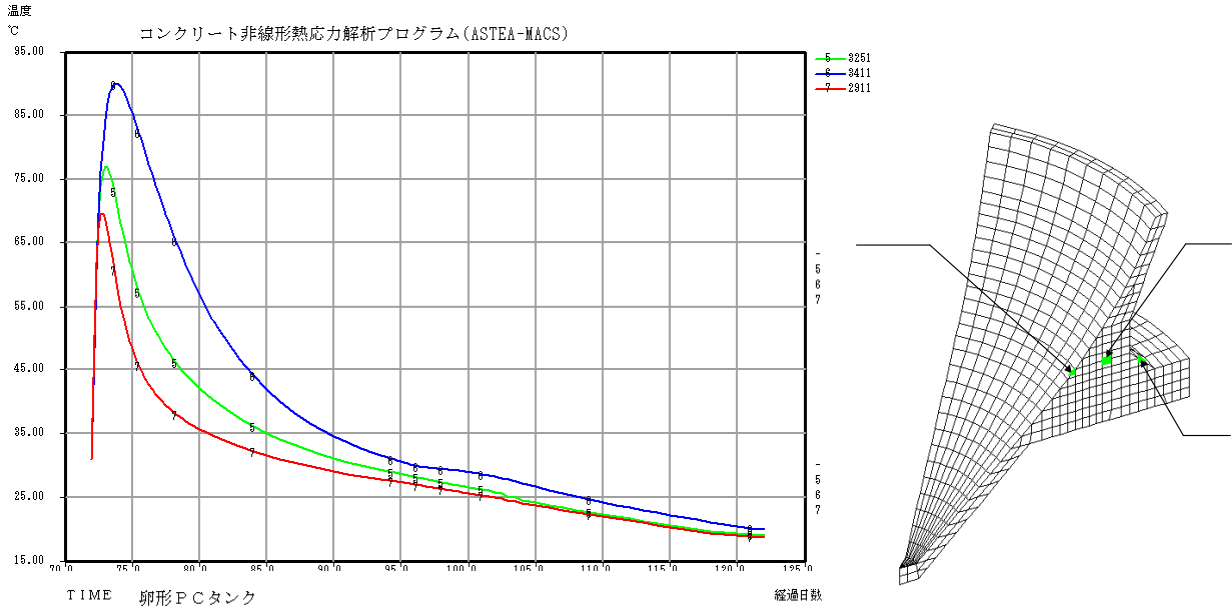


図 - 10 リングハンチ部の温度の経時変化 (高炉セメント)

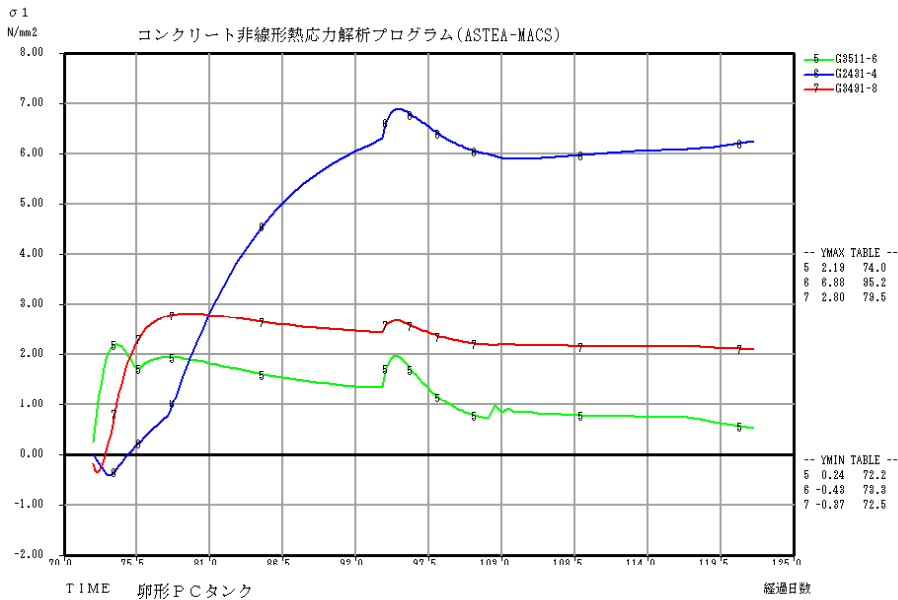


図 - 11 リングハンチ部の主応力の経時変化 (高炉セメント)

図 - 10 ~ 13 にリングハンチ部の温度および主応力の経時変化を示す。部材内部（青色）はコンクリート打設直後に圧縮応力が発生し，材齢の経過とともに引張応力が增大している。引張応力はコンクリート温度の下降に伴って増大しているため外部拘束が原因であると考えられる。経過日数 95 日付近で局所的に主応力が增大しているが，これは側壁第1リフトを打設した影響である。

部材表面（緑色：内表面，赤色：外表面）は，部材内部と表面とのコンクリート温度差が最大となる材齢付近で最大主応力が発生しているため内部拘束が原因だと考えられる。

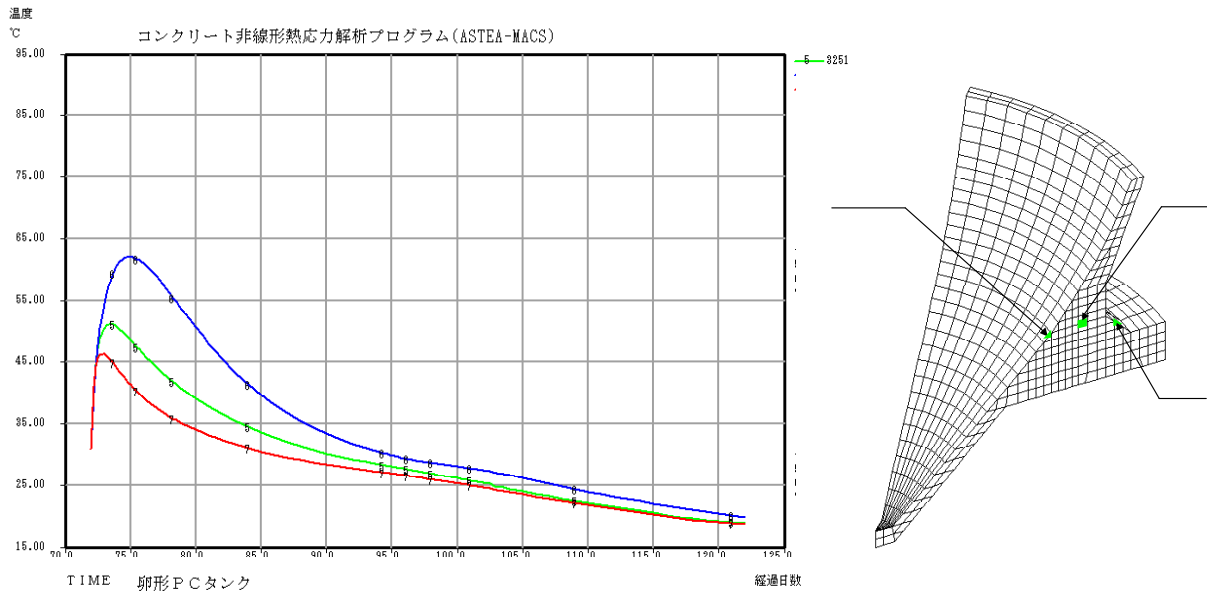


図 - 12 リングハンチ部の温度の経時変化（低発熱セメント）

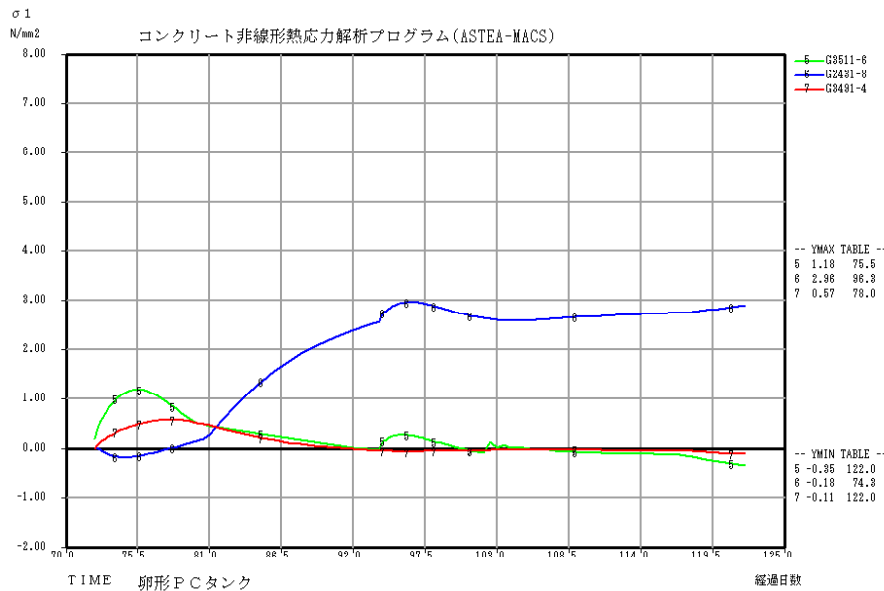


図 - 13 リングハンチ部の主応力の経時変化（低発熱セメント）



図 - 1 4 , 1 5 に高炉セメントを用いた場合のリングハンチの円周方向応力度および鉛直方向応力度を示す . これらを見ると図 - 1 1 に示した主応力は円周方向応力度が支配的であることがわかる . したがってひび割れ幅を制御するために鉄筋を配置する場合は円周方向に配置する必要がある .

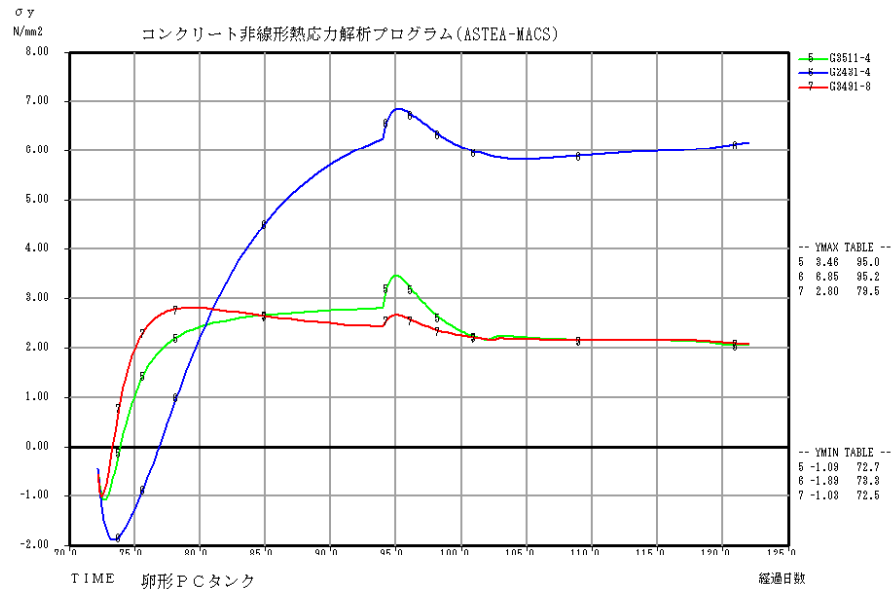


図 - 1 4 リングハンチ部の円周方向応力度 (高炉セメント)

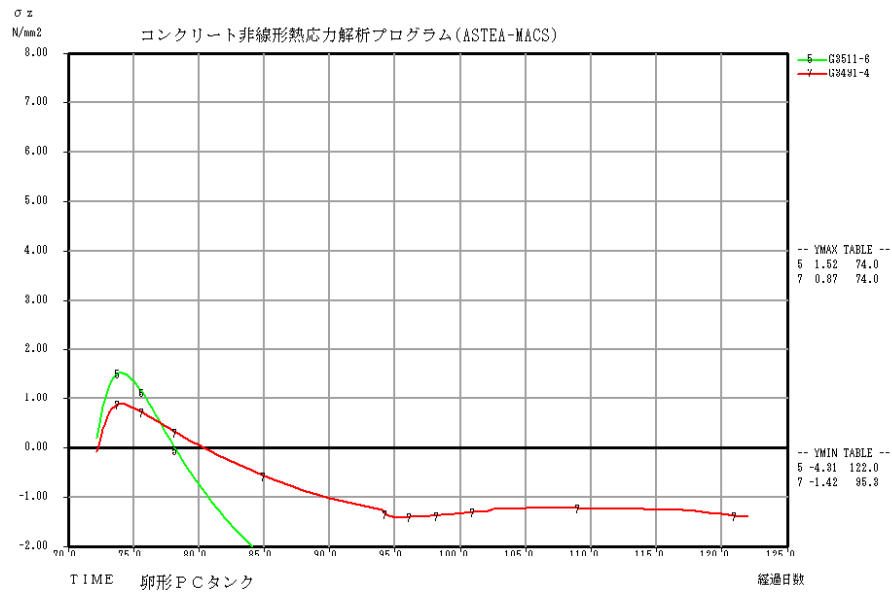


図 - 1 5 リングハンチ部の鉛直方向応力度 (高炉セメント)

### (3) ひび割れ指数

図 - 1 6 , 1 7 にひび割れ指数のコンターを示す . 高炉セメントを用いた場合はリングハンチおよび側壁は部材内部 , 内表面 , 外表面ともにひび割れ指数が 1.0 以下 (ひび割れ発生確率 80%) となっているため貫通ひび割れが発生する可能性が高いと考えられる . ただし , リング基礎については外表面側のひび割れ指数が 1.3 程度 (ひび割れ発生確率は 35%) であり貫通ひび割れの発生する可能性は低いと考えられる . 一方 , 低発熱セメントを使用した場合はリングハンチ , リング基礎ともに部材内部のひび割れ指数は 1.0 以下と小さいが , 表面は 1.5 以上 (ひび割れ発生確率 20%) であり , 内部ひび

割れが発生する可能性は高いが表面ひび割れが発生する可能性は低いので貫通ひび割れは発生しないと考えられる。側壁については部材表面のひび割れ指数は1.0程度と小さいが、部材内部のひび割れ指数は1.6程度(ひび割れ発生確率10%)でありリング基礎、リングハンチとは逆に表面ひび割れが発生する可能性は高いが内部ひび割れが発生する可能性は低いので貫通ひび割れは発生しないと考えられる。

低発熱セメントを使用することによりひび割れの発生を完全に防止することはできないが、高炉セメントを使用した場合に比べてひび割れ指数が大幅に改善されることが分かった。

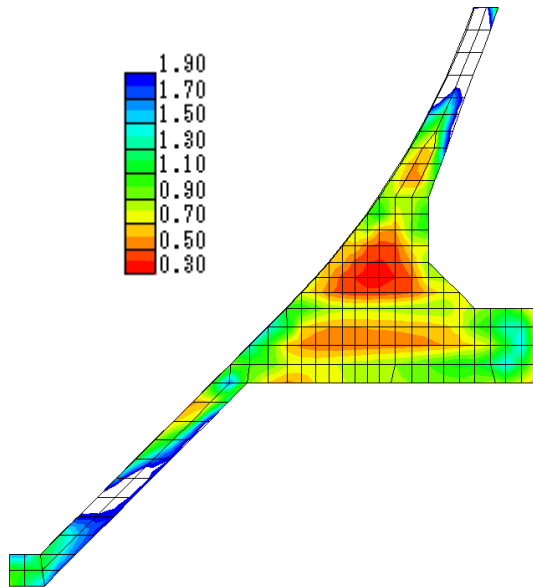


図 - 16 ひび割れ指数 (高炉セメント)

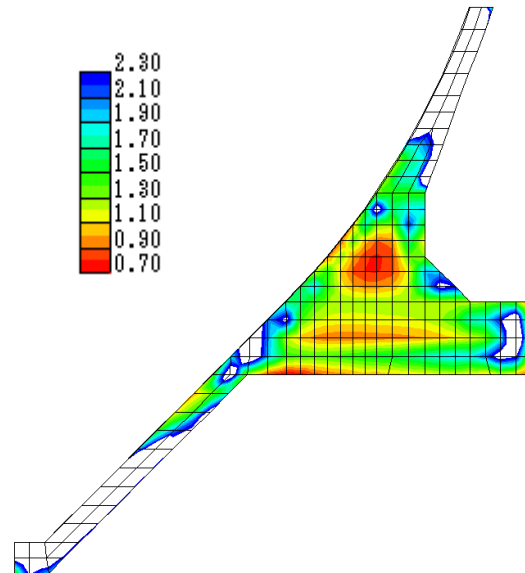


図 - 17 ひび割れ指数 (低発熱セメント)

表 - 8 ひび割れ指数

		リング基礎		リングハンチ		側壁	
		内表面	内部	内表面	内部	内表面	内部
ひび割れ指数	高炉	0.86	0.54	0.59	0.38	0.57	0.55
	低熱	1.56	0.94	0.79	0.78	1.04	1.64

#### 4. まとめ

マスコン対策として低発熱セメントを使用することの効果を確認できた。しかしながら低発熱セメントはコストが高い、強度発現に時間がかかるため工程に影響を及ぼす等の問題を有している。マスコン対策には低発熱セメントの使用以外にクーリング、養生条件の改善、膨張材の使用、モデレートプレストレスング、打設時期の変更等多様な方法がある。今回は試設計ということでセメントの種類のみに着目したが、実施工においては費用対効果を考慮し、最適なひび割れ対策を行う必要がある。

#### 参考文献

- 1) コンクリート標準示方書(施工編)2002年制定 土木学会