

PC LNGタンク基礎版の温度ひび割れに関する解析検討

Study on Numerical Analysis of Cracks in PC LNG Storage Tank Foundation Slab Caused by Thermal Stress

宮 崎 賢太郎 ピーシー橋梁株式会社九州支店技術部

中 村 定 明 ピーシー橋梁株式会社本社技術部 主任研究員 技術士（建設部門）

本稿は、PC LNG 地上式貯槽基礎版の温度応力の数値解析およびひび割れ制御の方法について検討し、設計および施工上の対策について論じたものである。本研究の範囲では、基礎版の施工時での温度ひび割れについては、発生自体を抑えるより、ひび割れ幅を制御する方がより現実的であることが分かった。また、施工時の温度応力によるひび割れ幅を制御する場合の対策についても言及したが、ひび割れ指数とひび割れ幅の関係を定量的に表すには、ひび割れ幅を数値解析によって精度良く算出する技術の開発が必要であり、今後の課題である。

The numerical analysis study was conducted on how to control the crack width of foundation slab of the PC LNG storage tanks caused by thermal stresses. Preventing cracking was difficult, but controlling crack width was possible through the analyses. Furthermore, several measures to control crack width were proposed in this study. More detailed analyses using such as non-linear FEM models are necessary to calculate precise crack width.

1. 緒 言

LNG（液化天然ガス）は、天然に存在するメタン（ CH_4 ）を主成分とする天然ガスを低温技術によって -160 まで冷却して液体としたもので、無色・無臭である。その液体は、比重が $0.42 \sim 0.48$ の範囲であり、体積が気体時の約 $1/600$ となるため、一度に大量のガスを輸送・貯蔵することが可能となり、消費地が生産地から遠く離れた場合でも、ほかのエネルギーに比べて経済的となる。また、LNG は液化する際に硫黄分などの不純物を除去することで、燃焼しても硫酸化物や窒素酸化物の発生が少なく、環境に優しい安全なエネルギーであり、現在世界中で最も注目されているエネルギーである。

PC LNG 地上式貯槽（以下、PC LNG タンク）の構造について言及すると、その設計・施工に関する国内外の指針は、かなり整備されてきている。例えば、国内では社団法人日本ガス協会の「LNG 地上式貯槽指針」⁽¹⁾、また国外においては英国の BS777 “Flat-bottomed, vertical, cylindrical storage tanks for low temperature service”⁽²⁾ が代表的で、現在までに数十基の PC LNG タンクが施工されている。これらの指針では、PC LNG タンクの基礎版の設計・施工は合理的かつ安全に行われなければならないとし、通常運転時においてひび割れ幅制御を行うことを原則としている。一般に PC LNG タンクの基礎版は厚さが 1.0 m 程度であり、 500 m^3 にも及びコンクリートを一度

に打設するため、一般にマスコンクリートの適用を受ける。そこで、十分に耐久的な基礎版の設計および施工を行うには、施工時におけるコンクリートの水和熱による温度応力を把握し、温度ひび割れに対する対策を講じる必要があるが、現状の設計・施工指針では明確な対応策について言及しているとはいえない。本稿では、施工時の温度応力を数値解析し、PC LNG タンク基礎版の温度応力に対する現状の課題について整理し、その対策について検討した結果を報告する。

2. 基礎版の要求性能と課題

PC LNG タンクの基礎版は、通常運転時に長期にわたる耐久性が要求されることから、部材に発生するひび割れによって鋼材の腐食が生じ、その使用目的が損なわれないようにしなければならない。そのため、鉄筋コンクリート製の基礎版においてはひび割れ幅を制御して、要求性能を満足させる必要がある。

前川の研究⁽³⁾では、部材厚さ 25 cm および 50 cm 、圧力 0.1 MPa の条件下で、液体窒素（ LN_2 ）を用いて漏液実験を実施している。その結果、ひび割れ幅が 0.1 mm 以内であれば、ひび割れが貫通していても液体が漏れることがないこと、また液体が接している部分のひび割れ幅が 0.2 mm 以内で貫通ひび割れでなければ、液体が漏れることがないことが示され、その現象を数値解析によっても検証している。

また、北村の研究⁽⁴⁾では、基礎版の許容ひび割れ幅は、環境条件から鋼材が腐食しない限界値として $W_a = 0.004 \cdot C$ (C : かぶり (mm)) と設定している。例えば、基礎版のかぶりを一般的な 50 mm とすると $W_a = 0.2$ mm となり、前川の示した曲げひび割れの漏液限界値と一致する。一方、海外の規準⁽²⁾では、基礎版の上にはセカンダリバリア (下部保冷構造) として 9% ニッケル鋼が敷設されるため、漏液時においても直接基礎版のコンクリートに液化ガスが接触しないことから、通常運転時での許容ひび割れ幅を 0.3 mm まで許容している場合もある。

ここで、通常運転時の許容ひび割れ幅として、上記の基準を遵守するためには、施工時の温度ひび割れをある制限値以内に抑制することが必要となる。例えば、文献 (5) ではコンクリート標準示方書 [施工編]⁽⁶⁾ に準じ、施工時の温度応力によるひび割れ指数を 1.5 以上とすることを推奨している。ここで、同示方書では、ひび割れ指数 I_{cr} とひび割れ防止に関する要求性能との関連を以下のように示している。

- ・ ひび割れを防止したい場合 $I_{cr} \quad 1.75$
- ・ ひび割れの発生をできるだけ制限したい場合

$$I_{cr} \quad 1.45$$

- ・ 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 $I_{cr} \quad 1.0$

この関係から、 $I_{cr} \quad 1.5$ は、ひび割れの発生をできるだけ制限したい場合となる。海外の規準では、ひび割れ指数の考え方は示されていないが、施工時の温度ひび割れと要求性能とを明確にするという観点からは重要な指標であると考えられる。

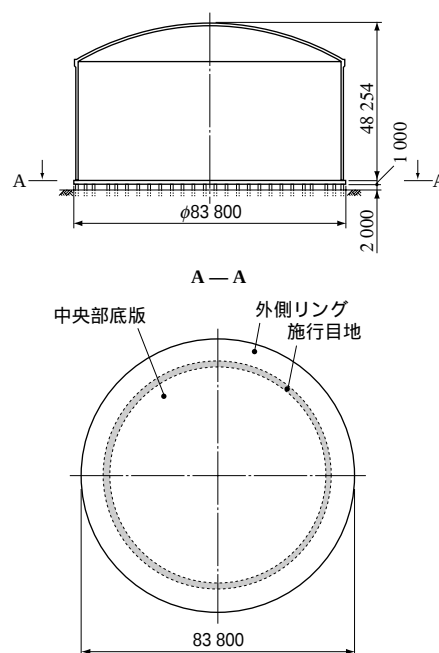
3. 温度応力解析および温度ひび割れに関する考察

3.1 概 要

本章では、PC LNG タンクの熱伝導解析および熱応力解析を実施し、施工時の温度応力によるひび割れ発生の検討とその対策方法についての検討を行う。

3.2 構造概要

本稿の検討に用いた PC LNG タンクの構造を第 1 図に示す。このタンクは、直径 83.8 m、高さ 48.3 m で、底板コンクリートの厚さは、標準部で 1.0 m である。また基礎版は、直径 1.0 m の杭で、地盤面から高さ 2.0 m に支持されている高床式構造である。側壁は、周方向および鉛直方向にプレストレスを導入した PC 構造であり、基礎版は RC 構造である。



第 1 図 PC LNG タンクの構造 (単位: mm)
Fig. 1 Structure of PC storage tank (unit: mm)

3.3 ブロック割および施工工程

基礎版のコンクリート打設のブロック割を第 2 図に示す。このブロック割は、1 日のコンクリート打設量を 500 m³ として決定したものである。コンクリートの打設は、ステージ-A ~ ステージ-F の外側リングの打設を行い、その後中央部の基礎版ステージ-1 ~ ステージ-9 の打設を行うものである。最終的にステージ-10 として、接合目地部のコンクリート打設を行って基礎版の施工を終了する。本研究では、以下に示す 6 ケースについて解析を行った。

ケース-1: 隣接施工ブロックの材齢差を最小 (最大 6 日)

ケース-2: ケース-1 の施工順序と同じで、隣接施工ブロックの材齢差を 7 日以上 (最大 10 日)

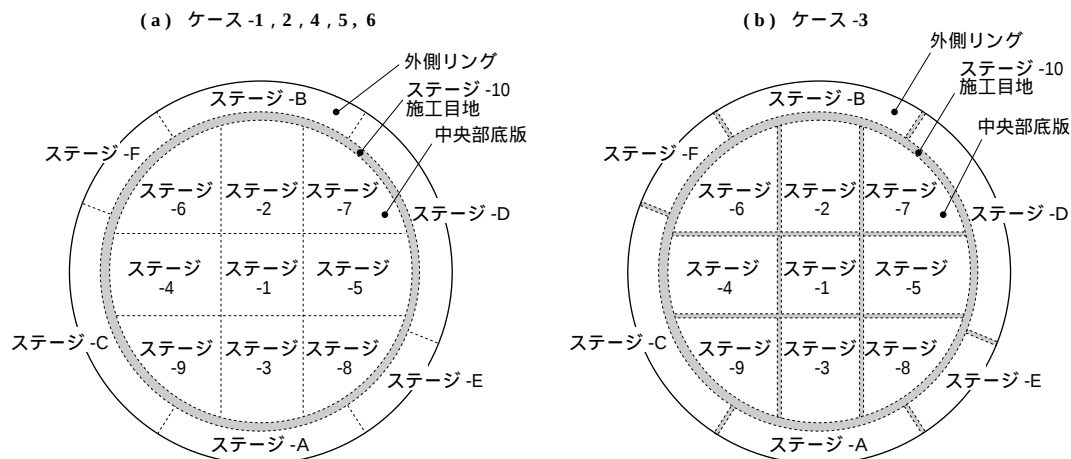
ケース-3: ケース-1 をベースに中央スラブのブロック間に施工目地を設けた場合。なお、この施工目地部には、膨張コンクリートを使用した。

ケース-4: ケース-1 をベースに実験値による断熱温度上昇値に変更

ケース-5: ケース-4 をベースに乾燥収縮を考慮せず (参考値)

ケース-6: ケース-5 をベースにコンクリートの打込時温度を 32 から 22 に変更 (参考値)

ここで、ケース-1 ~ ケース-3 は、断熱温度上昇を高炉セメント B 種とした土木学会式⁽⁶⁾ によって計算した場合で、ケース-4 ~ ケース-6 は断熱温度上昇を実配合による



第 2 図 基礎版のコンクリート打設用ブロック割
Fig. 2 Segment of base slab for casting concrete

断熱温度上昇試験結果に基づいて計算した場合である。ただし、ケース-5およびケース-6は、乾燥収縮および断熱温度上昇の影響をみるため、実際の基礎版の状態とは異なる設定のため参考値とした。

第 1 表に各解析ケースに対する施工工程をベースにした各ブロック完成までの経過日数を示した。ここで、外側リングの A ブロック施工完成日を 0 日として、各ブロック完成までの日数を計算したものである。

3.4 解析モデル

解析モデルを第 3 図に、ケース-1の場合の解析ステップおよび熱伝達率の設定値を第 4 図に示す。解析モデルは、構造物の対称性を考慮して 1/4 モデルとした。熱伝導

解析および温度応力解析には、三次元温度応力解析ソフト「ASTEA MACS Ver.3」を使用した。杭は基礎版下面から長さ 8.228 m とし、直径 1.0 m の円形断面と等価な正方形断面（一辺 0.876 m）でモデル化した。拘束条件としては、杭下端を固定とし、基礎版は対称性を考慮して x 方向あるいは y 方向の一方方向を拘束した。

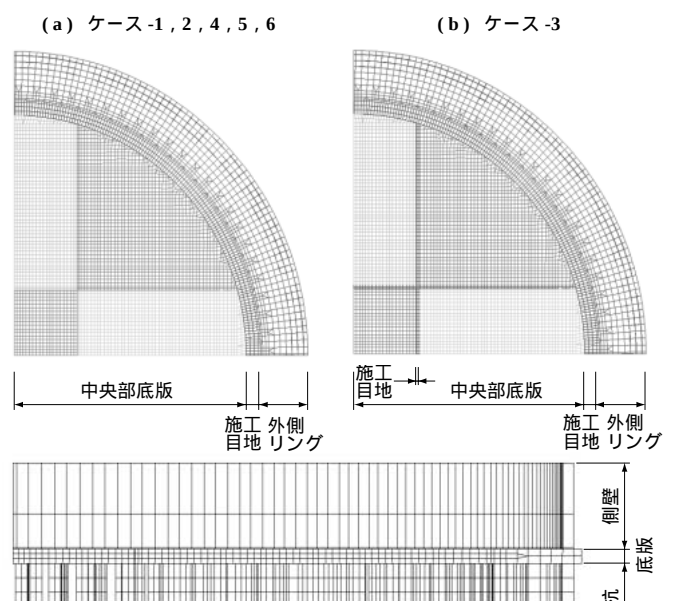
3.5 材料特性

コンクリートの配合条件を次に示す。

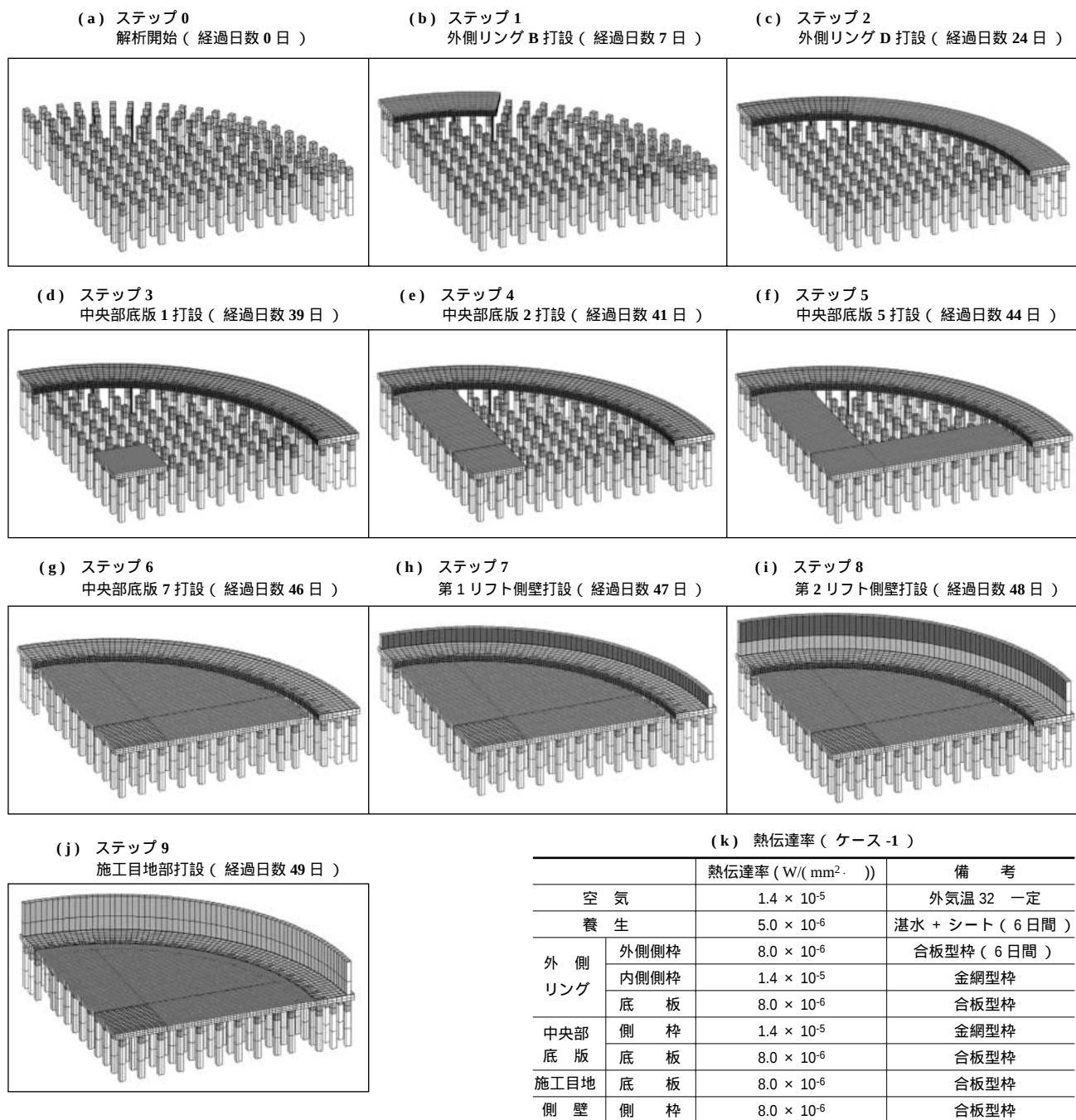
設計基準強度	40 N/mm ² (角柱強度)
	32 N/mm ² (円柱強度)
セメント種類	高炉セメント
水セメント比	36%
単位セメント量	450 kg/m ³

第 1 表 施工工程（経過日数）
Table 1 Construction schedule (Dates after construction start)

	ケース -1	ケース -2	ケース -3	ケース -4	ケース -5	ケース -6
ステージ -A	0	0	0	0	0	0
ステージ -B	7	7	7	7	7	7
ステージ -C	23	23	23	23	23	23
ステージ -D	24	24	24	24	24	24
ステージ -E	26	31	26	26	26	26
ステージ -F	27	32	27	27	27	27
外側リングの施工目地	—	—	34	—	—	—
ステージ -1	39	39	39	39	39	39
ステージ -2	41	46	41	41	41	41
ステージ -3	42	47	42	42	42	42
ステージ -4	43	48	43	43	43	43
ステージ -5	44	49	44	44	44	44
ステージ -6	45	54	45	45	45	45
ステージ -7	46	56	46	46	46	46
ステージ -8	47	57	47	47	47	47
ステージ -9	48	58	48	48	48	48
ステージ -10 (施工目地)	49	65	49	49	49	49



第 3 図 解析モデル
Fig. 3 Analytical model



第 4 図 解析ステップ図および熱伝達率 (ケース -1)
Fig. 4 Construction sequences for analyses and heat transfer coefficient in Case-1

高炉スラグ置換率 70%
膨張材使用量 30 kg/m^3 (ただし単位セメント量に対して内割)

硬化コンクリートの特性値を第 2 表およびコンクリートの熱特性を第 3 表に示す。すでに述べたように、ケース -1 ~ ケース -3 の断熱温度上昇については、土木学会式⁽⁶⁾を用いて行った。また、ケース -4 ~ ケース -6 については、上記の配合による断熱温度試験に基づく結果から求めたものである。両方の結果を第 5 図に示す。ここで、土木学会

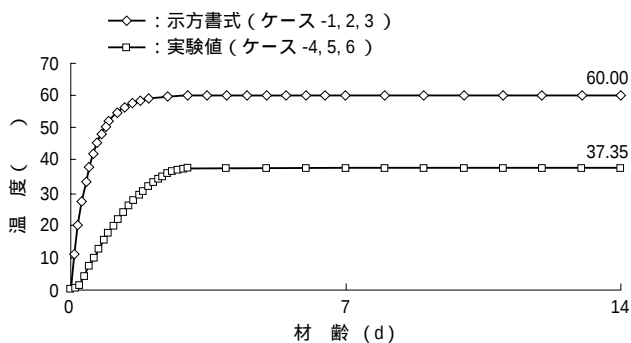
式による計算では、高炉スラグ置換率 70%の設定値がなかったため、高炉セメント B 種の値を使用した。高炉セメント B 種のスラグ置換率は 30 ~ 60%とばらつきが大きく、土木学会の設定値もその平均値であると考えられる。したがって、第 5 図に示されるように断熱温度上昇の土木学会式による値は 60 で、断熱温度上昇試験でのピーク値 37.35 とかなり異なった結果を示した。断熱温度上昇試験結果には、試験方法によるばらつきも含まれるものの、より実際のコンクリートに近いデータであると考えられる。

第2表 硬化コンクリートの特性値
Table 2 Characteristic value of hardened concrete

項 目	単 位	値 / 計算式	備 考
比 重	—	2.40	欧州基準
圧 縮 強 度 (弱材齢時)	N/mm ²	$f'_c(t) = \{t / (6.2 + 0.93t)\} \cdot 1.15 \cdot f'_{ck}$	土木学会
引 張 強 度	N/mm ²	$f_t(t) = -0.35 \sqrt{f'_c(t)}$	土木学会
弾 性 係 数	N/mm ²	$E_e = \phi(t) \times 4700 \times \sqrt{f'_c(t)}$	土木学会
ク リ ー プ 係 数	—	0.73 (材齢3日)	土木学会
		1.00 (材齢5日)	土木学会
ポ ア ソ ン 比	—	0.2	土木学会

第3表 コンクリートの熱特性
Table 3 Heat properties of concrete

項 目	単 位	値 / 計算式		備 考
		ケース -1 ~ 5	ケース -6	
比 熱	J / (kg · °C)	0.920×10^3		設計仕様書
熱 伝 導 率	W / (mm · °C)	1.900×10^{-3}		設計仕様書
コンクリートの 打込時温度		32	22	設計仕様書
断熱温度上昇	—	$Q(t) = Q_{\infty}(1 - e^{-\alpha t})$	実験による	土木学会
熱膨張係数	1/	10×10^{-6}		土木学会



第5図 断熱温度上昇
Fig. 5 Adiabatic concrete temperature rise

3.6 コンクリートの収縮特性

コンクリートの収縮特性として、乾燥収縮および自己収縮の影響を考慮した。施工目地部には、膨張コンクリートを使用するため、その膨張特性について以下のように設定した。

(1) 乾燥収縮

コンクリートの乾燥収縮は、土木学会式((1)式)⁽⁷⁾によって算出した。ここで、コンクリートの乾燥開始材齢は6日(シート養生)とした。

$$\epsilon'_{cs}(t, t_0) = [1 - \exp\{-0.108(t - t_0)^{0.56}\}] \epsilon'_{sh} \dots (1)$$

ここに、

$$\epsilon'_{sh} = -50 + 78[1 - \exp(RH/100)] + 38 \log_e W - 5[\log_e(V/S)/10]^2$$

ϵ'_{sh} : 乾燥収縮ひずみの最終値 ($\times 10^{-5}$)

$\epsilon'_{cs}(t, t_0)$: 材齢 t_0 から t までの収縮ひずみ ($\times 10^{-5}$)

RH : 相対湿度 = 80%

W : 単位水量 = 162 kg/m³

V : コンクリート体積 (mm³)

S : 外気に接する面積 (mm²)

t_0 : 乾燥開始材齢 = 6日

(2) 自己収縮

コンクリートの自己収縮は(2)式⁽⁷⁾によって算出した。

$$\epsilon'_c(t) = \gamma \epsilon'_{co} \beta(t) \dots (2)$$

ここに、

$$\epsilon'_{co} = 3070 \exp\{-7.2(W/B)\}$$

$$\beta(t) = 1 - \exp\{-a(t - t_0)^b\}$$

ϵ'_{co} : 自己収縮ひずみの最終値 ($\times 10^{-6}$)

$\epsilon'_c(t)$: 材齢 t での自己収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)

γ : 結合材および混和材の種類の影響を表す係数 = 1.18

$\beta(t)$: 自己収縮の進行を表す関数

W/B : 水結合材比

a, b : 水結合材比より定まる定数

$$a = 0.30, b = 0.62$$

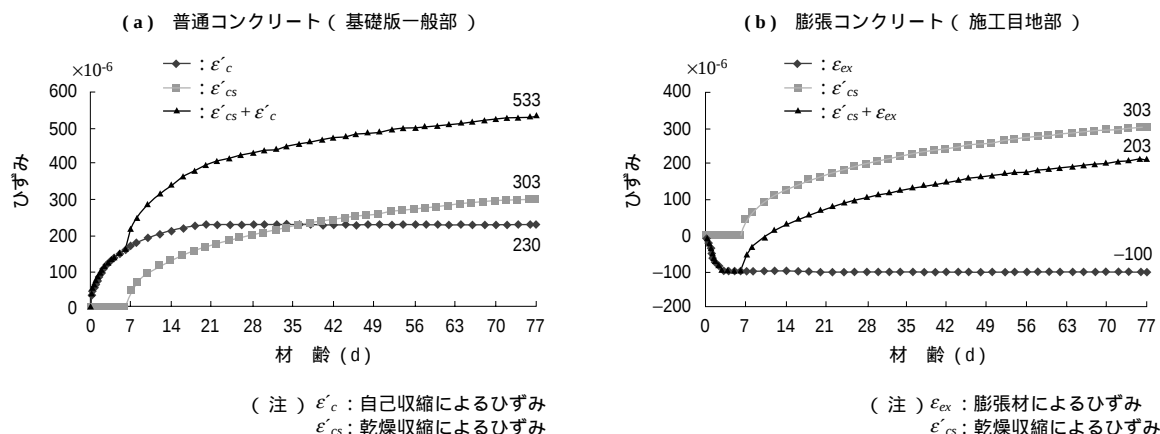
(3) 膨張材効果

膨張材の使用によるコンクリートの膨張量は、一般に実配合による試験で決定するが、ここでは目安値として、最終膨張量 $\epsilon_{ex} = -100 \times 10^{-6}$ として評価した。

第6図に解析に用いる(1)~(3)の各ひずみ履歴を示す。この図に示されるように、普通コンクリートでは自己収縮が 230×10^{-6} 、乾燥収縮が 303×10^{-6} であり、全体で 500×10^{-6} を超える収縮ひずみを生じている。一方、目地部に使用した膨張コンクリートでは、収縮量は乾燥収縮 303×10^{-6} 、膨張ひずみ -100×10^{-6} で、全体ひずみは 203×10^{-6} となり、普通コンクリートの1/2以下の収縮量となる。このように、収縮量を制限できるということからは膨張コンクリートの使用は効果的であると考えられる。

3.7 熱伝導解析結果

各解析ケースにおける各ブロックでの最高到達温度の比較を第4表に示す。この表に示されているように断熱温度上昇を土木学会式で算出したケース-1~ケース-3では、最高温度は約80に達しているが、各解析ケースでの差は



第 6 図 コンクリートのひずみ履歴
 Fig. 6 Strain changes in concrete due to shrinkage

第 4 表 各ブロックでの最高到達温度 (単位:)
 Table 4 Maximum temperature at each segment (unit:)

	ケース -1	ケース -2	ケース -3	ケース -4	ケース -5	ケース -6
ステージ -1	79.2	79.2	79.5	56.7	56.7	51.9
ステージ -5	79.2	79.2	78.6	57.8	57.8	52.9
外側リング	82.1	82.1	82.1	56.4	56.4	51.7
施工目地 -1	80.0	79.3	78.9	57.1	57.1	53.0
施工目地 -2	—	—	62.1	—	—	—

(注) 施工目地 -1 は、外側リングと中央スラブの間の施工目地、施工目地 -2 は中央スラブの各ブロック間の施工目地を示す。詳細は、第 2 図を参照のこと。

ほとんどみられない。一方、ケース -4 ~ ケース -6 の実験によって求めた断熱温度上昇式から求めた基礎版の最高温度は、52 ~ 58 で、土木学会式に比べて約 20 低い結果となっている。この差は、ほぼ断熱温度上昇の計算値と実験値との差に等しくなっている。すでに述べたが、高炉セメントのような混合セメントでは、混和材の品質および添加量のばらつきによって、断熱温度を仮定することが難しい。特に海外プロジェクトのように積極的に混合セメントを使用する場合には、断熱温度上昇試験を実施し、その熱特性を十分に把握して温度解析を行うことが、実施工における温度ひび割れに関する解析精度を上げるために重要となってくる。

3. 8 熱応力解析結果

(1) 最大主引張応力度

第 5 表に各解析ケースにおける主要断面での最大主引張応力度の結果を示す。この値は、第 4 図に示す各施工段階における温度応力による主引張応力度から最大値をピックアップしたものである。また、第 7 図には各検討断面における最大主引張応力度と解析ケースとの関係を示す。

ケース -2 は、隣接ブロックとの材齢差を 7 日以上としたケースであるが、材齢差を最小 (6 日以下) としたほかのケースに比べて最大主引張応力度の値が卓越していることが分かる。これは、隣接ブロックの材齢差が大きいくほど、先に打設したコンクリートによる拘束効果が大きくなり、新コンクリート側に大きな引張応力が発生するためである。この解析結果からも、隣接ブロックの材齢差をできるだけ小さくすることが、温度ひび割れを抑制するうえで重要であることが分かる。

また、ケース -3 はケース -1 に比べて基礎版の中間部の引張応力度が小さくなるが、逆に外側リング部との施工目地部での引張応力は大きくなる傾向がみられる。例えば、第 7 図 - (e) に示すステージ -7 では、ケース -3 の各断面で 1 ~ 2 N/mm² 発生応力度が小さくなっているが、- (f) ステージ -10 の打継部では逆にケース -1 より引張応力は大きくなっている。この結果、中間床版の施工目地は、ブロック内の引張応力を小さくすることはできるが、逆に目地部に大きな引張応力を発生させることが分かった。

さらに、ケース -4 ~ ケース -6 はケース -1 ~ ケース -3 に比べて断熱温度上昇値が約 20 低い値を用いたため、発生する引張応力度もかなり小さい値となっている。このように、コンクリートの水和熱を抑えることで、発生応力を小さくすることが可能である。

以上の熱応力解析の結果から、中間床版部に発生する主引張応力を抑制するには、隣接する施工ブロックの材齢差を小さくすること、およびコンクリートの水和熱を下げるのが最も有効な方法であると考えられる。

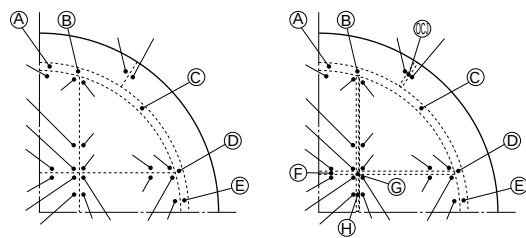
第 5 表 各解析ケースにおける最大主引張応力度のピックアップ (単位: N/mm²)

Table 5 Maximum principal stresses of each analytical case (unit: N/mm²)

ケース -1: 材齢差最小
 ケース -2: 材齢差 7 日以上
 ケース -3: ケース -1 をベースに中央部底版のブロック間に目地を設ける
 ケース -4: ケース -1 をベースに断熱温度上昇量を実験値に変更
 ケース -5: ケース -4 をベースに乾燥収縮を無視
 ケース -6: ケース -5 をベースにコンクリート打込み温度を 32 → 22 に変更

ケース -1, 2, 4, 5, 6

ケース -3



解析値 (最大応力)

節点	ケース -1			ケース -2			ケース -3			ケース -4			ケース -5			ケース -6		
	σ_1	σ_x	σ_y	σ_1	σ_x	σ_y	σ_1	σ_x	σ_y	σ_1	σ_x	σ_y	σ_1	σ_x	σ_y	σ_1	σ_x	σ_y
◎	3.64	2.29	3.55	3.64	2.39	3.55	3.54	2.51	3.48	2.34	1.65	1.75	1.52	1.09	1.36	1.17	0.85	1.03
	5.04	4.58	3.01	4.82	4.79	3.08	3.39	2.59	2.59	4.92	4.14	3.09	3.02	2.69	1.90	2.34	2.10	1.45
	—	—	—	—	—	—	3.22	0.05	3.22	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	2.67	2.50	2.66	3.02	2.97	1.65	2.10	1.08	1.36	2.52	2.28	2.00	1.55	1.52	1.40	1.58	1.55	1.45
	2.30	2.10	1.88	5.15	3.70	2.58	2.64	1.94	1.45	2.06	1.80	1.24	1.43	1.11	0.84	1.28	1.01	0.77
	2.32	2.31	1.85	2.17	1.46	2.01	2.10	1.37	1.07	1.99	1.94	1.34	1.16	1.14	0.93	1.18	1.17	0.93
	2.47	2.47	2.29	4.49	4.38	2.07	1.19	1.09	1.19	2.06	2.06	1.72	1.24	1.08	1.23	1.25	0.57	1.25
	2.45	2.45	2.19	8.37	4.51	4.69	1.98	1.59	1.39	1.97	1.95	1.56	1.38	1.08	1.27	1.19	0.55	1.17
	3.27	2.88	3.27	2.56	1.79	2.55	1.36	1.35	0.90	2.58	2.52	2.51	2.01	1.37	1.99	2.19	1.01	2.18
	2.79	0.81	1.57	4.32	3.67	1.68	2.86	1.76	1.80	2.67	0.24	0.81	1.65	0.25	0.67	1.20	0.05	0.54
	1.56	0.99	1.55	4.63	4.62	1.78	1.78	1.50	1.75	1.26	0.45	1.22	0.77	0.45	0.77	0.56	0.22	0.55
	4.55	2.12	4.55	5.22	1.86	5.20	1.24	1.24	1.14	3.46	1.87	3.46	2.52	1.12	2.52	1.81	1.12	1.81
	4.57	2.20	4.52	9.20	6.25	4.60	2.56	1.77	1.92	3.57	1.71	3.55	2.64	1.46	2.58	2.02	1.34	1.97
	3.51	2.78	3.50	3.48	2.85	2.14	1.69	1.38	1.39	3.01	2.47	2.88	1.86	1.53	1.68	1.84	1.54	1.27
	3.07	2.43	0.22	3.59	1.22	2.92	2.87	1.83	1.80	3.02	2.22	0.38	1.20	0.81	0.00	0.91	0.67	0.06
	2.32	2.30	0.77	3.42	1.44	3.40	1.46	1.46	1.18	1.87	1.85	0.51	0.86	0.85	0.00	0.63	0.62	0.07
	6.04	1.55	4.81	7.31	3.99	4.14	3.85	1.87	2.80	4.60	1.10	3.89	3.19	0.44	2.40	2.17	0.06	1.79
	4.34	2.93	4.15	4.58	2.52	4.56	2.27	1.69	2.11	3.34	2.48	3.06	3.29	1.42	2.17	1.55	0.99	1.42
	4.75	2.64	4.46	5.02	3.17	4.07	3.33	2.12	2.27	4.00	2.17	3.44	2.76	1.17	2.49	2.20	0.67	1.80
	3.45	2.91	3.44	5.43	4.13	2.55	2.90	2.45	1.44	2.79	2.14	2.78	1.74	1.28	1.68	1.41	0.71	1.20
	3.48	3.31	2.44	5.25	3.31	2.63	3.64	2.67	1.88	2.65	2.57	2.08	1.66	1.61	0.96	1.12	1.09	0.47
Ⓐ	4.59	4.43	1.30	5.55	5.48	0.85	5.48	5.41	0.83	1.98	1.77	0.81	3.37	3.27	0.57	2.15	2.04	0.35
Ⓑ	5.65	2.45	3.01	5.57	4.50	1.78	5.40	4.23	1.97	3.46	0.16	2.11	3.94	1.92	1.75	2.80	0.88	1.35
Ⓒ	3.04	2.36	2.91	4.81	3.13	3.13	4.72	3.07	3.08	2.23	0.81	1.30	2.20	1.77	2.10	1.43	1.05	1.35
Ⓓ	3.71	2.80	2.19	5.37	1.74	4.44	5.19	1.93	4.17	2.11	1.93	-0.08	2.97	1.71	1.91	1.95	1.31	0.86
Ⓔ	3.04	2.17	2.94	5.36	0.94	5.28	5.29	0.92	5.21	1.60	1.56	0.43	2.66	1.12	2.59	1.52	0.83	1.44
Ⓕ	—	—	—	—	—	—	3.34	3.34	-0.12	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ⓖ	—	—	—	—	—	—	2.79	2.22	2.15	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ⓗ	—	—	—	—	—	—	3.22	0.05	3.22	—	—	—	—	—	—	—	—	—

(注) σ_1 : 最大主引張応力度

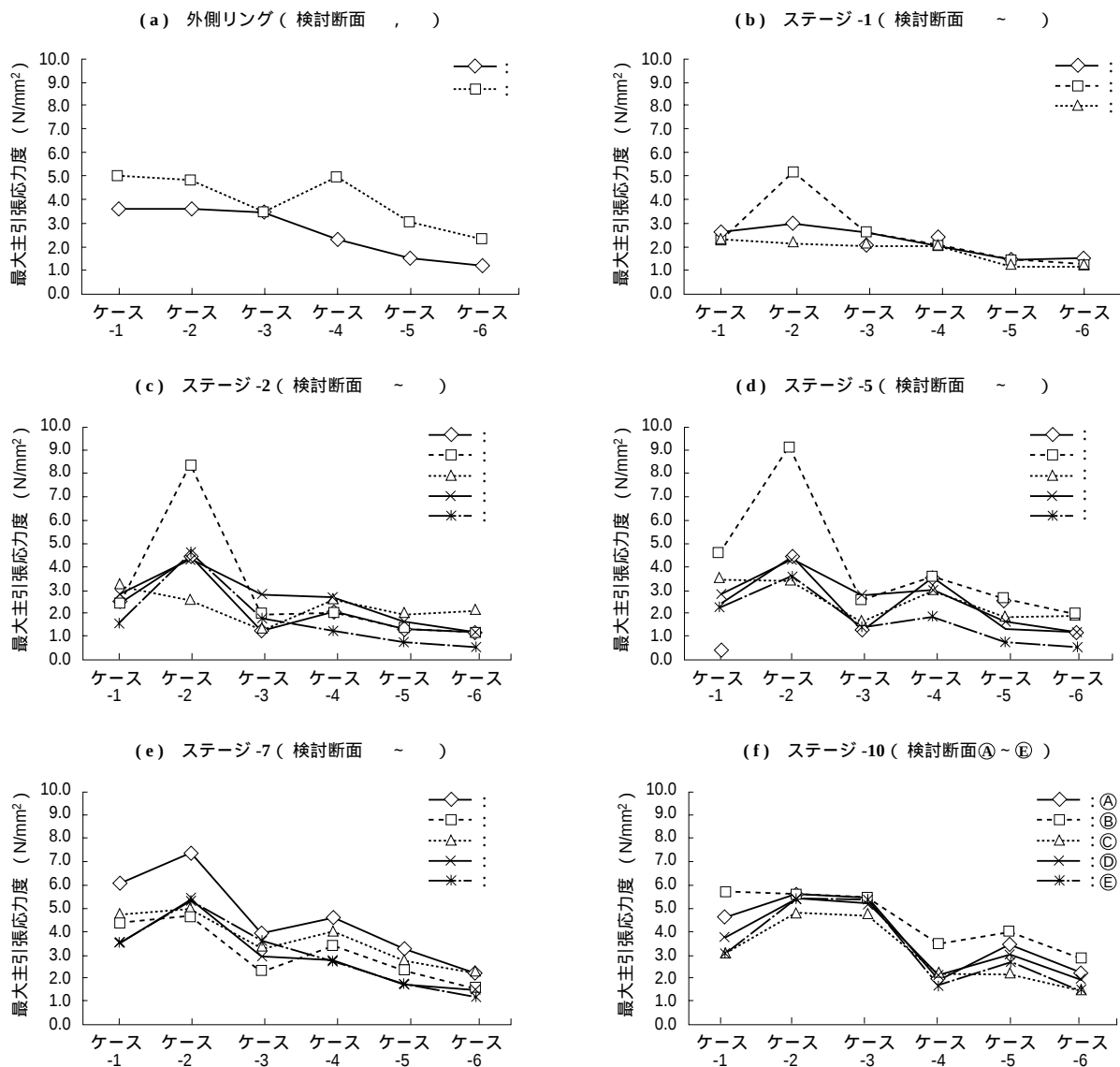
σ_x : x方向の応力度

σ_y : y方向の応力度

(2) ひび割れ指数

第 8 図に各解析ケースにおける主要断面でのひび割れ指数を示す。ここに示すひび割れ指数は、第 4 図に示す各解析ステップで求めたひび割れ指数の最小値をピックアップしたものである。この図に見られるように、ケース -1 ~ ケース -3 ではすべての主要断面でひび割れ指数 I_{cr} が 1.0 を下回った結果となり、過大なひび割れが発生する確率が高い。一方、ケース -4 では、および断面でひび割れ指数 I_{cr} は 1.0 を下回ったが、ほかの断面では 1.0 ~ 1.5 の間に位置している。 I_{cr} 1.5 を満足させるのは、ケース -5 あるいはケース -6 の場合であるが、乾燥収縮の影響は一般の構

造物では無視できないため、最も現場条件を反映した解析条件としては、ケース -4 であると考えられる。したがって、実構造物におけるひび割れ指数 I_{cr} は、1.0 ~ 1.5 の間におおむね入っており、コンクリート標準示方書での分類では、ひび割れの発生は許容するが、ひび割れ幅が過大とならないよう制御できる範囲と考えられる。しかし、現状の解析技術では、ひび割れ指数 I_{cr} とひび割れ幅の関係を精度良く表すことができていない。現在、非線形 FEM 解析によって、コンクリートの初期材齢時での温度応力によるひび割れの解析を検討中であり、今後の課題である。



(注) 検討断面位置は第6図を参照のこと。

第7図 主要断面の最大主引張応力
Fig. 7 Maximum principal stresses in main sections

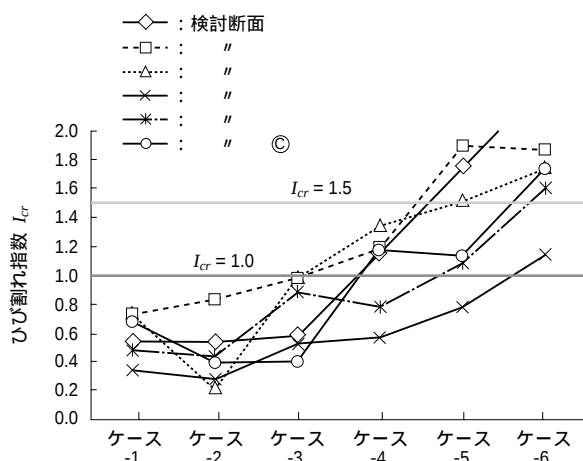
3.9 温度ひび割れ対策に関する考察

これまでの検討結果から、PC LNG タンクの温度ひび割れ対策について提案する。

- (1) 隣接する施工ブロックの材齢差が大きい程、温度ひび割れの影響を受けやすいことが分かった。本検討では、材齢差を最小とすることを考えて、最大6日の材齢差で計算を行ったが、基礎版の施工に当たっては、この材齢差を最小とするように施工計画を立てることが重要である。
- (2) コンクリートの水和熱を抑制することが、温度ひび割れを抑制するうえで最も重要である。国内であれば、低発熱型ポルトランドセメントの使用を推奨する。

また、国外プロジェクトの場合では、フライアッシュあるいはシリカフュームをセメントの代替として使用することを推奨する。高炉スラグも水和熱低減には有効な材料ではあるが、打設直後の収縮が大きく、コンクリートの弱材齢時にひび割れが入りやすいとの報告があるため、使用に当たっては十分な検討が必要である。

- (3) 温度解析からひび割れ指数を推定する場合、使用するコンクリートの断熱温度上昇の試験値を使用することが望ましい。特に、フライアッシュやシリカフュームを混合する場合には、温度発現のばらつきが大きいため、正確なデータを得るためには、現地での断熱



第 8 図 主要断面のひび割れ指数
Fig. 8 Safety factor for cracking in main sections

温度上昇試験によって発熱特性を把握することが重要となる。また、施工計画の段階から断熱温度上昇試験を計画しておくことも必要である。

- (4) ひび割れ幅の制御方法について、現状では温度応力およびひび割れ指数を算出することができるが、発生するひび割れ幅や鉄筋応力度を直接推定することは困難である。今後、施工時温度応力によって発生する鉄筋応力と残存鉄筋応力を非線形 FEM 解析などによって推定し、通常運転時の設計に反映させることが必要であり、より高度な解析技術の開発が必要となり、今後の課題と考えている。

4. 結 言

本稿は、PC LNGタンク基礎版の温度ひび割れ制御方法について、施工ステップを考慮した三次元温度応力解析を

実施し、基礎版に発生する最大主引張応力度およびひび割れ指数を求めた。これらの結果を基に、基礎版の合理的なひび割れ対策についての提案を行った。基礎版の温度ひび割れの制御方法についてさらに解析精度を上げ、施工時から通常運転時まで一貫した設計システムでひび割れ幅を制御する方法についての検討が今後の課題である。

参 考 文 献

- (1) 社団法人日本ガス協会、ガス工作物等技術基準調査委員会：LNG 地上式貯槽指針（改訂版） JGA 指-108-02 2002 年
- (2) BSI：Flat-bottomed, vertical, cylindrical storage tanks for low temperature service, Part 1 Guide to the general provisions applying for design, construction, installation and operation, BS777 (1993)
- (3) 前川宏一：低温液化ガス用コンクリート部材の貯液性能に関する研究 - その 1, その 2 - 土木学会第 45 回年次学術講演会 1990 年
- (4) 北村八朗：PCLNG 貯槽の開発 東京大学学位論文 1999 年 pp.191 - 192
- (5) 財団法人天然ガス導入促進センター：プレストレストコンクリート LNG 貯槽技術開発調査報告書 1990 年 pp.53 - 54
- (6) 社団法人土木学会：コンクリート標準示方書 [施工編] 2002 年 pp.41 - 44
- (7) 社団法人土木学会：コンクリート標準示方書 [構造性能照査編] 2002 年 pp.30 - 34