

報告 LNG地下式貯槽底版コンクリートの温度ひび割れ対策検討に関する一考察

頃安 研吾^{*1}・岩崎 淳^{*2}・松井 淳^{*3}・根本 浩史^{*4}

要旨 : LNG 地下式貯槽の底版コンクリートは、部材厚が非常に厚いマスコンクリートとなるため、施工時における温度ひび割れの制御が重要な課題となる。東京ガス(株)扇島工場に建設中の TL22 LNG 地下式貯槽の底版コンクリートの施工では、低発熱・収縮抑制型高炉セメントの採用や、内部拘束応力の低減を目的とした保温養生を実施することで、温度ひび割れ発生を防止した。本報では、底版コンクリート施工時の温度や応力の計測結果を基に、温度応力解析の適切なモデル化手法を提案し、使用セメントの温度応力抑制効果を検証した。結果、従来の3成分系セメントに比べ、初期膨張による温度応力抑制効果が高いことが分かった。

キーワード : 温度応力解析, 底版コンクリート, 低発熱・収縮抑制型高炉セメント, LNG 地下式貯槽

1. はじめに

1969年にLNG(液化天然ガス)プロジェクトが日本に導入されて以降、安全で周囲の景観ともよく調和する貯槽設備としてLNG地下式貯槽(以下、地下タンクと称す)が各地で建設されている。地下タンクの躯体は側壁と底版を剛結構造とし、地下水圧による浮力を抑えるため、部材厚が大きくなり、大規模なマスコンクリートとなる。

マスコンクリートの施工では、セメントの水和熱に起因するコンクリートの温度変化や自己収縮に伴う体積変化によりひび割れが発生し、構造物の諸性能を低下させるといった課題がある。そのため、事前に温度ひび割れ照査を行った上で、適切な制御対策を講じる必要がある。

近年、温度ひび割れ照査は有限要素法を用いた温度解析および応力解析に基づいて行うのが標準的となっている。しかしながら、地下タンクの底版のように、コンクリートの打設に長時間を要する大規模マスコンクリートのひび割れ照査について、特に有限要素法における適切なモデル化について報告された事例は少ない。

また、本事例では底版コンクリートの温度ひび割れ対策として、内部拘束応力低減を目的とした保温養生を実施するとともに、ひび割れ抵抗性の向上を目的として開発された低発熱・収縮抑制型高炉セメント(以下、低発熱型高炉セメントと称す)を採用した。

本報では、施工時の温度や応力の計測結果を基に同定解析を実施し、温度応力解析における適切なモデル化の方法を提案したうえで、ひび割れ制御対策として採用した低発熱型高炉セメントのひび割れ制御効果について検証を行なった。

2. 地下タンクおよび底版コンクリートの概要

2.1 地下タンクの概要¹⁾

本報で対象とする地下タンクは、環境性に優れたエネルギーであるLNGの普及拡大のニーズに対応するため、東京ガス(株)扇島工場での4基目の地下タンクとして現在建設中である。

基本形状は、外圧が支配的となる地下構造物に最適な円筒形であり、内径、液深、屋根のライズ等の基本寸法は、工場内のレイアウト、地盤条件および経済性を考慮した上で決定している。地下タンクは、鉄筋コンクリート製の底版、側壁および屋根、金属製の薄膜メンブレン、保冷材等で構成される。図-1および表-1に地下タンクの概要を示す。

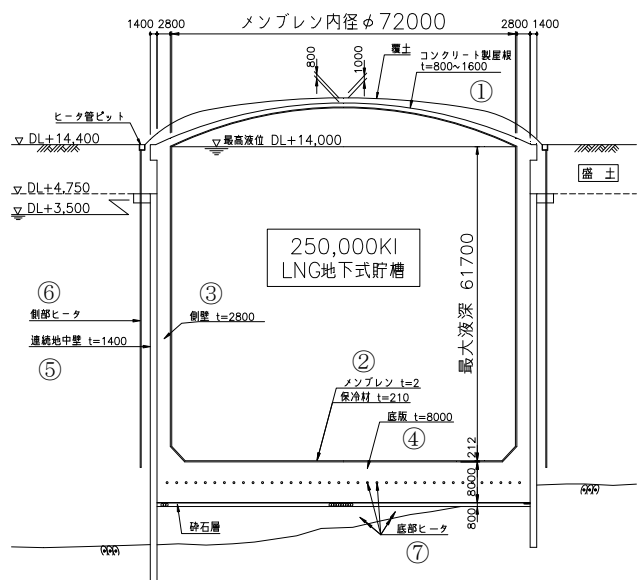


図-1 地下タンク概要図

*1 清水建設(株) 土木技術本部 基盤技術部 工修 (正会員)

*2 東京ガス(株) 生産エンジニアリング部 工修

*3 清水建設(株) 土木東京支店 土木第2部 工修

表-1 地下タンクの概要

貯蔵容量	250,000kL		
貯蔵液	液化天然ガス (LNG), 設計温度: -162°C, 設計圧力: 23.5kPa		
主要寸法	貯槽内径: 72,000mm (メンブレン内径), 最高液深: 61,700 mm		
基本形式	部 位	材 料・仕 様	目 的
	屋根	鉄筋コンクリート製 t=0.8~1.6m	耐圧
	メンブレン	SUS304 t=2 mm	液密・気密保持
	側壁	鉄筋コンクリート製 t=2.8m	耐圧
	底版	鉄筋コンクリート製 t=8.0m	耐圧
	連続地中壁	鉄筋コンクリート製 t=1.4m	仮設山留, 止水
	側部ヒータ	STPG370 Sch80	凍結領域制御
	底部ヒータ	STPG370 Sch40	凍結領域制御

2.2 底版コンクリートの概要

(1)底版コンクリートの概要および施工方法

底版コンクリートの打設概要を表-2 に示す。底版コンクリートは厚さ 8m, 面積が約 5,000m²であり, 図-2 に示すように 10 分割し, 10 班での同時打設とした。1 層の打設厚さは約 45cm で全 18 層となり, 39,050m³を 4 昼夜連続打設した。打設班 1 班につき, 地上部に圧送するためのポンプ車を, タンク内にディストリビューターとしてのポンプ車を配置し, タンク内のポンプ車のブーム筒先をコンクリート投入口に移動しながら打設した。

底版コンクリートは約 70m の高落差条件下での配管打設となるため, 配管の閉塞 が懸念された。このため, 閉塞の主要因であるコンクリートの自由落下をなくすように縦配管下端近傍にシャッターバルブを設置し, 圧送の停止時, 再開時にタイミング良くシャッターバルブを閉鎖, 開放することで, 自由落下による閉塞を防止した。

また, 底版コンクリートは, 底版上に設置する保冷材の設置精度から, 表面の不陸を±3mm 以内に収める必要があった。このため, 底版の上部には仕上げ精度向上を目的とした天端定規として, L 形のアンクル材を 1.5m 間隔で設置して仕上げることで, 精度を確保した。

(2) 底版コンクリートの仕様

底版コンクリートの仕様, 示方配合および使用材料を,

表-2 底版コンクリートの概要

項目	概要
形状	厚さ: 8m, 直径: 78m
コンクリート量	39,050 m ³
打設時期	H23.2.10 10時~2.14 10時
1時間当たりの打設量	約 500 m ³
プラント数	横浜市内: 4プラント 川崎市内: 5プラント 計 9プラント
アジテータラック延べ台数	9,208 台

表-3~5 にそれぞれ示す。コンクリートのスランプは, 確実な充てん性と圧送による流動性の低下を考慮し, 17 ±2.5cm と設定した。また, 空気量は, LNG の超低温による凍結融解抵抗性を確保するため, 5.0±1.0%とした。さらに, 長時間連続打設におけるコールドジョイント発生防止のため, 実機試験練りにおいて許容打重ね時間間

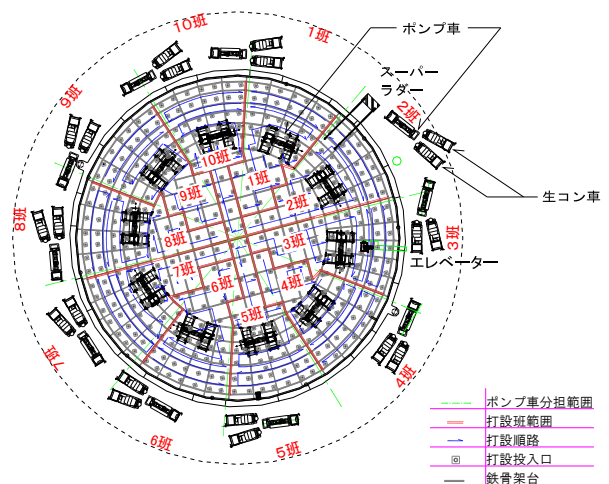


図-2 コンクリート打設班の分割

表-3 コンクリートの仕様

項目	仕様
設計基準強度	33N/mm ² (保証材齢 91 日)
スランプ	17±2.5cm
空気量	5.0±1.0%
ポンプ圧送性	加圧ブリーディング試験により, 標準曲線の範囲内にあること
ブリーディング率	5%程度以下
凝結性能	コールドジョイント防止を目的として, 7時間でプロクター貫入抵抗値 0.5N/mm ² 以下
温度ひび割れ制御	温度応力解析により, ひび割れ指数 1.0 以上

表-4 コンクリートの示方配合例

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 A
20	17±2.5	52	5.0±1.0	47.3	163	314	840	970	2.99

表-5 コンクリートの使用材料

材料	仕様	
セメント	低発熱型高炉セメント	密度 2.98g/cm ³
細骨材	山砂のみ：5 工場	表乾密度 2.50~2.70g/cm ³
	山砂及び砂岩砕砂：1 工場	
	山砂及び石灰砕砂：3 工場	
粗骨材	石灰砕石：9 工場	表乾密度 2.67~2.71g/cm ³
混和剤	高性能型 AE 減水剤標準形（I 種） （リグニンスルホン酸化合物およびポリカルボン酸エーテルの複合体）	

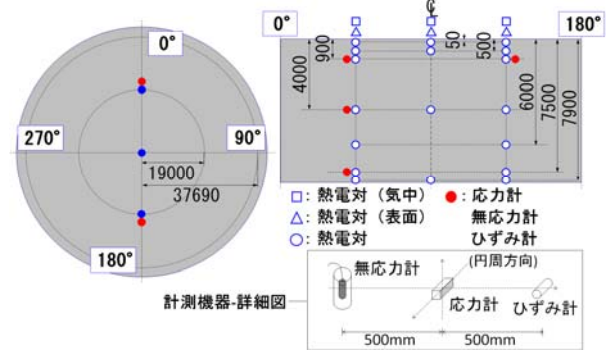


図-3 計測計器設置位置

隔を確認したところ7時間となり、計画打重ね時間間隔の4時間に対して3時間の余裕を持つことを確認した。

(3) 温度ひび割れ対策

底版は部材厚 8m のマスコンクリートであるため、コンクリート内部と表面の温度差による温度ひび割れの発生が懸念された。このため、内部と表面の温度差を低減するための保温養生と、水和熱を抑制して内部の温度を低減するために低発熱型高炉セメントを使用した。

保温養生に用いた養生材は、温度応力解析結果よりエアバッグ 4 枚とブルーシートとし、養生期間は 60 日以上で計画したが、実施工では底版内の温度計測を実施し、その結果に基づき養生材撤去時期を判断した。なお、側壁との連結鉄筋の周囲はエアバッグの敷設が困難であり、ビニル袋詰めした発泡スチロール緩衝材を用いた²⁾。

低発熱型高炉セメントは、「JIS R 5211 高炉セメント」の高炉セメント B 種に適合した上で、ひび割れ抑制効果が高い高炉セメントとして開発され、以下の特徴がある。

- a) 高炉スラグの分量が従来の高炉セメント B 種の約 42% に比べて約 58% と多い。
- b) セメントの比表面積が従来の高炉セメント B 種の約 3900cm²/g に比べて約 3300 cm²/g と小さい。
- c) SO₃ 量が従来の高炉セメント B 種の約 2% に比べて約 4% と多い。

これらの特徴により、水和熱低減効果と自己収縮低減効果があるためマスコンクリートにおけるひび割れ抑制に効果がある。従来、地下タンクの底版コンクリートにはひび割れ制御対策として、ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末とフライアッシュの 3 成分系セメントが主に用いられてきた。本事例で採用した低発熱型高炉セメントの温度ひび割れ制御効果は 4 章に示す。

3. 底版コンクリートの温度応力解析方法の検討

3.1 検討目的

有限要素法による温度解析および応力解析を行なう場合、コンクリートを連続的に打設して時間を要する場合でも、解析上は時間差を考慮せずに一度に打設するものと仮定するのが一般的である。しかし、今回の施工における事前検討で、一度に打設した場合と、4 日間かけて打設した場合の解析結果に差が生じる結果となった。そこで、底版コンクリート打設時にコンクリートの温度および応力を計測し、その結果を同定することにより、適切な温度応力解析のモデル化の方法について検討した。

3.2 計測の概要

図-3 に計測計器設置位置を示す。計測には熱電対、有効応力計、ひずみ計および無応力計を用いた。有効応力計は、計測された応力を解析結果と同定する目的で、また、ひずみ計および無応力計は解析条件となる有効ヤング係数および線膨張係数を算出する目的で設置した。計測結果は同定解析結果と合わせ、図-7~10 に示す。

3.3 同定解析による検討

温度および応力の同定解析は、2 次元軸対称の有限要素法を用いた非定常熱伝導解析および応力解析（使用プログラム：ASTEAMACS、(株)計算力学研究センター）により行なった。解析条件および解析結果を以下に示す。

(1) 解析条件

a) 解析ケース

解析ケースは、底版コンクリートを一度に 1 層で打設すると仮定した場合（ケース 1）と、4 日間かけて 18 層で打設する場合（ケース 2）の 2 ケースとした。解析モデルを図-4 に示す。

b) 解析条件

同定解析における解析条件を表-6 に示す。なお、線

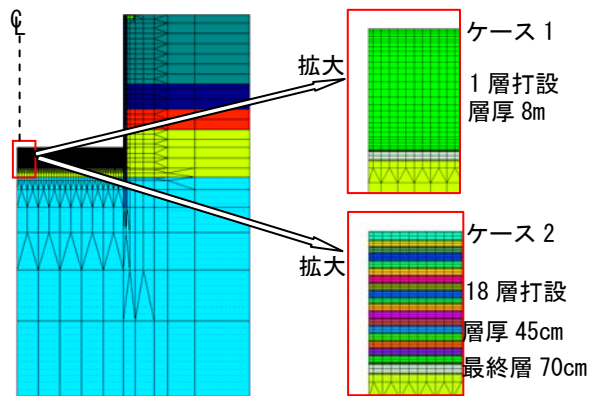


図-4 解析モデル

膨張係数および有効ヤング係数は計測結果をもとに以下に述べるように設定した。

c)線膨張係数

無応力計による自由ひずみと温度の計測結果の一例を図-5に、これらの結果から算定された線膨張係数の一覧を表-7にそれぞれ示す。

低発熱型高炉セメントは、SO₃量が多いことにより、材齢初期に膨張ひずみが発生する³⁾。自由ひずみの計測結果には、このような初期膨張や自己収縮ひずみの影響が含まれているため、材齢初期、温度上昇時および温度降下時の線膨張係数が異なる結果となっていると考えられる。また、初期膨張や自己収縮は直接測定していないが、これらの影響は線膨張係数に含まれるものと考え、同定解析では線膨張係数に計測データを用いた。

線膨張係数の測定は鉛直方向3点のみであり、連続的な線膨張係数の分布を把握できないため、本同定解析(ケース2)では、上部、中央部、下部で算出した線膨張係数を1~6層、7~12層、13~18層と均等に3分割し、それぞれ適用した。ケース1では、算定した初期膨張時、温度上昇時、温度降下時の線膨張係数およびその期間をそれぞれで平均し、同定解析に用いた。

d)有効ヤング係数

同定解析では、クリープ特性を考慮した有効ヤング係数の評価が重要である。コンクリート標準示方書・施工編では、クリープの影響を材齢依存型の補正係数を乗じることで表現し、また、ひび割れ制御指針では、最高温度に達する有効材齢により補正係数を設定している。さらに、江渡⁴⁾の研究では、応力経路依存型の補正係数を提案している。地下タンクのように大規模なマスコンクリートにおける有効ヤング係数を検討した事例は過去に見当たらない。ここでは参考文献⁴⁾に示される方法に従った。有効ヤング係数の算定には、無応力計で計測される自由ひずみとひずみ計で計測される実ひずみの差である拘束ひずみ、および有効応力計で計測される実測応力を用いて算定した。算定する際は、各実測値に含まれる測定誤差・ノイズの影響を軽減するため、材齢-実測値

表-6 同定解析条件

項目	条件
打設時期	H23.2.10 10時~2.14 10時
外気温	気象庁HPより横浜地区における観測データを使用
打設温度	打設時コンクリート温度 11℃
熱的定数	熱伝導率 2.7 W/m℃ 比熱 1.15 kJ/kg℃ 密度 2400 kg/m ³
断熱温度上昇特性	$Q(t) = Q_{\infty} [1 - \exp(-\alpha t)]$ に対して 終局断熱温度上昇量 Q_{∞} (℃) 事前検討時の42.4℃(断熱温度上昇試験結果)を温度同定により43.5℃に設定 温度上昇速度に関する定数 α 0.53(断熱温度上昇試験結果)
熱伝達率	2(W/m ² ℃)を標準として、温度同定により2~5(W/m ² ℃)に設定
圧縮強度 (N/mm ²)	$f'c(t) = t / (a + b \cdot t)$ a=0.194, b=0.0216 (圧縮試験結果より近似) JCI有効材齢で評価
ポアソン比	0.2

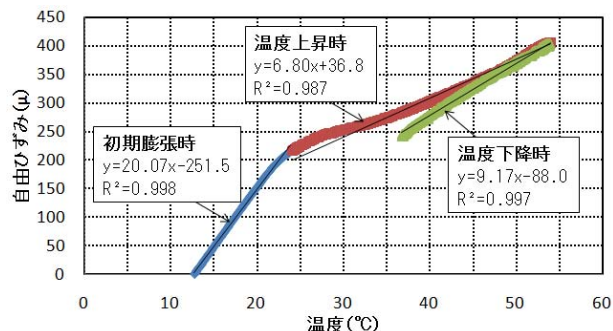


図-5 温度と自由ひずみの関係 (中央部の例)

表-7 線膨張係数の算定結果一覧

測定箇所	線膨張係数 (×10 ⁻⁶ 1/℃)		
	初期膨張時	温度上昇時	温度降下時
上部(y=900,0°)	18.81(1.1d)	6.80(4.1d)	8.12(43.7d)
中央(y=4000,0°)	20.07(1.1d)	6.80(18.3d)	9.17(144.7d)
下部(y=7500,0°)	20.97(1.3d)	5.51(6.1d)	12.08(158.5d)

※ () 内は期間 (日数) を示す

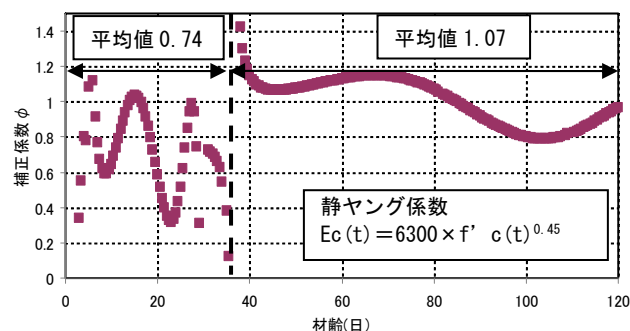


図-6 クリープ補正係数 (中央部の例)

表-8 クリープ補正係数算定結果一覧

測定箇所	クリープ補正係数	
	応力勾配変化時	応力勾配変化以降
上部(y=900, 0°)	1.19	1.13
中央(y=4000, 0°)	0.74	1.07
下部(y=7500, 0°)	0.67	0.79

の関係を多項式で回帰したうえで、測定結果の代用値とし、実測応力の時間増分を拘束ひずみの時間増分で除すことにより求めた。また、クリープ補正係数は有効ヤング係数を静ヤング係数で除すことにより算出した。

クリープ補正係数の算定結果を図-6 および表-8 に示す。図-6 における応力勾配変化時点以前のクリープ補正係数が大きく変動しているが、この変動は実測有効応力-材齢の関係を多項式で精度よく回帰した結果（相関係数 0.95 以上）、回帰曲線が若干変動していることが鋭敏に影響したためと考えられる。そのため、温度応力解析に用いる補正係数は平均値を採用することとした。

(2)解析結果

上記の解析条件に基づき同定解析結果を以下に示す。

a)温度解析結果

温度解析では計測結果に同定させるために、終局断熱温度上昇量 Q_{∞} (°C)を事前検討時の 42.4°Cから 43.5°Cに設定し、また、エアバッグ 4 枚とブルーシート 1 枚を敷設した場合の熱伝達率 $2(W/m^2°C)$ を、 $2\sim 5(W/m^2°C)$ に設定した。熱伝達率が JCI マスコンクリートのひび割れ制御指針に示される $2(W/m^2°C)$ よりも大きく同定された理由として、地下タンクの場合、底版表面に降雨が溜まりやすく排水に時間が掛かるため、降雨時の保温効果の低下や、底版表面は地下約 50m に位置するため日射の影響が少なく、日陰になることが多いこと等が考えられる。

それぞれの打設ケースの温度解析結果を図-7 および図-8 に示す。いずれのケースも終局断熱温度上昇量と表面の熱伝達率を同定することにより、各部位におけるピーク温度および温度降下勾配は計測結果と同様となり、比較的精度よく解析することができた。

b)応力解析結果

応力解析結果を図-9 および図-10 に示す。ケース 1 とケース 2 は、温度解析が同様な結果であるにもかかわらず、応力解析は異なる結果となった。ケース 1 は計測結果と比較して、上部の解析結果は引張側の値となり、下部の値は逆に圧縮側の値となっている。一方、ケース 2 では、上部は解析結果が測定結果と比較的よく一致しているが、下部は計測値よりも引張側であった。

ケース 1 とケース 2 の解析値を比較すると、上部の最大値で約 $1N/mm^2$ の差が生じている。この理由は、図-11 に示すように、上部打設後生じる温度上昇量が、ケース 1 では、上部よりも中央部のほうが大きく、内部拘束応力が発生するのに対して、ケース 2 では、逆に中央部よりも上部のほうが大きく、上部に内部拘束応力が発生しない状況であるためと考えられる。すなわち、ケース 2 では、上部打込み時に既に上部と中央部に温度差が発生しているが、上部のヤング係数はまだ微小で応力は発生していないため、上部打込み時の温度差は内部拘束応

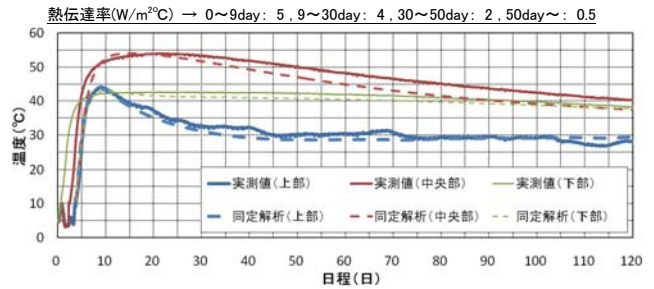


図-7 ケース 1 (1層打設) 温度解析結果

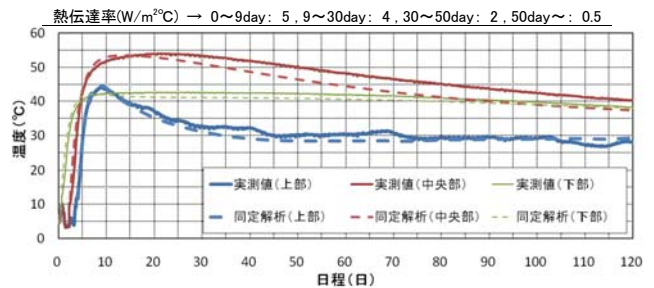


図-8 ケース 2 (18層打設) 温度解析結果

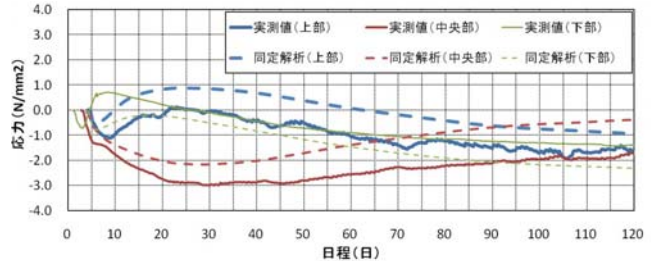


図-9 ケース 1 (1層打設) 応力解析結果

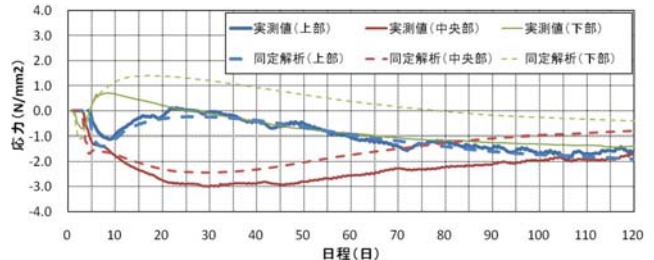


図-10 ケース 2 (18層打設) 応力解析結果

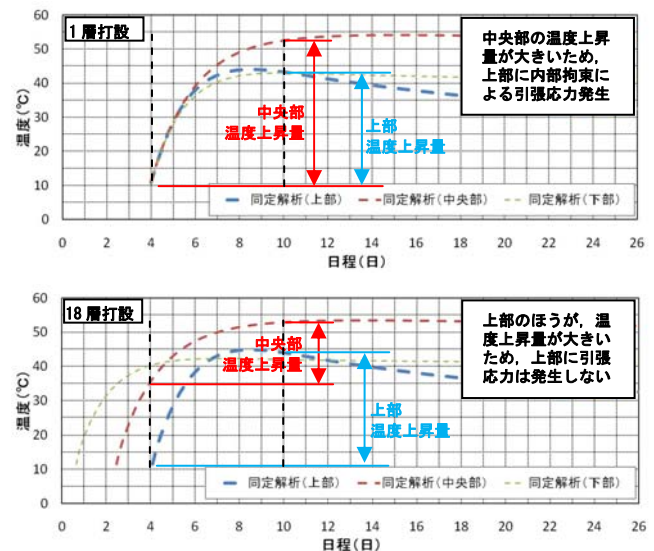


図-11 材齢初期の温度差

力には寄与せず、その後上部の硬化が進む中で新たに発生する温度差が内部拘束応力の発生に影響しているものと考えられる。

材齢初期の温度解析結果は、打設時期を忠実に再現しているケース2の方が精度が高く、また、上部および中央部の応力解析の精度も高いことから、解析モデルとしては、打設時期を考慮したケース2が適切であると考えられる。ただし、ケース2において、下部の応力に対する解析精度が低い原因は今後の検討課題となるが、底部の拘束条件を見直す等の余地がある。

4. 低発熱型高炉セメントの温度ひび割れ制御効果

今回の施工で適用した低発熱型高炉セメントの温度ひび割れ制御効果について、従来の3成分系セメントに対する優位性を、前述の打設時期を考慮した解析モデルを用いて比較検証する。

4.1 検討条件

解析条件を表-9に示す。比較対象の3成分系セメントを用いたコンクリートの線膨張係数や有効ヤング係数の計測値はないため、いずれのセメントとも一般的な値を用いるものとする。

また、自己収縮については図-12に示す室内試験結果を用いた。低発熱型高炉セメントはSO₃量が多いことにより、材齢初期に膨張ひずみの発生が認められるが、3成分系セメントについては、初期の膨張は微小である。

4.2 検討結果

解析結果を図-13に示す。低発熱型高炉セメントは3成分系セメントよりも、主に上部と中央部で発生応力が圧縮側に生じる結果となった。これは、初期膨張により圧縮応力が生じている影響が主要因と考えられる。

5. まとめ

本報は、底版コンクリート施工時の温度や応力の計測結果をもとに、温度応力解析での適切なモデル化の手法

表-9 解析条件

項目	解析条件
断熱温度上昇特性	$Q(t) = Q_{\infty} [1 - \exp(-\alpha \times t)]$ に対して 低発熱型高炉セメント (C:316kg/m ³) $Q_{\infty}(^{\circ}\text{C}):42.4^{\circ}\text{C}$ $\alpha:0.53$ 3成分系セメント (C:342kg/m ³) $Q_{\infty}(^{\circ}\text{C}):38.9^{\circ}\text{C}$ $\alpha:0.52$
圧縮強度 (N/mm ²)	$f'c(t) = t / (a + b \cdot t)$ 低発熱型高炉セメント: $a=0.194$, $b=0.0216$ 3成分系セメント: $a=0.146$, $b=0.0224$ JCI有効材齢で評価
線膨張係数	10 ($\times 10^{-6}$ 1/°C)
熱伝達率	2 (W/m ² °C)

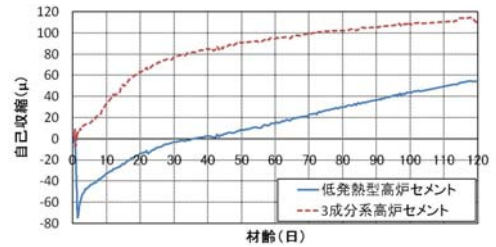


図-12 自己収縮解析条件

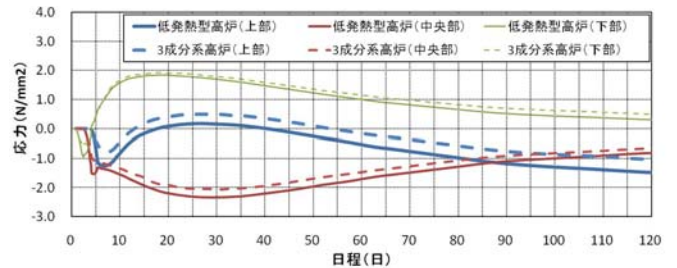


図-13 応力解析結果(低発熱型高炉と3成分系の比較)

を提案し、低発熱型高炉セメントの温度応力抑制効果を検証した。その結果、以下の考察を得ることが出来た。

- (1) 部材厚が大きいマスコンクリート温度応力解析では、温度ひび割れ照査のモデル化において層打ちとすることで、内部拘束応力に影響すると考えられる躯体表面部と中央部の打込み後の温度上昇量の差を考慮できるため、内部拘束応力を精度よく評価できることが分かった。
- (2) 低発熱型高炉セメントは、従来の3成分系セメントに比べて、初期膨張による温度ひび割れ制御効果が高い。

TL22 LNG 地下タンク建設工事は2009年4月に着工し、現在側壁を構築中である。底版コンクリートを打設して、10ヶ月余りが経過したが、ひび割れの発生もなく良好な結果が得られている。本報告が同種工事のコンクリート品質向上の一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) 岩崎淳, 和賀秀悦, 松井淳, 柏木幹雄: 環境にやさしい天然ガスの利用, 世界最大25万kL東京ガス(株)扇島工場 TL22LNG 地下タンク建設工事, 土木施工, Vol.52, pp.63-67, 2011
- 2) 伊藤健一, 野村朋宏, 根本浩史, 太田智久, 松井淳: LNG 地下式貯槽の底版コンクリートにおける梱包用緩衝材の養生材としての適用, 土木学会第63回年次学術講演会, VI-138, pp.275-276, 2008
- 3) 宮澤伸吾, 大澤友宏, 廣島明男, 鯉淵清: 低発熱・収縮抑制型高炉セメントを用いたコンクリートの特性, コンクリート工学年次論文集, vol.27, No.1, pp.487-492, 2005
- 4) 江渡正満: マスコンクリートの温度応力低減技術の開発に関する研究(学位論文), 長岡技術科学大学, 1999