

# 中空円筒構造物の温度ひび割れの防止施工実験と 温度応力解析の適用性について

小西 一寛<sup>1</sup>・竹田 宣典<sup>2</sup>・入矢桂史郎<sup>3</sup>・藤原 愛<sup>4</sup>・辻 幸平<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 株式会社大林組 土木技術本部 (〒101 東京都千代田区神田司町2-3)

<sup>2</sup>正会員 工修 株式会社大林組 技術研究所 (〒204 東京都清瀬市下清戸4-640)

<sup>3</sup>正会員 株式会社大林組 土木本部 (〒101 東京都千代田区神田司町2-3)

<sup>4</sup>工修 財団法人原子力環境整備センター 研究第二部 (〒105 東京都港区虎の門2-8-10)

<sup>5</sup>正会員 工博 群馬大学教授 工学部建設工学科 (〒376 群馬県桐生市天神町1-5-1)

本研究は、低発熱ポルトランドセメントの使用等の温度ひび割れ制御対策を採用して、中空円筒形の大型の鉄筋コンクリート試験体を作製し、施工時における温度ひび割れの防止を実験的に確認したものである。さらに、計測した温度及び応力と照合する精度の高いシミュレーションを行なって、解析手法の適用性を確認し、解析精度の向上には、熱伝達率に影響を及ぼす気象や養生等の放熱条件の設定に課題が残ることが明らかになった。

**Key Words :** *low heat portland cement, thermal stress, thermal crack index, simulation, surface heat convection, young's modulus*

## 1. はじめに

高度社会が安定成長に入った現在、限られた資源や材料が潜在的に保持している性能を確認し、付加機能を備えた材料として有効に利用することが望まれている。主として、強度機能材料として使用しているセメント・コンクリート材料も例外ではなく、例えば、放射性廃棄物処分施設では、高pH環境維持のためにコンクリートが有望視され、コンクリート構造物の低透水性機能や高耐久性能も期待されている。

これらの機能を保証するには、施工時から完成後長期にわたり、コンクリートのひび割れを防止することが望ましいが、施工時においては、気象の不確実性及び水和反応に伴う発熱・硬化メカニズムの複雑さから、温度ひび割れの制御段階にとどまっている。また、完成後の荷重作用に対する鉄筋コンクリート構造物の設計では、ひび割れ抵抗性の不確実さから、引張応力によりひび割れが生じやすい脆性材料として、セメント・コンクリート材料が取り扱われているのが現状である。

しかし、施工時の温度ひび割れの防止には、温度ひび割れ指数を1.5以上確保すること、さらに重要土木構造物の完成後のひび割れ有無の照査には、引張応力は部材厚に応じて低減した設計引張強度以下にすることを、それぞれ条件とする規準<sup>1)・2)</sup>も整備されてきた。

そして、マスコンクリートの温度応力の発生メカニズムは、FEMによる温度及び温度応力の解析を通じてかなり明らかにされるとともに<sup>3)</sup>、スラブ、壁状の大型試験体によりその変形挙動も確かめられてきた<sup>4)</sup>。一方、マスコンクリートの温度上昇により、材齢初期における自己収縮も無視できないことが半評してきた<sup>5)</sup>。さらに、温度ひび割れの制御対策は、低発熱ポルトランドセメントの開発などにより、材料・設計・施工の各分野にわたり発展してきた。

このような背景から、著者らは、低発熱ポルトランドセメント等による温度ひび割れの制御対策を併用して、大型の鉄筋コンクリート構造物である試験体を作製し、温度ひび割れの防止を試みることにした。

マスコンクリートの温度ひび割れを防止するには、十分な温度ひび割れの制御対策を講じて、温度ひび割れを防止する施工方法を確立し、温度及び温度応力の発生メカニズムに合った信頼性の高い解析手法を選定する必要がある。さらに、温度ひび割れ指数の評価条件となる温度及び温度応力の解析精度を向上するために、適切な解析条件を事前に設定することが必要である。

本研究では、まず、材料試験や計測により得られる熱物性を解析条件に直接反映させ、打設ブロックの温度を代表する位置に埋設した9点の最長70日間の実測温度データに対して、忠実な温度シミュレーションを行う。

表-1 温度ひび割れの制御対策

対策項目		加圧水槽	試験体
温度ひび割れの制御目標		温度ひび割れ抑制	温度ひび割れ防止
構造	側壁下部の底版同時打設	嵩上げ高さ1m	嵩上げ高さ1m
	底版下面の拘束低減	スリップ材	スリップ材
配合	低収縮性セメント ( $\sigma_{91}=400\text{kgf/cm}^2$ )	低発熱ポルトランドセメント	低発熱ポルトランドセメント
	液体窒素によるフルーキング	(常温打設)	打設温度 $8 \pm 2^\circ\text{C}$
施工	初期養生	(保温湿潤養生)	断熱湿潤養生

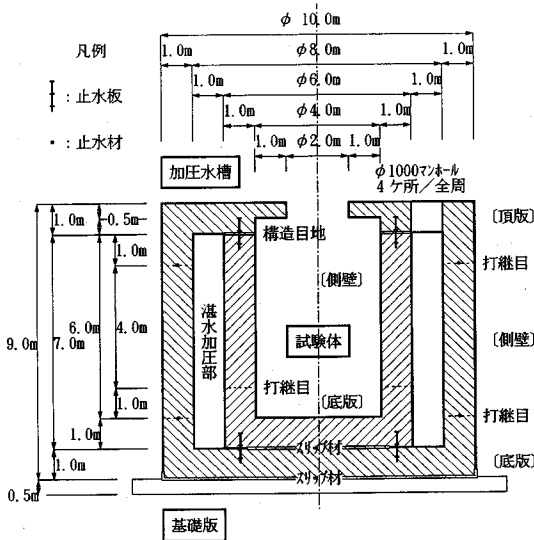


図-1 加圧水槽及び試験体の構造概要

さらに、得られた温度シミュレーション結果を用い、材料試験・計測により得られる力学的特性を解析条件に直接反映させ、躯体中央に埋設した8点の有効応力計の実測データに対して、温度応力のシミュレーションを行う。その結果得られるシミュレーションの精度及び同定された解析条件から、温度及び温度応力の解析上の課題を明らかにするものである。

## 2. 鉄筋コンクリート試験体の概要

### (1) 試験対象と温度ひび割れの制御対策

温度ひび割れを防止する対象構造物には、自己拘束が大きくひび割れの生じやすい、大型の鉄筋コンクリート製中空円筒形状を採用した。試験体は外水圧による透水試験を実施する計画があり、側方に湛水スペース1.0mを離して、加圧水槽を先行して作製した。図-1に示すように、加圧水槽は外径10.0m、高さ9.0m、躯体厚1.0m、その内側に作製する試験体は外径6.0m、高さ7.0m、躯体厚1.0mとした。

加圧水槽に内圧で作用する透水試験の水圧を $2\text{kgf/cm}^2$ とすると、円周方向に発生する引張応力は $9\text{kgf/cm}^2$ となり、ひび割れの発生が懸念された。そこで、コンクリートの設計基準強度は比較的高強度の $400\text{kgf/cm}^2$ とし、規準<sup>2)</sup>により部材厚さ1.0mに応じ許容引張強度を算定すると $21.3\text{kgf/cm}^2$ となり、発生引張応力を上回ることからプレストレスを導入しないことにした。ただし、鉄筋はひび割れが発生しても有害なひび割れとならないように、側壁の最大配筋はD38を200mmピッチで2段(SD295)の複鉄筋とし、最外縁鉄筋の重ね継手端をスパイラル筋で補強した。一方、試験体では透水試験の水圧が外圧とし

て作用するため、D29を200mmピッチの複鉄筋とした。試験体と類似の形状である加圧水槽は、温度ひび割れの抑制を目標とし、表-1に示すような温度ひび割れの制御対策のうち3対策を採用し、先行して施工した。

その結果、春季に作製した加圧水槽では温度ひび割れが生じたことから、秋季に施工する試験体では加圧水槽と同様な温度ひび割れ対策を用いても、温度ひび割れ指数は1.1となり、50%以上の確率で温度ひび割れが発生すると予想された。そこで、温度ひび割れの防止を目標とする試験体では、液体窒素によるコンクリートのプレクーリング、及び保温湿潤養生を強化し試験体をシートで覆う断熱湿潤養生を対策に追加した。

加圧水槽と試験体には通常の順打ち構法を模擬し、水平打継目を設けた。打継目位置は、側壁に対する底版の拘束を低減すること、及び応力が大きくなる隅角部を避けることを目的として、底版上面から上方に約1.0m上げ越し、側壁最下部を底版と同時に打設した。

加圧水槽は、基礎地盤の変形を低減するため厚さ0.5mの鉄筋コンクリート製基礎版上で、拘束を緩和するためビニール製シート( $t=1\text{mm}$ , 2枚)を敷いて作製した。試験体は、透水試験時のアップリフトを抑制する必要から底面外周部に止水板を設置し、その内側より減圧排水するためドレーン材(パブリックドレーンA型、 $t=10\text{mm}$ )を敷いた。なお、試験体側壁と加圧水槽頂版間には、水膨張性ゴム製の止水板を埋め込み、構造的に分離した。

### (2) コンクリート材料と配合

#### a) 使用材料

温度ひび割れの制御対策として、発熱及び自己収縮の少ない低発熱ポルトランドセメントを採用した。

コンクリートの配合条件は水密性及び耐久性の向上のため単位セメント量を $400\text{kg/m}^3$ とし、 $\sigma_{91}=400\text{kgf/cm}^2$ と比較的高い強度のためW/Cを41.3%とした。また、水密性の向上、ブリーディング及び材料分離の低減のため、石灰石微粉末を $50\text{kg/m}^3$ 混入した。

さらに、秋季に打設する試験体では、打設後に外気温が低下し温度ひび割れの発生が懸念されたため、液体窒素によるプレクーリングを行った。

表-2 低発熱ポルトランドセメントの物理化学的性質

	3日	7日	28日	
圧縮強さ (kgf/cm <sup>2</sup> )	43	62	217	
水和熱 (kcal/kg)	—	42.6	58.3	
凝結時間 (h-m)	始 発		終 結	
	4-10		6-20	
成分組成 (%)	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
	21.0	58.0	3.2	11.0

表-3 コンクリートの使用材料

使用材料		特性
低発熱ポルトランドセメント		比重=3.24, 比表面積=3060cm <sup>2</sup> /g
微粉末材料	石灰石微粉末	比重=2.70, 比表面積=3010cm <sup>2</sup> /g セメントとプレミックス
骨材	細骨材 神流川産砂(S1) 利根川産川砂(S2)	混合比率 S1:S2=7:3 表乾比重 :2.58, F.M.:2.81
	粗骨材 秩父産石灰碎石	表乾比重 :2.70, F.M.:6.70 実積率 :62.8%, 単重:1.69kg/ℓ
練混ぜ水	上水道	—
混和剤	高性能A E減水剤	ポリカルボン酸系

表-4 コンクリートの品質条件

	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプの範囲 (cm)	空気の量 (%)	設計基準強度 σ <sub>cc</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )	水セメント比 (%)	打設温度 (°C)
加圧水槽	20	15±2.5	4.5±1.5	400	41.3	(常温)
試験体	20	15±2.5	4.5±1.5	400	41.3	8 ± 2

表-5 コンクリートの標準配合

	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )					高性能A E減水剤
		水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	石灰石微粉末 LF	
加圧水槽	44.0	165	400	736	980	50	4.95 (C+LF) ×0.85 ~0.9%
試験体	44.0	165	400	736	980	50	4.05 (C+LF) ×1.1%

表-6 フレッシュコンクリートの品質

		外気温度 (°C)	コンクリート温度 (°C)	スランプ (cm)	空気量 (%)	カーテンング率 (%)
加圧水槽	底板	9.0	11.1	17.5	4.6	2.88
	側壁	12.0	14.8	17.0	4.6	2.50
	頂版	6.0	11.2	16.5	4.1	1.87
試験体	底板	22.0	24.2 ↓冷却 5.7	13.5 ↓冷却 13.0	4.2 ↓冷却 4.0	1.22
	側壁	11.0	17.6 ↓冷却 7.6	17.0 ↓冷却 14.0	4.1 ↓冷却 3.8	1.30

注) 試験値はトラックアジテータ車5台目から採取した値

低発熱ポルトランドセメントの物理化学的性質を表-2に、コンクリートの使用材料及び品質条件を表-3, 4に、試練りにより選定した標準配合を表-5に、それぞれ示す。

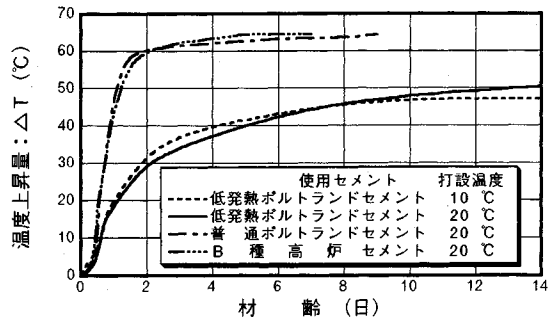


図-2 断熱温度上昇試験結果

b) フレッシュコンクリートの品質

コンクリート温度、スランプ、空気量、ブリーディング等のフレッシュコンクリートの品質を、表-6に示す。試験体コンクリートの冷却は、作製場所に設置した冷却専用装置で、液体窒素をアジテータ内に噴入しながらコンクリートを攪拌し、打設温度が8±2°Cにおさまるよう管理した。また、スランプ及び空気量等が所定の品質条件を満足するように、高性能A E減水剤及び空気量調整剤の添加量を調整した。

c) 断熱温度上昇試験

各種セメントを用いたコンクリートの断熱温度上昇試験結果を、図-2に示す。

普通ポルトランドセメント及び低発熱ポルトランドセメントを用いたコンクリートの断熱温度上昇試験結果を  $T = T_{max}(1 - \exp(-\gamma t))$  式に近似すると、 $T_{max}$  が4.0°Cから47.8°C、 $\gamma$ が1.09から0.42に低減する。

なお、低発熱ポルトランドセメントを用いたコンクリートでは、打設温度が10°Cと20°Cの断熱温度上昇試験結果にほとんど差はないが、以下の理由により10°Cにプレクーリングした。温度ひび割れの原因となる引張応力が増加する部位は、構造物内の平均温度変化に対し相対的に温度低下する部位であり、打設直後の温度上昇時の断面表面部や温度下降時の断面内部が相当する。これに対しプレクーリングにより打設温度を低下させると、断面表面部は打設直後に逆に周辺温度により温められ膨張するとともに、断面内部は最高温度が低下しその後の温度降下が緩やかになり、引張応力が低減されるためである。

d) 自己収縮試験

コンクリートの自己収縮の試験方法を以下に、試験容器の構造を図-3に示す。

- ① 円筒管 (直径150mm × 高さ300mm)の内面に、スポンジ及びビニールシートを貼り付け、コンクリートが自由に収縮できる構造の容器を製作する。
- ② 円筒管中心部に埋入型ひずみ計と熱電対を設置する。
- ③ センサを傷めないよう円筒管内のコンクリートを十分に締め固めた後、天端を塩化ビニール製の蓋で覆っ

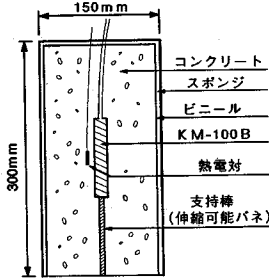


図-3 自己収縮試験容器

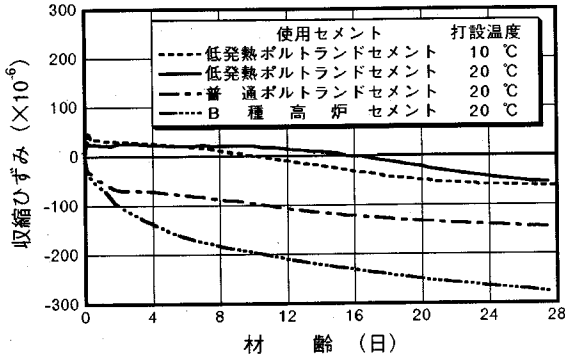


図-4 自己収縮試験結果

て法面の乾燥を防ぎ、 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ の恒温室内に静置する。

④ コンクリートの打込み後より、内部ひずみ・温度の計測を開始し、材齢28日まで計測する。

自己収縮試験の結果から、凝結の終結時を初期値とした自己収縮ひずみを図-4に示す。既往の文献<sup>6)</sup>によれば、普通ポルトランドセメント及びB種高炉セメントを用いた $W/C=40\%$ 程度の高流動コンクリートの自己収縮量は、 $150 \sim 200 \mu$ 程度である。本研究でも打設温度が $20^\circ\text{C}$ の材齢28日の自己収縮量は、普通ポルトランドセメントが約 $100 \mu$ 、B種高炉セメントが $300 \mu$ 程度であった。これらの値と比較して、低発熱ポルトランドセメントを用いた打設温度が $10^\circ\text{C}$ のコンクリートでは、材齢28日の自己収縮量が $60 \mu$ 程度であり、かなり小さな値となった。

#### e) 強度特性

試験体の作製場所で採取したコンクリート供試体は、材齢1日まで型枠中で屋外養生し、脱型後 $20^\circ\text{C}$ の水中において標準養生した。低発熱ポルトランドセメントを用いたコンクリートの強度は、材齢1日までの若材齢において型枠養生中の外気温の影響を強く受けたが、液体窒素によりプレクーリングした影響は少なかった。そこで、圧縮強度、ヤング係数及び引張強度と標準養生の材齢の関係を、 $\Sigma(T+10)\Delta t/30$ で示す有効材齢との関係に補正して、図-5~7に示す。

なお、材齢1日までの養生温度は外気温と同一とし、計測した外気温を用い有効材齢に補正した。

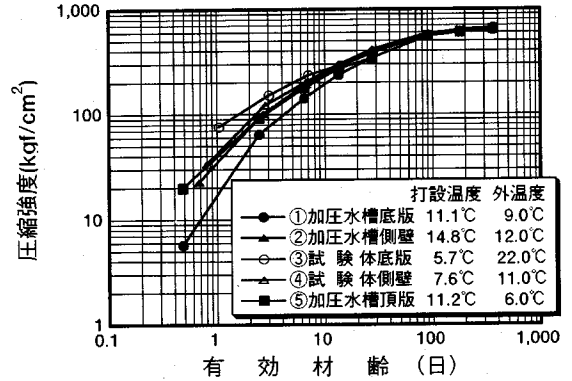


図-5 圧縮強度と有効材齢の関係

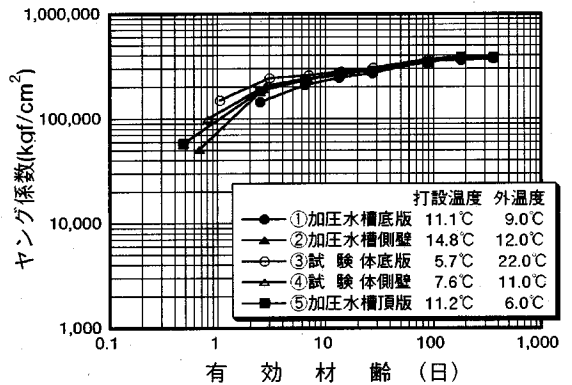


図-6 ヤング係数と有効材齢の関係

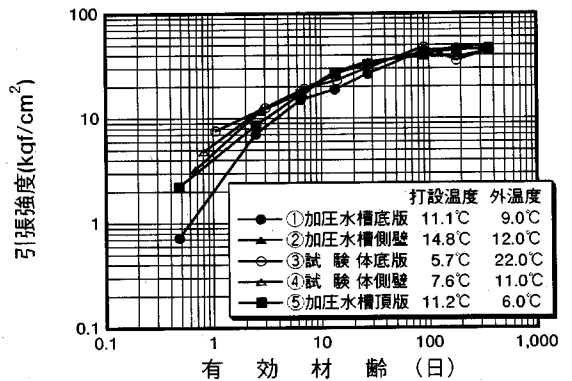


図-7 引張強度と有効材齢の関係

### (3) 打設

製作工程は表-7に示すとおり、春季に加圧水槽を、およそ半年後の秋季に試験体を作製することとし、それぞれの底版と側壁コンクリートを約1か月の間隔において順次打設した。コンクリートの練混ぜは、試験体の作

表-7 製作工程

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
加圧水槽底板	▼													
加圧水槽側壁		▼												
内部湛水養生				—										
試験体底板										▼				
試験体側壁											▼			
加圧水槽頂版														▼
湛水養生														—

製場所から約10km離れた製造プラント工場において行ない、トラックアジテータ車により運搬した。

型枠は、既製の円形鋼製型枠( $t=2.3\text{mm}$ )を使用した。また、打継面の処理は、打設翌日にレイタンスを取り除く一般的な施工とした。なお、透水試験時に内圧を受ける加圧水槽では、打継目に水膨張性ゴム製の止水材(断面 $20\text{mm}\times 20\text{mm}$ )を設置したが、透水試験の対象となる試験体では長期の耐久性が不明なため、止水材を使用しなかった。

#### (4) 養生とひび割れの目視調査

##### a) 加圧水槽

加圧水槽では打設面に養生マットを敷き散水すると共に、養生シートで打継ぎ用鉄筋を含め型枠に沿って覆う保温湿潤養生を行った。ところが、側壁脱型(材齢8日)直後のひび割れ目視調査により、側壁上面の打継目の外周側鉄筋から外側の角にかけて、幅 $0.1\text{mm}$ 程度の微細な表面ひび割れを多数確認したが、事前確研において温度ひび割れ指数の小さかった側壁表面の鉛直方向では、ひび割れが生じなかった。

温度計測からひび割れの原因を推測すると、側壁中央部の最高温度が $38^{\circ}\text{C}$ のとき、側壁上部の表面部温度は $23^{\circ}\text{C}$ であり、内外温度差( $\Delta T$ )から簡易式<sup>1)</sup>( $15/\Delta T$ )により温度ひび割れ指数を求めると $1.0$ となった。側壁上端角部ではさらに表面温度が低下することから、円周方向の温度応力が引張強度を上回ったと推定される。

このように、部材表面で同様な養生を行なっても、断面内の温度分布が異なる理由は、側壁最上部では放熱面が多くかつ風速が早いことに加えて、打継面では重ね継手用に突出した鉄筋が放熱体として働き、放熱を促進した可能性も考えられる。このことに関しては後に検討を加える。また、側壁打設から約1か月後に湛水した加圧水槽の水張調査(水深 $3.0\text{m}$ )では、湛水7日後に底板と側壁間の打継目(水深 $5.0\text{m}$ )の一部から、水が滲むのが観察された。

##### b) 試験体

そのため、加圧水槽では保温養生が不足したと考え、試験体では保温を強化した断熱養生を行うことにした。

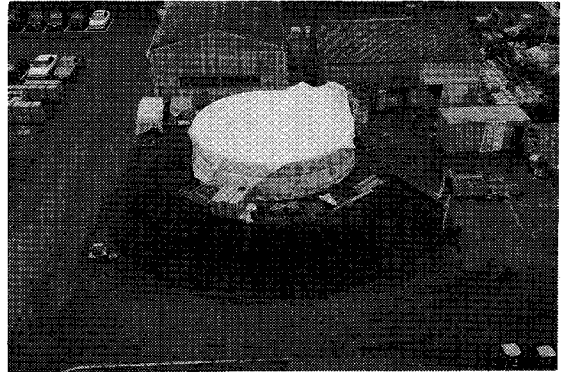


図-8 試験体側壁の断熱養生の状況

断熱養生の熱伝達率の目標は $3\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}^{\circ}\text{C}$ とし、加圧水槽も含む試験体全体を図-8に示すようにブルーシートで完全に覆った。断熱養生にシートを用いた理由は、シート内の対流により試験体の周囲空間の温度を平均化すると共に、上部コンクリートの雰囲気を高温度にし、放熱を抑制する効果を期待したためである。断熱養生中、試験体の内側が事前確研と比較して過度に温度上昇したため、温度上昇の抑制と脱型時の急激な表面温度低下を事前に緩和する目的で、側壁材齢2~5, 8, 12, 15, 18日に1回/日の頻度で内型枠へ散水した。

その結果、後述する温度ひび割れ指数の評価では、側壁打設直後の温度上昇時に表面の鉛直方向で $2.2$ であり、比較的小さな温度ひび割れ指数が生じるのは側壁表面部に限られた。さらに、側壁打設後0.5~3か月に行なった側壁及び底板の目視調査においても、温度ひび割れは観察されなかった。

気温の上昇する春季に打設した加圧水槽において微細な表面ひび割れが発生した原因は、部材内の温度差によると推定されたのに対し、気温の低下する秋季に打設した試験体においてひび割れを防止できたのは、以下の温度ひび割れ制御対策の効果によると考えられる。つまり、試験体で追加したコンクリートの打設温度を低下するブレーキングにより内部の最高温度を抑制する効果と、断熱養生により表面温度の低下を抑制する効果である。

また、側壁打設後から約3か月目に実施した試験体と加圧水槽間の湛水調査(水深 $3.0\text{m}$ )においても、試験体の打継目(水深 $3.0\text{m}$ )から漏水は観察されなかった。

温度ひび割れ指数が小さい加圧水槽は、打継目に止水材を設けても一部漏水が目視されたのに対し、比較的温度ひび割れ指数が大きい試験体は、止水材を設けなくても漏水しなかった。したがって、事例は少ないが、コンクリートの一般部と比較して、弱点となりやすい打継目に作用する温度応力は、小さいほうが剥離・ずれ等の損傷も少なく、止水上の欠陥にもなりにくいと思われる。

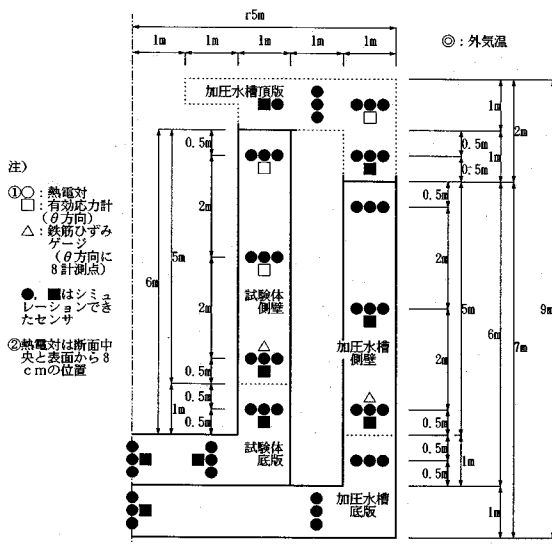


図-9 主な温度及び応力計測センサの配置

### 3. 温度及び応力計測

コンクリートの温度や温度応力計測は、初期養生管理を行うと共に、後述するシミュレーションの照合データを得ることを目的として実施した。

主な計測センサの配置を図-9に示す。有効応力計は、鉄筋の影響を受けにくい断面中央の円周方向に加圧水槽で2点、試験体で6点を配置した。

#### (1) 加圧水槽

12°Cで打設した底版は、材齢3日に断面中央部で最高温度の33°Cに達した後、材齢5日には底版の断面下部より温度が低下したことから、主に底版上面から放熱したと考えられる。底版と一体打設した側壁立上部は、上面と両側面の3面から放熱することから、材齢2日で最高温度25°Cに到達後の温度降下は早かった。

16°Cで打設した側壁は、断面中央において材齢2日で最高温度の38°Cに達したが、内側が外側温度と比較して高く、主に側壁外面から放熱したと推定される。側壁中・下部の断面中央で、円周方向に設置した有効応力計は、温度上昇に伴う膨張により1~2 kgf/cm<sup>2</sup>の圧縮応力が増加した後、温度降下に伴って反転し8~10 kgf/cm<sup>2</sup>の引張応力に到達後、緩やかに漸減した。

貫通ひび割れの生じやすい側壁下部の断面中央に、45°間隔で全周8ヶ所に設置したダミー鉄筋のひずみは、全て同様な圧縮モードを示したことから、ほぼ軸対称性は保たれたと推定される。

#### (2) 試験体

8°Cで打設した底版は中心部の断面中央において、材

齢3.5日後に最高温度39°Cに達した後、材齢11日で下部温度を下回ったことから、加圧水槽と比較して上面からの放熱は抑制されたと考えられる。底版の断面中央で円周方向に設置した3点の有効応力計は、打設直後の温度膨張により最大4~6 kgf/cm<sup>2</sup>の圧縮を示した後、温度降下に伴い徐々に減少した。また、図-10に示すように、底版の立上部中央は、側壁打設後の温度膨張に伴い最大3 kgf/cm<sup>2</sup>の引張反力を受けた後、側壁の温度降下による収縮に伴い最大8 kgf/cm<sup>2</sup>の圧縮に転じた。

8°Cで打設した側壁は断面中央部において、材齢3日後に最高温度の35°Cに達した後、主に外面から放熱した。図-10に示すように、側壁下部の断面中央で円周方向の有効応力計は、温度上昇により最大3 kgf/cm<sup>2</sup>の圧縮を示した後、温度降下により引張に転じ最大6 kgf/cm<sup>2</sup>に達した。

試験体においても、貫通ひび割れの生じやすい側壁下部の断面中央に45°間隔で設置した8点のダミー鉄筋のひずみは、全て同様な圧縮モードを示したことから、ほぼ軸対称性は保たれたと推定される。

以上の目視調査及び温度・応力計測の結果から、鉄筋コンクリート構造物である試験体は、施工時の温度ひび割れを防止できたと推定される。

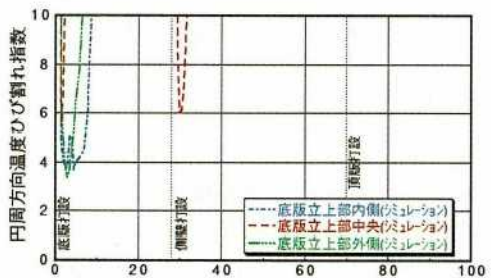
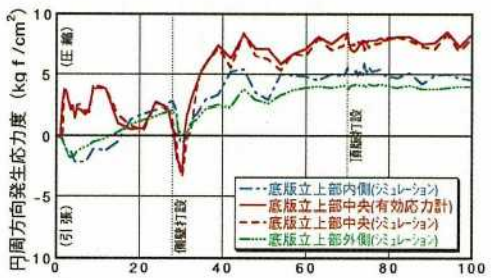
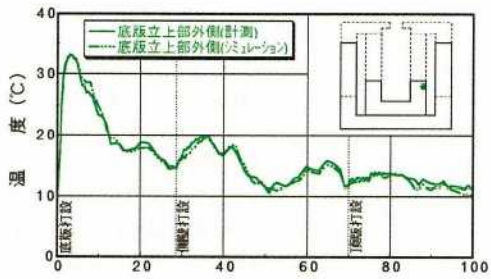
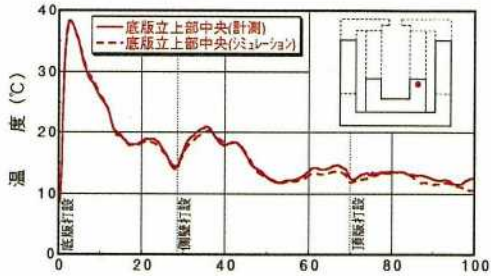
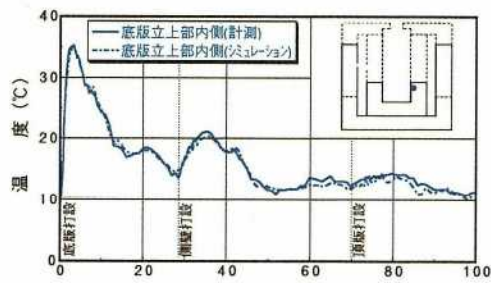
### 4. 温度及び応力のシミュレーションと

#### 温度ひび割れは指数の評価

ひび割れの原因となるコンクリートの体積変化は、温度(膨張)収縮・自己収縮及び乾燥収縮により生じる。このうち、自己収縮の少ない低発熱ポルトランドセメントを用いたことから自己収縮を、打設初期に湿潤養生を行ったことから乾燥収縮を、応力解析の容易さから無視することにした。したがって、初期応力の解析方法としては、従来から用いてきたセメントの水和反応熱に起因する温度上昇・降下に伴う膨張・収縮ひずみ変化に対して、低減したヤング係数を乗じた増加応力を逐次累加する解析法を用いることにした。ここでは、高い精度を必要とする温度ひび割れの防止の評価手法として、この温度応力解析法の適用性を検証することにした。

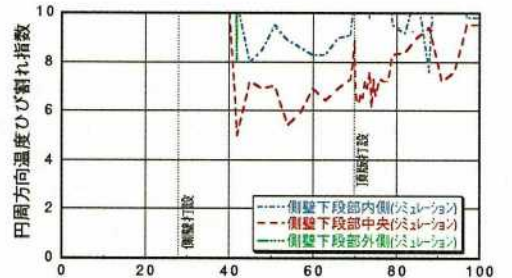
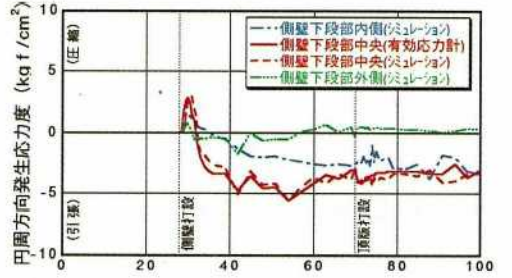
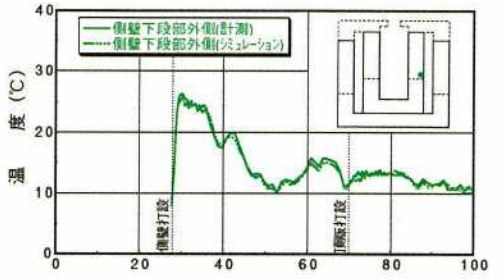
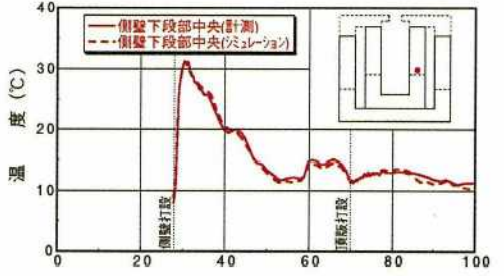
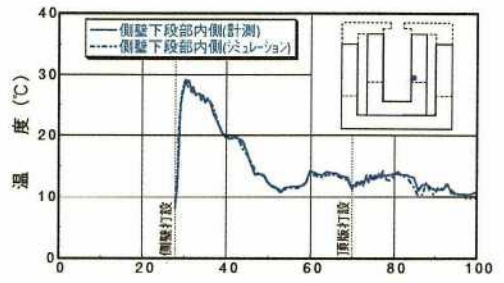
図-11に示す温度及び温度応力の解析条件のうち、材料試験や計測により得られないのは、温度解析における熱伝達率、及び温度応力解析におけるヤング係数の低減係数の2条件である。

そこで、温度及び温度応力のシミュレーションでは、材料試験・計測により得られたその他の情報を忠実に解析条件とし、温度及び温度応力計測データに高い精度で一致するように、熱伝達率とヤング係数の低減係数を各々パラメトリックスタディにより同定することにした。



底版打設からの経過日数 (日)

[底版立上部]



底版打設からの経過日数 (日)

[側壁下段部]

図-10 試験体の打継目近傍の温度・温度応力及び温度ひび割れ指数の履歴

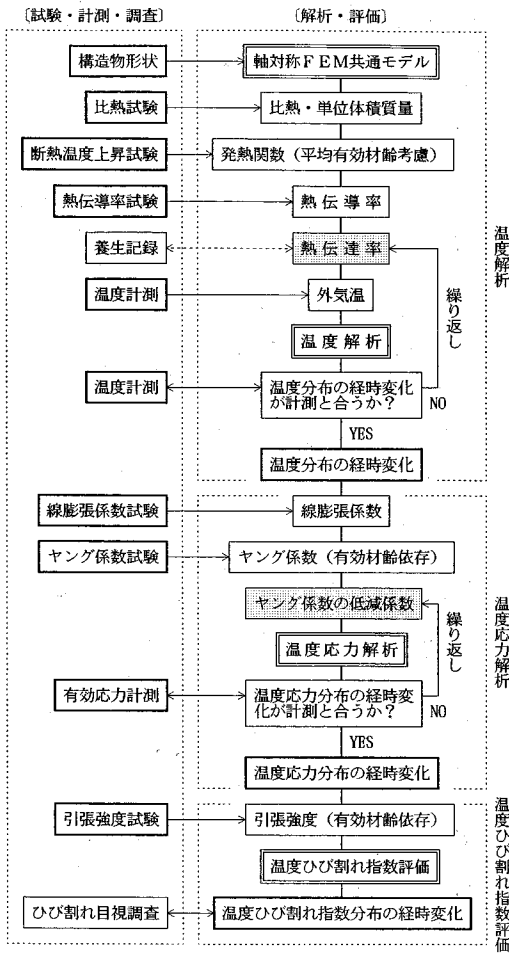


図-11 温度及び温度応力解析のシミュレーションフロー

(1) 温度及び温度応力のシミュレーション手法

図-11に示す温度、温度応力解析のシミュレーション及び温度ひび割れ指数評価の検討フローのうち、温度シミュレーションにより、熱伝達率を同定し躯体温度を求める。つぎに、温度解析結果を用いた温度応力シミュレーションにより、ヤング係数の低減係数を同定し躯体応力を求める。温度応力解析法を検証するには、躯体温度として実測温度を用いるのか望ましいか、解析範囲全体の温度情報を得ることは不可能なため、温度解析の結果を代用する。したがって、温度及び温度応力シミュレーションの接点である温度は、精度良く解析しなければならない。

温度解析手法は既往の検討実績から信頼性が高いため、試験・計測により得られる温度解析条件を用いて、多数の異なる躯体温度計測データと高い精度で一致させれば、その過程で用いた熱伝達率は同定されると考えられる。

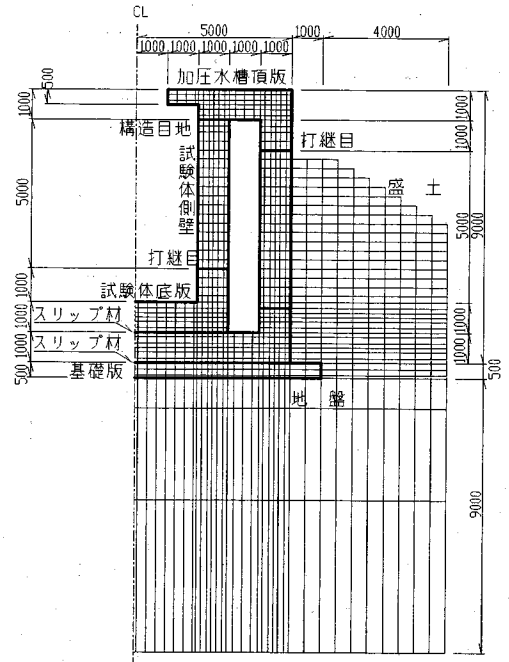


図-12 軸対称FEM解析モデル(試験体)

この温度シミュレーションは、加圧水槽並びに試験体の底版及び側壁に対して、それぞれを代表する位置9点に埋設した熱電対により、最長70日間の温度計測データについて行う。同様に、応力解析においても、試験・計測により得られる応力解析条件及び精度の高い躯体の温度解析結果を用いて、多数の異なる躯体応力計測データと高い精度で一致させれば、その過程で用いた温度応力解析手法とヤング係数の低減係数は同定されると考えられる。この温度応力シミュレーションは、加圧水槽の側壁に2点、試験体の底版及び側壁にそれぞれ3点を躯体中央部の円周方向に埋設した有効応力計測により、最長70日間の応力計測データについて行う。

なお、解析モデルは周辺地盤まで含む温度・温度応力解析共通とし、前項までの検討により試験体の初期ひび割れは防止できたと推定されるため、軸対称モデルとする。試験体の解析モデルを図-12に示す。

(2) 温度のシミュレーション

a) マチュリティを考慮した発熱量の推定

断熱温度上昇試験結果から算定した発熱量を材齢により入力した温度シミュレーションでは、熱伝達率をパラメトリックスタディし表面部温度を実測データに合わせても、部材中央部の温度が高くなり、精度の高いシミュレーションが行えないことが明らかになった。

断熱性の高い断熱温度上昇試験装置と比較して、一般の部材では放熱により低い温度履歴になり、水和反応は



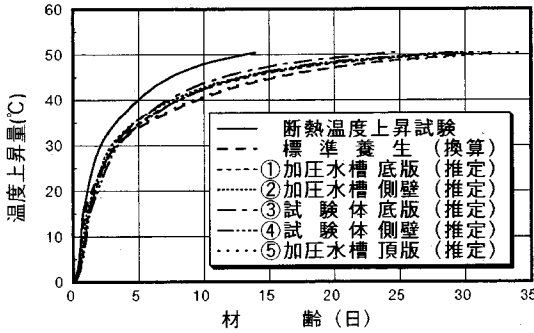


図-13 平均有効材齢を考慮した平均温度上昇曲線

表-8 温度シミュレーションに用いた熱物性

	加圧水槽		試験体		加圧水槽
	底板	側壁	底板	側壁	頂版
打設材齢 (日)	0	35	0	28	70
平均打設温度 (°C)	12.0	16.0	8.0	8.0	10.5
平均有効材齢を考慮した平均発熱量	図-13① (推定)	図-13② (推定)	図-13③ (推定)	図-13④ (推定)	図-13⑤ (推定)
単位体積質量 (kg/m³)	2,360 (試験)				
比熱 (kcal/kg°C)	0.28 (試験)				
熱伝導率 (kcal/mhr°C)	1.9 (試験)				

抑制される。そのため、断熱温度上昇試験の材齢で発熱量を評価すると、過大になると思われる。したがって、本来、温度解析に用いる発熱量は、岡村ほかの提唱する水和熱と熱伝導の非線形連続解析<sup>7)</sup>を用いるのが合理的と思われるが、本検討においては、温度解析コードの制約から発熱を材齢依存で入力する必要があった。

コンクリートの断熱温度上昇試験の環境が、理想的な断熱条件とすると、セメントの水和反応熱はロスなく温度上昇に消費される。したがって、総発熱量と $\sum(T+10)\Delta t/30$ から得られる有効材齢の関係は、放熱ロスのある標準養生を行った供試体の強度と有効材齢の関係と比較して、さらに相関が強いと考えられる。

そこで、コンクリートの総発熱量は有効材齢により概略推定できると考えられ、本検討の温度シミュレーションに適用することにした。具体的には断熱温度上昇試験結果を、20°Cの標準養生に相当する仮の発熱量にいったん置換し、各ロッド毎の代表断面3点(断面中央と表面2点)の平均有効材齢を用いて、平均発熱量を推定する。

推定した発熱量から換算した代表断面の平均断熱温度上昇曲線を、図-13に示す。材齢依存の方法では、試験期間の10日程度しか発熱を考慮できないが、この方法では、断面中央部の発熱量を過少評価し表面部を過大評価するものの、約1か月間にわたり発熱を考慮でき実状に近いと考えられる。

なお、熱物性は材料試験により定め、表-8に示す。

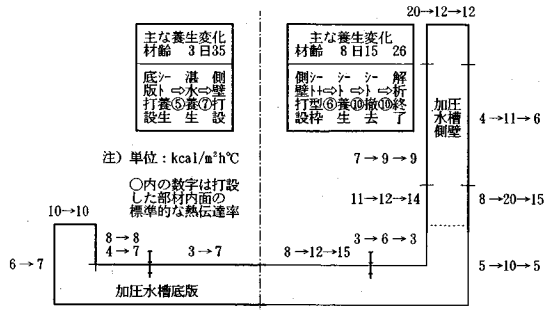


図-14 加圧水槽の熱伝達率(シミュレーション)

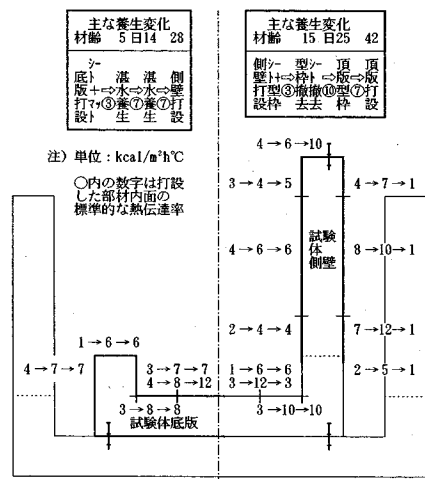


図-15 試験体の熱伝達率(シミュレーション)

b) 温度のシミュレーション結果

加圧水槽及び試験体の温度シミュレーションでは、試験・計測により得た温度解析条件を用い、最長70日間の実測温度に合うように熱伝達率をパラメトリックスタディした。その結果得られた図-10及び後の図-16に示すように、シミュレーション温度は実測温度と近似している。このことにより、前項のマチュリティを考慮した発熱量の推定方法は、ほぼ妥当であることが示唆される。

c) 熱伝達率の同定

施工で用いた鋼製型枠及び養生材料の熱容量は躯体コンクリートの1%以下であり、ここでは等価な熱伝導性を有する熱伝達境界にモデル化し、この熱伝達率をシミュレーションにより同定することにした。その際、底板、側壁等の各部材を代表する9点の温度分布・履歴を忠実にシミュレーションするために、表面位置を3分割、かつ養生を変更した2ないし3期間に細分化した。

加圧水槽及び試験体の熱伝達率のシミュレーション結果を、図-14, 15に示す。

温度シミュレーションによる熱伝達率の同定は困難であったが、得られた熱伝達率は、図-14, 15 に併記した打設リフト内面の熱伝達率の標準値<sup>1)</sup>と比較して、バラツキはあるものの平均的には大きな差異はなく、熱伝達率は同定されたと考えられる。

#### i) シート養生による断熱効果

試験体表面の熱伝達率は加圧水槽と比較して小さく、その中でも試験体内面の熱伝達率は外面よりさらに小さかった。この理由は、外気温・日射・雨・風等の気象変動の影響を緩和するため、試験体ではシートで覆う断熱養生を実施した効果と考えられる。これにより、加圧水槽と比較してシート内温度が上昇して放熱が減少し、結果的に外気温に対する熱伝達率が小さくなったと考えられる。図-20に示すように、試験体の外面と比較して、通気性の低い試験体の内面では、その効果が顕著に現れたと思われる。

このようにシートを用いた養生は、構造物の雰囲気温度を変えられ、結果的に放熱抑制効果があることがわかった。このことは外気温に対する熱伝達率の推定が、養生材料に気象変動を考慮した既往の研究だけでは困難であることを示唆しており、今後の検討が必要である。

#### ii) 鉄筋による放熱効果

側壁一般部と比較して打継目近傍の熱伝達率は、旧コンクリート側では小さいのに対し、新コンクリート側では大きい傾向にあり、加圧水槽では特に顕著であった。

加圧水槽と試験体の材料仕様で異なるのは打設温度と鉄筋量であるが、打設温度によりコンクリート自体の熱物性が変動したとは考えにくい。加圧水槽では透水試験圧力が内圧として作用するため、平均鉄筋量は $405\text{kg/m}^3$ と多いのに対し、試験体では外圧として作用するため、ほぼ半分の $203\text{kg/m}^3$ とした。鉄筋の熱伝導率はコンクリートの25倍程度大きいので、鉄筋が配置されている面内方向の熱伝導は鉄筋量に応じて多くなる。また、加圧水槽の側壁上面は打継目で重ね継手のための鉄筋が突出しているのに対して、試験体では構造目地であり鉄筋が露出してない。このため加圧水槽では、新コンクリートから打継ぎ用の鉄筋を媒体として大気へ放熱したり、旧コンクリートへの伝導熱も多く、新コンクリートの打継目近傍は温度低下すると考えられる。

したがって、鉄筋を無視して解析する場合には、見掛け上、新コンクリートの打継目近傍の熱伝達率を大きく、逆に、旧コンクリートでは鉄筋の伝導熱により温度上昇を促し、熱伝達率を小さくする必要があると考えられる。

鉄筋とコンクリートの熱特性から、簡易な並列モデルを用いて加圧水槽と試験体の平均的な熱特性を試算した結果を、表-9に示す。熱伝達率は、突出した鉄筋を放熱体としたモデルの放熱量<sup>3)</sup>から、鉄筋断面積当たりの熱伝達率にいったん換算し、打継ぎ面の鉄筋及びコンク

表-9 鉄筋を考慮した平均熱特性の試算

	単体		鉄筋コンクリート構造物		加圧水槽
	コックリト	鉄筋	試験体	加圧水槽	試験体
側壁片側縦筋 側壁縦筋比	—	—	D29@200 0.32%	D38@200 2段 1.14%	—
鉄筋量( $\text{kg/m}^3$ )	—	—	203	405	2.00
単位体積質量 ( $\text{kg/m}^3$ )	2,360	7,850	2,500	2,640	1.06
比熱 ( $\text{kcal/kg}^\circ\text{C}$ )	0.28	0.11	0.266	0.254	0.95
熱伝導率 ( $\text{kcal/mh}^\circ\text{C}$ )	1.9	47	面内: 2.19 面外: 1.9	2.93 1.9	1.34 1.0
熱伝達率 ( $\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ )	例えば10 とすると	220 / 250	打継目: 11.6 側面: 10	14.8 10	1.28 1.0

表-10 温度応力シミュレーションに用いた力学的物性

	加圧水槽		試験体		加圧水槽
	底板	側壁	底板	側壁	頂版
有効材齢を考慮した ヤング係数	図-6① (試験)	図-6② (試験)	図-6③ (試験)	図-6④ (試験)	図-6⑤ (試験)
ヤング係数の低減係数	0.72(シミュレーション)		0.65(シミュレーション)		
ポアソン比	1/6				
線膨張係数	$7.3 \times 10^{-6}$ ( $1/^\circ\text{C}$ ) (試験)				

リートの断面積平均とした。表-9から、熱伝導率及び熱伝達率に対する鉄筋の及ぼす影響は大きいと考えられ、新旧打継目付近の重ね継手用鉄筋は、熱伝導を促進する放熱体として振る舞うと推定される。

### (3) 温度応力のシミュレーション

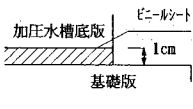
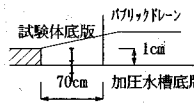
#### a) 力学的物性

コンクリートの力学的物性は材料試験等により定め、表-10に示す。温度応力シミュレーションに用いるヤング係数は、ヤング係数試験により求めた図-6に示す有効材齢との関係を用いた。なお、材齢1日未満のヤング係数は試験をしていないため、凝結終結時を初期値として有効材齢1日まで直線補間した。

大型構造物内の実測応力を実測ひずみで除した有効ヤング係数とヤング係数の比は、ヤング係数を材料試験により得た既往の研究<sup>9)</sup>では、材齢1日の0.77から漸減し7日で0.55にはほぼ平衡するのに対し、ヤング係数をマチュリティにより求めた研究<sup>10)</sup>では、材齢2日の0.5から漸増し5~7日で0.7と報告されている。このように、材齢約1週間の実測に基づくヤング係数の低下率は0.5~0.8の範囲に収まるが、材齢に対する増減傾向は定まっていない。また、既往の規準を整理した文献<sup>11)</sup>でも、材齢により漸減するものと材齢3~5日で増加するものが報告されており、ヤング係数試験から得られる値に直接乗じる低減係数は、確立されていない。

そこで、今回用いた低発熱ポルトランドセメントの自己収縮が小さいことから、当初、ヤング係数の低減係数を材齢によらず一定として、パラメトリックスタディに

表-11 底版下面要素の剛性低減

	加圧水槽	試験体
拘束 低減 構造		
ヤング係数	100 (kgf/cm <sup>2</sup> )	

より同定することにした。また、底版下面のスリップ材の要素剛性は、表-11に示すように低減した。

b) 温度応力のシミュレーション結果

温度応力及びびひ割れ指数の出力位置は、有効応力計の埋設位置に近い要素の積点とした。

i) 加圧水槽

側壁中・下部の断面中央に設置した2測点の円周方向有効応力計の実測データにより、ヤング係数に対する低減係数をパラメトリックスタディし、温度応力をシミュレーションした。その結果、異なった履歴モードを示す有効応力計の計測応力に対し、シミュレーション応力はそのモード及び数値ともほぼ一致させることができた。

ii) 試験体

加圧水槽と同様に、試験体の断面中央の円周方向に設置した6測点の有効応力計の実測データを照合データとして、温度応力のシミュレーションを実施した。その結果、図-10に示すように、かなり異なった履歴モードを示す有効応力計の計測応力に対し、シミュレーション応力は側壁上・中部の2測点を除き、そのモード、数値共ほぼ一致させることができた。

加圧水槽で有効性を確認した有効応力計(GK-100-505)は50mm×50mm×ℓ500mmと大きいセンサを用いたが、試験体では、後で行う透水試験に影響を与えないように、20mm×20mm×ℓ200mmと小型の有効応力計(GK-60-202)を用いた。有効応力計の設置は、コンクリートに埋まる直前に、センサ内にコンクリートの大きな粗骨材を取り除き充填することから、側壁上・中段の2測点ではセンサの埋設時に不具合が生じたと考えられる。このように推定した理由は、図-17に示すように、他の有効応力計で計測した実測応力とシミュレーション応力を比較すると、同様な位置の加圧水槽の側壁中段の有効応力計を含め相関性が高いのに、試験体側壁の上・中段の値は明らかに相関性が低いためである。また、データ分布の散らばりかたは計測当初からであると共に、規則的な分布でないことから、初期値等のデータ変換上の問題ではないと推定される。

加圧水槽及び試験体で合計8測点の計測及びシミュレーション応力を比較すると、図-17に示すように、6測点のうち、加圧水槽のバラツキが少し大きいものの、全体としてかなり良い相関を示した。

したがって、低発熱ポルトランドセメントを用い湿潤養生した外部拘束の少ない鉄筋コンクリート試験体の初期応力は、温度応力解析によりほぼシミュレーションでできたことから、温度応力に支配されているといえ、自己収縮及び乾燥収縮を無視しても、実用上特に問題はないと考えられる。また、シミュレーションに用いた温度応力の解析手法及び解析条件は、妥当であったといえる。当然のことながら温度応力の解析精度は、文字どおり温度の解析精度に左右されることから、図-16に示すように、温度応力解析を高い精度で実施するためには、温度解析を高い精度で実施しておく必要がある。

c) ヤング係数の低減係数の同定

温度応力シミュレーションでは、材料試験と計測により得られる応力解析条件を用い、70日間の実測応力に合うように、ヤング係数の低減係数をパラメトリックスタディした。その結果得られたシミュレーション応力は実測応力と良い相関を示しており、この過程で得たヤング係数の低減係数は同定されたと考えられる。温度応力シミュレーションにより同定されたヤング係数の低減係数は、表-10に併記したように加圧水槽で0.72、試験体で0.65で材齢にかかわらず一定であり、両者には大差がなかった。

同定したヤング係数の低減係数は材齢によらず一定としたが、材齢により変更した解析の一例として、材齢3日まで0.73材齢5日以降1.0とし、その間を直線補間する規準<sup>1)</sup>を用い温度応力解析した結果を、図-18に示す。

その結果、ヤング係数の低減係数を変更した解析応力のうち、0.73とした材齢5日までは実測応力とほぼ対応しているが、1.0とした材齢5日以降の相関性は低下した。材齢3から5日にかけてヤング係数の低減係数は増加するとした既往の規準<sup>1)</sup>によると、打設直後の最高温度に達するおおよそ3日までの温度上昇時には、コンクリートの高温特性によりクリープは大きいとしている。また、最高温度に到達後の温度降下時には、材齢が進行することによりクリープは小さいとしている。しかし、一般的に構造物には昇温時に膨張し圧縮応力が、降温時に収縮し引張応力が作用するため、前述したクリープの大小差を減じると考えられる。また、材齢7日程度の若材齢時において残留した温度応力に対するクリープは漸減するものの持続すると考えられ、ヤング係数の低減係数を1.0にすることは、これらのクリープを無視することになり過大と思われる。

本検討で用いたヤング係数の低減係数を考慮した増加応力を逐次累加する温度応力解析では、材齢にかかわらず一定のヤング係数の低減係数により、有効応力計で計測したコンクリート応力を忠実にシミュレーションできたが、今後、この数値の物性根拠について検討する必要がある。

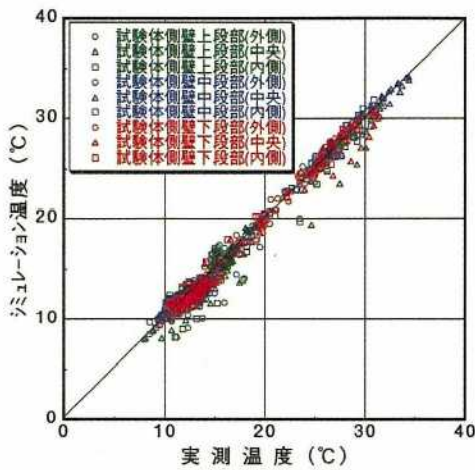


図-16 実測温度とシミュレーション温度の比較

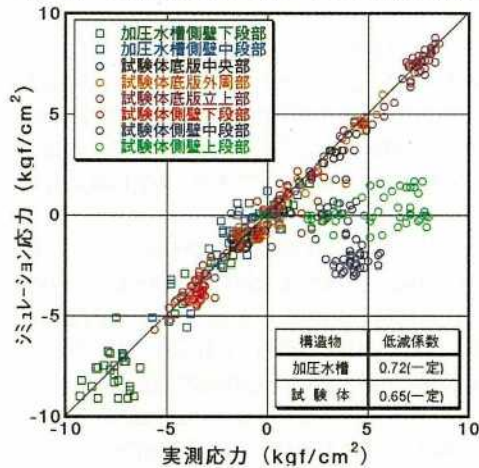


図-17 実測応力とシミュレーション応力の比較  
(ヤング係数の低減係数：一定)

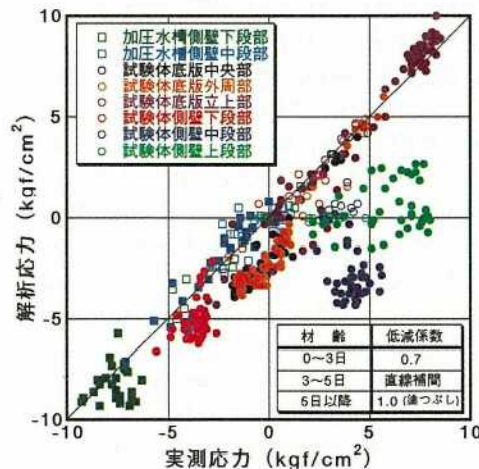


図-18 実測応力と解析応力の比較  
(ヤング係数の低減係数：土木学会施工編)

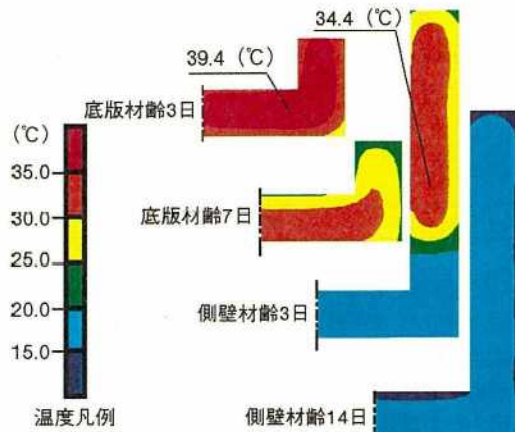


図-19 試験体の温度分布

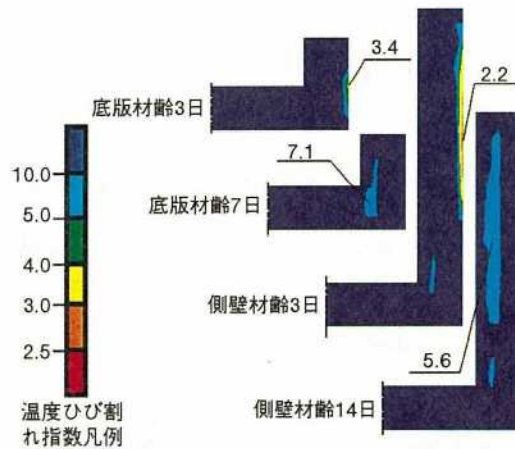


図-20 試験体鉛直方向の温度ひび割れ指数分布

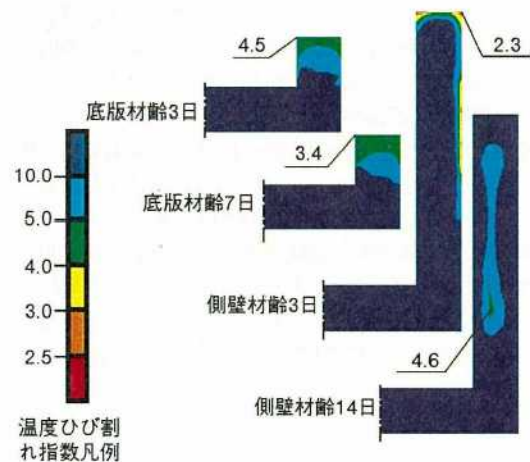


図-21 試験体円周方向の温度ひび割れ指数分布

表-12 温度ひび割れ指数の評価に用いた強度特性

	加圧水槽		試験体		加圧水槽
	底版	側壁	底版	側壁	頂版
有効材齢を考慮した引張強度	図-7① (試験)	図-7② (試験)	図-7③ (試験)	図-7④ (試験)	図-7⑤ (試験)

#### (4) 温度ひび割れ指数の評価

##### a) 強度特性

温度ひび割れ指数の評価に用いるコンクリートの引張強度は、図-7に示す有効材齢との関係を用い、強度特性として表-12に示す。なお、材齢1日未満の引張強度試験を行っていないことから、凝結終結時を初期値として有効材齢1日まで直線補間した。

##### b) 温度ひび割れ指数の評価結果

温度シミュレーションにより算出した有効材齢から推定した引張強度を、温度応力シミュレーションにより得られた温度応力で除して、温度ひび割れに対する安全率に相当する温度ひび割れ指数を評価する。

##### i) 加圧水槽

加圧水槽底版の立上部上面及び外側下部は、放熱により断面中央部ほど温度上昇しないため、外側下部の温度ひび割れ指数は材齢3日後に2.0まで低下した。また、温度ひび割れが確認された側壁上端角部の温度ひび割れ指数は、材齢2日後に1.5と小さかったことが解析により裏付けられた。

##### ii) 試験体

試験体底版の打設後3、7日目、側壁の打設後3、14日目の温度及び温度ひび割れ指数の断面分布を、図-19～21に示す。

底版表面の温度ひび割れ指数は、材齢3日後に外面鉛直方向、及び材齢7日後に立上部上面の円周方向で3.4となった。これは底版の平均温度上昇量と比較して、立上部の温度上昇量が少ないためであり、中央部の温度降下に伴い解消した。

側壁打設直後の内部温度上昇に追従できない表面の鉛直方向において、温度ひび割れ指数は材齢3日後に2.2となった。側壁上部外面の円周方向には、打設初期の部材内温度差により引張応力が生じ、温度ひび割れ指数は上端において材齢3日後に2.3まで低下したが、側壁脱型後に実施した試験体の目視調査では、前述のとおりひび割れは観察されなかった。一方、温度降下時に発生する側壁下部の断面中央の円周方向温度ひび割れ指数は、材齢14日で4.6におさまり、材齢7日の加圧水槽の2.1と比較してかなり改善した。

##### iii) 温度応力解析の適用範囲

今回用いた温度応力解析法は弾性応力解析による逐次累加法であり、温度ひび割れの発生を考慮していない。したがって、厳密には温度ひび割れが発生した時点で解

析の対象外となり、それ以降の解析精度が低下することも考えられたため、温度ひび割れが発生した後の解析精度に注目した。解析の対象とした加圧水槽及び試験体のうち、加圧水槽の断面中央部において温度ひび割れ指数は2.1となったが、温度ひび割れは発生しなかった。また、加圧水槽の表面において1.1まで低下したが、微細な表面ひび割れしか発生しなかったこともあり、特に解析精度は低下しなかった。

したがって、本検討で確認された解析精度の高い温度応力解析が行えた温度ひび割れ指数の最小値は、温度ひび割れの制御に有効な鉄筋の多い表面部において1程度配筋されていない中央部において2程度であった。

## 5. まとめ

外径6.0m、壁厚1.0m、高さ7.0mの中空円筒型の鉄筋コンクリート試験体に、種々の温度ひび割れ防止対策を適用して、施工時の温度ひび割れを防止することを試みた。使用したコンクリートは、低発熱ポルトランドセメントを400kg/m<sup>3</sup>用いてW/C=41.3%とし、10℃にプレクーリングした。また、底版と側壁の打継目は温度応力の少ない底版上1.0mに設け、約1ヵ月の間隔において打設後、計測管理を行いながら断熱湿潤養生を実施した。その結果、脱型後の目視調査、湛水による水張調査及び鉄筋ひずみ計測により、試験体の温度ひび割れの防止を確認した。

つぎに、この試験体の作製過程で得た最長70日間の計測データを基に、温度及び温度応力のシミュレーション解析を行った。熱伝達率及びヤング係数の低減係数の解析条件をパラメトリックスタディにより同定した結果、温度及び温度応力の解析により試験体の計測温度及び応力をほぼ再現できることがわかった。また、精度の高い事前解析を行うには、温度シミュレーションの過程で、気象、養生、配筋等の影響を受ける熱伝達率等の放熱条件の設定に、課題があることが明らかとなった。

以下に、鉄筋コンクリート製試験体の作製及びシミュレーションにより得られたことをまとめる。

(1) 低発熱ポルトランドセメント等の温度ひび割れの制御対策を併用して、大型中空円筒形の鉄筋コンクリート試験体を作製し、施工時の温度ひび割れを防止した。

(2) 熱電対・有効応力計で最長70日間測定した温度及び応力を照合データとして、材料試験・計測により得られなかった熱伝達率及びヤング係数の低減係数をパラメトリックスタディした結果、温度及び温度応力ともにほぼシミュレーションできた。

(3) したがって、小規模のマスコンクリート実構造物においても、以下の条件を満足して温度分布及び温度履歴を精度よく推定すれば、温度応力解析により、施工時の初期応力はほぼシミュレートできると思われる。

- ① 構造物の支持及び拘束条件が明らかなこと
- ② 低発熱ポルトランドセメントのように打設初期に硬化収縮の少ないセメントを使用すること
- ③ 温度ひび割れ指数は断面中央部において2程度、表面において1程度以上あること

(4) 従来の温度及び温度応力解析では、温度と比較して温度応力の解析精度は低いとされてきたが、今回行った温度シミュレーションでの熱伝達率の同定は困難であったのに対し、温度応力シミュレーションでのヤング係数の低減係数の同定は容易であった。

(5) ヤング係数の低減係数はコンクリートの材料物性であり、今後の研究により解明されると考えられる。これに対し、熱伝達率はコンクリート表面の放熱特性であり、外気温と共に不確定な気象に加えて、養生・配筋の影響も受けるため、総合的な検討が必要である。

## あとがき

大型のコンクリート構造物の温度ひび割れを防止するには、さらに、1)基礎剛性の不確定性、2)コンクリート材料の品質のバラツキ、3)表面放熱に対する外乱等を、いかに抑制して解析精度を高めるか検討すべき課題も残されている。今回実施した温度及び温度応力の解析手法が良好な精度を有していることから、解析条件のパラメトリックスタディを行って、温度ひび割れの制御対策の効果を評価していきたいと考えている。なお、今後は試験体の透水試験を実施し、鉄筋コンクリート構造物としての透水性を確認する計画である。

この研究は助原子力環境整備センターの委託研究をまとめたものであり、貴重なご助言を頂いた放射性廃棄物処分高度化システム確認委員会、並びにコンクリート構築物検討委員会の委員の方々に深く感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 土木学会, コンクリート標準示方書〔平成3年版〕施工編, pp. 135~140, 1991. 9.
- 2) 土木学会原子力土木委員会, 原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震設計に関する安全性照査マニュアル, pp. I-132~136, 1992. 9.
- 3) 日本コンクリート工学協会, マスコンクリートの温度応力研究委員会報告書, 1985. 11.
- 4) 石川, 前田, 西岡, 田辺: マスコンクリートの熱変形および熱応力に関する実験的研究, 土木学会論文集, 第408号/V-11, pp. 121~130, 1989. 8.
- 5) 土木学会, コンクリート技術シリーズ マスコンクリートの現状と動向, pp. 6~39, 1994. 10.
- 6) 日本コンクリート工学協会, 超流動コンクリート研究委員会報告書(II), 1994. 5
- 7) 岡村, 前川, 小澤: ハイパフォーマンスコンクリート, 技報堂出版, pp. 140~149, 1994. 5.
- 8) 日本冷凍協会, 冷凍空調便覧, pp. 179~180, 1981.
- 9) 中内, 吉川, 庄野: マスコンクリートの温度応力解析, 間組研究年報, pp. 159~179, 1980. 8.
- 10) 田辺, 原口, 石川: マスコンクリートの温度応力問題における岩盤あるいは旧コンクリートの外部拘束効果, マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集, 日本コンクリート工学協会, pp. 83~90, 1982. 9.
- 11) 土木学会, コンクリートライブラリー70 コンクリート標準示方書(平成3年版)改訂資料およびコンクリート技術の今後の動向, pp. 236~241, 1991. 9.

(1995. 10. 5受付)

## EXPERIMENTAL STUDY AND ANALYSIS FOR PREVENTING THERMAL CRACKS OF LARGE CYLINDRICAL REINFORCED CONCRETE SILO

Kazuhiro KONISHI, Nobufumi TAKEDA, Keishiro IRIYA,  
Ai FUJIWARA and Yukikazu TSUJI

This experimental study has been conducted on preventing cracks induced due to the heat of hydration of cement during construction. A large cylindrical reinforced concrete silo was used to assess the effect of several improved construction methods. Numerical analysis with high accuracy was conducted for the measured stresses, temperature, etc.. This numerical method, in which FEM was used can predict the thermal stresses of practical significance. It was noted that more detailed conditions on surface heat convection such as, influence of weather and curing conditions, must be considered to predict the actual value.