

論文 輸入セメントと石灰石骨材を採用した大型円筒形PCタンクの側壁コンクリートの温度ひび割れ制御

伊藤 朋紀*1・高安 馨*2・堅田 茂昌*3・下川 浩*4

要旨：大型円筒形PCタンクの側壁コンクリートは、外部拘束による温度ひび割れの発生確率が高く、施工前に温度応力解析などによりひび割れ対策を検討する必要がある。示方書や指針に掲載されている温度応力解析に関する各パラメータは、国内産の一般的な材料の実績に基づき設定されているが、沖縄県で施工された大型円筒形PCタンクでは、輸入セメント（中国産）と石灰石骨材が使用されたため、実験によりコンクリートの強度特性や熱特性値を決定した。これらの値を用いて温度応力解析を行い施工結果と比較検討し、施工結果に近いひび割れ幅が算定できることを確認した。

キーワード：輸入セメント、石灰石骨材、PCタンク、温度応力解析

1. はじめに

大型円筒形プレストレストコンクリートタンク（以下PCタンク）の側壁コンクリートは、底版や下段の側壁の外部拘束により、水和熱に起因するひび割れが発生する確率が高い。このような場合、土木学会コンクリート標準示方書（以下、示方書）〔設計編〕¹⁾では、施工前に温度応力解析を行い、ひび割れ対策を行うことを規定している。温度応力解析を行う際に使用するコンクリートの強度特性や熱特性値は、示方書〔設計編〕やマスコンクリートひび割れ制御指針 2008²⁾（以下、ひび割れ制御指針）によっている。しかし、沖縄県は気象条件が厳しく、これらの特性値が当てはまらない場合もある³⁾。一方、近年、沖縄県本島において輸入セメント（中国産）の使用が増えており、骨材は琉球石灰石や近隣の海砂が使用されている。このような材料を使用する場合、温度応力解析に使用する物性を適切に設定する必要がある。そこで、輸入セメントと沖縄本島の骨材を組み合わせたコンクリートの断熱温度上昇量、強度特性、線膨張係数を建設現場で簡便に実施できる試験によって計測し、その結果を解析することでこれらの値を求めた。また、貯水用円筒形PCタンクのひび割れ制御方法を検討する際に目標性能を定め、実施工の大型円筒形PCタンクにおいて検証した。

2. 対象とするPCタンクの概要

対象とするタンクの形状は、内径 80.0m、有効水深 10.5m、有効容量 50,000m³の円筒形PCタンクで、建設地点は沖縄県である。上水道用のPCタンクとしては大型であり、示方書〔施工編〕⁴⁾によれば底版、側壁はマ

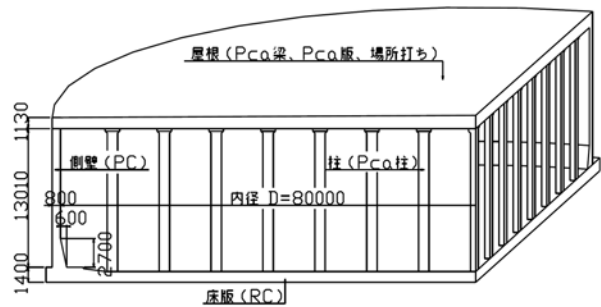


図-1 タンク概要図（単位：mm）

スコンクリートに分類される。タンク概要図を図-1に示す。底版は分割施工、側壁ハンチ部およびその上の側壁等厚部1リフト目（高さ1.8m）は高性能AE減水剤と膨張材を使用し、それ以上の上段は高性能AE減水剤を用いた配合となっている。このうち、本論文ではハンチ上の側壁等厚部1リフト目を対象として検討を行った。

3. コンクリートの物性確認試験

3.1 実物大試験の概要

輸入セメントを用いたコンクリートを用いて、側壁等厚部を想定した実物大簡易試験体を作製し、コンクリート断面内の温度履歴を計測し、逆解析によりコンクリートの断熱温度上昇量を求める。また、強度特性を圧縮供試体より求める。試験体寸法は、80cm×100cm×120cmである。側壁の内外面を想定した面には実施工に用いる木製の型枠を使用し、コンクリートの連続面となる側面と下面は断熱境界とするため、厚さ30cmのポリスチレンフォームを使用した。コンクリートの温度履歴は熱電対により測定した。

*1 (株) 安部日鋼工業 技術工務本部 技術部 (正会員)

*2 沖縄県企業局 建設計画課

*3 (株) 安部日鋼工業 技術工務本部 技術部 (正会員)

*4 (株) 安部日鋼工業・(株) 沖栄建設・大畑建設 (株) J V

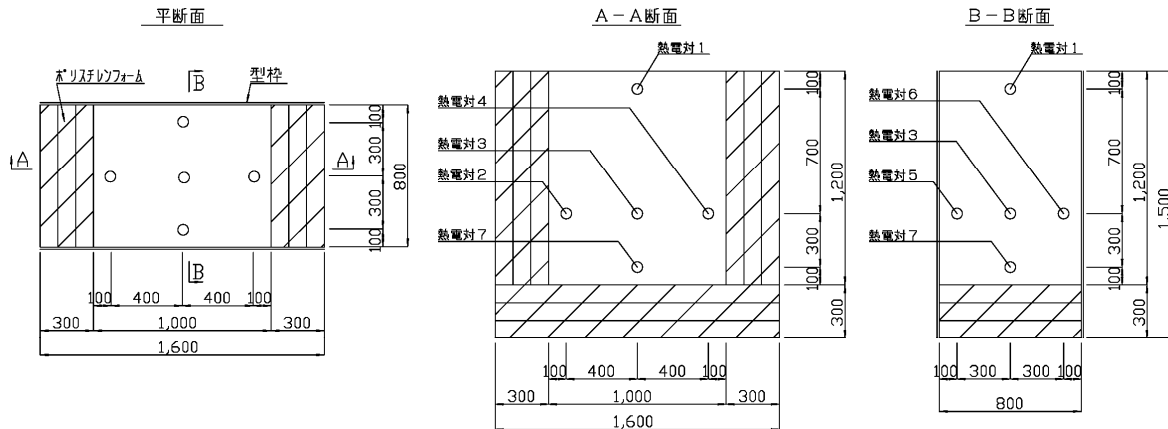


図-2 試験体の寸法および温度測定位置 (単位: mm)

表-1 コンクリートの配合表

	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
			水	セメント	細骨材①	細骨材②	粗骨材	混和剤
配合1	41.5	44.4	177	427	602	148	964	1,503 ※1
配合2	44.0	48.5	157	357	701	173	953	2,560 ※2

セメント:普通セメント (張家港海螺セメント有限公司)
 (密度:3.15g/cm³, 比表面積:3380cm²/g, 凝結始発:2-08, 終結:3-12
 水和熱7d:340J/g, 28d:380J/g)
 細骨材①:砕砂 (産地:山城鉱山, 表乾密度:2.64g/cm³, F.M.3.10)
 細骨材②:海砂 (産地:東村沖, 表乾密度:2.60g/cm³, F.M.2.40)
 粗骨材:砕石 (産地:山城鉱山, 表乾密度:2.70g/cm³, Gmax:20mm)
 混和剤:※1AE減水剤, ※2高性能AE減水剤

作製した試験体の寸法および温度測定位置を図-2に示す。コンクリートは、設計基準強度 36N/mm², スランプ 12cm, 粗骨材寸法 20mm の配合 1 と, 高性能 AE 減水剤を添加した配合 2 とした。コンクリートの配合表を表-1に示す。

3.2 試験結果

(1) コンクリートの強度特性

材料試験の結果を表-2に示す。圧縮強度の発現を国内の標準的なセメントのものと比較するため、配合1の圧縮強度の履歴と、ひび割れ制御指針の強度発現の式から算出した水セメント比が等しい普通ポルトランドセメントおよび早強ポルトランドセメントの圧縮強度の履歴を図-3に示す。図より、本試験のコンクリートは水セメント比が同一の場合、7日以降の強度は低いが、強度の立ち上がり早いことがわかる。また、ヤング係数の試験値は、ひび割れ制御指針のヤング係数の評価式を用いて圧縮強度から算定した数値とほぼ一致した。

(2) コンクリートの発熱特性

試験により得られた計測温度履歴を図-4に示す。コンクリート内部およびポリスチレンフォーム付近の熱電対 2, 3, 4, 7 と木製型枠付近の熱電対 5, 6 は、それぞれほぼ同じ温度を示した。

3.3 解析条件および解析モデル

試験により計測された温度履歴を解析で再現できるよう、コンクリートの発熱特性に関わる諸係数を逆解析

表-2 コンクリートの材料試験結果 (単位: N/mm²)

種類	試験項目	σ ₁	σ ₃	σ ₇	σ ₁₄
配合1	圧縮強度	13.9	26.4	35.0	38.2
	ヤング係数	21,200	27,500	31,700	32,400
配合2	圧縮強度	14.2	27.4	35.1	37.7
	ヤング係数	21,500	28,000	30,600	33,700

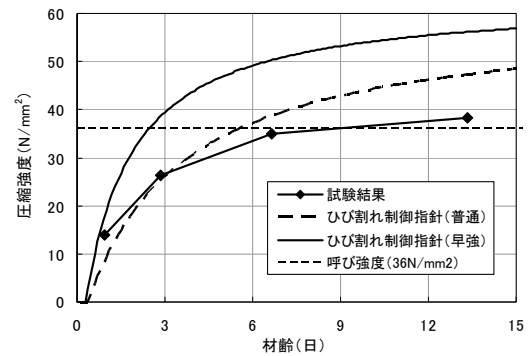


図-3 圧縮強度履歴

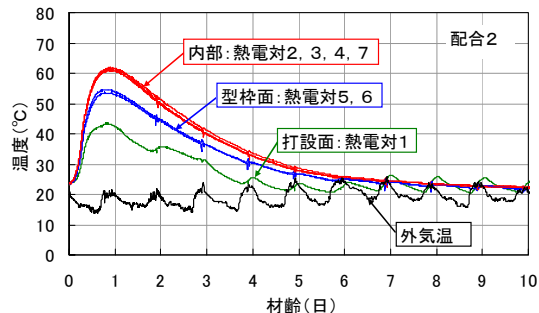
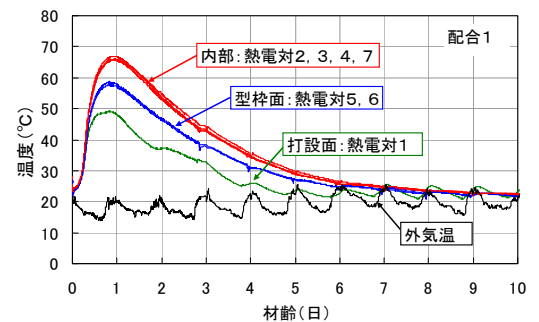


図-4 計測温度履歴

により求める。解析のモデルおよび境界条件を図-5に示す。試験体のコンクリート部分のみをモデル化し、型枠面は熱伝達率を $8\text{W/m}^2\text{C}$ 、ポリスチレンフォーム面は断熱境界とした。打設面は散水養生のため熱伝達率を $14\text{W/m}^2\text{C}$ とした。また、コンクリートの比熱は 1.125J/gC と一般的な値を用いたが、熱伝導率は時間が経過しても温度が低下しにくい試験結果を考慮し、一般より小さい 2.1W/mC とした。

3.4 解析結果

コンクリートの断熱温度上昇量は、使用するセメントの種類、単位セメント量、打込み温度から式(1)により評価できる。

$$Q(t) = Q_{\infty} [1 - \exp\{-r(t - t_{0,\infty})\}] \cdots \text{式(1)}$$

ここに、 t : 材齢 (日)

$Q(t)$: 材齢 t 日までの断熱温度上昇量 (°C)

Q_{∞} : 終局断熱温度上昇量 (°C)

r : 断熱温度上昇速度に関する係数

$t_{0,\infty}$: 発熱開始材齢 (日)

今回の試験では、コンクリートの打込み温度は 23C 、単位セメント量は配合1が 427kg/m^3 、配合2が 357kg/m^3 である。これらの値から、国内の標準的な材料を使用した場合の断熱温度上昇特性式の諸係数は、表-3の通りとなる。なお、普通ポルトランドセメントの場合と早強ポルトランドセメントの場合を算出した。

試験で計測された温度履歴を再現できるように、コンクリートの終局断熱温度上昇量および温度上昇速度を逆解析により求めた。表-3に求められた数値を示す。また、図-6に試験体コンクリートの打設面、内部、型枠面にそれぞれ対応する熱電対1、熱電対3、熱電対5の実測温度履歴と、解析により得られた同位置の温度履歴を示す。

終局断熱温度上昇量 Q_{∞} は、普通ポルトランドセメントよりも小さい値となり、温度上昇速度に関する係数 r は、早強ポルトランドセメントとほぼ同じ値となった。これは、圧縮強度の長期強度が普通ポルトランドセメントより低く、強度の立ち上がり早い傾向があることと一致している。

3.5 コンクリートの熱膨張係数

本工事に使用するコンクリートには、細骨材、粗骨材ともに石灰石が使用されている。既往の実験によれば、石灰石の熱膨張係数は平均 $5.5 \times 10^{-6} / \text{C}$ と、他の骨材と比較して小さいことが確認されている。したがって石灰石が使用されたコンクリートの熱膨張係数も小さいことが予想されるが、文献によると石灰石が使用されたコンクリートの熱膨張係数は $4.3 \sim 10.3 \times 10^{-6} / \text{C}$ とかなり

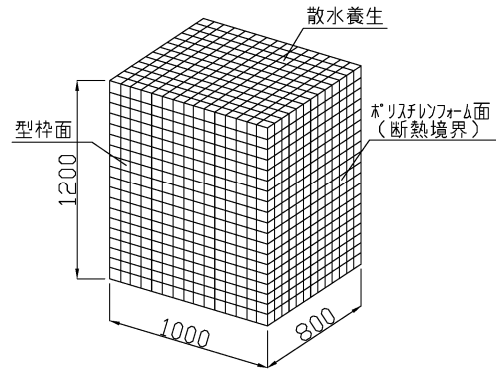


図-5 実物大試験解析モデル (単位: mm)

表-3 断熱温度上昇特性に関する各係数

種類	係数	単位	ひび割れ制御指針に基づく算定値		検討結果
			普通ポルトランドセメント	早強ポルトランドセメント	
配合1	Q_{∞}	°C	65.4	71.4	60.0
	r	-	1.726	2.322	2.300
	$t_{0,\infty}$	日	0.102	0.048	0.125
配合2	Q_{∞}	°C	57.0	61.9	52.0
	r	-	1.551	2.215	2.200
	$t_{0,\infty}$	日	0.121	0.070	0.146

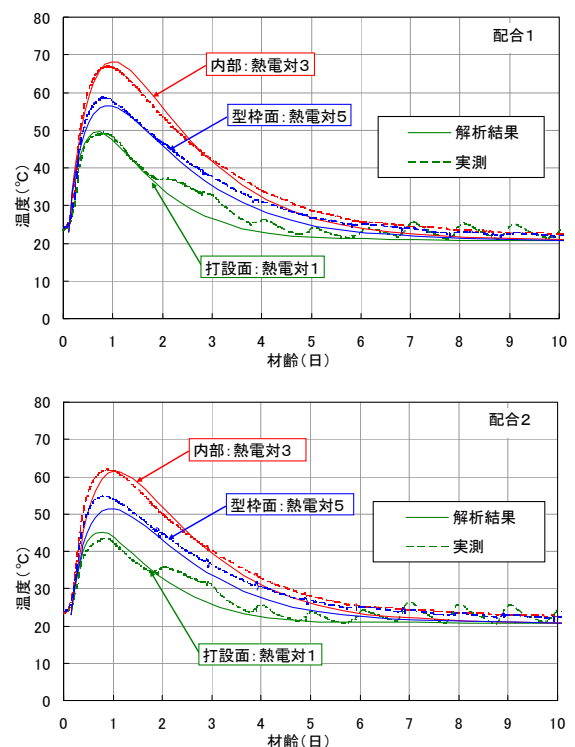


図-6 実測と解析結果の温度履歴

のばらつきが見られる⁵⁾。そこで、本工事に使用するコンクリートと同じ配合のコンクリートを用いて試験体を作製し、熱膨張係数を測定した。

コンクリートの熱膨張係数を測定する方法について、基準化された方法はない。ここでは、図-7に示す圧縮供

試験体の中央に熱電対付きひずみ計を配置した試験体を 2 体作製した。試験体を水中に入れ、水温をゆっくり変化させることで試験体の温度を均一に変化させ、このときの試験体の温度とひずみを測定し、熱膨張係数を算出する方法をとった。

試験はコンクリートの水和反応および自己収縮の影響が少なくなるよう、打設の 1 ヶ月後に行った。温度上昇時は、試験体を氷水の中に入れ、温水を徐々に追加し温度を 30℃まで上昇させた。下降時は、約 60℃の温水に入れ、そのまま放置して 30℃まで下降させた。温度変化はできるだけゆっくり与えるのが望ましく、既往の試験では 1~2℃/h で試験されている例が多い³⁾。本実験の温度変化速度は 0℃から 30℃への上昇時は 1.4℃/h、60℃から 30℃への下降時は 1.6℃/h である。

計測結果を最小二乗法により近似した式を図-8 に示す。試験体を 0℃から 30℃へ上昇させ、その後、60℃から 30℃まで下降させたが、両者の 30℃時点のひずみが一致していない。この理由として、試験体を 60℃まで上昇させるため約 60℃の温水に入れた時に、急激に体積膨張し、微細なひび割れが発生した可能性が考えられる。

測定結果を近似した直線の傾きから算出した熱膨張係数を表-4 に示す。試験の結果、熱膨張係数は平均で $4.53 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ となった。これは一般の場合 ($10 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) に比べ半分以下の値である。したがって本骨材を使用したコンクリートは、温度により発生するひずみが一般の場合に比べ小さくなり、マスコンクリートの温度ひび割れに限って言えば、非常に有利な材料といえる。

4. PC タンクのひび割れ制御

4.1 ひび割れ制御における目標性能

水を貯留するコンクリート構造物に要求される供用性能は、水密性と耐久性が挙げられる。水密性に対する照査として、土木学会では「構造物に防水処理を施すことにより、水密性に関する構造物の性能を確保してよい」とある。また、高い水密性を確保する場合、「断面力によるコンクリート応力は全断面において圧縮応力とし、最小圧縮応力度を $0.5\text{N}/\text{mm}^2$ 以上とする」とある¹⁾。一般には、防水処理を施す仕様として水密性を確保しているが、PC タンクの側壁円周方向は、満水時においても圧縮応力度を $0.5\text{N}/\text{mm}^2$ 以上確保しており、高い水密性を有している。側壁外面は塗装が施されるが、腐食性環境下とすれば、ひび割れ幅の限界値は 0.28mm ($0.004\text{C} = 0.004 \times 70\text{mm}$) となる。

PC タンクは円周方向プレストレスを導入することで発生したひび割れ幅を小さくできるので、プレストレス導入前のひび割れ幅を管理する必要がある。ひび割れ制御の目標ひび割れ幅は、一般に補修を必要としない目安

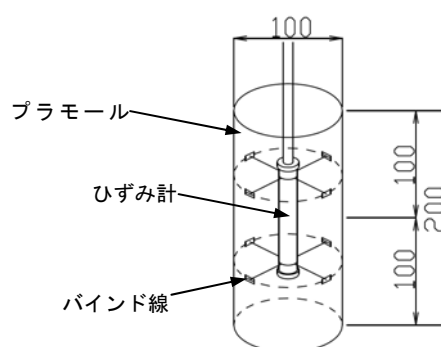


図-7 試験体概要図(単位: mm)

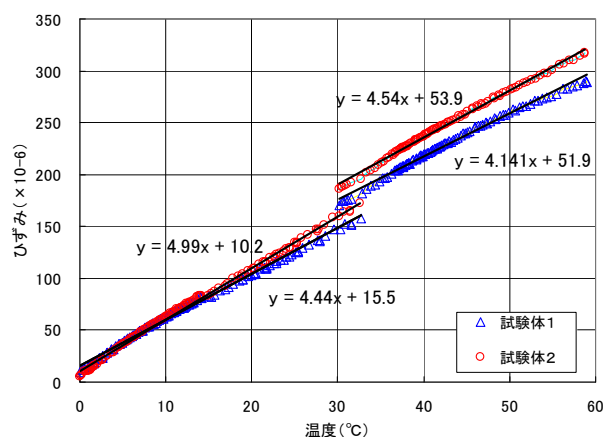


図-8 計測結果

表-4 熱膨張係数試験結果

	熱膨張係数 ($10^{-6}/^\circ\text{C}$)	
	温度上昇時 (0℃→30℃)	温度下降時 (60℃→30℃)
試験体1	4.44	4.14
試験体2	4.99	4.54

の 0.2mm とした。

4.2 温度応力解析

簡易な現場試験で得られた熱特性を用いて、温度応力解析により側壁のひび割れ幅を推定した。解析の対象としたのは側壁ハンチ上の側壁等厚部 1 リフト目である。したがって、解析モデルは、側壁等厚部 1 リフトまでとし、対称性を考慮して 1/4 モデルとした。解析モデルおよび熱伝達境界を図-9 に示す。側壁のコンクリートは、表-1 の配合 2 (高性能 AE 減水剤) に膨張材を加えた配合である。コンクリートの配合表を表-5 に示す。ひび割れ制御指針では、膨張材を用いたコンクリートの熱物性値は膨張材無混和のコンクリートと同一としてよいとあり、本解析でも、終局断熱温度上昇量 Q_{∞} 、温度上昇速度に関する係数 r 、圧縮強度、熱膨張係数は膨張材無混和の試験で得られた値を用いた。外気温およびコンクリートの打込み温度は実際に計測された値を使用した。それ以外の入力値は、ひび割れ制御指針に記載されている標準的な値を用いた。

解析より得られた最小ひび割れ指数分布を図-10に、最小ひび割れ指数発生位置における温度履歴およびひび割れ指数の履歴を図-11に示す。

4.3 追加鉄筋によるひび割れ制御

温度応力解析によって側壁のひび割れ幅を推定した。無対策の場合、最小ひび割れ指数は0.64となった。側壁等厚部の鉄筋比は0.36%であり、ひび割れ制御指針の温度ひび割れ指数とひび割れ幅の関係式より、ひび割れ幅は0.276mmと算定された。そのため、現場では側壁円周方向の鉄筋を追加して鉄筋比を0.36%から0.61%まで増加した。鉄筋比が0.61%のとき、ひび割れ幅は0.163mmと算定され、目標ひび割れ幅の0.2mm以下となることが推定できる。なお、この解析に用いた熱膨張係数は、安全性を踏まえて一般の値 ($10 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) を採用した。

次に、測定した熱膨張係数による解析を行った。対象部位の最小ひび割れ指数は1.24となった。鉄筋比が0.36%の場合、ひび割れ幅は0.158mm、鉄筋比を0.61%まで増加すると、ひび割れ幅は0.093mmと算定された。

5. 施工結果

PCタンク側壁等厚部を施工する際、図-12に示す3箇所の温度を10日間計測した。温度履歴を図-13に示す。打設時の外気温は約29°Cで、ひび割れ対策として実施した骨材への散水によるブレッカーリング、生コン車ドラムクーリングカバーの使用および生コン車待機場所の遮光ネット設置により、コンクリートの打込み時の温度は、外気温+2°C程度であった。

コンクリート打設の20日後に型枠を取り外した。型枠取り外し直後に、円周方向に約8m間隔で側壁鉛直方向に伸びる貫通ひび割れが確認された。そのほとんどがひび割れ幅0.1mm以下で、最大ひび割れ幅は0.15mmであった。これらのひび割れは、PC鋼材緊張後には約半数がひび割れ幅を確認できなくなり、最大でも0.08mm以下となった。

6. 解析の妥当性確認

6.1 温度履歴

解析値と実測値の温度履歴を図-13に示す。実測値が解析値より一様に大きな値を示した。これは、コンクリートの打込み温度が解析では28.0°Cであるのに対し実測では31.5°Cであり、外気温が解析では23.0°Cであるのに対し実測では29.3°Cと、差があったためと考えられる。そこで、施工時のコンクリート打込み温度と外気温を入力条件として再解析を行った結果を図-14に示す。断面中央部とコンクリート打設面付近は、ほぼ一致する結果となり、実物大試験で求めた熟物性値で、実構造物の温度を再現できることが分かる。型枠面では解析と実測に

表-5 コンクリートの配合表

配合	水結合材比 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
			水	セメント	膨張材	細骨材①	細骨材②	粗骨材	混和剤
配合	44.0	48.5	157	337	20	701	173	953	2.56

セメント:普通セメント(張家港海螺セメント有限公司)
 (密度:3.15g/cm³,比表面積:3380cm²/g,凝結始発:2-08,終結:3-12
 水和熱7d:340J/g,28d:380J/g)
 膨張材:水和熱抑制型膨張材
 細骨材①:砕砂(産地:山城鉱山,表乾密度:2.64g/cm³,F.M.3.10)
 細骨材②:海砂(産地:東村沖,表乾密度:2.60g/cm³,F.M.2.40)
 粗骨材:砕石(産地:山城鉱山,表乾密度:2.70g/cm³,Gmax:20mm)
 混和剤:高性能AE減水剤

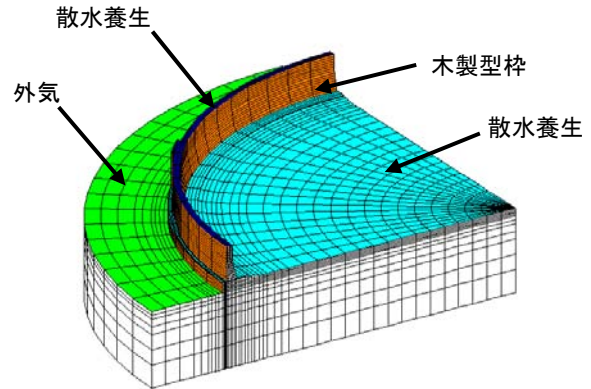


図-9 解析モデルおよび熱伝達境界

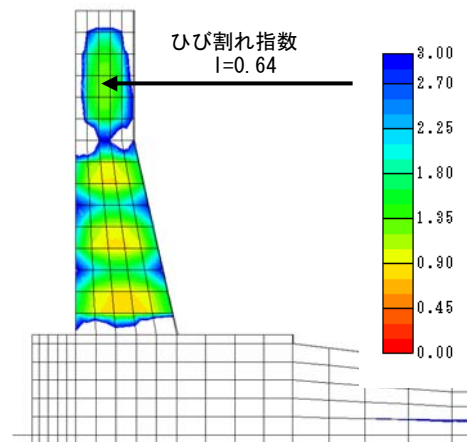


図-10 最小ひび割れ指数分布図

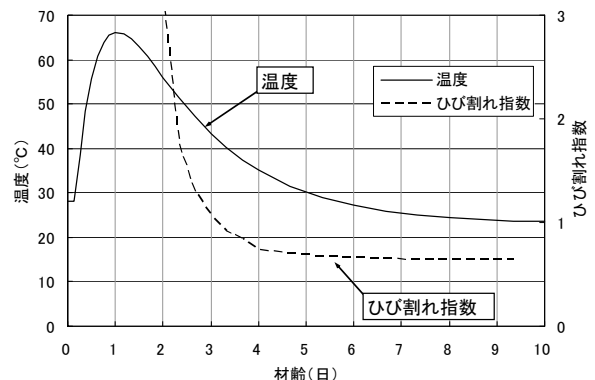


図-11 温度およびひび割れ指数履歴

最大 5℃の差が見られた。側壁コンクリートは型枠面に近づくにつれ急激に温度が下がる温度分布となっており、解析モデル要素の取り方、熱伝達率の設定などの解析上の要因や、構造物の寸法誤差、熱電対の設置誤差などの施工上の要因などによって、型枠面近傍は、解析と実測に差が生じやすいと考えられる。しかし、側壁コンクリートの温度ひび割れは貫通ひび割れであり、ひび割れ幅の算定は、断面中央部付近のひび割れ指数を用いるので、実施工に近い解析結果が得られると考えられる。

6.2 ひび割れ

計測した熱膨張係数を考慮した解析により算定されたひび割れ幅 0.093mm に対し、現場で確認されたひび割れのほとんどが 0.1mm であった。したがって、本論文にて行った試験で得られた値を用いて解析することで、施工結果に近いひび割れ幅を算定することができることが分かった。

今回は解析と施工結果が一致したが、ばらつきが大きい熱膨張係数は、本試験結果をそのまま他工事に使用すると解析結果が危険側の判定となる可能性がある。事前のひび割れ対策にあたり解析をする際には、採用する入力値には、慎重な対応が必要である。

7. まとめ

輸入セメントと石灰石骨材を使用し、厳しい条件下で施工されるコンクリートの強度特性および熱特性値を試験により求め、これらの値を用いて、大型PCタンク側壁に対し温度応力解析を行った。また、現場計測を行い解析の妥当性を確認した結果、次のような結論を得た。

- (1) 輸入セメントを用いたコンクリートの終局断熱温度上昇量 Q_{∞} は、普通ポルトランドセメントよりも小さい値となり、温度上昇速度に関する係数 r は、早強ポルトランドセメントとほぼ同じ値となった。
- (2) 石灰石骨材を使用したコンクリートの熱膨張係数は $4.53 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ となった。
- (3) コンクリートの打込み温度と外気温を適切に評価すれば、実物大試験で求めた熱物性値を用い、実構造物の温度を再現できる。また、試験により求めた熱膨張係数を用い、施工結果に近いひび割れ幅を算定できる。

謝辞： 本対策を行うにあたり、ご協力頂きました沖縄県企業局の関係者各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) コンクリート標準示方書 [設計編], (社) 土木学会, 2007
- 2) マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008, (社) 日本コンクリート工学会, 2008

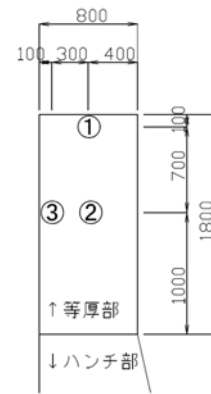


図-12 計測位置断面図(単位: mm)

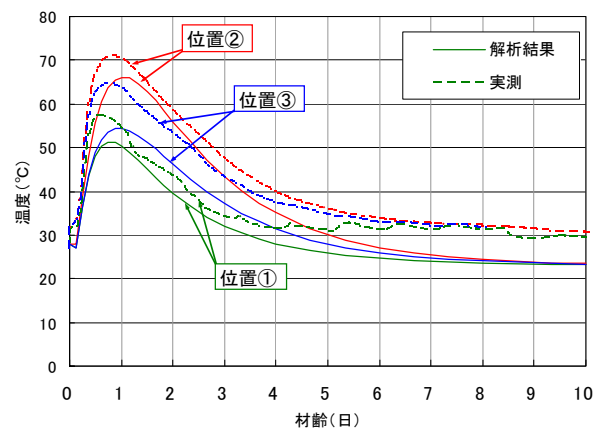


図-13 解析と実測の温度履歴

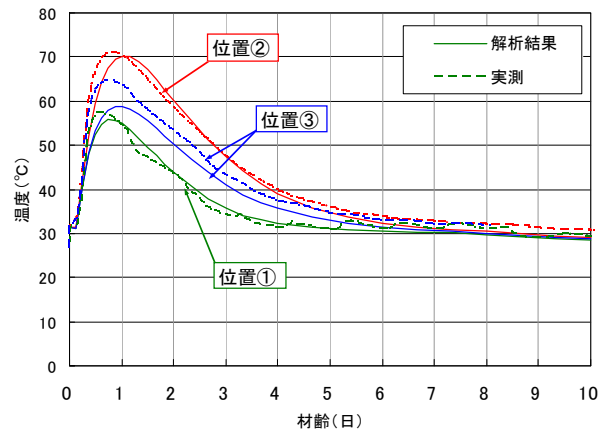


図-14 再解析と実測の温度履歴

- 3) 西尾浩志, 嘉手納良啓, 新垣允啓, 屋良朝憲: 酷暑条件下での温度応力を考慮した大型PCタンク側壁の施工, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.10, No.2, pp.127-132, 1988
- 4) コンクリート標準示方書 [施工編], (社) 土木学会, 2007
- 5) 川口徹: コンクリートの熱膨張係数に関する既往の研究成果について, 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, pp.15-18, 1982.9