

酷暑地域における大型円筒形PCタンク側壁の温度ひび割れ制御

(株) 安部日鋼工業 正会員 ○伊藤 朋紀
 (株) 安部日鋼工業 片山 悟
 (株) 安部日鋼工業 蓑毛 旭
 (株) 安部日鋼工業 河合 真樹

1. はじめに

沖縄県企業局の新石川浄水場建設工事の一環として計画された原水調整池は、半地下式の円筒形PC構造で、側壁の壁厚は80cmであり、土木学会コンクリート標準示方書〔施工編〕¹⁾によればマスコンクリートに分類される。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温度ひび割れが発生する確率が高い。そこで、マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008²⁾に基づき、3次元FEMによる温度応力解析を実施し、対策を検討した。また、解析の妥当性を確認するため、解析と施工結果を比較検討した。本稿はこれらの温度ひび割れ制御について報告するものである。

2. PCタンクの概要

本PCタンクは、内径80.0m、有効水深10.5m、有効容量50,000m³、2池で、上水道用のPCタンクとしては大型である。タンク概要図を図-1に示す。発注図書では、底版は分割施工、側壁ハンチ部は高性能AE減水剤と膨張材を使用しており、温度ひび割れ対策を踏まえた仕様であった。一方、ハンチ部より上の側壁等厚部の最下段は膨張材の使用、それより上の段は一般的なコンクリートであり、温度ひび割れ対策が必要と判断した。

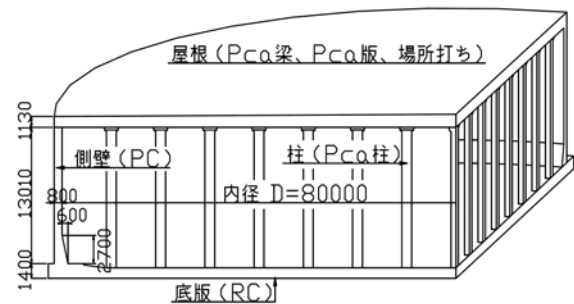


図-1 タンク概要図 (単位: mm)

3. ひび割れ制御の目標値

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。本PCタンクは側壁内面に防水処理を施すことにより、水密性を確保しており、また、側壁の円周方向は、満水時においても圧縮応力度を0.5N/mm²以上確保しているため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 (0.004C=0.004×70mm)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の0.2mm以下とした。

4. 側壁コンクリートの物性確認

温度応力解析に用いるコンクリートの発熱特性は、示方書〔設計編〕³⁾やひび割れ制御指針に標準的な値が記載されているが、本工事では、現地生コンプラントの諸事情により中国産セメントを使用した。そこで、側壁コンクリートの発熱特性を把握するために、側壁等厚部を想定した800×1000×1200mmの実物大試験体を作製し、コンクリートの温度履歴を熱電対により測定した。作製した試験体の寸法と温度測定位置を図-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、これに高性能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。

試験で計測された温度履歴を再現できるよう、コンクリートの熱特性値を逆解析により求め

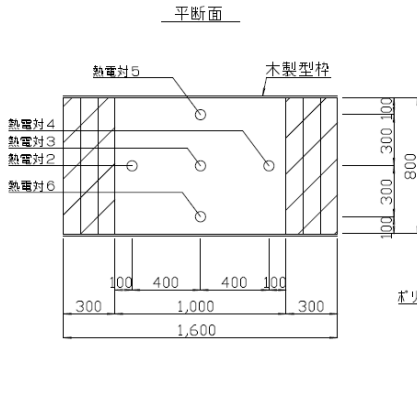


図-2 試験体の寸法と温度測定位置

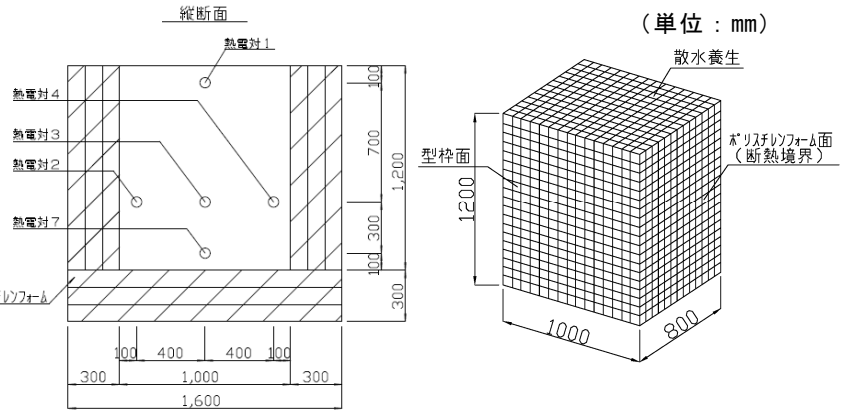


図-3 実物大試験解析モデル

た。解析のモデルと境界条件を図-3に示す。表-2に求めた数値を示す。図-4に配合1試験体コンクリートの打設面の熱電対1, 内部の熱電対3, 型枠面の熱電対5および外気温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。

5. 温度応力解析による温度ひび割れ検討

5.1 原設計のひび割れ検討

実物大試験で得られた強度特性値と熱物性値を用いて、発注図書の条件で施工した場合の側壁のひび割れ指数を算出した。外気温は年平均気温 23℃で一定とし、コンクリート打設時の温度は外気温に 5℃加えたものとした。解析モデルは、対称性を考慮して 1/4 モデルとした。解析モデルと熱伝達境界を図-5に示す。

発注図書の条件の解析より得られた最小ひび割れ指数分布を図-6に示す。ひび割れ指数は側壁下部で 0.52, 側壁上部で 0.46 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、ひび割れ幅は側壁下部で 0.30mm, 側壁上部で 0.31mm と算定された。ひび割れ幅の目標値を 0.2mm 以下とすると、ひび割れ対策を行う必要がある。

5.2 各種対策を行った場合のひび割れ検討

過去において、沖縄県企業局発注の大型 PC タンクでは、パイプクーリングによるひび割れ制御⁴⁾を行った。本件はこれを上回る大型構造であり、横締めシーすを利用したパイプクーリングの効果が薄く、クーリング用パイプを追加する必要がある。しかし、コンクリートの充填性など構造的な課題があり、費用対効果も踏まえ、新たな対策を検討した。ひび割れの改善を目的とした各対策を検討し、対策を実施した時のひび割れ幅を解析により算出した。解析結果を表-3に示す。なお、表中の対策7については、現場の諸事情により低熱ポルトランドセメン

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)
 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

表-2 解析により得られた熱物性値

種類	係数	単位	検討結果
配合1	Q _∞ : 終局断熱温度上昇量	℃	60.0
	r: 断熱温度上昇速度に関する係数	—	2.300
	t _{0,∞} : 発熱開始材齢	日	0.125
配合2	Q _∞ : 終局断熱温度上昇量	℃	52.0
	r: 断熱温度上昇速度に関する係数	—	2.200
	t _{0,∞} : 発熱開始材齢	日	0.146

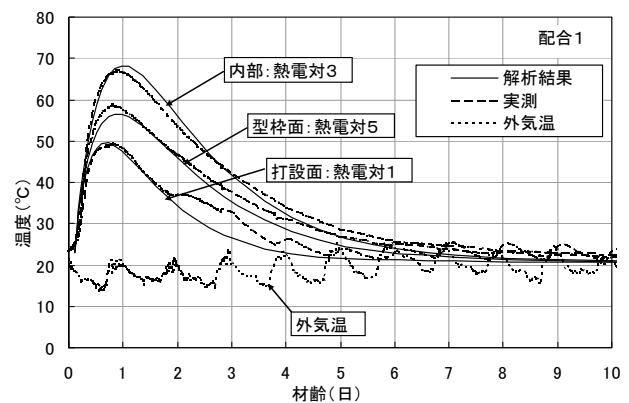


図-4 実測と解析結果の温度履歴

トは使用できなかったが、参考のため解析を行った。

低熱ポルトランドセメントを用いた場合、側壁下端のひび割れ指数の改善効果がみられたが、その他対策では、ひび割れが発生する確率は高く、推定ひび割れ幅は目標値 0.2mm 以下を満足しない。そこで、鉄筋を追加（鉄筋比を 0.36%から 0.61%まで増加）して、ひび割れ幅を 0.2mm 以下に制御することを基本とし、側壁等厚部最下段は高性能 AE 減水剤と膨張材の併用、それより上の段は高性能 AE 減水剤を使用することとした。また、骨材への散水によるプレクーリング、生コン車のドラムクーリングカバー使用、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温度を下げる対策を実施した。

6. 施工結果

6月に施工した1池目の側壁等厚部最下段の施工結果を述べる。図-7に示す3箇所の温度をコンクリート打設から10日間計測した。温度履歴を図-8示す。打設時の外気温は約29℃で、プレクーリングと生コン車の日射対策の結果、コンクリートの打込み時の温度は、外気温+2℃程度となった。型枠取り外し時に、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。当初の目標通りひび割れ幅を0.2mm以下に押さえることができた。なお、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となった。

一方、1月に施工した2池目で発生したひび割れは10本程度で、ひび割れ幅は平均で0.06mm、最大で0.10mmであった。本数が少なかった原因として、冬季施工であるため打込み温度が1池目と比べ10℃ほど低かったことが考えられる。

7. 解析の妥当性確認

7.1 温度履歴

事前解析値と実測値の温度履歴を図-8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値28℃に対し実測値31℃であり、外気温が解析値23℃に対し実測値29℃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-9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熱物性値で、実構造物の温度を概ね再現できることが分かる。

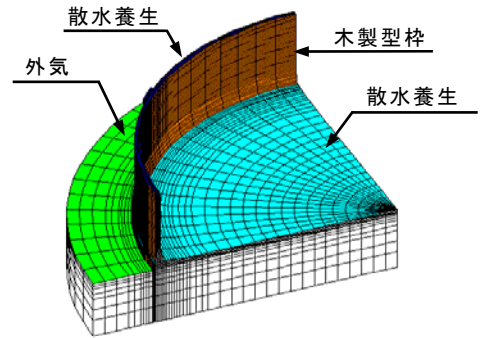


図-5 解析モデル

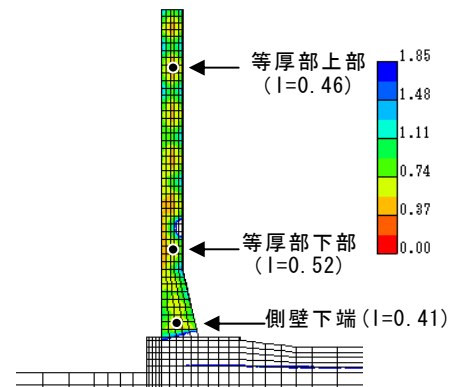


図-6 最小ひび割れ指数分布

表-3 各対策と解析結果

対策	着目位置	ひび割れ指数	鉄筋比	推定ひび割れ幅
原設計	側壁下部	0.52	0.36	0.30
	側壁上部	0.46	0.36	0.31
1 リフトの打設高さを0.9mとする。	側壁下部	0.44	0.36	0.32
	側壁上部	0.40	0.36	0.32
2 コンクリートの打ち込み温度を外気温まで下げる。	側壁下部	0.56	0.36	0.29
	側壁上部	0.49	0.36	0.31
3 側壁すべてに高性能AE減水剤を使用。	側壁下部	0.60	0.36	0.28
	側壁上部	0.52	0.36	0.30
4 側壁すべてに膨張材を使用。	側壁下部	0.49	0.36	0.31
	側壁上部	0.47	0.36	0.31
5 側壁すべてに高性能AE減水剤と膨張材を使用。	側壁下部	0.56	0.36	0.29
	側壁上部	0.54	0.36	0.30
6 シースを用いたエアークーリングを行う。	側壁下部	0.56	0.36	0.29
	側壁上部	0.46	0.36	0.31
7 低熱ポルトランドセメントを使用。	側壁下部	1.29	0.36	0.15
	側壁上部	0.80	0.36	0.24

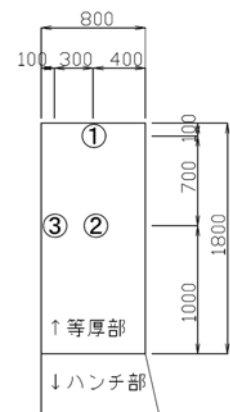


図-7 計測位置

7.2 ひび割れ幅

事前解析ではひび割れ幅は 0.172mm と算定され、施工時の温度を反映した再解析では 0.165mm と算定された。一方、現場で確認されたひび割れの多くが幅 0.1mm 以下であった。差が生じた要因の一つに、骨材の種類に起因するコンクリートの熱膨張係数の差が考えられる。

7.3 コンクリートの熱膨張係数

本工事のコンクリートには、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 $5.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ と、他の骨材と比較して小さく⁵⁾、石灰石を使用し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。そこで、本工事に使用するコンクリートと同じ配合で試験体を作製し、熱膨張係数を測定した。試験の結果、熱膨張係数は平均で $4.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ であった。この値を用いて、温度解析を行った結果、ひび割れ幅は 0.086mm と算定された。これは、現場で確認されたひび割れ幅の多くが 0.1mm 以下であった結果と一致している。

今回の計測結果を温度応力解析の入力値として採用すると、一般の場合 ($10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) と比べ算出される応力は小さくなる。今回は施工結果と一致したが、解析結果が危険側の判定となる可能性があり慎重な検討が必要である。

8. まとめ

大型 P C タンク側壁に対し、解析に基づくひび割れ制御を施した。また、現場計測を行い解析の妥当性を検討した。本検討にて得た所見を以下に示す。

- (1) 施工に先立ち、実物大試験によりコンクリートの熱特性値を把握した。この値を用いた解析に基づき、温度ひび割れ対策を実施した結果、発生するひび割れ幅を目標値以下とすることができた。
- (2) 解析により算定されたひび割れ幅に比べ、現場で確認されたひび割れ幅が小さい。その要因として骨材の種類に起因するコンクリートの熱膨張係数の差を指摘した。

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 [施工編], (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協会, 2008
- 3) コンクリート標準示方書 [設計編], (社) 土木学会, 2007
- 4) 西尾浩志, 嘉手納良啓, 新垣允啓, 屋吉朝憲: 酷暑条件下での温度応力を考慮した大型 P C 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
- 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

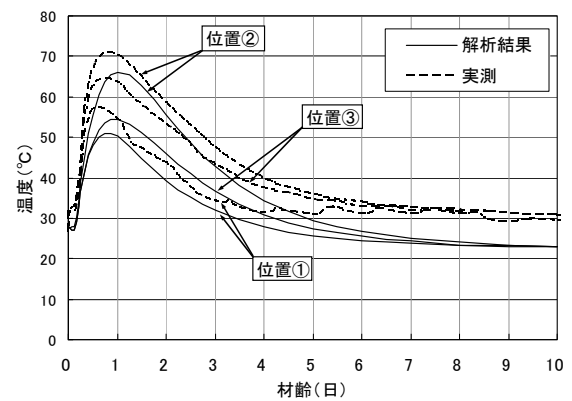


図-8 事前解析と実測の温度履歴

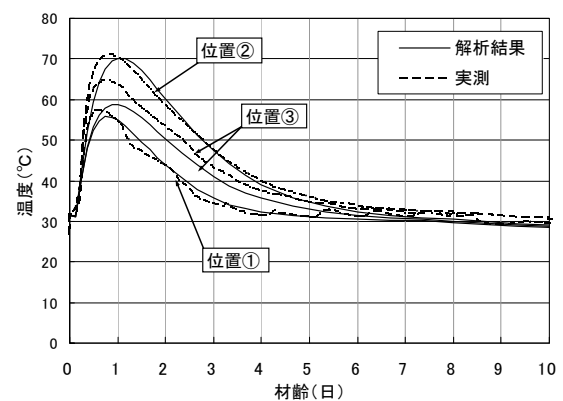


図-9 再解析と実測の温度履歴