

論文 PC タンク側壁下端部への膨張材適用

足立 真康^{*1}・堅田 茂昌^{*2}・保利 彰宏^{*3}・吉澤 昇^{*4}

要旨：固定式 PC タンクの側壁下端部は、底版による外部拘束を受けるためセメントの水和熱による温度ひび割れが発生しやすい。その対策として、膨張材の使用が有効であるが、PC タンクにおける膨張材の効果を検証した研究は少ない。本論文は、PC タンクにおける膨張材の効果を確認する目的で、側壁下端部に膨張コンクリートを用いて施工し、本現場において、熱電対および埋込型ひずみ計を用いて計測を行った。その結果、側壁下端部にひび割れは発生せず、計測に基づく三次元 FEM 解析においても、膨張材の効果を検証することができた。本論文は、現場計測および解析による膨張材の効果検証について報告するものである。

キーワード：PC タンク、膨張材、温度応力、ひび割れ指数、線膨張係数

1. はじめに

貯水槽において、躯体コンクリートのひび割れは機能性能が損なわれる恐れがあり、ひび割れを防止することは重要な課題である。固定式 PC タンクの側壁下端部は、底版による外部拘束を受けるため、セメントの水和熱による温度ひび割れが発生する可能性が高い。その対策として、収縮補償を目的とした膨張材の使用が有効と考えられる。しかし、実構造物における膨張材の効果を検証した研究は少ない。

今回、実施工の PC タンク側壁下端部において、温度ひび割れが懸念された。そこで、事前解析を行い、膨張材による温度ひび割れの抑制効果を確認し、膨張材の使用を決定した。使用した膨張材は、収縮補償を目的とした水和抑制型である。実施工の PC タンクにおいて、膨張材の効果を確認するため、膨張材を使用した側壁第 1 リフトに、埋込型ひずみ計および熱電対を設置し、現場計測を行った。現場計測の結果に基づいて、膨張材の効果の数値的評価を定めて、三次元 FEM 解析を行い、膨張材の効果を解析的に確認した。また、膨張材を用いない場合の解析も行い、その場合には、ひび割れの発生が高い

ことも確認した。施工された PC タンクの側壁には、ひび割れが発生しておらず、膨張材の効果を解析と共に検証することができた。収縮補償を目的とした水和抑制型膨張材を使用することにより、PC タンク側壁下端部の施工時の温度ひび割れを抑制することができるものと考えられる。

本論文は、ここで実証した現場計測に基づく、膨張材の効果の解析的な検証について報告するものである。

2. 検討フロー

膨張材の効果を評価するため、以下の手順により検討を行った。検討フローを図-1 に示す。

(1) 実構造物の計測

PC タンクの側壁第 1 リフトに埋込型ひずみ計と熱電対を設置し、側壁コンクリートの実ひずみと温度を計測する。

(2) 温度解析

三次元 FEM 解析により計測温度履歴を再現する。

(3) 温度応力解析

(2) で得られた温度解析条件下で、三次元 FEM

*1 (株) 安部工業所 岐阜本社 技術開発部 (正会員)

*2 (株) 安部工業所 岐阜本社 技術開発部 (正会員)

*3 電気化学工業 (株) セメント建材事業本部 工博 (正会員)

*4 南砺市役所 建設部

解析を実施し、計測ひずみを再現できる見かけの線膨張係数を決定する。

(4) 膨張コンクリートの解析

(2) および(3)において決定した解析条件に基づき、側壁コンクリートに膨張材を使用した解析を実施する。

(5) プレーンコンクリートの解析

膨張材を使用しない側壁コンクリートの解析を実施する。

(4) および(5)の解析結果の比較により、膨張材の効果を解析的に検証する。

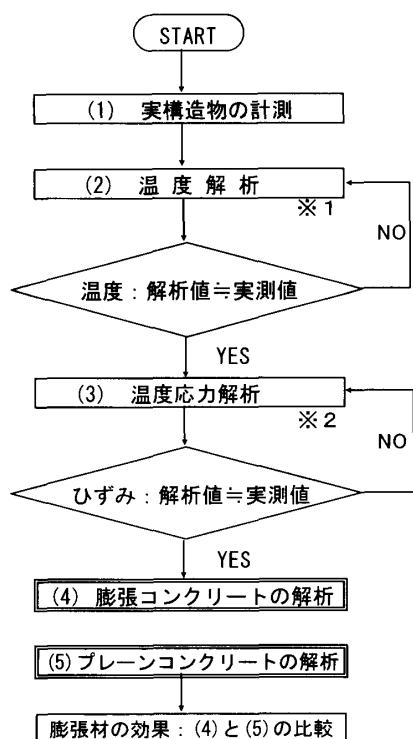


図-1 検討フロー

表-2 使用材料

材料	名称
セメント	普通ポルトランドセメント
膨張材	水和抑制型
細骨材	川砂 (表乾密度: 2.58g/cm ³ , F. M. 2.80)
粗骨材	碎石 (表乾密度: 2.62g/cm ³ , Gmax: 25mm)
混和剤	AE減水剤

表-1 コンクリート配合

配合の呼び名	W/C (%)	s/a (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)				
				水	セメント	膨張材	細骨材	粗骨材
36-12-25N	43.8	42.4	4.5	156	336	20	751	1035
								3.56

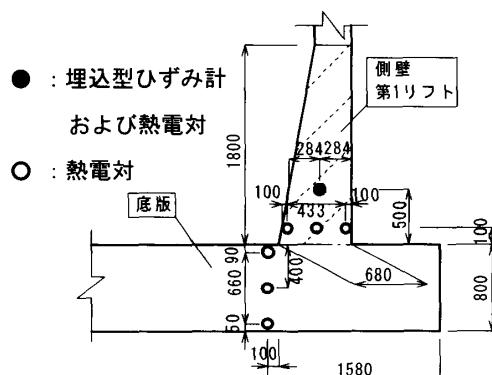


図-3 計測機器取付位置 (単位 mm)

3.4 計測結果

(1) 温度履歴

図-4に側壁第1リフトの中心部の温度を示す。側壁第1リフトの中心温度は、打設開始から約24時間後にピークに達し、最高温度は53.8°Cとなった。また、コンクリートの打設温度は25.1°Cであった。

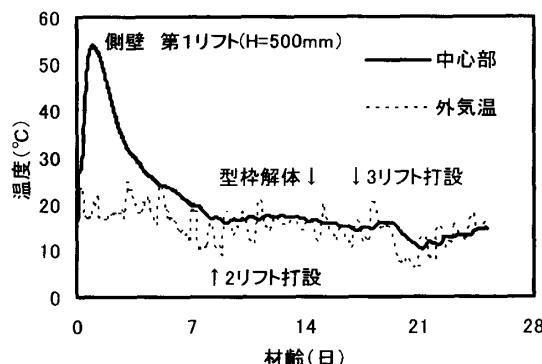


図-4 側壁第1リフト中心部の温度

(2) コンクリートの強度特性

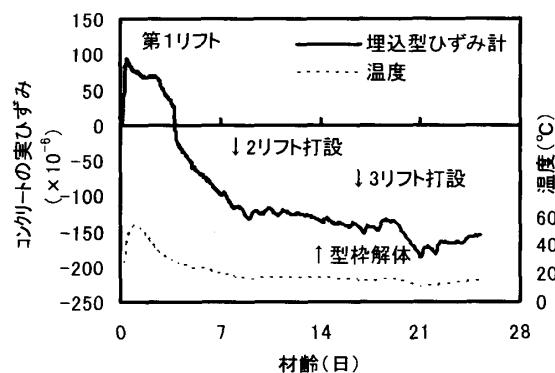
コンクリートの強度特性を把握するため、現場空中養生による供試体を用い、圧縮強度および静弾性係数試験を行った。表-3に試験結果を示す。

表-3 コンクリートの強度特性

材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)
1	12.8	—
2	17.9	—
5	33.0	27.2
6	35.8	—
28	45.6	33.6

(3) 実ひずみ

図-5に埋込型ひずみ計により計測されたコンクリートの実ひずみを示す。計測された実ひずみは、温度ひずみやクリープの影響等をすべて含んだひずみを表す。コンクリート温度がピークとなる材齢1日において、 95×10^{-6} の膨張ひずみが確認でき、その後の温度降下に伴い収縮に転じ、最終計測日である材齢25日では、 -155×10^{-6} の収縮ひずみが発生した。

図-5 コンクリートの実ひずみ
(膨張ひずみが正)

4. 解析検討

4.1 温度解析

温度応力解析の前段階として、計測温度履歴を再現できる温度解析のパラメーターを設定した。

(1) 解析モデルおよび解析条件

温度解析に用いる解析モデルを図-6に示す。また、解析条件を表-4に示す。

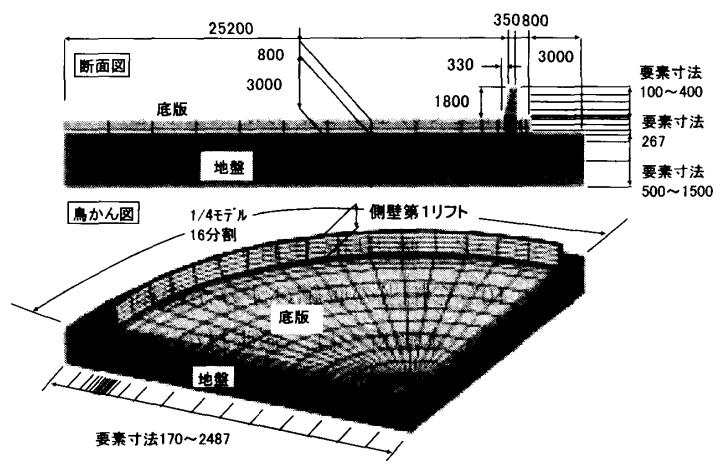


図-6 解析モデル (単位 mm)

表-4 解析条件^{2)~4)}

項目	地盤	底版	側壁
初期温度 (°C)	16.7	16.8	25.1
熱伝導率 (W/m°C)	3.45	2.7	2.7
比熱 (kJ/kg°C)	0.79	1.15	1.15
密度 (kg/m ³)	2650	2400	2400
圧縮強度 (N/mm ²)	-	30	$fc(t) = \{t/(2.7+0.95t)\}43.2 \cdot 1.11$
引張強度 (N/mm ²)	-	2.22	$ft(t) = 0.47\{fc(t)\}^{1/2}$
ヤング係数 (N/mm ²)	-	28000	$Ec(t) = \phi(t) \cdot 4700\{fc(t)\}^{1/2}$
断熱温度上昇の特性値	Q	-	51.7
	γ	-	1.54
熱伝達率 (W/m ² °C)	-	-	脱型後: 12, 養生マット: 5, 型枠: 8
線膨張係数 (μ/°C)	10	10	※b
ボアソン比	0.2	0.18	0.18

※a 計測値を基に最小二乗法から設定
※b 計測値に基づく値、膨張材の効果

(2) 解析結果

断熱温度上昇の特性値および熱伝達率は、コンクリート標準示方書²⁾に示されている値を用いた。

その結果を図-7~10に示す。計測値と解析値がほぼ一致している。表-4に示す解析条件による本温度解析により計測値を再現することができた。

4.2 見かけの線膨張係数

(1) 膨張材の効果の解析的評価

膨張材の効果を解析において評価する方法として、見かけの線膨張係数を用いる方法が提案されている⁵⁾⁶⁾。プレーンコンクリートの場合、温度降下時の見かけの線膨張係数(α_2 とする)は、 $10 \times 10^{-6}/\text{°C}$ 程度であることが分かっている⁷⁾。既往の研究結果⁷⁾より、膨張コンクリートの場合には、膨張効果により、 $6 \sim 8 \times 10^{-6}/\text{°C}$ であることが分かっている。膨張材を使用することで線膨張係数 $3 \times 10^{-6}/\text{°C}$ 相当の収縮ひずみが緩和されることとなる。本解析では、膨張材の効果を見かけの線膨張係数を用いるものとする。

また、コンクリートの若材令時の温度上昇時に

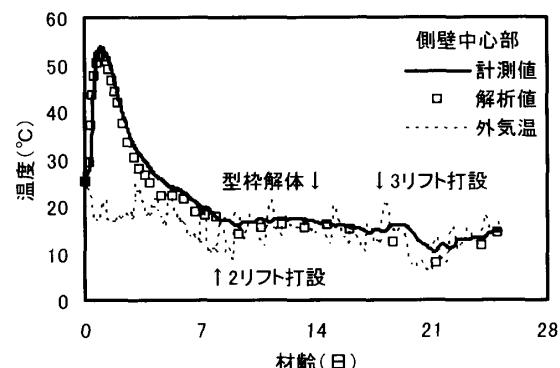


図-7 側壁第1リフト中心部の温度

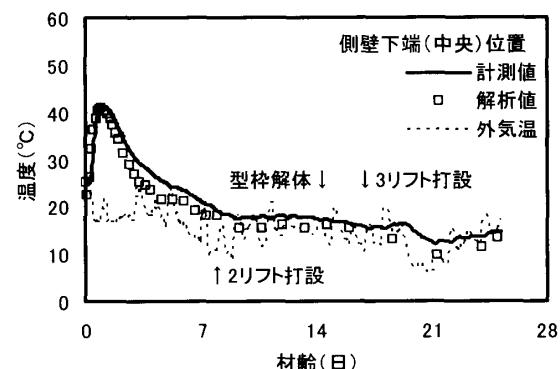


図-8 側壁第1リフト下端中央部の温度

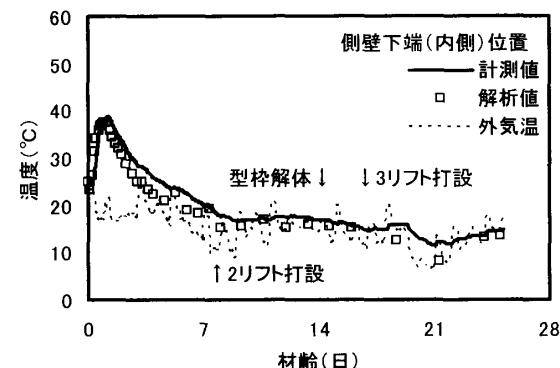


図-9 側壁第1リフト下端内側部の温度

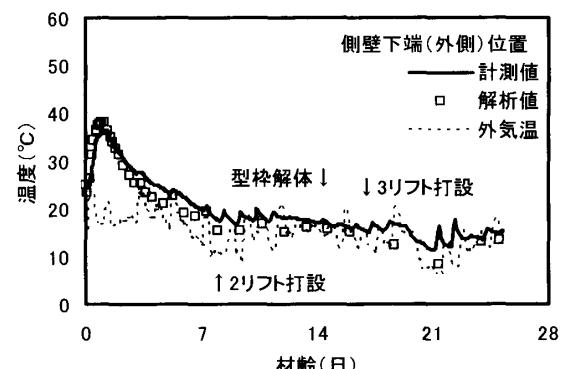


図-10 側壁第1リフト下端外側部の温度

における見かけの線膨張係数 (α_1 とする) は、プレーンおよび膨張コンクリート共に $4 \sim 6 \times 10^{-6}/\text{°C}$ と言われている⁸⁾。よって、温度上昇時においては、本値を参考とする。

(2) 見かけの線膨張係数の決定

膨張コンクリートに関しては、計測されたコンクリートのひずみ履歴と前節にて検証した温度解析とを用いて見かけの線膨張係数を定めた。即ち、若材令の温度上昇時の $\alpha_1 = 4 \sim 6 \times 10^{-6}/\text{°C}$ と温度下降時の $\alpha_2 = 6 \sim 8 \times 10^{-6}/\text{°C}$ を基本にして、 α_1 、 α_2 の値を変動させて FEM 解析を実施して、計測コンクリートひずみにほぼ一致する値を求めた。その結果、 $\alpha_1 = 4.5 \times 10^{-6}/\text{°C}$ 、 $\alpha_2 = 7.0 \times 10^{-6}/\text{°C}$ となった。本 α_1 、 α_2 を用いた、コンクリートのひずみに関する解析結果と計測値との比較を図-11 にまとめて示す。プレーンコンクリートに関しては、上記の結果より温度上昇時には $\alpha_1 = 4.5 \times 10^{-6}/\text{°C}$ とし、温度下降時には一般的に使用されている $10 \times 10^{-6}/\text{°C}$ とする。

ここで定めた見かけの線膨張係数を表-5 にまとめて示す。

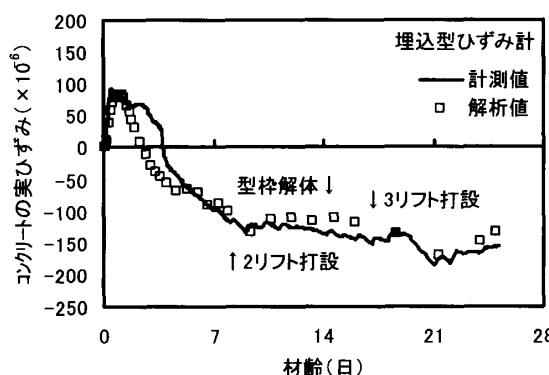


図-11 コンクリートの実ひずみと解析値

表-5 見かけの線膨張係数

		プレーンコンクリート	膨張コンクリート
見かけの線膨張係数	温度上昇時 (α_1)	$4.5 \times 10^{-6}/\text{°C}$	$4.5 \times 10^{-6}/\text{°C}$
	温度下降時 (α_2)	$10 \times 10^{-6}/\text{°C}$	$7.0 \times 10^{-6}/\text{°C}$

5. 膨張材の効果の検証

5.1 温度応力解析結果

表-4 に示す温度解析条件およびコンクリート諸物性値と表-5 に示す見かけの線膨張係数を用いて、三次元 FEM 温度応力解析を膨張コンクリートおよびプレーンコンクリートについて実施した。プレーンコンクリートの場合の強度特性は、文献⁵⁾より、膨張コンクリートと同等とした。解析結果を図-12 に示す。膨張材を使用することで、プレーンコンクリートに比べて $1.5 \sim 2.0 \text{ N/mm}^2$ の温度応力の低減効果が確認できた。

5.2 温度ひび割れ指数

温度ひび割れ指数の解析結果を図-13 に示す。本構造物をプレーンコンクリートで打設した場合、最小ひび割れ指数は 0.6 (材齢 9 日) となり、コンクリート標準示方書²⁾によれば過大なひび割れの発生が予想される。一方、膨張材を使用した場合は、1.0 (材齢 9 日) となり、コンクリート標準示方書²⁾に記載されている「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制限したい場合」に分類される。

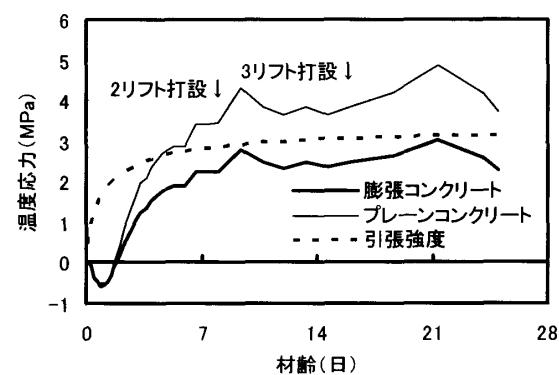


図-12 温度応力の比較

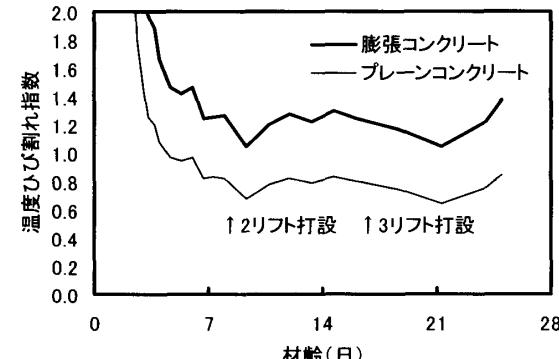


図-13 温度ひび割れ指数の比較

6. まとめ

固定式 PC タンクの側壁下端部の温度ひび割れ低減を目的として、膨張材を使用したコンクリートの計測を実施し、膨張材の効果を解析的に検討した結果を以下に示す。

- (1) 膨張材を使用することで、 $1.5 \sim 2.0 \text{ N/mm}^2$ の応力緩和が確認できた。
- (2) 本構造物を膨張材を使用しないプレーンコンクリートで打設した場合、最小ひび割れ指数は 0.6 (材齢 9 日) となり、過大なひび割れの発生が推察される。
- (3) 膨張材を使用した場合の最小ひび割れ指数は、1.0 (材齢 9 日) となり、コンクリート標準示方書²⁾に記載されている「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」に分類される。
- (4) 既往の研究結果^{5)~8)}と同様に、PC タンク側壁下端部においても、温度下降時の見かけの線膨張係数を通常の 70% 程度とすることで、膨張材の効果を評価できるものと考えられる。

本検討より、固定式 PC タンクの側壁下端部における収縮補償を目的とした水和抑制型膨張材の効果を解析的に評価した。また、計測を行った大型防火貯水槽においても、現在に至るまでひび割れは確認されておらず、膨張材の効果を解析と共に実証することができた。

参考文献

- 1) 保利彰宏、高橋光男、辻幸和、原田真剛：低添加型膨張材を用いたコンクリート基礎物性、コンクリート工学年次論文報告集, Vol.24, No1, pp.261-266, 2002
- 2) 土木学会:コンクリート標準示方書 施工編, pp.44-54, 2002
- 3) 土木学会:コンクリート標準示方書 構造性能照査編, pp.21, pp.28, 2002
- 4) 土木学会:最新のマスコンコンクリート技術、コンクリート技術シリーズ, pp.8-9, 1996
- 5) 膨張コンクリートによる構造物の高機能化／高耐久化に関するシンポジウム報告書, 日本コンクリート工学協会, pp.52, pp.125-134, 2003.9.19
- 6) 栖原健太郎、丸山文男、藤崎太一、丸山久一：鋼管橋脚に巻き立てた膨張コンクリートの効果に関する解析的研究, 日本コンクリート工学協会膨張コンクリートによる構造物の高機能化／高耐久化に関するシンポジウム論文, pp.167-174, 2003.9.19
- 7) 中村時雄、齊藤文男、湯室和夫、佐野隆行：高ビーライト系低熱セメントと水和熱抑制型膨張材を併用した高度浄水処理施設の側壁部マスコンクリート対策, コンクリート工学, Vol.36, No9, pp.28-34, 1998.9
- 8) 伊藤慎也、笠原正之、丸山久一：水和抑制型高性能膨張材を使用した R C 橋脚の温度ひび割れ低減効果, 日本コンクリート工学協会膨張コンクリートによる構造物の高機能化／高耐久化に関するシンポジウム論文, pp.1-6, 2003.9.19