

大型 PC タンクの温度およびひずみ測定とその考察

尾 坂 芳 夫*
秋 田 宏**

1. はじめに

PC タンクは、RC タンクに比較して水密性・耐蝕性にすぐれ、鋼製タンクに比較して座屈に強いのが特徴である。そのため、すでに多くの建設実績があるが¹⁾、その力学特性、とくに温度応力およびクリープ・乾燥収縮

による影響については、まだ不明な点も残されている。これらに関しては、昭和 55 年に制定された「水道用プレストレストコンクリートタンク標準仕様書」²⁾にも、定量的な取扱い方が明示されていない。PC タンクを合理的に設計するためには、これらの点を解明することが必要である。

表-1 側壁コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スラブ (cm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 S/G (%)	単 位 量 (kg/m ³)				
				セメント C	水 W	細骨材 S	粗骨材 G	プラスチック N _c
25	8	37.2	35.3	400	149	614	1150	1.60

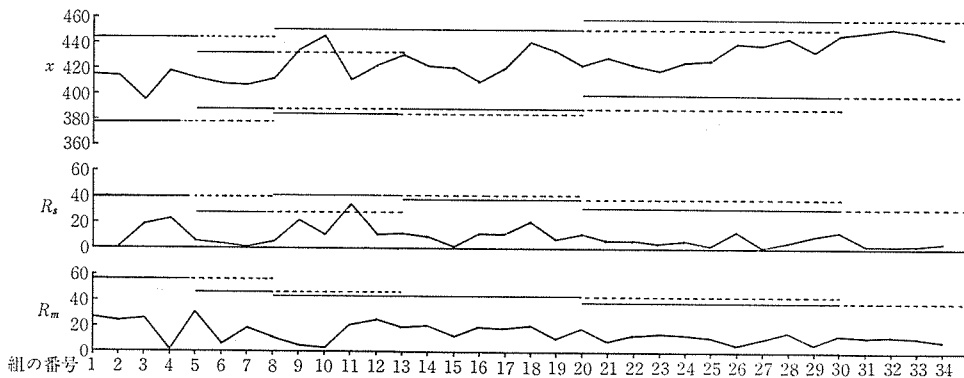


図-1 $x-R_s-R_m$ 管理図

表-2 骨材試験結果

項 目	種 類	細骨材	粗骨材	ふるい分け試験 (通過率%)		
				ふるい (mm)	砂	25mm
産 比 重	地 乾 表 乾	赤川	赤川	50		
		2.50	2.57	40		
容 積 率 (kg/m ³)	質	2.56	2.62	30		
		1.630	1.690	25		96
実 績 率 (%)		65.2	65.8	20		76
吸 水 量 (%)		2.40	1.95	15		53
洗 い 試 験 (%)		1.88	0.68	10		23
粘 土 塊 量 (%)		0.18	0.11	5	99	2
軟 石 量 (%)		—	1.06	2.5	92	
す り へ り 減 量 (%)		—	21.0	1.2	71	
安 定 性 (%)		4.19	6.94	0.6	43	
有 機 不 純 物		合格	—	0.3	20	
塩 分 含 有 量 (%)		痕跡	—	0.15	2	
比 重 1.95 の 液 体 に 浮 く も の (%)		0	0	粗 粒 率	2.73	6.99

* 東北大学工学部土木学科教授

** 東北工業大学工学部土木学科助教授

そこで、解明のための資料を得ることを目的として、実際のタンク建設の各段階で、各部の温度とひずみの測定を行い、結果の分析を試みた。ここでは、その一部について報告したい。

2. タンクおよび測定の概要

測定の対象としたタンクは、昭和 55 年に山形県鶴岡市に建設されたもので、内径 40 m、側壁高 9 m、有効水深 8 m、有効貯水量 10 000 t の球形ドーム式円筒形タンクである。

タンク側壁部に打設したコンクリートは、設計基準強度が 400 kg/cm² で、その配合は表-1 のようである。骨材は、赤川産の砂および玉砕であり、それらの試験結果は表-2 のようである。また、コンクリートの圧縮強度試験結果は図-1 のようであり、良好な管理状態にあったことがわかる³⁾。

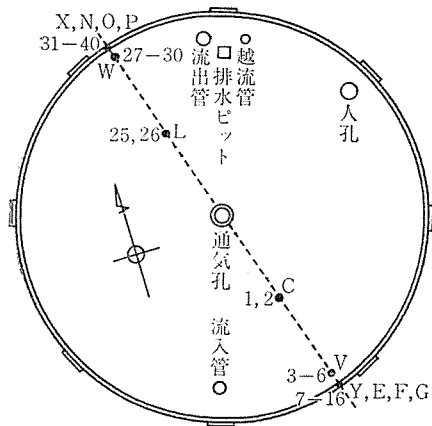


図-2 タンク平面図

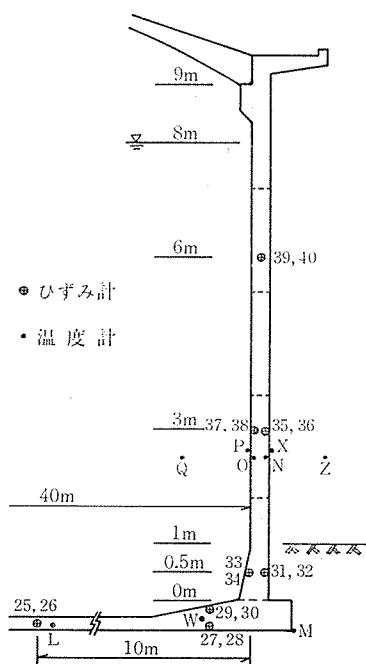


図-3 タンク側面図

図-2 に、タンク平面図および埋設ゲージ類の位置を示す。ゲージ類は、ほぼ南北の軸線に沿った断面内にあり、数字がひずみゲージを、英字が温度センサーを表わす。埋設位置は南北に対称なので、図-3 に北半分に関するタンク側面図およびゲージ類の位置を示す。ひずみゲージは、1 測点で直角 2 方向に配置され、奇数番号が円周方向または水平方向を、偶数番号が半径方向または鉛直方向を表わしている。また、曲げモーメントが顕著な断面では板厚の表裏両表面近くに、曲げモーメントの小さい断面では板厚のほぼ中央面に埋設してある。使用したゲージ類は、埋設用静ひずみゲージ KM-100 F、および熱電対式温度センサーである。

測定は、主要な建設段階の前後および供用開始後の適当な時期を選び、1 日の変動を調べるために、2 時間間

隔で 24 時間ずつ行った。

3. 計算モデル

1 日の気温変動および内水位変動によるタンク各部のひずみ変動を理論的に算出するために、軸対称シェル要素による計算モデルを用いた⁵⁾。図-4 は、底版中央部の伸縮が基礎版とのまさつ等のために拘束されていると仮定した場合のモデルである。底版は、変形が無視できないと思われる周辺部 (円版部分) をモデル化し、さらに円版部分の曲げモーメントを算出するために、外周部の支点を除いてある。支点を除いたために生じる側壁下端のたわみは、プレストレスによる上方への弾性たわみと、水深 7 m 時の水圧による下方へのたわみがほぼ相殺する程度である。また、側壁頂部の水平変位に及ぼすドームの拘束力は小さいので、ドーム部分はモデル化していない。

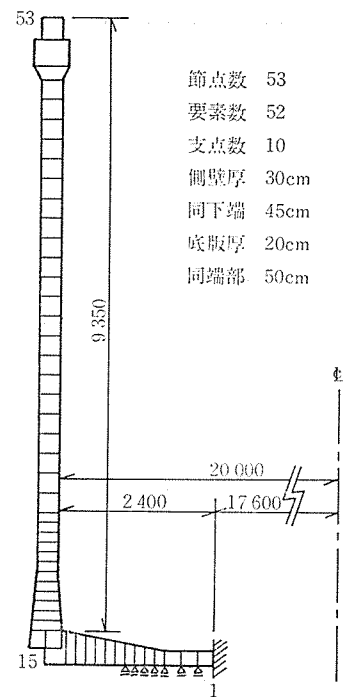


図-4 計算モデル

さらに、底版中央部のひずみを求めるために、底版と基礎版の間にまさつは無く、底版は自由に伸縮できると仮定し、底版全体をモデル化したものも用いた。

4. 温度測定結果

図-5 は、実測に先立ち、タンクおよび周辺土の温度分布を計算したものである。熱伝導率および比熱は、タンク躯体を $3.5 \times 10^{-3} \text{ cal/cm} \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$ および $0.22 \text{ cal/gr} \cdot ^\circ\text{C}$ 、周辺土が $5 \times 10^{-3} \text{ cal/cm} \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$ および $0.22 \text{ cal/gr} \cdot ^\circ\text{C}$ とした。また、境界条件は、外気に接する部分を

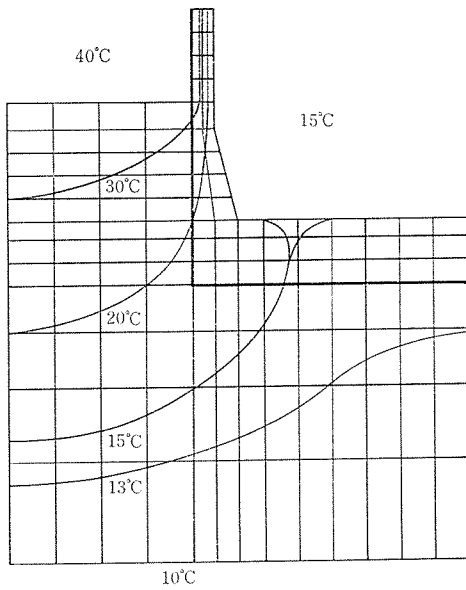
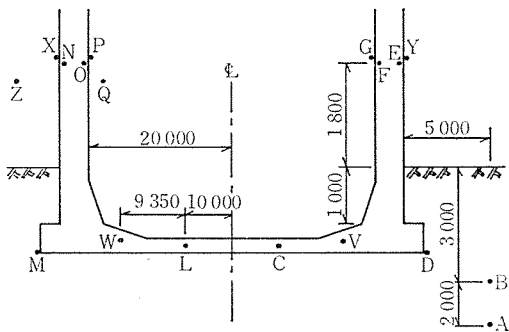


図-5 温度分布

表-3 各測点の温度

測点	月日	4/25	6/18	8/4	10/27
Z		14.8	18.0	24.5	7.0
A		10.6	11.5	12.7	16.0
B		9.0	13.5	16.7	16.0
Q		11.9	12.9	17.8	14.5
P		11.9	13.0	22.0	15.0
N		12.2	17.5	24.5	10.5
M		9.7	12.7	16.0	15.0
W		11.2	13.0	14.6	15.0
L		11.5	12.5	14.3	15.0
C		13.0	14.0	15.0	15.0
V		13.0	14.0	15.0	15.5
D		11.7	13.8	15.9	18.3
E		14.4	17.8	25.5	10.5
G		13.0	14.0	22.0	17.0



40°C, タンク内水に接する部分を 15°C, 地下 5m の位置で 10°C とし, 熱流が定常状態であると仮定した⁴⁾。

実際には, 外気温が刻々変動するために定常状態に落ち着くことはなく, また仮定と同一の境界条件も観測されていないが, 温度分布には類似の傾向が認められる。表-3 は, 供用開始後における午前 6 時の実測温度を示した。大気温の季節的な変動に対して, 地中温の変動に

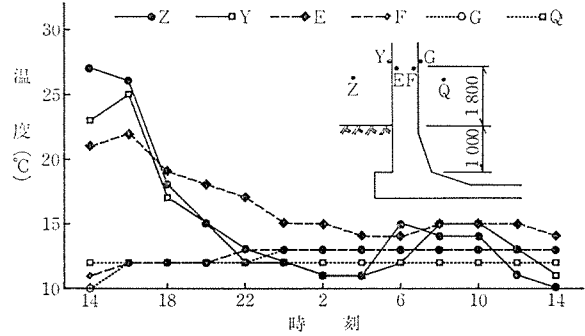


図-6 側壁の温度変化

表-4 側壁の温度

測点	月日	4/25	6/18	8/4	10/27
南側	Y	25.0	22.8	35.8	8.6
	E	21.5	20.0	32.0	12.5
	F	12.1	12.5	22.7	16.5
側	G	12.0	12.5	20.3	16.5
	X	24.0	22.7	33.2	7.4
北側	N	17.8	19.5	28.2	10.7
	O	12.1	12.5	21.2	15.0
	P	12.1	13.5	21.2	15.0

は位相遅れが認められる。

図-6 は, 側壁における 1 日の温度変化を, 56 年 4 月 24~25 日の南側を例として示したものである。各測点は外側から順に大気中, 側壁外表面, 外表面から 1cm 内側, 側壁内表面から 1.5cm 外側, 内表面, 内水中を表わす。ここで, 側壁外表面とは, 側壁コンクリートにほどこされたウレタン樹脂塗装表面である。図から知られるように, 側壁外表面の温度が変動する場合, 側壁内部の温度こう配は一様にはならず, 内表面付近では小さく外表面付近では大きくなっている。実際に, 外表面から 1cm の間に, 全体の 1/2 程度温度降下あるいは上昇している例が見られる。表-4 は, 各測定日において側壁内外表面に最大の温度差が生じた時点での温度を示したものである。

温度応力を理論的に求める場合, 一様な温度こう配を仮定すると計算が容易になる^{6),7)}。しかしながら, 1 日の気温変動による温度応力を算定するためには, 単に側壁内外表面の温度差から得られる温度こう配を用いるのは, 一般には不適當である。ここでは, 側壁外表面より 1cm 内側の温度を側壁外表面の温度とみなして得られ

る、仮想的な一様温度こう配を、以下の温度応力算定に用いる。

5. 底版中央部のひずみ

図-7 は、底版の中心から 10m 離れた位置での、ひずみの季節的な変化であり、測定値は午前 6 時の値のみを示してある。実線は、底版の伸縮がまったく自由であると仮定した場合の理論的な計算値であり、プレストレス、温度変化、水位変動の影響を考慮してある。破線は逆に、底版の伸縮が完全に拘束されていると仮定した場合に生ずべきひずみで、たとえば温度降下による収縮が妨げられて生ずる引張ひずみ等を表わしている。ただし、これらの計算値にはクリープおよび乾燥収縮の影響は含まれていない。なお、理論上南北の計算値は一致し、さらにこの位置では半径方向および円周方向のひずみも同一となる。

実測の結果は、南北の測定値に差が見られ、また供用開始後に圧縮ひずみが増加しているのが認められる。理論計算との比較では、底版の伸縮が自由であると仮定した場合の計算値に近いが、よく一致していると言えるほどではない。

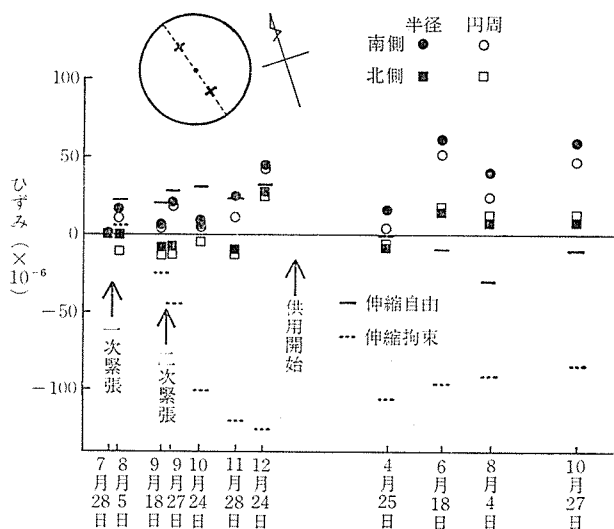


図-7 底版中央部のひずみ

6. 1日のひずみ変動

1日のひずみ変動を問題とする場合、観測されるひずみは次の二つの部分からなると考えられる。一つは、タンク各部の温度差により、また刻々と水位の変わる内水圧により生ずるひずみである。もう一つは、プレストレスおよびクリープ・乾燥収縮によるひずみで、1日の変動を問題とする限りでは、不変とみなして差しつかえないものと思われる。

ここでは、タンク躯体のヤング率を $3.5 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ 、

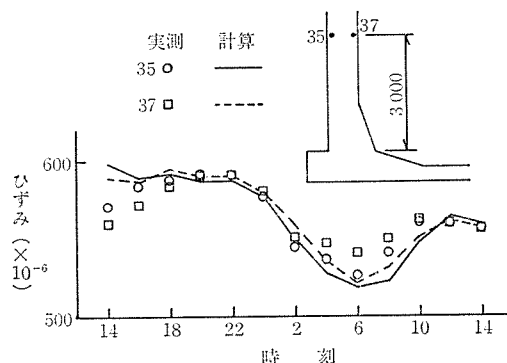


図-8 円周方向ひずみの変動

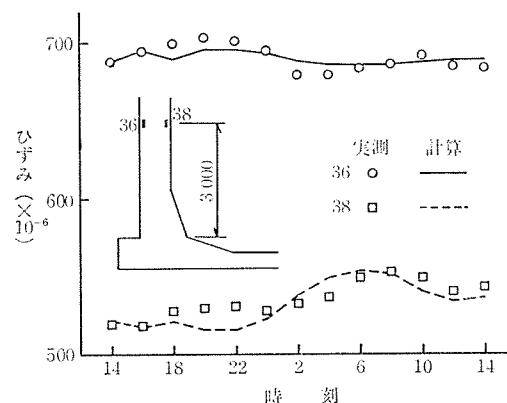


図-9 鉛直方向ひずみの変動

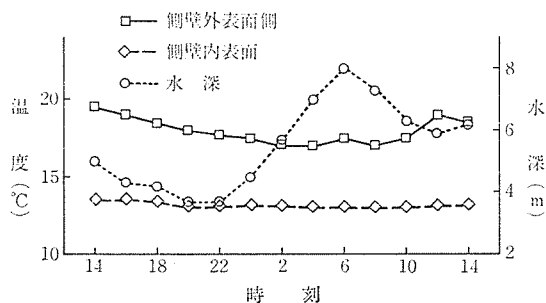


図-10 水深および側壁の温度変化

ポアソン比を 0.2 と仮定し、前者を実測された温度分布と内水位から理論的に算出した。後者は不明なので、実測値から計算値を差し引いたものの平均とみなし、両者の和を計算ひずみとして 6月 17~18 日を例にとり実測値と対比させると、図-8 および 図-9 となる。これらの図において、計算値と実測値はよく一致しており、計算上の仮定はほぼ妥当であったと思われる。図-10に理論計算に用いた対応する温度と水深の測定値を示す。

7. クリープ・乾燥収縮の進行状況

前節により求めた、プレストレスによる弾性ひずみとクリープ・乾燥収縮によるひずみとの和を、各測定日ご

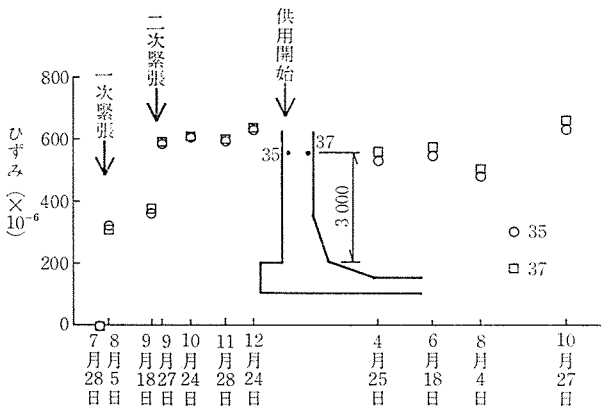


図-11 円周方向クリープ

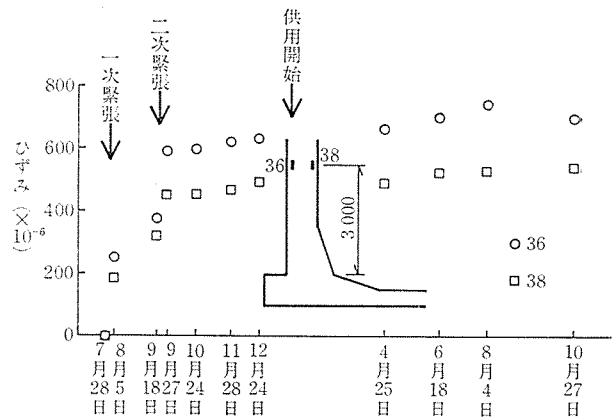


図-12 鉛直方向クリープ

とにプロットしたのが 図-11 および 図-12 である。円周方向では、静水圧により生ずる引張応力がプレストレスの一部を打ち消すため、供用開始後に若干のクリープ回復が認められる。

プレストレスの導入には 5~6 日を要しているため、導入直後の弾性ひずみを測定することができず、したがってその時点でのヤング率は求められなかった。そこで、ヤング率を $3.5 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ として弾性ひずみを算出すると、測点 35 および 37 に対しては 208×10^{-6} 、測点 36 および 38 に対してはそれぞれ 282×10^{-6} および 151×10^{-6} となる。これらの値によりクリープ係数を求めると、それぞれ 2.0, 1.5 および 2.6 となり、既往の報告例よりも若干大きい⁹⁾。なお、鉛直方向のひずみに関しては、静水圧により生ずる曲げモーメントが、測点 36 側に引張応力を、測点 38 側に圧縮応力を与えるため、見かけ上それぞれの測点のクリープ係数が減少および増大しているものと思われる。

8. むすび

温度応力に関しては、それ自身を独立に扱わずに、1 日の温度変動および内水位変動による変動ひずみ部分としてとらえ、実測値と計算値のよい一致が得られた。しかしながら、供用開始後 1 年未満であるため、設計上の支配条件を把握することはできなかった。また、モデル

計算上の仮定についても、底版の拘束状態を含めさらに検討を要する点が残されていると思われる。

クリープ・乾燥収縮に関しては、内水圧によるクリープの回復状態を示すことができたが、クリープの進行による応力の再分配については触れるまでに至らなかった。したがって、本報告を中間報告とし、今後も測定と解析を継続する予定である。

本報告をまとめるにあたり、鶴岡市水道部および株式会社安部工業所の関係者各位には、種々の便宜をはかっていただいたことを付記し、感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 鈴木素彦, 吉岡民夫: 上水用 PC タンクの現状と問題点, プレストレストコンクリート, Vol. 20, No. 5, 1978
- 2) 日本水道協会: 水道用 プレストレスト コンクリートタンク標準仕様書, 1980
- 3) 尾坂芳夫: コンクリートの品質管理入門, 彰国社, 1981
- 4) 後藤幸正, 尾坂芳夫: コンクリート工学(II)設計, 彰国社, 1979
- 5) 川股重也: シェル構造解析, 培風館, 1974
- 6) F.K.K. 技術資料: フレシネー工法によるプレストレストコンクリート製容器, 1976
- 7) M.J.N. Priestley: Ambient Thermal Stresses in Circular Prestressed Concrete Tanks, A.C.I. Journal, Vol. 73, No. 10, 1976
- 8) 土木学会 PC 設計施工指針改訂小委員会: PC 橋におけるコンクリートのクリープおよび乾燥収縮の実測, プレストレストコンクリート, Vol. 3, No. 1, 1961

会 員 増 加 に つ い て お 願 い

会員の数はその協会活動に反映するもので、増加すればそれだけ多くの便益が保証されています。現在の会員数は 2600 余名ですが、まだまだ開拓すべき分野が残されています。お知合いの方を一人でも多くご紹介下さい。事務局へお申し出下されば入会申込書をすぐお送りいたします。