

(39) PCタンクのドーム屋根と側壁との結合を剛結構造とした場合の検討

(株)安部工業所 技術本部技術部 正会員 ○井上 浩之
 (株)安部工業所 技術本部技術部 正会員 今尾 勝治
 (株)安部工業所 技術本部設計部 正会員 堅田 茂昌
 (株)安部工業所 技術本部技術部 正会員 西尾 浩志

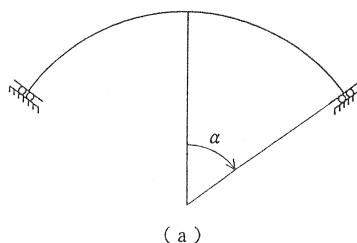
1. はじめに

プレストレストコンクリートタンク（以下PCタンクという）は、昭和32年に日本で初めて開発・施工されて以来、多くの水道事業体に採用され、全国各地で配水池等に使用されている。水道用PCタンクに関しては、昭和55年に「水道用プレストレストコンクリートタンク標準仕様書」（以下「水プ標準仕様書」という）が社団法人日本水道協会から発表され、その後はこの仕様書に従って設計施工されている。水道用PCタンクでは、屋根の構造形式をいわゆる球形ドーム構造とし、ドーム裾を側壁で支持するのが一般的である。このとき、ドームと側壁との結合は、側壁上端内側に張出し部を設け、ドームを受ける構造とすることにより、いわゆるピン結合とするのが一般的である。しかしながら、このような支持形式のドーム屋根の場合、側壁上端内側に設けた張出し部の施工およびドームと側壁との間に設ける目地の処理などが施工上複雑となる。

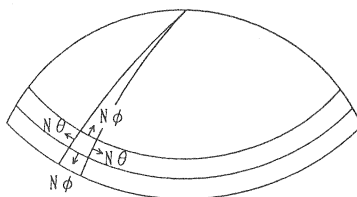
本文では、施工省力化のため側壁上端内側に通常設けられる張出し部を無くし、かつドームと側壁との結合を剛結構造とした形式のタンクに関して、特にドームに着目し、解析によりその基本的性状および安全性について検討した。

2. PCタンクドーム屋根設計の現状

PCタンク屋根の構造形式には、球形ドーム構造、スラブ構造および意匠を考慮した特殊な曲面シェル構造などがある。このうち、球形ドーム構造が最も一般的な形式であり、水道用PCタンクの施工実績においても、この形式が多い¹⁾。屋根の構造形式を球形ドーム構造とする場合、その開角 α （図-1(a)参照）は30°程度である。図-1(a)に示すように、ドーム半径方向のスライドが可能な支持状態では、理論上、ドームには膜力（軸力）しか生じない。膜力には、経線方向軸力 N_ϕ と円周方向軸力 N_θ （図-1(b)参照）があり、開角が30°程度であれば、両者とも圧縮力である²⁾。現在、ドーム屋根の設計は、以上のような理論を基にして行われるのが一般的である。しかし、図-1(a)に示すような支持状態とするのは、実際のタンクでは困難であり、実際のタンクにおけるドームと側壁との結合は、側壁上端内側に張出し部を設け、ドームを受ける構造とすることにより、いわゆるピン結合（図-2参照）



(a)



(b)

図-1 球形ドーム概念図

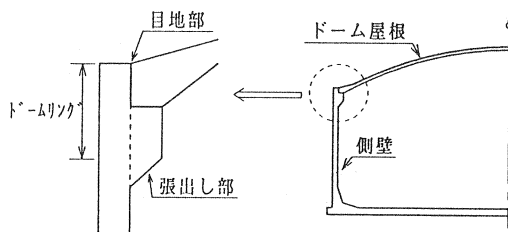


図-2 ドームと側壁とのピン結合としたタンク一般図

とするのが一般的である。

ところで、球形ドーム構造の場合、自重および積載荷重により、ドーム裾には、経線方向の軸力が生じる。この軸力は、鉛直分力および水平分力（以下水平スラストという）に分解することができ（図-3参照）、ドームと側壁とをピン結合とした場合、鉛直分力に関しては、側壁内側に設けた張出し部で支持する。一方、水平スラストにより、ドーム裾は、側壁上部を外側へ押し出し水平方向にひろがろうとするが、この水平変位を制御する目的で、水平スラストを打消すのに十分なプレストレス力（以下水平スラスト分プレストレス力という）を、図-2に示すドームリングに導入している。

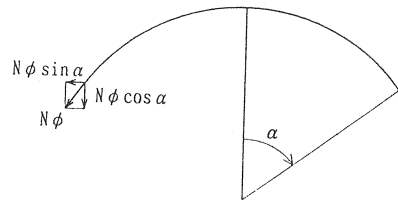


図-3 ドーム裾経線方向軸力分解図

3. 側壁との結合を剛結合としたドームの基本的性状

ドームと側壁とを剛結合とした場合、自重および積載荷重により、ドーム裾付近には、経線および円周方向曲げモーメントと円周方向軸引張力が発生する。一方、ドーム水平変位を制御するために導入する水平スラスト分プレストレス力により、ドーム裾付近には、自重および積載荷重で発生した断面力を打消す方向の曲げモーメントおよび軸圧縮力が発生する。よって、理論上は、ドームと側壁とを剛結合としても、水平スラスト分プレストレス力を適切に導入することにより、ドーム発生応力度を許容値以内に抑えることが可能であると考えられる。これを確認するために、軸対称薄肉シェル要素を用いた有限要素法（以下FEM解析という）により解析を行った。

3.1 解析モデルおよび荷重

解析を行ったタンク形状は、内径 $D=20\text{m}$ 、水深 $H=10\text{m}$ 、壁厚 $t=0.25\text{m}$ 、ドーム厚 $t_d=0.12\text{m}$ 、ドーム縁端部厚 $t_{da}=0.4\text{m}$ 、ドーム拡幅部長 $l=2.1\text{m}$ である（各部名称については、図-4参照）。なお、壁厚およびドーム拡幅部長については、「水圧標準仕様書」に示されている算定式¹⁾をもとに算出した。解析は、軸対称薄肉シェル要素を用いたFEM解析により行った。解析に用いた材料定数を表-1に示す。拘束条件は側壁下端完全固定とした。本解析に用いた荷重は、ドームに影響を与える主な荷重のみを考慮し、自重・積載荷重および水平スラスト分プレストレス力とした。

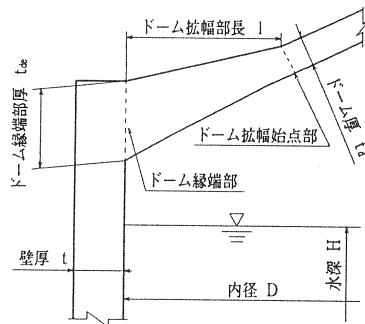


図-4 各部の名称

表-1 材料定数

	コンクリート強度 kgf/cm ²	単位体積重量 kg/cm ³	ヤング係数 kgf/cm ²	ポアソン比
側壁PC部材	350	2.45	2.95×10^5	0.2
ドームRRC部材	240	2.40	2.50×10^5	0.2

3.2 解析結果

各荷重およびこれらを合成した荷重により発生するドーム断面力図を図-5に示す。この結果より、自重・積載荷重によりドーム裾付近に発生する、経線および円周方向曲げモーメント、また、円周方向軸引張力は、水平スラスト分プレストレス力によりドーム裾付近に発生する、経線および円周方向曲げモーメントと円周方向軸圧縮力にほぼ打消され、経線および円周方向ともに、ほとんど軸圧縮力だけの状態となっている。また、応力度の検討を行った結果、ドームは、経線および円周方向ともに全断面圧縮であった。

これらの結果より、ドームと側壁とを剛結合としても、水平スラスト分プレストレス力およびドーム拡幅部の設計が妥当であれば、自重および積載荷重によりドーム裾付近に発生する、曲げモーメントと軸引張力

ほぼ打消され、ドームはほとんど軸圧縮力だけの状態となることが分かった。

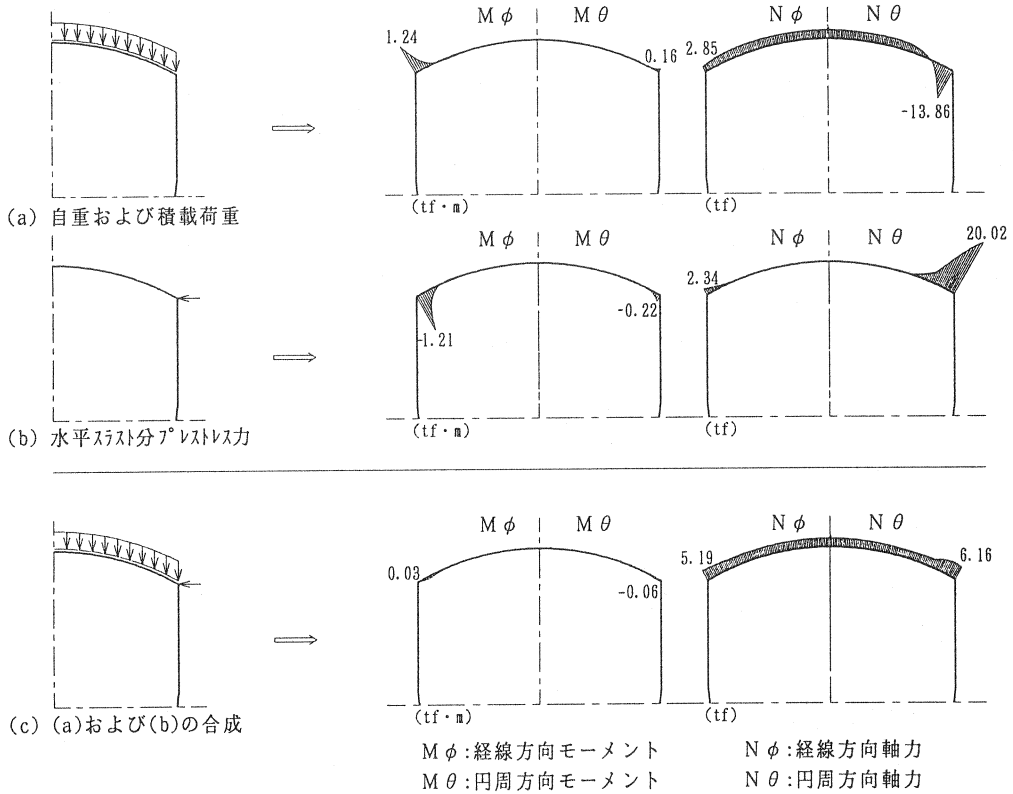


図-5 各荷重における ϕ - Δ 断面力図

4. 解析による安全性の検討

ドームと側壁との結合を剛構造とした形式のタンクについて、より詳細な検討を行うため、ドーム拡幅部および側壁上部を含めた、ドームと側壁との結合部近傍に軸対称ソリッド要素を用いたFEM解析を行い、発生応力度等を検討し、その安全性を確認した。

4.1 解析モデル

解析モデルは、側壁上端内側に通常設けられる張出し部を無くし、かつドームと側壁との結合を剛構造とした形式のタンクである。モデルの種類は、タンク内径 D を20m、40m、60mの3種類、水深 H を5m、10mの2種類とした計6種類である。

表-2 タンク形状一覧

モデル番号 No.	内径 D (m)	水深 H (m)	容量 V (m ³)	壁厚 t (m)	ϕ - Δ 厚 t_a (m)	ϕ - Δ 縁端部厚 t_{aa} (m)	ϕ - Δ 拡幅部長 l (m)
①	60	10	28,300	0.45	0.12	0.8	6.3
②		5	14,100	0.30	0.12	0.8	6.3
③	40	10	12,600	0.30	0.12	0.6	4.2
④		5	6,300	0.25	0.12	0.6	4.2
⑤	20	10	3,100	0.25	0.12	0.4	2.1
⑥		5	1,600	0.25	0.12	0.4	2.1

表-2に解析を行ったタンク形状一覧を示す。解析は、ドームと側壁との結合部近傍を特に詳細に検討することを目的とし、ドーム拡幅部および側壁上部を含めたこの部分に軸対称ソリッド要素、また、その他の部分

に軸対称薄肉シェル要素を用いたFEM解析により行った。解析に用いた材料定数は表-1に示すものと同様とした。拘束条件は側壁下端完全固定とした。なお、本解析では、タンク施工順序を考慮し、①側壁のみ、②側壁・ドーム一体の2段階にモデルを分け、それぞれの結果を合成した。図-6に側壁・ドーム一体モデルの要素分割図を示す。

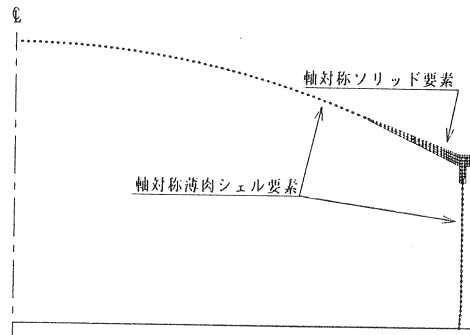


図-6 要素分割図

4.2 荷重

本解析に用いた荷重および荷重の組合わせを表-3に示す。荷重の組合わせにより、①常時空水、②常時満水、③温度作用時(冬)、④温度作用時(夏)、⑤地震時0° および⑥地震時180°、計6ケースの合成荷重を考慮した。なお、温度荷重は、タンク内外の温度差を5°Cとし、これにより発生する温度応力を考慮した。また、地震時荷重である、自重慣性力、積載荷重慣性力および動水圧は、水平震度 $K_h=0.3$ として計算した。

表-3 荷重および荷重の組合わせ

番号	荷 重	荷 重 の 組 合 わ せ						備 考
		常 時		温 度 作 用 時		地 震 時		
		空 水	満 水	冬	夏	0°	180°	
1	自 重	○	○	○	○	○	○	(PC) $\gamma=2.45(t/m^3)$ (RC) $\gamma=2.40(t/m^3)$
2	積 載 荷 重	○	○	○	○	○	○	$\gamma=0.1(t/m^2)$
3	鉛直方向 ∇ レストレス	○	○	○	○	○	○	*
4	円周方向 ∇ レストレス	○	○	○	○	○	○	静水圧 + 余裕圧縮力 (10kgf/cm ²)
5	水平スラスト ∇ レストレス	○	○	○	○	○	○	水平スラスト相当
6	静 水 圧		○	○	○	○	○	$\gamma=1.00(t/m^3)$
7	温 度 荷 重			○	○			内外温度差 5°C
8	自 重 慣 性 力					○	○	水平震度 $K_h=0.3$
9	積 載 荷 重 慣 性 力					○	○	
10	動 水 圧					○	○	

* 壁下端における許容引張応力度 0 kgf/cm² (満水時)、-7 kgf/cm² (空水時)を満足する量とした。

4.3 検討方法

(1) ドーム発生応力度の検討

ドームと側壁とを剛結合とすることによるドーム縁端部付近の応力分布を把握する目的で、まず、主応力図にてこの付近の検討を行った。また、RC部材であるドームの検討では、コンクリートのひび割れ、鋼材の腐食および水密性を考慮し、表-4に示すような許容応力度を設け、解析により得られた部材軸方向および円周方向の応力度が、許容応力度を満足しているか否かの検討を行った。なお、表-4に示す許容曲げ引張応力度は、ドームに発生するひび割れを制御するために設けたものであり、土木学会「コンクリート標準示方書〔平成8年版〕-設計編-」中の「曲げひび割れの検討」の項より、コンクリートの設計引張強度を算出し、それを適用した³⁾。

(2) 側壁発生応力度の検討

PC部材である側壁においても、表-5に示すような許容応力度を設け、解析により得られた部材軸方向および円周方向の応力度が、許容応力度を満足しているか否かの検討を行った。なお、表-5に示した許容応力度は「水プ標準仕様書」によった。

表-4 RC部材許容応力度

設計基準強度	240.0 kgf/cm ²	
許容曲げ圧縮応力度	90.0 kgf/cm ²	
許容曲げ引張応力度	常時	11.4 kgf/cm ²
	温度作用時	11.4 kgf/cm ²
	地震時	11.4 kgf/cm ²

表-5 PC部材許容応力度

設計基準強度	350.0 kgf/cm ²	
許容曲げ圧縮応力度	導入直後	170.0 kgf/cm ²
	その他	135.0 kgf/cm ²
許容曲げ引張応力度	導入直後	13.5 kgf/cm ²
	空水時	7.0 kgf/cm ²
	満水時	0.0 kgf/cm ²
	温度作用時	18.5 kgf/cm ²
	地震時	23.5 kgf/cm ²

5. 検討結果

(1) ドーム発生応力度の検討結果

ドーム縁端部付近の応力分布を見るために、主応力図にてその傾向を把握した。図-7にモデル番号① D=60m、H=10mのモデルの各合成荷重時の主応力図を示す。この結果より、ドーム縁端部付近においては、大きな引張および圧縮応力といった特異な応力は発生していないことが分かる。この傾向は、他の形状においても同様であった。

次に、ドームにおける部材軸方向および円周方向の発生応力度の検討を行った。図-8、図-9に、各形状における部材軸方向および円周方向の最大発生引張応力度をプロットしたグラフを示す。なお、グラフ横軸のタンク形状に付した番号は、表-2におけるモデル番号に対応している。

軸方向に発生する最大引張応力度は、各形状とも、荷重状態が温度作用時(夏)に発生している。また、その発生位置は、各形状ともドーム拡幅始点部付近である。図-8に示すように、軸方向最大発生引張応力度は、各形状とも許容引張応力度 11.4kgf/cm²を満足している。円周方向に発生する最大引張応力度も、荷重状態が温度作用時(夏)に発生しているが、その発生位置は、ドーム縁端部である。図-9に示すように、円周方向最大発生引張応力度も、各形状とも許容引張応力度を満足している。

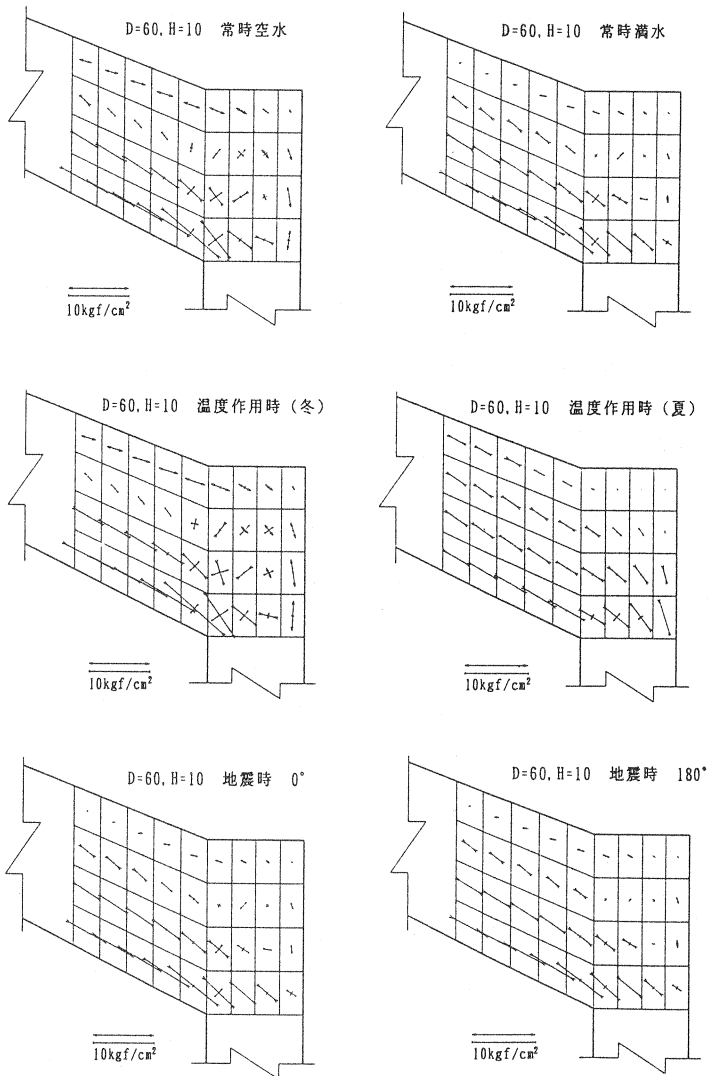


図-7 各合成荷重時の主応力図

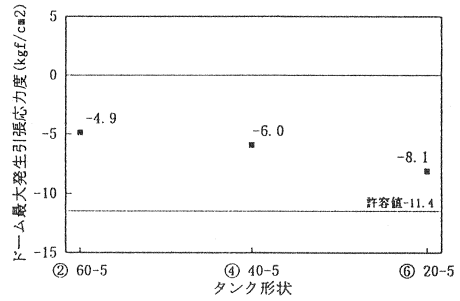
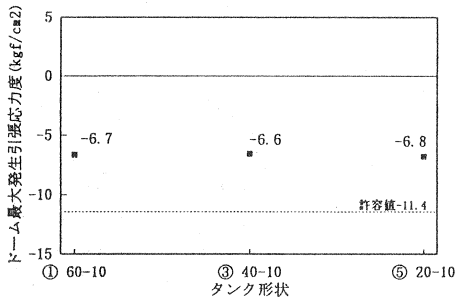


図-8 ト-ム軸方向最大発生引張応力度

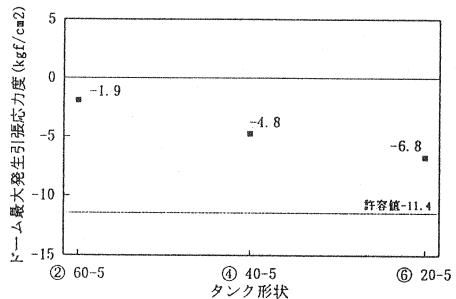
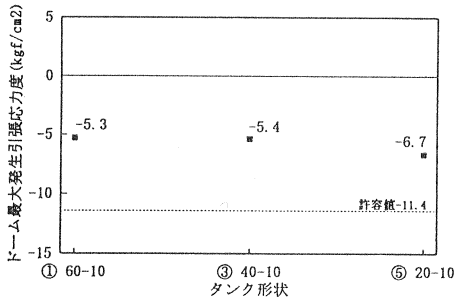


図-9 ト-ム円周方向最大発生引張応力度

(2) 側壁発生応力度の検討結果

側壁における部材軸方向および円周方向の発生応力度の検討を行った。その結果、発生応力度は、軸方向、円周方向ともに、解析を行った全ての形状において、許容応力度を満足していた。

6. まとめ

ドームと側壁との結合を剛構造とした形式のタンクの利点として、ドームと側壁との間の目地部が無くなることによるタンクの耐久性の向上、また、ドームを受けるために通常側壁に設ける張出し部を無くすることによる施工性の向上等が考えられる。本文では、施工省力化のために、側壁上端内側に通常設けられる張出し部を無くし、かつドームと側壁との結合を剛構造とした形式のタンクに関して、特にドームに着目し、解析によりその基本的性状および安全性について検討を行った。基本的にこのような形式のタンクの場合には、ドーム水平スラストを打消すためのプレストレス力およびドーム拡幅部の設計が妥当であれば、自重および積載荷重により、ドーム裾付近に発生する曲げモーメントおよび軸引張力はほぼ打消され、ドームはほとんど軸圧縮力みの状態となることが明らかになった。また、タンク形状および作用する荷重状態を変化させ、ドームおよび側壁の発生応力度の検討を行った結果、ドーム、側壁とも発生応力度は許容値を満足し、その安全性についても確認することができた。

今後は、このような形式のタンクを実構造物へ適用することを考慮した、さらに詳細な検討を実施していく予定である。

【参考文献】

- 1) 社団法人日本水道協会：水道用プレストレストコンクリートタンク標準仕様書，pp39～40，pp44，pp51，1980.3
- 2) 池田尚治：P C円形構造物の現況，最近のプレストレストコンクリート構造物と30年の歩み，pp37～38，1986.1
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書〔平成8年制定〕設計編，pp90，1996.3