

P.C調圧水槽の耐震設計の一例

西日本技術開発(株) 水俣 久
 電力中央研究所 正員 梶井彰雄 栗原千鶴子
 “ “ 岩楢敏広 矢島 浩

1. 要旨

九州電力(株)柳又発電所(筑後川水系筑後川)の導水路調圧水槽は、図1に示した諸元を有するフレシネー方式によるP.C.円形水槽である。一般に、P.C.水槽では、構造的には薄肉円筒シェルになると考えられ、その耐震設計は内部の水を含めた系としてシェル解析を行なう必要がある。本報告は、上記調圧水槽の耐震検討事例を述べ、この種の構造物の耐震設計の一助とするものである。

2. 検討方法

1) 水槽内部の水の動水圧

P.C.水槽の地震時荷重としては、水槽内部の水の慣性による動水圧が一義的なものとなる。精密には水槽振動を水力弾性振動として評価すべきであるが、水槽のたわみによる動水圧の増分よりは、地震動の水平移動によるものの方が大きいことから、動水圧は剛体水槽の水平移動によるものを採り、次に述べる応答解析では、これに定まる質量効果(仮想質量)が応答に與与するものとした。仮想質量分布 $m(\theta, z)$ としてこれを表わすと、次式で示される。

$$m(\theta, z) = \frac{\rho}{g} a \cdot \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(1)^i}{\lambda_i} \cdot I^{(i)}\left(\frac{a}{r_i}\right) \cdot \cos \lambda_i \frac{z}{h} \cdot \cos \theta$$

こゝに、 a : 水槽内径、 r_i : 水深、 ρ : 水の単位体積重量、 $\lambda_i = (2i+1)\pi/2$ 、 $I^{(i)}(\xi)$: 変形ベッセル関数で与えられる定数(文献1 付録参照)などである。

2) 解析方法

解析は次の方法によった。A) 薄肉円筒シェル要素を用いたFinite Element法による静的応答解析²⁾、B) 厚肉円筒用のF.E.M.による静的応答解析、C) 水槽剛性を曲げ一せん断ばりとして求めた7質点系モデルによる動的応答解析(スペクトル法および直接積分法)、D) 質点モデルによる応答を考慮したF.E.M.による静的応答解析。

方法A)は、水槽本体の挙動解析には便利な方法と考えられる。方法B)は、水槽下端での応力集中評価、座板応力の評価に有用と考えられる。方法A)およびB)での静的応答解析の変形から、水槽本体を曲げ一せん断ばりとして剛性を評価してよいものと判断されたので、動的解析にはC)の方法を用いた。なお、比較のために表1に固有周期の計算例を示したが、質点モデルでの近似は十分であると考えられる。方法D)は、動的応答解析結果をシェル応力に結びつけるに

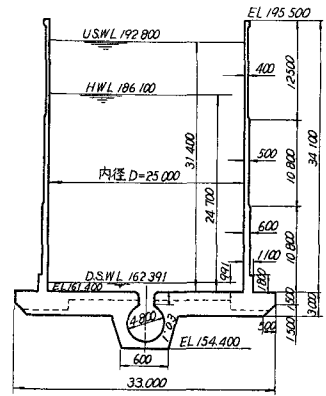


図1. 水槽断面図

めの便法として採用したものである。

3) 検討条件

検討条件は次のようである。 a) 震度：H.W.L.に対し0.2, b) 荷重：(静水圧)+(自重)+(木槽慣性力)+(動水圧), c) 許容応力：常時は表2, 表3による。

表1 固有周期の計算例 (sec)

	空船時	H.W.L.	U.S.W.L.	水面振動
円筒シイル ³⁾	0.104	0.144	0.226	2.71
筒内丸 ⁴⁾	0.092	0.138	0.178	5.24 ⁴⁾
A)	0.091			
B)	0.091			

3. 検討結果

1) 常時荷重(静水圧+自重)による応力設計の基本となるため、静水圧(U.S.W.L.)による応力分布の例を図2に示した。静水圧による応力解析は、その基本式のアナロジーから弾性床の上のはりとして行なうことができる⁵⁾。図中、点線で示した結果はこれによるものであり、F.E.M解析との一致は良好である。

表2 コンクリートの許容応力(常時: kg/cm^2)

	底版部(PC)	側壁部(PC)	備考
設計基準圧縮強度 σ_{pc}	240	400	PCスラブ $8 \sim 12\text{cm}$ 骨材最大径 20mm
許容曲げ引張応力度 σ_{pa}	60	140	
許容曲げ引張応力度 σ_{pa} 許容斜引張応力度は共に0			

2) 全組合せ荷重による応力

方法A)による解析結果の一例を図3に示した。また、表3に各断面での応力値を示した。全組合せ荷重による静的応答解析結果は、円周方向応力 σ_{θ} 、鉛直方向応力 σ_z とも最大値は約 $50 \text{ kg}/\text{cm}^2$ 、たわみの最大値は約 2mm であった。地震荷重による応力増加は常時荷重の約20%増である。

表3 P.C鋼鉄の許容応力(常時: kg/mm^2)

	PC鋼線 ($12-\phi 8\text{mm}$)	PC鋼棒 ($\phi 33\text{mm}$ 3種)	備考
断面積(mm^2)	603.24	789.0	
引張強度 σ_{pu}	156	110	
降伏点強度 σ_{py}	135	95	
許容応力度 σ_{pa}	94	66	設計荷重作用時
	109	77	ポストアクション カスリ直後
	121	85.5	プレスティング中

U.S.W.L.はH.W.L.よりは 6m 高いが、U.S.W.L.時の常時荷重による応力をH.W.L.時の全組合せ荷重による応力と比べると、円周方向応力 σ_{θ} では各部ともU.S.W.L.時が大きく、鉛直応力ではH.W.L.時全組合せ荷重によるものが大きかった。

水槽底版応力は、水槽下端との接続部で引張応力約 $10 \text{ kg}/\text{cm}^2$ 、せん断応力約 $7 \text{ kg}/\text{cm}^2$ が生ずるのみである。

プレストレスおよび配筋より水槽各部の応力値はすべて許容値内におさまる。

3) 動的応答解析の結果

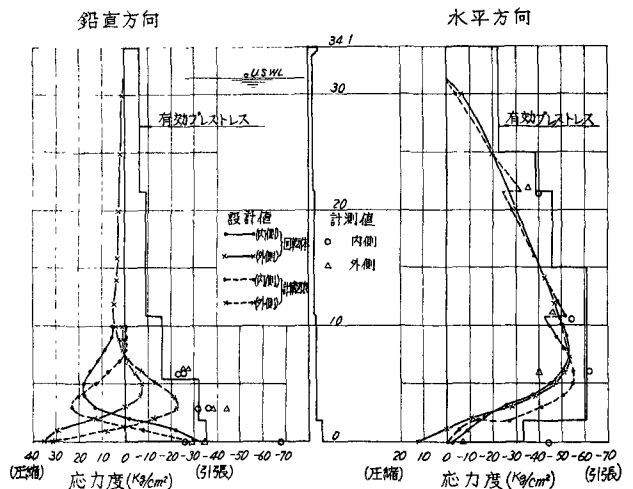


図2 応力分布(静水圧, U.S.W.L.)と設計プレストレス

動的解析は7質量モデルにより、a) 応答スペクトルによる方法(土木研究所スペクトル)、b) 応答スペクトル(EL CENTRO NS 1940, TAFT NZIE, ARIAKE 1969)、c) 上記3地震波による直接積分の3方法を採用した。

地震入力を100gal最大としたときの応答結果の一例を、図4に示した($R=2\%$, 方法c)による)。直接積分による応答倍率は、7.41 (ARIAKE) 5.96 (TAFT), 3.77 (EL CENTRO) などであった。解析方法の差異による水槽下端の応力の差をみると、方法a) b), c) に対し鉛直方向応力 σ_z はそれぞれ、 9.5 kg/cm^2 , 17.8 kg/cm^2 , 17.6 kg/cm^2 、せん断応力 τ_{rz} は 7.0 kg/cm^2 , 12.6 kg/cm^2 , 14.3 kg/cm^2 (TAFT) などである。応答スペクトルによる計算は3次までのモードも考慮したが、2次、3次の影響は僅少である。

地震入力の大きさは、評価方法に前後して定められる面もあるので、動的解析では震度0.2 に対応する値と採らる、地震圧より定めることとした。当地震(日田市)は河角マップによれば100年期期待値で50gal程度、金井マップによれば2%sec程度、当地震が過去に経験したであろう地震動は金井式によれば2~3%sec、42~63gal程度と推定。このため、余裕をみて100galとした。

動的解析による応力を、はりとして求めると前述したように $\sigma_z = 17.8 \text{ kg/cm}^2$ 程度である。応答結果をシェル応力に結びつけるため、TAFT入力による応答倍率を考慮し計算した結果を、図5に示した(方法Bおよびc))。ARIAKE地震は微小な地震であることを考慮してTAFT波を優先だが、ほとんどの応力が常時応力(U.S.W.L)以下である。合成応力の検討結果も各断面で許容値内であった。

水槽下端での配筋図を参考のため、図6に示した。

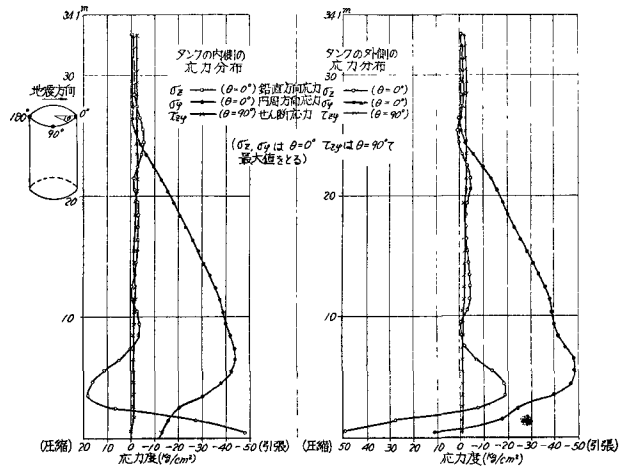


図3 全組合せ荷重による水槽応力(H.W.L) (A法)

表4 常時(U.S.W.L)と地震時(H.W.L)の応力の比較 (kg/cm²)

断面	高さ(m)	タンク内外別	円周方向応力度 σ				鉛直方向応力度 σ_z			せん断応力度(B法)
			常時		地震時		常時		地震時	
			A	B	A	B	A	B		
1	0	内	-2.0	-13.0	-2.0	-31.0	-48.5	-23.0	16.0	
		外	+13.0	+11.5	+16.0	+35.0	+49.6	+38.0	26.0	
2	2.0	内	-16.0	-18.0	-9.0	-2.0	-10.0	+4.0	6.5	
		外	-11.0	-21.0	-9.0	+13.0	+10.5	+23.0	5.0	
3	5.4	内	-41.5	-42.4	-38.2	+17.0	+11.3	+21.8	1.0	
		外	-44.0	-48.2	-41.0	-6.0	-13.3	0	1.0	
4	10.8	内	-50.0	-39.3	-40.0	+5.0	-2.1	+8.5		
		外	-44.0	-39.2	-39.0	-4.5	-2.7	+8.0		
5	21.6	内	-29.0	-12.9	-11.8	+3.5	-1.4	+3.8		
		外	-28.0	-13.5	-12.0	+3.5	-4.5	+4.0		

-:引張 +:圧縮

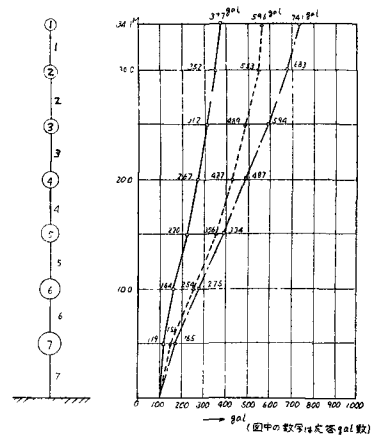


図4 3地震入力による応答

4. その他

なお、 $1/50$ 模型による模型振動実験および完成後における本槽の振動性状の測定を行なって、地震時には *valling* 振動は生じ難いこと、計算上のモデルと実際とは良好一致をみたことなどを確認した。

設計・施工の詳細については、文献6) に述べられているが、本設計例のように本槽下端を固定構造にすれば、耐震設計上断面が厚くなり、温度応力が無視できなくなる。施工方法に留意が必要である。

本報告は、九州電力(株)関係各位の御盡力によってとりまとめることができました。ここに、謝意を述べる次第である。

参考文献

- 1) 桜井彰雄 「水中構造物の振動(地震応答に対する一考察)」
電研技研報告 NO.65051, 1965
- 2) 岩楯・松尾・栗原 「薄肉円筒シェル要素を用いた有限要素法とその応用」 電研技研報告 NO.71012, 1972
- 3) 飯島・萩原 「円筒シェル水槽の耐震計算について」 土木学会誌 44巻 10号
- 4) Senda and Nakagawa 「土木技術者のための振動便覧, P.220」土木学会
- 5) 猪股俊司 「プレストレストコンクリートの設計と施工」 P.173
- 6) 大橋光太郎 「柳又発電所調圧水槽の設計と施工について」 発電水力 NO.123, 1973
- 7) 桜井・栗原・岩楯・矢島 「P.C調圧水槽の耐震性の検討(オ1報:柳又発電所導水路調圧水槽の静的応答解析)」 電研総報報告: 72509, 1972.8
- 8) " 「P.C調圧水槽の耐震性の検討(オ2報:柳又発電所導水路調圧水槽の動的応答解析)」 電研総報報告: 72565, 1973.1
- 9) 岩楯・増子・桜井・栗原・永津・吹点 「P.C調圧水槽の耐震性の検討(オ3報:柳又発電所導水路調圧水槽の常時微動観測とサージングによる振動性状の観測)」 電研総報報告(準備中)

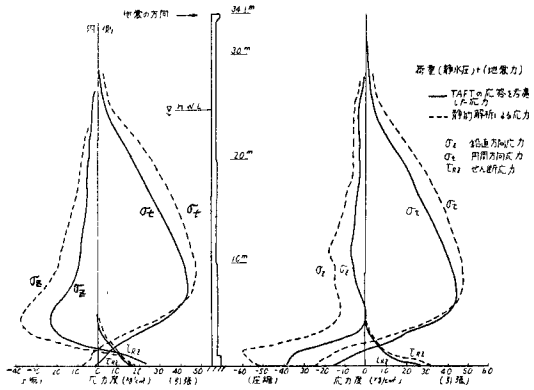


図5 応答も考慮した水槽応力(TAFT. B法)

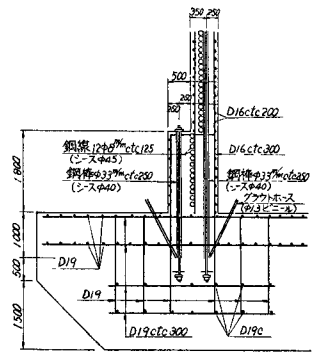


図6 水槽下端の配筋図