

[103] 円筒形容器（タンク・サイロ）の側壁下端連結法の改良

正会員 福島 啓一（飛島建設技術本部）

1. はじめに

円筒形容器は力学的に見て、合理的な形状であり、施工もし易いことから、石油、水などの液体タンク、穀物、セメント、鉱石、石炭などの粉粒体のサイロ、原子炉の格納容器などに広く採用されている。

円筒形容器に働く力は内容物（液体、粉粒体、気体）による内圧力が主なものであり、その他に排出時の摩擦による鉛直力、地震力、風力、温度応力、コンクリートの乾燥収縮による応力、ドームや屋根、機械装置からの力も考慮しなければならぬ。プレストレストコンクリート製とする時は、円周方向の緊張力による外圧力も考える。

円筒形容器は底板、円筒形の側壁及び屋根よりなるが（屋根はないこともある）、底板と側壁の接手の構造により、力学的には4種に分けられる。即ち(a)固定式、(b)ヒンジ式、(c)滑動式、(d)その他である。荷重として、回転中心軸に対称に働く外圧力、内圧力などだけを考えればよい時は、(c)滑動式が、力学的には最も合理的であるが、地震力、風力などの偏荷重を考えるとこの構造は不完全である。(b)ヒンジ式は、理論上は水平力に十分耐えることが出来る訳であるが、水密性、気密性を十分満

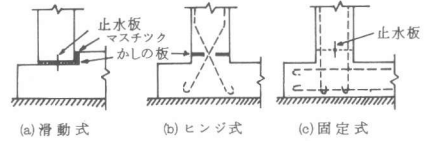


図-1 円筒形容器の壁下端の接続法

足し、施工もし易く、耐久性あり、力学的にも安全なヒンジ構造を得ることは仲々難しい。そのため、水タンクとしては相当利用されているが、重要なタンクには採用されていない。又 78年宮城沖地震での破壊例もある。

以上のことから、(a)固定式がすぐれている訳であるが、固定点（底板と側壁の連結部）に大きな曲げモーメントが働き、その補強のために大量の鉄筋やPC鋼材を配置したり、壁厚を増やしたりしなければならぬ欠点がある。そこで固定点の曲げモーメントを小さくし、しかも耐震性、水密性、気密性、施工性などがすぐれた構造形式を考案し（補助円筒式）比較設計を行って見た。

2. 補助円筒式の考え方

固定式の欠点は側壁下端に大きな曲げモーメントが発生することであるが、この曲げモーメントは底盤から離れた点では急激に少くなる（図-2）。そのため、この部分の壁厚を増して対処した実例もあるが、壁厚を増すと曲げモーメントも又増えるので、この対策はあまり良い方法ではない。そこで下記の改良を考案した。(a)側壁の根元近くに外圧（プレストレスの緊張力）又は内圧が働くと大きな曲げモーメントを生じるので、根元近くにはプレストレス力も加えず、内圧も働かない様にする。(b)内圧が側壁の根元近くに働かない様にするために、側壁内側に接して高さの低い補助円筒を設け、これにより内圧を負担させる。(c)排出用のホッパーを設ける時は、これに補助円筒の役割りをさせる。(d)補助円筒の天端は止水板又は内張鋼板などで側壁内面を連結し、気密性、水密性を保つと共に、補助円筒

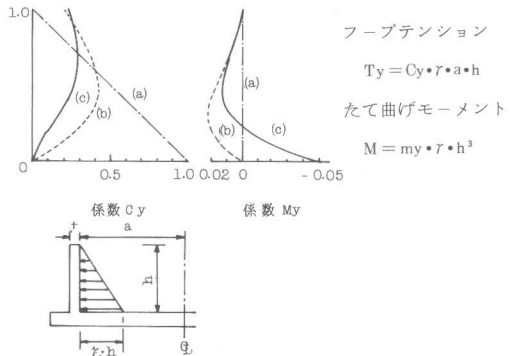


図-2 接続形式によるフープテンションの分布の違い。
($h^2/2at = 2$ の場合)!

の裏側及び側壁（本円筒）下端には気圧、水圧などが働かない様にする。(e)補助円筒の天端と本円筒との間は、一般には、圧縮力だけを伝える構造とする。補助円筒、本円筒共にコンクリート打設をした後に、円周方向のプレストレスを導入すれば両者は密着し、容易に圧縮力だけを伝える構造が得られる。又、こうすれば補助円筒も

プレストレスされる。(f)円周方向プレストレスは補助円筒のある高さには入れない。(g)高温又は低温の材料を貯蔵するタンク，原子炉格納容器などでは，補助円筒と本円筒の間に断熱材を入れることによって，本円筒下端には熱応力が殆んど働かないように出来る。(h)側壁（本円筒）は壁厚，たて方向のPC鋼材量共，上下方向に一定として設計出来るので施工が容易になる。スリップフォーム法を採用する時は，この利点は特に重要である。

3. 計算法

半無限長の円筒シェルの端に曲げモーメント M_0 ，せん断力 Q_0 ，が働いた場合（図-5）の，円筒の変位 w ，回転角 θ 等は次の様になる。

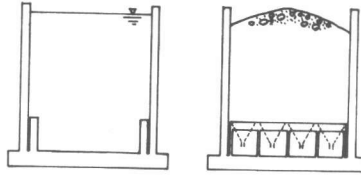


図-3 補助円筒付タンク及びサイロ

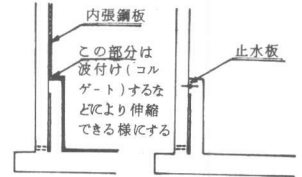


図-4 補助円筒詳細

$$w = \frac{e^{-\beta x}}{2 \beta^3 D} [\beta M_0 (\sin \beta x - \cos \beta x) - Q_0 \cos \beta x] \quad (278)$$

$$\left. \begin{aligned} \theta &= \frac{dw}{dx} = \frac{e^{-\beta x}}{2 \beta^2 D} [2 \beta M_0 \cos \beta x + Q_0 (\cos \beta x + \sin \beta x)] \\ -\frac{M}{D} &= \frac{d^2 w}{dx^2} = \frac{e^{-\beta x}}{\beta D} [\beta M_0 (\cos \beta x + \sin \beta x) + Q_0 \sin \beta x] \\ -\frac{Q}{D} &= \frac{d^3 w}{dx^3} = \frac{e^{-\beta x}}{D} [2 \beta M_0 \sin \beta x - Q_0 (\cos \beta x - \sin \beta x)] \end{aligned} \right\} (282)$$

ここに

$$\beta^4 = \frac{E t}{4 a^2 D} = \frac{3 (1-\nu^2)}{a^2 t^2}$$

$$D = \frac{E t^3}{12 (1-\nu^2)}$$

E : ヤング率

t : シェル（側壁）の厚さ

a : 円筒シェルの半径

ν : ポアソン比

w : 座標 x の点のたわみ

θ : 座標 x の点の回転角

又，無限長の円筒形シェルに線荷重 P が働く時の w， θ 等は次の様である。（図-6）

$$w = \frac{P e^{-\beta x}}{8 \beta^3 D} (\sin \beta x + \cos \beta x) \quad (283)$$

$$\left. \begin{aligned} \theta &= \frac{dw}{dx} = -\frac{P e^{-\beta x}}{4 \beta^2 D} \sin \beta x \\ -\frac{M}{D} &= \frac{d^2 w}{dx^2} = \frac{P e^{-\beta x}}{4 \beta D} (\sin \beta x - \cos \beta x) \\ -\frac{Q}{D} &= \frac{d^3 w}{dx^3} = \frac{P e^{-\beta x}}{2 D} \cos \beta x \end{aligned} \right\} (C)$$

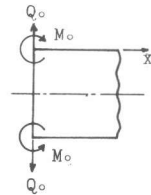


図-5

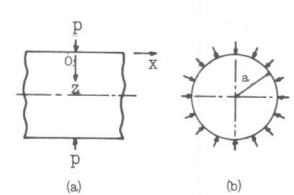


図-6

次に無限長の円筒形シェルに曲げモーメント $2M_0$ ，せん断 $2Q_0$ が働く時について図-7 に従って考える。相互に打消すせん断力 Q' により， $2M_0$ の働く点のたわみはゼロとなる。故に (278) (282) より

$$w = \frac{e^{-\beta x}}{2 \beta^3 D} [\beta M_0 (\sin \beta x - \cos \beta x) - Q' \cos \beta x] = 0 \quad (1)$$

$$\theta = \frac{dw}{dx} = \frac{e^{-\beta x}}{2 \beta^2 D} [2 \beta M_0 \cos \beta x + Q' (\cos \beta x + \sin \beta x)] \quad (2)$$

これを $x=0$ について解くと， $\theta_{x=0} = M_0 / 2 \beta D$ ， $2Q_0$ については(c)式で解ける。

今図-8の様に座標系をとり，固定方式の円筒形容器について上記の式を適用すると，下端固定の条件より $x=0$ の時 $w=0$ ， $\theta = dw/dx = 0$ であるから，P， M_0 ， Q_0 の間に次の関係式が成立つ。

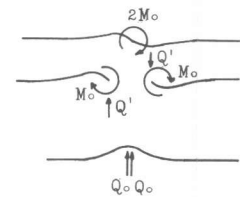


図-7

$$w_{x=0} = -\frac{Pe^{-\beta h}}{8\beta^3 D} (\sin \beta h + \cos \beta h) + \frac{Q_0}{4\beta^3 D} = 0 \quad (3)$$

$$\theta_{x=0} = \frac{dw}{dx} = \frac{Pe^{-\beta h}}{4\beta^2 D} \sin \beta h + \frac{M_0}{2\beta D} = 0 \quad (4)$$

ここに h は荷重点の座標である。これを M_0, Q_0 について解くと

$$M_0 = -\frac{Pe^{-\beta h}}{4\beta} \sin \beta h \quad (5)$$

$$Q_0 = \frac{P}{2} e^{-\beta h} (\cos \beta h + \sin \beta h) \quad (6)$$

故にこれより荷重 P の M_0, Q_0 についての影響線を描くと図-9 の様になる。即ち $\beta x = 0 \sim 2.0$ の間に働く荷重が M_0 に大きく影響することが分る。液体圧などの三角形分布をする荷重の場合では更に下端近くの荷重の影響が大きくなる。従って、この部分の荷重を別に分担する補助円筒を設ければ、 M_0, Q_0 は大幅に減ると予想される。今 $\beta x = 2.0 \sim 2.5$ の高さの補助円筒をつくるものとすれば所要高さ H は次の様になる。

$$\beta = \sqrt{\frac{Et}{4a^2 D}} = \sqrt{\frac{3(1-\nu^2)}{a^2 t^2}} = \frac{1.3027}{\sqrt{at}} \quad (7)$$

$$H = (2.0 \sim 2.5) / \beta = (1.5 \sim 1.9) \sqrt{at} \quad (8)$$

但し、 $\nu = 1/5$ とした。 $a = 50 \text{ m}$ 、 $t = 0.4 \text{ m}$ の超大型タンクでも $H = 6.9 \sim 8.5 \text{ m}$ 程度の補助円筒で、 M_0 を大幅に減らすことが出来るので、背の高いタンクやサイロでは相当の利点が生ずるものと予想される。

4. 設計例

(調圧水槽) 内径 20 m 、高さ 50 m の調圧水槽を考える。壁厚 40 cm とすると $H = 1.5 \sim 1.9 \sqrt{at} = (1.5 \sim 1.9) \cdot \sqrt{10 \times 0.4} = 3.0 \sim 3.8 \text{ m}$ の補助円筒が必要となる。固定式の場合は実施例から見て $1.80 \text{ m} \sim 0.40 \text{ m}$ で階段状に変化させる様な設計とし、両者の曲げモーメント、せん断力を求める。

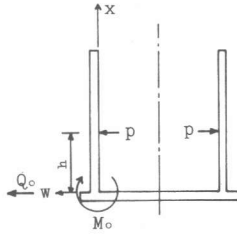


図-8

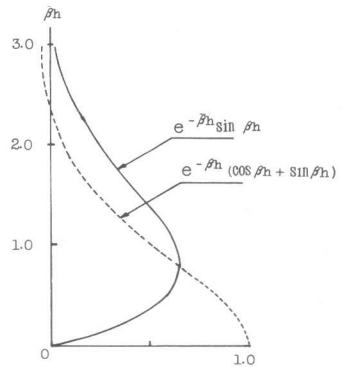


図-9 P の M_0, Q_0 に対する影響線

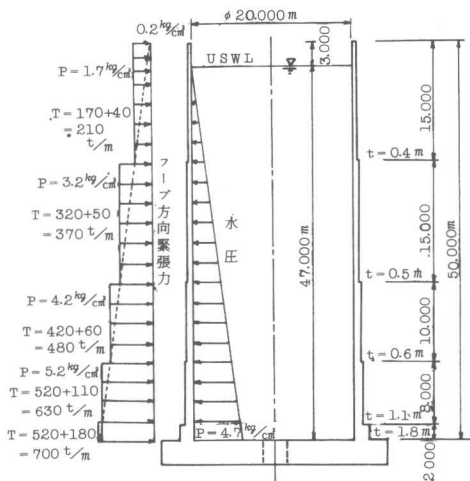


図-10 設計例 (固定式)

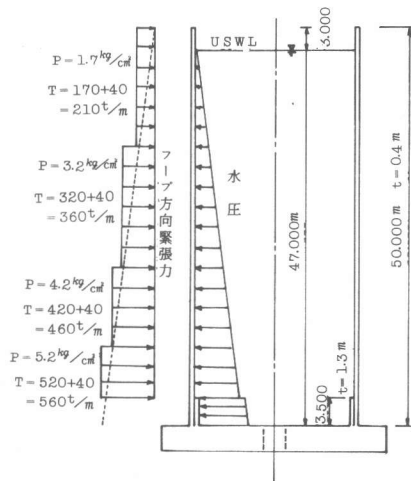


図-11 設計例 (補助円筒式)

実際のタンクは高さが有限長であり、壁厚変化もあつたりして、複雑なので、有限長の弾性床上のはりとして電算機により解いた曲げモーメント M を図-12に示す。ピラスターを無視すると、たて方向の曲げ応力は $\sigma_b = M \cdot y / I$, $= M / Z$, $Z = b t^2 / 6$ として求められる。たて方向の圧縮力 T_v は、曲げ応力を打消して、なお 10 Kg/cm^2 の圧縮応力が残る様に次式で求める。 $T_v = (\sigma_b + 10) \times t \times 2 a \pi$ 。たて締めめのPCケーブルを偏心させれば、これを多少減らすことは出来る。円周方向の緊張力は連続的

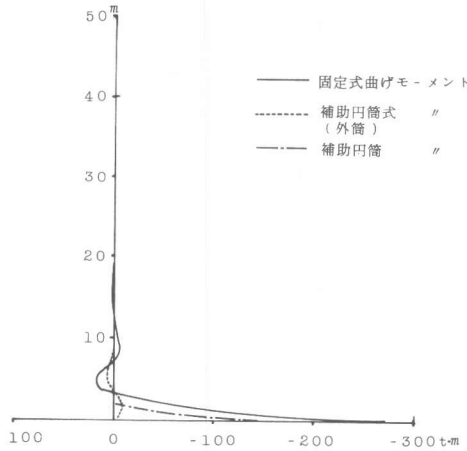


図-12 曲げモーメント

に変化させて、三角形分布になる様にすれば十分なのであるが、施工管理が複雑になるので、図-10、図-11に示した様に階段状変化とした。たて方向と同じく、荷重作用時に 10 Kg/cm^2 の圧縮応力が残る様にすると、所要の緊張力は $T_h = r \cdot h \cdot a + 10 t$ となる。

5. まとめ

以上の計算にもとづいて、所要材料を算出して見ると表-2の様になり、補助円筒式の有利さがはっきりすると思う。

その他、数字に出ない要素として、壁厚変化がないので、応力集中などの問題が少い、型枠が組みやすい(特に壁厚変化部に応力集中を緩和するためハンチをつけると、型枠工事が複雑になる上に、コンクリート打設の分割回数も増えるが、新方式ではそ

れらが全くはぶかれる) たて方向の緊張力を一定に出来るので、途中高さでの緊張がいらぬ、たて方向に緊張力の異うPC鋼材を接続すると云う面倒な問題がない、工期が短くなるなどの多くの利点がある。

比較のため、内水圧についての計算を行ったが、PC緊張力、温度応力などに対しても有利であり、大型で高さの高いサイロ、タンク、原子炉の格納容器などに適用すれば非常に有利な構造形式と考えられる。

参考文献

1. 猪股俊司：プレストレストコンクリートの設計および施工(1957. 技報堂)
2. S. Timoshenko and S. Woinowsky-Krieger: Theory of plates and Shells(1959)(式番号をそのまま引用した。)

表-1 たて方向PC鋼材の試算

	底板からの高さ m	曲げモーメント t-m	壁厚 t cm	曲げ応力 σ_b Kg/cm ²	必要なたて方向圧縮力 T_v ton	区間長 H m	延圧縮力 $T_v \times H$ ton · m	
固定式	50	0	40	0	2.824.9	15	42,373.7	
	35	-0.33	"	± 1.24				
	"	"	"	± 0.79	3.578.3	15	53,674.1	
	20	-0.58	"	± 1.39				
	"	"	"	± 0.97	6.597.3	10	65,973.4	
	10	-4.50	"	± 7.50				
	"	"	"	± 2.23	2.637.4.3	8	210,994.2	
	2	-56.78	"	± 28.16				
	"	"	"	± 10.51	6.824.2.9	2	13,648.5.7	
	0	-271.85	"	± 50.34				
計						50	509,501.1	
補助円筒式	50	-	40	-	2.860.1	42	120,124.3	
	9.50	-0.369	"	± 1.38				
	8	+0.301	"	± 1.13	10,450.2	8	83,601.5	
	4.50	+8.422	"	± 31.58				
	2	-8.02	"	± 30.08	5.002.1.7	3.50	170,065	
	0	-0.81	"	± 3.04				
	3.50	0	130	0				
	0	-144.33	"	± 51.24				
	計						50+3.5	373,790.8

表-2 所要材料の比較

名称	単位	固定式 A	補助円筒式			比率 B/A
			本円筒	補助円筒	計 B	
コンクリート	m ³	2085.73	1281.76	267.30	154906	74.3%
円周方向緊張力	t-m	1.252,867	1,054,946	-	1,054,946	84%
たて方向緊張力	t-m	509,501	203,726	170,065	373,791	73.4%