水工結構应力分析叢書之四

調压井襯砌

潘家錚編著

科技卫生出版社

水工結構应力分析叢書之四

調压井襯砌

潘家錚編著

科技卫生出版社

內 容 提 要

本書叙述了直井襯砌和底板的計算方法，在直井部分介紹了直井下端受到底板影响时，以及上段分段灌注时的不同計算方法，在底板方面介紹了圓形板及环形板的一般理論，及在不同載荷下的計算方法，并汇集了彈性理論中可資引用的方法和成果，且附有图表和实例。本書可供水利工程設計人員及有关專业院校师生参考之用。

水工結構应力分析叢書之四

調 压 井 襯 砌

編著者 潘 家 錚

*

科 技 卫 生 出 版 社 出 版

（上 海 南 京 西 路 2004 号）

上海市書刊出版业营业許可証出 093 号

科學出版社上海印刷廠　新华書店上海发行所总經售

*

統一書号 15·899

开本 850×1168 耗 1/32 · 印張 3 3/8 · 字数 82,000

1958年10月第1版

1958年10月第1次印刷 · 印數：1—2,500

定价：(10) 0.60 元

目　　录

第一章 概 述

有压引水道式的水电站，按“調压池水力計算規范”規定，当

$$\frac{\sum LV}{H}>15$$

时，必需在引水道上設置調压設备；式中 L 为水道各段長度（公尺），V 为相应的平均流速（公尺/秒），H 为最小水头（公尺）。实际上，在許多水电站中，虽 $\frac{\sum LV}{H}$ 略小于15，也常常由于受到压力升高、速率升高等因素限制，而設置調压設备的。調压設备的主要作用有二：(1)減輕水力冲击（水鏈）影响，(2)在負荷变动时調节水量。

如引水道为压力隧洞，則最常用的調压設备形式是“調压井”式的，即从地面山坡中开挖一个圓井而成，这往往比建筑在空中的調压塔或調压柜来得經济。

在調压池的水力計算完成后，各种主要尺寸均可加以肯定，接着就要进行結構应力計算及繪制施工詳图。本書中將介紹一些計算的方法和資料，俾有助于分析工作的迅速完成。

調压井的結構主要可分为(一)大井井壁——这往往是埋設在基岩中的一个鋼筋混凝土圓筒，(二)大井底板——这是一块放置在彈性地基上的圓形或环形板，(三)升水管及升水井、頂板和其余接头部分。在簡單式調压井中，沒有升水管，或連升水井也沒有。

圓筒和圓板的計算，在水工結構中是常常遇到的問題，过去有系統的資料不多，故本書中將較詳細的进行論述，有些材料甚至也不一定是調压井計算中所必需的，其用意是使讀者能够应用这些

資料解決一般的圓板、圓筒計算問題，因此本書也可改称为圓板及圓筒的計算。

必須指出，建造在地下的調压池的形式是很多的，調压井不过是主要和常見的一种，此外我們也常采用調压廊道、調压室等形式，这些結構的襯砌計算，可以按其性質，用本書及"漸变段襯砌計算"一書中的方法解决之。

調压井大井襯砌四周包于基岩（或回填土）之中，因此筒身力矩大形減少，主要只承受"箍应力"，只有在筒底（或其他部分）会有一定的局部弯曲（边界应力）存在，需要进行計算。在計算大井时，不計岩石彈性抗力影响是不妥的，因为这將造成很多的材料浪費。

調压井主要承受的荷載是：內水压力（水面高程由水力計算确定，有最高最低涌浪两种极限情况），外水压力，上托力，灌漿压力或回填土的主动压力，內水及襯砌重量（襯砌重量影响很小，特別是直井部分，通常不加計算），溫度及收縮应力，和地震力。在地震情况下的荷載性質及应力計算方法，尙无足够資料可供参考，因此，一般主要的計算情况有下列三种：

1. 最高內水压力 + 內水重

2. 最低內水压力（通常假定內水不存在）+ 最高外水压力或灌漿压力 + 岩石主动压力 + 上托力

3. 溫度及收縮应力、和上述某一种情况之和。

根据計算，往往情况（2）是控制的。特別在某些工程中，底板上的上托力为值很大，这时我們还值得研究一下是否可利用排水設施降低这种不利的外部压力，以改善襯砌应力情况。

在以下的計算中，我們將采用几条假定：

（1）直井襯砌断面上下一致，直井半徑也不变（或在每一段圓筒中，断面不变）。

（2）直井及底板都是薄板結構，可以适用薄壳和薄板的理論。

（3）岩石为彈性介質，当襯砌向岩石变形时，岩石发生的抗力

和变形成正比，其比例常数即称为岩石的彈性抗力系数 k。

(4) 直井和底板剛接（若为鉸接，亦可同样进行分析，唯实际上不多見）。襯砌和基岩是密接的，直井襯砌与基岩間的摩擦力足够維持襯砌本身自重，故井底的垂直变位可假定为0。

(5) 底板受到井壁傳来的对称徑向应力（拉力或压力）所产生的变形（半徑伸長或縮短）和井壁的撓曲变形相比，可以忽略，故井底亦无水平变位。

許多工程中，对調压井襯砌的計算常嫌不够，有些混凝土尺寸特别是底板厚度显得很大，事实上，若基岩情况良好，襯砌尺寸是否要这样大，实在值得詳細的研究一下。

第二章　直井計算(一)

直井的襯砌，是一个埋在岩石中的混凝土圓筒，常沿全高分成数节撓搗，有时留收縮縫，有时也可整体澆成，不留縫。圓筒与底板通常做成剛接，也可以做成鉸接，但是后者要做阻水（收縮縫中按理也应做阻水）。

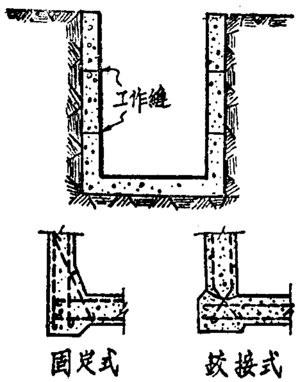

图 1

在这一节中，我們考虑最簡單情况：圓筒与底板剛接，本身不留縫，上下断面均匀一致，下面是引用的符号：

R——半徑(至襯砌中綫)(公尺)

t——襯砌厚度(公尺)

k——岩石的彈性抗力系数(公吨/公尺^3)

p——压力强度(兼指內外压力)(公吨/公尺^2)

y——襯砌的变位(公尺)

w——水的容重(1.0 公吨/公尺^3)

D——襯砌的撓曲剛度，$D=\frac{1}{12(1-\mu^2)}Et^3$，$\mu$ 为泊松比，E 为彈性模量(公吨公尺)

x——坐标，指襯砌上各点离开底板的距离(公尺)

H——直井全高(公尺)

β——参变数，$\beta=\left[\frac{Et+kR^2}{4R^2D}\right]^{\frac{1}{4}}$(公尺$^{-1}$)

M——力矩(公吨公尺/公尺)

V——剪力(公吨/公尺)

T——箍应力(公吨/公尺)

K——折算地基抗力系数$=\frac{Et}{R^2}+k$

我們并規定y以向外为正，$\frac{dy}{dx}$以向外傾为正，x从底向上量起，T以拉力为正，p以內部压力为正，M及V以图2及3中所示方向为正。

取出圓筒中的一微小元块如图2，考虑作用在其上的力系平衡，可得:

$$(V+dV)Rd\theta-VRd\theta-\\-Tdxd\theta+(p-ky)\\Rd\theta dx=0 \qquad (1)$$

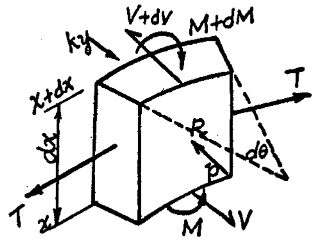

图2

化簡后，得

$$\frac{dV}{dx}-\frac{T}{R}+(p-ky)=0 \qquad (2)$$

根据撓曲理論

$$\frac{dV}{dx}=\frac{d^2M}{dx^2}=-\frac{d^2}{dx^2}\left(D\frac{d^2y}{dx^2}\right)=-D\frac{d^4y}{dx^4} \qquad (3)$$

根据箍应力公式

$$T=\frac{Et}{R}y \qquad (4)$$

或
$$\frac{T}{R}=\frac{Et}{R^2}y \qquad (5)$$

代入(2)后，得

$$D\frac{d^4y}{dx^4}+\frac{Et}{R^2}y+ky=p$$

或
$$\frac{d^4y}{dx^4}+\left(\frac{Et+kR^2}{DR^2}\right)y=\frac{p}{D}。 \qquad (6)$$

上式是圓筒变形的基本微分方程，它的形式，和彈性地基上的梁的基本方程可以說是一致的，只要取地基常数 $K=E\frac{t}{R^2}+k$ 即可，因此我們可以应用彈性地基上的梁的公式来进行圓筒計算。

注意若圓筒承受向內的压力时（如外水压力），則不能指望岩石对襯砌起拉住的作用（除非有特殊的錨定設置），这时，应置 $k=0$，而 $K=\frac{Et}{R^2}$。

式(6)的特殊积分甚易求得为（当 p 为 x 的三次以下函数时）

$$y=\frac{pR^2}{Et+kR^2}=\frac{p}{K} \tag{7}$$

特殊积分的意义，显然是当圓筒两端可以自由变形情况下的解答，在筒底，令 $p=p_0$，得

$$y_0=\frac{p_0}{k} \tag{8}$$

$$\left(\frac{dy}{dx}\right)_0=\frac{1}{K}\left(\frac{dp}{dx}\right)_0 \tag{9}$$

例如，設圓筒承受內水压力，水面齐頂，則

$$p_0=+wH \tag{10}$$

$$y_0=\frac{+wH}{K} \tag{11}$$

$$\left(\frac{dy}{dx}\right)_0=\frac{-w}{K} \tag{12}$$

設圓筒承受外压力，其强度 $p=\xi(H-x)$，則

$$y_0=-\frac{\xi H}{K} \tag{13}$$

$$\left(\frac{dy}{dx}\right)_0=\frac{+\xi}{K} \tag{14}$$

設圓筒承受內水压力，水面在 $x=d$ 处

$$p_0=wd \tag{15}$$

$$y_0=\frac{wd}{K} \tag{16}$$

$$\left(\frac{dy}{dx}\right)_0=-\frac{w}{K} \tag{17}$$

基本方程(6)的补充函数，可写成熟知的形式

$$y=e^{\beta x}(C_1\cos\beta x+C_2\sin\beta x)+e^{-\beta x}(C_3\cos\beta x+C_4\sin\beta x) \tag{18}$$

式中

$$\beta=\sqrt[4]{\frac{K}{4D}}=\sqrt[4]{\frac{Et+kR^2}{4R^2D}} \tag{19}$$

当 x 逐渐增大时，$e^{\beta x}$ 亦將无限增大。因为本节中考慮調压井身整体澆成，且高度很大，故常数 C_1 及 C_2 可取为 0（亦即將圓筒視为无穷長），或

$$y=e^{-\beta x}(C_3\cos\beta x+C_4\sin\beta x) \tag{20}$$

由此可計算：

$$M_x=-D\frac{d^2y}{dx^2} \tag{21}$$

$$V_x=-D\frac{d^3y}{dx^3} \tag{22}$$

設在 $x=0$ 处，置有力矩 M_0 及剪力 V_0，代入后，得

$$-D\left(\frac{d^2y}{dx^2}\right)_{x=0}=M_0 \tag{23}$$

$$-D\left(\frac{d^3y}{dx^3}\right)_{x=0}=V_0 \tag{24}$$

解出以上两式，得

$$C_3=-\frac{1}{2\beta^3D}(V_0+\beta M_0) \tag{25}$$

$$C_4=+\frac{M_0}{2\beta^2D} \tag{26}$$

而

$$(y)_0=-\frac{1}{2\beta^3D}(\beta M_0+V_0) \tag{27}$$

$$\left(\frac{dy}{dx}\right)_0=+\frac{1}{2\beta^2D}(2\beta M_0+V_0) \tag{28}$$

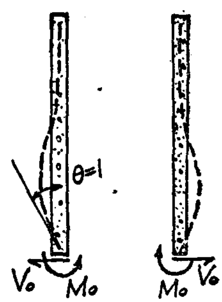

图 3

在图 3 中，示一无限長圓筒，在 $x=0$ 处作用力矩 M_0 及剪力 V_0；調整这两值，使底部发生一單位轉动角 $\left(\frac{dy}{dx}\right)_0=1$，但 $y=0$，則所需力矩及剪力可由式(27)、(28)求得

$$M_0=+2\beta D(\text{正号表示正力矩和正的轉动角方向相同}) \tag{29}$$

$$V_0=-2\beta^2 D(\text{負号表示所需剪力是向外的}) \tag{30}$$

按照近代結構学观念，$M_0=2\beta D$ 可称为圓筒的抗撓劲度，V_0 为相干系数。同样，令底部发生 $y=1, \frac{dy}{dx}=0$，所需之 M_0 及 V_0 各为

$$M_0=+2\beta^2 D(\text{相干系数}) \tag{31}$$

$$V_0=-4\beta^3 D(\text{抗推劲度}) \tag{32}$$

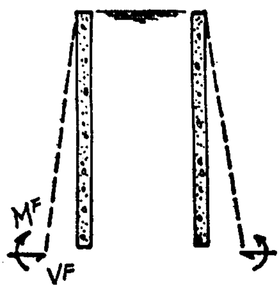

图 4

現在考慮图 4 中的圓筒，它的底部可以自由轉动及移动，在承受压力后，底部將产生移动 y_0 及轉动 $\left(\frac{dy}{dx}\right)_0$，(見式10—17)，然后再在筒底加一力矩 M_F 及剪力 V_F，以消去 y_0 及 $\left(\frac{dy}{dx}\right)_0$，則所需的 M_F 及 V_F 为：

当承受內水压力时

$$M^F=\frac{-wHRt}{\sqrt{12(1-\mu^2)}}\sqrt{\frac{Et}{Et+kR^2}}\left(1-\frac{1}{\beta H}\right)=$$
$$=\frac{-wH^3}{2}\cdot\frac{1}{(\beta H)^2}\left(1-\frac{1}{\beta H}\right) \tag{33}$$

$$V^F=\frac{+wRt}{\sqrt{12(1-\mu^2)}}\sqrt{\frac{Et}{Et+kR^2}}(2\beta H-1)=$$
$$=\frac{+wH^2}{2}\cdot\frac{1}{(\beta H)^2}(2\beta H-1) \tag{34}$$

当承受外压力时 $\left(\text{令 } k=0,\ \beta=\sqrt[4]{\frac{Et}{4R^2D}}\right)$

$$M^F=\frac{+\xi HRt}{\sqrt{12(1-\mu^2)}}\left(1-\frac{1}{\beta H}\right)=\frac{+\xi H^3}{2}\frac{1}{(\beta H)^2}\left(1-\frac{1}{\beta H}\right) \quad (35)$$

$$V^F=\frac{-\xi Rt}{\sqrt{12(1-\mu^2)}}(2\beta H-1)=-\frac{\xi H^2}{2}\frac{1}{(\beta H)^2}(2\beta H-1) \quad (36)$$

当承受部分內压力时，可將式(33)及(34)中的 H 改为 $(H-d)$。

以上公式給出了当圓筒底脚絕对不能移动和轉动时、在筒底所发生的 V 及 M 值。由結構学观点而言，这就相当于定端力矩及定端剪力。

如果底板相当厚，則圓筒的应力和固定端情况已很接近；一般倘有一些变动，將此变化之值記为 M' 及 V'，則在底部之力矩和剪力为

$$\left.\begin{aligned} M_0&=M^F+M' \\ V_0&=V^F+V' \end{aligned}\right\} \quad (37)$$

由筒底向上計，在 x 处的力矩、剪力、坡度和变位各为❶

$$M_x=M_0\phi(\beta x)+\frac{V_0}{\beta}\zeta(\beta x) \quad (38)$$

$$V_x=-2\beta M_0\zeta(\beta x)+V_0\psi(\beta x) \quad (39)$$

$$\frac{dy}{dx}=-\frac{w}{K}+\frac{1}{2\beta^2 D}[2\beta M_0\theta(\beta x)+V_0\psi(\beta x)] \quad (40)$$

$$y=+\frac{p}{K}-\frac{1}{2\beta^3 D}[\beta M_0\psi(\beta x)+V_0\theta(\beta x)] \quad (41)$$

式中 $\phi(\beta x)$、$\zeta(\beta x)$、$\psi(\beta x)$及$\theta(\beta x)$各为βx的函数，其定义为

$$\phi(\beta x)=e^{-\beta x}(\cos\beta x+\sin\beta x) \quad (42)$$

$$\zeta(\beta x)=e^{-\beta x}\sin\beta x \quad (43)$$

$$\psi(\beta x)=e^{-\beta x}(\cos\beta x-\sin\beta x) \quad (44)$$

$$\theta(\beta x)=e^{-\beta x}\cos\beta x \quad (45)$$

附表一中列有上述四个函数之值。

求出圓筒上各点的变位 y 后，相应的箍应力可由下式求出

❶ 参考文献(2)

附表 1 ϕ、ψ、θ及ζ函数表

βx	ϕ	ψ	θ	ζ
0	1.0000	1.0000	1.0000	0
0.1	0.9907	0.8100	0.9003	0.0903
0.2	0.9651	0.6398	0.8024	0.1627
0.3	0.9267	0.4888	0.7077	0.2189
0.4	0.8784	0.3564	0.6174	0.2610
0.5	0.8231	0.2415	0.5323	0.2908
0.6	0.7628	0.1431	0.4530	0.3099
0.7	0.6997	0.0599	0.3798	0.3199
0.8	0.6354	−0.0093	0.3131	0.3223
0.9	0.5712	−0.0657	0.2527	0.3185
1.0	0.5083	−0.1108	0.1988	0.3096
1.1	0.4476	−0.1457	0.1510	0.2967
1.2	0.3899	−0.1716	0.1091	0.2807
1.3	0.3355	−0.1897	0.0729	0.2626
1.4	0.2849	−0.2011	0.0419	0.2430
1.5	0.2384	−0.2068	0.0158	0.2226
1.6	0.1959	−0.2077	−0.0059	0.2018
1.7	0.1576	−0.2047	−0.0235	0.1812
1.8	0.1234	−0.1985	−0.0376	0.1610
1.9	1.0932	−0.1899	−0.0484	0.1415
2.0	0.0667	−0.1794	−0.0563	0.1230
2.1	0.0439	−0.1675	−0.0618	0.1057
2.2	0.0244	−0.1548	−0.0652	0.0895
2.3	0.0080	−0.1416	−0.0668	0.0748
2.4	−0.0056	−0.1262	−0.0669	0.0613
2.5	−0.0166	−0.1149	−0.0658	0.0492
2.6	−0.0254	−0.1019	−0.0636	0.0383
2.7	−0.0320	−0.0895	−0.0608	0.0287
2.8	−0.0369	−0.0777	−0.0573	0.0204
2.9	−0.0403	−0.0666	−0.0534	0.0132
3.0	−0.0423	−0.0563	−0.0493	0.0071
3.1	−0.0431	−0.0469	−0.0450	0.0019
3.2	−0.0431	−0.0383	−0.0407	−0.0024
3.3	−0.0422	−0.0306	−0.0364	−0.0058
3.4	−0.0408	−0.0237	−0.0323	−0.0085
3.5	−0.0369	−0.0177	−0.0283	−0.0106

（續）

βx	ϕ	ψ	θ	ζ
3.6	−0.0366	−0.0124	−0.0245	−0.0121
3.7	−0.0341	−0.0079	−0.0210	−0.0131
3.8	−0.0314	−0.0040	−0.0177	−0.0137
3.9	−0.0286	−0.0008	−0.0147	−0.0140
4.0	−0.0258	0.0019	−0.0120	−0.0139
4.1	−0.0231	0.0040	−0.0095	−0.0136
4.2	−0.0204	0.0057	−0.0074	−0.0131
4.3	−0.0179	0.0070	−0.0054	−0.0125
4.4	−0.0155	0.0079	−0.0038	−0.0117
4.5	−0.0132	0.0085	−0.0023	−0.0108
4.6	−0.0111	0.0089	−0.0011	−0.0100
4.7	−0.0092	0.0090	0.0001	−0.0091
4.8	−0.0075	0.0089	0.0007	−0.0082
4.9	−0.0059	0.0087	0.0014	−0.0073
5.0	−0.0046	0.0084	0.0019	−0.0065
5.1	−0.0033	0.0080	0.0023	−0.0057
5.2	−0.0023	0.0075	0.0026	−0.0049
5.3	−0.0014	0.0069	0.0028	−0.0042
5.4	−0.0006	0.0064	0.0029	−0.0035
5.5	0.0000	0.0058	0.0029	−0.0027
5.6	0.0005	0.0052	0.0029	−0.0023
5.7	0.0010	0.0046	0.0028	−0.0018
5.8	0.0013	0.0041	0.0027	−0.0014
5.9	0.0015	0.0036	0.0026	−0.0010
6.0	0.0017	0.0031	0.0024	−0.0007
6.1	0.0018	0.0026	0.0022	−0.0004
6.2	0.0019	0.0022	0.0020	−0.0002
6.3	0.0019	0.0018	0.0018	+0.0001
6.4	0.0018	0.0015	0.0017	0.0003
6.5	0.0018	0.0012	0.0015	0.0004
6.6	0.0017	0.0009	0.0013	0.0005
6.7	0.0016	0.0006	0.0011	0.0006
6.8	0.0015	0.0004	0.0010	0.0006
6.9	0.0014	0.0002	0.0008	0.0006
7.0	0.0013	0.0001	0.0007	

$$T=+\frac{Et}{R}\cdot y \tag{46}$$

因此，計算无限長襯砌的应力步驟为：(1)用式(33)～(34)計算圓筒底部的定端力矩及剪力；(2)与底板联合分析，确定圓筒底的端力矩及剪力(詳后)；(3)用式(38)、(39)、(40)、(41)、(46)計算沿筒身各点的力矩剪力、坡度、变位和箍应力。为了簡化这些計算工作，下面供給了一些实用数表。

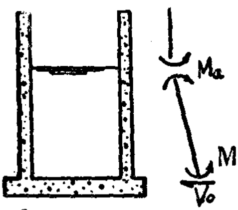

图 5

当圓筒承受部分內水压力时(图5)，在水面处弹性曲綫有不連續的地方，必須另加校正应力。若將圓筒在水面处切开，分別处理，則在上下两段間有一折角

$$\theta=-\frac{w}{K} \tag{47}$$

要取消此角，应在該处增加力矩 M_a 及剪力 V_a，其值为

$$M_a=-\beta D\theta=\frac{+w\beta D}{K} \tag{48}$$

$$V_a=0 \tag{49}$$

因此，在計算圓筒应力时，須在水面处分开計算，上面一段承受边界力矩 M_a 作用，下面一段承受水压力及边界力矩 M_a、M_o、及 V_0 作用，分別用式(38)至(46)計算中間各点的各項应力和形变。

倘水面很低时（即 $H-d$ 甚小），則下面一段已不能再視为无限長圓筒来分析，但在这种情况下，內水压力的影响常可忽略。若要进行較精确計算，可以用第三章中的公式。

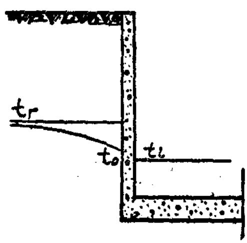

图 6

圓筒承受溫度变化所引起的应力，和隧洞很相象，首先我們要决定沿剖面上的溫度变化曲綫：在圓筒內为 t_i（水溫），筒外为 t_0，岩石稳定溫度为 t_r，圓筒的平均

温度为$\frac{t_i+t_0}{2}$。岩石受到筒水低温影响有向外收縮趋势，而混凝土筒在受到温度影响（澆搗时或灌漿时温度和最低温度$\frac{t_i+t_0}{2}$之差）时，也有向內收縮影响，这使其間发生相对拉力（这其中，当然还应該减去混凝土在水中膨脹的成分，可參考水工隧洞計算一書），于是，温度应力最后可以化成作用在圓筒外圈上的均匀拉力看待。其应力計算很簡單：首先假定圓筒底能自由变位，計算因温度影响混凝土筒和岩壁間將发生的脫开值y，因圓筒底和底板固結在一起，不能自由收縮，故上述变位值不能发生，因此而引起的力矩及剪力可用式(31)及(32)計算。

此外圓筒內外两面温度不同，也会在筒內引起应力，这可用堤壩的温度控制計算一書中所述的方法进行計算，主要的困难倒不在应力的計算，而在如何肯定t_0和t_i值，一般混凝土筒身是較薄的，故为近似計，就取$t_0=t_i=$水温，这样两面温差引起的温度应力就不存在了。

玆举一个圓筒計算的例子如次。設某大井襯砌，$R=10$公尺，高度$H=30$公尺，厚度$t=1$公尺，$E=2{,}000{,}000$公吨/平方公尺，$\mu=0.25$，$k=200{,}000$公吨/平方公尺，当內部充滿水时，試求其抗撓勁度和固定力矩。

$$D=\frac{1}{12}\cdot\frac{1}{1-\mu^2}\cdot Et^3=\frac{1}{12}\cdot\frac{16}{15}\cdot 2{,}000{,}000\times 1^3=$$

$$=177{,}770\ (\text{公吨-公尺})$$

$$\beta^4=\frac{Et+kR^2}{4R^2D}=\frac{2{,}000{,}000\times 1+200{,}000\times 100}{4\times 100\times 177{,}770}=0.3098$$

$$\beta=0.3098^{\frac{1}{4}}=0.745\ (\text{公尺}^{-1})$$

$\beta H=22.35$。（此值远大于π，故屬于長圓筒范疇）

抗撓勁度 $S_C=2\beta D=2\times 0.745\times 177{,}770=$

$$=265{,}000\ (\text{公吨公尺/公尺})$$