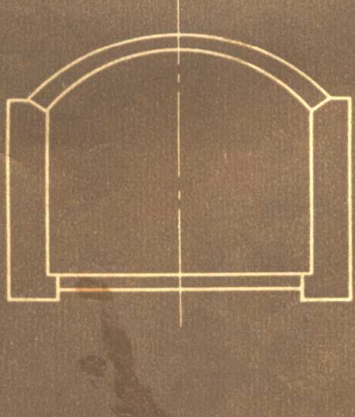
地下结构物衬砌计算

魏　琏著



人民铁道出版社

地下結构物衬砌計算

魏 璉 著

人民鉄道出版社
1965年·北京

本书对具有直牆衬砌的地下结构物的衬砌计算方法和理论，进行了较系统的研究和推算。书中既介绍了苏联学者C·H·纳乌莫夫、C·C·达维多夫等人有关这方面的理论和计算方法，又包括了著者在其基础上的推导和实践的经验。可供研究和改进地下结构衬砌计算方法参考。

本书可供从事铁路、公路、采矿以及其他地下建筑工作的工程技术人员工作参考。

地下結构物衬砌計算

魏 璉 著

人民鉄道出版社出版

（北京市霞公府甲24号）

北京市书刊出版业营业許可証出字第010号

新华书店北京发行所发行

各地新华书店經售

人民鉄道出版社印刷厂印

书号1757 开本787×1092 $\frac{1}{32}$ 印张9 $\frac{5}{16}$ 字数215千

1961年2月第1版

1965年11月第1版第3次印刷

印数1,750册〔累〕8,280册 定价（科六）1.20元

前　言

在我国交通运輸、水电以及采矿采煤等規模宏偉的基本建設事业中，各种类型的地下結构日見增多。因而研究地下結构襯砌之計算理論以获得完美而經济之設計，是有实用意义的。

本書研究地下結构直墙襯砌之計算理論，計十四章。其中第一章襯砌拱之計算，汇集了在地层压力、襯砌自重以及地震荷載等作用下抛物綫拱及圓拱（包括等截面及变截面）計算所必須之全部公式。前者以苏联学者 C·C· 达維多夫（Давыдов）推导之公式为准；后者則以著者推导之公式为准[1]。第二章襯砌之側墙計算系以文克尔假定为基础，对有关公式作了詳尽推演，以便讀者了解其来源，俾在設計时得以灵活应用。此外，在此章中并提供了确定側墙截面最大力矩的方法。

第三章提供了襯砌圓拱自重应力的准确計算方法，著者认为其結果既正确而計算亦簡捷，建議采用之，以代替現用的各种近似計算方法。

苏联学者 C·H· 納烏莫夫（Наумов）在其所著“鉄路隧道”一書中，提出了对称式单层单跨直墙襯砌的計算方法，本書第四章推导了該法中主要計算公式的来源，并将此法推广可用于（1）側墙受荷載时；（2）阶形側墙；（3）不对称荷載作用下之分析（側墙不对称时亦可应用）。

[1] 見魏璉著“超靜定圓拱分析”。科学技术出版社，1958。

第五章闡述了用“跨变剛构法”計算直墻襯砌的原理与具体应用，此法系将襯砌視为一种“跨变剛构”处理。因而对較复杂型式的直墻襯砌特别适用。例如第六章中，著者即将此法推广用于計算多层单間及多层多間之直墻襯砌，达到了簡化計算的目的。对于多层之地下結构直墻襯砌之計算，倘将楼层視为不存在而套用单层单間襯砌的分析法，或甚而竟套用朱布二氏之馬蹄形襯砌計算法，則此种計算将极不合理实属显而易見。

第七章研究了直墻襯砌拱部彈性抗力的計算問題，其中幷提供了著者建議的一种新計算方法。

大型块件装配式襯砌，是一种新型的装配式的地下結构物襯砌，在1958年大跃进的形势下，我国鉄道部試制成功单綫隧道的素混凝土大型块件装配式襯砌，这对加速施工进度，推行机械化施工，解除工人沉重的体力劳动，均具有重大意义。本書第八、第九两章，提供了此种型式襯砌的計算方法，可供实际設計之参考与采擇。

第十章系将納氏計算法中墻頂彈性变位公式与著者导得的墻頂調整彈性常数加以沟通与比較，这可有助于讀者进一步对二法的了解，在某些情況下幷可以收到簡化計算之功效。

第十一及十二两章提供了考虑彈性层厚度的剛性墻襯砌計算方法，此系将苏联 C·C· 达維多夫教授創議用于馬蹄形襯砌之計算理論加以推广而得。

第十三章闡述了直墻襯砌輪廓修正的計算方法，既可免除現有“繪图試凑法”的麻煩，提高設計工效，又可保証設計的質量。

第十四章闡述了阶形側墻的两种計算方法，对于地下式厂房、儲庫或电站，采用阶形側墻之襯砌可以应用。

综上所述，本书之阐述大体已包括直牆衬砌计算问题的各个方面。本书原计划分章刊出，少数章节并已在期刊上发表过。但鉴于目前有关地下结构衬砌计算理论之专著不多，而在实际工作中广大的读者则更需要比较系统的论述，因而将各章稍加整理使成一系统，并补充第一、二两章详细阐述单个衬砌拱及侧牆的计算，而成此书。

由于著者实际从事衬砌计算及研究的时间很少，因而本书之论述多系一孔之见，不妥之处，望国内专家及读者们指正。

目　　录

第一章　地下結構襯砌拱之計算

地下結构物之襯砌通常由上部拱和下部边墻及底板所构成(图 1 — 1)。上部拱为襯砌承重之重要构件，通常采用抛物綫拱或圓曲綫拱(后簡称圓拱)，用混凝土，有时亦用鋼筋混凝土或磚石砌体筑成，目前均按彈性体理論进行計算。襯砌拱通常承受下列荷載：

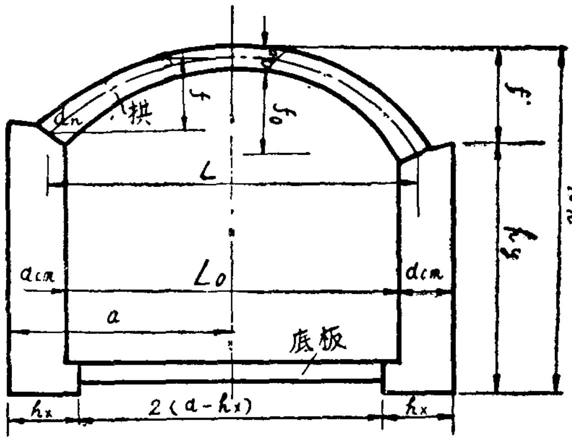


图　1—1

1. 地层压力，常为襯砌之主要荷載；
2. 襯砌拱之自重；
3. 其他特殊荷載，如灌浆压力，地震荷載，地表荷載作用之影响等，这些荷載在一般襯砌計算中常不予考慮；
4. 溫度变化及混凝土收縮影响。由于地下結构一般所受溫度变化之影响較小，加之截面厚度一般不很大，因此其

影响往往略去不計，但在較重要之地下結构，跨长及截面厚度均較大时，仍以核算为宜；

5. 由于岩层变形引起襯砌拱端（墻頂）变位产生拱內附加应力。将荷載及拱端变位影响引起之內力叠加，即为計算所需之襯砌拱之最終內力。

本文拟根据上述各种荷載列述拱变位之計算公式。計算采用彈性中心法，故所列公式均为彈心处之变位公式，且限于对称之拱形結构。为节省篇幅，各式来由一概从略，只列出計算公式結果及适用范圍，但指明有关文献以便讀者查閱。

§1-1 采用彈心法时拱之基本計算理論

图1—2示一对称拱BC，受有荷載，在拱頂截面切开并以刚性悬臂連接至彈性中心，彈心处作用有未知內力M_o（力

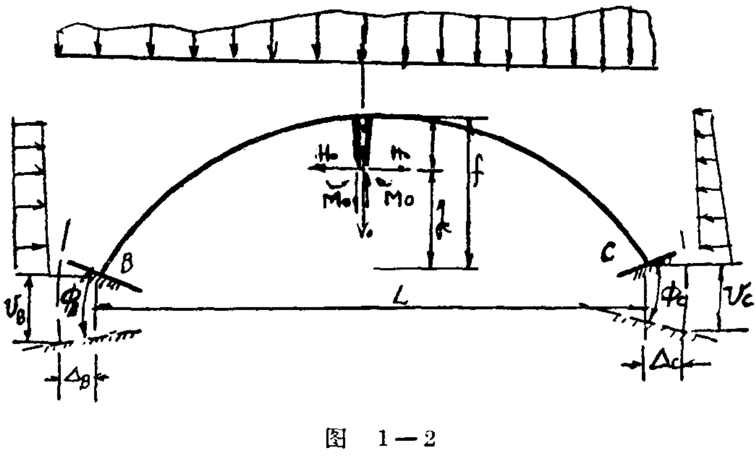


图 1—2

矩），H_o（水平推力）及V_o（切力）。設在荷載作用下拱左右两端各产生了角变 ϕ_B及ϕ_C （以向外旋轉为正），水平位移 Δ_B及Δ_C （以向外者为正）以及垂直位移v_B及v_C（均以

向下者为正），則由彈性中心法理論，知拱彈心处內力可以用下式計算：

$$
\left.\begin{aligned}
M_o &= -\frac{\Delta_{1p}}{\delta_{11}} - \frac{\phi_B+\phi_C}{\delta_{11}} = M_o^F - \frac{\phi_B+\phi_C}{\delta_{11}} \\
H_o &= -\frac{\Delta_{2p}}{\delta_{22}} - \frac{(\phi_B+\phi_C)y_c}{\delta_{22}} - \frac{\Delta_B+\Delta_C}{\delta_{22}} = \\
&= H_o^F - \frac{(\phi_B+\phi_C)y_c}{\delta_{22}} - \frac{\Delta_B+\Delta_C}{\delta_{22}} \\
V_o &= -\frac{\Delta_{3p}}{\delta_{33}} - \frac{v_B-v_C}{\delta_{33}} + \frac{(\phi_B-\phi_C)\frac{L}{2}}{\delta_{33}} \\
&= V_o^F - \frac{v_B-v_C}{\delta_{33}} + \frac{(\phi_B-\phi_C)\frac{L}{2}}{\delta_{33}}
\end{aligned}\right\} \qquad (1)
$$

在以上各式中：

Δ_{1p}，Δ_{2p}，Δ_{3p}——彈心处的三个載变位(角变，水平位移，垂向位移），系由拱上荷載及溫度变化等外部影响所引起，其計算公式将于第四节內列出。

δ_{11}，δ_{22}，δ_{33}——彈心处的三个单位变位（角变，水平位移，垂向位移），各系由彈心处作用单位力矩（$M_o=1$），或单位水平推力($H_o=1$)或单位切力（$V_o=1$）所生之变位，其公式則将于第三节內列述。

ϕ_B，ϕ_C——拱左右端之角变，以向外旋轉者为正。

Δ_B，Δ_C——拱左右端之水平位移，以向外位移者为正。

v_B，v_C——拱左右端之垂向位移，均以向下者为正。

y_c——拱彈心至拱端之垂距($=f-c$, f 为拱計算矢高，c 为彈心之高度，均見图示)。

L——拱計算跨長。

$$\left.\begin{aligned} M_o^F &= -\frac{\Delta_{1p}}{\delta_{11}} \\ H_o^F &= -\frac{\Delta_{2p}}{\delta_{22}} \\ V_o^F &= -\frac{\Delta_{3p}}{\delta_{33}} \end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

M_o^F, H_o^F, V_o^F 各表示拱端固定(Fixed-end)，即拱端各項变位均为零时拱彈心处的力矩，水平推力与切力。

拱彈心处单位变位 δ_{11}，δ_{22}，δ_{33} 以及拱彈心位置 c, y_c 的算式均依不同曲綫的拱而异，将在下节列出其公式。

一般襯砌及所受荷載均为对称，假定两側岩层变形引起拱端变位亦相同，以上公式簡化如下：

$$\left.\begin{aligned} \phi_B &= \phi_C = \phi \\ \Delta_B &= \Delta_C = \Delta \\ v_B &= v_C \end{aligned}\right\} \qquad (3)$$

彈心处載变位 $\Delta_{3p}=0$，由此得：

$$\left.\begin{aligned} M_o &= -\frac{\Delta_{1p}}{\delta_{11}} - \frac{2\phi}{\delta_{11}} = M_o^F - \frac{2\phi}{\delta_{11}} \\ H_o &= -\frac{\Delta_{2p}}{\delta_{22}} - \frac{2\Delta}{\delta_{22}} - \frac{2\phi y_c}{\delta_{22}} = \\ &= H_o^F - \frac{2\phi y_c}{\delta_{22}} - \frac{2\Delta}{\delta_{22}} \end{aligned}\right\} \qquad (4)$$

$$V_o = 0$$

拱端 BC 及 CB 处的定端力矩及推力为：

$$\left.\begin{aligned}
M_{BC}^{F}&=M_o+H_oy_c-\frac{1}{2}V_oL+M_{PL}'\\
H_{BC}^{F}&=H_o+H_{PL}'\\
M_{CB}^{F}&=M_o+H_oy_c+\frac{1}{2}V_oL+M_{PR}'\\
H_{CB}^{F}&=H_o+H_{PR}'
\end{aligned}\right\}\qquad(5)$$

式中:

M_{PL}', M_{PR}'——各为左半拱及右半拱上荷載对左拱端或右拱端之力矩;

H_{PL}', H_{PR}'——各为左半拱及右半拱上水平荷載之总和。

拱端之垂直反力（以向上为正）:

$$\left.\begin{aligned}
V_{BC}^{F}&=V_o+V_{PL}'\\
V_{CB}^{F}&=-V_o+V_{PR}'
\end{aligned}\right\}\qquad(6)$$

式中:

V_{PL}', V_{PR}'——各为左半拱及右半拱之垂直荷載之总和。

当襯砌拱及所受荷載为对称，则彈心处切力 $V_o=0$，$M_{PL}'=M_{PR}'=M_P'$，$H_{PL}'=H_{PR}'=H_P'$，$V_{PL}'=V_{PR}'=V_P'$，以上公式相应簡化如下:

$$\left.\begin{aligned}
M_{BC}^{F}&=M_{CB}^{F}=M_o+H_oy_c+M_P'\\
H_{BC}^{F}&=H_{CB}^{F}=H_o+H_P'\\
V_{BC}^{F}&=V_{CB}^{F}=V_P'
\end{aligned}\right\}\qquad(7)$$

拱上任意截面 x 处所产生內力为（見图1—3）:

力矩:

$$M_x=M_o+H_o(y-c)\mp V_ox+M_{px}\qquad(8a)$$

軸压力:

$$N_x=(H_o+H_{px})\cos\phi_x+(\pm V_o+V_{px})\sin\phi_x\qquad(8b)$$

切力:

$$Q_x=\mp(H_o+H_{px})\sin\phi_x\pm(\pm V_o+V_{px})\cos\phi_x\qquad(8c)$$

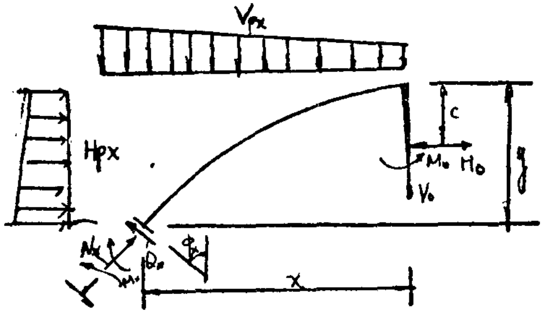


图 1—3

式中：

M_{px}，H_{px}，V_{px}——半拱上荷載对 x 截面处产生之力矩，水平力及垂直力；

ϕ_x——拱上 x 截面与垂綫之交角(見图1—3)；

x,y——x 截面的横座标与縱座标。

在公式（8）中，上边的符号指左半拱，下边的符号指右半拱（后同）。

当襯砌拱及所受荷載对称时，式（8）即簡化为：

$$\left.\begin{aligned} M_x &= M_o + H_o(y-c) + M_{px} \\ N_x &= (H_o + H_{px})\cos\phi_x + V_{px}\sin\phi_x \\ Q_x &= \mp(H_o + H_{px})\sin\phi_x \pm V_{px}\cos\phi_x \end{aligned}\right\} \qquad (9)$$

在采用以上公式計算单个之襯砌拱时，內力正負号規定如下：

1. 力矩：以使拱內緣受拉者为正。

2. 軸向力：以使拱軸压縮者为正。

3. 切力：对左边截面以向上为正，对右边截面以向下为正；反之均为負。

§ 1-2 襯砌拱单位变位計算公式

（一）拋物綫拱：

取座标軸如图1—4，拱頂为原点，令f，L各表示其矢高与跨长，則拱軸方程式可写为：

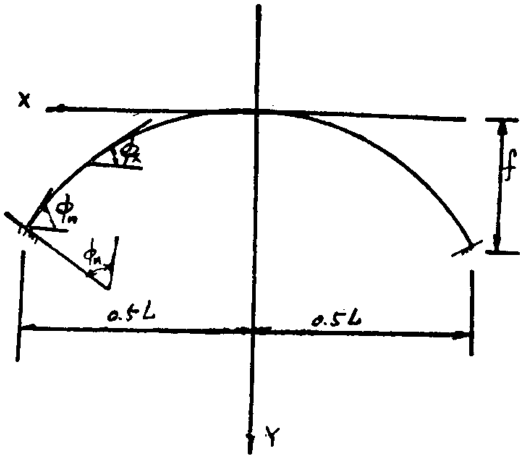


图 1—4

$$y = \frac{4f}{L^2} x^2 \tag{10}$$

任一点之斜率：

$$\left.\begin{aligned}
\tan\phi_x &= \frac{dy}{dx} = \frac{8f}{L^2} x \\
\phi_x &= \text{arc}\ \tan\left(\frac{8f}{L^2} x\right) \\
\cos\phi_x &= \frac{1}{\sqrt{1+\tan^2\phi_x}},\ \sin\phi_x = \frac{\tan\phi_x}{\sqrt{1+\tan^2\phi_x}}
\end{aligned}\right\} \tag{11}$$

在拱端截面，截面与垂綫之交角用ϕ_n表示，得：

$$\left.\begin{aligned}
&\tan\phi_n=\frac{8f}{L^2}\cdot\frac{L}{2}=\frac{4f}{L}\\
&\phi_n=\arctan\left(\frac{4f}{L}\right)\\
&\text{同理:}\\
&\cos\phi_n=\frac{1}{\sqrt{1+\tan^2\phi_n}},\ \sin\phi_n=\frac{\tan\phi_n}{\sqrt{1+\tan^2\phi_n}}
\end{aligned}\right\}\quad(12)$$

拱彈心位置:

$$\left.\begin{aligned}
&c=0.337f\ [1]\\
&y_c=f-c=0.663f
\end{aligned}\right\}\quad(13)$$

式中:

f ——拱矢高;

$$\left.\begin{aligned}
&\delta_{11}=\frac{L}{EI_o}\\
&\delta_{22}=0.08766f^2L\left[1+\beta_1\left(\frac{d_o}{f}\right)^2\right]\frac{1}{EI_o}\\
&\delta_{33}=\frac{L^3}{12EI_o}\left[1+\beta_2\left(\frac{d_o}{L}\right)^2\right]
\end{aligned}\right\}\quad(14)$$

式中，δ_{22}及δ_{33}均考慮了軸向力的影响，β_1,β_2 即为考慮軸向力影响的系数，各由下述公式及算表求算:

$$\left.\begin{aligned}
&\beta_1=0.954\frac{\arctan\left(\frac{4f}{L}\right)}{\left(\frac{4f}{L}\right)}\\
&\beta_2=1-\frac{\arctan\left(\frac{4f}{L}\right)}{\left(\frac{4f}{L}\right)}
\end{aligned}\right\}\quad(14a)$$

---

[1] 以下公式之推証，均見 С·С·Давыдсв 著“地下結构計算与設計”一書。〔2〕

d_o——拱頂截面厚度；

I_o——拱頂截面慣矩；

E——拱材彈性模量。

系数β_1及β_2随矢高比而变的值如下表所示。

系数值β_1及β_2

表 1-1

β \ f/l	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2.5}$	$\frac{1}{3.0}$	$\frac{1}{3.5}$	$\frac{1}{4.0}$	$\frac{1}{4.5}$	$\frac{1}{5.0}$
β_1	0.528	0.605	0.663	0.711	0.750	0.780	0.806
β_2	0.446	0.366	0.305	0.255	0.214	0.183	0.155

实用中因 δ_{33} 項內之軸向力影响很小，亦可略去不計，而在 δ_{22} 項內之軸向力影响稍大些，且拱水平推力之計算要求精度較高，可酌予計入。如不計軸向力的影响，則彈心处单位变位的計算公式可簡化成如下形式：

$$\left.\begin{aligned}\delta_{11}&=\frac{1}{EI}L\\ \delta_{22}&=0.08766f^2L\frac{1}{EI}\\ \delta_{33}&=\frac{1}{12EI}L^3\end{aligned}\right\}\qquad(15)$$

（二）圓拱[1]：

取座标軸如图1—5，拱頂为原点，令f、L各表示圓拱之矢高与跨长，則拱軸方程式可写为：

$$x^2+y^2=2ry \qquad (16)$$

[1] 本节公式之推导均見魏璉著“超靜定圓拱分析”一書，上海科学技术出版社，1958年。〔10〕

或表为参数方程（見图4）：

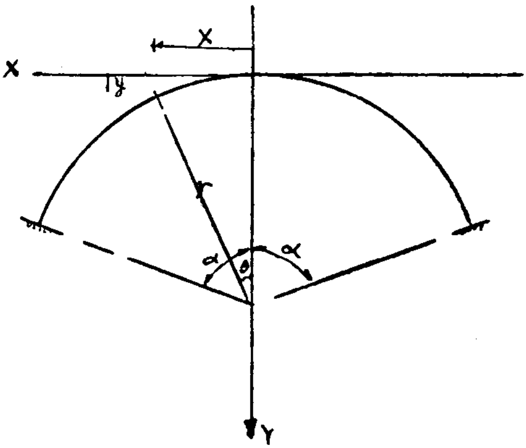


图 1—5

$$\begin{cases} x = r\sin\theta \\ y = r(1-\cos\theta) \end{cases} \tag{17}$$

式中：

r——圓拱半徑；

x, y——圓拱上任一点的横座标与縦座标；

θ——圓拱上任一点与圓心联綫与垂綫形成的交角。

圓拱半徑 r 可由下式計算：

$$r = 0.5\left(R + \frac{0.25}{R}\right)L \tag{18}$$

式中：

R——矢高比$\left(=\frac{f}{L}\right)$。

圓拱的半圓心角 α 由下式計算：

$$\sin\alpha = \frac{L}{2r}$$