

引水隧洞进水口结构设计

葛秀洁

(水电部成都勘测设计院)

提要

本文结合南垭河Ⅲ级水电站引水隧洞进水口的结构设计, 简要介绍特种型式进水口结构设计中的理论假定及计算方法。

一、引言

引水隧洞进水口, 往往因地质条件不好, 成洞困难, 需要对山坡进行明挖, 再浇筑混凝土形成进水口。因此其两侧导墙刚度很大, 而胸墙顶板刚度则较小, 结构极不对称。

导墙受载后, 基础面上产生一定的反力而发生相应的变位, 这种基础变位, 很难进行精确计算。笔者在南垭河Ⅲ级水电站引水隧洞进水口结构设计中, 参考有关专家论著, 视搁置建筑物的厚层花岗岩地基基础为半无限弹性平面体; 假定两侧导墙为刚体, 斜卧在此弹性基础上, 受力后仍保持平面。运用伏格特 (F·Vogt) 公式计算导墙变位, 按照横杆与导墙联合作用下的变形相容条件, 推导出公式, 然后解得横杆与导墙联合作用时的基础水平变位 Δx , 竖向变位 Δy 及角变位 ϕ , 进而计算出结构各截面的应力值。

本计算方法, 理论明确, 计算简便。用 PC-1500 袖珍机进行计算, 效果很好。

二、引水隧洞进水口简况

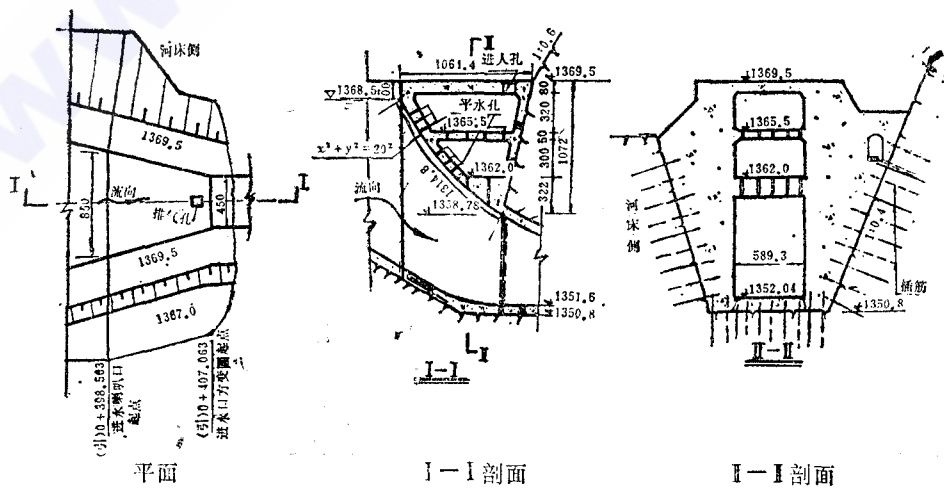


图 1

为使水流平顺地进入隧洞，有压隧洞进水口的胸墙，一般都较高大，弧面较长。

本工程进水口埋藏较深，洞径较大。胸墙设计成三层，空腹式胸墙，进水喇叭口及隧洞渐变段顶部曲线方程为：

$$x^2 + y^2 = 20^2$$

弧面长 13.15 m，顶部弧口宽 8.5 m，底部弧口宽 4.5 m，弧面高为 10.72m，胸墙两侧镶嵌在进水口边墙内。

结构布置及有关尺寸见图 1。

三、计算理论

进水口段长 8.5 m，计算典型剖面如 II—II。该型断面抵抗导墙向外侧的滑动是安全的，同时胸墙框架对两侧导墙起支撑作用，故也不可能向内侧倾倒，因而此段不存在结构稳定问题。计算的目的在于确定联杆内力及基础反力。

因导墙地基基础均一，结构型式及荷载大致对称，为简化计算，左右导墙按对称结构处理。

(一) 计算假定

1. 两侧导墙刚度很大，视导墙为弹性地基上的刚体。导墙受载变形后，基础仍保持为平面，且水平基础及斜坡基础具有相同的角变位。基础变形参照拱坝基础变位理论，按 F. Vogt 公式计算。

2. 按变形相容条件与两侧导墙变位一致的理论求解横向联杆内力。由于结构型式及荷载大致相对称，因此，横向联杆不考虑剪力。

3. 底板与两侧导墙设结构缝，因此不计水重对导墙基础的影响。

(二) 建立方程式

1. 平衡方程式 为求联杆内力及基础反力，建立平衡方程式（见图 2）。

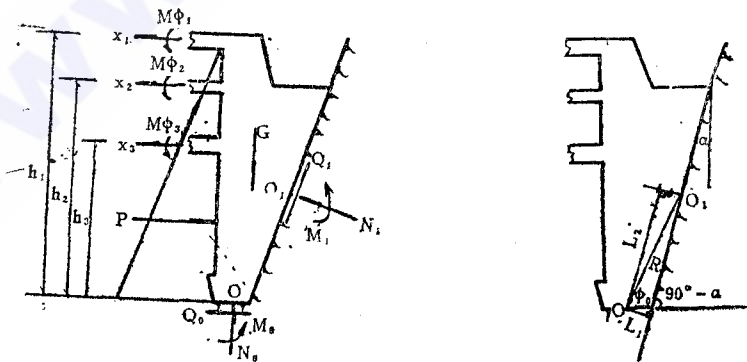


图 2

$$\sum x = 0 \quad \sum y = 0 \quad \sum M = 0$$

$$\begin{cases} x_1 + x_2 + x_3 - \Sigma P + Q_0 + N_1 \cos \alpha - Q_1 \sin \alpha = 0 \\ N_0 + N_1 \sin \alpha + Q_1 \cos \alpha - \Sigma G = 0 \\ M_0 + M_1 + N_1 L_2 + Q_1 L_1 + M_{x_1} + M_{x_2} + M_{x_3} + M_{\phi_1} + M_{\phi_2} + M_{\phi_3} - \Sigma M_P = 0 \end{cases} \quad (1)$$

方程式中有 12 个未知数, Q_0 、 N_0 、 M_0 (水平基础反力); Q_1 、 N_1 、 M_1 (斜坡基础反力), x_1 、 x_2 、 x_3 (由导墙受荷后的水平变位而使联杆产生的水平拉力); M_{ϕ_1} 、 M_{ϕ_2} 、 M_{ϕ_3} (由导墙受荷后的角变位而使联杆产生的弯矩)。因将导墙视为刚体, 受力后仍保持平面, 故两基础面的变位是相关的。根据 F·Vogt 公式, 反力可以用变位来表示, 实际未知数是基础 0 点的三个位移分量: Δx 、 Δy 、 ϕ 。以此三变位做基本未知数来表达联杆内力和基础反力, 代入平衡方程式解出变位值, 最后用变位值计算联杆内力及基础反力。

2. 两侧导墙应变方程式

(1) 水平基础上的变位表达式

$$\begin{cases} \Delta x = Q_0 \gamma_0' + M_0 \alpha_0'' & \text{(水平变位)} \\ \Delta y = N_0 \beta_0' & \text{(垂直变位)} \\ \phi = M_0 \alpha_0' + Q_0 \gamma_0'' & \text{(角变位)} \end{cases} \quad (2)$$

水平基础反力根据位移表达式 (2) 推出

$$\begin{cases} M_0 = (\Delta x \gamma_0'' - \phi \gamma_0') / (\alpha_0'' \gamma_0'' - \alpha_0' \gamma_0') \\ Q_0 = (\Delta x \alpha_0' - \phi \alpha_0'') / (\gamma_0' \alpha_0' - \gamma_0'' \alpha_0'') \\ N_0 = \Delta y / \beta_0' \end{cases} \quad (3)$$

(2) 斜坡基础上的变位表达式为

$$\begin{cases} \Delta T = Q_1 \gamma_1' - M_1 \alpha_1'' & \text{(切向变位)} \\ \Delta \gamma = N_1 \beta_1' & \text{(径向变位)} \\ \phi = M_1 \alpha_1' - Q_1 \gamma_1'' & \text{(角变位)} \end{cases} \quad (4)$$

斜坡基础反力根据位移表达式 (4) 推出

$$\begin{cases} M_1 = (\Delta T \gamma_1'' + \phi \gamma_1') / (\gamma_1' \alpha_1' - \alpha_1'' \gamma_1'') \\ Q_1 = (\Delta T \alpha_1' + \phi \alpha_1'') / (\gamma_1' \alpha_1' - \alpha_1'' \gamma_1'') \\ N_1 = \Delta \gamma / \beta_1' \end{cases} \quad (5)$$

式中 α' 、 α'' ——单位力矩在单宽上产生之角变位;

β' ——单位压力在单宽上产生之径向变位;

γ' 、 γ'' ——单位剪力在单宽上产生之切向变位。

上述单宽上的单位荷载变位, 可利用基岩的泊桑比及基础的长宽比值查 F·Vogt 曲线得各系数值, 再代入计算式求得。

按假定, 视导墙为刚体, 两基础面的变位是相关的, 故从两基础面上的位移几何关系推出斜坡基础的径向及切向变位公式:

$$\Delta Y = (\Delta x + \phi \cdot R \cdot \sin \phi_0) \cos \alpha + (\Delta y + \phi \cdot R \cdot \cos \phi_0) \sin \alpha \quad (6)$$

$$\Delta T = (\Delta y + \phi \cdot R \cdot \cos \phi_0) \cos \alpha - (\Delta x + \phi \cdot R \cdot \sin \phi_0) \sin \alpha$$

式中 R 、 ϕ_0 、 α 意义见图 2 (b)。

3. 联杆受力后应变方程式

按前假定，联接两侧导墙的三根联杆，由于结构型式大致相对称，故当导墙发生垂直变位时，联杆不产生内力。按照变形相容条件，在水平位移及角位移作用下，推出联杆的应变计算公式：

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta x + \phi h_i}{L/2} \quad (7)$$

(1) 由水平位移产生的联杆轴向力 x_i 为：

$$x_i = E_B \cdot F_i \cdot \varepsilon_i \quad (8)$$

式中 E_B —— 混凝土弹性模量；

F_i —— 联杆单宽截面积；

Δx —— 导墙水平位移；

ϕ —— 导墙角变位；

h_i —— 联杆中心线与水平建基面高差；

L —— 联杆长度。

(2) 由墙基础角变位引起联杆弯矩 $M_{\phi i}$ 为

$$M_{\phi i} = 2 \cdot E_B \cdot I_i \cdot \phi / L \quad (9)$$

式中 I_i —— 联杆断面惯性矩。

4. 解联立方程

将以上计算的 12 个未知量及外荷，代入平衡方程式 1 中，解出水平基础的 Δx 、 Δy 、 ϕ ，再分别代入公式 3、5、8、9 中，解出两基础面的弯矩、剪力、轴力及三个联杆的弯矩和轴力，最后利用偏心受压公式求出两基础面的地基应力。

四、计算实例

1. 结构布置及尺寸见图 1

2. 主要岩石物理力学指标

岩石	泊桑比	允许承载力	摩擦系数	凝聚力	变形模量	稳定边坡
花岗岩	$\mu = 0.25$	$[\sigma] = 2 \text{ MPa}$	$\tan \varphi = 0.6$	$C = 0$	$E_F = 5000 \text{ MPa}$	1:0.5

3. 荷载组合

运行期荷载组合为自重 + 内水压力 (因胸墙框架板均布平水孔，所以水位计到

1368.5 m高程) + 基础变位传来的内力。不计温度应力; 枢纽设沉沙池无泥沙压力; 底板与导墙脱离且墙体布有插筋(图 1 中 II—II 剖面), 不计扬压力。

4. 材料

混凝土150° $E_B = 23000 \text{MPa}$

5. 主要计算步骤

(1) 求两基础面单位荷载变位值

水平基础面的单位荷载变位系数:

$$\alpha_0' = 1.275/E_F; \beta_0' = 1.6/E_F; \gamma_0' = 1.8/E_F; \alpha_0'' = \gamma_0'' = 0.22/E_F$$

斜坡基础面的单位荷载变位系数:

$$\alpha_1' = 0.0086573/E_F; \beta_1' = 0.55/E_F$$

$$\gamma_1' = 0.63/E_F; \alpha_1'' = \gamma_1'' = 0.0087073/E_F$$

(2) 求两基础面的基础反力

水平基础面反力

$$M_0 = E_F(0.80121072\phi - 0.0989149\Delta x)$$

$$Q_0 = E_F(0.5675\Delta x - 0.0979\phi)$$

$$N_0 = E_F \cdot 0.625\Delta y$$

斜坡基础面反力

$$M_1 = E_F \cdot (1.5506945\Delta y - 0.4652028\Delta x + 118.6881542\phi)$$

$$Q_1 = E_F \cdot (1.5417882\Delta y - 0.4625253\Delta x + 3.1608314\phi)$$

$$N_1 = E_F \cdot (1.7415031\Delta x + 0.5224482\Delta y + 18.2709964\phi)$$

(3) 求出三个联杆的水平轴力及由基础角变位引起的弯矩和轴力对基础产生的弯矩:

由上至下命杆件序号为 1、2、3, 则力臂 $h_1 = 18.3\text{m}$; $h_2 = 14.45\text{m}$,
 $h_3 = 10.6355\text{m}$; $L/2 = 2.947\text{m}$; 各杆截面积 $F_1 = 0.8\text{m}^2$; $F_2 = 0.5\text{m}^2$;
 $F_3 = 1.071\text{m}^2$ 。

解出三联杆总水平拉力:

$$\begin{aligned} \Sigma x &= x_1 + x_2 + x_3 = E_B (F_1 \cdot \varepsilon_1 + F_2 \cdot \varepsilon_2 + F_3 \cdot \varepsilon_3) \\ &= (13.6772978\Delta x + 191.8376478\phi) \times 10^5 \end{aligned}$$

其中各杆水平拉力

$$x_1 = (4.5148622\Delta x + 84.4519853\phi) \times 10^5$$

$$x_2 = (2.3842889\Delta x + 41.6779778\phi) \times 10^5$$

$$x_3 = (6.1781467\Delta x + 65.7076847\phi) \times 10^5$$

解出三联杆总弯矩:

$$\begin{aligned} \Sigma M_\phi &= M_{\phi 1} + M_{\phi 2} + M_{\phi 3} = 2 \cdot E_B \cdot [(I_1 + I_2 + I_3) / L] \cdot \phi \\ &= 0.8969563\phi \times 10^5 \end{aligned}$$

其中各杆由角变位引起的弯矩:

$$M_{\phi 1} = 0.2463183\phi \times 10^5$$

$$M_{\phi_2} = 0.0600913\phi \times 10^5$$

$$M_{\phi_3} = 0.5905467\phi \times 10^5$$

$$\Sigma M_x = M_{x_1} + M_{x_2} + M_{x_3} = x_1 \cdot h_1 + x_2 \cdot h_2 + x_3 \cdot h_3$$

$$= (191.8376321\Delta x + 2846.5521908\phi) \times 10^5$$

其中各杆水平轴力对 0 点弯矩:

$$M_{x_1} = (84.4519783\Delta x + 1545.471331\phi) \times 10^5$$

$$M_{x_2} = (41.677946\Delta x + 602.2467792\phi) \times 10^5$$

$$M_{x_3} = (65.7076792\Delta x + 698.8340806\phi) \times 10^5$$

(4) 代入平衡方程, 得导墙与联杆共同作用的三元一次方程组:

$$25.5196138\Delta x + 0.286937\Delta y + 274.3091198\phi = 1.354658 \times 10^{-3}$$

$$0.2869785\Delta x + 11.259448\Delta y + 41.388178\phi = 2.324095 \times 10^{-3}$$

$$274.3040151\Delta x + 41.387785\Delta y + 4393.0623871\phi = 12.310565 \times 10^{-3}$$

(5) 解联立方程

$$\Delta x = 0.15\text{mm} \text{ (墙基向河床侧水平位移值)}$$

$$\Delta y = 0.25\text{mm} \text{ (墙体垂直下沉位移值)}$$

$$\phi = -0.00769 \times 10^{-3} \text{ (墙体逆时针方向转角, 说明墙顶向渠内倾斜)}$$

(6) 两基础面地基应力分析

水平基础

$$\sigma_{0\max} = 510\text{kPa} < [\sigma]$$

$$\sigma_{0\min} = 220\text{kPa}$$

斜坡面基础

$$\sigma_{1\max} = 103\text{kPa} < [\sigma]$$

$$\sigma_{1\min} = 10\text{kPa}$$

(7) 三联杆内力

$$x_1 = -36\text{kN} \quad (\text{压})$$

$$x_2 = 63\text{kN} \quad (\text{拉})$$

$$x_3 = 316\text{kN} \quad (\text{拉})$$

$$M_1 = -661\text{kN}\cdot\text{m} \quad \curvearrowright$$

$$M_2 = 910\text{kN}\cdot\text{m} \quad \curvearrowleft$$

$$M_3 = 3.355\text{MN}\cdot\text{m} \quad \curvearrowleft$$

根据以上各联杆内力值进行胸墙结构配筋。

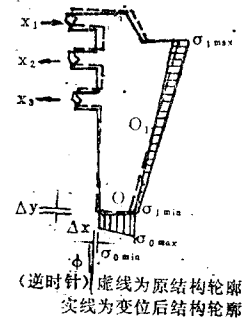


图 3

五、结束语

本进水口的结构设计, 较完整的反映了其结构应力状况, 理论是明确的, 计算方法是可行的, 可为今后在地质条件差的岩基经大明挖后, 建特种型式进水口的设计提供参考依据。

(下转 31 页)

