

不过水围堰 隧洞导流方案优化计算

张文友

(河北省水利水电勘测设计研究院 天津 300250)

摘 要 在不过水围堰隧洞导流施工中,选择几条、多大直径的隧洞和哪种类型、多高的围堰其施工费用最省是设计者首先关心的问题。本文在以往工作经验的基础上拟通过优化计算(忽略次要因素)较迅速地获得近似的理论最优解,从而大大减少了计算工作量。

关键词 围堰 导流隧洞 优化计算

1 建立目标函数

1.1 导流隧洞

中间楔体的体积也可作适当修正,该体计算公式将由“ $1/2ah_0L$ ”变为“ $1/6h_0L(2a+a')$ ”其修正值为:

$$1/2ah_0L - 1/6h_0L(2a+a') = 1/6h_0L(a-a')$$

即在原计算结果的基础上再减去该修正值就得到所求实际体积。

通过以上分析推导可知,利用积分法和形体分离法均可求得准确的体积值。但积分需建立函数关系,当 $m_1 \neq m_2, a \neq a'$ 时,建立函数关系比较复杂,且计算过程相对有一定的难度,形体分离法虽直观明了,实际用起来却又较繁琐。而简化公式计算简捷方便,省时省力,虽然计算结果与实际数值相差较大,但其差值已被我们通过分析印证确定下来,并且极易求出。因此在实际计算中,我们采取利用简化公式计算,进而根据具体情况对计算结果进行修正的做法,既简便快捷,又能达到确保计算结果准确无误的目的。

关于河道蓄水量的计算,往往会更多地遇到另一种情况,为了充分利用河道多蓄水,上游闸并不建在下游闸回水高度为零处,而上游闸下具有一定的蓄水深度,此时下游闸所蓄水的体积如图6所示。下游闸上水深为 h_0 ,上游闸下

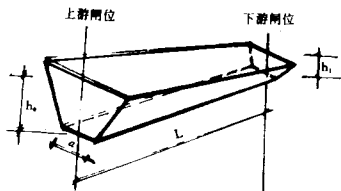


图6

对于坝址处为V型河谷或有条件采用隧洞导流的水利水电工程,设计要求在坝址上游

水深为 h_1 ,两闸相距为 L 。此时水体呈现的形体与以上我们讨论的形体并非相同。对此,可通过形体分离找出他们的共同点,进而将其归纳入上述类型。其分离情况见图7。将上游断面 h, g 两点分别平行于河底纵坡向下游断面连线至 c, d ,并连结 c, d ,则平面 $cdhg$ 将原水体分离为两部分。平面以下

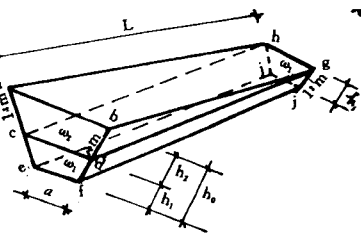


图7

为一梯形柱,其体积为 $V_1 = w_1L$;平面以上部分则正是我们以上所讨论的形体。该部分的体积为:

$$V_2 = 1/2w_2L - 1/6mh_2^2L$$

蓄水体的全部体积为:

$$V = V_1 + V_2 = w_1L + 1/2w_2L - 1/6mh_2^2L$$

采用简化公式计算结果为:

$$V' = (w_0 + w_2)L/2 = (2w_1 + w_2)L/2 = w_1L + 1/2w_2L$$

两者对比, V' 与 V 的差值是 $1/6mh_2^2L$ 。与以上情况类同,只不同这里须将 h_0 变为 h_2 , ($h_2 = h_0 - h_1$)。因此,在计算此类情况的蓄水量时,仍可利用简化公式,而后减去 $1/6mh_2^2L$ 作为修正,同样可得到准确的计算结果。以上算法应限于河底宽度和坡比不变的渠段,如断面技术指标有变化,则须根据具体情况分段推求。

(收稿日期 1995-02-06)

修建一不过水围堰和若干条导流隧洞。导流隧洞的型式一般以圆型和方圆型最为常见,下面就以这两种导流隧洞型式作为研究对象。

1.1.1 圆型导流隧洞

假设所选择导流隧洞直径为 $D(\text{m})$,如图1。

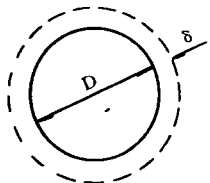


图1 圆型隧洞剖面图

隧洞过水断面面积 $Fd_0(\text{m}^2)$:

$$Fd_0 = 1/4\pi D^2$$

隧洞开挖断面面积 $Fd_1(\text{m}^2)$:

$$Fd_1 = 1/4\pi(D+2\delta)^2$$

隧洞混凝土衬砌断面面积 $Fd_2(\text{m}^2)$:

$$Fd_2 = Fd_1 - Fd_0 = 1/4\pi(4\delta D + 4\delta^2)$$

设隧洞长度为 $Ld(\text{m})$,隧洞石方开挖单价 $fd_1(\text{元}/\text{m}^3)$,衬砌混凝土的单价为 $fd_2(\text{元}/\text{m}^3)$,并假定隧洞岩性单一,无特殊地质问题,全洞长需要混凝土衬砌。则不计入隧洞进出口工程的隧洞石方开挖与混凝土衬砌总直接费用 $Zd(\text{元})$:

$$\begin{aligned} Zd &= Fd_1 \cdot Ld \cdot fd_1 + Fd_2 \cdot Ld \cdot fd_2 \\ &= 0.785Ld \cdot fd_1 \cdot D^2 + 3.142Ld \cdot \delta \\ &\quad \times (fd_1 + fd_2)D + 3.142Ld \cdot \delta^2 (fd_1 \\ &\quad + fd_2) \end{aligned}$$

$$\begin{cases} kd_1 = 0.785Ld \cdot fd_1 \\ kd_2 = 3.142Ld \cdot \delta (fd_1 + fd_2) \\ kd_3 = 3.142\delta^2 \cdot Ld (fd_1 + fd_2) \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{则 } Zd = kd_1 D^2 + kd_2 D + kd_3 \quad (2)$$

1.1.2 方圆型导流隧洞

隧洞断面如图2。所有假设条件均与 1.1.1 相同,用上面 1.1.1 的方法,可以得到,方圆型隧洞石方开挖与混凝土衬砌的总直接费用 $Zd(\text{元})$:

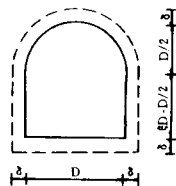


图2 方圆型隧洞剖面图

$$\begin{aligned} Zd &= (\xi - 0.107)Ld \cdot fd_1 \cdot D^2 + 2(\xi + 0.785)\delta \cdot Ld \cdot (fd_1 + fd_2)D \\ &\quad + 3.57\delta^2 \cdot Ld \cdot (fd_1 + fd_2) \end{aligned}$$

$$\begin{cases} kd_1 = (\xi - 0.107)Ld \cdot fd_1 \\ kd_2 = 2(\xi + 0.785)\delta \cdot Ld (fd_1 + fd_2) \\ kd_3 = 3.57\delta^2 Ld (fd_1 + fd_2) \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{则 } Zd = kd_1 D^2 + kd_2 D + kd_3 \quad (4)$$

1.2 不过水围堰

不过水围堰可以设计成各种型式。现在选用两种典型的型式进行分析,其它型式可以用相同的方法进行分析。型式(1)重力式混凝土围堰;型式(2)土石围堰(粘土斜墙防渗)。

1.2.1 重力式混凝土围堰

剖面型式如图3。

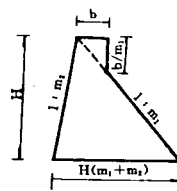


图3 混凝土围堰剖面图

其断面面积为 Fy :

$$Fy = 1/2[(m_1 + m_2)H^2 + b^2/m_1]$$

式中 H ——围堰高度(m)

b ——围堰顶宽(m)

m_1 ——围堰下游边坡系数

m_2 ——围堰上游边坡系数

混凝土工程量为 $Vy(\text{m}^3)$:

$$\begin{aligned} Vy &= FyLy \\ &= 1/2[(m_1 + m_2)H^2 + b^2/m_1] \cdot Ly \end{aligned} \quad (5)$$

式中 Ly ——围堰计算长度(m)

为了简化混凝土工程量 Vy 的计算,假设 $Ly = g + \gamma \cdot H$,其中 g 和 γ 为常数,可由两组 (Ly, H) 数据确定之。将 $Ly = g + \gamma H$ 代入(5)式:

$$\begin{aligned} Vy &= 1/2[\gamma(m_1 + m_2)H^3 + g(m_1 + m_2)H^2 \\ &\quad + 1/m_1 \gamma b^2 H + 1/m_1 g b^2] \end{aligned}$$

设围堰混凝土综合单价为 $fy(\text{元}/\text{m}^3)$,则围堰混凝土施工总直接费用 $Zy(\text{元})$:

$$\begin{aligned}
 Z_y &= V_y f_y \\
 &= 1/2 f_y [\gamma(m_1 + m_2)H^3 + g \\
 &\quad \times (m_1 + m_2)H^2 + 1/m_1 \gamma b^2 H \\
 &\quad + 1/m_1 g b^2] \\
 \text{令 } \begin{cases} k y_1 = 1/2 f_y \cdot \gamma(m_1 + m_2) \\ k y_2 = 1/2 f_y \cdot g(m_1 + m_2) \\ k y_3 = \frac{1}{2m_1} f_y \cdot \gamma b^2 \\ k y_4 = \frac{1}{2m_1} f_y \cdot g b^2 \end{cases} \quad (6)
 \end{aligned}$$

$$\text{则: } Z_y = k y_1 H^3 + k y_2 H^2 + k y_3 H + k y_4 \quad (7)$$

1.2.2 粘土斜墙堆石围堰

围堰剖面型式如图4。

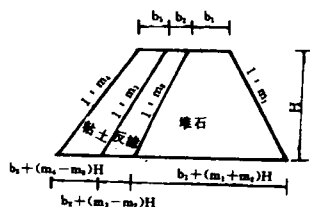


图4 堆石围堰剖面图

图4中, b_1 、 b_2 、 b_3 分别为堆石体、反滤层、粘土斜墙顶部宽度(m), $1/m_1$ 、 $1/m_2$ 、 $1/m_3$ 、 $1/m_4$ 分别为堆石体下游侧、上游侧、反滤层上游侧和粘土斜墙上游侧的坡度。

仅考虑堆石体、反滤料及粘土斜墙填筑工程时, 则围堰施工总直接费用 Z_y (元)为:

$$\begin{aligned}
 Z_y &= [b_1 H + 1/2(m_1 + m_2)H^2] L_y \\
 &\quad \times f_{y1} + [b_2 H + 1/2(m_3 - m_2)H^2] \\
 &\quad \times L_y \cdot f_{y2} + [b_3 H + 1/2(m_4 - m_3) \\
 &\quad \times H^2] L_y \cdot f_{y3} \quad (8)
 \end{aligned}$$

式中 H ——围堰高度(m)

f_{y1} 、 f_{y2} 、 f_{y3} ——分别为堆石体、反滤料、粘土的填筑单价(元/ m^3)

L_y ——堆石体, 反滤料, 粘土斜墙的计算长度(m)

假定 $L_y = g + \gamma H$

将 $L_y = g + \gamma H$ 代入(8)式整理后, 并令

$$k y'_1 = b_1 f_{y1} + b_2 f_{y2} + b_3 f_{y3}$$

$$\begin{aligned}
 k y'_2 &= 1/2 [f_{y1}(m_1 + m_2) + f_{y2}(m_3 - m_2) \\
 &\quad + f_{y3}(m_4 - m_3)] \quad (9)
 \end{aligned}$$

$$k y_1 = k y'_1 \cdot \gamma$$

$$k y_2 = k y'_1 \cdot \gamma + k y'_2 \cdot g$$

$$k y_3 = k y'_1 \cdot g$$

$$\text{则 } Z_y = k y'_1 L_y H + k y'_2 L_y H^2$$

$$Z_y = k y_1 H^3 + k y_2 H^2 + k y_3 H \quad (10)$$

1.3 建立目标函数

上述导流隧洞工程与围堰工程费用之和, 即为导流工程之总费用, 用 Z_0 表示。 Z_0 即为目标函数。

$$Z_0 = Z_d + Z_y$$

$$\begin{aligned}
 &= k d_1 D^2 + k d_2 D + k d_3 + k y_1 H^3 \\
 &\quad + k y_2 H^2 + k y_3 H + k y_4 \quad (11)
 \end{aligned}$$

当围堰为堆石围堰时 $k y_4 = 0$ 。

2 约束条件

由(11)式可知, 目标函数 Z_0 中包含有两个变量 D 和 H , 事实上 D 和 H 之间存在着密切的关系, D 越大, H 越小, D 越小, H 越大。因此假定 $H = aD^2 - \beta D + C$, a 、 β 、 C 为常数, 当 $a > 0$, $0 < D < \frac{\beta}{2a}$ 时, 满足上述要求, 只要确定了 a 、 β 、 C , 就可以确定 H 和 D 的关系。再将 $H = aD^2 - \beta D + C$ 代入(11)式, 目标函数就变成只含 D 或 H 的非线性方程, 就可以用简单的解析法进行优化计算。

我们知道, 当导流标准, 导流方式一定时, 用试算法假定一个隧洞直径, 经过水力计算和施工洪水调洪计算, 可以得到一个相应的上游最高围堰挡水位, 从而确定出围堰高度, 作为一组可行解。若假定几个隧洞断面尺寸, 便可得到几个相应的围堰高度, 即几组可行解。

当已知三组可行解 (D_1, H_1) , (D_2, H_2) , (D_3, H_3) 时 ($D_1 < D_2 < D_3$):

$$H_1 = aD_1^2 - \beta D_1 + C$$

$$H_2 = aD_2^2 - \beta D_2 + C$$

$$H_3 = aD_3^2 - \beta D_3 + C \quad (12)$$

联解(12)式得:

$$\beta = \frac{(H_1 - H_2)(D_1^2 - D_3^2) - (H_1 - H_3)(D_1^2 - D_2^2)}{-(D_1 - D_2)(D_1^2 - D_3^2) + (D_1 - D_3)(D_1^2 - D_2^2)}$$

$$\alpha = \frac{H_1 - H_2 + \beta(D_1 - D_2)}{D_1^2 - D_2^2}$$

$$C = H_1 - \alpha D_1^2 + \beta D_1 \quad (13)$$

$$H = \alpha D^2 - \beta D + C \quad (14)$$

3 解析计算

将(14)式代入(11)式中整理后得

$$Z_0 = k_1 D^6 - k_2 D^5 + k_3 D^4 - k_4 D^3 + k_5 D^2 - k_6 D + k_7 \quad (15)$$

式中 $k_1 = k_{y_1} \cdot \alpha^3$

$$k_2 = 3k_{y_1} \cdot \alpha^2 \beta$$

$$k_3 = 3k_{y_1} \cdot \alpha(\alpha C + \beta^2) + k_{y_2} \cdot \alpha^2 \quad (15)'$$

$$k_4 = k_{y_1} \cdot \beta(6\alpha C + \beta^2) + 2k_{y_2} \alpha \beta$$

$$k_5 = kd_1 + 3k_{y_1} C(\alpha C + \beta^2) + k_{y_2}$$

$$\times (2\alpha C + \beta^2) + k_{y_3} \cdot \alpha$$

$$k_6 = 3k_{y_1} \cdot \beta C^2 + 2k_{y_2} \cdot \beta C + k_{y_3} \beta - kd_2$$

$$k_7 = kd_3 + k_{y_1} C^3 + k_{y_2} C^2 + k_{y_3} C + k_{y_4}$$

对堆石围堰 $k_{y_4} = 0$

欲求(15)式 $Z_0 = F(D)$ 的最小值,只要使

一阶导数 $\frac{dZ_0}{dD} = 0$, 并有 $\frac{d^2 Z_0}{dD^2} > 0$, 则有 Z_0 最小值。

令 $\frac{dZ_0}{dD} = 0$ 得

$$6k_1 D^5 - 5k_2 D^4 + 4k_3 D^3 - 3k_4 D^2 + 2k_5 D - k_6 = 0 \quad (16)$$

$$0 < D \leq \frac{\beta}{2\alpha}$$

$$\frac{d^2 Z_0}{dD^2} = 30k_1 D^4 - 20k_2 D^3 + 12k_3 D^2 - 6k_4 D + 2k_5 \quad (17)$$

求解(16)式 $f(D) = 6k_1 D^5 - 5k_2 D^4 + 4k_3 D^3 - 3k_4 D^2 + 2k_5 D - k_6 = 0$ 的程序框图如图5。

具体计算步骤如下:

(1) 拟定1,2,3,...n条隧洞方案,对各方案进行水力计算和施工洪水调洪计算,确定出3个不同隧洞直径的围堰高度,按(13)式分别计算出 α, β, C 。

(2) 由已知数据分别计算出 k_{y_i}, kd_i, k_i 各值。

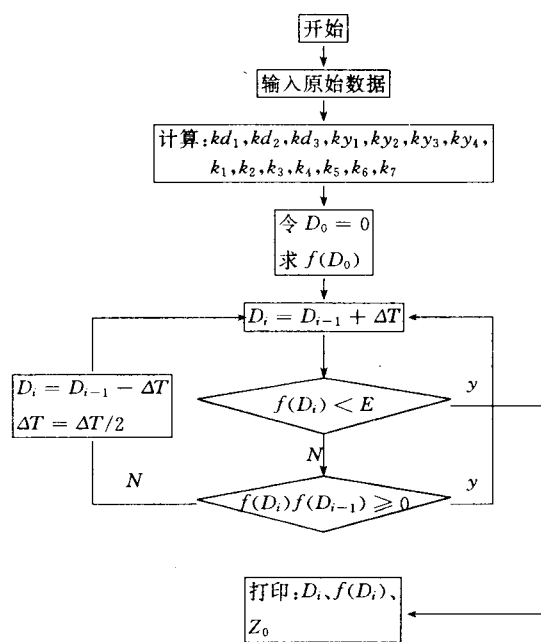


图5 求解 $f(D)=0$ 程序框图

(3) 由(16)式、(14)式和(15)式分别求出各方案最优洞径(用 D^* 表示),最优围堰高度(用 H^* 表示)、最低费用(用 Z_0^* 表示),并用(17)式验证之。

对解出之 D^* ,应从两方面分析其合理性,首先应了解隧洞处的岩石特性,能否适应 D^* 这样大的洞径;其次是施工上是否可行。

(4) 分析比较相同条数隧洞、不同围堰型式的方案总导流费用(即在 Z_0^* 基础上加入隧洞进出口工程、围堰基础开挖及基础处理等项工程费用),择优选用经济上合理、技术上可行的最优方案,并确定其最优洞径、围堰型式及围堰高度。然后对不同条数隧洞的各个最优方案,再进行技术上、经济上综合分析论证。最后优选出此项工程之最优隧洞导流方案,并确定出最优的隧洞条数、隧洞直径、围堰型式及围堰高度。

4 算例

某堆石坝工程施工导流标准为20年一遇洪水,其相应流量 $Q_{5\%} = 6700 \text{ m}^3/\text{s}$ 。采用不过水围堰,右岸设两条断面尺寸相同的圆型导流隧洞,水力计算与施工调洪计算成果如下表:

隧洞直径 (m)	上游水位 (m)	围堰高度 (m)
11	39	39.8
14	29.2	30
15.5	26.8	27.6

已知导流隧洞总长 $Ld=1250\text{m}$, 洞线处岩性单一, 全断面衬砌, 衬砌厚度为 $\delta=0.8\text{m}$, 围堰型式选择重力式混凝土围堰和粘土斜墙防渗堆石围堰做方案比较, 围堰基础无特殊地质问题, 又知混凝土围堰顶宽 8.0m , 上游边坡为垂直, 下游边坡为 $1:0.67$, 围堰混凝土单价 58.0 元/ m^3 ; 堆石围堰的堆石体、反滤层及粘土斜墙顶部宽度分别为 10.0m 、 2.0m 和 2.0m , 堆石体的上下游边坡均为 $1/1.5$, 反滤层及粘土斜墙上游边坡分别为 $1/2$ 和 $1/4$; 堆石体单价 14.3 元/ m^3 , 粘土单价 12 元/ m^3 , 反滤料单价 9.7 元/ m^3 ; 导流隧洞石方开挖单价为 25.6 元/ m^3 , 衬砌混凝土单价 78.8 元/ m^3 , 又知 $g=25$, $\gamma=7.9$, 试求混凝土围堰和堆石围堰二方案的最优隧洞直径及围堰高度。

解 (1) 求 α 、 β 、 C

由已知三点坐标 $(11, 39.8)$, $(14, 30)$, $(15.5, 27.6)$ 代入 (13) 式得: $\alpha=0.3704$, $\beta=12.526$, $C=132.77$

(2) 对混凝土围堰方案

将已知数据代入 (15)'、(1) 和 (6) 式得:

$$kd_1=25120, kd_2=328025, kd_3=262420$$

$$ky_1=178.692, ky_2=565.48, ky_3=25476$$

$$ky_4=80621$$

$$k_1=9.078, k_2=921.102, k_3=40992.610$$

$$k_4=1016824, k_5=14846116,$$

$$k_6=120240896, k_7=431916713$$

将上述数据代入 (16) 式解得: $D^*=14.23\text{m}$, 将 D^* 代入 (14) 式 $H^*=29.52\text{m}$, 将 D^* 代入 (17) 式 $\frac{d^2Z_0}{dD^2}=568762>0$, 且 $D^*<\frac{\beta}{2\alpha}=16.9\text{m}$ 故目标函数取得最小值 $Z_0^*=1594.11$

万元。

(3) 对堆石围堰方案

将已知数据代入 (1) 式、(9) 式 (15)' 式得:

$$kd_1=2510, kd_2=328025, kd_3=262420$$

$$ky_1=283.413, ky_2=2369.435, ky_3=4660,$$

$$ky_4=0$$

$$k_1=14.399, k_2=1460.907, k_3=65217.996$$

$$k_4=1626388, k_5=23894470,$$

$$k_6=195349532, k_7=705968560$$

将上述数据代入 (16) 式解得: $D^*=15.095\text{m}$, $H^*=28.08\text{m}$, 将 D^* 代入 (17) 式 $\frac{d^2Z_0}{dD^2}=743809>0$ 且 $D^*<\frac{\beta}{2\alpha}=16.9\text{m}$ 故目标函数取得最小值 $Z_0^*=1921.5$ 万元。

(4) 计算导流总费用

由上述计算可见混凝土重力式围堰导流方案直接费用省 327.4 万元。究竟采用哪种围堰型式, 还应考虑两个方案中隧洞进出口土石方开挖、混凝土护砌及围堰基础开挖及基础处理等项费用, 便得到实际最小的施工导流总直接费用。最后进行综合技术、经济比较 (包括工期) 确定一经济合理的施工导流方案。

5 结语

5.1 上述优化计算方法, 虽然做了一些粗略假定, 由于它是建立在真实数据基础上的, 所以用于初步设计阶段的方案比较是可以的。

5.2 假定条件中 D 和 H 之关系受多种复杂关系的制约, 仅在 $0<D\leq\frac{\beta}{2\alpha}$ 区间成立, 当优化

出之 $D^*>\frac{\beta}{2\alpha}$ 时, 应修正 D 与 H 之关系。

5.3 可行解越接近优化结果, 越有利于优化结果的准确性, 如果把首次优化结果, 作为一组可行解, 再优化一次, 会增加优化结果的可靠性。

(收稿日期 1995-05-20)