

文章编号:1671-1637(2012)06-0013-07

公路黄土坝式路堤蓄水位分析

徐世强^{1,3}, 邹群², 折学森³, 封建湖¹, 时磊³

(1. 长安大学理学院, 陕西西安 710064; 2. 南昌工程学院土木与建筑工程学院, 江西南昌 330029;
3. 长安大学公路学院, 陕西西安 710064)

摘要:为分析公路黄土坝式路堤涵洞闲置原因, 针对路堤上游蓄水的U型沟谷几何边界条件建立库区模型, 根据路堤蓄水补充损失特点建立库水补充损失模式, 利用渗流力学、蒸发理论得到蓄水位算式, 通过调研与实测选定路堤模拟参数进行了水位计算, 并与已建的路堤蓄水实际情况进行了对比验证。分析结果表明: 不考虑泥沙影响, 在正常的年降雨入库量条件下, 无放水的公路黄土坝式路堤具有正常蓄水上限水位, 即理想均值水位和上限高水位; 上限水位的存在与蓄水时间没有关系; 上限高水位小于涵洞底部标高是涵洞闲置的本质原因; 实际设计时应注意上限高水位对滞洪库容的影响。

关键词:路基工程; 坝式路堤; 涵洞; 蓄水位; 上限水位

中图分类号: U416.169 **文献标志码:** A

Pool level analysis of highway loess dam embankment

XU Shi-qiang^{1,3}, ZOU Qun², SHE Xue-sen³, FENG Jian-hu¹, SHI Lei³

(1. School of Sciences, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330029, Jiangxi, China; 3. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to find out the idle reasons of loess dam embankment culvert for highway, the calculation model of reservoir was established according to the geological boundary conditions of U-shaped gully for embankment upriver water storage. In-out water modes were set up based on the characteristics of embankment in-out water. Pool level formulae were proposed based on seepage mechanics and evaporation theory. Water level was calculated with simulated embankment parameters from investigation and actual measuring, and was contrasted with the actual situation of embankment water storage. Analysis result shows that highway loess dam embankment is of upper limit water levels without drainage and the influences of mud and sand in normal rainfall, that are ideal average water level and upper limit peak water level. The upper limit water level is not related with storing time. The essence reason for idle culvert is that upper limit peak water level is less than the bottom elevation of culvert, and the effect of upper limit peak water level on balancing storage should be considered in actual design. 4 tabs, 9 figs, 16 refs.

Key words: subgrade engineering; dam embankment; culvert; pool level; upper limit water level

Author resume: XU Shi-qiang(1972-), male, associate professor, PhD, +86-29-82335655, qiangshixu@126.com.

收稿日期: 2012-08-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41172262); 陕西省自然科学基金项目(2007E204); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD2011JC042)

作者简介: 徐世强(1972-), 男, 陕西澄城人, 长安大学副教授, 工学博士, 从事路基工程研究。

0 引 言

公路黄土坝式路堤是一种土工构筑物,其在保证公路运输前提下具有滞洪蓄水、水土保持、改善环境的功能,对于旱、半干旱黄土地区的经济可持续发展具有重大意义。然而根据已建的 42 座坝式路堤调研,坝式路堤在使用十几年后,蓄水也未达到设计水位,上置的泄水涵洞仅 2 座有过水痕迹,设计中是否设置涵洞一直困扰着设计者^[1]。

《公路设计手册:路基》中,关于坝式路堤涵洞设计的描述是“当汇水面积、汇流流量、库容较小,当地蒸发量较大时,其泄洪构造物可以不修或缓修”。路堤涵洞设计思想基本上服从于即来即排式^[2-3],适用于路堤底部设涵,对于上部设涵的路堤,因库区调节作用大小难以掌握,所以实际中按照《公路设计手册:路基》及《公路桥涵设计手册:涵洞》设计,坝式路堤涵洞泄洪力明显偏大。高维隆等采用蓄水增量计算方法对坝式路堤涵洞泄洪力进行了研究,并提出相应设计方法^[4],但对实际中将涵洞底部作为设计水位的分析不足,没有得出泄洪力偏大的原因。

坝式路堤和水库、淤地坝都可蓄水,但有区别。在主要功能方面,水库是蓄水、灌溉、防洪和发电^[5-6];淤地坝是拦泥、淤地、缓洪^[7];坝式路堤是交通兼蓄水(或不蓄水)、淤地、滞洪。在工程结构方面,水库有坝体、下部的输水设施、上部的泄洪设施;淤地坝有坝体、下部的放水卧管涵、上部的溢洪道,即“三大件”,近年来一般采用无溢洪道的“两大件”,俗称“闷葫芦”的“一大件”很少采用,其只有坝体,无放泄水设施,为保险考虑在坝顶布设溢流口;坝式路堤有坝体(上游坝面设置防水土工布,不透水)、上置的泄洪涵洞,无下部放水设施。在坝高设计方面,水库坝高等于设计洪水水位加上坝顶超高;淤地坝坝高等于拦泥高、滞洪高、安全超高之和;坝式路堤高度由公路选线确定,一般高度为 20~60 m。在年入库水量特点方面,水库充裕,年内考虑入出平衡设计^[8],汛前或汛间放水控制防洪限制水位;淤地坝的“两、三大件”水量相对充裕,一般不长期蓄水,汛前考虑放水以安全度汛^[9];坝式路堤和淤地坝“一大件”相似,水量不足,上游汇水面积小,年入库水量小,其泄洪涵洞下部库容相当于淤地坝“一大件”的“闷葫芦”情况。在防洪限制水位方面,水库和淤地坝“两、三大件”一样,可人为调控^[10-11];坝式路堤和淤地坝“一大件”相似,均不可控,它由不放水情况下的库区蓄水位天然确定。从上面对比可以看出,坝

式路堤泄洪力计算不能直接借用水库、淤地坝“两、三大件”的成熟设计方法,在防洪限制水位方面,坝式路堤和淤地坝“一大件”相似,但“一大件”的相关研究很少。

坝式路堤为减小涵长又多蓄水,将涵洞尽可能上置,涵洞若干年内没有发挥泄水功能,这说明蓄水年限内,路堤在没有放水情况下,蓄水水位并没有随着蓄水年限的增加而增加,而达到设定的设计水位,即上置的涵洞底部标高的位置。那么在正常的年降雨量、年入库量情况下,路堤无放水时,是否存在与蓄水时间无关的蓄水水位上限,如果存在,其作用就相当于水库和淤地坝“两、三大件”中的防洪限制水位,涵洞闲置现象和涵洞泄洪力偏大问题就会迎刃而解。所以,研究不放水情况下的路堤是否存在正常蓄水时的水位上限是解决问题的关键。

本文针对路堤上游蓄水的 U 型沟谷几何边界条件建立库区模型,利用渗流力学、蒸发理论得到蓄水位算式,通过调研和实测资料选定的路堤模拟参数进行水位计算,并和已建的路堤蓄水实际情况进行对比,研究跨越 U 型沟谷、正常年降雨入库量、无放水的坝式路堤是否存在与蓄水时间无关的正常蓄水位上限,分析实际中涵洞泄洪力设计问题。

1 库区模型建立及相关算式推导

跨越 U 型沟谷的坝式路堤,其上游库区常见情况是沟谷底部为水平粘性泥岩隔水层,两侧沟岸为直立黄土,并且沟谷底部具有纵坡,蜿蜒伸向上游。本文针对以上情况将库区纵向拉直,保证蓄水体积分不变,且不考虑上游坝坡上部库容及绕坝渗漏,建立库区模型见图 1。图 1 中: h 为蓄水高度; α 为沟谷底纵坡与水平面夹角; S_k 为沟谷宽度; S_1 为沟谷底的水平面长度。

蓄水高度为 h 时的库容 Q_{ku} 为

$$Q_{ku} = S_1 S_k h + \frac{1}{2} \cot(\alpha) S_k h^2 \quad (1)$$

大部分情况下,黄土库区两岸按照无人渗处理,且临近沟谷很少有蓄水存在,参考钱家欢等编著的《土工原理与计算》,引用其中的杜布依(Dupuit)公式,得到库岸单边渗漏量 Q_{rs} 为

$$Q_{rs} = \frac{K}{2L} h^2 [S_1 + h \cot(\alpha)] \quad (2)$$

式中: L 为两沟谷距离; K 为库岸渗透系数。

蓄水高度为 h 处的单位时间蒸发体积 Q_{zt} 为

$$Q_{zt} = [S_1 + h \cot(\alpha)] S_k \tau_{zfl} \quad (3)$$

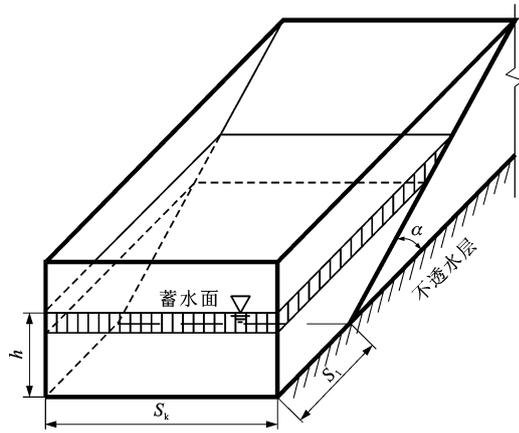


图 1 库区模型

Fig. 1 Reservoir model

式中: τ_{zfl} 为单位时间单位面积的蒸发高度。

左右两岸渗漏量及蒸发量之和等于高度 h 处的库水损失率 $f(h)$, 由式(2)、(3)得

$$f(h) = \left(\frac{K_z}{2L_z} + \frac{K_y}{2L_y} \right) \left\{ h^2 [S_1 + h \cot(\alpha)] \right\} + S_k \tau_{zfl} [S_1 + h \cot(\alpha)] \quad (4)$$

式中: L_z 、 L_y 分别为左右岸到相邻沟谷距离; K_z 、 K_y 分别为左右岸渗透系数。

2 库水补充损失模式

库水的补充主要是降雨, 包括径流部分和库面降雨部分, 而径流入库量与上游流域面积、降雨量、

径流系数等有关, 影响因素复杂^[12-13]。本文目标是研究正常的年降雨入库量情况下, 蓄水位随蓄水年限的增加是否有上限问题, 所以不进行年入库量的求算, 直接从年降雨入库量实测结果中选取。坝式路堤库水补充有两种方式, 即点降雨入库补充和均匀降雨入库补充。点降雨入库补充模拟年内暴雨导致的沟谷径流陡然入库情况, 其主要特点是补充所占用时间极短; 均匀降雨入库补充模拟年内连续降雨而径流缓慢连续入库情况, 其主要特点是补充所占用时间较长。两者均包含库面降雨部分, 一次降雨导致的入库可以分解为若干点降雨和均匀降雨, 年点降雨入库量和年均降雨入库量的和等于年入库量, 库水的损失部分是渗漏和蒸发引起的。

年内降雨的时空分布具有多样化^[14-15], 因而降雨导致的库水补充损失模式也是多样化。图 2(a) 中, 最外圈数字表示一年中的 12 个月份, 圈内黑直线表示点降雨入库, 黑圆弧表示均匀降雨入库, 线的长度表示该次降雨入库量大小, 黑直线和黑圆弧总长度表示年入库量, 降雨补充入库时间外的时间为干旱时间, 而渗漏在全年内存在。

图 2 中, 库水补充损失模式包括两种极端工况和若干中间工况。图 2(b) 工况是将年入库水量一次性全部点降雨入库, 补充占用时间为 0, 随后干旱时间为 365 d, 到次年再补充再干旱, 以此类推, 此种极端模式一次性补充水量最大, 而干旱时间

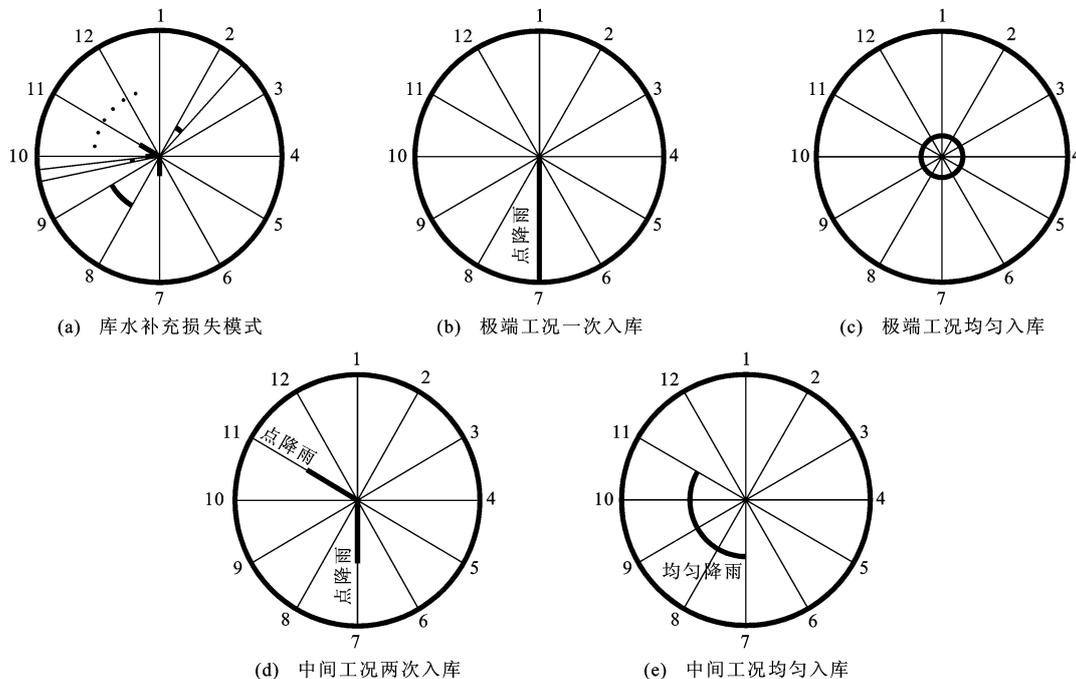


图 2 库水补充损失模式

Fig. 2 In-out water modes

最长,所以年内最高水位和最低水位的差值变化最大,水位波动最大;图2(c)工况是按照年入库水量均匀降雨入库补充,补充占用时间为一年最长的365 d,干旱时间则为0,下一年也如此,这种极端情况,可以得出理想均值水位,即库水补充量与库水损失量达到动态平衡时的蓄水位高度。中间工况是处于图2(b)、(c)两种极端工况间的众多工况,实际情况下的库水补充和损失就属于中间工况,本文仅列出图2(d)、(e)两种中间工况进行演算。图2(d)工况是雨季持续4个月,降2次雨,每次为年降雨量的一半,降雨时间点为雨季两 endpoints,旱季持续8个月;图2(e)工况是雨季4个月,连续降雨情况。

3 蓄水位算式

3.1 理想均值水位算式

在图2(c)中,均匀降雨随时间无限增加,库水损失率和补充率达到动态平衡时的蓄水位高度就是理想均值水位,由式(4)得

$$\left(\frac{K_z}{2L_z} + \frac{K_y}{2L_y}\right) \left\{ h^2 [S_1 + h \cot(\alpha)] \right\} + S_k \frac{\tau_{nz}}{365} \cdot [S_1 + h \cot(\alpha)] = Q_{nr}/365 \quad (5)$$

式中: Q_{nr} 为年入库量; τ_{nz} 为年蒸发量。

3.2 干旱时低水位算式

历时 t 天干旱,水位从高水位 h_2 下降到低水位 h_1 的平均库水损失率 $\overline{f(h)}$ 为

$$\begin{aligned} \overline{f(h)} &= \frac{1}{h_2 - h_1} \int_{h_1}^{h_2} f(h) dh = \frac{AS_1}{3} (h_2^2 + h_2 h_1 + h_1^2) + \frac{A \cot(\alpha)}{4} (h_2^2 + h_1^2) (h_2 + h_1) + \\ & S_k \tau_{zfl} S_1 + S_k \tau_{zfl} \frac{\cot(\alpha)}{2} (h_2 + h_1) \quad (6) \end{aligned}$$

$$A = \frac{K_z}{2L_z} + \frac{K_y}{2L_y}$$

根据式(1),高度变化引起的库容变化 Q_{kb} 为

$$Q_{kb} = S_1 S_k (h_2 - h_1) + \frac{1}{2} \cot(\alpha) S_k (h_2^2 - h_1^2) \quad (7)$$

因 S_1 一般是施工造成的小平面,对于库容影响有限,令 S_1 为0,则式(6)、(7)分别变为

$$\overline{f(h)} = \frac{a_1}{4} (h_2^2 + h_1^2) (h_2 + h_1) + \frac{a_2}{2} (h_2 + h_1) \quad (8)$$

$$a_1 = A \cot(\alpha)$$

$$a_2 = S_k \tau_{zfl} \cot(\alpha)$$

$$Q_{kb} = \frac{1}{2} \cot(\alpha) S_k (h_2^2 - h_1^2) \quad (9)$$

水位在 t 天内匀速下降时,库水的损失量等于

库容的变化量,即

$$\overline{f(h)} t = Q_{kb} \quad (10)$$

将式(8)、(9)代入式(10),整理得低水位 h_1 为

$$h_1 = \left\{ -1 + \left[1 - \frac{t}{S_k} \left(\frac{K_z}{L_z} + \frac{K_y}{L_y} \right) \left(\frac{t}{4S_k} \left(\frac{K_z}{L_z} + \frac{K_y}{L_y} \right) h_2^2 - h_2 + \frac{t}{365} \tau_{nz} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \right\} / \left[\frac{t}{2S_k} \left(\frac{K_z}{L_z} + \frac{K_y}{L_y} \right) \right] \quad (11)$$

3.3 降雨时高水位算式

当点降雨入库时,利用式(7),用某次点入库的水量 Q_{cr} 代替 Q_{kb} 得

$$\frac{1}{2} \cot(\alpha) S_k h_2^2 + S_1 S_k h_2 - \frac{1}{2} \cot(\alpha) S_k h_1^2 - S_1 S_k h_1 - Q_{cr} = 0 \quad (12)$$

S_1 仍取0时,高水位 h_2 为

$$h_2 = \frac{\sqrt{S_k \cot(\alpha) [\cot(\alpha) S_k h_1^2 + 2Q_{cr}]}}{S_k \cot(\alpha)} \quad (13)$$

当均匀降雨入库时,从低水位上升到高水位,历时 t 天的入库水量 Q_{lr} 等于期间的渗漏损失量加上库容的变化量,即

$$\overline{f(h)} t + Q_{kb} = Q_{lr} \quad (14)$$

将式(8)、(9)代入式(14)得高水位 h_2 算式为

$$\left[\frac{a_1}{4} (h_2^2 + h_1^2) (h_2 + h_1) + \frac{a_2}{2} (h_2 + h_1) \right] t + \frac{1}{2} \cot(\alpha) S_k (h_2^2 - h_1^2) = Q_{lr} \quad (15)$$

4 计算结果分析

甘肃省在G310线、G312线、G109线等多条公路上修建了坝式路堤,根据实地调查,坝式路堤跨越U型沟谷的沟底平均纵坡在 $2^\circ \sim 20^\circ$ 之间,U型沟宽一般小于100 m,两岸距离远处沟道距离变化较大,黄土边坡为砂质黄土或泥质黄土,上游汇水面积在 5 km^2 以下。路堤所处区域为干旱半干旱地区,年降雨量在400 mm以下,年蒸发量在1 526.3 ~ 2 275.3 mm之间^[16]。年入库量的取值见表1^[4],本文选取的坝式路堤模拟计算参数见表2,常用沟底纵坡比为1:10,则角度 α 为 $\text{arccot}(10)$,计算工况及意义见表3。

根据式(5)及表2,得理想均值水位为9.031 3 m,

表1 实测年入库量

Tab. 1 Actual measured annual reservoir inflows

路线名称	桩号	公路等级	蓄水年份	汇水面积/ km^2	Q_{nr}/m^3
G312	K2 129+900	二级	1992	1.5	12 480
G310	K168+700	二级专用	1998	1.9	13 560

表 2 坝式路堤参数

Tab. 2 Parameters of dam embankment

参数	$\alpha/(\circ)$	$K_z, K_y/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$L_z, L_y/\text{m}$	S_k/m	τ_{nz}/mm	Q_{nr}/m^3
取值	$\arccot(10)$	5×10^{-4}	300	50	1 800	12 000

当表 2 中 K_z, K_y 取 0, 得不渗漏时理想均值水位为 13.334 4 m。路堤开始蓄水时初始低水位为 0, 按照表 3 中工况及表 2 中参数, 降雨时使用式(13)、(15), 干旱时使用式(11), 第 15 年和第 70 年的蓄水位结果见表 4, 各工况下水位逐年计算结果分别见图 3~8。

表 3 计算工况及意义

Tab. 3 Calculation working conditions and meanings

工况	意义	参数取值	年入库量
极端工况	图 2(b)	表 2	正常年降雨入库量
	图 2(c)		
中间工况	图 2(d)		
	图 2(e)		
不渗漏工况	图 2(b)	表 2 中 K_z, K_y 为 0	
频率洪水工况	图 2(d)	表 2	正常年突遇设计频率洪水, 后续年仍为正常年降雨入库量

表 4 蓄水位计算结果

Tab. 4 Calculation results of pool levels

工况	理想均值水位/m	最高水位/m	最低水位/m	平均水位/m	最高水位与最低水位差/m	年限
极端工况	9.031 3	10.324 2	7.654 3	8.989 3	2.669 9	15
		9.028 9	9.027 4	9.028 2	0.001 5	
9.890 4		8.117 3	9.003 9	1.773 1		
9.897 6		8.123 8	9.010 7	1.773 8		
不渗漏工况	13.334 4	14.233 0	12.432 9	13.333 0	1.800 1	70
频率洪水工况	9.031 3	9.906 2	8.133 0	9.019 6	1.773 2	15

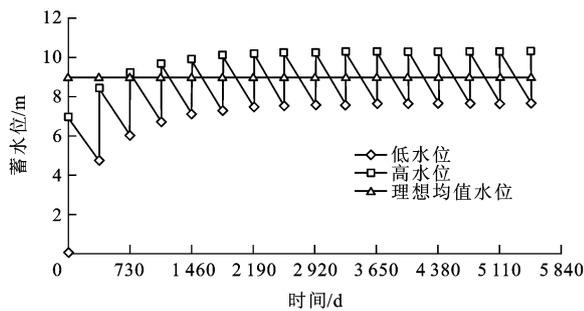


图 3 极端工况一次入库蓄水位

Fig. 3 Pool levels of one inflow in extreme mode

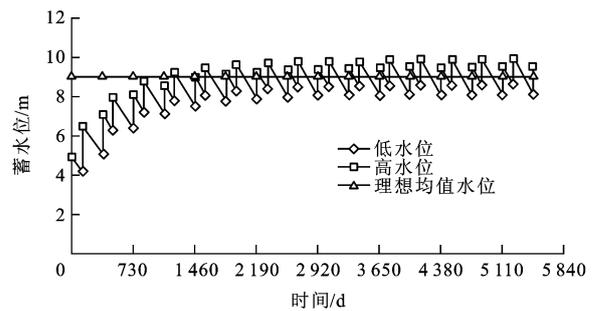


图 5 中间工况两次入库蓄水位

Fig. 5 Pool levels of two inflows in mid mode

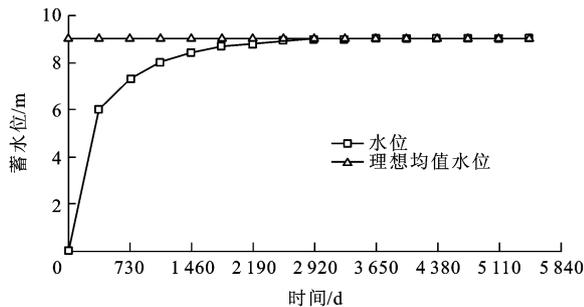


图 4 极端工况均匀入库蓄水位

Fig. 4 Pool levels of uniform inflow in extreme mode

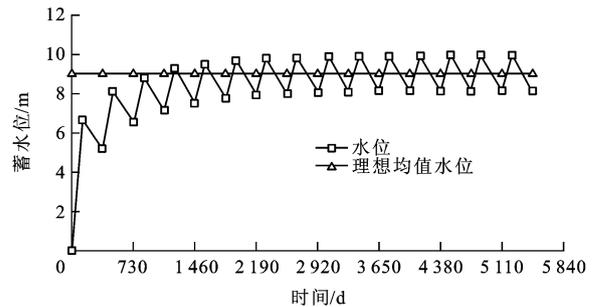


图 6 中间工况均匀入库蓄水位

Fig. 6 Pool levels of uniform inflow in mid mode

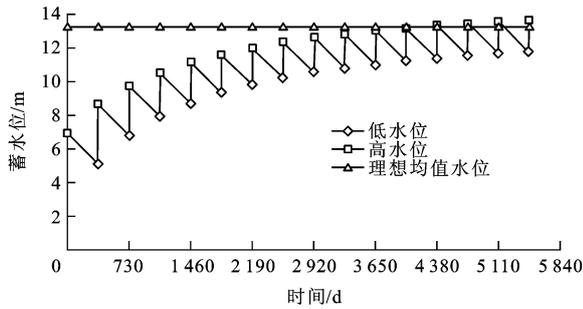


图 7 不渗漏一次入库蓄水位
Fig. 7 Pool levels of one inflow without seepage

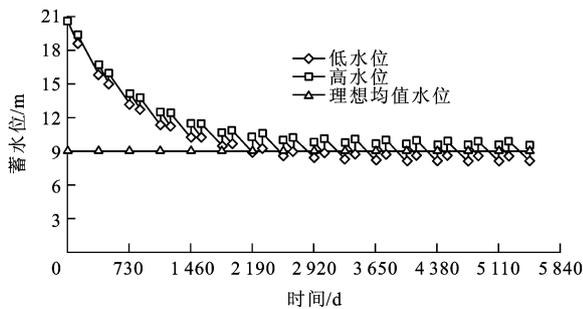


图 8 正常蓄水遇频率洪水后蓄水位
Fig. 8 Normal pool levels in frequency flood

从表 4 和图 3~7 可以看出,各工况下的平均水位无法超过理想均值水位,这和图 2(c)的理想均值水位极限意义是一致的。最高水位和最低水位值逐年增加,但其平均水位受上限的理想均值水位约束,所以最高水位也有上限值。中间工况的最高水位值小于极端工况图 2(b)的最高水位值,这也和其建立意义相一致。

坝式路堤属于中间工况,也就有理想均值水位和上限最高水位的约束,因此,在年入库量一定情况下,无放水的坝式路堤具有正常蓄水时的上限水位,即理想均值水位和上限高水位。蓄水 15 年及蓄水 70 年不渗漏计算表明,在年入库量一定情况下,蓄水位存在上限值,与蓄水年限长短没有关系。

从图 8 可以看出,即使在路堤正常使用中,突遇一次设计频率洪水,洪水总量很大,致使水位上升很高,但后续蓄水年仍为正常降雨入库量时,水位也会随时间下降到正常的上限水位之下。

以上分析是在表 2 的模拟参数下得出的,具体到某个特定坝式路堤,参数会不同,从式(5)不难看出, K_z, K_y, τ_{nz}, S_k 越大, L_z, L_y, α, Q_{nr} 越小,上限的理想均值水位值则越小,反之亦然。用式(5)求出的上限理想均值水位值可能不同,但只要水位值小于路堤允许的最大高度,就有上限存在的规律。

如图 9,在预设的涵洞最大标高位确定后,路堤

刚开始没蓄水时蓄水位为 0,第 1 年的滞洪库容则最大,第 i 年的滞洪库容由其雨季前的蓄水位确定,再加上灌溉、牲畜用水等,使得蓄水位变化不定,滞洪库容难以确定,这样使得坝式路堤涵洞泄洪力设计难以把握。然而,上面得出在正常年降雨入库量为定值的理想情况下,无放水坝式路堤具有正常蓄水上限水位,上限水位的存在和蓄水年限没有关系,其对分析涵洞闲置本质原因和改善设计有意义。

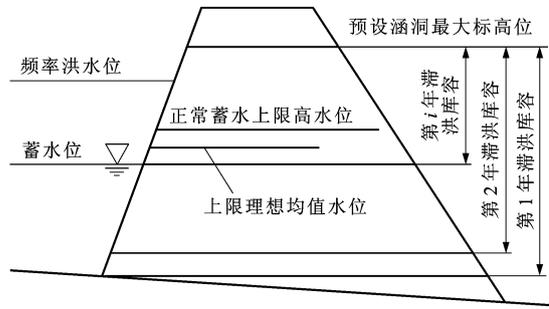


图 9 设计使用水位
Fig. 9 Design water levels

实际中年入库量不会相同,设计年限内的路堤可能会经历丰水年、平水年、枯水年的过程,年入库量取值越大,相应的上限水位也越大,即使取丰水年的年入库量值,相应的上限水位也存在,不随蓄水年限增加而增加。如图 9,跨越小沟谷坝式路堤,上游年来水量常较小,当设置的涵洞标高位大于其具有的正常蓄水上限高水位,且设计频率洪水没有出现时,涵洞闲置就是必然现象。

对于以后路堤设计中涵洞该不该设置问题,不能简单理解为预设涵洞标高位大于正常上限高水位就不用设置,要考虑路堤正常使用年限内,设计频率洪水可能出现的问题,此时涵洞就只为预防频率洪水出现而设置,将正常的上限高水位当作防洪限制水位来设计泄洪涵洞应该是保守可行的。

根据防洪限制水位和预设的涵洞底部标高,并通过水位-库容曲线得出滞洪库容 V_z 。借用水利上成熟的调洪公式

$$q_p = Q_p(1 - V_z/W_p)$$

可确定是否设置涵洞以及设置多大涵洞, Q_p 为设计洪峰流量。当滞洪库容 V_z 大于设计洪水总量 W_p 时,不设涵洞,否则须设置涵洞,同时可利用此公式得出涵洞最大下泄流量 q_p 。当预设的涵洞最大标高位小于求得的正常上限高水位时,需要设置涵洞,此时涵洞的底部标高位就应为防洪限制水位,此时就变成成为公路不蓄水路堤的即来即排式成熟设计方法,因此,坝式路堤涵洞设计应该认识并重视路堤在

正常蓄水年限下,无放水的库区存在正常蓄水上限水位问题。

5 结 语

本文针对路堤上游蓄水的 U 型沟谷几何边界条件建立库区模型,根据路堤蓄水补充损失特点建立库水补充损失模式,利用渗流力学、蒸发理论得到蓄水位算式,通过调研与实测所选定的模拟路堤参数进行水位计算,并和已建的路堤蓄水实际情况进行了对比验证,最后分析了涵洞闲置原因、涵洞是否设置及设置多大问题。结果表明,正常的年降雨入库量条件下,无放水的公路黄土坝式路堤具有正常蓄水上限水位,上限水位的存在与蓄水时间没有关系,上限高水位小于涵洞底部标高是涵洞闲置的本质原因,实际设计时应注意上限高水位对滞洪库容的影响。用本文方法可初步得出正常蓄水上限水位,但还要考虑设计年限内泥沙的影响、参数的精确取值等,这需作进一步研究。

参 考 文 献 :

References :

- [1] 杨重存,王志贵,谈敦仪. 甘肃省公路土桥病害与黄土分区相关关系[J]. 西安公路交通大学学报,1999,19(4):24-29.
YANG Zhong-cun, WANG Zhi-gui, TAN Dun-yi. Relation between disease of loess bridge on highway and loess zoning in Gansu Province[J]. Journal of Xi'an Highway University, 1999, 19(4): 24-29. (in Chinese)
- [2] 谈至明. 公路排水系统设计参数研究[J]. 中国公路学报, 2006,19(2):7-11.
TAN Zhi-ming. Research on design parameters of highway drainage system[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(2): 7-11. (in Chinese)
- [3] 沈波,艾翠玲. 山区公路排水系统抗水灾评价指标[J]. 长安大学学报:自然科学版,2008,28(4):11-16.
SHEN Bo, AI Cui-ling. Evaluation indices of anti-flood for mountain highway drainage system[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(4): 11-16. (in Chinese)
- [4] 高维隆,支喜兰,唐战虎,等. 坝式路堤涵洞及附属泄洪设施蓄水增量计算方法[J]. 中国公路学报,2011,24(3):29-35.
GAO Wei-long, ZHI Xi-lan, TANG Zhan-hu, et al. Calculation method of water storage increment of culvert and attached flood-discharge device in dam-embankment[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(3): 29-35. (in Chinese)
- [5] 吴保生,邓跃. 三门峡水库非汛期控制运用水位对库区泥沙冲淤的影响[J]. 水力发电学报,2007,26(2):93-98.
WU Bao-sheng, DENG Yue. Effects of controlled pool level in non-flood seasons on the sedimentation in Sanmenxia Reservoir[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007, 26(2): 93-98. (in Chinese)
- [6] KUCUKARSLAN S, COSKUN S B, TASKIN B. Transient analysis of dam-reservoir interaction including the reservoir bottom effects[J]. Journal of Fluids and Structures, 2005, 20(8): 1073-1084.
- [7] 方学敏,万兆惠,匡尚富. 黄河中游淤地坝拦沙机理及作用[J]. 水利学报,1998(10):49-53.
FANG Xue-min, WAN Zhao-hui, KUANG Shang-fu. Mechanism and effect of silt-arrest dams for sediment reduction in the middle Yellow River Basin[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998(10): 49-53. (in Chinese)
- [8] XIONG Li-hua, GUO Sheng-lian. A two-parameter monthly water balance model and its application [J]. Journal of Hydrology, 1999, 216(1/2): 111-123.
- [9] 冉大川,罗全华,刘斌,等. 黄河中游地区淤地坝减洪减沙及减蚀作用研究[J]. 水利学报,2004(5):7-13.
RAN Da-chuan, LUO Quan-hua, LIU Bin, et al. Effect of soil-retaining dams on flood and sediment reduction in middle reaches of Yellow River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(5): 7-13. (in Chinese)
- [10] 周建军,林秉南,张仁. 三峡水库减淤增容调度方式研究——多汛限水位调度方案[J]. 水利学报,2002(3):12-19.
ZHOU Jian-jun, LIN Bing-nan, ZHANG Ren. Optimized operation scheme for deposition reduction and enhancement flood control capacity of Three Gorges Project Reservoir[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002(3): 12-19. (in Chinese)
- [11] HE X Y, WANG Z Y, HUANG J C. Temporal and spatial distribution of dam failure events in China[J]. International Journal of Sediment Research, 2008, 23(4): 398-405.
- [12] 陈利群,刘昌明. 黄河源区气候和土地覆被变化对径流的影响[J]. 中国环境科学,2007,27(4):559-565.
CHEN Li-qun, LIU Chang-ming. Influence of climate and land-cover change on runoff of the source regions of Yellow River[J]. China Environmental Science, 2007, 27(4): 559-565. (in Chinese)
- [13] VERBURG P, HECKY R E. Wind patterns, evaporation, and related physical variables in Lake Tanganyika, East Africa[J]. Journal of Great Lakes Research, 2003, 29(2): 48-61.
- [14] 周玉良,陆桂华,吴志勇,等. 基于多重分形的降雨时空解集研究[J]. 四川大学学报:工程科学版,2010,42(2):26-33.
ZHOU Yu-liang, LU Gui-hua, WU Zhi-yong, et al. Study on rainfall space-time downscaling based on multifractal analysis[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2010, 42(2): 26-33. (in Chinese)
- [15] VENEZIANO D, FURCOLO P, IACOBELLIS V. Imperfect scaling of time and space-time rainfall[J]. Journal of Hydrology, 2006, 322(1/2/3/4): 105-119.
- [16] 任国玉,郭军. 中国水面蒸发量的变化[J]. 自然资源学报, 2006,21(1):31-44.
REN Guo-yu, GUO Jun. Change in pan evaporation and the influential factors over China: 1956-2000[J]. Journal of Natural Resources, 2006, 21(1): 31-44. (in Chinese)