

• 水利与土木工程 •

DOI:10.15961/j.jsuese.202000118



本刊网刊

纵向增强体土石坝内置心墙受力安全性分析

梁 军¹, 杨燕伟²

(1.四川省水利厅, 四川 成都 610016; 2.中建长江建设投资有限公司, 四川 成都 610213)

摘 要:纵向增强体土石坝是基于“刚柔相济”建坝思路提出的一种新坝型,在土石坝中设置刚性防渗心墙与原土石坝体一起形成坝体结构。纵向增强体将坝体分为上游临水一侧和下游背水一侧,增强体同时受到上、下游两侧的水土压力作用,起到双向挡土墙的作用。随着上游库水位的变化,作用在增强体上的水土荷载也产生动态变化,从而引起增强体位移方向和大小变化,导致增强体上下游两侧堆石区存在主动力区与被动力区的转换。本文提出了纵向增强体受力安全系数的概念,应用库伦土压力理论分析增强体在竣工期、正常蓄水期和水位骤降3种典型工况下的受力状态,分别给出了3种典型工况下纵向增强体受力安全系数的表达式。在此基础上,从纵向增强体双向挡土墙不同于常规挡土墙单向受力的特点出发,根据增强体受力安全系数研究其与坝坡稳定性之间的关系,提出了临界坝坡时的被动土压力计算方法。研究表明:作为双向挡土墙的增强体无论受力、变形还是自身稳定都与坝坡稳定性有关,纵向增强体蓄水期的被动土压力将随主动压力的增长而得到激发,受力程度也将得到更好地发挥,实现等强增效的力学特点;非临界坝坡设计中采用由本文临界坝坡时计算得到的被动土压力折减系数是偏于安全的,增强体土石坝断面可以进一步优化。

关键词:纵向增强体心墙土石坝;坝体稳定性;心墙体受力安全系数;双向挡土墙;被动土压力系数;坝体优化

中图分类号:TV47

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2020)05-0110-07

Safety Analysis of the Earth-rock Fill Dam with Built-in Longitudinal Reinforced Wall

LIANG Jun¹, YANG Yanwei²

(1. Water Resources Dept. of Sichuan Province, Chengdu 610016, China; 2. China Changjiang Construction Investment Co., Ltd., Chengdu 610213, China)

Abstract: The longitudinal reinforced earth-rock dam was a new type of dam. The dam structure was formed by setting the rigid impermeable core wall in earth-rock dam, that the rigid core-wall played an important role in anti-seepage water and soil pressure and resistance to deformation. The dam was divided into the upstream side and the downstream side by rigid core-wall, and the displacement of the wall and the water and soil load born by the wall changed with the water level on the upstream side. A transition between active and passive stress states was unlocked in the driven area of the upper and lower dam, which was segregated by rigid wall. Based on the Coulomb earth pressure theory and the safety definition of rigid core-wall bearing load that was proposed in this paper, the safety of rigid core-wall as the retaining wall bearing water and soil pressure was analyzed under three conditions of completion, normal water storage and sudden drawdown of water level, and the analytic formulas of safety in the three conditions were provided. On this basis, according to the relation between the wall safety and the dam stability the calculation method of the reduced coefficient of passive earth pressure was proposed. This calculation method considered the role that the rigid core-wall bored bidirectional water and soil pressure front and behind dam. The result showed that the stress conditions deformation and stability of the wall and the dam stability interrelated. The passive earth pressure loaded in the wall was unlocked with the increase of active pressure under normal water storage condition, and the coefficient of passive earth pressure was bigger than the other two conditions. The coefficient of passive earth

收稿日期:2020-02-24

基金项目:四川省重大水利科研项目(2016003)

作者简介:梁 军(1962—),男,教授级高级咨询师,博士。研究方向:土石坝工程。E-mail: liang00jun@163.com

网络出版时间:2020-08-25 11:39:45 网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20200824.1307.002.html>

pressure obtained by the calculation method in this paper was on the safe side, and the sectional shape of dam could be further optimized

Key words: longitudinal reinforced earth-rock dam; stability of the dam; safety factor of core wall under earth pressure; the retaining wall working in two directions; passive pressure coefficient; optimization of earth-rock dam

土石坝因地质地形条件适应性强、筑坝材料容易获得、施工方法成熟等优点,被广泛使用^[1-2]。但土石坝运行安全性低于混凝土重力坝、拱坝等^[2],据统计1956—2000年间,国内土石坝溃决数量占到溃决总数的97.8%^[3-4]。由于中国93%以上的大坝为土石坝且建造于20世纪50~70年代,受当时技术经济条件限制,工程建设先天不足以及后期运行管理不到位,如今不少坝体存在渗漏、开裂、滑坡、白蚁侵蚀等隐患,需进行病害整治和除险加固^[4]。

为有效消除土石坝的上述病险,近年来作者提出土石坝内置混凝土刚性心墙以形成底部通过灌浆固定于坝基的纵向增强体心墙土石坝的新坝型^[5],除用于土石坝病害治理^[6],已经用于新建土石坝^[7]。纵向增强体心墙土石坝中刚性纵向增强体墙体与原土石坝体一起形成坝体结构,共同工作协同受力,如图1所示。增强体由于其刚性特点,除防渗性外,还起结构性作用,具有受力承重、抵抗变形、防止溃坝、增加坝体稳定性的优点。从目前已建成的纵向增强体心墙土石坝看,其运行状况正常。因此,诸如“刚柔相济”的筑坝思路,特别是堆石坝体与刚性心墙的作用机理与受力特性便成为工程实践和理论分析亟待研究解决的问题之一。

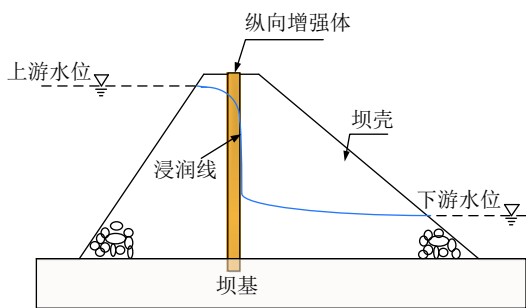


图1 纵向增强体土石坝示意图

Fig. 1 Schematic of the longitudinal reinforced rock fill dam

高江林^[8]研究刚性墙体底端约束形式对墙体受力和变形的影响,发现采用固定约束计算的墙体应力大于采用接触约束的计算结果,尤其是对于墙体承载更为关键的拉应力。侯奇东等^[9]基于方田坝水库的纵向增强体土石坝采用数值计算方法对坝体稳定性及坝坡坡比优化进行研究,结果表明:该坝型防渗性能较好,增强体受力以压应力为主,出现整体性破坏可能性小,坝坡坡比可进一步优化。笔者等针对纵向增强体土石坝的设计理论及应用^[5,7]、坝体受力机理^[9]、运行安全性^[10]和漫顶溢流性能^[11]等开展了系

统研究,取得一些成果,基本完善了该坝型的设计方法并用于新建工程实践^[7]。

作者在文献^[5,9]中从增强体在坝体中起双向挡土墙作用,提出双向挡土墙在主动压力作用下被动区的被动压力被激发从而形成抵抗,呈现等效增强的力学特点;在竣工、正常蓄水、水位骤降等过程中,上下游坝体和增强体作为挡土墙同时发生受力状态的转换,即主动和被动土压力方向反转。王旭东^[12]、梅国雄^[13]、徐日庆^[14]等建立了能够考虑土体变形的朗肯土压力计算模型,并在模型基础上研究了被动土压力折减系数,认为被动土压力折减系数随内摩擦角增大而减小,随变形量增大而增大。关立军^[15]研究了抗剪强度折减土坡的应力与位移,以及确定边坡的安全系数和最危险滑移面的方法。Dou等^[16]在库伦土压力理论上引入干扰度理论研究了挡土墙绕顶部转动时的土压力分布,建立了挡土墙绕顶部转动时非极限状态下的被动土压力计算方法,并通过模型试验进行了验证。Cao等^[17]结合被动状态下受挡墙墙背和滑动面摩擦影响的滑动土楔内主应力传递特点,采用圆弧形主应力迹线描述滑动土楔中最大主应力传递规律,建立出了挡墙被动土压力分析新方法。Hu等^[18]认为强降雨情况下,渗流将使主动土压力急剧增加,被动土压力降低,增加挡土结构失稳概率,有效摩擦角和界面摩擦角的增加都会导致被动土压力的增加。上述研究没有涉及到纵向增强体土石坝内置刚性心墙在受力机理上具有双向挡土墙的特点,也没有考虑在主动压力作用下,被动区被动土压力被激发形成抵抗呈现等强增效的特点。

本文依据土石坝在竣工期、正常蓄水期和水位骤降3种工况下的水库运行方式,按照本文提出的纵向增强体受力安全系数的概念,研究其与坝坡稳定性之间的关系,作为双向挡土墙的增强体无论受力、变形还是自身稳定都与坝坡稳定性密切相关,针对增强体土石坝边坡稳定性所做的相关分析与计算,进而提出了依据临界坝坡计算被动土压力系数;进一步印证了这种坝型较传统土石坝更为优化的结论^[9]。

1 双向挡土墙工作机理分析

纵向增强体土石坝各工况见图2。如图2所示,纵向增强体将坝体分为上游临水一侧和下游背水一侧,增强体同时受到上游侧和下游侧的水压力和土压力作用,起到了双向挡土墙的作用;坝坡上下游荷载变

化将直接影响墙体两侧受到的荷载大小,对墙体的变形及其量值产生影响。

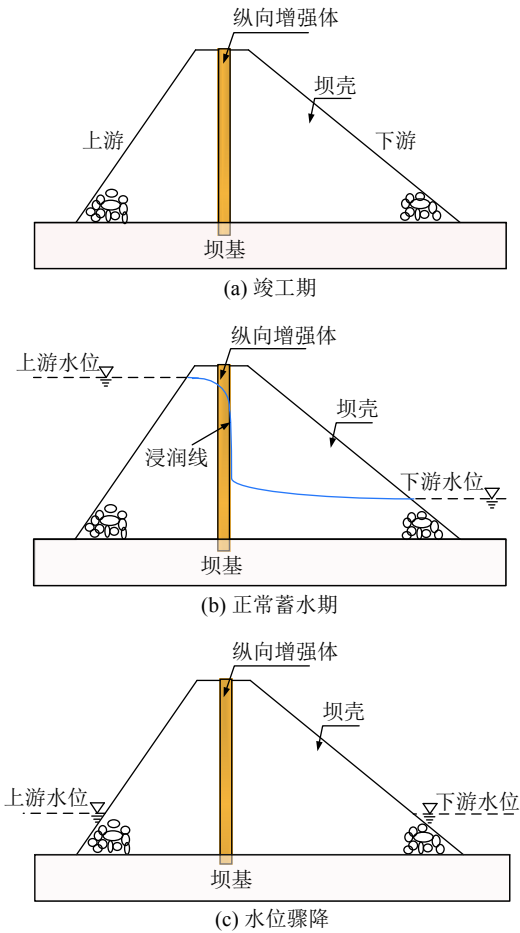


图 2 纵向增强体土石坝工况

Fig. 2 Rock-fill dam in different conditions

图3所示为库水位上升期墙体水平位移方向和大 小随所受土压力方向和大小发生相应变化,与单向挡 土墙相比,增强体作为挡墙的双向受力作用机理更为 复杂,水平位移同时引起墙体两侧土压力性质及大小 发生变化。竣工期,增强体两侧坝体基本无水平位移 或者位移很小,认为增强体两侧土体处于静止土压力 状态。开始蓄水后,上游临水一侧作用在增强体上的 水土压力增大,增强体产生弹性变形具有向下游位移 趋势或者偏移;对上游临水一侧坝体则处于主动土压 力状态,对下游背水一侧坝体则处于被动土压力状态。 水位骤降期即当上游临水一侧从高水位下降到低水 位(或水位消去),临水一侧处于卸载状态,墙体又有 向上游方向变形的趋势或偏移,墙体弹性变形回复原 位,下游区将成为主动土压力区而上游区则是被动土 压力区。可以看出,随着上游临水一侧水位变化,作 用在增强体上的水土荷载也在动态变化,并产生作用 方向与量值的变换,因而增强体两侧上下游堆石区也 存在主动力区与被动力区的转换。

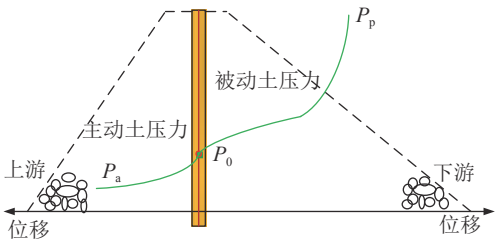


图 3 挡土墙位移与土压力关系曲线

Fig. 3 Relation of earth pressure and relative displacement

2 不同工况下墙体受力安全系数

2.1 墙体受力安全系数的定义

将坝体运行过程中增强体的受力状态归纳为3 个基本工况:一是竣工期,增强体处于坝体内部,受 到两侧基本对称的静止土压力作用;二是正常蓄水 期,因蓄水墙前处于主动土压力而墙后处于被动土 压力;三是水位骤降期,上游水压力通过堆石坝体排 水很快消散,则墙前为被动土压力而墙后为主动土 压力。显然,3种工况下增强体的受力状态、变形和 内力分布不同。借助于边坡抗滑稳定安全系数定义 的思路,定义增强体(挡土墙)受力安全系数S为其所受 被动土压力与主动土压力之比^[7],即:

S = Pp / Pa (1)

式中, P_p为墙体所受到的被动土压力之和(含水压 力), P_a为墙体所受到的主动压力之和。显然,前述竣 工、正常蓄水和水位骤降3种工况下墙体的受力安全 系数是不一样的。

2.2 竣工期墙体受力安全系数

如图2(a)所示,竣工期水库尚未蓄水。此时墙体 处于静止土压力状态,鉴于墙体两侧填料性质不同 (如干密度、内摩擦角、填料组成物质等),理论上讲 仍然存在墙前墙后土压力的不同。

为便于比较,按墙体两侧力学条件的差异,依照 库伦经典挡土墙理论,设定填料密度大的墙体一侧 将产生更大的土压力,从而形成主动压力区域,反之 将形成被动压力区域,此处设定上游堆石体填筑密 度大于下游堆石填筑密度。

上游主动土压力P_{1a}:

P1a = 1/2 * rho1 * g * k1a * H1^2 (2)

式中, rho₁为上游坝体填筑料的密度, k_{1a}为主动土压力 系数, H₁为增强体心墙高度。

k1a = (cos^2 phi1 / (1 + sqrt(sin phi1 sin (phi1 + beta1) / cos beta1)))^2 (3)

式中, φ_1 为上游坝体填筑料的内摩擦角, β_1 为上游坝坡坡角。

下游被动土压力 P_{2p} :

$$P_{2p} = \frac{1}{2} \rho_2 g k_{2p} H_1^2 \quad (4)$$

$$k_{2p} = \frac{k'_2 \cos^2 \varphi_2}{\left(1 - \sqrt{\frac{\sin \varphi_2 \sin(\varphi_2 - \beta_2)}{\cos \beta_2}}\right)^2} \quad (5)$$

式中, ρ_2 为下游坝体填筑料的密度, k_{2p} 为下游坝体被动土压力系数, φ_2 为下游坝体填筑料的内摩擦角, β_2 为下游坝坡坡角, k'_2 为下游坝坡被动土压力折减系数。

由式(1)的定义, 得到竣工期墙体受力安全系数 S :

$$S = \frac{P_{2p}}{P_{1a}} = k'_2 \frac{\rho_2 \cos^2 \varphi_2}{\rho_1 \cos^2 \varphi_1} \cdot \frac{\left(1 + \sqrt{\frac{\sin \varphi_1 \sin(\varphi_1 + \beta_1)}{\cos \beta_1}}\right)^2}{\left(1 - \sqrt{\frac{\sin \varphi_2 \sin(\varphi_2 - \beta_2)}{\cos \beta_2}}\right)^2} \quad (6)$$

式中, 符号意义同前。

2.3 正常蓄水运行期墙体受力安全系数

如图2(b)所示, 正常蓄水时, 墙体受到上游水荷载和坝坡体主动土压力作用而倾向下流变形, 同时又受到下游坝坡体被动土压力作用, 即上游处于主动土压力区而下游处于被动土压力区, 根据库伦土压力理论, 可以如上述列出主动与被动土压力计算式(此处从略), 最后由式(1)得到正常蓄水运行期的受力安全系数 S_e 为:

$$S_e = k'_2 \frac{\rho_2 \cos^2 \varphi_2}{A \cdot \left[1 - \sqrt{\frac{\sin \varphi_2 \sin(\varphi_2 - \beta_2)}{\cos \beta_2}}\right]^2} \quad (7)$$

$$A = \rho_w + \frac{\rho'_1 \cos^2 \varphi_1}{\left[1 + \sqrt{\frac{\sin \varphi_1 \sin(\varphi_1 + \beta_1)}{\cos \beta_1}}\right]^2} \quad (8)$$

式中: ρ_w 为水的密度, 取值为1; ρ'_1 为上游坝体堆石填筑料浮密度; 其余符号意义同前。

2.4 水位骤降期墙体受力安全系数

如图2(c)所示, 在上游水位发生骤降时, 墙体由于上游水荷载卸载就有向上游变位的倾向, 上游坝坡体成为被动土压力区, 下游坝坡体则变为主动土压力区。考虑最危险的水位骤降工况即上游水荷载被卸去同时上游坝坡体尚未排水而整体处于饱水状态。同样, 依据库伦理论, 由式(1)得出水位骤降期的受力安全系数 S_d 为:

$$S_d = \frac{k'_1 \rho_{1m} \cos^2 \varphi_1}{\rho_2 \cos^2 \varphi_2} \left[\frac{1 + \sqrt{\frac{\sin \varphi_2 \sin(\varphi_2 + \beta_2)}{\cos \beta_2}}}{1 - \sqrt{\frac{\sin \varphi_1 \sin(\varphi_1 - \beta_1)}{\cos \beta_1}}} \right]^2 \quad (9)$$

式中, k'_1 为上游坝坡体的被动土压力折减系数, ρ_{1m} 为上游堆石饱和密度, 其余符号意义同上。

3 3种工况下被动土压力系数计算与应用

由以上分析可知, 3种工况的墙体受力安全系数 S 与筑坝料内摩擦角 φ 和坝坡坡角 β 等指标有关, 存在下列4种组合关系。

3.1 $\varphi_1 < \beta_1$ 或 $\varphi_2 < \beta_2$ 的情况

由式(6)~(9)可知上下游坝坡坡角不宜大于坝坡体材料的内摩擦角, 即使 $\varphi_1 < \beta_1$ 或 $\varphi_2 < \beta_2$, 否则公式平方根号是负数, 挡土墙的受力安全系数无意义。此时, 相应的坝坡稳定分析(诸如条分法)计算得稳定安全系数 K 不大于1.0, 即坝坡处于临界或不稳定状态。这种情况实际上不允许存在。

3.2 $\varphi_1 = \beta_1$ 或 $\varphi_2 = \beta_2$ 的情况

这一情况称为临界坝坡, 此时式(6)~(9)可对应化简为式(10)~(12)。

$$S = k'_2 \frac{\rho_2 \cos^2 \varphi_2}{\rho_1 \cos^2 \varphi_1} (1 + \sqrt{2} \sin \varphi_1)^2 \quad (10)$$

$$S_e = k'_2 \frac{\rho_2 \cos^2 \varphi_2}{\rho_w + \frac{\rho'_1 \cos^2 \varphi_1}{(1 + \sqrt{2} \sin \varphi_1)^2}} \quad (11)$$

$$S_d = k'_1 \frac{\rho_{1m} \cos^2 \varphi_1}{\rho_2 \cos^2 \varphi_2} (1 + \sqrt{2} \sin \varphi_2)^2 \quad (12)$$

显然, 临界坝坡情况下, 坝体稳定安全系数 K 值等于或接近于1.0。在这种情况下, 设定墙体受力安全系数也等于或接近于1.0, 即: $S=1$, $S_e=1$, $S_d=1$ 。

按这一思路由式(10)~(12)可得临界坝坡竣工期、正常蓄水运行期和水位骤降期被动土压力系数, 见式(13)~(15)。

$$k'_2 = \frac{\rho_1 \cos^2 \varphi_1}{\rho_2 \cos^2 \varphi_2 (1 + \sqrt{2} \sin \varphi_1)^2} \quad (13)$$

$$k'_2 = \frac{\rho_w + \frac{\rho'_1 \cos^2 \varphi_1}{(1 + \sqrt{2} \sin \varphi_1)^2}}{\rho_2 \cos^2 \varphi_2} \quad (14)$$

$$k'_1 = \frac{\rho_2 \cos^2 \varphi_2}{\rho_{1m} \cos^2 \varphi_1 (1 + \sqrt{2} \sin \varphi_2)^2} \quad (15)$$

假定在一个材料均质且上下游对称的坝体中设置纵向增强体的理想情况; 实际施工可以采用圪卡斯钻机建造连续防渗墙, 操作简易实施性强。则式(13)~(15)可以进一步简化为式(16)~(18):

$$k'_2 = \frac{1}{(1 + \sqrt{2} \sin \varphi)^2} \quad (16)$$

$$k_2' = \frac{\rho_w}{\rho \cos^2 \varphi} + \frac{\rho'}{\rho (1 + \sqrt{2} \sin \varphi)^2} \quad (17)$$

$$k_1' = \frac{\rho}{\rho_m (1 + \sqrt{2} \sin \phi)^2} \quad (18)$$

式中, φ 为均质坝体材料的内摩擦角, ρ 为坝体材料的天然密度, ρ' 坝体材料的浮密度, ρ_m 坝体材料的饱和密度。

由式(16)计算的竣工期被动压力折减系数与土工挡土墙设计规范^[19]建议值见表1, 竣工期被动土压力折减系数与坝料内摩擦角变化关系如图4所示。从表1中可以看出, 计算值小于规范值。

表 1 竣工期被动土压力折减系数值

Tab. 1 Reduced coefficient of passive earth pressure					
$\varphi/(^\circ)$	k_1'		$\varphi/(^\circ)$	k_2'	
	规范	本文		规范	本文
15	0.75	0.54	35	0.41	0.30
20	0.64	0.45	40	0.35	0.27
25	0.55	0.39	45	—	0.25
30	0.47	0.34			

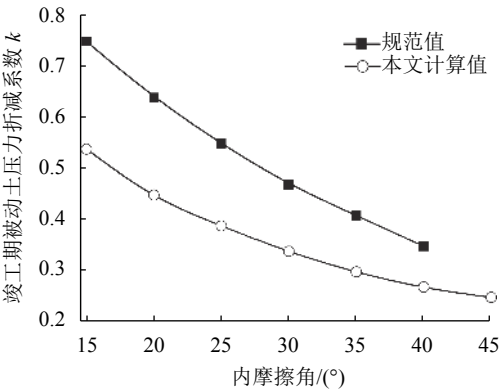


图 4 竣工期被动土压力折减系数

Fig. 4 Reduced coefficient of passive earth pressure in dam completion

设坝体填筑密度分别取值1.6、1.7、1.8、1.9、2.0、2.1、2.2 t/m³, 相应的浮密度分别为0.7、0.8、0.9、1.0、1.1、1.2、1.3 t/m³, 饱和密度取为1.7、1.8、1.9、2.0、2.1、2.2、2.3 t/m³。按式(17)和(18)分别计算正常蓄水期和水位骤降期的被动土压力系数, 该系数与坝料内摩擦角变化关系分别如图5~6所示。可见, 仅在竣工期和水位骤降期被动土压力系数是折减的, 而在蓄水期, 被动土压力折减系数却是增加的, 反映出上游水荷载作为主动力对下游被动区的被动土压力是一种激励, 主动力与被动力之间存在所谓等强增效的关系。

从以上计算可知:

1) 被动压力折减系数不仅与坝体材料的物理力学性质密切相关, 也与坝体的受力条件(工况)有关,

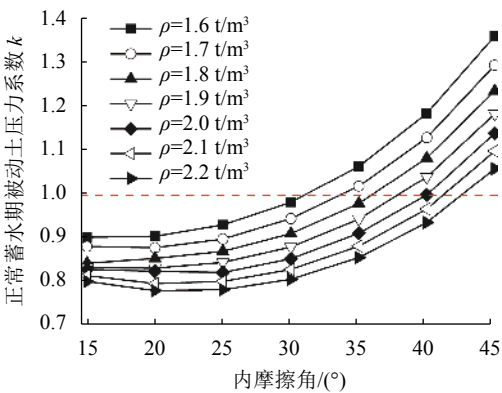


图 5 正常蓄水期被动土压力系数

Fig. 5 Reduced coefficient of passive earth pressure in the storage period

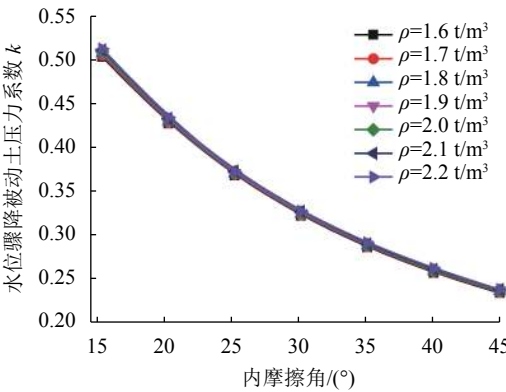


图 6 水位骤降期被动土压力系数

Fig. 6 Reduced coefficient of passive earth pressure in water rapid drawdown condition

不同工况下被动土压力系数计算式不同。

2) 在竣工和水位骤降工况, 被动土压力系数是随坝坡坡角(或坝料内摩擦角)的变大而减小的, 是折减的, 与文献[12–14]的研究结论一致; 而在蓄水工况情况正相反, 被动土压力系数随着坝坡坡角增大而增大。分析原因: 被动土压力系数实际反映了在主动土压力作用下, 被动土压力作为一种荷载作用在墙体上使墙体产生较为顽强的抵抗所致, 只有水荷载引起的主动压力才能够最大限度地激发被动土压力的受力响应; 也就是正常蓄水工况下被动压力与主动压力有着一种“等强增效”的力学特点。

3) 正常蓄水工况, 不同筑坝料对应 k 值为1.0的坡角分布在32°~41°之间(图5), 在这个坡角范围墙后被动压力随墙前主动压力的作用而得以等强发挥, 相应坝坡坡比为1.0:1.6~1.0:1.2。

3.3 $\varphi_1 \gg \beta_1$ 或 $\varphi_2 \gg \beta_2$ 的情况

这种情况下坝坡坡角远小于坝料内摩擦角, 坝坡稳定能够确保, 边坡稳定系数 K 远大于1.0或规范取值^[20]。由于 $\varphi_1 \gg \beta_1$ ($\varphi_2 \gg \beta_2$), 所以 β_1/φ_1 (β_2/φ_2) $\rightarrow 0$, 墙体受力安全系数 S 可以简化为:

竣工期:

$$S = k'_2 \left[\frac{1 + \sin \varphi_1}{1 - \sin \varphi_2} \right]^2 \quad (19)$$

正常蓄水期:

$$S_e = k'_2 \frac{\rho_2 \cos^2 \varphi_2}{(1 - \sin \varphi_2)^2 \left(\rho_w + \rho'_1 \left(\frac{\cos \varphi_1}{1 + \sin \varphi_1} \right)^2 \right)} \quad (20)$$

水位骤降期:

$$S_d = k'_1 \frac{\rho_{1m}}{\rho_2} \left[\frac{\cos \varphi_1 (1 + \sin \varphi_2)}{\cos \varphi_2 (1 - \sin \varphi_1)} \right]^2 \quad (21)$$

算例1: 有一内置薄壁挡墙坡体, 土坡很缓, 坡角 β_1 和 β_2 均为 5° ; 坝料内摩擦角 φ_1 和 φ_2 取 36° 和 38° ; $\rho_1=1.65 \text{ t/m}^3$, $\rho_2=1.68 \text{ t/m}^3$; $\rho_{1m}=1.78 \text{ t/m}^3$; $\rho'=0.78 \text{ t/m}^3$ 。由于 $\varphi_1 \gg \beta_1$ 或 $\varphi_2 \gg \beta_2$, 墙体受力安全系数可采用式(19)~(21)计算。分别采用水工挡土墙规范^[19]被动土压力折减系数建议值和本文临界坝坡被动土压力折减系数计算值进行墙体受力安全系数计算。

被动土压力折减系数 k'_1 和 k'_2 按表1规范取值为0.38。计算结果表明, 竣工期 $S=6.48$; 正常蓄水期 $S=2.23$; 水位骤降期 $S=6.52$ 。而采用临界坝坡情况下计算得到的 k'_1 和 k'_2 值(见图3~5), 竣工期, 取 $k'_2=0.29$, 有 $S=4.95$; 正常蓄水期, 取 $k'_2=1.10$, 有 $S=6.18$; 水位骤降期, 取 $k'_1=0.277$, 有 $S=2.81$ 。

从算例1计算结果可以看出:

1) k' 按规范取值计算的正常蓄水期 S 值较小。分析原因为: 规范被动土压力折减系数取值没有反映等强增效特点;

2) 本文方法 k' 按照工况取不同的值, 墙体安全系数计算结果更为合理;

3) 两种折减系数取值方法计算的 S 值均大于1.0, 说明在 $\varphi \gg \beta$ 情况下, 墙体受力是安全的。

3.4 $\varphi_1 > \beta_1$ 或 $\varphi_2 > \beta_2$ 的情况

坝边坡的坡角小于坝料内摩擦角(即 $\varphi_1 > \beta_1$ 或 $\varphi_2 > \beta_2$)时, 称为非临界坡体, 这是最一般最常见的坡体结构, 验证表明, 只要坝坡的坡角不超过材料的内摩擦角, 通过极限平衡计算的坝坡也处于稳定安全的状态。

算例2: 考虑堆石坝坡, 坡体内摩擦角 φ_1 和 φ_2 分别 38° 和 36° , $\rho_1=2.13 \text{ t/m}^3$, $\rho_2=2.12 \text{ t/m}^3$; $\rho_{1m}=2.35 \text{ t/m}^3$; $\rho'_1=1.35 \text{ t/m}^3$ 。按式(6)~(9)计算, 其中被动土压力系数 k'_1 和 k'_2 值由图3~5选择, 选用 k' 值分别为0.290(竣工期)、0.916(蓄水期)、0.277(骤降期), 由此得到墙体3种工况的受力安全系数 S 与不同坝坡坡角 β 之间的关系如图7所示, 图7中同时罗列了方田坝、仓库湾两座堆石坝所做的坝坡稳定安全系数计算成果^[21-22]。

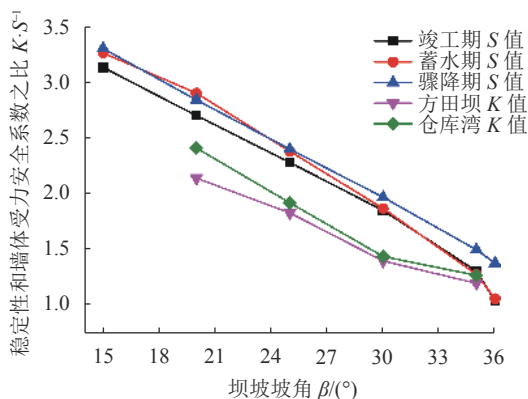


图7 墙体受力状态和坝坡稳定的相关性

Fig. 7 Correlation between stress state of wall and stability of dam slope

从图7可知:

1) 3种工况墙体的受力安全系数随坝坡坡角的增大而降低, 只要保持坡角 β 不超过堆石内摩擦角 φ , 受力安全系数 S 亦将大于1.0~1.2以上, 说明墙体受力状况是安全的。

2) 在 $\beta=\varphi$ (此处 $\beta_2=\varphi_2=36^\circ$)的临界坝坡, 其 S 值已经达到1.05, 说明不宜采取 $\beta=\varphi$ 的临界坝坡设计。

3) 水位骤降对增强体而言是一种卸荷, 因而墙体受力的安全余度较大。

4) 通过本算例与方田坝和仓库湾两座堆石坝边坡稳定分析结果对比, 墙体受力安全系数 S 值与边坡稳定安全系数 K 值之间存在某种同一性或相关性。由于 S 总大于 K , 或者说 S 是 K 的外包线, 说明墙体的受力安全性能一旦满足, 那么, 坝坡的稳定也必然得到满足。

4 结论

1) 纵向增强体作为坝内双向作用薄壁挡土墙其受力安全系数与坡体稳定安全系数存在相同的变化规律, 这种同一性有待进一步深入研究, 以便分析其原理。

2) 纵向增强体土石坝内墙挡土墙在蓄水期的被动土压力将随水荷载引起的主动压力的增长而得到激发, 其受力程度也将得到更好地发挥, 从而实现等强增效的力学特点。

3) 临界坝坡计算得出的被动土压力折减系数值是增强体土石坝的最大折减(蓄水工况是最大增加), 在非临界坝坡设计中采用由本文临界坝坡时计算得到的被动土压力折减系数是偏于安全的。建议进一步研究水工挡土墙设计规范中被动土压力折减系数的取值和适用条件。

4) 正常蓄水工况被动土压力折减系数为1.0时对应着不同筑坝材料的坝坡坡角为 $32^\circ \sim 41^\circ$, 对应坡比为1.0:1.6~1.0:1.2, 这对增强体土石坝坝体断面优化设计提供了依据, 从而使坝体断面更优更经济。

参考文献:

- [1] 贾金生,袁玉兰,马忠丽.2005年中国与世界大坝建设情况[C]/中国水力发电工程学会水水泥沙专业委员会,中国水力发电工程学会水水泥沙专业委员会第七届学术讨论会论文集(上册).成都:四川科学技术出版社,2007.
- [2] Jia Jinsheng, Yuan Yulan, Zheng Cuiying, et al. Dam construction in China: Statistics progresses and concerned issues[J]. *Water Power*, 2010, 36(1): 6–10. [贾金生,袁玉兰,郑瑞莹,等.中国水库大坝统计和技术进展及关注的问题简论[J]. *水力发电*, 2010, 36(1): 6–10.]
- [3] 中华人民共和国水利部,中华人民共和国国家统计局.第一次全国水利普查公报[N].北京:中国水利水电出版社,2013.
- [4] 李雷,王仁钟,盛金保,等.大坝风险评价与风险管理[M].北京:中国水利水电出版社,2006.
- [5] Liang Jun. Design principle and method for the earth rock fill dam with longitudinal reinforcements[J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*, 2018, 46(2): 128–133. [梁军.纵向增强体土石坝的设计原理与方法[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(2): 128–133.]
- [6] Wei Min, Zhou Heqing, Zhang Ying. Analysis on seepage and its treatment of Dazhu-River asphalt concrete core dam[J]. *Dam and Safety*, 2014(5): 45–50. [位敏,周和清,章赢.大竹河水库沥青混凝土心墙坝渗漏分析及处理方案研究[J]. *大坝与安全*, 2014(5): 45–50.]
- [7] Liang Jun, Zhang Jianhei, Zhao Yuanhong, et al. Application of the designing principle and method of longitudinal reinforced rock fill dam in Fangtianba reservoir[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2019, 47(4): 345–351. [梁军,张建海,赵元弘,等.纵向增强体土石坝设计理论在方田坝水库中的应用[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(4): 345–351.]
- [8] Gao Jianglin. An analysis of the impact of different wall bottom constraint forms on stress computation of enclosed cut-off wall[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2016(2): 1117–121. [高江林.底端约束对封闭式坝体防渗墙应力计算的影响[J]. *中国农村水利水电*, 2016(2): 1117–121.]
- [9] Hou Qidong, Liang Jun, Li Haibo, et al. Stability analysis on the new-type longitudinal reinforced earth-rock fill dam[J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2019, 30(6): 164–171. [侯奇东,梁军,李海波,等.纵向增强体新型土石坝稳定性研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2019, 30(6): 164–171.]
- [10] Liang Jun. New type of dam for longitudinal reinforced rockfill dam and its operation safety analysis[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2019, 51(2): 38–44. [梁军.纵向增强体土石坝新坝型及其安全运行性能分析[J]. *工程科学与技术*, 2019, 51(2): 38–44.]
- [11] Liang Jun, Cheng Xiaojing. Analysis on the overtopping safe operation performance of longitudinal reinforced rock-fill dam[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2019, 47(3): 238–242. [梁军,陈晓静.纵向增强体土石坝漫顶溢流安全性能分析[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(3): 238–242.]
- [12] Wang Xudong, Mei Guoxiong, Zai Jinmin. The study on reduced coefficient of passive earth pressure[J]. *Industrial Construction*, 2003, 33(1): 29–31. [王旭东,梅国雄,宰金珉.被动土压力折减系数的研究[J]. *工业建筑*, 2003, 33(1): 29–31.]
- [13] Mei Guoxiong, Zai Jinmin. Rankine earth pressure model considering deformation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001(6): 851–854. [梅国雄,宰金珉.考虑变形的朗肯土压力模型[J]. *岩石力学与工程学报*, 2001(6): 851–854.]
- [14] Xu Riqing, Chen Yekai, Yang Zhongxuan, et al. Experimental research on the passive earth pressure acting on a rigid wall[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2002, 24(5): 569–575. [徐日庆,陈页开,杨仲轩,等.刚性挡土墙被动土压力模型试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2002, 24(5): 569–575.]
- [15] Guan Lijun. Study on soil slope stability analysis method based on strength reduction[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2003. [关立军.基于强度折减的土坡稳定分析方法研究[D].大连:大连理工大学,2003.]
- [16] Dou Guotao, Xia Junwu, Yu Wenjie, et al. Non-limit passive soil pressure on rigid retaining walls[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2017, 27(3): 581–587.
- [17] Cao Wengui, Liu Tao, Xu Zan. Calculation of passive earth pressure using the simplified principal stress trajectory method on rigid retaining walls[J]. *Computers and Geotechnics*, 2019(109): 108–116.
- [18] Hu Z, Yang Z X, Wilkinson S P, et al. Analysis of passive earth pressure modification due to seepage flow effects[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2018, 55(5): 666–679.
- [19] 中华人民共和国水利部.水工挡土墙设计规范:SL379[S].北京:中国水利水电出版社,2007.
- [20] 中华人民共和国水利部.碾压式土石坝设计规范:SL274[S].北京:中国水利水电出版社,2001.
- [21] 王小雷.四川省通江县方田坝水库扩建工程初步设计报告[R].成都:四川省水利水电设计勘测设计研究院,2015.
- [22] 陈立宝.四川省通江县仓库湾水库初步设计报告[R].成都:四川大学设计院,2018.

(编辑 张 琼)

引用格式: Liang Jun, Yang Yanwei. Safety analysis of the earth-rock fill dam with built-in longitudinal reinforced wall[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2020, 52(5): 110–116. [梁军,杨燕伟.纵向增强体土石坝内置心墙受力安全性分析[J]. *工程科学与技术*, 2020, 52(5): 110–116.]