

•水利与土木工程•

DOI:10.15961/j.jsuese.201800882

纵向增强体土石坝新坝型及其安全运行性能分析

梁 军

(四川省水利厅, 四川 成都 610016)

摘 要:在总结大量水库大坝加固实践的基础上提出一种新坝型——纵向增强体土石坝,即以常规土石坝为依托,在其内部“插入”集防渗与受力为一体的刚性结构体(纵向增强体)。增强体既起到防渗体系作用,又起到结构体作用,力求克服传统土石坝(如均质坝、土质心斜墙坝等)在漫顶、渗漏、裂缝等原发性病险,以及滑坡、变形、白蚁等次生性灾害,特别针对传统土石坝存在的洪水漫顶溃坝、损毁、失效等灾难提出了尽可能的解决方案。从理论上简要分析了纵向增强体土石坝相对于常规土石坝抵御洪水漫顶破坏的安全程度,初步阐述这一新坝型安全运行的机理,分析洪水漫顶造成下游堆石料被冲刷流失,形成坝体冲坑等水力学过程,冲坑的逐步形成将恶化增强体的受力条件,最终导致增强体上游侧受力而下游侧临空的受力状态,从而影响到整个坝体是否溃决。计算表明,增强体作为刚性结构体延缓了坝体的溃决,并为工程抢险和下游群众转移争取到足够的时间。纵向增强体土石坝在工程建设投资与工期、施工工艺与材料选取方面均有一定优势,对今后建坝或对已建成土石坝的除险加固有着十分重要的意义和广阔的应用前景。

关键词:新坝型;纵向增强体土石坝;安全运行;漫顶溃决;冲刷深度;力学强度

中图分类号:TV65

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2019)02-0038-07

New Type of Dam for Longitudinal Reinforced Rockfill Dam and Its Operation Safety Analysis

LIANG Jun

(Water Resources Dept. of Sichuan Province, Chengdu 610016, China)

Abstract: After a long time operation, a conventional earth rockfill dam (e.g. homogeneous dam or core wall dam) may suffer from a lot of dam diseases such as dam-break, overtopping, landslides and leakage. On the basis of a large number of practices of rebuilding and strengthening the medium and small-sized dams, a new type of dam, a longitudinal reinforced rockfill dam, is proposed. This new type of dam has triple functions of seepage control, stress resistance and deformation resistance. It also has significant advantages in both construction material selection and construction technology when compared to a conventional earth rockfill dam. Based on the theoretical research and successful practice of the new dam construction technology by placing rigid structures (also called longitudinal reinforcements) in conventional rockfill dams, the factors of safety against overtopping compared with that of the unreinforced rockfill dams was briefly analyzed in this paper. The hydraulic process of the overtopping is presented, during which the downstream material is washed away and forming a scour hole in the dam. The progressive development of the scour hole will change the stress distribution of the reinforced body. Eventually the reinforced body will reach a state in which it is subjected to the pressure from the upstream when the toe zone is empty. The advantage of this new dam is that it changes the conventional overtopping failure mode to the progressive scour hole development mode, therefore delays the dam breaking, and provides time for repair and evacuation. The longitudinal reinforced rockfill dam has important and broad applications in the construction of new dams or strengthening of existing rockfill dams.

Key words: new type of dam; longitudinal reinforced rockfill dam; safe operation; overtopping failure; depth of scour; mechanical strength

一般而言,土石坝是由岩土散粒体材料通过外力分层填筑压密而形成的,但是这种“柔性”的土石

坝安全运行性能比“刚性”重力坝差,存在运行风险。据中国大坝学会统计,国内土石坝溃坝案例3 496

收稿日期:2018-07-31

基金项目:国家重点研发计划项目资助(2017YFC1502504)

作者简介:梁 军(1962—),男,博士,高级工程师,教授级高级咨询师。研究方向:土石坝工程。E-mail: 130762101@qq.com

网络出版时间:2019-02-27 09:39:31 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20190226.1424.002.html>

<http://jsuese.ijournals.cn>

<http://jsuese.scu.edu.cn>

个,其中:四川省最多,达396个,其次为山西省288个,湖南省287个,云南省234个。这些溃决大多发生于中低坝,主要原因是洪水漫过坝顶导致的溃决。从机理上讲,土石坝漫顶溃决是遭遇超标洪水(或者泄水设施出了故障不能有效泄洪),洪水从坝顶翻水漫顶冲刷下游坝坡,使得由外部强力压密的散粒体组成的下游坝体被水流逐步冲刷崩解而出现的垮塌甚至溃决的过程。据统计,截止到2013年,国内共有大坝84 000多座,其中90%以上为中小型坝,土石坝最为常见,以四川为例,2013—2014年统计四川省境内共有中小型坝7 878座,其中,土石坝占91.2%,共7 186座,具体分布情况如图1所示。这些土石坝中,坝高低于70 m的中低坝又占了95%,这些中低土石坝大多数修建于20世纪60、70年代,分布在经济与社会发展水平相对发达地区,水库管理水平、安全运行状况、病害整治程度等情况十分复杂。随着时间的推移,由于受土石坝自身特性及施工技术条件的限制,60%以上的土石坝都存在渗漏、稳定、裂缝、白蚁侵蚀等各种不同程度的病险隐患。这些水库大坝的运行风险也较高,每年汛期耗费大量人力物力用于巡查、检测和防汛等工作。

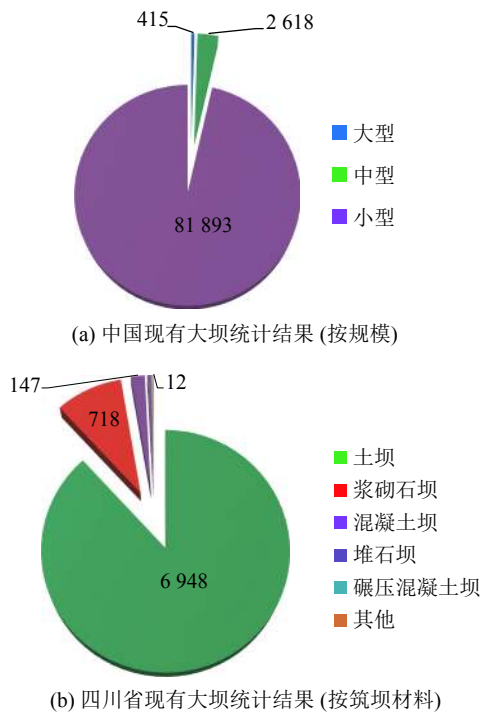


图1 大坝统计示意图

Fig. 1 Statistical chart of dams in China

鉴于土石坝占比高、安全运行风险高、汛期防洪压力大、病险情况复杂以及安全鉴定、除险加固存在实际困难等情况,对这类坝从结构上进行适当改造势在必行。作者结合大量中小水库整治工作的实践和理论分析^[1],通过“刚柔相济”对常规土石坝进行

“改良”,提出一种纵向增强体土石坝的新坝型,以期能够增强土石坝的防渗、受力和抵抗变形能力,有效减小土石坝周期性重复治理和可能出现的溃坝灾害,降低或延缓土石坝发生洪水漫顶时的溃坝风险,延长土石坝安全运行周期。

理论分析初步表明这一新坝型确实提高了常规土石坝的安全运行水平和抗溃坝风险能力。

1 纵向增强体土石坝及其特性

纵向增强体土石坝^[1]是以常规土石坝为依托,在其内部“插入”集防渗与受力为一体的刚性结构体(即纵向增强体)构成的一种新坝型,如图2所示。增强体既起到防渗体系作用,能有效降低浸润线减小渗漏;又起到结构体作用,能够增强坝体的稳定性、提高应力变形能力。

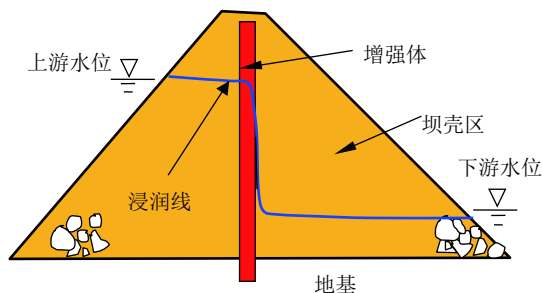


图2 纵向增强体土石坝示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the longitudinal reinforced rockfill dam

纵向增强体土石坝在施工工艺、防渗、受力等方面较常规土石坝有较大区别,其主要体现在以下方面。

1.1 工艺特性

纵向增强体土石坝通常采用先整体连续填筑坝体,后通过中间掏槽浇筑纵向增强体的施工工艺。如图3所示,增强体可以采用技术十分成熟的诸如地下连续墙、圪卡石混凝土防渗墙、高压喷射防渗墙等的施工工艺,在坝体中浇筑形成一道整体刚性防渗结构体^[1]。



图3 增强体浇筑现场(通江方田坝)

Fig. 3 Construction scene of longitudinal reinforced rockfill dam (Fangtianba project in Tongjiang county)

常规土石坝对心墙防渗料的品质、施工工艺均有较高要求。很多坝址区附近没有满足黏土心墙设计要求的黏土料,如方田坝坝址区50 km范围内无成片满足设计要求的黏土可供开采。而沥青混凝土心墙施工工艺要求较高,很多沥青混凝土心墙坝因为施工工艺较差、质量控制不到位而出现变形开裂、水力劈裂等现象。如英国的Balderhead坝^[2],是一座狭窄土质心墙堆石坝,坝高48 m;1966年初水库达最高水位332.3 m,此时渗流量突然增加;1967年发现其坝顶上游边缘塌陷,心墙内存在较大范围的冲蚀破坏区。经研究分析,裂缝在水库蓄水前并不存在,在心墙上游面的水压作用下产生水力劈裂裂缝。糯扎渡水电站大坝在坝体填筑完成后水库蓄水到最高蓄水位^[3],之后两年库水位季节性变动40~70 m,检测发现坝体产生横向和纵向裂缝。

由于纵向增强体土石坝采用先填筑坝体后掏槽浇筑增强体结构的方法,相比以往类型的土石坝而言,因为可以先整体连续填筑坝体,不受心墙施工的影响,施工速度更快,可在保证工程质量的前提下,有效缩短施工工期,降低工程投资,将土石坝坝工建设水平提高到一个新的档次。尤其是对于老坝扩建或改建工程来说,可以不用拆除原有坝体,直接在老坝基础上加高培厚坝体并采用中间掏槽浇筑增强体的施工方法,可显著提高施工效率,有效节省工程投资。

1.2 防渗性能

渗流控制是土石坝的一大关键难题。常规土石坝通常采用黏性土作为防渗材料,由于土体颗粒间存在大量的孔隙,具有一定的透水性,水库蓄水后,在水压力的作用下,水流必然会沿着坝身土料、坝基土体和坝端两岸地基中的孔隙渗向下游,造成坝身、坝基和绕坝的渗漏。当渗流量在设计控制的范围之内,对大坝任何部位的土体都不会产生渗透破坏,称之为正常渗流,此时渗流量较小,水质清澈,不含土壤颗粒;与之相反,如果渗流量大,水质浑浊,透明度高,含有土壤杂质颗粒,此时对坝体就具有破坏作用,流土的冲刷会使坝体发生渗透破坏,这种影响蓄水兴利的渗流则为异常渗流,对土石坝的安全至关重要^[4]。据国内统计,从241座大型水库发生的1 000次事故分析,由渗流破坏所引起的占32%;从2 391座水库失事分析,由渗流破坏造成垮坝的占29%;总体上,在中国土石坝因为渗流破坏而造成的事故或垮坝的现象占30%左右^[5]。例如,河北省邱庄水库,该水库土石坝为均质土坝,坝高24.8 m,覆盖层上部为3~6 m的天然土层;在1960年初蓄水后,造成了天然铺盖大面积的单独塌坑;同时,砂卵石层的

不均匀沉陷导致天然铺盖上出现了许多条裂缝,坝后管涌现象严重,此后多次进行加固处理,塌坑和裂缝依然出现^[5]。又如山西省东榆林水库,该水库土石坝为砂质壤土均质坝,主坝坝高为15.5 m,副坝坝高为8.5 m,主坝设截水槽,副坝坝基未做防渗处理,下游排渗沟未铺反滤层;1978年12月至1979年2月蓄水期间,副坝下游排渗沟出现浑水,渗水量明显增加;1979年4月初蓄水至1 039.5 m时,排渗沟渗水塌坡,4月25日晚,副坝溃决,溃口长129 m,坝基冲深6 m^[5]。

纵向增强体土石坝通过在常规土石坝中“插入”刚性结构体,如地下连续墙、高压喷射防渗墙等,在底部通过灌浆与坝基持力层连接为一整体,并在坝体中形成一道整体防渗心墙,能够有效降低土石坝浸润线高度,提高土料及土石混合料防渗的界限,提高大坝的防渗作用,避免坝体由于流土或管涌等造成渗透破坏。同时,可以切断白蚁沿浸润线附近贯通土石坝的穴路,能够避免土石坝建成后耗时费力且花费巨大的白蚁防治工作,节省了常规土石坝的日常运行资金投入,延长了土石坝的使用寿命,提高了土石坝的整体安全性。

1.3 抗变形性能

常规土石坝多采用黏土心墙作为防渗体,在施工期,随着坝体填土逐渐加高,下部黏性填土体受到上部填土的压力作用,往来不及固结,因此出现超静孔隙水压力^[6]。特别是对于黏性大、含水量高或接近饱和的土更是如此。这种情况下,边坡高度增加,剪应力不断加大,填土的有效应力和抗剪强度却增加不多,而易于导致土坡失稳。在刚竣工时达到最不利的程度,严重影响大坝的稳定。另外在大坝运行过程中,由于黏性土料防渗性能有限,对降低下游坝坡渗流曲线能力有限,且常常会由于变形不协调而出现心墙开裂渗漏的情况,影响坝坡变形稳定。而增强体由防渗性能较好的混凝土墙或高压喷射防渗墙构成,能够有效截断渗漏通道,降低浸润线,确保下游坝坡长期处在较低水位运行,因此,理论上可以提高坝坡的坡度,以减小工程量。

同时,纵向增强体土石坝也不同于常规的塑性混凝土心墙或沥青混凝土心墙土石坝,因为后者只考虑心墙的防渗作用。纵向增强体既是防渗体系又是结构体,不仅有利于提高土石坝的防渗性能,也能够发挥受力及抵抗变形性能,提高土石坝的整体稳定性。

2 纵向增强体土石坝安全运行性能分析

这里,安全运行性能主要是指当土石坝遭遇超标洪水漫顶时是否产生溃坝。

2.1 洪水漫顶水力学分析

常规土石坝在遭遇洪水或超标洪水时如果泄水设施再出现故障, 坝体安全将受到严重威胁, 此时, 洪水漫顶翻水将在所难免, 在多数情况下, 大坝面临溃坝风险, 将对河道下游城镇居民和生产生活设施构成极大危害。针对常规土石坝的漫顶溃坝分析已有大量研究^[7-10]。试验证明, 纵向增强体土石坝在洪水漫顶发生后的冲刷过程如图4所示。图4(a)为洪水漫顶冲刷开始; 图4(b)为洪水冲刷致使坝顶消失并使增强体下游侧出现冲刷破坏且开始形成冲坑的情形; 图4(c)为洪水落差增大, 冲坑继续发展, 增强体下游侧开始形成临空面; 图4(d)为冲坑达到最大的情形。

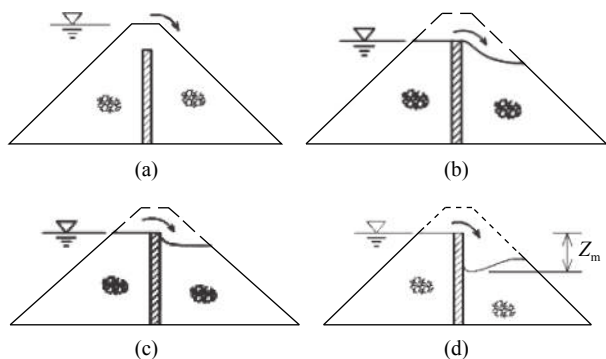


图4 增强体土石坝漫顶溃决过程

Fig. 4 Process of overtopping failure development of longitudinal reinforced rockfill dam

目前未见专门针对堆石料的冲刷试验研究报告, 根据本次试验和比照有关碎裂岩体的冲刷试验研究成果^[11-12], 初步认为碾压堆石与碎裂岩体的冲刷性能具有相似性, 最大的不同在于影响深度和有关冲刷参数的选择。经振动碾压密实的堆石坝体下游侧冲刷坑最大深度 Z_m 由式(1)计算确定:

$$Z_m = \Phi H^m q^n \bar{D}^s \quad (1)$$

式中: Φ 为冲刷系数, 与筑坝料的物性及密实程度、级配等有关, 取 $\Phi=3.25 \sim 4.25$; H 为上下游水位差; q 为漫顶时的单宽流量; \bar{D} 为下游堆石料平均粒径; m 、 n 、 s 均为试验系数, $m=0.16 \sim 0.30$, $n=0.42 \sim 0.56$, $s=0.18 \sim 0.24$ 。

形成最大冲坑的时间 T_m 计算式为:

$$T_m = \omega \cdot q^\alpha \cdot \bar{D}^\beta \quad (2)$$

式中: ω 为时间系数, $\omega=3.16 \sim 3.88$; α 、 β 为试验因子, $\alpha=-0.40 \sim -0.55$, $\beta=0.12 \sim 0.18$ 。

2.2 增强体冲刷后的强度复核

由于洪水漫顶冲刷使墙体下游侧形成冲坑, 从受力上看增强体在冲坑范围内将单独承受来自上游库水压力和坝体水平压力作用, 因此复核增强体

在冲刷深度所在断面是否满足结构强度要求将成为坝体是否溃决的关键。如果这一断面增强体并没有产生强度破坏, 说明坝体尚未溃决; 否则, 大坝将产生溃决。此时, 不能按变形指标(如增强体顶端的弯曲与挠度值)控制, 因为即便墙体已发生较大变形, 但只要没有超过强度极限值, 则不会引起坝体溃决。由于土石坝两岸岸坡的库水压力相对要小, 而增强体受坝基的约束更大, 因此漫顶溃决一般发生在河床部位, 下游形成冲刷坑时的受力情况详见图5。

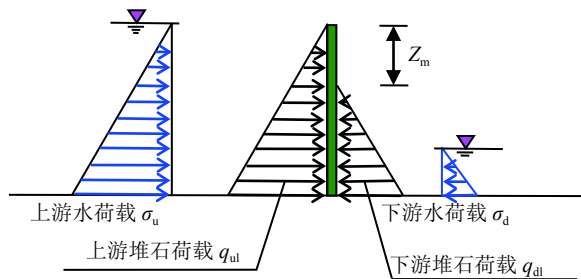


图5 增强体受力分析

Fig. 5 Stress analysis of longitudinal reinforced rockfill dam

增强体在冲刷坑最低点截面的剪力、弯矩计算式为:

$$Q_a = \int_0^{Z_m} k_{a1} \rho'_1 g z dz + \int_0^{Z_m} \rho_w g z dz \quad (3)$$

$$M_a = \int_0^{Z_m} k_{a1} \rho'_1 g z (Z_m - z) dz + \int_0^{Z_m} \rho_w g z (Z_m - z) dz \quad (4)$$

其中,

$$Q_a \leq \delta \cdot K_Q R_Q, M_a \leq K_M R_M \quad (5)$$

式中: R_Q 为增强体的抗剪强度值, 取 $R_Q=(0.056 \sim 0.316)R_C$ ^[13]; R_M 为增强体的抗弯强度值, $R_M=(1/20 \sim 1/30)R_C$ ^[14]; R_C 为增强体抗压强度^[15]。

则达到剪切破坏和弯矩破坏时的极限深度(Z_m 值)计算式为:

$$Z_m^Q = \sqrt{\frac{2K_Q R_Q \cdot \delta}{g(\rho_w + k_{a1} \rho'_1)}} \quad (6)$$

$$Z_m^M = \sqrt[3]{\frac{6K_M R_M}{g(\rho_w + k_{a1} \rho'_1)}} \quad (7)$$

很显然, 当 $Z_m < \min(Z_m^Q, Z_m^M)$ 时, 增强体心墙尚未破坏(可能已出现较大变形), 坝体不会出现溃坝; 否则, 心墙破坏将导致坝体溃决。

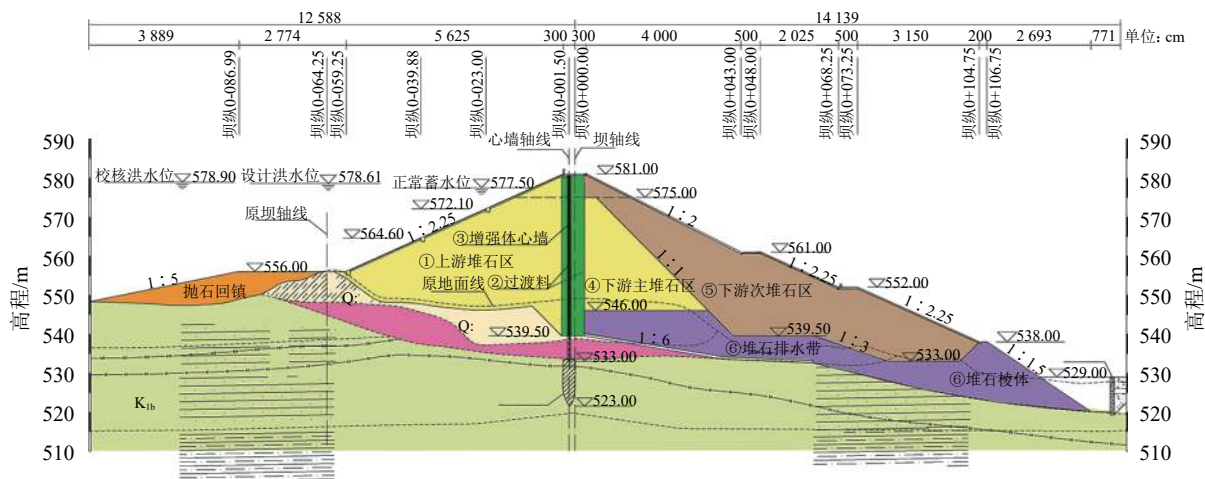
3 实例分析

3.1 算例1

某水库为新建水库, 最大坝高41.5 m, 坝顶长365 m,

上游水位39.5 m, 下游水位1.5 m, 采用C25刚性混凝土作为防渗心墙, 砂岩石渣料填筑坝体, 如图6所示,

下游堆石料平均粒径 $\bar{D}=0.45$ m。该水库洪水特性如表1所示。



注: ①上游堆石区: 采用弱风化或新鲜砂岩填筑; ②上、下游过渡区: 混凝土心墙上、下游宽度分别为1.6 m、3.6 m, 采用新鲜砂岩填筑; ③ 增强体心墙: 槽孔混凝土防渗心墙; ④下游主堆石区: 采用弱风化或新鲜砂岩; ⑤下游次堆石区: 采用砂泥岩混合物; ⑥堆石棱体及堆石排水带: 采用新鲜砂岩。

图 6 扩建后大坝典型设计横剖面图

Fig. 6 Design typical drawing in side sectional elevation of dam after expansion-translation

表 1 某新建水库洪水特性

Tab. 1 Flood features in a new reservoir project

洪水频率	流量 $Q/(m^3 \cdot s^{-1})$	单宽流量 $q/(m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^{-1})$	坝体冲坑深 Z_m/m	形成冲坑时 间 T_m/h
300年一遇	149.0	0.408	5.26	4.69
30年一遇	93.4	0.256	4.17	5.77
20年一遇	83.2	0.228	3.93	6.07
10年一遇	66.1	0.181	3.50	6.74
5年一遇	49.1	0.135	3.03	7.69

上下游水位差 $H=39.5-1.5=38$ m; 冲刷系数 $\phi=3.83$, $m=0.25$, $n=0.50$, $s=0.18$; 时间系数 $\omega=3.52$, $\alpha=-0.45$, $\beta=0.15$ 。分别由式(1)、(2)计算各频率洪水冲刷坑深 Z_m 和达到计算坑深所需的时间 T_m 并列入表1。因此, 在水库遭遇300年一遇的校核洪水漫顶冲刷时, 最大冲深可达5.26 m, 相应时间为4.67 h; 在30年一遇的设计工况下, 如洪水漫顶, 则坝下游最大冲深4.17 m, 相应时间为5.77 h。

依据式(3)~(7)进行增强体的强度复核。取 $K_Q=1.3$, $K_M=1.25$, C25墙体混凝土的 $R_C=17$ MPa^[15], 则 $R_Q=3.162$ MPa, $R_M=7.083$ MPa, 对本工程, 增强体厚度 $\delta=0.8$ m, 上游堆石浮密度 $\rho'_1=1.22$ t/m³, 土压力系数 $k_{a1}=0.24$, 由此得: $Z_m^Q=7.20$ m, $Z_m^M=7.48$ m。

由于校核工况下的 $Z_m=5.26$ m $<$ min($Z_m^Q=7.20$, $Z_m^M=7.48$)=7.20 m, 设计工况下的 $Z_m=4.17$ m $<$ min($Z_m^Q=7.20$, $Z_m^M=7.48$)=7.20 m, 因此, 在300年一遇洪水和30年一遇洪水下, 增强体土石坝并不会产生如同常

规土石坝所谓溃决的极端情况, 表明增强体土石坝的安全运行性能比常规土石坝更为出色。

3.2 算例2

某水库为小(I)型, 在原老坝体上加高扩建, 已知坝高36.5 m, 坝顶长273 m, 上下游水位差为30 m, C25防渗心墙, 灰岩堆石料填筑坝体, 下游堆石料平均粒径0.30 m。水库洪水特性如表2所示。

表 2 某改建水库洪水特性

Tab. 2 Flood features in a renovation reservoir project

洪水频率	流量 $Q/(m^3 \cdot s^{-1})$	单宽流量 $q/(m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^{-1})$	坝体冲坑深 Z_m/m	形成冲坑时 间 T_m/h
300年一遇	238.0	0.872	7.58	3.14
30年一遇	173.5	0.636	6.37	3.56
20年一遇	145.0	0.531	5.77	3.83
10年一遇	106.7	0.391	4.87	4.33
5年一遇	67.9	0.249	3.80	5.19

上下游水位差 $H=30$ m, 冲刷系数 $\phi=4.25$, $m=0.27$, $n=0.55$, $s=0.22$; 时间系数 $\omega=3.65$, $\alpha=-0.40$, $\beta=0.17$ 。分别由式(1)、(2)计算各频率洪水冲刷坑深 Z_m 和达到计算坑深所需的时间 T_m 并列入表2。因此, 在水库遭遇300年一遇的校核洪水漫顶冲刷时, 最大冲深可达7.58 m, 相应时间为3.14 h; 在30年一遇的设计工况下, 如洪水漫顶, 则坝下游最大冲深6.37 m, 相应时间为3.56 h。

下面复核增强体的力学强度。依据式(3)~(7), 已知 $K_Q=1.3$, $K_M=1.25$, C25墙体混凝土的 $R_C=17$ MPa^[15],

则 $R_Q=3.162$ MPa, $R_M=7.083$ MPa, 对本工程, 增强体厚度 $\delta=0.8$ m, 上游堆石浮密度 $\rho_1=1.30$ t/m³, 土压力系数 $k_{a1}=0.20$, 由此算得: $Z_m^O=7.29$ m, $Z_m^M=7.55$ m。

由于校核工况下的 $Z_m=7.58$ m $>$ min($Z_m^O=7.29$, $Z_m^M=7.55$)=7.29 m, 设计工况下的 $Z_m=6.37$ m $<$ min($Z_m^O=7.29$, $Z_m^M=7.55$)=7.29 m, 说明: 在遭遇设计洪水时, 墙体仍然是安全的。而在遭遇校核洪水时, 增强体将被破坏, 进而可能产生溃坝, 即使如此, 漫顶至溃坝已有3.14 h的缓冲时间便于下游避险转移。

4 讨 论

随着农村水利水电工程建设的不断深入, 中国已建成或正在修建(扩建)一大批中小型水库大坝, 这些工程都有坝体不高、工程周期短、地形地质条件复杂、交通不便、运输成本较高等特点, 受地形地质条件和筑坝材料等因素的制约, 使得土石坝成为最具竞争力的坝型。这些水库大坝在防洪、灌溉、发电、城市供水、水产养殖及旅游等方面发挥了巨大作用。但是由于受土石坝自身特性及施工技术条件的限制, 90%以上的土石坝都存在渗漏、稳定、裂缝、白蚁侵蚀等各种不同程度的病险隐患。如白莲河、花凉亭水库大坝黏土心墙出现大面积变形开裂现象, 西北口、天荒坪大坝发生面板挤压破坏开裂现象, 冶勒大坝、茅坪溪大坝等都存在沥青混凝土心墙变形开裂和水力劈裂的情况。

作者提出的纵向增强体土石坝新坝型从结构上对常规土石坝进行改造, 在已建成的柔性土石坝中“插入”刚性结构体(纵向增强体), 集防渗、受力和抵抗变形为一体, 实现对常规土石坝的“改良”, 从而克服了传统土石坝在防渗、变形破坏以及受外界干扰如白蚁侵蚀等方面的不足, 并在工程建设投资与工期、施工工艺与材料选取方面均有较大优势^[1]。

纵向增强体土石坝在建造施工上比常规土石坝具有更大优越性: 一是, 先整体连续填筑坝体直至基本完成坝体填筑, 其特点是不受心墙施工的影响, 施工速度更快, 在保证工程质量的前提下, 有效缩短施工工期, 降低工程投资; 二是, 在已成施工平台上进行掏槽现浇增强体施工并预先埋入满足灌浆需求的钢管, 最后用混凝土封管形成钢管混凝土, 相比常规土石坝, 不受土料的限制, 从而将土石坝坝工提高到一个新的水平。尤其是对于老坝扩建或改建工程来说, 可以不用拆除原有坝体, 直接在老坝基础上采用掏槽浇筑心墙的施工方法, 工程投资省, 效率大大提高。

纵向增强体既是防渗体系又是结构体, 不仅有利于提高土石坝的防渗性能, 也能够发挥受力及变

形性能, 提高土石坝的整体稳定性。即使在遭遇超标洪水, 发生洪水漫顶险情时, 由于刚性增强体的存在, 大坝也不会像常规土石坝那样产生瞬溃, 因为增强体起到很好的防止与延缓作用, 可有效延长溃坝时间, 为下游的紧急避险转移提供可能。

纵向增强体土石坝新坝型提高了常规土石坝的安全运行水平和抗风险能力, 对于水库的新建及病险库的处置或改(扩)建是大有裨益的。据不完全统计, 四川省共有中小型水库7 878座, 其中病险库或需要改(扩)建的超过5 000座。纵向增强体土石坝的成功实践可为四川省乃至全国类似土石坝的新建或改(扩)建工程提供参考和指导, 其应用前景广阔。

5 结 论

纵向增强体土石坝是以常规土石坝为依托, 在其内部“插入”集防渗与受力为一体的刚性结构体(即纵向增强体)构成的一种新坝型。增强体既起到防渗体系作用, 有效降低浸润线减小渗漏; 又起到结构体作用, 能够增强坝体的稳定性, 提高应力变形能力。

纵向增强体土石坝将常规土石坝可能发生的漫顶溃坝模式改变成坝体冲坑模式, 由增强体独自抵抗来自上游的巨大荷载至少在时间上延缓了坝体溃决的发生。坝体是否溃决取决于冲坑深度与增强体受力导致破坏的极限深度之间的计算比较。

纵向增强体土石坝的重要意义不仅在于可以依据这种建坝的理论和实践进行新坝建设, 还在于对大量现存的众多土石坝(以中小型土石坝为主)进行旧坝改造、除险加固和保坝安全提供了可行的解决方案, 从而最大可能地消除由此产生的溃坝风险和次生灾害。这种建坝技术具有广泛的应用前景。

有关提高增强体土石坝安全运行的方法、准则和试验验证工作尚需进一步深入研究, 以期取得更加科学可靠的建坝指导原则与技术措施。

[致谢]: 感谢四川大学周家文教授为本文所提供的帮助。

参考文献:

- [1] 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.]
- [2] Xin Baolong. Study on hydraulic fracturing performance of asphalt concrete core wall of earth rock dam[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2016. [辛宝龙. 土石坝沥青混凝土心墙施工缺陷条件下水力劈裂研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2016.]

- [3] Lei Hongjun, Feng Yelin, Liu Xingning. The study on the Stress deformation and anti hydraulic fracturing characteristics of the dam of the Nuozhadu hydropower project[J]. *Yunnan Water Power*, 2014(1):4-6. [雷红军, 冯业林, 刘兴宁. 糯扎渡水电站大坝应力变形及抗水力劈裂特性研究[J]. *云南水力发电*, 2014(1):4-6.]
- [4] Li Xiurong, Yan Li. Earth and rockfill dam seepage failure and control measures thereof[J]. *China Water Power & Electrification*, 2016(10):3-5. [李秀荣, 闫利. 土石坝渗透破坏及其控制措施[J]. *中国水能及电气化*, 2016(10):3-5.]
- [5] Niu Yunguang. Lessons learned from seepage failure accidents of several earth rock dams in China[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 1992(7):50-54. [牛运光. 从我国几座土石坝渗流破坏事故中吸取的经验教训[J]. *水利水电技术*, 1992(7):50-54.]
- [6] Fan Shubin. Simulation analysis of earth-rock dam seepage control and stress-strain of dam body under seepage action[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2008. [樊述斌. 渗流作用下土石坝防渗及坝体应力变形仿真分析[D]. 北京: 中国地质大学, 2008.]
- [7] Cui Guangtao, Lin Jiyong, Liang Xingrong. Forces of overflow nappe of arch dam on riverbed[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1985(8):60-65. [崔广涛, 林继镛, 梁兴蓉. 拱坝溢流水舌对河床作用力及其影响的研究[J]. *水利学报*, 1985(8):60-65.]
- [8] Liu Peiqing, Dong Junrui, Li Yongxiang, et al. Experimental study of fluctuating uplift at the bottom of a scour pool[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1995(12):59-66. [刘沛清, 冬俊瑞, 李永祥, 等. 在冲坑底部岩块上脉动上举力的实验研究[J]. *水利学报*, 1995(12):59-66.]
- [9] 陈生水. 土石坝溃决机理与溃坝过程模拟[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.
- [10] Yang Wucheng. Experiments and disciplines of the breach formation time of emergency dam[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 1984(7):23-27. [杨武承. 引冲式自溃坝口门形成时间的试验及规律[J]. *水利水电技术*, 1984(7):23-27.]
- [11] 刘新纪, 徐秉衡. 岩石冲刷试验模拟方法冲深估算[R]. 沈阳: 水利电力部东北勘测设计院科学研究所, 1978.
- [12] 尤季茨基 Г. А. 跌落水流对节理岩块的动水压力作用和基岩的破坏条件[C]// 水工水力学译文集(岩基冲刷专辑). 南京: 华东水利学院, 1979.
- [13] Shi Shishen. Shear strength, modulus of rigidity and young's modulus of concrete[J]. *China Civil Engineering Journal*, 1999, 32(2):47-52. [施士昇. 混凝土的抗剪强度、剪切模量和弹性模量[J]. *土木工程学报*, 1999, 32(2):47-52.]
- [14] 中国建筑科学研究院. 混凝土结构设计规范: GB50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [15] 中华人民共和国水利部. 水工混凝土结构设计规范: SL191—2008[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.

(编辑 张 琼)

引用格式: 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.]