

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.02.005

# 纵向增强体土石坝的设计原理与方法

梁 军

(四川省水利厅,四川 成都 610017)

**摘要:**为提高土石坝的安全运行性能,提出在常规土石坝中设置混凝土纵向增强体,这一刚性结构在坝体内具有防渗、受力和抵抗变形三重作用。采用经典力学方法定量分析了纵向增强体的防渗作用、抗变形能力和承受外力的能力,得出增强体厚度与上下游水位、堆石坝体物料特性之间的定量关系。理论公式推导将增强体作为竖向固端梁,主要受上下游水体作用、堆石主动土压力和因心墙和堆石差异沉降而产生的堆石对墙体两侧的拖曳力作用。由扰曲微分方程得出增强体顶部变位及转角和底部固定端应力计算公式,并以此进行设计复核,进而提出通过兼顾基础灌浆和满足增强体应力要求的预埋灌浆钢管的施工方法。

**关键词:**土石坝;纵向增强体;刚性结构;防渗;拉应力;设计方法

**中图分类号:**TV641      **文献标志码:**A      **文章编号:**1000-1980(2018)02-0128-06

## Design principle and method for the earth rockfill dam with longitudinal reinforcements

LIANG Jun

(Water Conservancy Office of Sichuan Province, Chengdu 610017, China)

**Abstract:** To improve the operational safety of earth rockfill dam, a longitudinal reinforcement is proposed. This rigid structure has triple functions as the seepage controlling, stress resistance and deformation resistance. Based on the classical mechanics, its anti-seepage effect, anti-deformation ability and the capacity to withstand external force is quantitatively analyzed. In addition, the quantitative relationships between the reinforcement thickness and the downstream water level, as well as the material properties of the rockfill dam are derived. For the theoretical derivation, the reinforced body is regarded as a fixed-end beam, loaded by water pressures from upstream and downstream, the active earth pressure from rockfill and the vertical drag force due to the differential settlement between core walls and rockfill. The top displacement together with the rotation angle and the bottom stress of the fixed end are derived from the deformation differential equation and validated through designing reviews. Subsequently, the construction method of buried steel pipe, which is adopted to perform the base grouting and also to meet the strength requirements, is put forward. The proposed method plays an important guiding role in rehabilitating and reinforcing the dangerous earth rockfill dams, as well as the design and construction of new dams.

**Key words:** earth rockfill dam; longitudinal reinforcement; rigid structure; anti-seepage; tensile stress; design method

土石坝一直是应用最广泛的一种水工坝型。统计表明,已建成的各类坝型中土石坝所占比例最高<sup>[1]</sup>,这说明土石坝与其他坝型相比仍然具有强大不衰的生命力。但是,与混凝土类坝(如重力坝、拱坝)等刚性结构相比土石坝运行更具风险性,国际大坝委员会在20世纪90年代的调研表明,按溃坝计,土石坝数量最多,占总数的70%。这方面,中国同样不例外,有资料显示,在失事的土石坝中,洪水漫顶占50.6%,设计施

**作者简介:**梁军(1962—),男,高级工程师,博士,主要从事水利技术管理工作。E-mail:liangoojun@163.com

**引用本文:**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. DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.02.005.

工质量差占38%,运行管理不善占5.3%,其他事故为6.1%<sup>[2]</sup>。常规土石坝(如均质坝、土质心斜墙坝)经过长期的运行,多数坝体会出现渗漏、裂缝、滑坡等不同程度病害,若不及时加固处理,可能造成溃坝、失效等严重危害。土石坝坝体渗漏会导致坝体下游浸润线抬高,使得白蚁易于筑穴繁殖,形成管涌通道,或者降低了坝体的抗剪强度指标,从而对坝体稳定性带来不利影响。尽管水利部《水库大坝安全鉴定办法》规定每6~10 a必须开展一次安全鉴定,但实际操作存在较大困难,主要是数量众多,工作量太大,安全鉴定的经费也十分缺乏。另外,从病险土石坝水库除险加固情况看,土石坝的整治—维护—加固—良性运行具有周期性。一般每隔15~20 a就需要治理一次,同样耗时费钱。

由于土石坝存在上述影响安全运行的病险情况以及安全鉴定、除险加固方面的实际困难,有必要加大研究与开发新技术,有效减小土石坝周期性重复治理和可能出现的溃坝灾害,同时也对新建土石坝具有指导作用。从目前的工程实践看,刚性结构体与土石坝填筑体的组合关系一般分为外部和内部组合两大类,钢筋混凝土面板堆石坝就是刚性结构体(面板)与土石填筑体的一种外部组合形式,这种坝型现已相当普遍<sup>[3-5]</sup>。为此,采用内部组合创新的方法,研究提出既保留土石坝工程的一些长处又吸收诸如重力坝混凝土刚性材料的优点,刚柔相济,形成一种较新颖的水工坝型,以大幅度降低土石坝溃坝风险,从而进一步增强土石坝的安全性能。笔者提出一种在柔性土石坝中“插入”刚性结构体的建坝思路,即在土石坝中置入由混凝土或钢筋混凝土等刚性结构材料制成的所谓纵向增强体(简称纵向体或增强体),以期增强土石坝的防渗、受力和抵抗变形能力,降低土石坝运行风险,延长土石坝安全运行周期。

## 1 纵向增强体土石坝的设计原理与方法

纵向增强体不同于塑性混凝土心墙或沥青混凝土心墙,因为后者只起防渗作用。SL274—2001《碾压式土石坝设计规范》<sup>[6]</sup>虽然允许防渗体采用混凝土防渗心墙,但并没有从技术理论阐述这样做的科学性、合理性,缺乏相关计算方法和依据,也没有认识到这种心墙除防渗作用以外,还能够作为坝体受力结构的一部分,承受应力和抵抗变形,因而《碾压式土石坝设计规范》不完备。

### 1.1 防渗作用

纵向增强体在土石坝中担任防渗作用已经突破了一般采用模量较低的土料及土石混合料防渗的界限。纵向增强体可以采用施工技术十分成熟的诸如地下连续墙、圪卡石混凝土防渗墙、高压喷射防渗墙等刚性体构成,在坝体中形成一道整体防渗心墙。如图1所示为这类坝型正常运行期的渗流情形,上游水位可近似认为与库水位持平,在纵向增强体(此时亦可称防渗心墙)内的浸润线一般亦为二次曲线,但考虑到心墙厚度 $\delta$ 较薄可以认为心墙内的浸润线为一急剧下降的陡倾直线,在心墙下游面出露并高出下游水位 $h_0$ <sup>[7-8]</sup>:

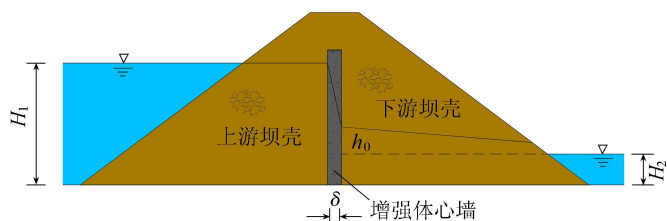


图1 增强体心墙正常渗流示意图

Fig. 1 Seepage diagram of the earth-rock dam with vertical reinforced body

$$h_0 = \frac{k_e}{2\delta k} (H_1^2 - H_2^2) \quad (1)$$

其中  $\delta = \frac{k_e}{2v_{c2}H_2} \left( H_1^2 - \frac{v_{c2}^2}{v_{ce}^2} H_2^2 \right)$       $v_{ce} = i_{ce}k_e$       $v_{c2} = i_{c2}k_2$

式中: $k_e$ ——增强体心墙的渗透系数; $H_1$ ——上游水头; $k$ ——坝壳体渗透系数; $H_2$ ——下游水头; $\delta$ ——增强体心墙厚度; $v_{ce}$ ——心墙与下游坝壳界面上的允许逸出流速; $i_{ce}$ ——心墙体的允许水力坡降; $v_{c2}$ ——下游坝壳至下游界面上的允许逸出流速; $i_{c2}$ ——下游坝壳的允许水力坡降; $k_2$ ——下游坝壳的渗透系数。

$h_0$  一经算出,可据此作为下游排水体的设计依据。一般增强体心墙在坝内的防渗标号已能满足土石坝防渗等级要求,其对应的渗透系数一般为  $K_e = A \times 10^{-8} \sim A \times 10^{-10}$  cm/s。这种结构与常规土石坝一样,依然是坝基、坝肩接合部的防渗最为关键,施工前应按设计预先在坝基、坝肩部位埋设后期注浆管,以便于实施连接墙体和坝基帷幕灌浆及固结灌浆<sup>[8-16]</sup>。

## 1.2 抗变形能力

在单宽截面上,增强体心墙可视作受上、下游堆石和水荷载作用的固端梁,这种坝型结构的变形在2个方面倍受关注,一是上下游堆石相对于增强体心墙产生的向下沉降 $S$ ,二是增强体心墙顶部的挠度 $y_0$ 、转角 $\theta_0$ 等。

### 1.2.1 增强体心墙上下两侧的堆石沉降 $S$

$S$ 由堆石体自重引起的沉降 $S_1$ 和上部新填堆石对下部堆石层的附加沉降 $S_2$ 组成,即 $S=S_1+S_2$ ,取纵轴 $z$ 原点位于坝底,方向向上为正。重点研究堆石体与增强体在坝体轴部附近相接触的变形情况,由于在坝体轴部近似成立侧限条件,坝体填筑高度为 $z$ 处的堆石自重沉降:

$$S_1 = \int_0^z \frac{\rho g}{E_s} (z - \xi) d\xi \quad (2)$$

其中

$$E_s = E_{s0} (z - \xi)^{n[17-20]}$$

填筑高度 $z$ 以上的堆石层厚度为 $\Delta h$  ( $\Delta h=H-z$ ,  $H$ 为坝高),形成对已填堆石层的附加沉降 $S_2$ :

$$S_2 = \int_0^z \frac{\rho g}{E_s} (H - z) d\xi \quad (3)$$

式中: $\rho$ ——堆石体密度,可取各种料的平均值; $E_{s0}$ ——堆石料压缩模量初始值; $n$ ——邓肯-张模型参数。

由式(2)、式(3)得

$$S = S_1 + S_2 = \frac{\rho g}{E_{s0}} \left[ \frac{1}{2-n} z^{2-n} + \frac{1}{1-n} (H-z) z^{1-n} \right] \quad (4)$$

堆石坝最大沉降发生在坝高 $(1-n)H$ 处,其值为

$$S_{\max} = \frac{\rho g H^{2-n}}{(2-n)(1-n)^n E_{s0}} \quad (5)$$

### 1.2.2 增强体心墙顶端的挠度与转角计算

以坝轴线为 $z$ 轴,单位长度纵向增强体心墙作为固定端梁在其顶端 $T$ 点的挠度和转角可由挠曲线近似微分方程

$\frac{d^2 y}{dz^2} = \frac{M}{E_c I_c}$  积分求得( $y$ 为上下游方向的挠度值, $M$ 为力矩, $E_c$ 、 $I_c$ 分别为增强体心墙的弹性模量、惯性矩)。

为此,可将增强体心墙的受力状况分为施工期和运行期。施工期心墙受上、下游堆石体主动土压力作用和心墙顶部以上至坝顶(亦称通填区)的土重力作用;运行期除上面作用以外,还有上、下游水荷载作用,如图2所示。

为了简化计算,只考虑运行期蓄水后上游堆石自心墙顶端以下应以浮密度计算土压力,水库蓄水至正常水位,假定上游水位 $H_1$ 与纵向增强体心墙同高。据此可以推导出各种荷载对心墙顶端 $T$ 的挠度与转角公式,最后得出2种工况下心墙顶端 $T$ 点的挠度、转角计算式。

施工期:

$$y_T^{(s)} = \frac{k_{01} \rho_1 g - k_{02} \rho_2 g}{30 E_c I_c} H_1^5 \quad (6)$$

$$\theta_T^{(s)} = \frac{k_{01} \rho_1 g - k_{02} \rho_2 g}{24 E_c I_c} H_1^4 \quad (7)$$

运行期:

$$y_T^{(y)} = \frac{(k'_{01} \rho'_1 g - k_{02} \rho_2 g + \rho_w) H_1^5}{30 E_c I_c} - \frac{(k_{02} \rho_2 g - k'_{02} \rho'_2 g + \rho_w g) H_1^3 H_2^3}{12 E_c I_c} \quad (8)$$

$$\theta_T^{(y)} = \frac{(k'_{01} \rho'_1 g - k_{02} \rho_2 g + \rho_w) H_1^4}{24 E_c I_c} - \frac{(k_{02} \rho_2 g - k'_{02} \rho'_2 g + \rho_w g) H_1 H_2^3}{6 E_c I_c} \quad (9)$$

式中: $\rho_1$ 、 $\rho_2$ ——上游、下游堆石的密度; $\rho'_1$ 、 $\rho'_2$ ——上游、下游堆石浮密度; $\rho_w$ ——水的密度; $k_{01}$ 、 $k_{02}$ ——上游、下游堆石施工期对增强体心墙的侧压力系数; $k'_{01}$ 、 $k'_{02}$ ——运行期或上、下游浸水饱和时堆石体对心墙的侧压力系数。

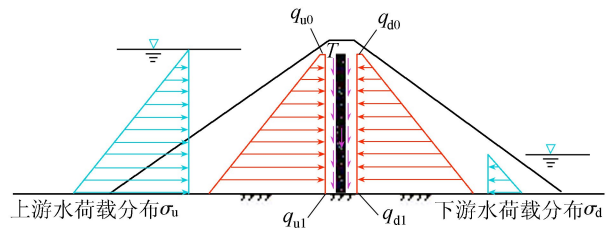


图2 纵向增强体受力简图

Fig. 2 Force diagram of the vertical structure

### 1.3 纵向增强体心墙的受力分析

可将纵向增强体视为位于坝体中部(坝轴线)附近贯穿于坝体左右两岸的竖向“薄板”,其底部与坝基基础通过固结灌浆形成刚性连接,从剖面看,类似于“插入”地基的固端梁,除自重外,它还受坝体上游、下游堆石水平土压力作用和运行期上游水荷载作用,同时受到堆石体与纵向增强体因沉降位移差引起的表面拖曳作用,这个向下的拖曳力是纵向增强体土石坝的一个力学特点,它形成了对增强体表面的下拉荷载作用。

#### 1.3.1 下拉荷载

由于纵向增强体心墙的模量远大于上下游堆石体的模量,上下游堆石体因存在向下的差异沉降而对心墙侧面产生一种向下的拖曳力,称为下拉荷载。下拉荷载对心墙而言,是一种“负担”,加重了心墙的受力,这与沥青混凝土心墙堆石坝不同。如图 3 所示,以上游为例,心墙受下拉荷载作用。

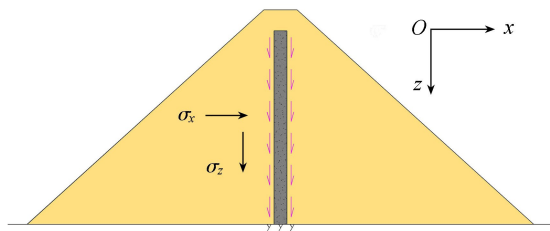


图 3 纵向增强体下拉荷载示意图

Fig. 3 Down-drag diagram of the vertical structure

$$\frac{\sigma_x}{\sigma_z} = k_0 \quad \sigma_s = f\sigma_x = fk_0\sigma_z = fk_0\rho gz \quad (10)$$

其中  $f = f_0 + f_c S$

式中:  $\sigma_x, \sigma_z$ ——堆石作用于心墙上游侧面的水平、竖直应力;  $k_0$ ——静止侧压力系数;  $\sigma_s$ ——堆石与心墙接触面的下拉应力;  $f$ ——接触面摩擦系数;  $f_0$ ——接触面静止摩擦系数;  $f_c$ ——接触面动摩擦系数。

总的下拉应力为

$$\sigma_s = \int_0^z (f_0 + f_c S) k_0 \rho g dz = A_0 z + \frac{A_1 z^{3-n}}{(1-n)(2-n)(3-n)} + \frac{A_1 H_1^{3-n}}{(1-n)(3-n)} - \frac{A_1 H_1 z^{2-n}}{(1-n)(2-n)} \quad (11)$$

其中  $A_0 = f_0 k_0 \rho g$       $A_1 = \frac{f_0 k_0 \rho^2 g^2}{E_{s0}}$

在增强体心墙施工中,一般需要一个施工平台,通填区以上的堆石都是后期待墙体施工完毕后再填筑上去的。为方便推导,取纵轴  $z$  原点位于坝顶,方向向下为正。因此式(4)的堆石沉降  $S$  可修正为

$$S = \frac{\rho g}{E_{s0}} \left[ \frac{1}{2-n} (H_1 - z)^{2-n} + \frac{1}{1-n} (H_1 - z)^{1-n} z \right] \quad (12)$$

总的下拉荷载为  $N_s = \int_0^H \sigma_s dz$      (13)

限于篇幅,本文仅列出施工完建期沿墙体侧面分布的下拉应力  $\sigma_s^{(s)}$  和作用在增强体心墙固定端的总下拉荷载  $N_s^{(s)}$  的计算公式:

$$\sigma_s^{(s)} = (A_{01} + A_{02})z + \frac{(A_{11} + A_{12})z^{3-n}}{(1-n)(2-n)(3-n)} + \frac{(A_{11} + A_{12})H_1^{3-n}}{(1-n)(3-n)} - \frac{(A_{11} + A_{12})H_1 z^{2-n}}{(1-n)(2-n)} \quad (14)$$

$$N_s^{(s)} = \frac{H_1^2}{2} (A_{01} + A_{02}) + \frac{(n^2 - 5n + 5)H_1^4}{(1-n)(2-n)(3-n)(4-n)} (A_{11} + A_{12}) \quad (15)$$

式中:  $A_{01}, A_{11}$ ——上游侧的  $A_0, A_1$  值;  $A_{02}, A_{12}$ ——下游侧的  $A_0, A_1$  值。

#### 1.3.2 心墙固定端的受力

设计应充分考虑作用在纵向增强体固定端上的弯矩  $M$ 、剪力  $Q$  和轴向压力  $N$  和增强体自重影响,按常规荷载进行相应的计算复核,计算  $M$  主要是确定固端的拉应力,用于配筋;  $Q$  用于复核固端抗剪强度;计算轴向压力  $N$  用于复核固端的抗压强度是否满足要求。计算复核分为施工完建期和蓄水运行期 2 种工况,经推导,可得出如下计算式。

a. 施工完建期:

$$M^{(s)} = w_1 e_1 - w_2 e_2 \quad (16)$$

$$Q^{(s)} = w_1 - w_2 \quad (17)$$

$$N^{(s)} = \rho_c g \delta H_1 + N_s^{(s)} \quad (18)$$

式中:  $M^{(s)}, Q^{(s)}, N^{(s)}$ ——弯矩、剪力、轴压力;  $e_1, e_2$ ——上、下游堆石水平推力  $w_1, w_2$  作用点至固定端的力臂长度;  $\rho_c$ ——纵向增强体心墙的密度。



### b. 蓄水运行期:

$$M^{(y)} = w_1^{(y)} e_1' + p_1 e_1'' - w_2^{(y)} e_2' - p_2 e_2'' \quad (19)$$

$$Q^{(y)} = w_1^{(y)} + p_1 - w_2^{(y)} - p_2 \quad (20)$$

$$N^{(y)} = \rho_c g \delta H_1 + N_s^{(y)} \quad (21)$$

式中: $M^{(y)}$ 、 $Q^{(y)}$ 、 $N^{(y)}$ ——固端弯矩、固端剪力、轴向压力; $e_1'$ 、 $e_2'$ ——上、下游堆石水平推力  $w_1^{(y)}$ 、 $w_2^{(y)}$  作用点至固定端的力臂长度; $e_1''$ 、 $e_2''$ ——分上、下游水荷载作用力  $p_1$ 、 $p_2$  至固定端的力臂长度。

## 2 纵向增强体心墙的设计方法简述

基于本文提出的计算公式,可以进行纵向增强体土石坝的设计。(a)依据坝工设计的基础资料(如通过规模论证得出的正常水位、拟定土石坝高度和筑坝材料相关力学参数指标),由式(1)计算根据纵向增强体心墙水平厚度  $\delta$  和下游侧逸出的水头高  $h_0$ 。(b)进行这种坝体在控制断面(一般选择在最大剖面处)的变形复核计算,依据式(2)~(4)复核堆石体的沉降;再根据式(6)~(9)计算增强体顶部  $T$  点(变形最危险点)的变位值,这一值应不超过钢筋混凝土的允许变形值。(c)复核增强体在底部固定端(受力最危险点)的受力情况,一是按式(11)~(15)计算端部的轴向压力,复核此压力和增强体自重叠加不能超过混凝土体的抗压强度;二是由式(16)~(21)复核底部截面由弯矩产生的拉应力,并以这一拉应力按钢筋混凝土构件进行配筋计算,以保证底部截面满足增强体的抗拉强度,与常规不同的是按含钢量相等的原则配制满足后期进行基础灌浆的预埋灌浆钢管而非配制常规钢筋。如图4所示,为心墙底部固定端横剖面的几种配筋形式,其中图4(a)(b)是针对截面出现拉应力而设计的,图4(c)仅针对不出现拉应力的情形。在增强体心墙内采用钢管配筋既是结构抗拉应力的需要又是基于施工的考虑,增强体心墙在施工时,钢管是预先埋入的,先是满足灌浆的需要,最后用混凝土封管形成钢管混凝土,用以满足抗拉设计要求。上述设计方法已在2个工程取得实际应用<sup>[21-22]</sup>。

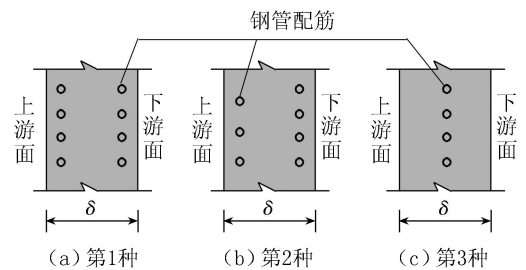


图4 3种配筋形式

Fig. 4 Three kinds of reinforcement types

## 3 结 语

纵向增强体的防渗性能与沥青心墙土石坝或常规的土质心墙防渗体的性能是一致的,宜通过公式计算出纵向增强体心墙水平厚度  $\delta$  和下游侧逸出的水头高  $h_0$ ,为下游排水设计提供依据。应复核纵向增强体受力与抵抗变形的能力,并进行相应设计。对受力而言,主要是考虑纵向体上下游2个侧面所受的下拉荷载影响,以及上下游堆石所形成的主动土压力和水荷作用在增强体心墙的底部产生较大的应力,特别是拉应力的作用,配筋计算宜与混凝土墙体施工桁架下设和后期灌浆所需的灌浆钢管同步考虑,用于承受拉应力。由于各种工况和荷载作用,纵向增强体顶部的变形也宜复核,其挠度与转角不应过大而导致墙体出现开裂等情况。

### 参考文献:

- [1] 贾金生,袁玉兰,郑瑾莹,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. (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. (in Chinese))
- [2] 方崇惠,段亚辉. 溃坝事件统计分析及其警示[J]. 人民长江,2010,41(11):96-101. (FANG Chonghui, DUAN Yahui. Statistical analysis and warning for dam failure events[J]. Yangtze River,2010,41(11):96-101. (in Chinese))
- [3] 周建平,宗敦峰,杨继学,等. 现代堆石坝技术进展[M]. 北京:中国水利水电出版社,2009.
- [4] 郇能惠. 高混凝土面板堆石坝新技术[M]. 北京:中国水利水电出版社,2007.
- [5] 曹克明,汪易森,徐建军,等. 混凝土面板堆石坝[M]. 北京:中国水利水电出版社,2008.
- [6] 中华人民共和国水利部. 碾压式土石坝设计规范:SL274—2001[S]. 北京:中国水利水电出版社,2002.
- [7] 关志诚. 水工设计手册(第六卷 土石坝)[M]. 北京:水利电力出版社,2007.
- [8] 高钟璞. 大坝基础防渗墙[M]. 北京:中国电力出版社,2000.
- [9] 陶月赞,姚梅. 地下水渗流力学的发展进程与动向[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2007,37(2):221-230. (TAO

- Yuezan, YAO Mei. Development process and tendency of the hydrodynamics of groundwater[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2007,37(2): 221-230. (in Chinese))
- [10] 高钟璞,安致文,王国民. 小浪底水利枢纽上游围堰塑性混凝土防渗墙施工[J]. 水力发电,1994,20(3):10-12. (GAO Zhongpu, AN Zhiwen, WANG Guomin. Construction of upstream cofferdam plastic concrete cut-off wall in Xiaolangdi Water Control Project[J]. Water Power,1994,20(3):10-12. (in Chinese))
- [11] 钮新强. 水库病害特点及除险加固技术[J]. 岩土工程学报,2010,32(1):159-163. (NIU Xinqiang. Characteristics of reservoir defects and rehabilitation technology in China[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010,32(1):159-163. (in Chinese))
- [12] 位敏,周和清,章赢. 大竹河水库沥青混凝土心墙坝渗漏处理[J]. 人民长江,2016,47(4):43-46. (WEI Min, ZHOU Heqing, ZHANG Ying. Construction treatments on seepage of Dazhu River asphalt concrete core dam[J]. Yangtze River,2016,47(4):43-46. (in Chinese))
- [13] 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):45-51. (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):45-51. (in Chinese))
- [14] 宗敦峰,刘建发,肖恩尚,等. 水工建筑物防渗墙技术60年I:成墙技术和工艺[J]. 水利学报,2016,47(3):455-462. (ZONG Dunfeng,LIU Jianfa,XIAO Enshang, et al. 60 years' perspective of the diaphragm wall technology for seepage controll, part I :construction method and workmanship[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2016,47(3):455-462. (in Chinese))
- [15] 余学明,何顺宾. 冶勒水电站沥青混凝土心墙堆石坝基础防渗处理设计[C]//佚名. 现代堆石坝技术进展:2009第一届堆石坝国际研讨会论文集. 北京:中国水利水电出版社,2009:202-212.
- [16] 岳广润,石峰. 冶勒水电站廊道内混凝土防渗墙施工技术[C]//佚名. 2004水利水电地基与基础工程技术:中国水利学会地基与基础工程专业委员会2004年学术会议论文集. 北京:中国水利学会,2004:47-53.
- [17] 梁军. 紫坪铺工程筑坝材料应力应变特性研究报告[R]. 成都:四川省水利水电设计勘测设计研究院,1995.
- [18] 刘萌成,高玉峰,刘汉龙,等. 堆石料变形与强度特性的大型三轴试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(7):1104-1111. (LIU Mongcheng, GAO Yufeng, LIU Hanlong, et al. Large-scale triaxial test study on deformation and strength characteristics of materials[J]. Chinese Journal of Mechanics and Engineering, 2003, 22(7): 1104-1111. (in Chinese))
- [19] 梁军. 不同应力路径堆石料的抗剪强度特性[J]. 四川水利,1996(4):33-36. (LIANG Jun. Shear strength characteristics of different stress paths of rockfill[J]. Sichuan Water Resources,1996(4):33-36. (in Chinese))
- [20] 程展林,丁红顺. 堆石料工程特性试验研究[J]. 人民长江,2007,38(7):110-114. (CHENG Zhanlin, DING Hongshun. Engineering characteristics of rockfill tests[J]. Yangtze River,2007,38(7):110-114. (in Chinese))
- [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] 陈开武. 四川省会东县马头山水库工程初步设计报告[R]. 成都:四川省水电建筑工程监理中心,2016.

(收稿日期:2017-07-31 编辑:刘晓艳)