

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.2199

陡峻河谷高面板坝坝体与坝基接触效应

魏匡民^{1,2}, 陈生水^{1,2}, 李国英^{1,2}, 吴俊杰^{1,3}

(1. 南京水利科学研究院 岩土工程研究所, 江苏 南京 210024; 2. 南京水利科学研究院 水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室, 江苏 南京 210029; 3. 新疆水利水电勘测设计研究院, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘 要:以新疆大石峡 250 m 级特高面板砂砾石坝为依托工程, 采用大型接触面直剪试验确定了筑坝料与基岩的摩擦接触参数, 建立了考虑坝体与坝基相互接触作用的面板坝三维数值模型, 研究了摩擦接触效应对坝体、混凝土面板应力变形以及止水接缝三向变位的影响。结果表明: 双曲线模型符合筑坝料与基岩之间剪应力与位移的非线性关系; 若不考虑坝体与基岩的接触效应, 坝体边界处变形梯度和主应力值计算值均偏小, 导致判断该区域坝体开裂区范围偏小而拱效应被高估; 蓄水期面板挠度和顺坡向应力受接触效应影响相对较小, 而轴向位移和轴向应力受接触效应影响较大; 周边缝变位受接触效应影响非常强烈, 在高水头压力作用下, 坝体局部可能出现相对基岩的滑移导致周边止水变形和坝肩竖缝张开量大幅增加。陡峻河谷筑坝若不考虑接触效应, 计算结果是偏危险的。计算结果和 Anchicaya 坝实测渗漏位置结果均表明, 周边缝变位控制是陡峻河谷面板坝建设的关键。

关 键 词: 陡峻河谷; 面板坝; 摩擦接触; 直剪试验; 有限元

中图分类号: TV 223

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018) 09-3415-10

Influence of contact effect between dam body and dam foundation on behaviours of high concrete faced rockfill dam built in steep valleys

WEI Kuang-min^{1,2}, CHEN Sheng-shui^{1,2}, LI Guo-ying^{1,2}, WU Jun-jie^{1,3}

(1. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing, Jiangsu 210024, China; 2. Key Laboratory of Failure Mechanism and Safety Control Techniques of Earth-Rock Dam of the Ministry of Water Resources, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing, Jiangsu 210029, China; 3. Xinjiang Water Conservancy and Hydropower Survey Design Institute, Urumqi, Xinjiang 830000, China)

Abstract: In this study, based on the 250 m grade concrete face gravel dam of Dashixia in Xinjiang province, large-scale direct shear tests were conducted to determine friction parameters of the interface, and numerical model considering the contact effect was established. The influence of contact effect on stress and deformation of the dam body, concrete slab, and water stops were studied. Results show that the hyperbolic model can meet the non-linear relationship of the shear stress and the displacement of the interface. If the contact effect is not taken into account, the deformation gradient and the principal stress value of the dam body become low, and the arch effect would be overestimated. The deflection and the slope direction stress of slab are less affected by the contact effect, while the axial displacement and the axial stress are greatly influenced. The deformation of the peripheral joint is strongly affected by the contact effect. Under the high-water pressure, the local dam body slip may occur, which may lead to an increase of the peripheral and vertical joint deformation. The results of this study and in-situ observations of Anchicaya dam reveal that the control of peripheral joint deformation is the key point in constructing concrete-faced rockfill dams in steep valleys.

Keywords: steep valley; concrete-faced rockfill dam; friction contact; direct shear test; finite element

1 引 言

20 世纪 60 年代末期, 重型振动碾逐步应用于

压实堆石和砂卵石。由振动碾压设备压实的筑坝土石料, 其密实度高、坝体沉降小, 使得混凝土面板的工作状况大为改善, 从而促进了面板堆石坝发展。

收稿日期: 2017-11-02

基金项目: 国家重点研发计划重点专项 (No.2017YFC0404904); 国家自然科学基金项目 (No.51509163, No.U1765203); 中央级公益性科研院所基本科研业务费 (No.Y317004); 水利部公益性行业专项经费项目 (No.201501035)。

This work was supported by the National Key R & D Plan (2017YFC0404904), the National Natural Science Foundation of China (51509163, U1765203), the Basic Scientific Research Funds in National Nonprofit Institutes (Y317004) and the Financial Support from the Chinese Ministry of Water Resource (201501035).

第一作者简介: 魏匡民, 男, 1985 年生, 博士, 高级工程师, 主要从事岩土工程数值分析和本构模型方面的研究。E-mail: kmwei@nhri.cn

近些年,面板堆石坝筑坝技术日趋成熟,相继在填筑压实标准^[1-2]、施工质量控制^[3-4]、止水接缝材料^[5-6]、混凝土面板抗裂^[7]等方面进行了一系列技术革新,目前已成为了一种经济、安全、环保的优良坝型。据统计,截止 2013 年底,我国 100 m 以上高面板堆石坝已有 80 余座,占世界一半以上^[8]。一批世界级高坝如水布垭、猴子岩、洪家渡、公伯峡、天生桥一级、三板溪等相继投入运行,在防洪、发电、灌溉等方面发挥着重要作用。随着水利水电工程开发不断深入,复杂坝址条件下面板堆石坝适应性问题日益突出,其中狭窄陡峻河谷面板坝坝体与基岩接触效应就是其中一个重要的研究课题。

已有研究结果表明,修建陡峻狭窄河谷地区的堆石坝,坝体应力空间分布呈现出明显的拱效应^[9],坝体整体变形往往偏小,但坝肩接触部位变形梯度大,易出现明显的剪切滑移,对止水接缝尤为不利。1974 年建成的哥伦比亚 Anchicaya 面板堆石坝^[10]是典型的狭窄陡峻河谷区面板堆石坝,最大坝高 140 m,典型剖面如图 1 所示,混凝土面板与接缝系统布置如图 2 所示。水库于 1974 年 10 月 19 日开始蓄水,于 10 月 24 日达到 634 m 高程,蓄水期坝体渗漏持续增加,最大漏水量达到 1 800 L/s。经过检查发现,大部分渗漏发生在周边缝的局部位置,尤以大坝右岸为重^[11]。检查后发现,混凝土面板没有发现大的裂缝、断裂或剥落,仅在面板中部发现细小的裂缝。在坝左岸,567~620 m 高程处的所有周边缝都已张开。在坝右岸,597~623 m 高程的所有周边缝都已张开,面板接缝 8 处渗漏点位置标于图 2 中。1978 年建成的 Golillas 坝^[11],坝高 125 m,坝体高宽比仅为 0.87,两岸极为陡峻。水库第 1 次蓄水期间,渗漏急剧增大,降低水位发现渗漏源主要位于趾板与坝肩岩石接触面,对该部位进行修补后进行 2 次蓄水仍出现严重渗漏,再次降低水位至 2 965 m 以下对坝肩进行了局部处理,发现面板与趾板接触部位存在压碎破坏,右坝肩周边缝存在剪切破坏。监测资料表明,初次蓄水后该坝面板靠近两岸陡峭坝肩的沉降量与峡谷中心的沉降量接近^[11],说明两岸陡峭坝肩与基岩面接触部位可能存在较大的剪切滑移变形,导致了周边止水和面板底端的破坏。

以上工程实例可以得到启示:陡峻河谷高面板坝坝体和基岩的接触效应对混凝土面板和接缝系统产生不可忽略的不利影响。目前,工程界已认识到陡峻河谷区面板坝建设的特殊性。例如,修建在狭窄河谷区坝高 223.5 m 的猴子岩面板坝,在两岸

附近与坝体底部设置主堆石特别碾压区以减少由堆石变形引起的周边缝变形,并提高了周边缝附近特殊垫层区与垫层区的填筑标准。但是,国内外学者对坝体与基岩接触效应影响的理论研究却相对较少,文献资料显示,国内清华大学宋文晶等^[12-13]首次提出了一种摩擦接触单元用于模拟堆石坝坝体与坝基的摩擦接触效应,通过比较不同岸坡坡度的计算结果,得到了一些有益的结论。总体来讲,坝体与基岩相互作用的理论研究仍落后于工程实践。

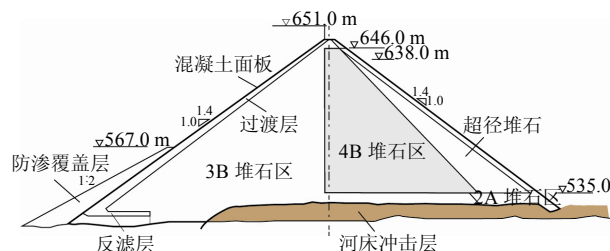


图 1 Anchicaya 坝典型横剖面
Fig.1 Typical cross section of Anchicaya dam

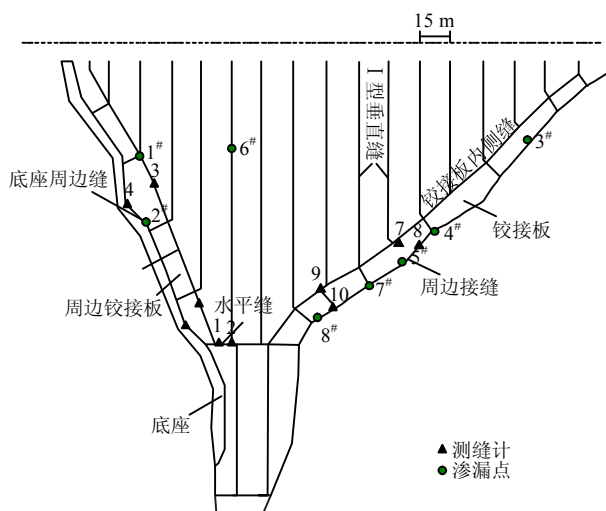


图 2 Anchicaya 坝混凝土面板与接缝系统
Fig.2 Concrete slab and joint system of Anchicaya dam

我国拟建的 250 m 级新疆大石峡特高砂砾石面板坝由中国电建西北院设计,该坝址河谷地形复杂,陡峻边坡问题突出,工程方案设计极具代表性,该工程对同类型的高堆石坝设计建设具有重要的借鉴意义。本次研究依托新疆大石峡砂砾石面板展开,结合室内试验和数值分析手段,对复杂陡峻河谷坝体与基岩的整体接触效应进行研究,为陡峻河谷面板堆石坝设计建设提供技术支持。

2 工程概况与数值模型

2.1 工程概况

大石峡水利枢纽工程位于新疆库玛拉克河上,

拦河坝采用混凝土面板砂砾石坝最大坝高为 247.0 m, 正常蓄水位为 1 700.0 m。大石峡坝址河道弯曲, 呈向西“凸”出的弧形拐弯。坝址区为峡谷地形, 河谷呈不对称的“V”型, 左岸地形坡高陡峻, 右岸在高程为 1 610~1 660 m 古河床形成阶地, 相对于左岸边坡较缓。两岸均为基岩边坡, 山势高陡, 自然边坡坡度一般为 45°~75°, 局部近直立, 是典型的修建在陡峻河谷的面板坝。

坝体填筑分区如图 3 所示, 大坝填筑主砂砾料取自天然砂砾料场(图 4(a)), 最大粒径为 500 mm, 小于 5 mm 颗粒含量为 13%~37%, 小于 0.075 mm 颗粒含量不大于 10%, 连续级配。下游堆石料(图 4(b))最大粒径不超过铺料厚度, 小于 5 mm 颗粒含量不大于 20%, 小于 0.075 mm 颗粒含量不大于 5%, 连续级配。混凝土面板坡度为 1:1.606, 面板和高趾墙均采用 C30 混凝土。

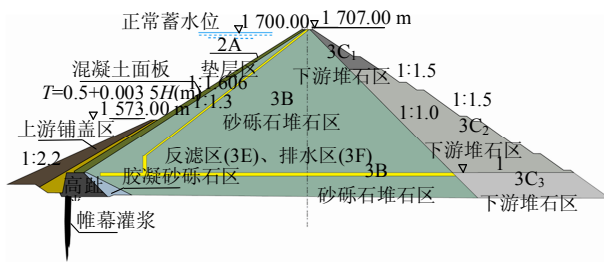


图 3 大石峡砂砾石面板坝材料分区
Fig.3 Material zoning of Dashixia concrete face gravel dam



(a) 主砂砾料 (b) 堆石料

图 4 大石峡砂砾石面板坝主要坝料
Fig.4 Main dam materials of Dashixia dam

大坝填筑分为 VII 期, 面板浇筑分为 III 期, 施工次序为: (1) 浇筑混凝土高趾墩和趾板; (2) I 期坝体填筑(历时 9 个月); (3) II 期坝体填筑(历时 6 个月); (4) III 期坝体填筑(历时 7 个月); (5) 浇筑 I 期面板(历时 3 个月, 停工 3 月); (6) IV 期坝体填筑(历时 4 个月); (7) V 期坝体填筑(历

时 8 个月); (8) 浇筑 II 期面板(历时 3 个月, 停工 3 月); (9) VI 期坝体填筑(历时 9 个月, 停工 6 月); (10) 浇筑 III 期面板(历时 3 个月); (11) VII 期坝体施工(坝顶堆石与防浪墙); (12) 蓄水至正常蓄水位(历时 12 个月)。大坝填筑次序示意如图 5 所示。

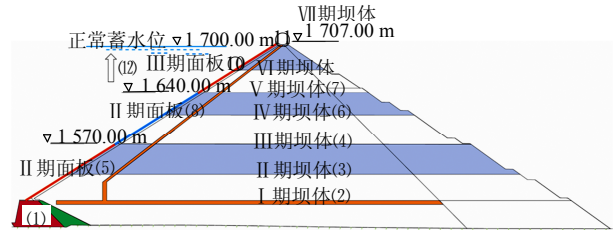


图 5 大石峡砂砾石面板坝施工次序
Fig.5 Construction schedule of Dashixia concrete face gravel dam

2.2 筑坝料计算模型与参数

筑坝料采用“南水”双屈服面弹塑性本构模型^[14], 该模型能够较好地反映筑坝料的强度非线性、剪胀、剪缩性特征, 被广泛用于土石坝计算分析。南水双屈服面弹塑性模型屈服面为

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= p^2 + r^2 q^2 \\ F_2 &= q^s / p \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: p 为平均应力; q 为广义剪应力; r 和 s 均为屈服面参数, 一般地可令其等于 2 或 3, 本文 r 和 s 均取为 2。该模型中切线杨氏模量 E_t 和切线体积比 μ_t 分别为

$$E_t = E_i (1 - R_f S_1)^2 \quad (2)$$

$$\mu_t = 2c_d (\sigma_3 / p_a)^{n_d} \frac{E_t R_s}{\sigma_1 - \sigma_3} \frac{1 - R_d}{R_d} \left(1 - \frac{R_s}{1 - R_s} \frac{1 - R_d}{R_d} \right) \quad (3)$$

式中: E_i 为初始模量; S_1 为应力水平; R_f 为破坏比; p_a 为大气压力; c_d 、 n_d 、 R_d 均为材料参数; σ_1 为大主应力; σ_3 为小主应力。

$$E_i = k p_a (\sigma_3 / p_a)^n \quad (4)$$

式中: k 为材料参数。

$$S_1 = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)(1 - \sin \varphi)}{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi} \quad (5)$$

$$R_s = R_f S_1 \quad (6)$$

采用非线性强度指标, 内摩擦角 φ 表示如下:

$$\varphi = \varphi_0 - \Delta \varphi \lg(\sigma_3 / p_a) \quad (7)$$

式中: φ_0 为小主应力等于大气压力时材料的内摩擦角; $\Delta\varphi$ 为小主应力每增加 10 倍时内摩擦角减小的量值。

“南水”双屈服面模型参数包括 k 、 n 、 R_f 、 φ_0 、 $\Delta\varphi$ 、 c_d 、 n_d 、 R_d 。南京水利科学研究院采用大型三轴试验仪对大石峡筑坝垫层料、主砂砾石料、下游堆石料进行了系统的试验, 为了反映砂砾石在低围压下的剪胀性, 本次研究分别进行了低围压剪切试验和中、高围压试验。低围压试验方案中砂砾石料和堆石料试验围压分为 4 级, 分别为 50、100、200、300 kPa, 中、高围压试验方案中试验围压分别为 400、800、1 200、2 000、3 000 kPa。根据三轴试验结果确定的筑坝料南水模型参数如表 1 所示。

表 1 大石峡筑坝材料南水模型参数
Table 1 Parameters of Nanshui model of Dashixia dam materials

坝体分区	ρ_d /(g/cm ³)	φ_0 /(°)	$\Delta\varphi$ /(°)	k	n	R_f	c_d /%	n_d	R_d
2A 垫层区	2.31	49.3	5.9	920.2	0.29	0.67	0.49	0.45	0.65
3B 砂砾石	2.28	50.6	7.2	1 381.2	0.32	0.67	0.16	0.83	0.51
3C1 堆石区	2.22	53.2	9.0	1 104.4	0.22	0.65	0.40	0.72	0.64
3C2 堆石区	2.20	48.5	6.2	704.6	0.35	0.69	0.58	0.62	0.66
3C3 堆石区	2.20	48.5	6.2	704.6	0.35	0.69	0.58	0.62	0.66

2.3 坝体与基岩接触模型与参数

在南京水利科学研究院大型接触面直剪试验仪上进行了坝料与基岩之间的接触力学性质试验, 上剪切盒尺寸为 500 mm×500 mm×150 mm, 下剪切盒尺寸为 500 mm×670 mm×150 mm。上、下剪切盒开缝值控制为 20 mm。大石峡大坝基岩以灰岩为主, 现场实测岩体纵波速度为 3 500~4 600 m/s, 换算所得弹性模量与 C35 混凝土接近。由于试验尺寸的立方体岩石现场取样和制备均有一定困难, 所以下剪切盒放置养护龄期为 28 d 的 C35 混凝土试块, 在混凝土试块表面采用人工增糙来模拟现场开挖的边坡。根据现场调研, 确定试验人工增糙面的凿毛起伏差不大于 5 mm, 上剪切盒充填主砂砾石料。采用静水头法对试样进行饱和固结稳定后, 分别在垂直应力为 0.3、0.6、1.0、1.5 MPa 下对试样剪切, 记录水平剪力和水平位移, 试验曲线见图 6。试验结果表明, 剪应力与剪切位移符合双曲线关系, Clough 等^[15]假定接触面剪应力与相对位移存在双曲线关系, 考虑到粗粒土与基岩面客观存在咬合强度(图 7), 本文采用的接触面剪切切线刚度形式如下:

$$K_t = k_1 \cdot \gamma_w \left(\frac{\sigma_n}{p_a} \right)^n \left(1 - \frac{R_f \tau}{c + \sigma_n \tan \varphi} \right)^2 \quad (8)$$

式中: k_1 、 n 、 R_f 为材料参数; γ_w 为水的重度; c 为咬合强度; σ_n 为法向应力, τ 为剪切应力。接触面参数如表 2 所示, 本次研究采用无厚度的摩擦单元, 法向刚度 k_2 也列于表 2 中。基于式(8)的数值模拟结果绘于图 6 中, 可以看出数值模拟与试验结果能较好符合。

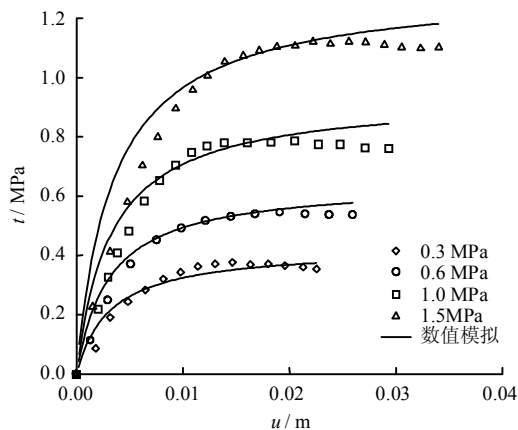


图 6 接触面剪切试验结果与数值模拟
Fig.6 Shearing test results of interface and model simulation

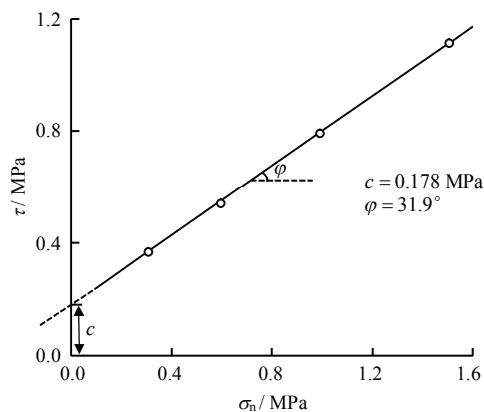


图 7 接触面强度参数
Fig.7 Strength parameters of contact interface

表 2 接触面模型参数
Table 2 Parameters of contact interface model

φ /(°)	c /MPa	k_1	k_2 /(kN/m ³)		n	R_f
			受压	受拉		
31.9	0.178	6 747	10^8	5	0.62	0.85

2.4 大石峡面板砂砾石坝有限元模拟

对坝体和基岩进行了有限元离散, 单元总数为 69 244 个, 结点总数为 65 805 个。整体坐标系定义为: X 方向为轴向, 指向右岸为正, 零点设置在左

岸趾板右侧 37.0 m 处；Y 方向为顺河向，指向下游为正，零点为轴线 0+0.00 位置；Z 方向为垂直向，向上为正，以其高程为坐标值。大石峡砂砾石面板堆石坝三维网格剖分如图 8 所示，坝体与基岩接触单元离散如图 9 所示，坝体填筑和蓄水次序严格按照图 5 进行，填筑和蓄水过程分 51 个荷载级模拟，其中蓄水过程分为 6 个荷载级模拟。

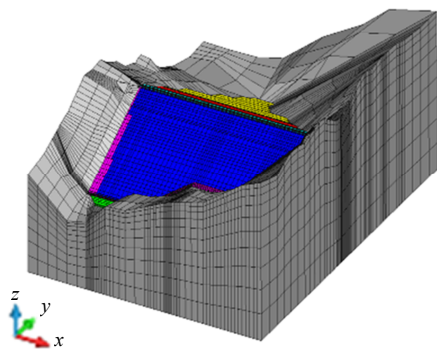


图 8 大石峡面板砂砾石坝三维有限元网格
Fig.8 3D meshes of Dashixia dam

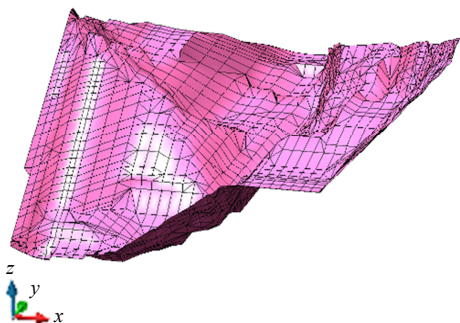


图 9 坝体与基岩摩擦接触单元三维有限元网络
Fig.9 3D meshes of contact interface between dam body and dam foundation

3 坝基与坝体接触效应对坝体应力变形影响分析

为了研究坝体与基岩之间的摩擦接触效应对坝体应力变形的影响，本次研究对比分析了不考虑坝体与基岩相互作用（坝体与基岩之间不设接触）和考虑坝体基岩相互作用（坝体与基岩之间设置接触）两种情况下坝体应力变形，以此评价摩擦接触效应

对坝体应力变形影响。其中，设置接触方案：在坝体和基岩之间设置无厚度摩擦单元，如图 9 所示；不设接触方案：坝体与基岩直接连接，删除接触面单元，两方案计算网格差异仅在于坝体与基岩之间有无接触单元，其他部位单元离散完全相同。

图 10 为正常蓄水位时坝体与基岩接触面位移三维矢量分布。可以看出，数值模型反映的坝体相对基岩的接触滑移变形规律良好，在河谷陡峭部位接触滑移变形较平缓处大，在坝轴线方向坝体相对基岩的变形指向河床，在顺河向坝体相对于基岩的滑动位移基本以山脊为分界线，上游区域滑移指向上游，下游区域指向下游。表 3 列出了竣工期和蓄水期大坝坝体应力变形特征值。由于筑坝砂砾料模量高，并且河谷效应强烈，坝体竣工期和蓄水期最大沉降均较同类型的面板堆石坝小，占坝高的 0.32%~0.34%。从坝体应力变形极值可以看出，考虑接触效应后竣工期、蓄水期最大沉降较不考虑接触效应均增加了 1.5 cm；竣工期、蓄水期坝体指向上游的最大位移较不考虑接触效应增加了 2.4、0.7 cm，指向下游最大位移分别增加了 2.9、3.4 cm。该坝坝址位于河谷转弯处，坝轴线上游河谷不对称强烈，坝轴线剖面部位左右岸河谷相对对称，所以，坝轴线剖面指向左、右岸的水平位移大小差别较小，竣工期、蓄水期坝体指向右岸的最大位移较不考虑接触效应均增加 0.6 cm，指向左岸最大位移分别增加了 0.9、0.8 cm。

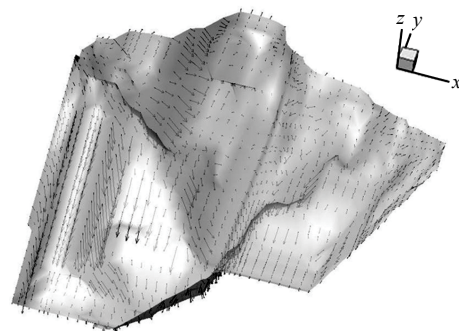


图 10 坝体与接触面位移三维矢量
Fig.10 Displacement vectors of contact interface

表 3 大石峡坝体应力变形特征值
Table 3 Extreme values of stress and deformation in Dashixia dam

条件	竣工期							蓄水期						
	沉降 / cm	水平位移/ cm				大主应力 / MPa	小主应力 / MPa	沉降 / cm	水平位移/ cm				大主应力 / MPa	小主应力 / MPa
		指向 上游	指向 下游	指向 右岸	指向 左岸				指向 上游	指向 下游	指向 右岸	指向 左岸		
考虑接触	79.4	-18.3	27.1	11.4	-11.9	3.32	1.38	84.8	-9.0	29.5	11.8	-12.2	3.43	1.44
不考虑接触	77.9	-15.9	24.2	10.8	-11.0	3.29	1.32	83.3	-8.3	26.1	11.2	-11.4	3.41	1.40

从极值差异可以看出,顺河向位移极值受接触效应影响最为明显,这主要是由于该坝修建于河流转弯处,上、下游方向坡度陡峭,且上、下游方向坝体变形受河谷约束效应小。考虑接触效应后坝体大、小主应力极值均略有增大。坝体应力、变形极值一般出现在河床最大剖面部位,而坝体与基岩作用最为强烈区域一般位于坝肩,所以仅通过极值变化难以全面表征坝体与基岩的接触效应。本节通过典型横剖面 0+210.0 以及坝轴线纵剖面应力、变形分布,讨论接触效应对坝体应力、变形的影响。由于竣工期和蓄水期应力变形结论基本相同。受篇幅所限,本节仅列出了蓄水期坝体的应力、变形结果。

图 11(a)、11(b)为蓄水期横剖面 0+210.0 沉降和顺河向位移等值线分布,可以看出,在河床最大剖面考虑接触后沉降略大于不考虑接触效应,考虑接触效应后坝体顺河向位移明显大于不考虑接触效应。众所周知,陡峻河谷地形区域坝体变形梯度大,不均匀沉陷易引起坝体裂缝。李君纯^[16]基于工程实践提出的变形倾度法是一种行之有效的判断裂缝区域的方法,文献[17]将其与有限元方法结合,使该方法应用更为便捷。本次研究亦在有限元方法中加入计算各单元倾斜度指标的算法。在整体坐标下,沿顺河向倾度 $\gamma_y = (\partial S / \partial y) \times 100\%$; 沿坝轴向倾度 $\gamma_x = (\partial S / \partial x) \times 100\%$ 。目前,坝料产生裂缝的临界倾度值尚没有定论,根据一些工程经验,开裂临界值取 1% 是大体合适的^[18]。图 12(a)、12(b)为不考虑和

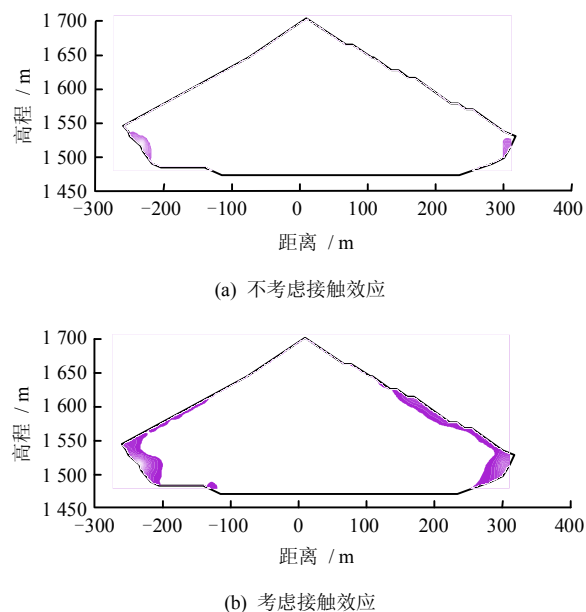


图 12 蓄水期最大横剖面顺 $\gamma_y \geq 1\%$ 区域

Fig.12 Areas where deformation gradient γ_y greater than 1% of the maximum cross section during storage period

考虑接触效应时横剖面 0+210 顺河向倾度大于等于 1% 区域分布。计算结果表明,考虑接触效应后可能产生裂缝的区域增大,尤其体现在上游垫层区和下游坝坡低高程部位,这主要是由于不考虑接触效应时坝体与基岩直接连接限制了坝体的变形,计算结果接触部位变形梯度小,所以考虑坝体与地基的接触效应后接触部位变形更接近实际情况。

图 13 为蓄水期坝轴线纵剖面位移分布,可以看出,考虑接触效应后坝体沉降和轴线位移均有了不

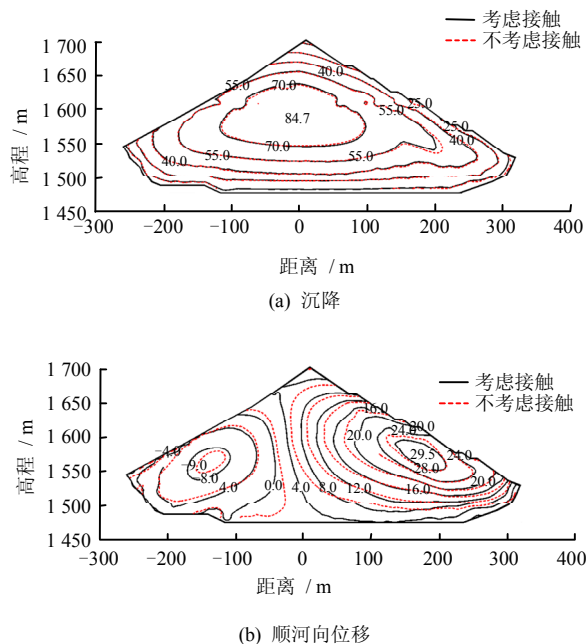


图 11 蓄水期最大横剖面位移分布 (单位: cm)

Fig.11 Displacement contours of the maximum cross-section during storage period (unit: cm)

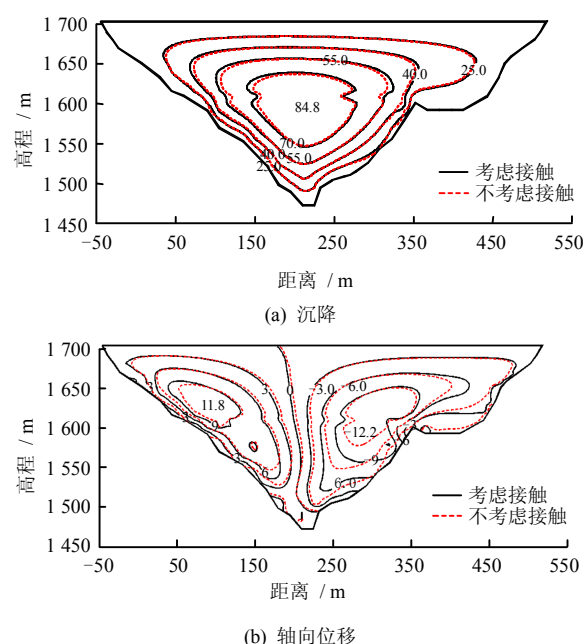
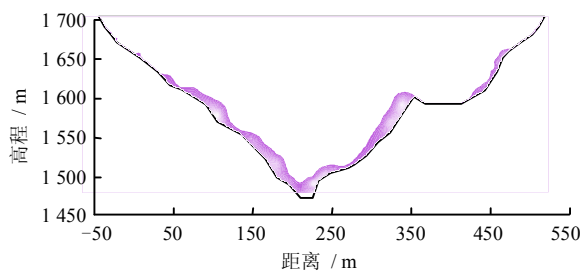


图 13 蓄水期坝轴线剖面位移分布 (单位: cm)

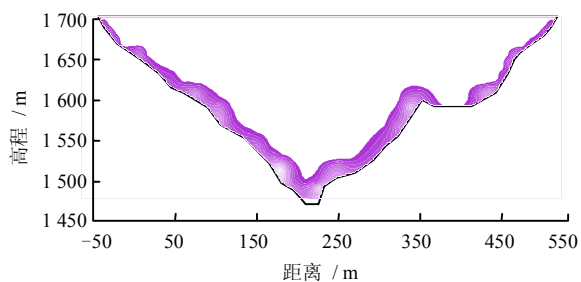
Fig.13 Displacement contours of longitudinal section during storage period (unit: cm)

同程度增加,尤其是右岸最为陡峭的边坡位置,其轴向位移大于不考虑接触效应。图 14 为蓄水期坝轴线剖面轴向倾度大于 1% 的区域分布。由图可明显看出,考虑接触效应后,坝体相对于基岩的滑移变形会导致岸坡部位出现较大的可能开裂区,若不考虑岸坡接触效应,计算得到的结果是偏危险的。

图 15(a)、15(b)为蓄水期坝轴线纵剖面大、小



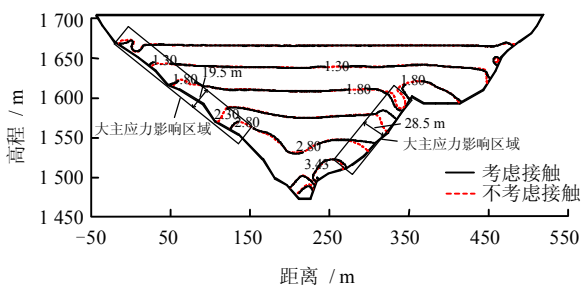
(a) 不考虑接触效应



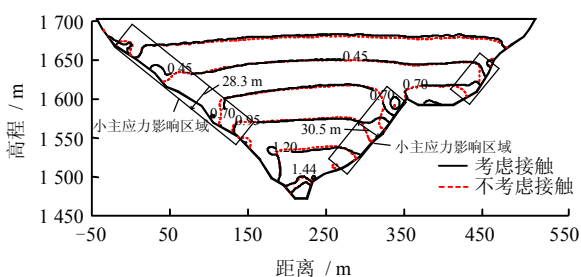
(b) 考虑接触效应

图 14 蓄水期坝轴线剖面 $\gamma_x \geq 1\%$ 区域

Fig.14 Areas where deformation gradient γ_x greater than 1% in longitudinal section during storage period



(a) 大主应力



(b) 小主应力

图 15 蓄水期坝轴线剖面主应力分布 (单位: MPa)

Fig.15 Principal stress contours of longitudinal section during storage period(unit: MPa)

主应力分布,可以看出,接触效应对河床部位坝体主应力分布影响极小,影响最为强烈的部位位于岸坡附近,坝轴线剖面处左岸岸坡平均坡角约为 39° ,右岸古河床阶地较为平缓,其余坝坡平均坡角约为 46° 。从主应力分布规律看,考虑了接触效应后岸坡处大、小主应力总体有所增大,尤其是小主应力增加更为明显。由此可知,不考虑接触效应的计算结果会高估岸坡附近的拱效应。图 15 中同时标出了接触效应影响区域,大主应力左、右岸的影响区厚度约分别为 19.5、28.5 m,小主应力左、右岸的影响厚度约分别为 28.3、30.5 m,边坡越陡峭影响深度越大。

4 坝基与坝体接触效应对面板应力变形影响分析

表 4 列出了考虑和不考虑接触效应时大石峡大坝面板应力和变形特征值,图 16 为正常蓄水期面板变形和应力分布。本工程中,考虑接触效应面板挠度较不考虑接触效应减小了 0.8 cm,顺坡向压应力减小了 0.6 MPa,这是因为:该工程面板分期施工,1 期面板浇筑后坝体继续填筑,则面板位移随之指向上游。考虑接触效应时坝体指向上游的顺河向位移更大(如图 16(b)所示),蓄水后水荷载将面板压回下游,面板的挠度反而会小,面板顺坡向拉、压应力也相应地变小。本例中面板上部的顺坡向拉应力减小了 0.11 MPa。面板轴向位移分布受地形影响强烈,左、右岸分布不对称性强,考虑接触效应后面板指向右岸的位移增大了 0.9 cm,受地形影响大坝左岸上游区域滑动位移较右岸上游区大,所以,指向右岸的变形一定程度上抑制了指向左岸的变形。考虑接触后指向左岸变形减小了 0.2 cm,总体上,大坝整体向河床挤压趋势增加,面板轴向挤压变形增加,轴向压应力增大了 0.20 MPa。面板轴向拉应力最大值位于右岸,考虑接触后右岸位移有所增大,拉应力也增加了 0.31 MPa。考虑接触后面板挠度、轴向位移、轴向压应力、顺坡向压应力变化幅度分别为 2.1%、22.5%, 2.0%, 4.1%。可以看出,接触效应对面板轴向变形影响最大,面板的应力状态受接触效应影响较小。

表 4 大石峡坝体面板应力变形特征值

Table 4 Extreme values of stress and deformation of slab in Dashixia dam

条件	挠度 / cm	轴向位移 / cm		轴向应力 / MPa		顺坡向应力 / MPa	
		指向右岸	指向左岸	压应力	拉应力	压应力	拉应力
考虑接触	37.5	4.0	-2.2	9.87	-1.41	13.93	-1.50
不考虑接触	38.3	3.1	-2.4	9.67	-1.10	14.53	-1.61

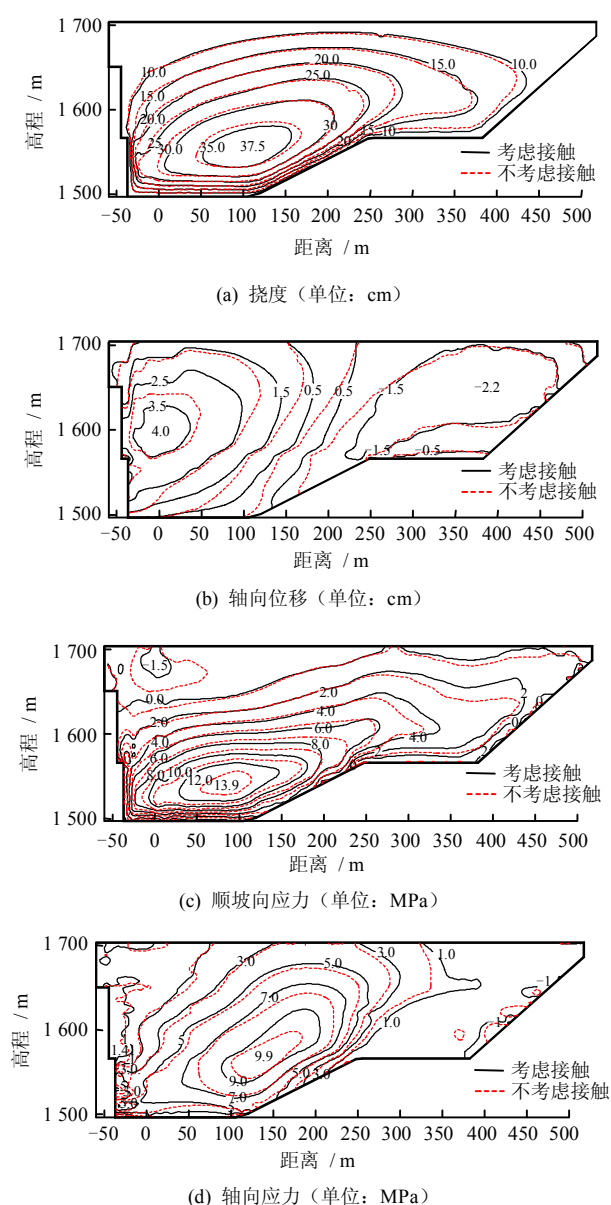


图 16 蓄水期面板应力和变形分布
Fig.16 Stress and deformation of slab during full storage period

5 接触效应对止水接缝变形影响分析

面板周边缝被称为面板堆石坝的“生命线”^[19], 接缝过大的变形会导致止水结构破坏, 如不采取有效措施, 则可能导致坝体与基岩接触部位渗透破坏, 甚至发生溃决。图 17(a)~17(c)给出了大石峡面板坝蓄水期周边缝三向变形分布, 图中分别标出了错动、沉陷、张拉变形较大的区域, 不考虑接触效应错动、沉陷、张拉值分别为 25.5、43.7、8.7 mm, 考虑接触效应后分别为 25.0、69.8、12.8 mm。错动位移最大值出现在右岸 0+210.0 剖面附近, 考虑接触效应后右岸剪切位移略有减小, 其原因与面板轴向变形差异相同 (图 16(b)), 即左岸较大的滑移变形抑制了右岸指向河床的变形。周边

缝错动变形主要是由面板的轴向位移引起的, 而周边缝沉陷和张拉变形主要是由面板的挠曲引起的, 在大坝蓄水期, 水荷载引起的面板端挠曲变形要大于轴向挤压变形, 所以表现为考虑接触效应后周边缝沉陷和张拉值变化远大于错动值变化。考虑接触效应后周边缝沉陷变形值大幅度增加, 已接近止水变形极限 (对于 200~300 m 高坝, 沉陷临界值为 80 mm^[19]), 其原因在于右岸 0+210 剖面附近河谷为指向下游的陡坡, 平均角度约为 30°, 水荷载作用下坝体会产生较大的向下游的滑移, 导致周边缝变形状态恶化。周边缝张开区域基本位于右岸坝肩, 考虑接触后张开度略有增大。蓄水后两岸坝肩部位面板竖缝处于张开状态, 最大值位于左岸面板靠近

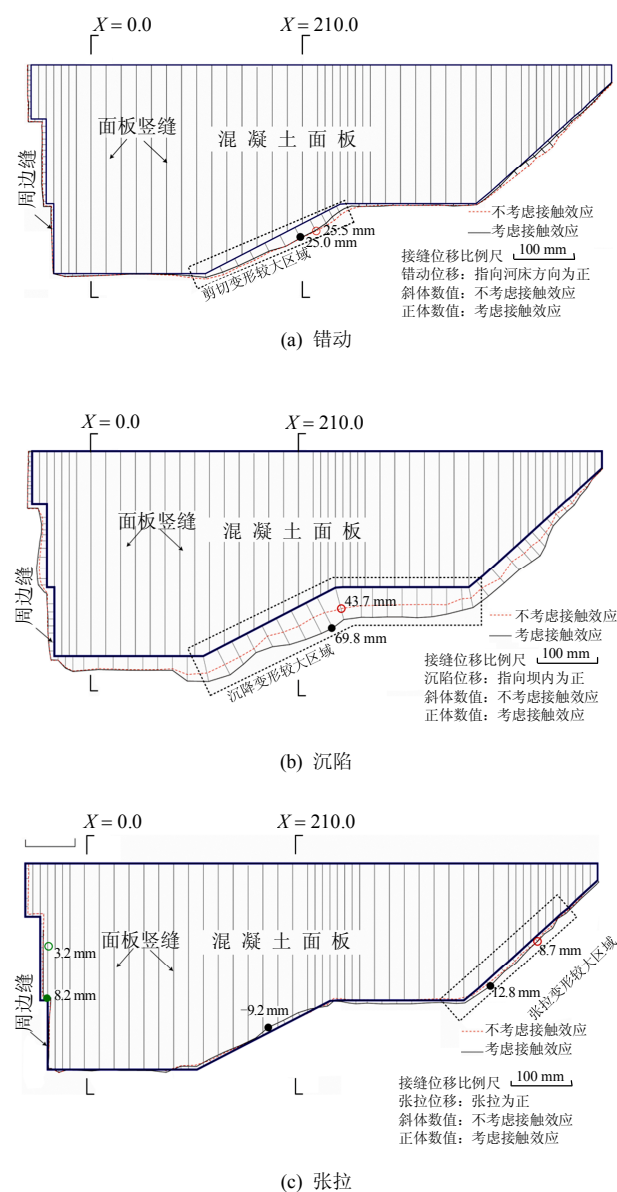


图 17 蓄水期面板周边缝变形
Fig.17 Deformation of peripheral joints during full storage period

趾板部位,不考虑岸坡接触效应竖缝张开最大值为 3.2 mm,考虑接触效应后竖缝张开最大值为 8.2 mm,极值位置见图 17(c),可见,考虑接触效应后面板竖缝张开量增大,尤其是位于趾板附近的止水竖缝。结合大石峡工程周边缝变位特点以及 Anchicaya 坝实测渗漏位置(图 2),能够说明陡峻河谷坝体与基岩摩擦滑移作用对大坝防渗体系,尤其是周边缝变位的不利影响。

6 结论与建议

以拟建的大石峡特高砂砾石面板坝为依托工程,结合室内试验和数值模拟研究了坝体与地基摩擦接触效应对坝体和防渗体应力变形的影响,得到以下结论:

(1) 大型接触面直剪试验结果表明,筑坝粗粒料与基岩面之间存在客观的咬合强度,双曲线模型能较好地模拟粗粒料与基岩面之间的应力-位移非线性关系。

(2) 考虑坝体与基岩的接触效应后,大坝沉降增加了 1.5 cm,竣工期和蓄水期指向上游的最大位移分别增加了 2.4、0.7 cm,指向下游最大位移分别增加了 2.9、3.4 cm;竣工期坝体指向右岸最大位移均增加了 0.6 cm,蓄水期则增加了 0.9、0.8 cm。结果表明,顺河向位移极值受接触效应影响最为明显,这主要是由于上下游坝坡受河谷约束效应小,且与该工程坝址地形相关。采用了有限元倾度法预测了最大横剖面 and 坝轴线纵剖面裂缝可能开展区,结果表明,不考虑坝体与基岩的接触效应时,计算的坝体边界处变形梯度值偏小,若以此确定特殊碾压区,结果偏于危险。比较分析了考虑和不考虑接触效应时坝轴线剖面的主应力分布,结果表明,两者在岸坡附近区域存在较大差异,不考虑接触效应的计算结果高估了岸坡部位坝体的拱效应。接触效应对主应力的影响范围随边坡坡度增加而增加,且小主应力受影响范围要比大主应力大。

(3) 接触效应对面板轴向变形和轴向应力极值影响较大,本工程中影响幅度分别达到 22.5%、4.1%,但是其对面板挠度、顺坡向应力的极值影响相对较小。

(4) 接触效应对面板周边缝三向变位的影响最为强烈,本工程中由于右岸存在陡坡,导致周边缝沉陷较不考虑接触效应增加了近 0.6 倍。靠近两岸趾板的竖缝张开量也有了较大幅度增加。以上结果都表明,陡峻河谷修建面板坝若不考虑接触效应,计算结果偏于危险。从本文计算结果以及 Anchicaya

坝实测渗漏点的分布看,周边缝部位应是陡峻河谷面板坝建设的关键环节。特殊碾压区和特殊垫层料的级配设计、分布范围、压实标准应充分论证、精心设计。

(5) 本文以 247.0 m 高的大石峡面板砂砾石坝为依托进行了坝体与基岩接触效应研究,得到的结论可为工程设计施工提供依据。目前,坝体与地基接触效应的研究总体较少,尚不完善。与工程实际相同的应力、温度、湿度条件下的接触面力学性质演变,应是未来研究的重点。

参考文献

- [1] 日本土质工学会. 粗粒料的现场压实[M]. 郭熙灵译. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
Japan Society of Soil Science. Field compaction of coarse aggregates[M]. Translated by GUO Xi-ling. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 1999.
- [2] 朱晟, 邓石德, 宁志远, 等. 基于分形理论的堆石料级配设计方法[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(6): 1151—1155.
ZHU Sheng, DENG Shi-de, NING Zhi-yuan, et al. Gradation design method for rockfill materials based on fractal theory[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2017, 39(6): 1151—1155.
- [3] 钟登华, 刘东海, 崔博. 高心墙堆石坝碾压质量实时监控技术及应用[J]. 中国科学(技术科学), 2011, 41(8): 1027—1034.
ZHONG Deng-hua, LIU Dong-hai, CUI Bo. Real-time compaction quality monitoring of high core rockfill dam[J]. **Science China(Technology Sciences)**, 2011, 41(8): 1027—1034.
- [4] 马洪琪. 糯扎渡高心墙堆石坝坝料特性研究及填筑质量检测方法和实时监控关键技术[J]. 中国工程科学, 2011, 13(12): 9—14.
MA Hong-qi. Study on the properties of dam materials of HCRFD, filling quality detecting methods & critical real time monitoring techniques[J]. **Engineering Sciences**, 2011, 13(12): 9—14.
- [5] 贾金生, 郝巨涛, 吕小彬, 等. 高混凝土面板堆石坝周边缝新型止水[J]. 水利学报, 2001 (2): 35—38.
JIA Jin-sheng, HAO Ju-tao, LÜ Xiao-bin, et al. New type of waterstop for perimetric joints of high CFRD[J].

- Journal of Hydraulic Engineering**, 2001, (2): 35—38.
- [6] 贾金生, 郝巨涛, 谭建平, 等. 适应大变形的接缝止水结构和材料研究[J]. 水力发电, 2001 (8): 44—45.
- JIA Jin-sheng, HAO Ju-tao, TAN Jian-ping, et al. Study on the joint sealing structure and materials suitable to large deformation[J]. **Water Power**, 2001 (8): 44—45.
- [7] 杨德福, 马锋玲. 面板混凝土抗裂及耐久性研究[J]. 水力发电, 2001 (8): 42—43.
- YANG De-fu, MA Feng-ling. Study on crack resistance and durability of concrete[J]. **Water Power**, 2001 (8): 42—43.
- [8] 贾金生, 郇能惠. 高混凝土面板坝安全关键技术研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014.
- JIA Jin-sheng, LI Neng-hui. Study on key technology for the safety of high CFRDs[M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2014.
- [9] 邓刚, 徐泽平, 吕生玺, 等. 狭窄河谷中的高面板堆石坝长期应力变形计算分析[J]. 水利学报, 2008 (6): 639—646.
- DENG Gang, XU Ze-ping, LÜ Sheng-xi, et al. Analysis on long term stress and deformation of high concrete face rockfill dam in narrow valley[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2008 (6): 639—646.
- [10] 水利电力部科学技术司. 国外混凝土面板堆石坝[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1988.
- Ministry of Science and Technology of Water Resources and Electric Power. Foreign concrete face rockfill dams[M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 1988.
- [11] 朱晟, 王继敏. 建造在狭窄河谷上的高混凝土面板堆石坝[J]. 红水河, 2004, 23(4): 81—84.
- ZHU Sheng, WANG Ji-min. High CFRDs built in narrow valley[J]. **Hongshui River**, 2004, 23(4): 81—84.
- [12] 宋文晶, 王彭煦. 河谷地形对面板坝防渗体系安全性的影响[J]. 水力发电学报, 2008, 27(4): 94—100.
- SONG Wen-jing, WANG Peng-xu. Influence of valley topography on the safety of CFRD anti-seepage systems[J]. **Journal of Hydroelectric Engineering**, 2008, 27(4): 94—100.
- [13] 宋文晶, 高莲士. 窄陡河谷面板堆石坝坝肩摩擦接触问题研究[J]. 水利学报, 2005, 36(7): 793—798.
- SONG Wen-jing, GAO Lian-shi. Frictional contact between abutment and CFRD in deep narrow valley[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2005, 36(7): 793—798.
- [14] 朱百里, 沈珠江. 计算土力学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1990.
- ZHU Bai-li, SHEN Zhu-jiang. Computational soil mechanics[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1990.
- [15] CLOUGH G W DUNCAN J M. Finite element analysis of retaining wall behavior[J]. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, 1971, 97 (SM12): 1657—1 672.
- [16] 李君纯. 土坝裂缝的简捷估算方法[J]. 水利水运科学研究, 1983 (3): 1—11.
- LI Jun-chun. Simple calculation method of soil dam crack[J]. **Hydro-science and Engineering**, 1983 (3): 1—11.
- [17] 彭翮, 张宗亮, 张丙印, 等. 高土石坝裂缝分析的变形倾度有限元法及其应用[J]. 岩土力学, 2013, 34(5): 1453—1458.
- PENG Chong, ZHANG Zong-liang, ZHANG Bing-yin, et al. Deformation gradient finite element method for analyzing cracking in high earth-rock dam and its application[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(5): 1453—1458.
- [18] 张丙印, 张美聪, 孙逊. 土石坝横向裂缝的土工离心机模型试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1254—1258.
- ZHANG Bing-yin, ZHANG Mei-cong, SUN Xun. Centrifugal modeling of transverse cracking in earth core dams[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(5): 1254—1258.
- [19] 陈生水, 李国英, 傅中志. 高土石坝地震安全控制标准与极限抗震能力研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(1): 59—65.
- CHEN Sheng-shui, LI Guo-ying, FU Zhong-zhi. Safety criteria and limit resistance capacity of high earth-rock dams subjected to earthquakes[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(1): 59—65.