

DOI: 10.11779/CJGE201711001

# 特高面板砂砾石坝结构安全性论证

陈生水<sup>1, 2</sup>, 阎志坤<sup>1</sup>, 傅中志<sup>1, 2</sup>, 李国英<sup>1, 2</sup>

(1. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024; 2. 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)

**摘 要:** 基于试验研究与数值计算分析, 对新疆大石峡 250 m 级特高面板砂砾石坝结构安全性进行了论证。结果表明: 压实后的砂砾石料有较高的变形模量、较小的流变和地震残余变形, 大坝运行期坝体最大沉降仅为最大坝高的 0.64%; 设计地震用下坝体最大震陷量仅为最大坝高的 0.40%; 静、动力荷载作用下, 面板周边缝的沉陷和张拉值均未超过国内外已建工程的最大实测值, 周边缝的剪切位移虽然比国内外已建工程的最大实测值大, 但中国在混凝土面板接缝止水结构与材料方面的技术储备已经能够满足其要求。因此, 与相同高度的面板堆石坝相比, 面板砂砾石坝变形安全控制的难度较小。需要指出的是, 250 m 级特高砂砾石坝的防渗面板在静、动力荷载作用下的轴向和顺坡向拉、压应力极值较高, 有必要在面板周边缝和压性垂直缝两侧一定范围配置加强钢筋。

**关键词:** 特高面板砂砾石坝; 应力变形; 结构安全

中图分类号: TV641; TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)11-1949-10

**作者简介:** 陈生水(1962-), 男, 江苏南京人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事岩土与土石坝工程方面的科学研究与技术咨询工作。E-mail: sschen@nhri.cn。

## Evaluation of safety performance of extremely high slab-faced gravel dams

CHEN Sheng-shui<sup>1, 2</sup>, YAN Zhi-kun<sup>1</sup>, FU Zhong-zhi<sup>1, 2</sup>, LI Guo-ying<sup>1, 2</sup>

(1. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 2. Key Laboratory of Earth-Rock Dam Failure Mechanism and Safety Control Techniques, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** The structural safety performance of Dashixia concrete face gravel dam (CFGD), an extremely high CFGD in Xinjiang, is studied based on the large-scale triaxial experiments on dam materials and the detailed finite element method-based numerical analyses. Compacted gravel materials are found to exhibit high deformation modulus, small magnitude of creep and small magnitude of shaking-induced residual deformation. The maximum settlement of Dashixia CFGD during operation is evaluated to be about 0.64% of the dam height, while the earthquake-induced permanent settlement at the crest is about 0.40% of the dam height. The maximum settlement and tension of the peripheral joints do not exceed the maximum measured ones in the investigated existing cases. The shear displacement, on the other hand, is larger than all the measured ones in these cases. However, the advancement in sealing structures and materials achieved in China can already satisfy the need of CFGDs as high as 250 m. Therefore, it can be concluded that the difficulty in deformation control is relatively less compared with that of rockfill dams with similar height. What deserves special attention, on the other hand, is the high static and dynamic stresses in concrete slabs, both along the axial and slope directions. The reinforcements near some peripheral joints and the compressive vertical joints are necessary.

**Key words:** extremely high slab-faced gravel dam; stress and deformation; structural safety

## 0 引 言

混凝土面板砂砾石坝是一种以河床砂砾石开挖料为主要坝体材料, 以上游侧钢筋混凝土面板、趾板以及各类接缝止水结构为防渗系统的土石坝<sup>[1]</sup>。由于砂砾石广泛分布于河床和岸坡滩地, 无需爆破开挖山体, 故其利用成本低廉, 对生态环境影响较小<sup>[2]</sup>。近年来, 中国在高面板砂砾石坝止水结构设计、垫层料级配、排水体结构、原位监测技术以及恶劣环境下施工技术

等领域取得了重要突破<sup>[2-4]</sup>, 并建成了古洞口、乌鲁瓦提、黑泉、吉林台(一级)以及察汗乌苏等一批 150 m 级高混凝土面板砂砾石坝工程, 迄今均安全运行。

目前, 中国规划建设的面板砂砾石坝已经达到

**基金项目:** 国家重点研发计划重点专项项目(2017YFC0404800); 国家自然科学基金项目(51379130, 51539006); 水利行业公益性专项经费项目(201501035)

**收稿日期:** 2017-06-30

250 m 量级,如新疆库玛拉克河上的大石峡水利枢纽,主要利用河床天然砂砾石料构筑拦河面板砂砾石坝,最大坝高 247 m<sup>[3-4]</sup>;位于黄河干流的青海茨哈峡水电站,枢纽建筑物亦拟采用面板砂砾石坝,最大坝高达 256 m<sup>[5]</sup>。尽管 150 m 级面板砂砾石坝建设的实践经验表明,砂砾石料压实后具有较高的变形模量,与利用爆破开挖料填筑的面板堆石坝相比,面板砂砾石坝坝体变形明显降低,且稳定时间较短,变形安全控制难度相对较小<sup>[1-2]</sup>。但天然砂砾石料级配不连续且离散性大,在碾压施工过程中,粗细颗粒易发生分离,导致其抗渗透破坏和抗水流冲刷能力较差;当大坝高度上升至 250 m 后,坝内应力显著增加,使得坝体变形明显增大,不利于大坝防渗排水系统正常工作,从而危及大坝安全<sup>[1-2,6]</sup>。此外,上述两座特高面板砂砾石坝均位于高地震烈度区,100 a 超越概率 2% 地震动峰值加速度分别达到 3.87 m/s<sup>2</sup> 和 2.66 m/s<sup>2</sup>,坝体及其防渗系统在地震荷载作用下的应力、变形以及稳定问题较为突出。尽管中国已有建设水布垭(坝高 233 m)特高混凝土面板堆石坝的成功经验<sup>[7]</sup>,但鉴于坝高的进一步突破以及砂砾石料与爆破开挖料力学与渗透特性的差异,从大坝结构安全、防渗安全以及抗震安全等角度深入研究 250 m 级特高面板砂砾石坝工作性态很有必要。

## 1 工程概况

大石峡水利枢纽工程位于新疆阿克苏市温宿县与乌什县交界的阿克苏河一级支流——库玛拉克河上,是《新疆阿克苏河支流库玛拉克河河段水电规划报告》推荐的库玛拉克河在境内河段上 4 级水电站的龙头水库。水利枢纽为一等大(1)型工程,拦河坝为 1 级建筑物,拟采用混凝土面板砂砾石坝,坝高 247 m,正常蓄水位 1700.00 m,死水位 1590.00 m,电站装机容量 750 MW(三台机),校核洪水位下水库库容 12.74 亿 m<sup>3</sup>,场区地震基本烈度 7 度,拦河坝设防烈度为 8

度。

坝体材料分区方案如图 1 所示,主要分区包括盖重区(1B)、上游铺盖区(1A)、防渗区(F)、垫层区(2A)、反滤料区(3E)、排水区(3D)、主砂砾石区(3B)、下游堆石区(3C)、下游块石护坡(P)。主要分区材料的级配包线如图 2 所示,其中:主砂砾石料最大粒径 500 mm,小于 5 mm 颗粒含量 13%~37%,小于 0.075 mm 颗粒含量不大于 10%,连续级配;垫层料采用块石料场新鲜、坚硬的灰岩石料经破碎加工而成,最大粒径 80 mm,小于 5 mm 颗粒含量 35%~50%,小于 0.075 mm 颗粒含量不大于 2%~7%,连续级配;反滤料布置于垫层料与堆石料以及堆石料与主砂砾石料之间,拟采用天然砂砾石料经筛分剔除粒径大于 60 mm、小于 2 mm 后成料;下游堆石料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;高程 1495 m 以下堆石区按排水料要求填筑,石料要求坚硬、透水性好,拟采用块石料场开采的新鲜、坚硬、抗风化强块石料或混凝土骨料筛分弃料填筑。

面板厚度从上至下按下式计算: $T=0.5+0.0035H$ ,顶部最小厚度 0.4 m,底部最大厚度 1.14 m。面板采用单层双向配筋,钢筋布置于面板中上部,钢筋的保护层厚度不小于 10 cm,横向配筋率按 0.3% 控制、纵向配筋率按 0.35% 控制;在面板压性缝(河床部位)两侧 1.0 m 范围配抗挤压加强筋,结合缝面填充材料(轻质浸沥青木板或塑料泡沫板)吸收可能产生的挤压变形,预防面板垂直缝发生挤压破坏;在约坝高 2/3 以下周边缝附近 10~20 m 范围面板顶面配附加钢筋,以预防拉应力对面板的不利影响。面板拟采用不等宽分缝,单块面板宽度压性垂直缝间距 15 m,张性垂直缝间距 7.5 m,河床段设置压性缝。两岸岸坡段面板垂直缝在距周边缝 1 m 处以折线形式垂直与周边缝衔接。

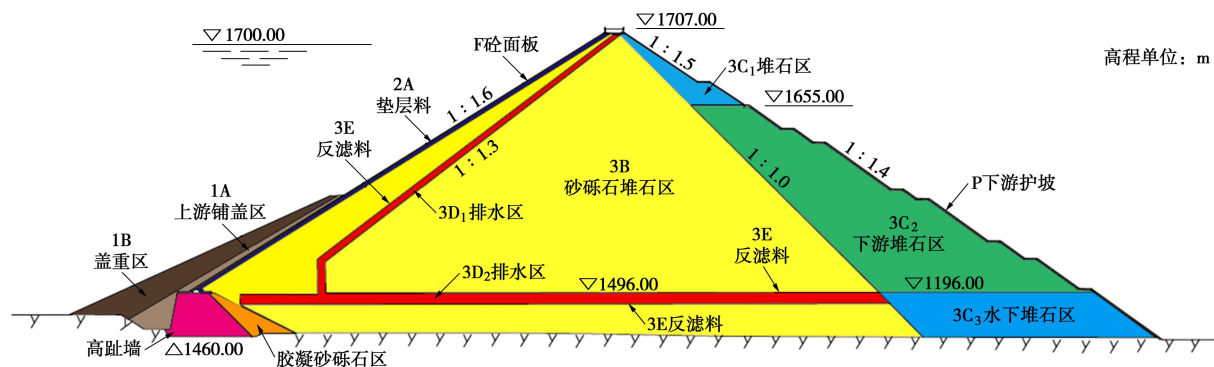


图 1 新疆大石峡面板砂砾石坝材料分区

Fig. 1 Material zones of Dashixia concrete face gravel dam in Xinjiang

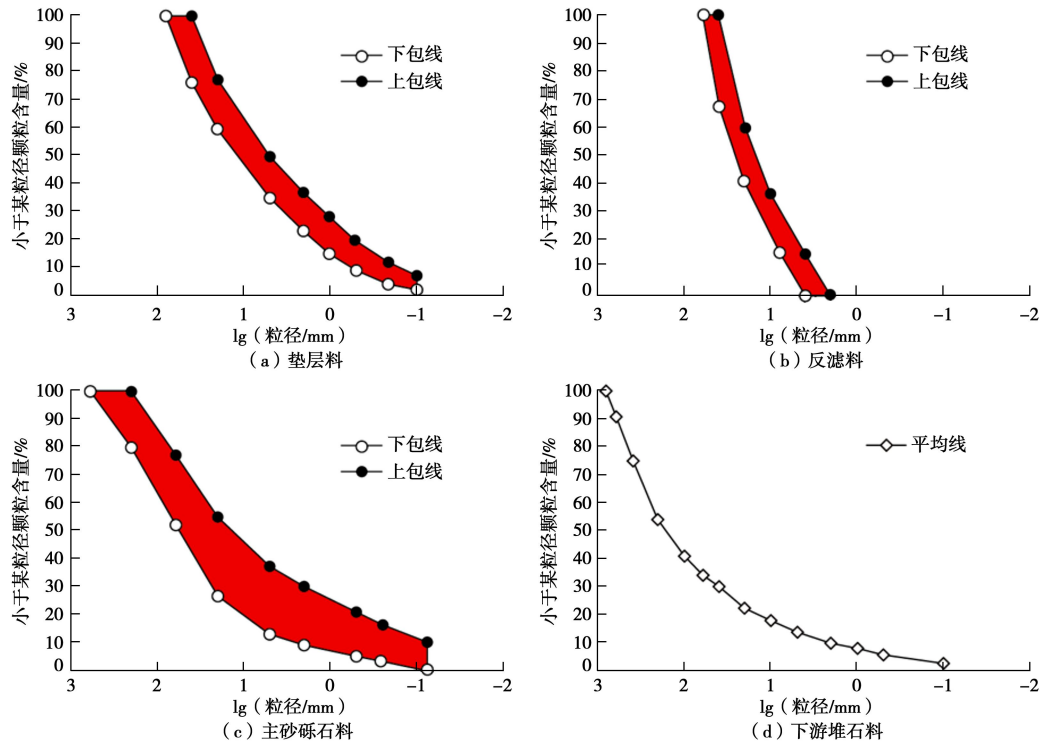


图 2 主要筑坝材料的级配曲线

Fig. 2 Grain-size distributions of main dam materials

## 2 计算模型与参数

### 2.1 静力计算模型与参数

静力计算采用“南水”双屈服面弹塑性模型<sup>[8]</sup>, 其切线弹性模量  $E_t$  和切线体积比  $\mu_t$  表达式分别为

$$E_t = (1 - R_f S_L)^2 \cdot E_i, \quad (1)$$

$$\mu_t = 2c_d \left( \frac{\sigma_3}{p_a} \right)^{n_d} \frac{E_i \cdot R_f S_L}{\sigma_1 - \sigma_3} \frac{1 - R_d}{R_d} \left( 1 - \frac{R_f S_L}{1 - R_f S_L} \frac{1 - R_d}{R_d} \right), \quad (2)$$

其中, 初始模量  $E_i$  和应力水平  $S_L$  与应力状态有关, 可由下述两式计算:

$$E_i = k \cdot p_a \cdot \left( \frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n, \quad (3)$$

$$S_L = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)(1 - \sin \varphi)}{2\sigma_3 \sin \varphi + 2c \cos \varphi}. \quad (4)$$

式 (1) ~ (4) 中  $R_f$ ,  $R_d$ ,  $k$ ,  $n$ ,  $c_d$ ,  $n_d$ ,  $c$ ,  $\varphi$  为模型参数;  $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$  为大主应力和小主应力;  $p_a$  为大气压力。对于粗颗粒材料, 通常黏聚力  $c$  为零, 峰值摩擦角  $\varphi$  则与围压  $\sigma_3$  有关, 即

$$\varphi = \varphi_0 - \Delta\varphi \lg \frac{\sigma_3}{p_a}, \quad (5)$$

式中,  $\varphi_0$ ,  $\Delta\varphi$  为峰值摩擦角参数。

运用大型三轴剪切试验系统对筑坝土石料 (垫层

料、过渡料、砂砾石料以及下游堆石料) 开展了五级围压下的试验研究, 即  $\sigma_3 = 0.4, 0.8, 1.2, 2.0, 3.0$  MPa, 分析整理了主要筑坝材料的上述变形与强度参数, 如表 1 所列。

对砂砾石料和下游堆石料开展了 5 级围压下的流变试验, 围压与三轴剪切试验一致。各级围压下分别在 4 种不同应力水平条件下进行, 即  $S_L = 0.0, 0.2, 0.4, 0.8$ 。根据试验结果, 按照下列最终体积流变量  $\varepsilon_{vf}$  和最终剪切流变量  $\gamma_f$  公式整理参数<sup>[9]</sup>:

$$\begin{cases} \varepsilon_{vf} = b \cdot \left( \frac{\sigma_3}{p_a} \right)^{n_b} + c \cdot \left( \frac{q}{p_a} \right)^{n_c} \\ \gamma_f = d \cdot \left( \frac{S_L}{1 - S_L} \right)^{n_d} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $n_b$ ,  $n_c$ ,  $n_d$  为最终流变量参数;  $q$  为广义剪应力。表 2 中列出了砂砾石料和下游堆石料的流变量参数, 垫层料和过渡料以及排水体的流变量参数参照主砂砾石料选择。

对于坝肩和坝基岩体以及混凝土材料, 采用弹性模型计算。其中, 岩石的弹性模量  $E$  为 10 GPa, 泊松比  $\nu$  为 0.2。混凝土面板与趾板的弹性模量  $E$  为 28 GPa, 泊松比  $\nu$  为 0.167。

### 2.2 动力计算模型与参数

动力计算采用等效线性化方法, 其中岩石与混凝土采用与静力计算相同的参数, 粗粒料的动剪切模量

表 1 筑坝堆石料的“南水”双屈服面弹塑性模型参数

Table 1 Parameters of Nanshui double-yield surface model for dam materials

坝料	$\rho_d$ /(g·cm <sup>-3</sup> )	$R_f$	$k$	$n$	$\varphi_0$ /(°)	$\Delta\varphi$ /(°)	$c_d$ /%	$n_d$	$R_d$
垫层料	2.31	0.67	920	0.29	49.3	5.9	0.49	0.45	0.65
过渡料/排水体	2.26	0.67	1110	0.34	48.7	5.0	0.43	0.51	0.67
主砂砾石料	2.27	0.74	1294	0.32	50.1	6.3	0.30	0.67	0.72
下游堆石料	2.19	0.66	918	0.23	53.2	8.9	0.52	0.69	0.66

表 2 筑坝堆石料的最终流变量模型参数

Table 2 Parameters of creep model for dam materials

坝料	$b$ /%	$c$ /%	$d$ /%	$n_b$	$n_c$	$n_d$
主砂砾石料	0.109	0.028	0.252	0.347	0.554	0.788
下游堆石料	0.138	0.030	0.363	0.358	0.629	0.783

表 3 筑坝堆石料的动力模型参数

Table 3 Parameters of dynamic constitutive model for dam materials

坝料	$k'$	$k_d$	$m$	$\lambda_m$	$c_1$ /%	$c_2$	$c_4$ /%	$c_5$
垫层料	22.8	2010	0.358	0.22	0.33	0.62	7.90	0.86
主砂砾石料	26.9	2459	0.343	0.19	0.36	0.69	5.56	0.84
下游堆石料	24.3	2126	0.311	0.22	0.79	0.83	7.38	0.96

$G$  和阻尼比  $\lambda$  则按照沈珠江建议的模型计算<sup>[10]</sup>，即

$$G = \frac{1}{1 + k' \cdot \bar{\gamma}^c} \cdot k_d \cdot p_a \cdot \left( \frac{\sigma_3}{p_a} \right)^m, \quad (7)$$

$$\lambda = \lambda_m \frac{k' \cdot \bar{\gamma}^c}{1 + k' \cdot \bar{\gamma}^c} \quad (8)$$

其中，归一化的动剪应变幅值定义为

$$\bar{\gamma}^c = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ (\varepsilon_1^c - \varepsilon_2^c)^2 + (\varepsilon_2^c - \varepsilon_3^c)^2 + (\varepsilon_3^c - \varepsilon_1^c)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \left( \frac{p_0}{p_a} \right)^{1-m} \quad (9)$$

上述各式中， $k_d$ ， $m$ ， $k'$ ， $\lambda_m$  为动力模型参数。

运用大型振动三轴试验系统分别针对垫层料、主砂砾料和下游堆石料进行了 5 种不同围压（与静力试验相同）、两种不同固结应力比（ $\sigma_1/\sigma_3=1.5, 2.0$ ）条件下的动弹性模量与阻尼比试验，每一种应力状态下，轴向动应力分 6~10 级施加。此外，亦对垫层料、主砂砾料和下游堆石料开展了排水条件下的动力变形试验，试验应力状态与动模量试验相同。根据沈珠江建议的残余应变模型计算坝体的地震残余变形<sup>[10]</sup>，即

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_v &= c_1 \cdot \gamma_d^{c_2} \cdot \exp(-c_3 S_L^2), \\ \gamma &= c_4 \cdot \gamma_d^{c_5} \cdot S_L \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中， $c_1 \sim c_5$  是 5 个残余应变模型参数。为简单起见，通常取  $c_3 = 0$ 。表 3 中列出了动模量、阻尼比以及残余应变模型参数。

从表 1~3 可以看出，主砂砾料具有很高的变形模量系数  $k$ ，且其流变模型参数  $b$ ， $c$ ， $d$  值明显小于灰

岩堆石料，故可以判断采用砂砾料填筑的坝体变形相对于堆石填筑的坝体要小，这对于坝体变形控制以及防渗系统安全具有重要意义。此外，砂砾料具有较高的动模量系数  $k_d$ ，较低的残余变形参数  $c_1$  与  $c_4$ ，故地震产生的残余变形亦低于堆石填筑的坝体。

### 3 面板砂砾石坝有限元模拟

#### 3.1 坝体网格离散

对混凝土面板堆石坝及其两岸坝肩与坝基岩体进行了有限元离散，共形成单元 68277 个，结点 65623 个，如图 3 所示。其中，基岩单元 40143 个，坝体单元 22803 个，面板与垫层料接触面单元 1282 个，周边缝单元 170 个，面板垂直缝单元 1225 个。接触面与接缝的模拟方法及参数见文献[1]。静力计算的边界条件为：左、右两坝肩的岩体垂直截断边界设坝轴向（ $x$ ）约束；上、下游河谷及岩体垂直截断边界设水流向（ $y$ ）约束；基岩底部水平截断边界设竖直向（ $z$ ）约束。动力计算时，采用无质量地基假定，加速度从基岩底部水平截断边界输入。

#### 3.2 分期加载模拟

静力计算时，首先对坝基和坝肩岩体的初始地应力进行了计算，计算中忽略了构造应力，仅考虑岩体自重的影响。坝体填筑和水库蓄水细分为 60 级模拟，如图 4 所示。初始地应力平衡后首先浇筑混凝土高趾墙以及趾板，因混凝土材料采用线弹性模型，故上述施工过程仅采用一步模拟即可；其次，第 2~11 级模

拟 1 期坝体施工至 1530 m 高程, 第 12~19 级模拟 2 期坝体施工至 1570 m 高程, 第 20~27 级模拟 3 期坝体施工至 1610 m 高程; 其后, 第 28 级模拟一期面板浇筑至 1570 m 高程。第 29~35 级模拟 4 期坝体施工至 1640 m 高程, 第 36~42 级模拟 5 期坝体施工至 1670 m 高程; 其后, 第 43 级模拟二期面板浇筑至 1640 m 高程。第 44~49 级模拟 6 期坝体施工至坝顶高程; 第 50 级模拟三期面板施工至防浪墙底高程; 第 51~60 级模拟水库蓄水至正常高水位。

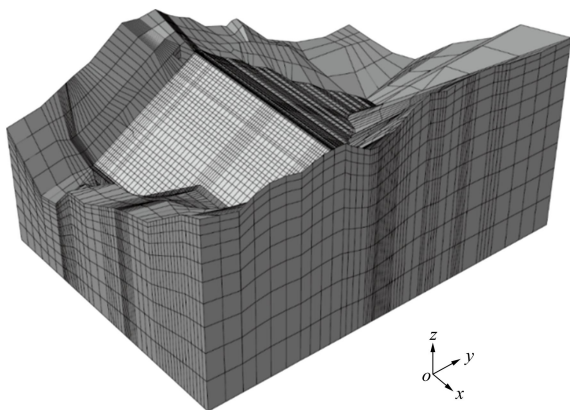


图 3 大石峡面板砂砾石坝三维有限元网格

Fig. 3 Three-dimensional finite element mesh of dam

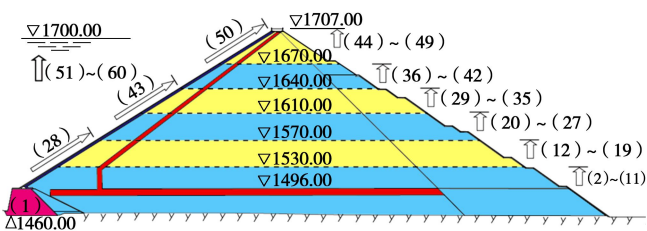


图 4 大石峡面板砂砾石坝填筑与蓄水过程的分级模拟

Fig. 4 Construction and impounding stages of dam

3.3 地震动输入

坝址区 100 a 超越概率 2% 地震动峰值加速度为 0.387g, 其设计规准反应谱参数为:  $\beta_m = 2.60$ ;  $T_0 = 0.04$  s;  $T_1 = 0.1$  s;  $T_g = 0.55$  s;  $C = 1.0$ 。根据上述加速度峰值及反应谱参数, 人工合成了 3 条地震加速度时程曲线, 如图 5 所示。其中, 竖直向加速度峰值为水平向加速度峰值的 2/3。

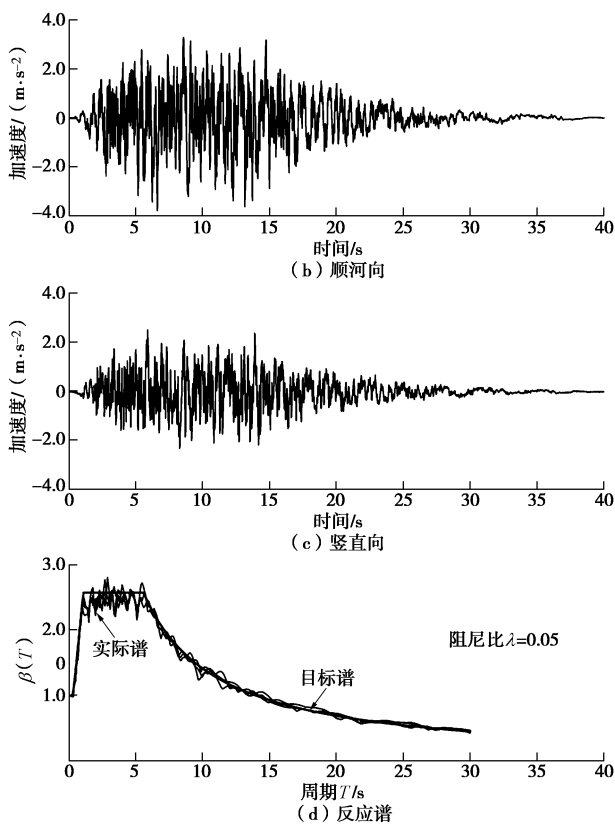
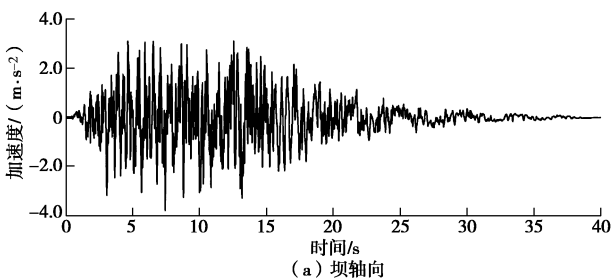


图 5 坝址区 100 a 超越概率 2% 基岩加速度时程曲线与反应谱

Fig. 5 Acceleration histories and spectra at dam site

4 大坝结构安全性评价

4.1 静力安全性分析

表 4 中列出了竣工、蓄水以及运行期(考虑流变)坝体轴向位移、顺河向位移以及沉降极值, 填筑竣工时, 坝体沉降量为 137.1 cm, 蓄水期增加至 149.1 cm, 考虑坝料流变后运行期沉降值约 158.9 cm, 与坝高的比值约为 0.64%。图 6 中给出了中国几座典型面板坝沉降率及其与坝高的关系, 其中, 珊溪和滩坑两座面板坝采用“金包银”方式利用了部分河床砂砾石料, 但其剖面仍然是以开挖堆石料利用为主, 砂砾石料仅小范围采用, 故仍将其归入堆石坝中。从图 6 中可以看出, 对于坝高 100~200 m 的面板堆石坝, 沉降率普遍在 0.6% 以上, 而面板砂砾石坝的沉降率基本上不超过 0.6%。坝高超过 200 m 后, 面板堆石/砂砾石坝沉降率均进一步增加, 但面板砂砾石坝的沉降率仍低于相同坝高的面板堆石坝。可见, 运用高模量砂砾石料按设计要求填筑的面板坝变形控制的难度小于相同高度的面板堆石坝。

图 7 中绘制了坝体顺河向最大水平位移与最大沉降之比与坝高的关系, 除紫坪铺面板坝外, 其余大坝最大水平位移与最大沉降之比基本上不超过 0.2, 也就是说坝体变形主要表现为竖直向沉降。本文采用“南



水”双屈服面模型预测的最大水平位移与最大沉降之比约 0.45，高于其余大坝的实测结果，这可能与“南水”模型以及相应试验方法高估粗粒料剪胀、低估其剪缩性有关。

表 4 竣工、蓄水及运行期坝体变形指标  
Table 4 Deformations of dam at different stages (cm)

计算 条件	坝轴向		顺河向		沉降
	指向	指向	指向	指向	
	右岸	左岸	上游	下游	
竣工期	19.9	23.0	16.8	58.3	137.1
蓄水期	22.2	23.9	4.2	66.1	149.1
运行期	25.0	25.4	4.1	71.7	158.9

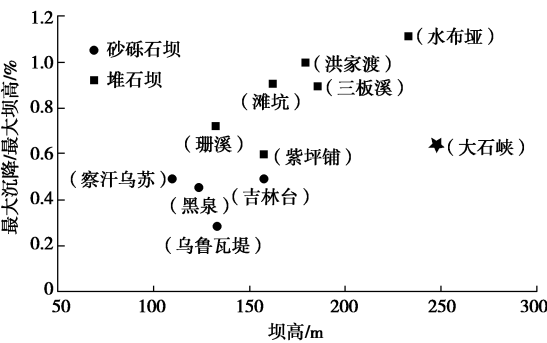


图 6 面板堆石/砂砾石坝沉降与坝高的关系<sup>[11-15]</sup>

Fig. 6 Relationship between settlement and dam height<sup>[11-15]</sup>

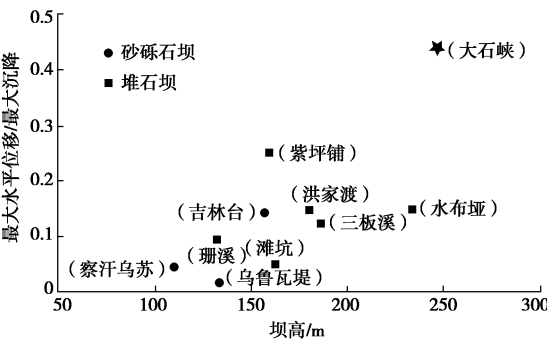


图 7 面板坝水平位移与沉降之比与坝高的关系<sup>[11-15]</sup>

Fig. 7 Relationship between ratio of horizontal displacement to settlement and dam height<sup>[11-15]</sup>

蓄水和运行期，两岸坡面板向河谷中央位移，并在河谷中央面板中产生较大的轴向压应力，两岸岸坡局部范围内出现拉应力。面板顺坡向应力以压为主，仅在顶部小范围内出现拉应力。表 5 中列出了计算得到的各阶段面板轴向和顺坡向拉、压应力极值以及面板轴向位移和挠度极值，运行期面板的最大拉应力达到 2.45 MPa；坝轴向最大压应力达到 22.2 MPa；顺坡向最大压应力达到 23.8 MPa，已经达到或超出 C35 混凝土强度标准值。

表 5 竣工、蓄水及运行期面板应力变形指标

Table 5 Stresses and deformations of concrete slabs

计算条 件	轴向应力/MPa		坡向应力/MPa		坝轴向位移/cm		挠度
	压	拉	压	拉	指向右岸	指向左岸	
竣工期	9.15	1.77	17.09	1.36	2.8	3.5	29.1
蓄水期	17.30	2.16	21.06	1.84	7.1	6.7	51.5
运行期	22.20	2.45	23.81	1.99	11.2	11.3	62.8

天生桥一级面板堆石坝因上、下游堆石料模量差异显著（压缩模量比为 2<sup>[6]</sup>），且上、下游堆石填筑高差过大（最大高差 123 m），上、下游堆石体产生了显著的不均匀沉降，引起上游面拉伸变形，导致垫层开裂，面板与垫层料脱空，致使面板产生了许多水平裂缝<sup>[1]</sup>。天生桥一级面板堆石坝、巴西 Barra Grande 面板坝和 Campos Novos 面板坝等均在运行数年后出现了河床段面板垂直缝挤压破坏<sup>[17]</sup>。可见，对于特高面板坝，在面板压性缝（河床部位）两侧 1.0 m 范围配置抗挤压加强筋，结合缝面填充材料（轻质浸沥青木板或塑料泡沫板）吸收挤压变形；在约坝高 2/3 以下周边缝附近 10~20 m 范围面板顶面配附加钢筋等措施很有必要。

图 8 中绘制了面板堆石/砂砾石坝的面板挠度与坝高的关系，大石峡面板堆石坝运行期最大挠度预测值约 62.8 cm，占坝高的 0.25%左右，该量值略高于水布垭面板堆石坝挠度与坝高的占比。两座 200 m 以上高坝的面板挠度坝高比值均明显高于 200 m 以下面板坝，表明随着坝高增加，面板变形量增加，200 m 以下面板坝面板变形量值的经验可能低估 250 m 级面板坝的面板挠度值。

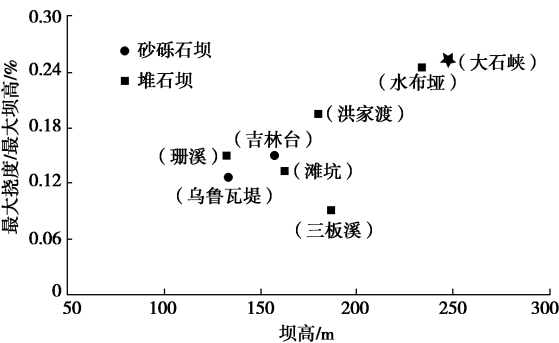


图 8 面板最大挠度与坝高的关系<sup>[11-15]</sup>

Fig. 8 Relationship between maximum slab deflection and dam height<sup>[11-15]</sup>

表 6 中列出的是面板周边缝的三向变位以及面板垂直缝的张拉值，各工况下垂直缝的变形量均低于周边缝变形量，可见周边缝乃是面板坝安全的生命线<sup>[18]</sup>。在水压力的作用下，周边缝沉陷均指向坝内，且随着水深的增加而增大；右岸及河床段周边缝向右岸

剪切, 左岸周边缝则向坝底剪切; 张性周边缝主要分布在左右两岸坡部位, 河床段周边缝处于挤压状态。

表 6 竣工、蓄水及运行期接缝系统变位

计算条件	周边缝			垂直缝
	沉降	剪切	张拉	张拉
竣工期	38.3	36.9	10.7	5.3
蓄水期	58.0	48.6	28.3	14.7
运行期	64.8	56.0	34.7	15.3

图 9~11 中绘制了国内外 63 座面板堆石坝周边缝三向变位与坝高的关系, 图中曲线是陈生水等人根据实测数据拟合的上包线<sup>[18]</sup>。对于沉陷, 仅哥伦比亚 Alto Anchicaya 和澳大利亚 Reece 两座坝的实测数据明显高于该上包线, 大石峡面板坝周边缝沉降约 65 mm, 略低于该上包线, 未突破经验。周边缝的剪切变形比经验公式预测的界限值高 10 mm 左右; 张拉变位则低于经验公式预测值 10 mm 左右。总体而言, 大石峡面板坝周边缝的三向变位均高于已建的水布垭面板堆石坝周边缝, 可见对于 250 m 级特高面板坝而言, 研究适应周边缝大变形的止水结构与材料, 增强止水结构自愈性和高水头下稳定性至关重要。

周边缝的沉降和张拉原则上都可以通过增加铜片止水的鼻高来适应, 关键是保障其大剪切位移和高水头作用下不破坏。中国水利水电科学研究院对铜片止水进行的大模型剪切试验表明, 鼻高 135 mm, 鼻宽 30 mm 的铜片止水可以满足 60 mm 的剪切位移要求, 并可能满足 80 mm 的剪切位移要求。抗绕渗模型试验表明, 采用该铜片止水, 并在翼板上单面复合 85 mm 宽、3 mm 厚的 GB 止水板, 可以满足在 3.5 MPa 水压力、接缝剪切位移 80 mm 作用下的止水要求<sup>[21]</sup>。上述试验表明, 中国在接缝止水结构与材料方面的技术储备已经能够满足 250 m 级特高面板砂砾石坝的需求。

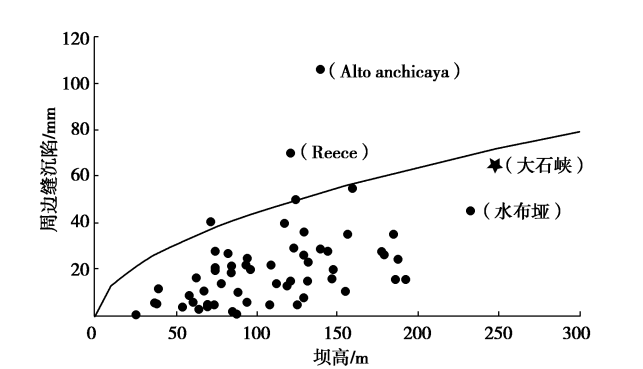


图 9 面板周边缝沉陷与坝高的关系<sup>[18-20]</sup>

Fig. 9 Relationship between maximum settlement of peripheral joints and dam height<sup>[18-20]</sup>

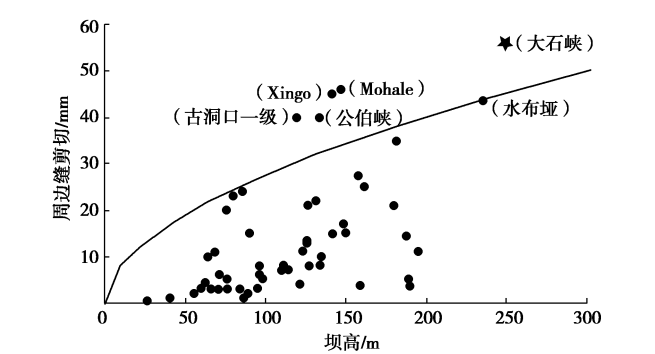


图 10 面板周边缝剪切与坝高的关系<sup>[18-20]</sup>

Fig. 10 Relationship between shear displacement of peripheral joints and dam height<sup>[18-20]</sup>

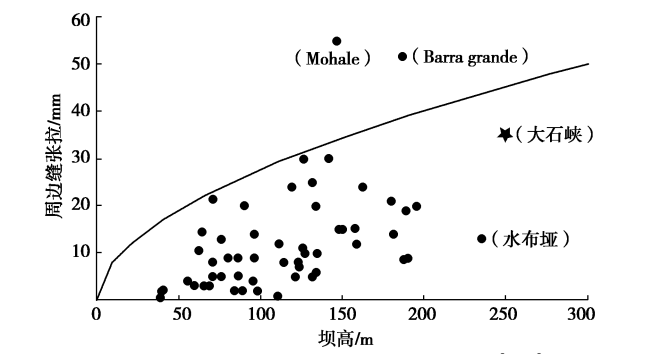


图 11 面板周边缝张拉与坝高的关系<sup>[18-20]</sup>

Fig. 11 Relationship between maximum tension of peripheral joints and dam height<sup>[18-20]</sup>

4.2 动力安全性分析

表 7 中列出了坝体在经受 100 a 超越概率 2% 的地震时的动力反应, 输入加速度在坝顶 1/5 范围内迅速放大, 坝轴向、顺河向和竖直向加速度放大倍数分别达到 2.22, 2.30 和 2.32, 量值与《水电工程水工建筑物抗震设计规范》<sup>[22]</sup>规定的设防烈度 8 度时的动态分布系数 (2.5) 相当, 宜在临近坝顶的下游坝坡面上采取防护措施, 防止堆石松动滚落, 砸坏下游观测房和其他设施。地震使两岸坝体产生向河谷中央的水平位移, 从而在面板中产生水平向挤压, 极易造成垂直缝的压裂。汶川地震时, 紫坪铺面板堆石坝多块面板间垂直缝即在地震永久变形引起的作用在面板上的摩擦力与地震动应力联合作用下, 出现局部挤压破坏<sup>[24]</sup>, 可见, 对于特高面板砂砾石坝, 混凝土面板及其接缝仍然是抗震的薄弱环节。

表 7 设计地震时坝体的动力反应

earthquake					
坝顶加速度放大倍数			水平残余变形/cm		坝顶
坝轴向	顺河向	竖直向	指向 右岸	指向 左岸	震陷 /cm
			指向 上游	指向 下游	
2.22	2.30	2.32	13.0	12.7	—
				59.1	96.8

大石峡面板砂砾石坝在设计地震作用下坝顶震陷量为 96.8 cm，相对震陷量约 0.4%，低于紫坪铺面板坝在汶川地震中的相对震陷量（0.64%）<sup>[23]</sup>，这主要得益于两个方面：首先，砂砾石料的动力变形参数  $c_1$  和  $c_4$  值（见式（10））明显低于堆石料；其次，汶川地震的基岩峰值加速度水平与持续时间均明显高于本文采用的地震动输入。刘君等人整理分析了 123 座土石坝的震害调查资料以及 48 座土石坝的地震永久变形计算结果<sup>[24]</sup>，如图 12 所示。陈生水等基于这些调研资料并结合紫坪铺震害案例指出，对于级配良好的堆石体，在防渗面板发生严重损伤，坝体出现严重漏水后，大坝短期内不会溃决，但考虑到水库大坝安全的重要性及公众对面板损伤的接受程度，建议以坝顶震陷率小于 0.6%作为面板堆石坝的地震残余变形控制标准<sup>[18]</sup>。大石峡面板砂砾石坝的坝顶相对震陷量低于该标准，故在确保砂砾石料碾压质量，精心设计坝内排水系统的前提下，大坝的抗震安全性是有保障的。

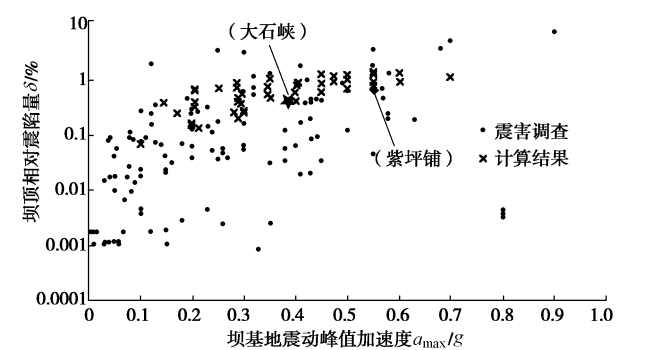


图 12 土石坝坝顶相对震陷量与地震加速度的关系<sup>[23-24]</sup>  
Fig. 12 Relationship between settlement and ground acceleration<sup>[23-24]</sup>

100 a 超越概率 2%地震动作用下，面板坝轴向动压应力极值为 5.72 MPa，动拉应力极值为 5.06 MPa；顺坡向动压应力和动拉应力极值分别为 8.65 MPa 和 7.53 MP，如表 8 所列。且河谷中央部位面板压应力较大，面板上部拉应力较大，与静应力叠加后，面板极易出现拉裂、压碎以及错台等破坏形式，大石峡面板坝工程设计中所采取的在垂直缝两侧面板加强配筋以及吸收挤压变形的工程措施对于抗震也是十分有利的。此外，设计地震动作用下，面板周边缝的沉降、剪切和张开位移最大值分别为 54.0，35.5，21.7 mm；垂直缝张拉位移最大值为 16.6 mm，如表 8 所列。上述接缝位移最大值大都发生在左侧陡峻岸坡坝段，与静力位移叠加后，周边缝极易出现剪切或拉伸破坏，应采取能抵御大位移的止水结构和材料。

总体而言，在地震作用下，大石峡水利枢纽工程 247 m 面板砂砾石坝坝体的动力反应和地震残余变

形、面板的应力变形及接缝位移等分布规律符合高面板堆石坝一般规律，采取必要的抗震工程措施后，大石峡面板砂砾石坝是安全的。值得指出的是，高面板堆石坝的抗震安全并非指大坝及其防渗系统完全不出现局部损伤破坏，而是指即使出现局部损伤破坏时，也不致于引发不可控的库水下泄和溃坝事件。汶川地震过程中，紫坪铺面板堆石坝的混凝土面板和止水结构局部出现了严重损伤，但经过修复后大坝能够继续正常运行。

表 8 设计地震时面板与接缝系统的动力反应  
Table 8 Seismic responses of concrete slabs and joints excited by design earthquake

面板应力/MPa				接缝系统动变位/mm			
轴向动应力		坡向动应力		周边缝		垂直缝	
压	拉	压	拉	沉陷	剪切	张拉	张拉
5.72	5.06	8.65	7.53	54.0	35.5	21.7	16.6

## 5 结 论

针对大石峡特高面板砂砾石坝，采用三维有限单元法对坝体、面板及其接缝系统在竣工、蓄水、运行各阶段以及地震工况下的应力变形性态进行了计算分析，结合已建工程的监测资料，论述了特高面板砂砾石坝工程的结构安全性，得出以下 3 点结论。

（1）大石峡面板坝拟用料场的砂砾石料具有较高的变形模量、较小的流变和地震残余变形，预测的运行期坝体最大沉降约为最大坝高的 0.64%，低于中国已建的水布垭面板堆石坝的沉降率；在设计地震动作用下，坝顶相对震陷量约为最大坝高的 0.40%，低于经历过汶川特大地震的紫坪铺面板堆石坝的坝顶震陷率。目前，水布垭面板坝运行性状良好；紫坪铺面板坝经修复后已正常运行。可以推断，只要按照现行规范精心设计与施工，大石峡面板坝静、动力变形安全是有保证的。

（2）大石峡特高面板砂砾石坝运行期面板的最大拉应力超过 2.45 MPa；最大压应力达到 23.8 MPa，接近或超出 C35 混凝土强度标准值。若进一步遭遇地震，静、动应力叠加后极易造成面板拉裂或压碎。因此，有必要在面板压性缝两侧一定范围配置抗挤压加强筋，结合缝面填充材料吸收挤压变形。

（3）周边缝是特高面板砂砾石坝的生命线，大石峡面板砂砾石坝周边缝的沉陷和张拉预测值分别为 64.8，34.7 mm，均高于已建的水布垭面板堆石坝周边缝实测变位值，但最大沉陷值低于 Alto Anchicaya（106 mm）；最大张拉值低于 Mohale（55 mm）和 Barra Branda（52 mm），上述几座国外大坝均正常运行，故



可以推断周边缝沉陷和张拉不会对大坝防渗系统安全造成重大威胁。在统计的 63 座面板坝中, 大石峡面板坝周边缝的剪切位移是最大的, 达到 56.0 mm, 中国在面板接缝止水结构与材料方面的技术储备已经能够满足该要求。

综上所述, 经过精心设计与施工的 250 m 级特高面板砂砾石坝变形安全是有保障的, 但应采取加强面板配筋、采用柔性嵌缝填料、开发适应大变形与高水头的止水结构与材料等措施来保障防渗系统安全。值得指出的是, 尽管压实后砂砾石料变形模量较高, 变形控制难度相对较小, 但其渗透系数达  $10^{-4}$  cm/s 级, 且在碾压施工过程中, 粗细颗粒易发生分离, 导致其抗渗透破坏和抗水流冲蚀能力较低, 一旦库水大量渗入坝体且不能及时排除, 极易发生渗透破坏, 甚至引发溃坝。因此, 对于特高面板砂砾石坝, 在注重其变形安全控制的同时, 还应高度重视坝体变形对其防渗排水系统长期服役性能的影响。

## 参考文献:

- [1] 顾淦臣, 束一鸣, 沈长松. 土石坝工程经验与创新[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004. (GU Gan-cheng, SHU Yi-min, SHEN Chang-song. Experiences and innovations in earth and rockfill dams[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004. (in Chinese))
- [2] 陈生水. 高混凝土面板砂砾石坝关键技术研究[J]. 中国水利, 2004, 22: 73 - 74. (CHEN Sheng-shui. Key technologies in high concrete face gravel dams[J]. China Water Resources, 2004, 22: 73 - 74. (in Chinese))
- [3] 邓铭江. 严寒、高震、深覆盖层混凝土面板坝关键技术研究综述[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(6): 985 - 996. (DENG Ming-jiang. Advances in key technology for concrete face dams with deep overburden layers under cold and seismic conditions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(6): 985 - 996. (in Chinese))
- [4] 邓铭江, 于海鸣, 李湘权. 新疆坝工技术进展[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(11): 1678 - 1687. (DENG Ming-jiang, YU Hai-ming, LI Xiang-quan. Advances of dam construction techniques in Xinjiang[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(11): 1678 - 1687. (in Chinese))
- [5] FU Zhong-zhi, CHEN Sheng-shui, WANG Ting-bo. Predicting the earthquake-induced permanent deformation of concrete face rockfill dams using a strain potential concept in the finite element method[J]. International Journal of Geomechanics, 2017. (in Press)
- [6] 许百立, 王治明. 浅谈目前中国的高砂砾石面板坝设计[J]. 水力发电, 1998(12): 46 - 49. (XU Bai-li, WANG Zhi-ming. On the design of high concrete face gravel dams in China[J]. Water Power, 1998(12): 46 - 49. (in Chinese))
- [7] 杨启贵, 刘 宁, 孙 役, 等. 水布垭面板堆石坝筑坝技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010. (YANG Qi-gui, LIU Ning, SUN Yi, et al. Construction technologies in the Shuibuya concrete face rockfill dam[M]. Beijing: China Water Power Press, 2010. (in Chinese))
- [8] 沈珠江. 理论土力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000. (SHEN Zhu-jiang. Theoretical soil mechanics[M]. Beijing: China Water Power Press, 2005. (in Chinese))
- [9] 李国英, 米占宽, 傅 华, 等. 混凝土面板堆石坝堆石料流变特性试验研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(11): 1712 - 1716. (LI Guo-ying, MI Zhan-kuan, FU Hua, et al. Experimental studies on rheological behaviors for rockfills in concrete faced rockfill dam[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(11): 1712 - 1716. (in Chinese))
- [10] 沈珠江, 徐 刚. 堆石料的动力变形特性[J]. 水利水运科学学报, 1996(2): 143 - 150. (SHEN Zhu-jiang, XU Gang. Deformation behavior of rock materials under cyclic loading[J]. Hydro-Science and Engineering, 1996(2): 143 - 150. (in Chinese))
- [11] 郇能惠. 中国高混凝土面板堆石坝性状监测及启示[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(2): 165 - 173. (LI Neng-hui. Performance of high concrete face rockfill dams in China and its inspiration[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(2): 165 - 173. (in Chinese))
- [12] 菅 强, 顾永明, 韩 庆. 察汗乌苏水电站面板堆石坝坝体沉降变形规律分析[J]. 西北水电, 2013(3): 76 - 79. (JIAN Qiang, GU Yong-ming, HAN Qing. Analysis on law of settlement deformation of concrete face rockfill dam embankment[J]. Northwest Water Power, 2013(3): 76 - 79. (in Chinese))
- [13] 韩艳红, 龙智飞. 乌鲁瓦提面板砂砾石坝安全监测分析[J]. 水利水运工程学报, 2010(1): 62 - 68. (HAN Yan-hong, LONG Zhi-fei. Safety monitoring analysis of Wuluwati concrete face gravel rockfill dam[J]. Hydro-Science and Engineering, 2010(1): 62 - 68. (in Chinese))
- [14] 李 为, 苗 喆. 察汗乌苏面板坝监测资料分析[J]. 水利水运工程学报, 2012(5): 30 - 35. (LI Wei, MIAO Zhe. Stress and deformation analysis of Chahanwusu concrete face rockfill dam (CFRD) based on monitoring data[J]. Hydro-Science and Engineering, 2012(5): 30 - 35. (in Chinese))

- Chinese))
- [15] 吴 艳, 周富强, 美丽古丽. 乌鲁瓦提混凝土面板砂砾石坝运行期安全监测资料分析[J]. 水电自动化与大坝监测, 2008, **32**(3): 59 - 63. (WU Yan, ZHOU Fu-qing, Meiliguli. Analysis of safety monitoring data of Wuluwati concrete face rockfill dam for the operation period[J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2008, **32**(3): 59 - 63. (in Chinese))
- [16] 马洪琪. 300 m 级面板堆石坝适应性及对策研究[J]. 中国工程科学, 2011, **13**(12): 4 - 8. (MA Hong-qi. 300 m grade concrete faced rockfill dam adaptability and countermeasures [J]. China Engineering Sciences, 2011, **13**(12): 4 - 8. (in Chinese))
- [17] 沈 婷, 李国英. 超高面板堆石坝混凝土面板应力状态影响因素分析[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(9): 1345 - 1349. (SHEN Ting, LI Guo-ying. Factors for stress behavior of concrete face slab of super-high CFRD[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(9): 1345 - 1349. (in Chinese))
- [18] 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. (in Chinese))
- [19] 国际大坝委员会. 混凝土面板堆石坝设计与施工概念[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010. (International Commission on Large Dams (ICOLD). Concrete face rockfill dams, concepts for design and construction[M]. Beijing: China Water Power Press, 2010. (in Chinese))
- [20] SL228—2013 混凝土面板堆石坝设计规范[S]. 2013. (SL228—2013 Design code for concrete face rockfill dams[S]. 2013. (in Chinese))
- [21] 郝巨涛, 鲁一晖, 贾金生, 等. 高混凝土面板堆石坝接缝止水系统变形适应性研究[C]// 2009 年度堆石坝国际研讨会. 成都, 2009: 291 - 297. (HAO Ju-tao, LU Yi-hui, JIA jin-sheng, et al. Deformation adaptability of water stop systems for joints in high concrete face rockfill dams[C]// International Conference on Rockfill Dams. Chengdu, 2009: 291 - 297. (in Chinese))
- [22] NB 35047—2015 水电工程水工建筑物抗震设计规范[S]. 2013. (NB 35047—2015 Code for seismic design of hydraulic structures of hydropower project[S]. 2013. (in Chinese))
- [23] 陈生水, 霍家平, 章为民. “5.12”汶川地震对紫坪铺混凝土面板坝的影响及原因分析[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(6): 795 - 801. (CHEN Sheng-shui, HUO Jia-ping, ZHANG Wei-min. Analysis of effects of “5.12” Wenchuan earthquake on Zipingpu concrete face rock-fill dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(6): 795 - 801. (in Chinese))
- [24] 刘 君, 刘 博, 孔宪京. 地震作用下土石坝坝顶沉降估算[J]. 水力发电学报, 2012, **31**(2): 183 - 191. (LIU Jun, LIU Bo, KONG Xian-jing. Estimation of earthquake induced crest settlements of earth and rock-fill dams[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, **31**(2): 183 - 191. (in Chinese))