

DOI: 10.11779/CJGE2023S10054

高面板砂砾石坝堆石料力学变形特性及坝体分区研究

邓成进^{1,2}, 周 恒¹, 党发宁², 苗 谳¹, 袁秋霜¹

(1. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065; 2. 西安理工大学岩土工程研究所, 陕西 西安 710048)

摘要: 随着高混凝土面板砂砾石坝高的突破, 坝体内部高应力区和坝坡、坝顶低应力区的应力差别增大, 而不同应力条件下砂砾石料和块石料的力学特性存在较大差异, 将影响着坝体分区及变形安全。开展砂砾石料和块石料三轴力学试验, 研究不同应力条件对其力学变形特性的影响; 在此基础上根据坝体应力分布特征, 研究高混凝土面板砂砾石坝坝体分区。研究表明, 在低围压条件下, 块石料的模量系数大于砂砾石料; 随着围压增加到一定程度, 块石料颗粒破碎导致模量系数大幅降低, 远小于砂砾石料的模量系数; 为充分利用两种堆石料的力学变形特性, 加强高面板砂砾石坝坝体变形控制, 坝体内高、低应力区应分别采用砂砾石料和块石料填筑, 提出一种基于坝体应力分布特征的坝体分区准则和优化调整方法; 最终推荐一种块石料半包砂砾石料的坝体分区型式, 提高了高混凝土面板砂砾石坝的综合安全性。

关键词: 应力条件; 模量系数; 坝体分区准则; 变形控制

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2023)S1-0054-05

作者简介: 邓成进(1986—), 男, 高级工程师, 主要从事土石坝试验和数值模拟研究工作。E-mail: dengchengjin@nwh.cn。

Mechanical deformation characteristics of rockfill and dam body zoning of high concrete face gravel dam

DENG Chengjin^{1,2}, ZHOU Heng¹, DANG Faning², MIAO Zhe¹, YUAN Qiushuang¹

(1. Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710065, China)

Abstract: With the height breakthrough of the high concrete face gravel dam, the stress difference between the high stress zone inside the dam body and the low stress zone on the dam slope and top increases. The mechanical properties of gravel and block stone under different stress conditions are quite different, which directly affects the partition and deformation safety of dam body. The triaxial mechanical tests are carried out to study the influences of stress conditions on the mechanical and deformation characteristics of gravel and block materials. On this basis, according to the stress distribution characteristics of the dam body, the zoning criteria for high concrete face gravel dams are studied. The results show that the modulus coefficient of block is greater than that of gravel under low confining pressure. With the increase of the confining pressure to a certain extent, the modulus coefficient of block materials decreases greatly, while that of gravel materials is larger. In order to take advantage of the mechanical properties of the two materials and strengthen the deformation control of the dam body, the zoning criteria and the optimization adjustment method based on the stress distribution characteristics of the dam body are proposed. The high-and low-stress areas of the dam are filled with gravel and block stone, respectively. Finally, a type of partition type of the dam body with block stone and half-clad gravel stone is recommended, which improves the comprehensive safety of the high concrete face gravel dam.

Key words: stress condition; modulus coefficient; zoning criterion for dam body; deformation control

0 引言

砂砾石料是一种广泛分布于河床和岸坡滩地, 比爆破块石料具有更低的开采成本、更高的抵抗变形能力的填筑材料, 国内利用砂砾石料为主要填筑材料的高混凝土面板砂砾石坝工程实践也日益增多。砂砾石料和块石料力学变形及渗透特性存在较大差异, 直接

影响高混凝土面板砂砾石坝坝体分区安全^[1]。

砂砾石料颗粒磨圆度较高, 细颗粒含量较多, 易于压实, 但渗透稳定性差, 低应力条件下砂砾石料强度不高^[2]; 刘杰等^[3]、陈生水等^[4]研究认为通过设置合

理的坝体排水区和坝料间反滤保护, 可以控制高混凝土面板砂砾石坝坝体渗流安全。块石料大颗粒起到骨架作用, 但颗粒棱角多, 在高应力作用下易发生破碎、重组^[5]; 迟世春等^[6]研究堆石料颗粒单粒强度试验分布规律, 认为破碎后颗粒的粒径级配曲线基本服从分形分布; 陈生水等^[7]研究建立了 8 参数模型, 反映了颗粒破碎对堆石料强度与变形特性的影响。在高面板堆石坝坝体分区安全方面, 徐泽平^[8]研究各坝体分区的碾压密实标准, 减少坝体变形; 钮新强^[9]认为现有分区对下游堆石区的重视程度不足, 导致部分高面板堆石坝出现变形不协调问题。上述研究均为高混凝土面板砂砾石坝坝体分区、坝体砂砾石料反滤排水设计提供借鉴意义。

随着面板坝坝高的增加, 底部荷载增大, 坝体内应力范围增宽, 不同区域的应力差别增大, 考虑不同应力条件下堆石料力学特性的差异性及其对高混凝土面板砂砾石坝坝体分区影响的研究较少。因此, 本文开展砂砾石料和块石料三轴力学试验, 研究不同应力条件对其变形参数的影响; 在此基础上研究高混凝土面板砂砾石坝坝体分区准则和方法, 为高混凝土面板砂砾石坝坝体分区设计和优化提供依据。

1 不同应力条件下堆石料变形特性

1.1 试验方案

试验取料采用大石峡 S3 天然砂砾石料和左坝头块石料。砂砾石料最大粒径一般 500 mm, 5 mm 以下颗粒含量 13%~37%, 不均匀系数 162.6, 曲率系数 6.3, 含泥量 5.3%。块石料为微晶灰岩、角砾灰岩, 属中-坚硬岩类。砂砾石料和块石料设计级配曲线见图 1 所示。

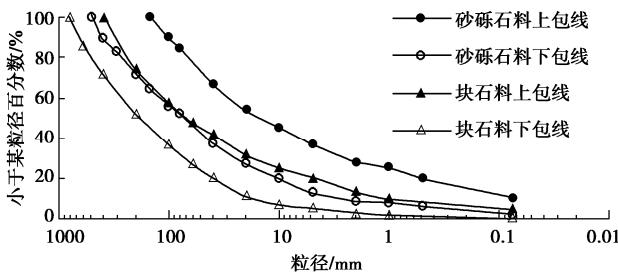


图 1 砂砾石和块石料级配

Fig. 1 Grain-size distribution curves of gravel and stone

块石料试样孔隙率取 19%, 砂砾石料试样相对密度取 0.9, 试验干密度分别为 2.22, 2.28 g/cm³。三轴试验应力条件分别为 50, 100, 200, 300, 400, 800, 1200, 2000, 3000 kPa 共九级围压, 分成低围压(50~300 kPa)、高围压(400~3000 kPa)两组试验。

三轴试验试样尺寸 $\Phi 300 \text{ mm} \times 700 \text{ mm}$, 试样最大粒径 60 mm, 采用等量替代法进行缩制。根据试验的干密度、试样级配曲线计算所需试样颗粒重量, 装样后施加围压固结, 使试样保持排水条件, 进行固结排水剪切试验。低围压和高围压条件下堆石料三轴试验应力应变关系曲线分别见图 2, 3 所示。

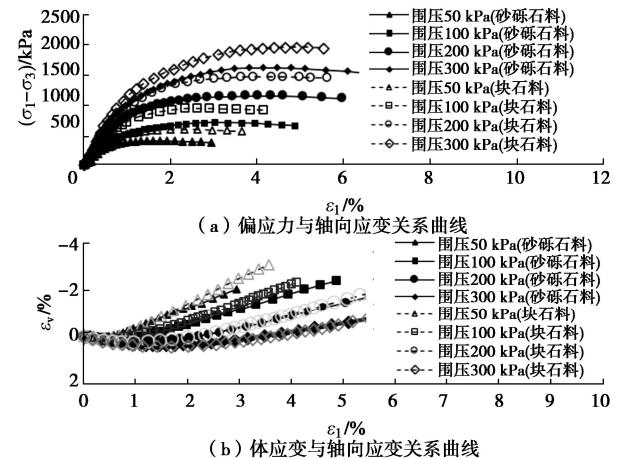


图 2 低围压条件下堆石料三轴试验应力应变关系曲线

Fig. 2 Triaxial test strain curves of rockfill under low confining pressure

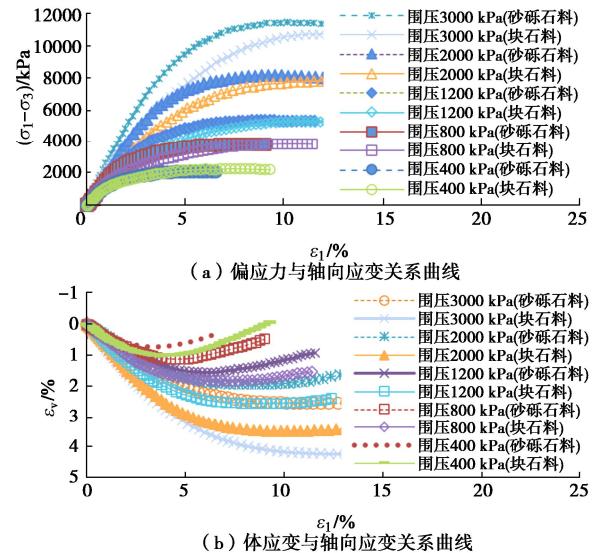


图 3 高围压条件下堆石料三轴试验应力应变关系曲线

Fig. 3 Triaxial test strain curves of rockfill under high confining pressure

由图 2, 3 可知: 在低围压条件下, 由于块石料大颗粒骨架作用明显、颗粒咬合较强, 块石料峰值强度比砂砾石的大; 在高围压条件下, 由于块石料颗粒破碎, 砂砾石料峰值强度反而较大; 不同应力条件下, 块石料和砂砾石料的强度特征存在明显差异。

1.2 应力条件对堆石料变形参数影响分析

采用邓肯-张模型 (E-B) 分别整理出低围压(50~300 kPa)、高围压(400~3000 kPa)条件下块石料和

砂砾石料初始模量与围压的关系见图4所示。

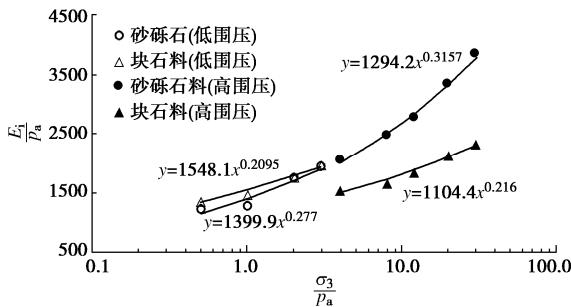


图4 大石峡堆石料的初始模量 E_i 与围压的关系

Fig. 4 Relationship between initial modulus E_i and confining pressure of rockfill in Dashixia project

由图4可知, 砂砾石料的初始模量随着围压增加而增大, 在低围压、高围压应力条件下的模量系数 K 分别为 1399.9, 1294.1, 随着围压增大砂砾石料的模量系数略有下降。而灰岩块石料的初始模量随着围压增加到一定条件后出现突降而后再增加; 低围压、高围压条件下的模量系数 K 分别为 1548.1, 1104.4, 表明在高围压条件下块石颗粒破碎的影响, 颗粒重组导致块石料模量系数大幅下降。

试验表明, 砂砾石料和块石料在不同应力条件下变形特性存在明显差异; 低围压条件下的块石料模量系数大于砂砾石料, 随着围压增加到一定程度, 块石料模量系数大幅下降, 砂砾石料的反而较大。

为了进一步对比分析块石料颗粒破碎对堆石料变形参数的影响, 同时将文献[10]中糯扎渡水电站 T2m 岩层块石料三轴试验的初始模量 E_i 与围压的关系列于图5中, 其三轴试验采用 100, 300, 500, 900, 1500, 2500 kPa 六级围压。

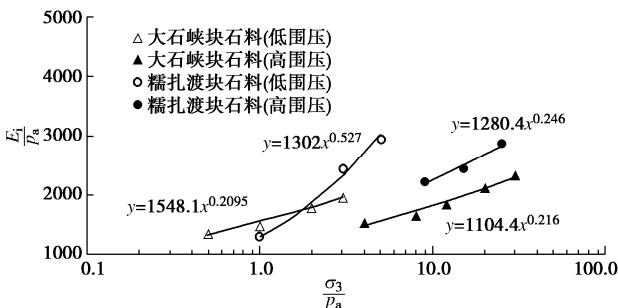


图5 块石料的初始模量 E_i 与围压的关系

Fig. 5 Relationship between initial modulus E_i and confining pressure of block stone

由图5可知, 糯扎渡水电站 T2m 岩层块石料与本次试验灰岩块石料有着类似的规律, 即随着围压增加块石料的初始模量 E_i 增加到一定程度后急剧降低后再增加, 造成了低围压、高围压条件下堆石料 $E-B$ 模型参数 K, n 差异较大。分析认为, 随着试验围压增

加, 当试样内最大压应力值达到块石料颗粒破碎压力值^[11], 块石棱角等薄弱部位被挤压破碎, 颗粒之间骨架会有所调整和重组, 导致一定围压条件下块石料的初始模量急剧下降, 低围压、高围压条件下变形参数差异较大。而砂砾石料颗粒磨圆度高, 颗粒不易破碎, 颗粒间保持相对稳定, 随着围压增加初始模量 E_i 连续性较好, 故砂砾石料变形参数变化不大。

综上所述, 由于高围压条件下块石料颗粒破碎的影响, 块石料在低、高围压条件下变形参数差异较大。在低围压条件下, 块石料模量系数大于砂砾石料; 在高围压条件下, 块石料的颗粒发生破碎, 砂砾石料的模量系数反而较大。

2 基于坝体应力分布特征坝体分区研究

2.1 高混凝土面板砂砾石坝坝体分区准则

目前高混凝土面板砂砾石坝坝体分区利用了砂砾石料抵抗变形能力强、渗透稳定性差以及块石料抗剪强度高的特点^[12], 在坝体上游和中部布置砂砾石料区有利于坝体变形, 下游块石料区有利于提高下游坝坡稳定; 但该分区未考虑坝体应力分布特征和低应力、高应力条件下砂砾石料和块石料力学特性的差异性。

面板堆石坝蓄水后, 大坝主应力最大值一般出现在坝体底部, 随坝体高度增加逐步减小, 大坝顶部、下游区域和上游一定范围内存在较低应力区域。随着坝高增加, 坝体内不同区域的应力差别增大, 坝体变形控制和变形协调问题显得尤为突出。因此, 为加强坝体变形控制, 坝体分区应充分利用低围压条件下块石料变形模量较高、高围压条件下砂砾石料的变形模量反而大于块石料的特点, 低应力区、高应力区分别采用块石料、砂砾石料填筑。同时块石料具有透水性较好、抗剪强度高的特点, 低应力区内采用块石料可加强面板砂砾石坝坝体排水、确保坝体砂砾石料处于干燥状态, 并提高了坝坡抗震安全性。

因此, 随着高混凝土面板砂砾石坝坝高的突破, 为提高坝体变形安全性, 应充分考虑不同应力条件对砂砾石料和块石料力学特性的影响, 坝体划分不同区域, 各分区分别采用合适的填筑料和相应填筑控制指标; 最终以加强坝体变形控制为目标, 兼顾坝体渗透稳定和坝坡抗震安全, 对坝体分区进行优化调整, 作为高混凝土面板砂砾石坝坝体分区准则。

2.2 坝体分区调整方法

根据上述坝体分区准则, 高混凝土面板砂砾石坝坝体分区调整和优化方法和步骤如下: ①初步拟定高

混凝土面板砂砾石坝坝体分区方案以及砂砾石料和块石料的填筑标准。②开展不同应力条件下砂砾石料和块石料力学试验, 分析不同应力条件下堆石料的力学及变形特征, 确定划分坝体高应力区和低应力区的界限值; ③计算高混凝土面板砂砾石坝坝体的应力大小及分布, 以高应力区和低应力区界限值, 将坝体划分为低应力区和高应力区; ④调整坝体分区, 低应力区采用块石料填筑, 高应力区采用砂砾石料填筑; ⑤对坝体分区调整后的坝坡稳定进行复核计算; ⑥重复步骤①至步骤⑤不断调整坝体分区, 使高混凝土面板砂砾石坝安全性得以优化; ⑦最终考虑大坝水库运行条件、施工、投资等因素确定坝体分区。

2.3 高混凝土面板砂砾石坝坝体分区研究

本文依据高混凝土面板砂砾石坝坝体分区准则和方法, 以大石峡 247 m 高混凝土面板砂砾石坝为例进行坝体分区研究。

首先, 根据规范 (SL 228—2013) 初拟坝体分区见图 6 (a) 所示, 主砂砾石料 3B 与下游块石区 3C 分区界限坡比为 1:1.0。开展砂砾石料和块石料力学变形试验 (图 4), 确定划分坝体高应力区和低应力区的界限值。根据坝体应力分布特征, 将大坝坝顶及上下游坡一定范围划为低应力区 ($\leq 400 \text{ kPa}$) 区域, 其它区域为高应力区, 见图 6 (b) 所示。

根据大坝应力分布情况对坝体分区进行优化调整, 大坝坝顶部和上游坝壳低应力区一定高程以上采用块石料, 坝体下游侧高应力区采用砂砾石料, 将砂砾石料和块石料之间界限坡比调缓。最后, 考虑大石峡高混凝土面板砂砾石坝水库水位运行条件, 且大坝坝体分区不宜过于复杂, 最终将死水位以上的上游坝坡和坝顶 30 m 范围调整为块石料, 在满足大坝下游坝坡抗震安全性的基础上, 主砂砾石区与下游堆石区之间的界限坡比调整为 1:1.2, 最终优化调整后的坝体分区方案见图 6 (c)。

调整后大石峡高混凝土面板砂砾石坝坝体分区方案有特点如下: 上游坝坡死水位以下部位承受水荷载作用较大, 属于高应力区, 仍然采用砂砾石料筑坝; 死水位以上荷载较小的上游坝坡部位采用低围压条件下具有较高模量的块石料, 以减少坝体及上游面板止水变形, 同时提高了坝坡稳定性。上游坝坡死水位以上采用强透水的块石料, 加强了死水位以上水位变幅区的强透水性, 使得死水位以上砂砾石坝体在各种运行状态包括极端情况下处于干燥状态, 死水位以下砂砾石坝体通过设置 L型排水区保持干燥 (或非饱和) 状态。

调整后的坝体分区方案充分利用堆石料在不同

应力条件下力学特性的差异性, 与规范设计分区相比, 在加强坝体变形控制的前提下, 兼顾提高坝坡稳定、坝体排水效果, 形成一种块石料半包砂砾石料的坝体分区型式, 使高混凝土面板砂砾石坝的综合安全性得以优化, 因此推荐该分区作为高混凝土面板砂砾石坝的坝体分区。

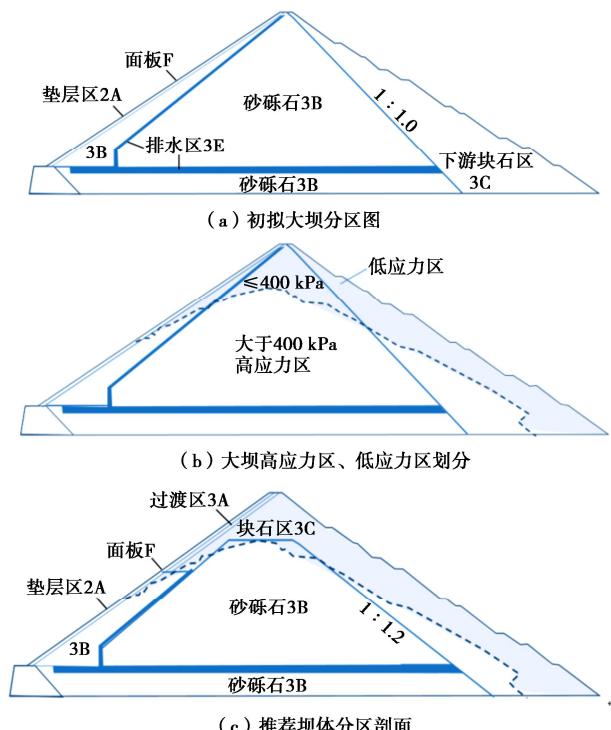


图 6 坝体分区调整

Fig. 6 Standard section of partition scheme

3 结 论

本文开展不同应力条件下块石料和砂砾石料的力学试验, 研究堆石料力学特性及其对高混凝土面板砂砾石坝坝体分区的影响, 优化高混凝土面板砂砾石坝坝体分区, 得出以下两点结论。

(1) 不同应力条件对块石料的力学变形特性影响较大。在低围压条件下, 块石料骨架作用明显, 模量系数大于砂砾石料; 当围压增加到一定程度时, 块石料的颗粒发生破碎, 块石料的初始模量 E_i 急剧降低, 造成在高压条件下块石料的模量系数大幅降低, 砂砾石料的模量系数反而大于块石料。

(2) 根据坝体应力分布特征和堆石料力学特性, 提出将坝体划分成不同区域, 坝体各区域选择合适的填筑材料, 最终以减少和控制坝体变形为目标, 兼顾坝体渗透稳和抗震安全, 形成一种块石料半包砂砾石料的坝体分区型式, 对高面板砂砾石坝坝体分区设计具有较高的参考价值。

参考文献：

- [1] 徐泽平. 混凝土面板堆石坝关键技术与研究进展[J]. 水利学报, 2019, **50**(1): 62-74. (XU Zeping. Research progresses and key technologies of CFRD construction[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, **50**(1): 62-74. (in Chinese))
- [2] 陈生水, 凤家骥, 袁 辉. 砂砾石面板坝关键技术研究[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(1): 16-20. (CHEN Shengshui, FENG Jiaji, YUAN Hui. Research on key techniques of facing sandy gravel dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(1): 16-20. (in Chinese))
- [3] 刘 杰, 谢定松. 我国土石坝渗流控制理论发展现状[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(5): 714-718. (LIU Jie, XIE Dingsong. Advances of earth-rock dam seepage control theory in China[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(5): 714-718. (in Chinese))
- [4] 陈生水, 凌 华, 米占宽, 等. 大石峡砂砾石坝料渗透特性及其影响因素研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(1): 26-31. (CHEN Shengshui, LING Hua, MI Zhankuan, et al. Experimental study on permeability and its influencing factors for sandy gravel of Dashixia Dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(1): 26-31. (in Chinese))
- [5] 邹德高, 田继荣, 刘京茂, 等. 堆石料三维形状量化及其对颗粒破碎的影响[J]. 岩土力学, 2018, **39**(10): 3525-3530. (ZOU Degao, TIAN Jirong, LIU Jingmao, et al. Three-dimensional shape of rockfill material and its influence on particle breakage[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(10): 3525-3530. (in Chinese))
- [6] 迟世春, 王 峰, 贾宇峰, 等. 考虑细观单粒强度的堆石料破碎特性研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(10): 1780-1785. (CHI Shichun, WANG Feng, JIA Yufeng, et al. Modeling particle breakage of rockfill materials based on single particle strength[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(10): 1780-1785. (in Chinese))
- [7] 陈生水, 傅中志, 韩华强, 等. 一个考虑颗粒破碎的堆石料弹塑性本构模型[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(10): 1489-1495. (CHEN Shengshui, FU Zhongzhi, HAN Huaqiang, et al. An elastoplastic model for rockfill materials considering particle breakage[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(10): 1489-1495. (in Chinese))
- [8] 徐泽平. 堆石压实标准及结构分区对混凝土面板堆石坝应力变形影响的研究综述[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2009, **7**(2): 112-119. (XU Zeping. Summarization on studies of impacts of rockfill compaction and zoning on stress and deformation of CFRD[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2009, **7**(2): 112-119. (in Chinese))
- [9] 钮新强. 高面板堆石坝安全与思考[J]. 水力发电学报, 2017, **36**(1): 104-111. (NIU Xinqiang. Security of high concrete face rockfill dam consideration and conclusion[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, **36**(1): 104-111. (in Chinese))
- [10] 陈立宏. 邓肯-张 EB 模型参数求解的二次优化法[J]. 水力发电, 2017, **43**(8): 52-55, 75. (CHEN Lihong. Two step optimization method for parameters of duncan-Chang EB model[J]. Water Power, 2017, **43**(8): 52-55, 75. (in Chinese))
- [11] 柏树田, 崔亦昊. 堆石的力学性质[J]. 水力发电学报, 1997, **16**(3): 21-30. (BAI Shutian, CUI Yihao. The mechanical properties of rockfill[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 1997, **16**(3): 21-30. (in Chinese))
- [12] 关志诚. 强震区砂砾石筑坝技术进展 [J]. 中国水利, 2012(12): 4-5, 20. (GUAN Zhicheng. Dam construction technology of using sand gravel in earthquake zone[J]. China Water Resources, 2012(12): 4-5, 20. (in Chinese))

(编校: 黄贤沙)