

DOI: 10.11779/CJGE2018S2032

尾矿库筑坝土石料大型三轴试验与力学模型研究

汪良峰¹, 汪斌¹, 陈生水², 李跃³*

(1. 中钢集团马鞍山矿山研究院有限公司金属矿山安全与健康国家重点实验室, 安徽 马鞍山 243000; 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; 3. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098)

摘要: 针对沙溪铜矿龙王顶尾矿库工程初设土石坝建设方案, 配置了3种含石量(5%、15%和30%)的筑坝土石料, 开展了常围压条件下的大三轴压缩试验。试验表明, 在低围压下土石料表现出明显的剪胀变形, 在高围压条件下其变形以剪缩为主。随试样含石量从5%增加至30%, 土石料的应力应变曲线形态相似, 但强度和剪胀效应均明显增大。基于试验成果分析, 构造适用于描述土石料剪缩/剪胀变形规律的塑性加载和流动方向矢量。在广义塑性本构模型框架内, 建立了一个适用于土石料的弹塑性力学模型, 阐述了模型参数的确定方法。将此力学模型应用于土石料的大型三轴试验模拟, 发现该力学模型能较好地模拟土石料的剪缩/剪胀变形规律。

关键词: 尾矿库; 土石料; 大型三轴试验; 广义塑性理论; 力学模型

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)S2-0157-05

作者简介: 汪良峰(1977-), 男, 高级工程师, 主要从事岩土力学试验与岩土工程技术研究工作。E-mail: wlf10000@163.com。

Large-scale triaxial tests and modelling mechanical behaviors of soil-rockfill materials for a mine tailings dam

WANG Liang-feng¹, WANG Bin¹, CHEN Sheng-shui², LI Yue³

(1. State Key Laboratory of Safety and Health for Metal Mines, Sinosteel Ma'anshan Institute of Mining Research Co., Ltd., Ma'anshan, 243000, China; 2. Key Laboratory of Earth-Rock Dam Failure Mechanism and Safety Control Techniques of Ministry of Water Resources, Nanjing, 210029, China; 3. Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing, 210029, China)

Abstract: Based on the preliminarily designed construction plan of a soil-rockfill dam for Longwangding tailing dam project in Shaxi Copper Mine, the soil-rockfill materials with three different stone contents (5%, 15% and 30%) are compounded. A series of large-scale triaxial compression tests under various confining pressures are conducted on the soil-rockfill materials. The test results show that the soil-rockfill materials exhibit shear-dilatation and shear-contraction deformations under low and high confining pressures, respectively. With the increase of stone content from 5% to 30%, the stress-strain curves are similar, but the strength and dilatation effects obviously increase. Based on the test result analysis, the plastic loading and flow direction vectors are constructed to build an elastoplastic mechanical model within the generalized plasticity framework. The method for determining the model parameters is described. Then, the model is applied to the simulations of the large-scale triaxial compression tests, and satisfactory simulation on the shear-contraction/dilatation deformations of the soil-rockfill materials is obtained.

Key words: tailings dam; soil-rockfill material; large-scale triaxial test; generalized plastic theory; mechanical model

0 引言

在水利、尾矿库、库区边坡等各类岩土工程中, 土石料是常见的工程开挖对象或工程填料^[1-2]。与细粒粉、黏土相比, 土石料的强度和变形等力学行为更依赖于应力状态。土石料颗粒较大, 土石之间软硬接触, 差异明显, 故其力学性质具有尺寸效应。

针对各类土石料的大型三轴压缩试验研究表明, 低围压状态下剪胀而高围压状态下剪缩是土石料宏观

力学行为中最突出的变形规律^[2]。对这一变形现象的数学描述一直是建立土石料弹塑性力学模型的重要关注点。针对此力学行为, 国内学者在经典塑性理论的基础上发展了一些适用于土石料的弹塑性力学模型^[3-4],

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51539006); “十三五”国家重点研发计划项目(2017YFC0804603)

收稿日期: 2018-07-22

*通讯作者(E-mail: geotechnical@126.com)

获得了较好的模拟效果。另有不少学者将广义塑性理论推广到土石料的本构关系研究中,提出一些能反映土石料变形规律的广义塑性力学模型,取得了卓有成效的研究成果^[5-8],并在一些实际的工程仿真分析中获得较好的应用效果^[9]。

本文针对沙溪铜矿龙王顶尾矿库工程初设土石坝建设方案,配置了3种含石量的筑坝土石料,开展了常围压条件下的大三轴压缩试验。基于试验成果,分析了土石料的应力-应变曲线特征、以及剪缩/剪胀变形特性与围压和含石量的相关性。基于试验分析,在广义塑性力学框架内,采用合适的剪胀方程,构造塑性加载和流动方向的矢量,建立了描述土石料弹塑性变形特性的力学模型,模拟了土石料的大型三轴试验。

1 试验方案及试验过程

1.1 土石料

龙王顶尾矿库是为沙溪铜矿采选矿工程配套的矿山环保工程,初步设计方案为土石坝,拟采用库区开挖山体的土石料作为填筑材料。碎石料的岩性以强—微风化安山岩和闪长斑岩为主,细料以黄褐色黏土、粉土和粉质黏土为主。

在料场采集了部分岩土体进行分析。发现土石料的含石量变化范围较大,约为8%~22%。考虑到岩土材料的随机性,试验配置了3种含石量:5%,15%和30%。制样过程按照DLT 5356—2006《水电水利工程粗粒土试验规程》进行。

1.2 试验加载方案

试样经过饱和和处理,饱和度达到80%以上,开展三轴常围压固结排水试验(CD剪)。对于每组试样,先施加围压至设定的围压值0.2,0.6,1.0 MPa,进行前期固结压缩试验至排水量的变化。然后再开始采用采用位移控制加载轴压,速率为1 mm/min。加载至最大轴向应变达到15%时,认为试样破坏,停止试验。

1.3 试验设备

在中钢集团马鞍山矿山研究院有限公司金属矿山安全与健康国家重点实验室下属的散体力学实验室,采用成都东华卓越科技有限公司生产的应力路径大型三轴试验机进行土石料大型三轴试验研究。该试验机可提供围压 $\sigma_3 \leq 4$ MPa和轴压 $\sigma_1 \leq 17$ MPa,试样直径为300 mm,高度为600 mm。

2 试验成果分析

图1所示是不同含石量土石料试样的大三轴试验曲线。总体上,当轴向应变 $\varepsilon_a < 5\%$ 时,土石料承受的偏应力随应变的增大而增长较快。当 $\varepsilon_a > 6\%$ 之后,偏应力的增长逐渐变缓,并趋于平稳,塑性为其主要变

形特性。

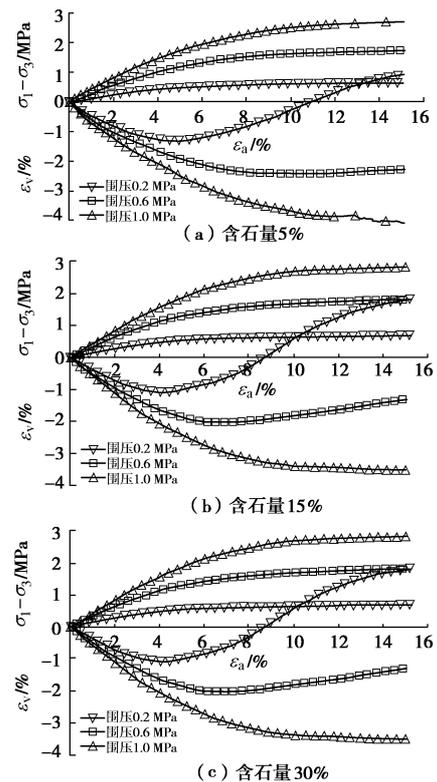


图1 土石料大型三轴试验曲线

Fig. 1 Large-scale triaxial test results for soil-rockfill materials

在0.2 MPa围压条件下,土石料的体积变形大致分为两个阶段:①当轴向应变 $\varepsilon_a < 4\% \sim 5\%$ 时,土石料的体积随轴压的增加而逐渐压缩减小,表现为剪缩为主的体变特性;②当 $\varepsilon_a > 4\% \sim 5\%$ 时,体积由压缩转变为膨胀,表现为剪胀为主的体变特性。

在0.6 MPa围压条件下,土石料的体积变形表现为随含石量的增加,剪胀特性增强。在1.0 MPa围压条件下,对于30%含石量的土石料试样,当 ε_a 达到7%~8%时,体变逐渐由剪缩向剪胀转变。对于5%和15%含石量的土石料试样,体积应变一直表现为剪缩。

3 广义塑性力学模型研究

3.1 应力-应变关系

在岩土材料的弹塑性力学模型中,通常将总应变增量 $d\varepsilon$ (ε 为应变矢量)分解为弹性应变增量 $d\varepsilon^e$ 与塑性应变增量 $d\varepsilon^p$ 之和,即

$$d\varepsilon = d\varepsilon^e + d\varepsilon^p \quad (1)$$

应力增量 $d\sigma$ 可用弹塑性刚度矩阵 D^{ep} 与总应变增量 $d\varepsilon$ 的乘积确定:

$$d\sigma = D^{ep} d\varepsilon \quad (2)$$

D^{ep} 的数学表达式与经典塑性力学是一致的:

$$D^{ep} = D^e - \frac{D^e n_g n_f^T D^e}{n_f^T D^e n_g + H} \quad (3)$$

式中, D^e 为弹性刚度矩阵。 H 为塑性模量。 n_g 和 n_f 分别为塑性流动方向和加载方向单位矢量, 相当于经典塑性力学模型中塑性势面 $g(\sigma)=0$ 和屈服面 $f(\sigma, \xi^p)=0$ (ξ^p 表示塑性内变量) 的法向量的归一化, 即

$$n_g = \frac{\partial g / \partial \sigma}{\|\partial g / \partial \sigma\|} = \frac{\left\{ \frac{\partial p}{\partial \sigma} \quad \frac{\partial q}{\partial \sigma} \right\} \left\{ \frac{\partial g}{\partial p} \quad \frac{\partial g}{\partial q} \right\}^T}{\sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial p} \right)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial q} \right)^2}}, \quad (4)$$

$$n_f = \frac{\partial f / \partial \sigma}{\|\partial f / \partial \sigma\|} = \frac{\left\{ \frac{\partial p}{\partial \sigma} \quad \frac{\partial q}{\partial \sigma} \right\} \left\{ \frac{\partial f}{\partial p} \quad \frac{\partial f}{\partial q} \right\}^T}{\sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial p} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial q} \right)^2}}。 \quad (5)$$

式中, p 和 q 分别为平均应力和广义剪应力。将应力矢量 σ 扩展为二阶应力张量 σ_{ij} , 可以方便地计算 p 和 q 。计算公式如下:

$$p = \frac{1}{3} \sigma_{kk}, \quad q = \sqrt{\frac{3}{2} (\sigma_{ij} - p \delta_{ij})(\sigma_{ij} - p \delta_{ij})}, \quad (6)$$

式中, σ_{kk} 的双“ kk ”下标表示张量的求和计算。 δ_{ij} 为 Kronecker 张量, $i=j, \delta_{ij}=1; i \neq j, \delta_{ij}=0$ 。

3.2 弹性变形参数

众多试验表明, 土石混合料的弹性变形参数与应力状态相关。参考文献[10]关于密实砂土的等向压缩试验研究, 弹性体积应变 ε_v^e 和塑性体积应变 ε_v^p 与平均应力 p 之间有如下关系:

$$\varepsilon_v^e = c_e \left[\left(\frac{p}{p_a} \right)^m - \left(\frac{p_0}{p_a} \right)^m \right], \quad (7)$$

$$\varepsilon_v^p = (c_t - c_e) \left[\left(\frac{p}{p_a} \right)^m - \left(\frac{p_0}{p_a} \right)^m \right], \quad (8)$$

式中, c_t 为压缩指数, c_e 为回弹指数, 与 m 都为土石混合料的材料参数。 p_0 为平均应力的初始值。 p_a 为大气压力。

可采用式 (7) 计算弹性体变模量 K :

$$K = \left(\frac{d\varepsilon_v^e}{dp} \right)^{-1} = \frac{p_a^m}{m c_e p^{m-1}}, \quad (9)$$

弹性剪切模量 G 为

$$G = \frac{3(1-2\nu)}{2(1+\nu)} K, \quad (10)$$

式中, ν 为泊松比。参考相关研究成果^[8], 本文取其值为 0.3。以 K 和 G 为弹性参数可以构造 D^e 。

3.3 剪胀方程

体积应变由剪缩转变为剪胀的体变特征点, 称为体胀点。该点的 q 和 p 之比, 即 $M_c = q_c/p_c$ 描述了剪缩向剪胀转变的应力状态, 是描述土石料剪胀规律的力学参数。将 3 组 9 个土石料试样的体变特征点的 (p_c, q_c) 绘于图 2 中, 可见 p_c 与 q_c 之间具有较好

的线性关系。3 种不同含石量的土石料在不同围压作用下的剪胀比参数 M_c 平均值约为 1.43。

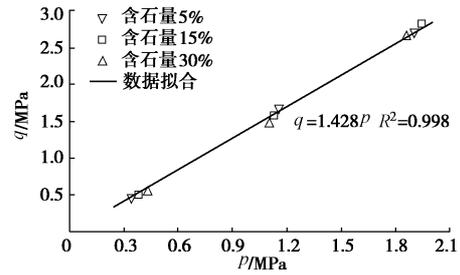


图 2 不同含石量土石料试样的剪胀应力比

Fig. 2 Shear-dilatation stress ratio of soil-rockfill materials with different stone contents

定义塑性体积应变增量 $d\varepsilon_v^p$ 与广义塑性剪应变增量 $d\bar{\gamma}^p$ 之比为剪胀比 d_g 。本文采用文献[8]提出的剪胀方程拟合 d_g 与 η 之间的关系:

$$d_g = \frac{d\varepsilon_v^p}{d\bar{\gamma}^p} = \alpha (M_c - \eta) \exp(\eta / M_c), \quad (11)$$

式中, α 为剪胀参数, 可采用公式(11)拟合 $d_g - \eta$ 的实测数据确定。

图 3 表明围压对剪胀比 d_g 有一定程度的影响。分析另外两组含石量的试验数据发现, 含石量对剪胀特性的影响较围压更大。因此, 在同一种含石量条件下, 采用不同围压的 $d_g - \eta$ 数据拟合均值确定 α 。图 3 中只展示 15% 含石量的 3 个试样的试验数据。由数据拟合可确定 15% 含石量土石料的 α 可取值为 0.489。

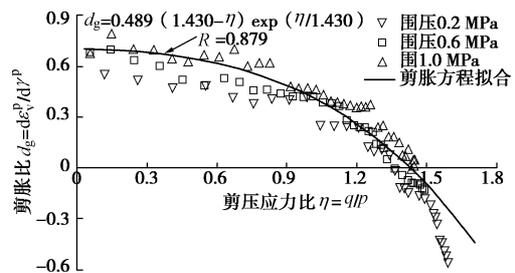


图 3 土石料剪胀比与剪压应力比的关系 (含石量 15%)

Fig. 3 Relation between shear-dilatation-strain ratio and shear-contraction stress ratio (stone content 15%)

3.4 塑性流动与加载方向

通过剪胀比 d_g 的定义以及塑性位势理论, 可以推导出塑性流动方向的表达式:

$$n_g = \frac{1}{\sqrt{d_g^2 + 1}} \left\{ \frac{\partial p}{\partial \sigma} \quad \frac{\partial q}{\partial \sigma} \right\} \left\{ \begin{matrix} d_g \\ 1 \end{matrix} \right\}, \quad (12)$$

式中, $n_{gv} = d_g / \sqrt{d_g^2 + 1}$ 和 $n_{gs} = 1 / \sqrt{d_g^2 + 1}$ 分别表示引起 $d\varepsilon_v^p$ 与 $d\bar{\gamma}^p$ 的 $g(\sigma)=0$ 对 p 和 q 的导数的归一化。

采用非关联流动法则, n_g 与 n_f 不等, 可仿照式 (12) 建立塑性加载方向矢量 n_f 的表达式如下:

$$n_f = \frac{1}{\sqrt{d_f^2+1}} \left\{ \frac{\partial p}{\partial \sigma} \frac{\partial q}{\partial \sigma} \right\} \left\{ \frac{d_f}{1} \right\} \quad (13)$$

类似地, $n_{fv} = d_f / \sqrt{d_f^2+1}$ 和 $n_{fs} = 1 / \sqrt{d_f^2+1}$, 其中

$$d_f = \beta(M_f - \eta) \exp(\eta / M_f) \quad (14)$$

式中, M_f 为土石料的破坏应力比, 即 $M_f = q_f / p_f$ 。参考相关研究成果^[3, 7], 土石料的破坏应力比 M_f 可表示为

$$M_f = M_{f0} \left(\frac{p}{p_a} \right)^{n_f-1} \quad (15)$$

式中, M_{f0} 和 n_f 为表征土石料材料的强度参数。

图4描绘了3组不同含石量土石料试样大型三轴试验破坏点数据 (p_f, q_f) 的破坏应力比值 M_f , 以及与对应的 p/p_a 的关系。采用公式(15)的函数拟合数据点, 可获得不同含石量土石料的强度参数 M_{f0} 和 n_f 的值。由图4可见3种不同含石量的土石料试样, 其破坏应力比曲线形态基本相同。

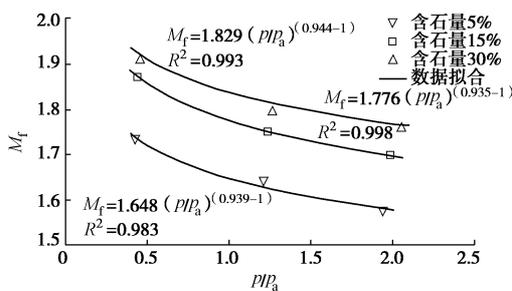


图4 不同含石量土石料的破坏应力比拟合曲线

Fig. 4 Failure data of soil-rockfill materials and approximation-fitting curves for failure-stress ratio

3.5 塑性模量

对式(8)求 ε_v^p 关于 p 的微分, 可得

$$H = \frac{p_a^m p^{1-m}}{m(c_t - c_e)} \quad (16)$$

式(16)的塑性模量 H 仅满足等向压缩的条件。实际上, 试验在剪切加载过程中, 塑性模量 H 不断降低直至破坏时的0值。文献[11]考虑了这一力学现象, 建议引入一个由1递减至0的关于 η 的函数 $t(\eta)$ 以修正塑性模量 H :

$$H = \left(1 - \frac{\eta}{M_f} \right) \frac{1 + (1 + \eta / M_c)^2}{1 + (1 - \eta / M_c)^2} \frac{p_a^m p^{1-m}}{m(c_t - c_e)} \quad (17)$$

4 数值模拟验证

4.1 力学参数确定

基于试验成果, 可以标定所提出力学模型的土石料材料参数, 如表1所示。因未开展等压加、卸载试验, 故不能直接测定压缩指数 c_t 、回弹指数 c_e 和幂指数 m , 本文采用参数试算的方法确定。

表1 土石料的材料参数

Table 1 Mechanical parameters of soil-rockfill materials								
含石量/%	c_t	c_e	m	ν	M_f	n_f	M_c	α
5	0.0161	0.0081	0.552	0.3	1.648	0.939	1.428	0.551
15	0.0142	0.0083	0.580	0.3	1.776	0.935	1.428	0.489
30	0.0115	0.0085	0.623	0.3	1.829	0.944	1.428	0.373

4.2 模拟结果分析

基于表1中的力学参数, 采用提出的力学模型模拟了土石料的大型三轴试验。由图5可见, 本文的广义塑性力学模型的模拟曲线与试验数据差异较小。说明此模型较准确地反映了土石料的强度和变形规律。

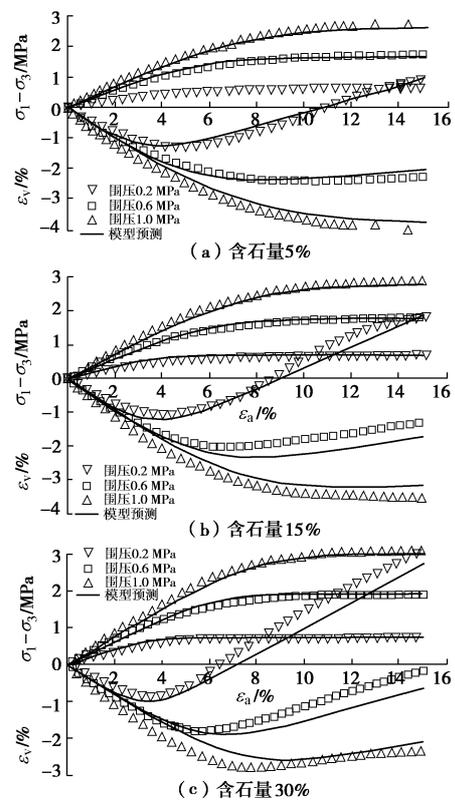


图5 土石料大型三轴试验与数值模拟结果对比

Fig. 5 Comparison between large-scale triaxial test data and numerical simulations of soil-rockfill materials

5 结论

本文针对不同含石量的土石料开展了室内大型三轴试验。基于试验结果, 提出适用的广义塑性力学模型。主要得出以下3点结论。

(1) 在荷载作用下, 土石料试样具有明显的低围压剪胀、高围压剪缩的变形特性。在0.2 MPa的低围压时, 当轴向应变达到4%~5%时, 体积变形由剪缩向剪胀转变。随围压进一步增大, 剪胀点发生迁移而逐渐靠近破坏点。

(2) 含石量对土石料的剪胀特性影响较大, 表明在剪切过程中, 石块之间的接触和相互作用对体积膨胀有较大影响。当约束侧胀的围压较小时, 这一影响更加显著。尽管含石量不同, 但体胀点的剪胀应力比 M_c 变化较小。对于试验的土石料, M_c 约为 1.428。

(3) 基于试验分析, 提出一个适用于土石料的广义塑性力学模型, 用于模拟三轴试验, 获得较好的模拟效果。模型仅使用了 8 个力学参数, 可通过等向压缩和剪切三轴试验确定, 具有较好的实用性。

参考文献:

- [1] HUANG S L, DING X L, ZHANG Y T, et al. Triaxial test and mechanical analysis of rock-soil aggregate sampled from natural sliding mass[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015, 2015: 1 - 14.
- [2] 姜景山, 程展林, 左永振, 等. 粗粒土剪胀性大型三轴试验研究[J]. *岩土力学*, 2014, **35**(11): 3129 - 3138. (JIANG Jing-shan, CHENG Zhan-lin, ZUO Yong-zhen, et al. Dilatancy of coarse-grained soil in large-scale triaxial tests study[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, **35**(11): 3129 - 3138. (in Chinese))
- [3] 刘萌成, 高玉峰, 黄晓明. 考虑强度非线性的堆石料弹塑性本构模型研究[J]. *岩土工程学报*, 2005, **27**(3): 294 - 298. (LIU Meng-cheng, GAO Yu-feng, HUANG Xiao-ming. Study on elasto-plastic constitutive model of rockfills with nonlinear strength characteristics[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, **27**(3): 294 - 298. (in Chinese))
- [4] SUKKARAK R, PRAMTHAWEE P, JONGPRADIST P. A modified elasto-plastic model with double yield surfaces and considering particle breakage for the settlement analysis of high rockfill dams[J]. *Ksce Journal of Civil Engineering*, 2017, **21**(3): 1 - 12.
- [5] 邹德高, 付 猛, 刘京茂, 等. 粗粒料广义塑性模型对不同应力路径适应性研究[J]. *大连理工大学学报*, 2013, **53**(5): 702 - 709. (ZOU De-gao, FU Meng, LIU Jing-mao, et al. Study of adaptability of generalized plastic model of coarse grained soil under various stress paths[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2013, **53**(5): 702 - 709. (in Chinese))
- [6] 王占军, 陈生水, 傅中志. 堆石料的剪胀特性与广义塑性本构模型[J]. *岩土力学*, 2015, **36**(7): 1931 - 1938. (WANG Zhan-jun, CHEN Sheng-shui, FU Zhong-zhi. Dilatancy behaviors and generalized plasticity constitutive model of rockfill materials[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, **36**(7): 1931 - 1938. (in Chinese))
- [7] 朱 晟, 魏匡民, 林道通. 筑坝土石料的统一广义塑性本构模型[J]. *岩土工程学报*, 2014, **36**(8): 1394 - 1399. (ZHU Sheng, WEI Kuang-min, LIN Dao-tong. Generalized plasticity model for soil and coarse-grained dam materials[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, **36**(8): 1394 - 1399. (in Chinese))
- [8] 郭万里, 朱俊高, 彭文明. 粗粒土的剪胀方程及广义塑性本构模型研究[J]. *岩土工程学报*, 2017, **32**(2): 1 - 7. (GUO Wan-li, ZHU Jun-gao, PENG Weng-ming. Study on dilatancy equation and generalized plastic constitutive model for coarse-grained soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, **32**(2): 1 - 7. (in Chinese))
- [9] XU B, ZOU D, LIU H. Three-dimensional simulation of the construction process of the Zipingpu concrete face rockfill dam based on a generalized plasticity model[J]. *Computers and Geotechnics*, 2012, **43**: 143 - 154.
- [10] NAKAI T. An isotropic hardening elastoplastic model for sand considering the stress path dependency in three-dimensional stresses[J]. *Soils and Foundations*, 1989, **29**: 119 - 137.
- [11] 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 Sheng-shui, FU Zhong-zhi, HAN Hua-qiang, et al. An elastoplastic model for rockfill materials considering particle breakage[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, **33**(10): 1489 - 1495. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)