

DOI: 10.11779/CJGE2023S10033

# 胶凝堆石料力学性能试验及本构关系特性研究

赵寿刚<sup>1,2</sup>, 李娜<sup>\*1,2</sup>, 何鲜峰<sup>1,2</sup>

(1. 黄河水利委员会黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003; 2. 水利部堤防安全与病害防治工程技术研究中心, 河南 郑州 450003)

**摘 要:** 通过大型三轴试验得到了胶凝堆石料应力-应变关系曲线, 分析了其力学性能, 并针对关系曲线存在明显的非线性及软化特性, 采用分段描述的方法建立了胶凝堆石料的本构关系, 即破坏强度前考虑剪切所引起的体积变化采用双模量  $K-G$  模型描述, 峰值强度后软化曲线的数学模型通过数据的回归分析和参数反演方式分析得到, 各模型参数均可通过大三轴试验获取, 方便可靠。

**关键词:** 胶凝堆石料; 应力-应变; 龄期; 本构关系; 大三轴试验

**中图分类号:** TV41

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2023)S1-0230-05

**作者简介:** 赵寿刚(1971—), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要从事水工程安全评价和防灾减灾以及试验检测技术等方面的研究工作。E-mail: zsg6537@163.com。

## Experimental study on mechanical properties and constitutive relation of CSG materials

ZHAO Shougang<sup>1,2</sup>, LI Na<sup>1,2</sup>, HE Xianfeng<sup>1,2</sup>

(1. Yellow River Institute of Hydraulic Research, YRCC, Zhengzhou 45003, China; 2. Research Center on Levee Safety & Disaster Prevention, Ministry of Water Resources, Zhengzhou 450003, China)

**Abstract:** The stress-strain relationship curve of cementitious CSG materials is obtained through the large-scale triaxial tests, and its mechanical properties are analyzed. In response to the obvious nonlinear and softening characteristics of the relationship curve, a segmented description method is used to establish the constitutive relation of cementitious CSG materials. The volume change caused by shear is considered in the curve before failure strength, and a two-modulus  $K-G$  model is used to describe it. The mathematical model for the softening curve after the peak strength is obtained through the regression analysis of data and parameter inversion analysis. The parameters of each model can be easily determined through the large-scale triaxial tests.

**Key words:** CSG material; stress and strain; age; constitutive relation; large-scale triaxial test

## 0 引 言

胶凝堆石料作为一种新型的筑坝材料备受工程界关注<sup>[1-5]</sup>。由于胶凝材料用料少、施工工艺粗放,其材料特性介于碾压堆石和混凝土之间,受胶凝含量、骨料级配、含砂率等诸多因素影响,具有明显的非线性应力-应变特征。然而目前已发表文献中,胶凝堆石料本构模型的研究大致可分为线弹性模型和非线性模型两类<sup>[4,6]</sup>,但很多学者重在描述应力-应变关系非线性和软化特征,并未考虑试验过程中体积变形的影响。

本文以双模量  $K-G$  模型为基础来分析胶凝堆石料的应力-应变关系。由已有研究成果可知,  $K-G$  模型在描述切线剪切模量  $G_t$  时,假定了曲线形状,当采用驼峰曲线(即软化曲线)时,在剪应力达到最大值,曲线开始下降时,  $G_t$  出现负值,致使劲度矩阵对角线出现了负值,此时矩阵将出现异常,致使方程可能无解。即使是采用对应于相同剪切应力时上升段的劲度矩阵

或其它方法来替代此时的劲度矩阵,仍与实测关系曲线存在很大差异。为简化计算,本文将针对胶凝堆石料力学性能,根据在简单应力状态下获得的试验资料,利用双模量  $K-G$  模型推导方法,分段建立考虑软化特性的胶凝堆石料本构模型。

## 1 胶凝堆石料力学性能

### 1.1 材料选型

试验材料采用胶凝含量为  $65 \text{ kg/m}^3$  的胶凝堆石料,胶凝剂采用 P.O42.5 普通硅酸盐水泥, I 级粉煤灰:细度 9.3%,需水量比 92%,含水率 0.7%,烧失量 2.8%,水灰比为 1:1,含水率  $75 \text{ kg/m}^3$ 。堆石料级配为直径

**基金项目:** 黄河水利科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项项目 (HKY-JBYW-2020-02)

**收稿日期:** 2023-07-14

**\*通信作者** (E-mail: zhuofan8227@163.com)

40~60 mm 的砂砾石占 8.75%, 20~40 mm 的占 18.83%, 10~20 mm 的占 18.61%, 5~10 mm 的占 14.16%, 5 mm 以下的占 39.65%。

## 1.2 试验方案

试样尺寸按 300 mm×700 mm 的标准, 依据《土工混凝土试验规程》要求进行制备, 试样密度为 2.05 g/m<sup>3</sup>。制样时在成模筒内先套两层橡皮膜, 橡皮膜内侧垫 0.4 mm 的橡胶板, 用振动碾分 5 层装填压实, 成型后带模养护。制备好的试样在承台上安放到位后, 把橡皮膜绑扎在上下透水承压板上, 然后真空饱和。

试样真空饱和固结完成后, 在 100 t 电液伺服粗粒土动静三轴试验机上, 以 0.02 mm/s 的加荷速度进行排水剪切 (CD) 试验, 试验围压分别为 400, 600, 800 kPa, 固结比 1.0。试验过程中记录轴向压力、轴向位移、排水量和孔隙压力, 以峰值强度作为破坏标准, 以轴向应变值达到 15% 或试样完全破坏作为试验结束条件。

## 1.3 应力-应变关系

根据大型三轴试验资料成果<sup>[7]</sup>, 不同龄期试样的应力-应变曲线较为相似, 各龄期不同围压下的应力-应变关系曲线见图 1 所示。可知, 在应力水平较低情况下, 胶凝堆石料的应力-应变关系曲线近似直线发展。一般围压越高直线斜率越大; 随着轴向应力进一步增加, 材料塑性变形增大, 曲线向应变轴偏转, 并逐步达到材料强度极限; 随后材料塑性变形迅速发展, 应力水平难以维持, 并逐步下降; 当应力水平达到残余强度时, 基本维持不变, 材料应变继续发展。

从图 1 可知, 在三向受压情况下, 胶凝材料具有应力峰值, 而且关系曲线可大致分为 3 个阶段: ①弹性变形阶段。从开始加载到试样应力达到胶凝堆石料极限强度的 65%~84% 左右时, 试样的变形与应力成正比, 应力-应变关系曲线基本呈直线, 在此阶段内, 胶凝堆石料可近似为线弹性材料。②塑性变形阶段。当试样的应力超过材料弹性极限强度后, 胶凝堆石料的应变增加速率大于应力增长速率, 应力-应变关系曲线开始逐渐向应变轴弯曲; 试样应力接近胶凝堆石料极限强度时, 应变增加速率急剧增大, 塑性变形明显。③试样破坏阶段。当试样应力达到极限强度时, 因试样发生剪切破坏不能承受更大的外荷载, 此时的极限强度为峰值抗压强度, 相应的应变值为峰值应变。大三轴试验试样的破坏多表现为上中部隆起, 围压较小时, 变形较大部位在试样上端, 随着围压的增加, 逐渐表现为试样中部破坏。当超过峰值抗压强度后, 试样材料间破坏而剪切滑移增大, 变形越来越大, 承载能力下降。继续对试样施压, 随着变形的增大, 剪

切位移克服了颗粒之间的咬合作用, 颗粒结构崩解变松, 黏聚力很快减低, 而颗粒之间的内摩擦力还在起作用, 使试件仍然能够承受一定的外荷载; 当应变达到 15% 左右时, 材料强度趋于一个定值, 即残余强度。峰值强度和残余强度随着围压增长基本呈现增长趋势。

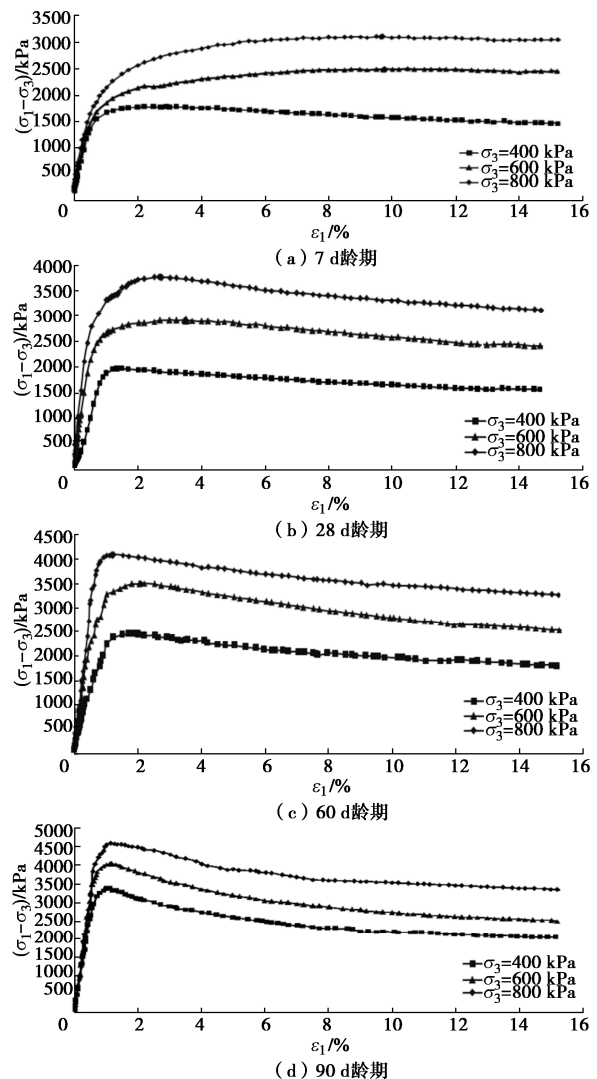


图 1 大三轴试验的应力-应变关系曲线

Fig. 1 Stress-strain curves of samples in triaxial tests

## 2 胶凝堆石料本构关系特性

### 2.1 本构关系基本特性

根据对胶凝堆石料大三轴试验资料的分析, 其应力-应变关系呈现明显的非线性和软化特性, 不满足邓肯-张本构模型中的双曲线假设, 且随着龄期的增长, 越接近材料破坏, 应力-应变关系曲线的切线斜率越高。本文采用应用较为广泛的双模量  $K-G$  模型来描述胶凝堆石料的应力-应变本构关系。该模型在确定参数时所用的剪切应变包含了正应力增加所引起的剪缩,

也包括了剪切所引起的体积变化。在描述胶凝堆石料应力-应变关系的数学表达时,分为以下两个阶段:①峰值强度前曲线用双模量模型描述,考虑剪切所引起的体积变化;②峰值强度后软化曲线的数学模型通过数据的回归分析和参数反演等方式进行挖掘分析。

2.2 峰值强度前本构关系的建立

(1) 切线体积模量  $K_t$  的测定

试验采用各向等压固结,根据增量广义Hooke定律,有

$$K_t = \frac{\Delta p}{\Delta \varepsilon_v} \quad (1)$$

式(1)表明  $p$ - $\varepsilon_v$  关系曲线的切线斜率具有  $K_t$  的物理意义。基于这一点,求得孔隙比  $e$  与压力  $p$  的  $e$ - $p$  关系曲线,即可由此曲线推出  $dp/d\varepsilon_v = K_t$ 。

以60 d龄期胶凝堆石料为例,各向等压固结的试验结果如表1所示。

表1 60 d龄期胶凝堆石料各向等压固结试验结果

Table 1 Results of isotropic isobaric consolidation tests on CSG materials at age of 60 d

压力 $p/\text{kPa}$	试样初始体 积 $V_0/\text{cm}^3$	固体颗粒体 积 $V_s/\text{cm}^3$	排水量 $V_f/\text{cm}^3$	孔隙 比 $e$
400	44405.70	36400	1506.9	4.14
600	44836.02	36400	1335.8	3.67
800	44193.49	36400	1187.5	3.26

由表1可获得孔隙比  $e$  与压力  $p$  的对应关系,并在半对数纸上点绘  $e$ - $\ln p$  关系曲线,  $e$ - $p$  关系可用下式表示:

$$e = e_{a0} - \lambda \ln p \quad (2)$$

式中,  $e_{a0}$ ,  $\lambda$  为试验常数。

进而推得切线体积模量  $K_t$  的表达式:

$$K_t = \frac{dp}{d\varepsilon_v} = \frac{1+e_0}{\lambda} p \quad (3)$$

式中,  $e_0$  为起始孔隙比。

(2) 切线剪切模量  $G_t$  的测定

60 d龄期胶凝堆石料大型三轴试验的  $(q/3)$ - $\bar{\varepsilon}$  曲线如图2所示。 $(q/3)$ - $\bar{\varepsilon}$  关系曲线(峰值前)与双曲线近似,但本次试验为各向等压固结,与Domaschuk等的假设不同,试验条件为  $\sigma_3$  不变,  $G_t$  的表达式计算过程考虑用邓肯-张双曲线的推算过程。根据增量广义Hooke定律可知,  $G_t = \Delta(q/3)/\Delta\bar{\varepsilon}$ ,体现了  $(q/3)$ - $\bar{\varepsilon}$  关系曲线的切线斜率具有  $G_t$  的物理意义。

对于某一剪切应力  $q/3$ ,  $(q/3)$ - $\bar{\varepsilon}$  关系可表示为

$$\frac{\bar{\varepsilon}}{(q/3)} = a + b\bar{\varepsilon} \quad (4)$$

式中,  $a$ ,  $b$  为试验常数。

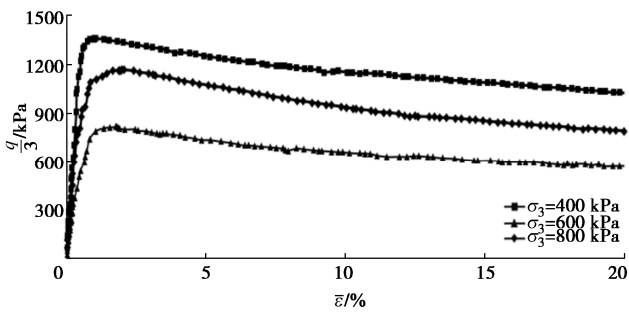


图2 60 d龄期的  $(q/3)$ - $\bar{\varepsilon}$  曲线

Fig. 2 Curves of  $(q/3)$ - $\bar{\varepsilon}$  at age of 60 d

以  $\bar{\varepsilon}/(q/3)$  为纵坐标,  $\bar{\varepsilon}$  为横坐标,构成新的坐标系,则双曲线转换为直线。参照常用的  $E$ - $B$  模型中参数  $a$ 、 $b$  的求取方法(见图3),通过对胶凝堆石料试验资料的整理与分析,取应力水平70%和80%两点的连线求得  $a$ 、 $b$  较合适,其中  $a$  为直线在纵坐标上的截距,  $b$  为直线的斜率。由  $a$  和  $b$  即可求得初始切线剪切模量  $G_t$  和主应力差的渐近值  $(q/3)_{ult}$ 。

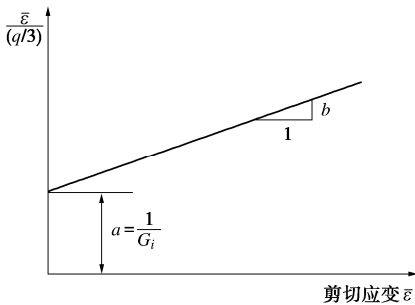


图3  $\bar{\varepsilon}/(q/3)$ - $\bar{\varepsilon}$  关系曲线

Fig. 3 Curves of  $\bar{\varepsilon}/(q/3)$ - $\bar{\varepsilon}$

根据增量广义 Hooke 定律,得

$$G_t = \frac{\Delta \frac{q}{3}}{\Delta \bar{\varepsilon}} = \frac{\partial(\frac{q}{3})}{\partial \bar{\varepsilon}} \quad (5)$$

将式(4)代入式(5),可求得

$$G_t = \frac{1}{a} [1 - b(q/3)]^2 \quad (6)$$

当  $\bar{\varepsilon} \rightarrow \infty$  时,

$$b = \frac{1}{(q/3)_{b \rightarrow \infty}} = \frac{1}{(q/3)_{ult}} \quad (7)$$

定义破坏比  $R_f = (q/3)_f / (q/3)_{ult}$  (其中  $(q/3)_f$  为试样破坏时的应力差, kPa), 则

$$b = 1 / \left( \frac{q}{3} \right)_{ult} = R_f / \left( \frac{q}{3} \right)_f \quad (8)$$

可得切线剪切模量:

$$G_t = G_i \left[ 1 - R_f \left( \frac{q}{3} \right) / \left( \frac{q}{3} \right)_f \right]^2 \quad (9)$$

可见,  $G_t$ ,  $(q/3)_f$ ,  $R_f$  的值均随着  $\sigma_3$  的变化而有所变化。结合胶凝堆石料大三轴试验结果可进一步确定式

中参数  $G_t$ ,  $(q/3)_f$ ,  $R_f$  与围压  $\sigma_3$  的关系, 进而得到

$$G_t = k_1 P_a e^{n\left(\frac{\sigma_3}{P_a}\right)} \left[ 1 - R_f \frac{(q/3)}{k_2 P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a}\right)^{m-1}} \right]^2 \quad (10)$$

即求得了剪切模量  $G_t$  的函数表达, 从式 (10) 中可以看出,  $G_t$  随应力水平的增加而降低, 随围压的增加而增加, 这一规律与邓肯-张模型得到的结论是一致的, 但  $G_t$  的表达则较邓肯-张模型简单。该函数仅包含  $k_1$ ,  $n$ ,  $k_2$ ,  $m$  四个无量纲试验参数。

### 2.3 峰值强度后本构关系的建立

定义  $\bar{\varepsilon}_f$  为破坏强度  $(q/3)_f$  对应的剪切应变值, 此典型曲线满足以下数学条件: ① 当  $\bar{\varepsilon} = \bar{\varepsilon}_f$  时,  $d\left(\frac{q}{3}\right)/d(\bar{\varepsilon}) = 0$ , 且  $q/3 = (q/3)_f$ , 曲线单峰; ② 当  $\bar{\varepsilon} \rightarrow +\infty$  时,  $q/3 \rightarrow (q/3)_u$ ,  $(q/3)_u$  为残余强度的渐进值。

对不同围压下的剪切破坏强度  $q/3$  进行回归分析, 考虑  $q/3$  随  $\bar{\varepsilon}$  的变化规律。在对比分析的基础上, 考虑最优数学模型  $\left(\frac{q}{3}\right) = A e^{-\bar{\varepsilon}/t_1} + k_0$ , 其中  $A$ ,  $t_1$ ,  $k_0$  为待求的回归系数, 均与围压存在一定关系:

$$A(\sigma_3) = \left( A_1 \ln\left(\frac{\sigma_3}{P_a}\right) + A_2 \right) / \left( \frac{\sigma_3}{P_a} \right)^2, \quad t_1(\sigma_3) = t_2 \left( \frac{\sigma_3}{P_a} \right) + t_3,$$

$k_0(\sigma_3) = k_{01} e^{a\left(\frac{\sigma_3}{P_a}\right)}$ , 其中  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ ,  $k_{01}$ ,  $a$  均为无量纲试验常数。各式代入后即可得到胶凝堆石料破坏强度后剪应力  $q/3$  与  $\bar{\varepsilon}$  关系的数学表达式:

$$\frac{q}{3} = P_a \left[ \frac{A_1 \ln\left(\frac{\sigma_3}{P_a}\right) + A_2}{\left(\frac{\sigma_3}{P_a}\right)^2} e^{-\frac{\bar{\varepsilon}}{t_2\left(\frac{\sigma_3}{P_a}\right) + t_3}} + k_{01} e^{a\left(\frac{\sigma_3}{P_a}\right)} \right] \quad (11)$$

### 2.4 剪切应变峰值点的确定

胶凝堆石料应力-应变关系曲线具有明显的应力峰值, 应力峰值前表现出非线性的本构关系特性; 达到峰值后应变继续增大, 而应力水平逐渐减小并逐步趋于一个定值, 表现出明显的软化特征。分界点剪切应力峰值  $(q/3)_f$  对应的剪切应变为  $\bar{\varepsilon}_f$ 。由试验结果可知, 剪切应变  $\bar{\varepsilon}_f$  与围压和龄期有关, 并呈现非线性变化关系, 可表示成围压和龄期的函数:

$$\bar{\varepsilon}_f = f_1(\sigma'_3, t') \quad (12)$$

式中:  $f_1$  为剪切应变函数; 为了便于计算,  $\sigma'_3$ ,  $t'$  分别为无量纲化围压和龄期的对应值。

利用基因自动编程算法 (GEP) 函数挖掘, 取  $\sigma'_3 = \sigma_3 / 10 P_a$ ,  $t' = t / 180$ 。得到胶凝堆石料破坏强度预测函数为

$$\bar{\varepsilon}_f = \frac{1}{\sigma'_3 t'} (0.52 - 0.19 / \sigma'_3) \quad (13)$$

## 3 结 论

(1) 根据大型三轴试验资料分析了胶凝堆石料力学性能, 其应力-应变关系表现出明显的非线性和软化特性; 在低应力水平下表现为线弹性性质; 当应力达到其峰值强度的 65%~84% 后塑性变形明显, 直至达到其峰值强度; 其后应力随着应变的增长而降低, 表现出明显的软化特性, 当应变达到 15% 左右时趋近于材料的残余强度。

(2) 采用分段建模的方法分别建立了胶凝堆石料应力-应变本构关系, 达到破坏强度前关系曲线采用双模量  $K-G$  模型建立了包含 4 个无量纲参数的胶凝堆石料非线性本构关系模型, 并考虑了试验过程中体积变形的影响; 通过试验数据的回归分析, 建立了包含 6 个无量纲参数达到破坏强度后软化曲线的本构关系模型, 各参数均可由大三轴试验确定, 方便可靠。

### 参考文献:

- [1] 何蕴龙, 刘俊林, 李建成. Hardfill 筑坝材料应力-应变特性与本构模型研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2011, 43(6): 40-47. (HE Yunlong, LIU Junlin, LI Jiancheng. Study on the stress-strain property and constitutive model of hardfill material[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2011, 43(6): 40-47. (in Chinese))
- [2] 贾金生, 马锋玲, 李新宇, 等. 胶凝砂砾石坝材料特性研究及工程应用[J]. 水利学报, 2006, 37(5): 578-582. (JIA Jinsheng, MA Fengling, LI Xinyu, et al. Study on material characteristics of cement-sand-gravel dam and engineering application[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(5): 578-582. (in Chinese))
- [3] 黄 虎, 李 坡, 霍文龙, 等. 胶凝砂砾石材料宏观参数及破坏模式研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2020, 41(4): 27-38. (HUANG Hu, LI Po, HUO Wenlong, et al. Study on relationship between mesoscopic and macroscopic mechanical parameters and failure model of cemented sand and gravel material[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2020, 41(4): 27-38. (in Chinese))
- [4] 蔡 新, 武颖利, 李洪焯, 等. 胶凝堆石料本构特性研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(9): 1340-1344. (CAI Xin, WU Yingli, LI Hongxuan, et al. Constitutive equation for CSG

- 2003(3): 65-66, 64. (in Chinese))
- [7] 陈学习, 吴立新, 车德福, 等. 基于钻孔数据的含断层地质体三维建模方法[J]. 煤田地质与勘探, 2005, **33**(5): 5-8. (CHEN Xuexi, WU Lixin, CHE Defu, et al. 3D modeling method of geological bodies including faults based on borehole data[J]. Coal Geology & Exploration, 2005, **33**(5): 5-8. (in Chinese))
- [8] LI Q, LIAO G, CHEN X, et al. Approach on area coordinate, volume coordinate and their usage in true 3dgis[J]. International Conference on Geo-spatial Solutions for Emergency Management and the 50th Anniversary of the Chinese Academy of Surveying and Mapping, 2009, C(5): 158-164.
- [9] 李青元, 张洛宜, 曹代勇, 等. 三维地质建模的用途、现状、问题、趋势与建议[J]. 地质与勘探, 2016, **52**(4): 759-767. (LI Qingyuan, ZHANG Luoyi, CAO Daiyong, et al. Usage, status, problems, trends and suggestions of 3D geological modeling[J]. Geology and Exploration, 2016, **52**(4): 759-767. (in Chinese))
- [10] 车德福, 吴立新, 殷作如. 三维地质建模中地层错断处自动构建的新方法[J]. 煤炭学报, 2009, **34**(10): 1305-1309. (CHE Defu, WU Lixin, YIN Zuoru. The new method for creating 3D model automatically of bad break within geological body[J]. Journal of China Coal Society, 2009, **34**(10): 1305-1309. (in Chinese))
- [11] WANG W, SUN L, LI Q, et al. Representing the geological body heterogeneous property field using the quadratic generalized tri-prism volume function model[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2017, **10**(5): 115.
- [12] YAN B, LIU J, QI Q, et al. Study on chain relationship and risk assessment model of coal mine geological disasters[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2022, **15**(9): 900.
- 
- (上接 233 页)
- materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(9): 1340-1344. (in Chinese))
- [5] 颀建军. 300m 级浇筑式沥青混凝土面板胶凝堆石坝设计研究[J]. 水力发电, 2017, **43**(2): 54-59. (XIE Jianjun. Design study of jellification rockfill dam for 300m-high level pouring asphalt concrete face[J]. Water Power, 2017, **43**(2): 54-59. (in Chinese))
- [6] T F, A N, H K, et al. Material properties of CSG for the seismic design of trapezoid-shaped CSG dam: Proceedings of the Thirteenth World Conference on Earthquake Engineering[C]// Vancouver, 2004.
- [7] 李娜, 何鲜峰, 张斌, 等. 基于大型三轴试验的胶凝堆石料力学特性试验研究[J]. 水力发电学报, 2014, **33**(6): 202-208. (LI Na, HE Xianfeng, ZHANG Bin, et al. Study of mechanical properties of cemented sand and rockfill material based on large-scale triaxial tests[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, **33**(6): 202-208. (in Chinese))

(编校: 黄贤沙)

(编校: 孙振远)