

# 高堆石坝流变机理的组构理论分析方法

周伟<sup>1</sup>, 胡颖<sup>2</sup>, 闫生存<sup>2</sup>

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072; 2. 湖北清江水布垭工程建设公司, 湖北 宜昌 443002)

**摘要:** 提出了采用颗粒材料的组构理论分析高堆石坝流变变形机理的方法, 从堆石体材料的细观角度探讨堆石集合体的宏观力学和变形响应。现有研究成果表明: 仅仅采用孔隙率和干密度不足以完全表达堆石体材料的离散特征, 组构分析的张量不仅包含上述宏观指标所表达的力学意义, 而且还包含堆石体在空间的分布情况。组构张量包含以下具体涵义: 堆石体颗粒本身的几何特征、堆石体在空间的分布、堆石体颗粒间的相互作用等。堆石体组构张量与应力张量和应变张量有密切的关系, 从组构张量的变化可以导出堆石体的变形机理和规律, 从而揭示堆石体材料流变变形的细观机理。

**关键词:** 堆石坝; 流变机理; 组构理论

**中图分类号:** TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2007)08-1274-05

**作者简介:** 周伟(1975-), 男, 湖南岳阳人, 博士, 副教授, 主要从事水工结构数值仿真方面的研究。

E-mail: zw\_mxx@163.com。

## Fabric theory on creep deformation mechanism for high rockfill dams

ZHOU Wei<sup>1</sup>, HU Ying<sup>2</sup>, YAN Sheng-cun<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Hubei

Qingjiang River Hydropower Development Company Ltd., Yichang 443002, China)

**Abstract:** An analytic method of fabric theory for granular materials was presented to study the creep deformation mechanism for high rockfill dams. Macro mechanics and deformation response of rockfill assemblies were discussed from the microcosmic point view. It was shown by recent studies that only the void factor and the dry density could not describe the discrete characteristics of rockfill materials completely. The analytic method of fabric theory included not only the mechanical meaning of the above macro indices but also the distributing state of rockfill in space. Fabric tensors included geometical characteristics of rockfill granules, interaction among granules and distributing state of rockfill granules in space. The osculating relation existed between rockfill fabric tensors and stress tensors, which had been theoretically proved. So the creep mechanism and the deformation law of rockfill could be gained from the variation of fabric tensors, and thus the creep mechanism of rockfill might be revealed from the microcosmic view.

**Key words:** rockfill dam; creep mechanism; fabric theory

## 0 引言

对于面板堆石坝, 面板的变形主要取决于堆石体变形, 如果堆石体变形过大, 就会使面板产生裂缝, 从而影响其防渗性能, 甚至危及坝体的稳定。对于高面板堆石坝, 堆石体的流变变形对面板的应力变形影响较大, 在已建成的混凝土面板堆石坝的安全监测结果中, 堆石的流变现象都比较明显, 例如罗马尼亚里苏(Lesu)面板堆石坝和我国已竣工的天生桥面板坝以及正在建设的水布垭面板坝的实际观测资料均已证明这种现象<sup>[1-2]</sup>。因此, 在设计高面板堆石坝时合理地计入堆石体流变的影响, 降低堆石体的变形量, 特别是运行期的变形量, 是保证大坝安全的关键之一。

近年来国内很多学者对堆石体的流变变形机理和规律进行了探讨, 主要是通过室内试验的手段和反馈分析的方法进行。

文献[3]在国内较早开展了堆石坝的流变数值分析, 以天生桥面板坝为对象计算了流变变形。国内最早的流变试验是1991年沈珠江等在应力控制式三轴仪上进行的堆石流变试验<sup>[4]</sup>, 试样为西北口垫层料, 试样直径为10 cm, 围压控制为100 kPa和200 kPa。经过比较, 文献[5]建议了堆石体的三参数流变本构模

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50509019)

收稿日期: 2006-09-11

型。该流变模型认为最终体积流变量与围压成正比,最终剪切流变量与应力水平呈双曲线关系,并根据4种典型堆石料填筑的堆石坝原型观测资料,反馈分析了几种不同类型土石料的流变模型参数。三参数指数型流变本构模型通过拟合流变试验曲线而得到,具有一定的物理意义,且模型简单,易于数值分析。后来大多数不同工程堆石料的试验成果整理方法及数值分析<sup>[6-9]</sup>,在最终流变量的计算方面,都参照文献[4]的研究成果或是在其基础上进行局部修正。文献[10]采用水布垭大坝主堆石料茅口组灰岩和次堆石料栖霞组灰岩进行了多组大型平行的流变室内试验,根据试验结果建议了9参数幂函数流变模型。文献[11]也根据大型压缩试验成果整理出了开尔文流变模型的参数。在文献[10]试验成果的基础上,笔者针对水布垭面板堆石坝进行了考虑流变效应的三维仿真分析<sup>[12-13]</sup>,在一定程度上为水布垭面板坝一期和二期面板的浇筑时间以及堆石坝施工程序的优化提供了依据。

由于堆石体流变变形的复杂性,影响的因素很多,因此,仅仅通过室内试验很难从本质上反映其流变机理和特性,除了试样尺寸与现场的巨大差异引起的缩尺效应误差之外,就是平行试验成果间也会出现差异,即试验成果的不确定性<sup>[14]</sup>,这与堆石体内部的组构特征是密切相关的。

组构理论是从细观的角度研究散粒体的变形规律,在细观的基础上分析颗粒集合体的宏观力学响应的一种方法。这里所谓的细观是指与颗粒尺寸等量级的尺度大小。20世纪七八十年代以来,各国学者就对颗粒材料的细观变形机理以及其组构关系进行了大量的研究<sup>[15-18]</sup>。文献[19, 20]还运用组构理论研究了岩石材料的微观变形机理。

本文试图将组构理论的分析方法引入堆石体流变机理的研究中,从细观的角度探讨堆石体流变的产生、发展直至稳定的全过程,为推演基于组构理论的堆石体流变本构模型提供理论依据。

## 1 堆石体流变机理的宏观定性分析

古典的弹塑性理论认为物体的应力状态是恒定的,加荷以后立即产生变形。而实际上,堆石是具有一定级配的岩石颗粒的集合体,其应力和变形都是时间的函数。在骨架应力作用下,颗粒的重新排列和骨架体的错动具有时间效应。由于堆石的流变行为在宏观表现上与土体极为相似,因此,在土体流变理论与实践的基础上,人们曾经试图通过室内试验,用研究土体流变性质的方法来研究堆石的流变特性,已取得了一定的研究成果。为此,在室内试验研究成果的基

础上,结合工程实践从机理上探讨堆石的流变特性,以确定堆石的变形特性特别是长期变形特性已是一个非常重要的手段。图1, 2是Cethana坝和西北口面板坝实测变形与时间的关系曲线,图3, 4是西北口垫层料和水布垭面板坝堆石料的室内流变试验曲线。

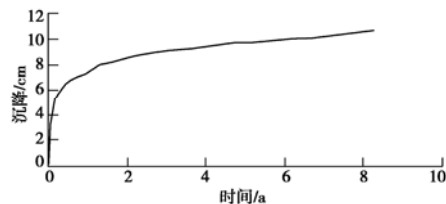


图1 Cethana坝坝顶沉降与时间的关系

Fig. 1 The relationship between settlement of dam top and time for Cethana Dam

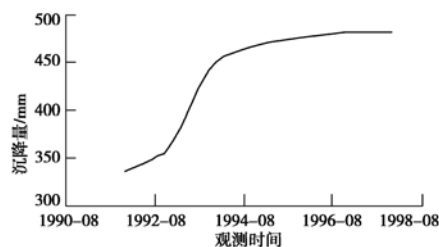


图2 西北口坝轴线270 m高程处沉降与时间的关系

Fig. 2 The relationship between settlement at Elevation 270 m and time for Xibeikou Dam

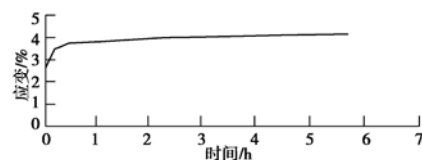


图3 西北口面板坝垫层料流变试验曲线<sup>[4]</sup>

Fig. 3 Experimental creep curve of cushion for Xibeikou Dam

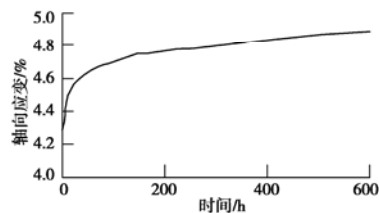


图4 水布垭面板坝茅口组堆石料流变试验曲线

Fig. 4 Experimental creep curve of Maokou group of rockfill for Shuibuya CFRD

从以上已建工程的实测变形成果和几个工程的室内流变试验曲线的变化规律可以看出,堆石体的瞬时变形在填筑过程中可以很快完成,而流变变形在堆石体形成后会在很长一段时间内(有些工程会持续十几

年)持续发展。根据已有的观测资料来看,流变变形有随着大坝高度的增加占总变形的比例不断增加的趋势。

从堆石的室内流变试验曲线来看,室内堆石的变形规律与已建工程实测变形的规律基本相似,但室内堆石的沉降一般只需几个小时到几十个小时即可完成整个变形的80%左右,而后逐渐趋于稳定,而实测工程的流变变形将持续几年甚至上十年。这是由于受试样尺寸及其最大粒径的限制,室内试验中颗粒棱角的破碎、转动滑移、重新排列的过程很快结束,再加上试样体积有限,这种单纯颗粒重新排列过程引起的变形效应难以测出,所以堆石体的室内流变试验宏观上表现为变形迅速平稳<sup>[21]</sup>。

## 2 堆石体流变机理的组构分析方法

### 2.1 堆石体材料的组构定义

堆石体材料组构的完整描述包括以下3个要素:颗粒本身的几何特征、颗粒在空间的分布、颗粒间随时间的相互作用过程。

对于球状颗粒,可以简单地用颗粒半径来表示其几何特征。对于堆石体这种非球状颗粒材料,本文采用半径向量来描述:

$$r=(\bar{r},\delta) \quad (1)$$

式中, $\bar{r}$ 是堆石体颗粒的平均半径, $\delta$ 是颗粒最大半径与平均半径的差值,反映了堆石体颗粒表面现状的不均匀起伏程度。

球颗粒在空间的分布可采用球心在空间的分布密度 $g(r)$ 来表示,对于堆石体这种非球状颗粒材料,本文采用下面的分布密度函数来描述:

$$g=g(\bar{r},L) \quad (2)$$

式中, $L$ 是堆石体颗粒的枝向量,表示相接触颗粒的质量中心的连线,对于堆石体集合,用枝在空间的密度分布、枝向量在空间的定向分布以及枝长的分布等来反映宏观排列效应。

颗粒间相互作用包括配位数、接触法线 $\bar{n}$ 、枝向量 $L$ 以及粒间接触力 $\bar{f}$ 。配位数表示与某颗粒相接触的颗粒数目,它是衡量颗粒材料密实程度的一个指标,与颗粒大小基本无关。对于堆石体集合,可用接触法线的球座标 $\alpha,\beta$ 的分布密度函数来反映它在空间的定向。

由于上述的各种分布函数较多且通过试验很难确定,故一般采用组构张量来描述堆石体颗粒集合的宏观效应。从配位数的定义得知,它与堆石体颗粒集合的孔隙率有较好的相关关系,一般不作为组构张量的变量,因此,本文采用枝向量、粒间接触力和时间作

为组构张量的分量:

$$F_{i,j}=\langle f_i^j L_j^i \rangle \quad (3)$$

式中, $\langle \cdot \rangle$ 符号表示对里面的变量取平均。

### 2.2 基于组构理论的堆石体平衡方程

对于平衡条件下的堆石体颗粒集合体,平衡方程只对单个的颗粒有意义,堆石体颗粒的平衡代表作用在每一个颗粒上的粒间接触力的平衡。在与颗粒尺寸等量级的尺度条件下,粒间接触力可以看作是集中力。可以证明(由于篇幅有限,上述证明另文详述),在不考虑堆石体颗粒破碎的条件下,通过虚位移原理可以得出堆石体颗粒的组构张量与应力张量存在一一对应的关系:

$$\sigma_{i,j}'=\langle f_i^j L_j^i + f_j^i L_i^j \rangle \quad (4)$$

由组构张量与应力张量之间的密切关系得到启示,从组构的变化规律可以推断宏观应力的变化规律。

### 2.3 基于组构理论的堆石体形变方程

对于堆石体材料这样的离散体,形变方程只具有统计意义,因为离散的堆石体中同样不存在光滑连续的位移场,任一堆石体颗粒的位移并不是其座标的连续函数。正如上节所述,堆石体的宏观流变变形是通过小颗粒的转动滑移、重新排列来实现的,也即通过堆石体颗粒集合体的组构变化实现的。堆石体颗粒集合体形变方程的建立的前提条件是找到一组独立而完备的组构指标以反映其所有的组构特征。由于堆石体流变过程比较复杂,既包含颗粒的棱角破碎,同时还有小颗粒的转动滑移、重新排列等。简单起见,本文暂且忽略少量颗粒棱角破碎引起的流变变形,假定宏观流变变形主要由颗粒的转动滑移、重新排列引起,即宏观应变只是由枝向量的方向和大小的改变所引起。

对于堆石体颗粒集合,在 $r$ 方向上枝长的平均值为 $\bar{L}_r$ ,由颗粒的转动滑移、重新排列引起枝长的平均值有一微小的增量 $\Delta\bar{L}_r$ ,因此在 $r$ 方向上堆石体颗粒的宏观应变增量可以表示为

$$d\varepsilon_r'=\frac{\Delta\bar{L}_r}{\bar{L}_r} \quad (5)$$

采用固体路径的分析方法可得在 $r$ 方向、在 $t$ 时刻枝长的平均值为

$$\bar{L}_r^t=\int_t^{t+\Delta t}\int_{L_{\min}}^{L_{\max}}\int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi}L f(L)f(\theta')\cos\theta'd\theta dLd\tau \quad (6)$$

式中, $f(L),f(\theta')$ 分别表示枝长和枝向量与 $r$ 轴的夹角分布密度函数。对式(6)取分布密度函数 $f(L),f(\theta')$ 的变分:

$$\bar{L}_r^t+\Delta\bar{L}_r^t=\int_t^{t+\Delta t}\int_{L_{\min}}^{L_{\max}}\int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi}L A B \cos\theta'd\theta dLd\tau \quad (7)$$

式中,  $A = [f(L') + \delta f(L')]$ ,  $B = [f(\theta') + \delta f(\theta')]$ 。

把式(7)展开, 可得  $\Delta \bar{L}_i$ :

$$\Delta \bar{L}_i = \int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} \int_{L_{\min}}^{L_{\max}} \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} L' [\delta F(\theta', L') + E] \cos \theta' d\theta dL d\tau, \quad (8)$$

式中,  $F(\theta', L') = f(L')f(\theta')$ ,  $E = \delta f(L')\delta f(\theta')$ 。

因为  $E$  为两个一阶小量的乘积, 其结果为一个二阶小量, 所以可以近似忽略不计, 因此,  $\Delta \bar{L}_i$  可以简化为

$$\Delta \bar{L}_i = \int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} \int_{L_{\min}}^{L_{\max}} \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} L' \delta F(\theta', L') \cos \theta' d\theta dL d\tau, \quad (9)$$

将式(5), (8) 带入式(4), 可得

$$d\epsilon_r' = \frac{\Delta \bar{L}_r}{\bar{L}_r} = \frac{\iiint L' \delta F(\theta', L') \cos \theta' d\theta dL d\tau}{\iiint L' F(\theta', L') \cos \theta' d\theta dL d\tau}. \quad (10)$$

对于随机排列的堆石体颗粒集合, 假定堆石体颗粒不存在破碎现象(在大多数实际情况, 这种近似是可以接受的, 因为堆石体棱角破碎只占很小一部分比例), 可以证明其枝向量的分布密度函数为一常数, 也即堆石体集合在完全随机排列的情况下, 其颗粒分布呈现均匀分布。由此:

$$\delta f(L') = 0, \quad (11)$$

由此得

$$\begin{aligned} \delta F(\theta', L') &= f(L')\delta f(\theta') + \delta f(L')f(\theta') \\ &= f(L')\delta f(\theta'). \end{aligned} \quad (12)$$

在等围压三轴条件下:

$$\begin{aligned} d\epsilon_1' &= \frac{\iiint L' f(L') \delta f(\theta') \cos \theta' d\theta dL d\tau}{\iiint L' f(L') f(\theta') \cos \theta' d\theta dL d\tau} \\ &= \frac{\int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} \delta f(\theta') \cos \theta' d\theta d\tau}{\int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} f(\theta') \cos \theta' d\theta d\tau}, \end{aligned} \quad (13)$$

$$d\epsilon_3' = \frac{\int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} \delta f(\theta') \sin \theta' d\theta d\tau}{\int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} f(\theta') \cos \theta' d\theta d\tau}. \quad (14)$$

至此, 式(12)、(13) 已经完整给出了由组构量得变化直接求得堆石体颗粒集合体某一时刻的宏观应变的方法和公式, 且当  $f(\theta')$  的初始分布为均匀分布或者对称分布时,  $\delta f(\theta')$  与宏观应变  $\epsilon_{ij}$  主轴有相同的对称轴。

### 3 结 语

(1) 从室内试验和实际工程的实测流变资料综合分析了宏观上堆石体产生流变变形的现象: 堆石体内部少量颗粒的棱角由于应力集中的作用发生破

碎, 使得小颗粒发生转动滑移而重新排列、并充填大块堆石体之间的孔隙, 随着孔隙的逐步充填密实, 小颗粒充填排列的速度也逐步变慢, 直至达到一个相对的稳定变形状态。

(2) 针对堆石体材料的组成特点, 阐述了堆石体颗粒集合体组构张量的定义、平衡方程以及形变方程的具体表达式。

本文初步探讨了组构理论在解释堆石体流变机理方面的应用, 本文的工作为以后进一步开展堆石体流变变形的组构分析奠定了基础。

### 参考文献:

- [1] 付志安, 凤家骥. 混凝土面板堆石坝[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1993. (FU Zhi-an, FENG Jia-ji. Concrete face rockfill dam[M]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 1993. (in Chinese))
- [2] 曹克明, 汪易森, 张宗亮. 高混凝土面板堆石坝的设计与施工[J]. 水力发电, 2001(10): 49 - 52. (CAO Ke-ming, WANG Yi-sheng, ZHANG Zhong-liang. Design and construction of high CFRD[J]. Hydroelectric Engineering, 2001(10): 49 - 52. (in Chinese))
- [3] 沈凤生, 陈慧远, 潘家铮. 混凝土面板堆石坝的蓄水变形分析[J]. 岩土工程学报, 1990, 12(1): 73 - 81. (SHENG Feng-sheng, CHEN Hui-yuan, PAN Jia-zhen. Deformation analysis of CFRD during operation period[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 12(1): 73 - 81. (in Chinese))
- [4] 沈珠江, 左元明. 堆石料的流变特性试验研究[C]// 第六届全国土力学及基础工程学术会议文集. 上海: 同济大学出版社, 1991: 443 - 446. (SHEN Zhu-jiang, ZUO Yuan-ming. Study of creep test for rockfill[C]// The 6th Soil Mechanics and Foundation Engineering Academic Conference. Shanghai: Tongji University Press. 1991: 443 - 446. (in Chinese))
- [5] 沈珠江, 赵魁芝. 堆石坝流变变形的反馈分析[J]. 水利学报, 1998, 6(6): 1 - 6. (SHEN Zhu-jiang, ZHAO Kui-zhi. Back analysis of CFRD creep[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998, 6(6): 1 - 6. (in Chinese))
- [6] 王 勇, 殷宗泽. 一个用于面板坝流变分析的堆石流变模型[J]. 岩土力学, 2000, 21(3): 227 - 230. (WANG Yong, YIN Zong-ze. A rheology model of rockfill used in the rheology analysis of concrete face rockfill dam[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(3): 227 - 230. (in Chinese))
- [7] 郭兴文, 王德信, 蔡 新, 等. 混凝土面板堆石坝流变分析[J]. 水利学报, 1999, 11(11): 42 - 46. (GUO Xing-wen, WANG De-xin, CAI Xin, et al. Rheological analysis of

- concrete faced rockfill dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, **11**(11): 42 - 46. (in Chinese))
- [8] 蔡 新, 成 峰, 杨建贵, 等. 土石坝流变非线性分析[J]. 河海大学学报. 1999(11): 19 - 24. (CAI Xin, CHENG Feng, YANG Jian-gui. Nonlinear analysis of soil and rockfill dam[J]. Journal of Hohai University, 1999(11): 19 - 24. (in Chinese))
- [9] 张丙印, 师瑞锋. 流变变形对高面板堆石坝面板脱空的影响分析[J]. 岩土力学, 2004, **8**(25): 1179 - 1184. (ZHANG Bing-yin, SHI Rui-feng. Influence of creeping on separation between concrete slab and cushion layer in high concrete face rock-fill dam[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **8**(25): 1179 - 1184. (in Chinese))
- [10] 程展林, 丁红顺. 堆石料蠕变特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(4): 473 - 476. (CHENG Zhan-lin, DING Hong-shun. Creep test for rockfill[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(4): 473 - 476. (in Chinese))
- [11] 梁 军, 刘汉龙. 面板坝堆石料的蠕变试验研究[J]. 岩土工程学报, 2002, **24**(2): 257 - 259. (LIANG Jun, LIU Han-long. Creep test for rockfill of CFRD[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, **24**(2): 257 - 259. (in Chinese))
- [12] 周 伟, 常晓林, 曹艳辉. 堆石体流变对分期浇筑的面板变形影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(5): 1043 - 1048. (ZHOU Wei, CHANG Xiao-lin, CAO Yan-hui. Study of rockfill creep influence on face constructed by stages[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(5): 1043 - 1048. (in Chinese))
- [13] 周 伟, 常晓林. 高混凝土面板堆石坝流变的三维有限元数值模拟[J]. 岩土力学, 2006, **27**(8): 1389 - 1392. (ZHOU Wei, CHANG Xiao-lin. Three dimensional FEM numerical simulating of the rockfill creep of high concrete face rockfill dam[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, **27**(8): 1389 - 1392. (in Chinese))
- [14] 程展林, 丁红顺. 论堆石料力学试验中的不确定性[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(10): 1222 - 1225. (CHENG Zhan-lin, DING Hong-shun. Research on indeterminacy of rockfill test result[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(10): 1222 - 1225. (in Chinese))
- [15] CUNDALL P A, STRACK O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. Geotechnique, 1979, **29**(1): 47 - 65.
- [16] 吴为义. 颗粒材料组构与本构关系的研究[D]. 武汉: 武汉大学, 1988. (WU Wei-yi. Study on fabric and constitution relation of granular material[D]. Wuhan: Wuhan University, 1988. (in Chinese))
- [17] 周 健, 池毓蔚, 池 永, 等. 砂土双轴试验的颗粒流模拟[J]. 岩土工程学报, 2001, **23**(6): 701 - 704. (ZHOU Jian, CHI Yu-wei, CHI Yong, et al. Simulation of biaxial test on sand by particle flow code[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, **23**(6): 701 - 704. (in Chinese))
- [18] 李世海, 汪远年. 三维离散元土石混合体随机计算模型及单向加载试验数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(2): 172 - 177. (LI Shi-hai. WANG Yuan-nian. Stochastic model and numerical simulation of uniaxial loading test for rock and soil blending by 3D DEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(2): 172 - 177. (in Chinese))
- [19] 刘 斌. 不同温压下岩石弹性波速度、衰减及各向异性与组构的关系[J]. 地学前沿, 2000, **7**(1): 247 - 257. (LIU Bin. Relations of elastic wave velocity and attenuation and their anisotropies to the fabric of rocks under different p-t conditions[J]. Earth Science Frontier, 2000, **7**(1): 247 - 257. (in Chinese))
- [20] 章军峰, 金振民. 结构水引起的榴辉岩变形组构和变形机制[J]. 科学通报, 2005, **50**(6): 559 - 564. (ZHANG Jun-feng, JIN Zhen-ming. Eclogite deformation fabric and mechanic by constitution water[J]. Chinese Science Bulletin, 2005, **50**(6): 559 - 564. (in Chinese))
- [21] 王 勇. 堆石流变的机理及研究方法初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, **19**(4): 526 - 530. (WANG Yong. Analysis on rheology mechanism and study method of rockfill[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, **19**(4): 526 - 530. (in Chinese))