

DOI: 10.11779/CJGE2016S2042

堆石流变模型及在高填方路基工程中的应用

耿之周¹, 徐 锴^{*1}, 李雄威²

(1. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024; 2. 常州工学院, 江苏 常州 213002)

摘 要: 依托某堆石体填筑道基工程, 对堆石体流变特性进行了研究。在三参数 (b, c, d) 流变模型基础上, 引入了高木俊介线性加载模式, 用于分析堆石体分级加载作用下的变形时变规律, 同时还考虑了道基结构自重应力作用三角形分布特征。通过室内大型压缩试验结果, 获取了模型所需参数, 在此基础上对依托工程堆石体道基典型断面进行了流变分析, 分析结果表明, 道基结构自身压缩流变基本可以忽略。这一结论与压缩试验前后试样级配变化较小的试验结果相验证。

关键词: 堆石体; 流变模型; 颗粒级配; 分级加载

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)S2-0255-05

作者简介: 耿之周(1988-), 男, 工程师, 主要从事地基处理和土工合成材料方面的研究。E-mail: zgzeng@nhri.cn。

Creep model for rockfill and its application to road ground projects

GENG Zhi-zhou¹, XU Kai¹, LI Xiong-wei²

(1. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 2. Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213002, China)

Abstract: Relying on a road ground project filled with rockfill, the creep behavior of rockfill is studied. Based on the creep model with three parameters (b, c, d), the Shunsuke Takagi multi-linear load mode is introduced to analyze the time-dependent law of deformation of rockfill under step load. The triangular distribution characteristics of self-weight stress of road ground structures are also taken into account. Through the results of indoor large compression tests, the required model parameters are obtained, based on which the creep behavior of road ground rockfill of typical cross section of the supporting project is analyzed. The results indicate that the own compressive creep of road ground structures can be ignored. The conclusion is validated by the small gradation change before and after the compression tests.

Key words: rockfill; creep model; grain size gradation; step loading

0 引 言

堆石体在工程中受到施工荷载和自重作用下往往可以达到较密实状态。尽管如此, 在堆石体营运过程中, 由静荷载、环境变化导致的风化或干湿循环、荷载周期性的变化作用将导致骨架应力的重新分布, 从而使粗大颗粒棱角发生挤压破碎或者软弱颗粒少量的破碎、细化, 导致颗粒重新排列, 并进一步产生结构调整从而出现蠕变沉降。

堆石体的流变特性是一个受到广泛重视的研究对象。Parkin^[1]采用固结仪进行堆石体流变试验研究了堆石体的流变速率; Neves 等^[2]采用改进的对数型流变模型, 通过平面有限元方法分析了堆石体的流变特性; 李国英等^[3]采用自行改进的大型三轴流变试验仪器, 对堆石料的流变性质进行了研究。沈珠江等^[4]利用大型三轴仪和大型固结仪进行堆石体流变试验研究, 并在试验成果基础上提出了所谓的“三参数”流

变模型^[5], 通过对株树桥、鲁布革、从化、小干沟 4 个不同堆石料填筑的大坝的原型观测资料的反分析, 得出了软岩、中硬岩、硬岩和砂卵石的流变模型参数值^[6]。另外, 沈凤生等^[7]曾选用一个三元件黏弹性流变模型 (Merchant 模型) 描述堆石体的流变变形, 通过推导流变计算公式, 对天生桥面板坝进行考虑流变的沉降计算。程展林等^[8]基于三轴流变试验结果分析, 提出一个九参数的幂函数流变经验模型, 周伟^[9]则利用该模型探讨了水布垭高面板坝堆石体流变对分期浇筑面板的变形影响。尽管一些学者^[10-11]对堆石体流变特性已展开了一些研究, 但受试验条件限制, 目前关

基金项目: 水利部公益性行业科研专项经费项目 (201401006); 水利部公益性行业科研专项经费项目 (201501043); 国家自然科学基金项目 (51408381)

收稿日期: 2016-05-19

*通讯作者 (E-mail: kxu@nhri.cn)

于堆石体流变的研究成果仍然较少,流变本构模型数量有限。

本文依托某堆石体填筑道基工程,通过引入高木俊介多级线性加载模式和考虑堆石体自重线性分布特征,对上述“三参数”流变模型进行改进,并通过室内大型压缩试验提取模型参数,分析堆石体道基的流变特征。

1 流变模型

沈珠江提出的三参数流变模型中,假设常应力下堆石体变形过程曲线为指数衰减型,即

$$\varepsilon_t = \varepsilon_f (1 - e^{-ct}) \quad (1)$$

式中, ε_t 为 t 时刻已发生的流变量; ε_f 为最终流变量; c 为流变随时间衰减的指数 (为第一天流变量占最终流变量之比)。

对式 (1) 进行求导, 可得

$$\dot{\varepsilon}_t = c\varepsilon_f e^{-ct} \quad (2)$$

像瞬时变形一样, 流变速率也区分体积流变速率 $\dot{\varepsilon}_{vt}$ 和剪切流变速率 $\dot{\varepsilon}_{st}$, 并由式 (2), 有

$$\left. \begin{aligned} \dot{\varepsilon}_{vt} &= c\varepsilon_{vf} e^{-ct} \\ \dot{\varepsilon}_{st} &= c\varepsilon_{sf} e^{-ct} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中, ε_{vf} , ε_{sf} 分别为最终体积流变和最终剪切流变, 试验研究表明, 其分别与围压 σ_3 和应力水平 s 有关, 可表示为

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{vf} &= b \frac{\sigma_3}{p_a} \\ \varepsilon_{sf} &= d \frac{S}{1-S} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中, b 、 d 为模型参数。采用 Prandtl-Reuss 流动法则, 并考虑式 (3)、(4), 则流变率可表示为

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_t &= \frac{1}{3} \dot{\varepsilon}_{vt} + \frac{s_1}{\sigma_s} \dot{\varepsilon}_{st} \\ &= \left(\frac{1}{3} b \frac{\sigma_3}{p_a} + d \frac{s_1}{\sigma_s} \frac{S}{1-S} \right) c e^{-ct} \end{aligned} \quad (5)$$

式中, s_1 为竖向偏应力; σ_s 为广义剪应力。具体计算时, 将流变作为一种初应变考虑, Δt 时段内初应变 $\Delta \varepsilon_t^0$ 为

$$\Delta \varepsilon_t^0 = \dot{\varepsilon}_t \Delta t \quad (6)$$

可以看出, 上述模型共含有 b 、 c 、 d 三个参数, 故称之为三参数模型。工程实践中, 堆石体均采用分层填筑, 而且荷载增加过程不规则, 需要对上述流变模型进行修正以用于实体工程。本文通过考虑堆石体自重应力线性分布特征和引入高木俊介多级线性加载模式, 对上述三参数流变模型进行改进, 具体做法如下。

上述流变模型的根本问题归结为寻找最终流变量 ε_f 和初始相对流变率 c 。对比式 (2)、(5), 可得最终流变量 ε_f :

$$\varepsilon_f = \frac{1}{3} b \frac{\sigma_3}{p_a} + d \frac{s_1}{\sigma_s} \frac{S}{1-S} \quad (7)$$

结合实际工程, 式 (7) 计算时, 假设 $\sigma_2 = \sigma_3$, 故有

$$\frac{s_1}{\sigma_s} = \frac{2}{3} \quad (8)$$

又因为

$$\sigma_3 = \sigma_1 K_0 = \sigma_1 (1 - \sin \varphi) \quad (9a)$$

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = (\sigma_1 + \sigma_3 + 2c \cot \varphi) \sin \varphi \quad (9b)$$

故有

$$\begin{aligned} \frac{S}{1-S} &= \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f - (\sigma_1 - \sigma_3)} \\ &= \frac{\sigma_1}{\sigma_1 (2 - \sin \varphi) + 2c \cot \varphi - \sigma_1} \end{aligned} \quad (9c)$$

式中 K_0 为土压力系数; $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 为破坏偏应力; c , φ 为堆石体的表观黏聚力和内摩擦角。

将式 (8)、(9c) 代入式 (7), 则有

$$\varepsilon_f = \frac{1}{3} b \frac{\sigma_1 (1 - \sin \varphi)}{p_a} + \frac{2}{3} d \frac{\sigma_1}{\sigma_1 (1 - \sin \varphi) + 2c \cot \varphi} \quad (10)$$

对于某一高度为 H 的堆石体, 其自重应力分布图参见图 1, 将 $\sigma_1 = \gamma z$ 代入式 (10), 将 ε_f 在堆石体高度范围 $[0, H]$ 内进行积分, 即可得出堆石体高度 H 内平均蠕变 $\bar{\varepsilon}_f$:

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon}_f &= \frac{\int_0^H \varepsilon_f dz}{H} = \frac{1}{6 p_a} b \gamma H (1 - \sin \varphi) + \frac{2}{3} \frac{d}{1 - \sin \varphi} - \\ &\quad \frac{2dc \cot \varphi}{\gamma H (1 - \sin \varphi)^2} \ln \frac{\gamma H (1 - \sin \varphi) + 2c \cot \varphi}{2c \cot \varphi} \end{aligned} \quad (11)$$

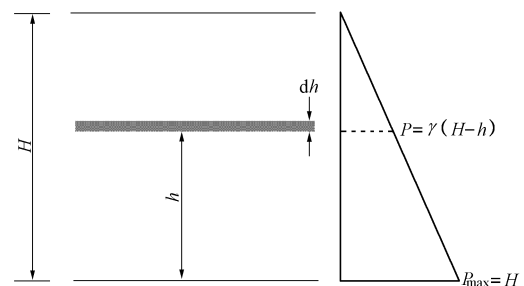


图1 堆石体自重应力分布

Fig. 1 Distribution of self-weight stress of rockfill

由于堆石体道基均采用分层填筑施工, 故堆石体的压缩量必须考虑分层施工的影响。在利用改进高木俊介法^[12]计算分级等速加载的情况时, 平均固结度的表达式为

$$U_i = \sum_{i=1}^n \frac{\dot{q}_i}{\sum \Delta p} \left[(T_i - T_{i-1}) - \frac{1}{c} e^{-ct} (e^{cT_i} - e^{cT_{i-1}}) \right]. \quad (12)$$

笔者提出将 t 时间对应的地基平均固结度改变为堆石体平均蠕变, 则修正后的堆石体流变模型为

$$\varepsilon(t) = \bar{\varepsilon}_r \sum_{i=1}^n \frac{\dot{q}_i}{\sum \Delta p} \left[(T_i - T_{i-1}) - \frac{1}{c} e^{-ct} (e^{cT_i} - e^{cT_{i-1}}) \right]. \quad (13)$$

式中 \dot{q}_i 为第 i 级荷载的加载速率 (m/s); $\sum \Delta p$ 为各级荷载的累计值 (kPa); T_i, T_{i-1} 为为各级等速加荷的起点和终点时间 (从零点起算), 当计算某一级等速加荷过程中时间 t 的固结度时, 则 T_n 改为 t, s 。必须指出, 高木俊介法是根据巴伦理论^[13]推导出来的, 然而对于堆石体, 由于固结理论的假定条件和确定计算指标的试验方面技术上的问题, 此处只是简单借用高木俊介线性加载模式。

2 试验研究

堆石体填筑过程中虽然主应力随填筑高度增加而增加, 但大小主应力之比变化不大, 侧限压缩试验也属于等主应力比试验, 而且在竖向应变微小的情况下, 堆石体只出现微小的侧向变形, 因而认为在微小应变状态下堆石体的受力情况与单向压缩时的受力情况很相近。鉴于此, 本文采用室内压缩试验考察堆石体的流变特性, 并提取上述三参数流变模型中的参数: b, c, d 。

基于依托工程现场检测数百组筛分试验统计结果, 本文采用平均法取出代表性级配, 并对代表性级配按几何相似条件等比例进行缩尺 (相似级配法^[14]), 缩小至满足仪器尺寸容许粒径 (<60 mm), 从而获取室内大型压缩试验级配, 如图 2 所示。压缩试验试样干密度按 2.11 kg/dm³ 控制, 荷载按 50, 100, 200, 400, 600, 800, 1600 kPa 梯度逐级施加, 压缩变形观测采用渐进方法, 即: 起始阶段每 5 s 读一个数, 当 5 s 内压缩量小于 0.005 mm 后, 10 s 读数, 以此类推, 时间间隔分别为 5, 10, 30 s, 1, 2, 5 min。当试样在 5 min 内压缩量小于 0.005 mm 时, 施加下一级荷载。各级荷载下试样压缩变形时间曲线如图 3 所示。试验结束后, 同样对试样进行筛分试样, 试验后试料级配参见图 2。可以看出, 试样压缩前后级配曲线总体而言变化很小, 颗粒破碎情况不明显。由于堆石体的蠕变与颗粒破碎相关, 颗粒破碎少, 相应的蠕变量也将较小, 这与下一节关于依托工程堆石体蠕变的研究结果一致。

利用式 (1)、(10), 采用麦夸特法 (Levenberg-Marquardt), 对在室内压缩试验各级荷载下的时程曲

线进行拟合, 以确定参数 b, d, c , 其中强度指标 c, ϕ 分别取为 150 kPa 和 40° (通过室内大型三轴试验获取)。由于 b, c, d 三参数有明显的物理含义, 故其初值和可能的变动范围可以根据经验确定。例如中等压缩性土 1 个大气压下的压缩量在 1% 左右, 故 b 可能在 0.001~0.005 之间。本次拟合结果参见表 1 和图 3, 可以看出, b, d 大小与已有资料^[6]相近, 而受试样压缩时间限制, 参数 c (流变随时间衰减的指数) 较已有资料偏大, 具体工程实例计算时可做适当折减。

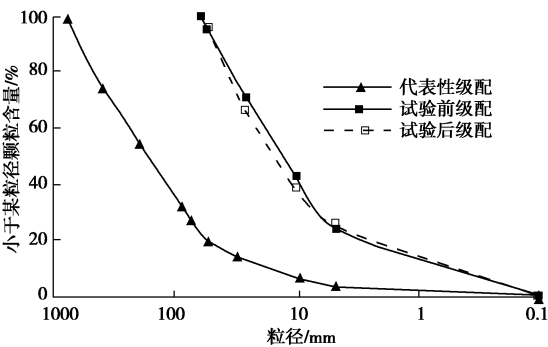


图 2 级配曲线

Fig. 2 Grading curve

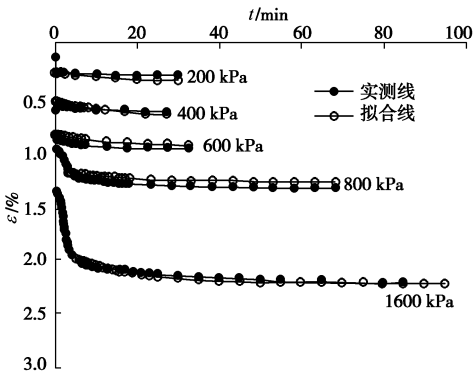


图 3 压缩变形时间曲线

Fig. 3 Curves of compressive deformation-time

表 1 流变模型参数

Table1 Parameters of creep model

| 堆石料 | 泥页岩 (软) | 灰岩 (中) | 花岗岩 (硬) | 砂卵石 | 安山岩 |
|-----|------------|-----------|------------|--------|--------|
| 工程 | 株树桥 | 鲁布革 | 从化 | 小干沟 | 本工程 |
| b | 0.0012 | 0.0008 | 0.0003 | 0.0002 | 0.0004 |
| d | 0.008 | 0.006 | 0.004 | 0.003 | 0.004 |
| c | 0.005 | 0.007 | 0.007 | 0.007 | 0.07 |

3 工程实例

针对依托工程道基堆石体, 分别选取低山沟谷和海涂低地区两个典型断面 (道基高度分别为 17.5, 21.0 m), 利用式 (11)、(12) 进行流变分析计算。两断面的实际加载时间线参见图 4, 其中低山沟谷区断面在

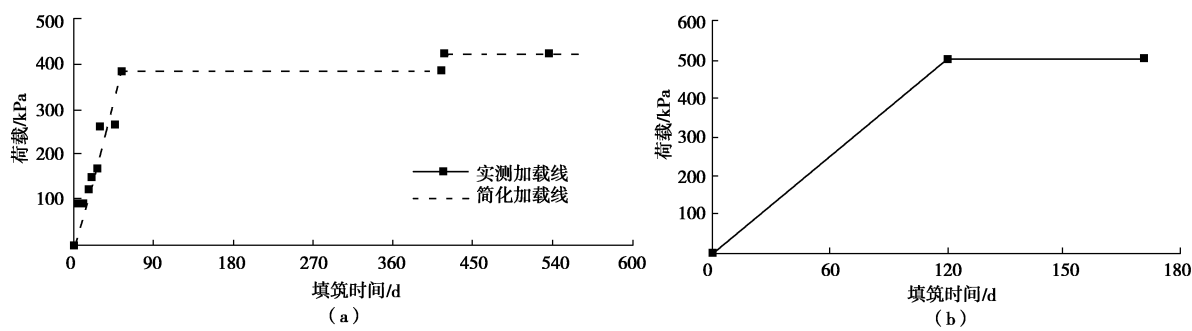


图 4 典型断面加载时间曲线

Fig. 4 Curves of load-time of typical cross section

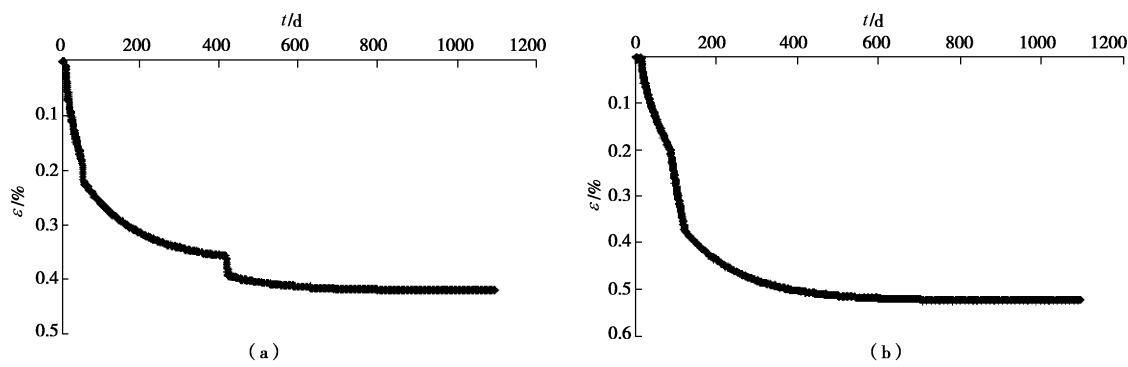


图 5 堆石体应变 - 时间变化图

Fig. 5 Curves of strain-time of rockfill

表 2 计算结果汇总

Table 2 Summary of calculated results

| 区域 | 填筑高度/m | 总应变 ϵ_t /% | 不同时间应变 ϵ_t /% | | | 工后沉降/mm | | |
|-------|--------|---------------------|------------------------|------|-------|---------|-------|-------|
| | | | 6 个月 | 9 个月 | 12 个月 | 18 个月 | 24 个月 | 36 个月 |
| 低山沟谷区 | 17.5 | 0.42 | 0.31 | 0.34 | 0.35 | 19.6 | 14.6 | 11.8 |
| 海涂低地区 | 21.0 | 0.52 | 0.42 | 0.47 | 0.50 | 21.8 | 11.0 | 5.8 |

计算时简化为两级线性加载模式。计算过程中，参数 b 、 d 分别采用上述压缩试验拟合结果，参见表 1。结合已有数据，参数 c 做适当折减，取为 0.007。由于本文重点考察堆石体的流变特性，故道基变形初始阶段的弹塑性变形采用较简单的线性强化模型计算，此处不展开叙述。计算结果参见表 2 和图 5。

可以看出，堆石体自身的蠕变很小，如海涂低地区 1 a 后，工后沉降仅为 5.8 mm，蠕变基本可以忽略。相对安山岩爆破堆石体的颗粒高强度特征，依托工程道基自重应力作用水平相对较低，堆石体颗粒破碎十分有限，道基结构自身压缩流变特征基本可以忽略的，基本结论是合理的。

4 结 论

依托某堆石体填筑道基高填方工程，对堆石体流变特性进行了研究，得出以下 2 点结论。

(1) 通过引入高木俊介线性加载模式，用于分析堆石体分级加载作用下的变形时变规律，再引入道基

结构自重应力作用三角形分布特征，对三参数 (b 、 c 、 d) 流变模型进行了修正。

(2) 通过室内大型压缩试验提取模型所需参数，对依托工程堆石体道基进行了流变分析，分析结果表明，由于爆破安山岩颗粒强度较高且道基自重应力水平相对较低，道基结构自身压缩流变特征基本可以忽略。压缩试验前后试样级配整体变化较小佐证了这一现象。

参考文献：

[1] PARKIN A K. Settlement rate behaviour of some fill dams in australia[C]// Proceedings of 11th ICSMFE. San Francisco: 1985: 2007 - 2010.

[2] NEVES E M. Advances in rockfill structure[M]. London: Kluwer Academic Publishers, 1991.

[3] 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 face rockfill dam[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(11): 1712 - 1716. (in Chinese))
- [4] 沈珠江, 左元明. 堆石料的流变特性试验研究[C]// 第 6 届土力学及基础工程学术会议论文集. 上海: 同济大学出版社, 1991: 443 - 446. (SHEN Zhu-jiang, ZUO Yuan-ming. Test research on creep behavior for rockfill materials[C]// Proceedings of the 6th Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Shanghai: Tongji University Press, 1991: 443 - 446. (in Chinese))
- [5] 沈珠江. 土石料的流变模型及其应用[J]. 水利水运科学研究, 1994(12): 314 - 342. (SHEN Zhu-jiang. A creep model of rock-fill material and determination of its parameters by back analysis[J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 1994(12): 34 - 342. (in Chinese))
- [6] 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): 1 - 6. (SHEN Zhu-jiang, ZHAO Kui-zhi. Back analysis of creep deformation of rockfill dams[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998(6): 1 - 6. (in Chinese))
- [7] 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): 74 - 81. (SHEN Feng-sheng, CHEN Hui-yuan, PAN Jia-zheng. Deformation analysis for concrete faced rockfill dam during reservoir filling[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, **12**(1): 74 - 81. (in Chinese))
- [8] 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))
- [9] 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 influence of rockfill rheology on face deformation with substage construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(5): 1043 - 1048. (in Chinese))
- [10] 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): 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): 42 - 46. (in Chinese))
- [11] 周伟. 高混凝土面板堆石坝流变模型理论及其应用[D]. 武汉: 武汉大学, 2004. (ZHOU Wei. Theory and application of rheology constitutive model on high concrete face rockfill dam[D]. Wuhan: Wuhan University, 2004. (in Chinese))
- [12] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996. (QIAN Jia-huan, YIN Zong-ze. The soil computation and theory[M]. Beijing: Chinese Hydraulic and Water Power, 1996. (in Chinese))
- [13] BARRON R A. Consolidation of fine grained soils by drainwells[J]. Transactions of American Society of Civil Engineers, 1948, **113**: 18 - 742.
- [14] SL 237—1999 土工试验规程[S]. 1999. (SL 237—1999 Specification of soil test[S]. 1999. (in Chinese))

(责任编辑 孙振远)