

DOI: 10.11779/CJGE201412005

堆石料流变的黏弹塑性本构模型研究

王占军¹, 陈生水^{1, 2}, 傅中志^{1, 2}

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 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)

摘 要: 堆石坝流变变形主要是堆石料在环境因素作用下的劣化和高接触应力下的颗粒破碎重排引起的。在等向压缩方程中引入反映堆石料颗粒强度的固相硬度参数, 选用双曲线型式的固相硬度衰减模型, 以反映堆石料颗粒强度随时间劣化的特性; 在分析堆石料流变试验结果的基础上, 建立了流变变形的双曲线型流动准则; 推导了流变变形的计算公式, 并构建了流变模量表达式, 从而建立了一个可统一考虑加载与流变过程的堆石料黏弹塑性本构模型。通过模拟两种典型堆石料的流变试验资料验证了模型的有效性。

关键词: 堆石料; 流变; 黏弹塑性本构模型

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)12-2188-07

作者简介: 王占军(1986-), 男, 博士研究生, 主要从事土石坝工程研究。E-mail: nhrwj@126.com。

Viscoelastic-plastic constitutive model for creep deformation of rockfill materials

WANG Zhan-jun¹, CHEN Shen-shui^{1, 2}, FU Zhong-zhi^{1, 2}

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Key Laboratory of Earth-Rock Dam Failure Mechanism and Safety

Control Techniques, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China)

Abstract: The underlying mechanism of creep deformation of rockfill dams is the particle deterioration due to environmental changes and the particle breakage under high contact stresses. A solid hardness parameter reflecting particle strength is introduced into the isotropic compress equation. In order to describe the deterioration process of rockfill particles with time, the solid hardness parameter is assumed to vary with time, following a mathematical representation of hyperbola distribution. By analyzing the data of triaxial creep tests on rockfill materials, a hyperbolic creep flow rule is established. The creep formulae for deformation are derived, and the expressions for creep modulus are proposed. Then a visco elastic-plastic constitutive model for rockfill materials is proposed considering the influence of both loading and creep deformation. Finally, the validity of the proposed model is confirmed by comparing the simulated results with the measured data of two kinds of rockfill materials.

Key words: rockfill material; creep; viscoelastic-plastic constitutive model

0 引 言

堆石料具有明显的流变特性^[1-4], 导致坝体竣工后持续产生后期变形, 对坝体和防渗系统长期应力变形产生不利影响, 持续增加的坝体流变变形易造成面板顶部脱空或心墙裂缝, 面板或心墙受力状态恶化, 周边缝剪切位移和沉陷增加, 影响大坝的长期安全性。天生桥一级面板堆石坝(坝高 178 m)在运行过程中出现面板脱空、面板垂直缝挤压破损及大量裂缝的一个很重要原因就是坝料的流变^[5]。近年来一些 200 m 级高堆石坝已建成并运行, 实测资料表明堆石料流变对大坝变形的影响更加显著, 如水布垭面板堆石坝(坝高 233 m)坝体填筑完成后最大断面中部沉降量已达 320 mm 左右(2006 年 9 月 14 日至 2010 年 4 月 22 日)^[6]。而忽略堆石体流变效应的应力变形数值计算

结果通常会低估坝体和周边缝变形^[7-8], 并对大坝安全作出偏于危险的评价。因此合理模拟堆石料流变变形对提高坝体和防渗系统长期应力变形预测结果的可靠性及保障大坝安全具有重要意义。

目前, 常用的堆石料流变模型主要分为理论模型和经验模型两类^[2-4]。理论模型通过并联或串联组合弹簧、黏壶和滑片 3 种力学元件形成黏弹塑性流变模型, 如常用的 Merchant 模型, 但该类模型较复杂且参数确定困难; 经验模型通常通过直接拟合堆石料在某应力状态下的最终流变量与当前应力状态的关系曲线, 并引入流变随时间发展规律的某种假定得到, 如沈珠江 3 参数模型^[1]、长科院 9 参数模型^[9]和中国水科院幂函

基金项目: 国家自然科学基金项目(51379130, 51209141, 91215301)

收稿日期: 2014-04-22

数模型^[10]以及这些模型的改进型^[4,11]。由于经验模型回避了流变的复杂物理机理, 可以方便地与有限单元法结合, 在土石坝流变计算中得到了广泛的应用^[1-4,12], 但该类模型未反映出堆石料流变的物理机理, 且不能统一考虑加载与流变过程, 对于建设年限较长, 施工过程中流变显著的高土石坝适用性是有限的。

王勇^[13]、梁军等^[14]、李国英等^[11]和周伟等^[15]研究认为堆石料流变主要是由颗粒破碎引起; 殷宗泽^[16]认为堆石料流变的主要部分是环境变化和周期性荷载产生的变形; 张丙印等^[17]也认为劣化变形是高堆石坝后期变形的重要组成部分; Fu 等^[18]认为颗粒强度降低导致颗粒破碎从而引起堆石料的流变变形。综上, 堆石料流变的外因主要是库水位变化、日晒雨淋等干湿循环和温度循环作用; 其内因则是颗粒性质劣化, 强度随时间衰减, 高接触应力作用下堆石料颗粒局部发生破碎, 从而使高接触应力得以释放并转移至邻近堆石料, 并触发新的破碎—重排—应力转移等过程^[19]。由于目前尚缺乏实用的颗粒破碎度量指标用于本构模型, 直接从颗粒破碎的角度建模将十分困难。因此, 本文将以正确描述颗粒性质劣化规律作为建立堆石料流变模型的突破口。本文在等向压缩方程中引入反映堆石料颗粒劣化的参变量, 并构建了该参变量衰减模型, 基于堆石料流变试验资料, 构造了流变变形的流动准则, 提出了一个可统一考虑加载与流变过程的堆石料黏弹塑性本构模型, 并运用典型堆石料流变试验资料验证了模型的有效性。

1 考虑颗粒劣化的堆石料压缩方程

荷载作用下特别是高围压下堆石料颗粒破碎现象明显, 其压缩曲线在 $e - \ln p$ 平面上不是直线^[20-21], 文献[22]采用下述压缩方程描述堆石料的压缩特性:

$$e = e_0 \exp\left[-(p/h_s)^n\right] \quad (1)$$

式中 e_0 为堆石料的初始孔隙比; p 为平均应力; h_s 为固相硬度, 是一个参考应力, 综合度量堆石料抵抗破碎能力; n 为由材料级配决定的无量纲参数。

若堆石料颗粒强度不变, 即堆石料固相硬度 h_s 为常数, 由式(1)可推出等向压缩参数 λ 为^[22]

$$\lambda = ne(p/h_s)^n = n[e_0 - (1 + e_0)\varepsilon_v](p/h_s)^n \quad (2)$$

式(2)说明 λ 依赖于密实度和平均压力, 当 p 不变时, 堆石料趋于密实的过程中, λ 逐渐减小, 则堆石料压缩性降低。 λ 也反映了颗粒破碎的显著程度, 当 $p < h_s$ 时, $\partial\lambda/\partial p > 0$, 即随着 p 增加, 堆石料压缩性逐渐提高, 表明颗粒破碎趋于显著; 当 $p = h_s$ 时, $\partial\lambda/\partial p = 0$, 堆石料压缩参数 λ 达到最大值, 表明颗粒破碎速率最大; 当 $p > h_s$ 时, $\partial\lambda/\partial p < 0$, 即随着 p 增

加, 堆石料压缩性逐渐降低, 表明颗粒破碎使堆石料趋于稳定级配。

如前所述, 堆石料流变^[12-19]是颗粒在复杂环境因素作用下的劣化和高接触应力下的破碎重排引起的。因此, 正确描述颗粒性质劣化规律是建立堆石料流变模型的关键。堆石料颗粒劣化是颗粒的生物—化学作用、温度和含水率变化等多因素综合作用的结果^[18], 造成颗粒抵抗破碎能力下降, 由式(1)知堆石料颗粒强度劣化可通过堆石料固相硬度 h_s 的衰减间接反映, 从而 h_s 成为一状态量, 与时间 t 有关, 因此本文改用 h_{st} 表示随时间变化而衰减的固相硬度, 并选用双曲线型式的固相硬度衰减模型, 即

$$h_{st} = h_{so} \left(1 - \frac{at}{r+t}\right) \quad (3)$$

式中 h_{st} 为 t 时刻堆石料的固相硬度; h_{so} 为初始时刻堆石料的固相硬度; $a = (h_{so} - h_{sl})/h_{so}$ 反映了固相硬度的衰减程度, h_{sl} 为堆石料的固相硬度的长期稳定值, a 越大, 固相硬度衰减越显著; r 为半衰龄期, 反映固相硬度衰减快慢的参数, 具有时间量纲。固相硬度 h_{st} 的衰减示意图如图 1 所示。

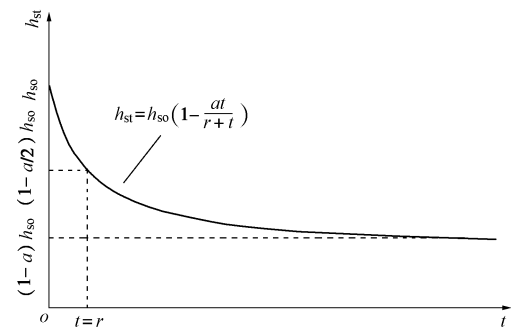


图 1 固相硬度衰减示意图

Fig. 1 Schematic plot of solid hardness deterioration

综上所述, 式(1)可改写为

$$e = e_0 \exp\left[-\left(\frac{p}{h_{st}}\right)^n\right] \quad (4)$$

式(4)两边对时间求导可得

$$de = ne \left(\frac{p}{h_{st}}\right)^n \left(\frac{dh_{st}}{h_{st}} - \frac{dp}{p}\right) \quad (5)$$

式(5)表明堆石料孔隙比的变化与平均应力 p 有关, 还与固相硬度 h_{st} 的衰减有关。若保持平均应力 p , 则式(5)退化为

$$de = ne \left(\frac{p}{h_{st}}\right)^n \frac{dh_{st}}{h_{st}} \quad (6)$$

式(6)反映在恒定应力作用下, 固相硬度 h_{st} 的

减小引发了颗粒破碎重新排列, 从而引起堆石料孔隙比减小, 这与堆石料流变的机理一致, 说明式 (6) 可以用于描述堆石料流变。从式 (6) 可看出固相硬度衰减率一定时, 堆石料的孔隙比 e 越大, 平均应力 p 越大, 则颗粒接触应力越大, 颗粒越易破碎, 堆石料压实速度越快; 堆石料的孔隙比 e 和平均应力 p 一定时, 固相硬度衰减率越大, 则颗粒越易破碎, 堆石料压实速度越快, 即流变速率越大。

2 堆石料流变的流动准则

堆石料流变试验多是在恒定应力状态下开展的, 所产生的变形全部为塑性变形, 符合一定的流动准则, 可通过室内试验建立流变的流动准则。流动准则对流变变形分量的相对比例关系具有重要的影响, 是建立堆石料流变本构模型的一个关键问题。

图 2, 3 是某面板堆石坝 (坝高 253 m) 堆石料 A (主堆石区砂砾料 ($\rho=2.26 \text{ g/cm}^3$)) 和堆石料 B (弱风化开挖料 (70%砂岩+30%板岩, $\rho=2.23 \text{ g/cm}^3$)) 的三轴流变试验结果, 从图中可看出: ①相同围压下, 应力水平越大, 即偏应力越大, 体应变和轴向流变越大; ② $\varepsilon_v - \varepsilon_1$ 曲线近似为一通过原点的直线, 即流变

变形阶段 $d\varepsilon_v/d\varepsilon_1$ 可假定为一常量。整理上述 2 种典型堆石料不同围压下的应变率比 $\partial\varepsilon_v/\partial\varepsilon_1$ 和应力比 σ_1/σ_3 , 如图 4 所示, 发现可采用双曲线拟合图 4 中的试验数据。因此本文构造下述流动准则:

$$3 - d\varepsilon_v/d\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1/\sigma_3 - 1}{b_1 + b_2(\sigma_1/\sigma_3 - 1)} \quad (7)$$

式中 b_1 和 b_2 是两个非负无量纲参数, 通过拟合 $d\varepsilon_v/d\varepsilon_1 - \sigma_1/\sigma_3$ 曲线得到, 见图 4。

轴对称三轴试验中:

$$\varepsilon_s = \varepsilon_1 - \frac{1}{3}\varepsilon_v \quad (8)$$

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (9)$$

$$p = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3 \quad (10)$$

将式 (8) ~ (10) 代入式 (7) 中, 可得 $d\varepsilon_s/d\varepsilon_v$ 与应力比 η 的关系:

$$dg_t = \frac{d\varepsilon_s}{d\varepsilon_v} = \frac{\eta}{3(b_1(3-\eta) + (3b_2-1)\eta)} \quad (11)$$

式中, $\eta = q/p$ 。

式 (11) 确定了堆石料流变中的剪缩方程, 反映了流变变形中各应变的比例关系。

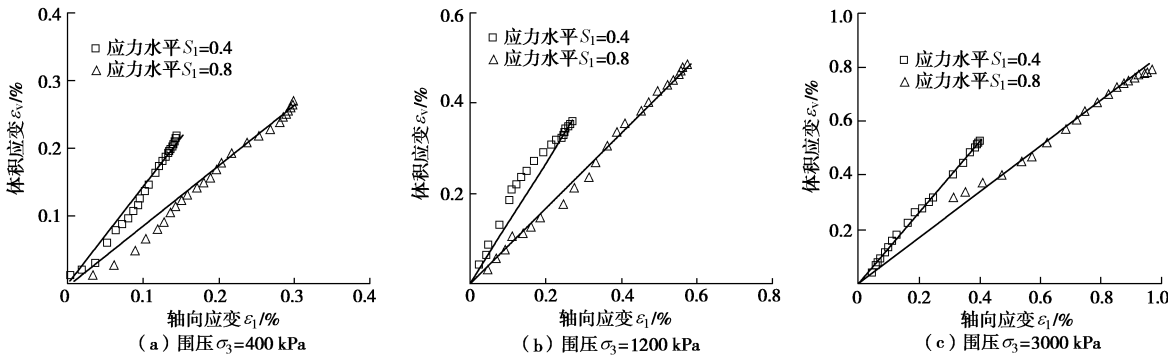


图 2 堆石料 A 流变试验结果

Fig. 2 Experimental results of creep for rockfill materials A

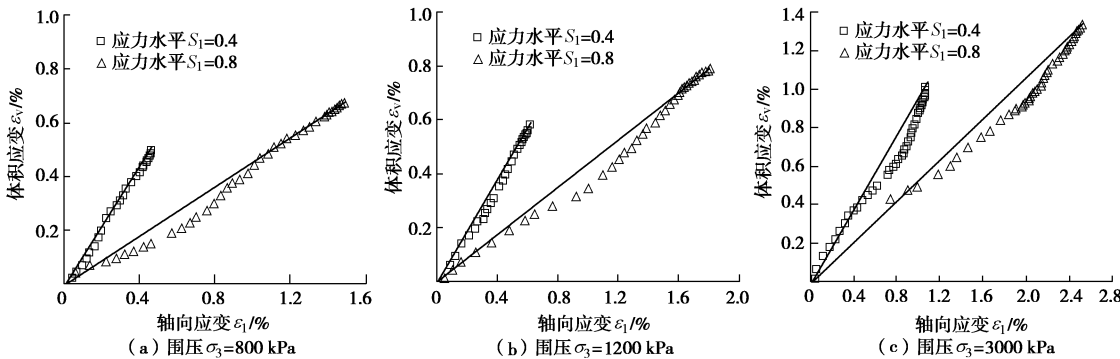


图 3 堆石料 B 流变试验结果

Fig. 3 Experimental results of creep for rockfill materials B

由式 (8) 可得

$$\frac{d\varepsilon_s}{d\varepsilon_v} = \frac{d\varepsilon_1}{d\varepsilon_v} - \frac{1}{3}, \quad (12)$$

又由式 (7) 知 $d\varepsilon_1/d\varepsilon_v \geq 1/3$, 所以 $d\varepsilon_s/d\varepsilon_v \geq 0$, 即 $dg_t \geq 0$, 说明式 (11) 可反映堆石料流变引起的体缩, 这与大量的试验结果是相符的^[12, 16]。

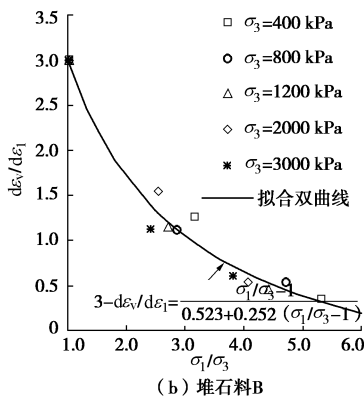
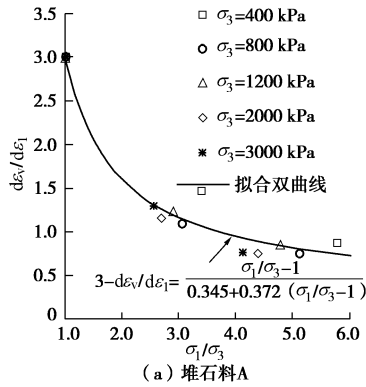


图 4 应变率比 $d\varepsilon_v/d\varepsilon_1$ - 应力比 σ_1/σ_3 关系曲线

Fig. 4 Relationship between $(d\varepsilon_v/d\varepsilon_1)$ and (σ_1/σ_3) in triaxial creep experiments

3 堆石料黏弹塑性本构模型

3.1 一维应力 - 应变 - 时间关系

式 (6) 可以表示为

$$d\varepsilon_v^t = -\frac{1}{1+e} ne \left(\frac{p}{h_{st}} \right)^n \frac{dh_{st}}{h_{st}} = -\frac{\lambda}{1+e} \frac{dh_{st}}{h_{st}}. \quad (13)$$

结合堆石料广义弹塑性本构模型^[22]中一维弹塑性应力 - 应变公式, 可得堆石料一维黏弹塑性应力 - 应变 - 时间关系:

$$d\varepsilon_v = \frac{\lambda}{1+e} \frac{dp}{p} - \frac{\lambda}{1+e} \frac{dh_{st}}{h_{st}}. \quad (14)$$

瞬时加载时 $dh_{st} = 0$, 则公式 (14) 退化为堆石料广义弹塑性模型的一维应力 - 应变关系。

3.2 黏弹塑性本构模型

基于广义塑性理论建立的堆石料弹塑性本构模

型^[22], 直接根据塑性流动方向矢量、加载方向矢量和塑性模量建立了三轴应力状态下堆石料的弹塑性应力 - 应变关系式:

$$\begin{bmatrix} d\varepsilon_v \\ d\varepsilon_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{K_e} + \frac{1}{H} n_{gv} n_{fv} & \frac{1}{H} n_{gv} n_{fs} \\ \frac{1}{H} n_{gs} n_{fv} & \frac{1}{3G_e} + \frac{1}{H} n_{gs} n_{fs} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dp \\ dq \end{bmatrix}. \quad (15)$$

式中 K_e 和 G_e 分别是弹性体积模量和弹性剪切模量; n_{gv} 和 n_{gs} 是塑性流动方向矢量 n_g 的分量; n_{fv} 和 n_{fs} 是加载方向矢量 n_f 的分量; H 是塑性模量。

为计算堆石料流变变形随时间的变化量, 可将固相硬度 h_{st} 随时间变化量 dh_{st} 作为等效荷载, 即可令 $d\sigma_t = dh_{st}$ 为时间引起的等效应力增量, 则堆石料流变变形增量计算公式可表示为

$$\begin{bmatrix} d\varepsilon_v^t \\ d\varepsilon_s^t \end{bmatrix} = \frac{1}{H_t} \begin{bmatrix} 1 \\ dg_t \end{bmatrix} dh_{st}. \quad (16)$$

式中 $d\varepsilon_v^t$ 和 $d\varepsilon_s^t$ 分别是堆石料流变变形中体应变增量和剪切应变增量; H_t 是随时间变化的流变模量; dg_t 同式 (11)。

与弹塑性本构模型相比, 堆石料黏弹塑性本构模型考虑了流变变形引起的塑性变形。则式 (15) 可扩展为

$$\begin{bmatrix} d\varepsilon_v \\ d\varepsilon_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{K_e} + \frac{1}{H} n_{gv} n_{fv} & \frac{1}{H} n_{gv} n_{fs} \\ \frac{1}{H} n_{gs} n_{fv} & \frac{1}{3G_e} + \frac{1}{H} n_{gs} n_{fs} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dp \\ dq \end{bmatrix} + \frac{1}{H_t} \begin{bmatrix} 1 \\ dg_t \end{bmatrix} dh_{st}. \quad (17)$$

3.3 流变模量公式

等向压缩条件下式 (16) 退化为式 (13), 则可得流变模量为

$$H_t = -\frac{1+e}{\lambda} h_{st} = -\frac{1+e}{ne} \left(\frac{p}{h_{st}} \right)^{-n} h_{st}. \quad (18)$$

为考虑复杂应力状态的影响, 经试算后, 建议流变模量为

$$\begin{aligned} H_t &= -\left(1 - \frac{\eta}{M_f} \right)^\mu \left(\frac{p}{p_a} \right)^{0.5} \frac{1+e}{\lambda} h_{st} \\ &= -\left(1 - \frac{\eta}{M_f} \right)^\mu \left(\frac{p}{p_a} \right)^{0.5} \frac{1+e}{ne} \left(\frac{p}{h_{st}} \right)^{-n} h_{st}, \end{aligned} \quad (19)$$

式中, μ 是一个量纲为“1”的参数, 峰值应力比 M_f 为

$$M_f = \frac{6 \sin \varphi}{3 - \sin \varphi}. \quad (20)$$

表 1 堆石料流变模型参数

Table 1 Creep constitute model parameters of rockfill materials										
材料	e_0	h_{s0}/MPa	n	$\varphi_0/(\text{^\circ})$	$\Delta\varphi/(\text{^\circ})$	a	r/h	b_1	b_2	μ
堆石料 A	0.20	40.00	0.82	59.03	9.67	0.48	0.54	0.345	0.372	0.19
堆石料 B	0.22	11.46	1.13	57.12	9.63	0.45	1.03	0.523	0.252	0.25

峰值摩擦角 φ 为

$$\varphi = \varphi_0 - \Delta\varphi \lg(p/p_a) \quad (21)$$

式中 φ_0 为平均应力 p 为大气压力 p_a 时的峰值摩擦角； $\Delta\varphi$ 为平均应力 p 增加一个数量级时峰值摩擦角降低的幅度。

4 模型验证

除初始孔隙比 e_0 及堆石料弹塑性本构模型中的峰值摩擦角 φ_0 和 $\Delta\varphi$ 、初始固相硬度 h_{s0} 和压缩方程参数 n 外，本文提出的模型还有另外 5 个参数，即①固相硬度劣化参数 a 和 r ，可通过式（3）和式（13）拟合等向压缩条件下堆石料的流变试验曲线得到；②流变变形的流动准则参数 b_1 与 b_2 ，确定方法如第 2 节所述；③流变模量参数 μ ，由式（16）和式（18）拟合 $\varepsilon_v - t$ 曲线得到。堆石料 A 和堆石料 B 的流变模型参数如表 1 所示。

本文建立的模型分别模拟了堆石料 A 和堆石料 B 的流变试验数据，见图 5，6。由图中模型预测曲线与试验结果的对比，可以看出模型预测值与试验值吻合

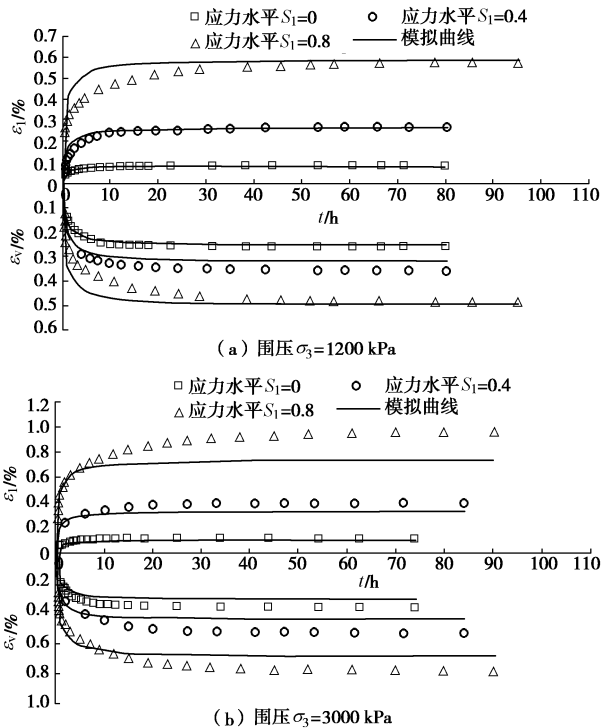


图 5 堆石料 A 的流变试验结果与模型预测值对比

Fig. 5 Comparison between model predictions and experimental results of rockfill material A

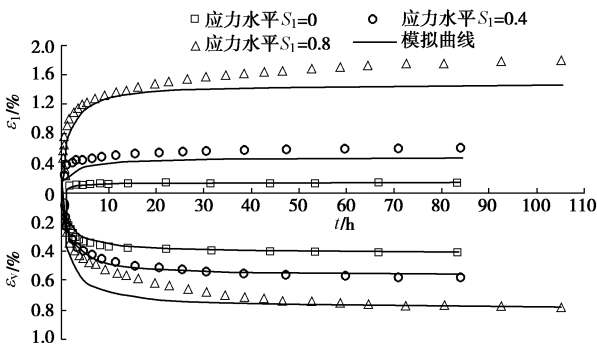


图 6 堆石料 B 的试验结果与模型预测值对比

Fig. 6 Comparison between model predictions and experimental results of rockfill material B

较好，说明本文建立的模型可以较好地模拟堆石料不同围压下的流变特性；对同一种堆石料，相同围压下，剪应力水平越大，流变速率越大，流变变形亦越大；母岩性质对堆石料的流变影响显著，堆石料 A 是新鲜砂砾石料，堆石料 B 是弱风化开挖料，相同围压和应力水平下堆石料 B 的流变变形明显大于堆石料 A，符合已建成坝中软岩堆石料的后期变形较大的工程实践。

5 结 论

本文提出的堆石料黏弹塑性本构模型具有以下 3 个特点。

- (1) 选用双曲线型式的堆石料固相硬度随时间衰减模型，反映堆石料颗粒劣化过程。
- (2) 基于分析堆石料流变试验结果所发现的应变率比与应力比之间呈双曲线型函数关系，构造了流变变形流动准则。
- (3) 该模型可统一考虑加载与流变过程，特别适用于建设年限较长，施工过程中流变显著的高土石坝应力变形计算分析。

该模型相对简单，除弹塑性本构模型参数外，模型中针对堆石料流变引入了 5 个参数，均可由流变试验确定。两种典型堆石料流变试验结果与模型预测值的比较表明，该模型可较好地预测堆石料的长期变形。

需要指出的是，目前的技术条件下，流变试验尚无法对工程所在地区的环境变化进行模拟，且所用饱和试样与坝料实际干湿状态有别，故室内试验中堆石料流变速率明显较实际工程大很多，所以室内试验得

到的流变-时间关系曲线一般不能直接用于确定真实运行环境中堆石料固相硬度的衰减参数, 确定堆石料固相硬度衰减参数应借助大量高土石坝工程运行期的变形观测资料。

参考文献:

- [1] 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(4): 335 - 342. (SHEN Zhu-jiang. A creep model of rockfill material and determination of its parameters by back analysis[J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 1994(4): 335 - 342. (in Chinese))
- [2] 花俊杰, 常晓林, 周伟. 高堆石坝流变研究进展[J]. 水力发电学报, 2010, 29(4): 194 - 199. (HUA Jun-jie, CHANG Xiao-lin, ZHOU Wei. Advances in researches on creep of high rock-fill dams[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(4): 194 - 199. (in Chinese))
- [3] 花俊杰, 周伟, 常晓林, 等. 300 m 级高堆石坝长期变形预测[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2011, 43(3): 33 - 38. (HUA Jun-jie, ZHOU Wei, CHANG Xiao-lin, et al. Long-term deformation prediction of 300m high rockfill dams[J]. Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition), 2011, 43(3): 33 - 38. (in Chinese))
- [4] 王观琪, 余挺, 李永红, 等. 300 m 级高土石心墙坝流变特性研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(1): 140 - 145. (WANG Guan-qi, YU Ting, LI Yong-hong, et al. Creep deformation of 300m-high earth core rockfill dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(1): 140 - 145. (in Chinese))
- [5] 酆能惠. 高混凝土面板堆石坝设计理念探讨[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(8): 1143 - 1150. (LI Neng-hui. New concept of design for high concrete face rockfill dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(8): 1143 - 1150. (in Chinese))
- [6] 程展林, 潘家军. 水布垭面板堆石坝应力变形监测资料分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(12): 2299 - 2236. (CHEN Zhan-lin, PAN Jia-jun. Analysis of monitoring data of stress and deformation for Shuibuya concrete face rockfill dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(12): 2299 - 2236. (in Chinese))
- [7] 丁战峰, 王瑞骏, 耿计计, 等. 砂砾石面板堆石坝流变特性研究[J]. 水资源与水工程学报, 2012, 2(2): 132 - 136. (DING Zhan-feng, WANG Rui-jun, GENG Ji-ji, et al. Research on rheological properties of rock filled dam with sand-gravel face[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2012, 2(2): 132 - 136. (in Chinese))
- [8] 周伟, 胡颖, 杨启贵, 等. 高混凝土面板堆石坝流变机理及长期变形预测[J]. 水利学报, 2007(增刊 1): 100-105. (ZHOU Wei, HU Ying, YANG Qi-gui, et al. Study on creep mechanism and long-term deformation prediction for high concrete face rockfill dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007(S1): 100 - 105. (in Chinese))
- [9] 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))
- [10] 李海芳, 徐泽平, 温彦峰, 等. 九甸峡堆石料蠕变特性试验研究[J]. 水力发电学报, 2010, 29(6): 166 - 170. (LI Hai-fang, XU Ze-ping, WEN Yan-feng, et al. Study of Jiudianxia rockfill creep behaviors by triaxial creep model test[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(6): 166 - 170. (in Chinese))
- [11] 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 of rheological behaviors for rockfills in concrete faced rockfill dam[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(11): 1712 - 1716. (in Chinese))
- [12] ZHOU Wei, HUA Jun-jie, CHANG Xiao-lin, et al. Settlement analysis of the Shuibuya concrete-face rockfill dam[J]. Computers and Geotechnics, 2011, 38(2): 269 - 280.
- [13] 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))
- [14] 梁军, 刘汉龙, 高玉峰. 堆石蠕变机理分析与颗粒破碎特性研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(3): 479 - 483. (LIANG Jun, LIU Han-long, GAO Yu-fong. Creep mechanism and breakage behaviour of rockfill[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(3): 479 - 483. (in Chinese))
- [15] 周伟, 胡颖, 闫生存. 高堆石坝流变机制的组构理论分析方法[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(8): 1274 - 1278. (ZHOU Wei, HU Ying, YAN Sheng-cun, et al. Fabric theory on creep deformation mechanism for high rockfill dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(8): 1274 - 1278. (in Chinese))
- [16] 殷宗泽. 高土石坝的应力与变形[J]. 岩土工程学报, 2009,

- 31(1): 1 - 14. (YIN Zong-ze. Stress and deformation of high earth and rock-fill dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(1): 1 - 14. (in Chinese))
- [17] 张丙印, 孙国亮, 张宗亮. 堆石料的劣化变形和本构模型[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(1): 98 - 103. (ZHANG Bing-yin, SUN Guo-liang, ZHANG Zong-liang. Degrading deformation of rockfill materials and its constitutive model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(1): 98 - 103. (in Chinese))
- [18] FU Z Z, CHEN S S, LIU S H. Hypoplastic constitutive modelling of the wetting induced creep of rockfill materials[J]. Sci China Tech Sci, 2012, 55: 2066 - 2082.
- [19] 马 刚, 周 伟, 常晓林, 等. 颗粒劣化效应的堆石料流变细观数值模拟[J]. 岩土力学, 2012, 33(S1): 257 - 264. (MA Gang, ZHOU Wei, CHANG Xiao-lin, et al. Mesomechanically numerical simulation of rockfill rheology based on particle deterioration[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(S1): 257 - 264. (in Chinese))
- [20] 张 兵, 高玉峰, 刘 伟, 等. 坝体填筑料压缩特性及影响因素分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 741 - 746. (ZHANG Bing, GAO Yu-feng, LIU Wei, et al. Research on compressibility of rockfill materials for dams and analysis of influencing factors[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(3): 741 - 746. (in Chinese))
- [21] 孙海忠, 黄茂松. 考虑粗粒土应变软化特性和剪胀性的本构模型[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, 37(6): 727 - 733. (SUN Hai-zhong, HUANG Mao-song. A constitutive model for coarse granular material incorporating both strain work-softening and dilatancy[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2009, 37(6): 727 - 733. (in Chinese))
- [22] 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 - 1496. (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 - 1496. (in Chinese))

第九届全国土动力学学术会议在天津大学隆重召开

第九届全国土动力学学术会议于 2014 年 11 月 14 日—16 日在天津大学隆重召开, 本次会议由 中国振动工程学会土动力学专业委员会主办, 得到了中国土木工程学会土力学与岩土工程分会、中国水利学会岩土力学专业委员会、中国力学学会岩土力学专业委员会、中国地震学会地震工程专业委员会、中国建筑学会工程勘察分会、中国建筑学会地基基础分会支持, 天津大学、天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室等单位具体承办, 河北工业大学等单位协办。

本次会议共收到学术论文近 300 篇, 来自全国高校、科研与设计单位的 400 余名代表参加了此次大会。清华大学的张建民教授、中海石油研究总院千人计划专家李亚博士、中国水利水电科学研究院刘小生教授级高工、南京工业大学陈国兴教授、中国机械装备集团公司徐建教授级高工、同济大学黄茂松教授以及天津大学的王建华教授应邀做了大会报告; 大会进行了 14 场、86 个分组报告的学术交流。在紧张有序的学术交流中, 与会代表围绕着我国土动力学及岩土工程抗震领域的最新研究进展与未来发展方向开展了广泛、深入、亮点突出的研

究和交流。

本次会议得到了《岩土工程学报》与《地震工程学报》的大力支持, 会议录用的论文将陆续在《岩土工程学报》与《地震工程学报》刊出。

会议期间还举办了颁奖仪式, 对由专业委员会评选出的第二届汪闻韶优秀青年论文和第九届全国土动力学会议优秀青年论文的作者给予了奖励。

会议期间, 中国振动工程学会土动力学专业委员会还进行了换届选举, 通过无记名投票, 选出了由 79 人组成的中国振动工程学会第 7 届土动力学专业委员会, 其中有 23 人当选为常务委员, 清华大学张建民教授当选为主任委员, 中国机械装备有限公司徐健教授、甘肃省地震局王兰民教授、浙江大学陈云敏教授、重庆大学刘汉龙教授、中国冶金建筑总院辛鸿博教授、中国水利水电科学研究院刘小生教授、大连理工大学的孔宪京教授与同济大学黄茂松教授当选为副主任委员。

大会于 2014 年 11 月 16 日圆满闭幕。

(天津大学岩土工程研究所 孙立强 供稿)