

堆石流变试验及双屈服面流变模型的研究

王海俊, 殷宗泽

(1. 河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098; 2. 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要: 通过对两类不同岩性的堆石料作室内三轴流变试验, 研究了堆石料的流变特性, 试验结果表明流变体积应变和广义剪应变随时间均呈双曲线变化。殷宗泽曾以椭圆-抛物双屈服面弹塑性模型为基础, 提出了一个综合反映堆石料瞬时变形和流变的双屈服面流变模型的初步框架。结合堆石流变试验规律, 将该模型用于模拟试样在不同应力状态下的流变变形的发展, 确定了模型参数的计算方法, 初步验证该模型的合理性和有效性。该模型能反映复杂加载情况, 反映剪胀、剪缩特性和流变特性。

关键词: 土石坝; 堆石料; 流变试验; 塑性变形; 流变模型

中图分类号: TU43; TV131

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2008)07-0959-05

作者简介: 王海俊(1981-), 男, 江苏泰兴人, 博士研究生, 主要从事堤坝建筑材料的特性研究。E-mail: wanghaijun@hhu.edu.cn。

Creep tests of rockfill and double-yield surface creep model

WANG Hai-jun, YIN Zong-ze

(1. Geotechnical Research Institute of Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Creep tests were done to study the creep characteristics of two kinds of rockfill materials by use of triaxial-rheometer. It was concluded that the time dependent volumetric strain and generalized shear strain were fit for the law described as hyperbola respectively. Based on the elasto-plastic constitutive model with oblong-parabola double-yield surface, Yin Zong-ze proposed the preliminary framework of a creep model with double-yield surface to consider creep characteristics of rockfill. According to the creep characteristics of rockfill, the model was applied to simulate the shearing creep tests and the method of determination of model parameter was also proposed. As compared with the test results, the proposed constitutive model was proved to be reasonable and effective. It was shown that the proposed model could reflect the visco-elasto-plastic behaviors, dilatation and shrinkage of rockfill materials, and it was also applicable to all kinds of loading conditions.

Key words: embankment dam; rockfill material; creep test; plastic deformation; creep model

0 引言

流变是土体的重要变形特性, 国内外多座已建成的面板堆石坝现场安全监测结果表明, 堆石体也存在明显的流变现象^[1-2]。堆石的流变除了引起坝体的沉降变形还会影响面板的应力分布, 造成面板破坏。近年来, 随着坝高不断上升, 坝体堆石的流变特性越来越受到重视, 已有不少学者在坝体的应力应变计算中考虑堆石的流变^[3-6]。描述材料流变变形特性通常有两类方法: ①用流变力学元件组合形成土体流变模型; ②根据室内流变试验测得的曲线提出经验公式。前者模型中所指的塑性变形, 往往是理想塑性变形, 即屈服后变形无限发展。主要针对的是一般材料的力学行为, 有一定适用范围, 不完全符合土的变形特性。后者实际上符合土体的实际, 更便于在工程中应用。本文通

过对两类不同岩性的堆石料作室内三轴流变试验, 研究了堆石料的流变特性, 采用双曲线的经验关系模拟体积应变和广义剪应变随时间的发展。殷宗泽曾在文献[7]中假定流变变形是不可恢复的塑性变形, 采用相关联的流动法则, 以椭圆-抛物线双屈服面应力应变模型^[8]为基础, 提出了一个综合反映堆石料瞬时变形和流变的双屈服面流变模型的初步框架, 但尚未作实际应用。本文结合相应的堆石料流变试验规律, 将该模型用于模拟试样在不同应力状态下的流变变形的发展, 验证该模型的合理性和相关模型参数的确定方法。

基金项目: 国家自然科学基金项目(50479019); 雅砻江重点基金项目(50639050)

收稿日期: 2007-08-03

1 双屈服面流变模型思路及基本假定

堆石体是由尺寸不同的块石经成层铺筑、碾压而成,在外力作用下,孔隙体积减小,部分颗粒破碎,颗粒间相互错动滑移,使其重新排列,从而产生了堆石体的变形。对于堆石体而言,由于其颗粒的形状和排列没有规律,无论是各向相等的球应力还是剪应力所引起颗粒间错动和滑移的方向都是极为复杂的,有些错动滑移引起体积压缩,有些错动滑移则引起体积膨胀,它们同时存在于整个堆石体中。如果引起压缩者占优势,则宏观上表现为压缩变形,反之表现为膨胀变形^[8]。因此,堆石体的变形均可表示为

$$\{\mathbf{d}\boldsymbol{\varepsilon}\} = \{\mathbf{d}\boldsymbol{\varepsilon}^1\} + \{\mathbf{d}\boldsymbol{\varepsilon}^2\}, \quad (1)$$

式中, $\{\mathbf{d}\boldsymbol{\varepsilon}^1\}$ 与土体压缩相关联, $\{\mathbf{d}\boldsymbol{\varepsilon}^2\}$ 与土体剪胀相关联。

堆石体的变形除了瞬时弹塑性变形,还包括滞后产生的随时间有关的流变变形,根据Bjerrum的滞后变形理论,任一点的应变可表示为

$$\{\boldsymbol{\varepsilon}\} = \{\boldsymbol{\varepsilon}^{\text{ep}}\} + \{\boldsymbol{\varepsilon}^{\text{t}}\}, \quad (2)$$

式中, $\{\boldsymbol{\varepsilon}^{\text{ep}}\}$ 表示瞬时弹塑性变形,采用殷宗泽^[8]提出的椭圆-抛物线双屈服面弹塑性模型来计算, $\{\boldsymbol{\varepsilon}^{\text{t}}\}$ 表示与时间有关的粘滞变形,由下文的流变试验的分析,采用相应的经验模型公式可获得应变分量随时间的发展规律。但问题的难点还在于,如何将其推广到三维的6个应变分量。这就必须作某种假定。

由于堆石体流变主要为塑性变形,可以应用塑性理论中的方法。其中流动法则就是一种推广到6个应变分量的有效方法,即应变增量的方向垂直于塑性势面。弹塑性模型理论求得的塑性应变是一种瞬时应变,堆石不存在固结问题,加荷后立即发生。流变是其后随时间继续发展的不可恢复的应变,即塑性应变。因为在恒定荷载作用过程中没有新的因素来改变这种规律,可以合理假定,后继的塑性应变按照既定规律发展。这意味着,流变增量的方向也垂直于同一塑性势面,用相关联的流动规律,则它垂直于同一屈服面。其屈服准则函数表示为

$$f_1: \quad p + \frac{q^2}{M_1^2(p + p_r)} = p_0 = \frac{h\varepsilon_v^{\text{pl}}}{1 - m\varepsilon_v^{\text{pl}}} p_a, \quad (3a)$$

$$f_2: \quad \frac{aq}{G} \sqrt{\frac{q}{M_2(p + p_r) - q}} = \varepsilon_s^{\text{p2}}, \quad (3b)$$

式中,硬化参数 $\varepsilon_v^{\text{pl}}$ 和 $\varepsilon_s^{\text{p2}}$ 是瞬时发生的塑性应变分量。

由塑性理论可知瞬时塑性应变的流动法则为

$$\{\mathbf{d}\boldsymbol{\varepsilon}^{\text{p}}\} = \text{d}\lambda \left\{ \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \right\}, \quad (4)$$

那么流变增量便可表示为

$$\{\mathbf{d}\boldsymbol{\varepsilon}^{\text{t}}\} = \text{d}\lambda^{\text{t}} \left\{ \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \right\}. \quad (5)$$

由式(1)知,流变变形包含两部分,即 $\{\mathbf{d}\boldsymbol{\varepsilon}^{\text{t1}}\}$ 和 $\{\mathbf{d}\boldsymbol{\varepsilon}^{\text{t2}}\}$ 需分别根据屈服函数 f_1 和 f_2 来计算, $\{\mathbf{d}\boldsymbol{\varepsilon}^{\text{t}}\}$ 可表示成这两部分应变的叠加:

$$\{\mathbf{d}\boldsymbol{\varepsilon}^{\text{t}}\} = \{\mathbf{d}\boldsymbol{\varepsilon}^{\text{t1}}\} + \{\mathbf{d}\boldsymbol{\varepsilon}^{\text{t2}}\} = \text{d}\lambda_1^{\text{t}} \left\{ \frac{\partial f_1}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \right\} + \text{d}\lambda_2^{\text{t}} \left\{ \frac{\partial f_2}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \right\}, \quad (6)$$

式中, $\text{d}\lambda^{\text{t}}$ 不是常量,而是随时间 t 变化的量。由此,将解得的 $\text{d}\lambda_1^{\text{t}}$, $\text{d}\lambda_2^{\text{t}}$ 代入式(6),可求得任一时刻总的流变应变分量。有限元计算中采用初应变法,将流变变形 $\{\mathbf{d}\boldsymbol{\varepsilon}^{\text{t}}\}$ 看成初始应变,令

$$\{\mathbf{d}\boldsymbol{\sigma}^{\text{t}}\} = [\mathbf{D}_{\text{ep}}] \{\mathbf{d}\boldsymbol{\varepsilon}^{\text{t}}\}, \quad (7)$$

算出相应的附加节点荷载,施加于网格,求解总体平衡方程,即可求得任一时刻应力应变。

2 堆石料的流变试验研究

2.1 堆石料的流变试验

本次试验在试样尺寸为 $\Phi 101 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 的中型三轴流变仪和 $\Phi 300 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$ 的大型三轴流变仪上进行。中三轴试样材料为花岗岩,控制干密度为 1.96 g/cm^3 ,大三轴试样材料为硬质砂岩,控制干密度分别为 2.0 g/cm^3 。

堆石的流变与应力状态有关,包括体积应力 p 和广义剪应力 q 。为了研究荷载因素单独作用对流变的影响,对每一个试样(风干试样)仅施加一种应力状态,并维持这种应力状态不变至变形趋于稳定。由于 p 和 q 的变化会有许多组合,每种组合的试样维持时间较长,要进行各种应力组合下的流变试验,工作量太大。中三轴试验压力为 100, 200, 400 kPa,每组围压做了 3 种偏应力下的剪切流变试验,采用应力水平 $s = q/q_r$ 来反映剪应力的相对大小,其中 q_r 为风干试样剪切试验达到破坏时的广义剪应力, s 的取值为 0.25, 0.50, 0.75。大三轴试验压力为 200, 400, 800 kPa,其中仅对 800 kPa 围压做了 4 种偏应力下的剪切流变试验, s 取值分别为 0.3, 0.5, 0.7, 0.83。

各组围压下的三轴流变试验过程如下。

(1) 各向等压流变试验: 仅施加 σ_3 作用,试验过程中只测量体积随时间的变化,直至体积变形达到稳定,停止试验。

(2) 剪切流变试验: ①先施加 σ_3 , 让试样在 σ_3 作用下固结稳定 0.5 h; ②将固结稳定 0.5 h 所对应的体积变形作为三轴流变试验的初始固结体变,然后施加轴向偏应力; ③轴向偏应力按应变控制方式加载到某一应力状态(控制速率与剪切试验相同),并保持不

变; ④保持轴向偏应力不变, 观测轴向位移及体积随时间的变化, 直至轴向位移及体积变形均达到稳定, 停止试验。

各向等压及剪切流变试验过程中体积应变和轴向应变随时间变化的关系曲线如图1所示。

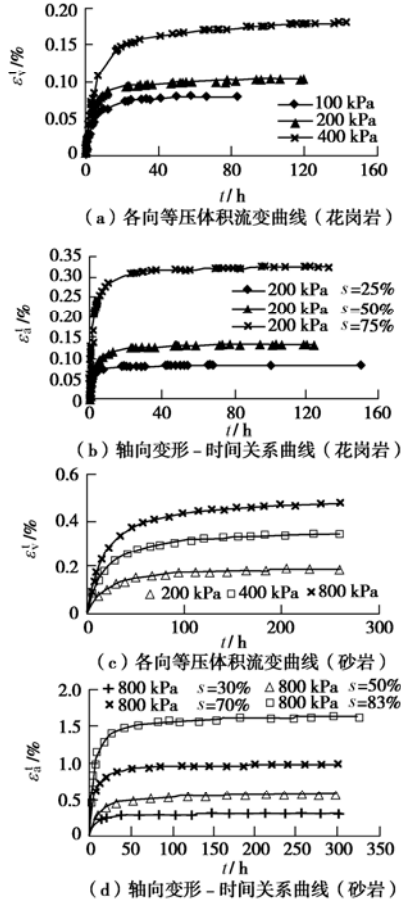


图1 堆石流变试验曲线

Fig. 1 Creep test curves of rockfills

2.2 流变试验曲线拟合

关于堆石体流变已有不少学者进行了室内试验研究, 沈珠江等^[9-11]对不同尺寸($\Phi 101 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$, $\Phi 300 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$)和高围压情况堆石的流变特性进行研究, 试验结果表明常应力下堆石变形过程是一逐渐趋于停止的衰减曲线, 这点与本试验结果一致。最常用的衰减曲线有指数衰减和双曲线两种形式。本文采用双曲线形式拟合, 点绘体积流变 ε_v^t 和剪切流变 ε_s^t 随时间 t 发展关系曲线如图2, 3所示, 方程表示为

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_v^t &= \frac{t}{c_v + b_v t} \\ \varepsilon_s^t &= \frac{t}{c_s + b_s t} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中 $c_v = 1/k_v$, k_v 为双曲线的初始切线斜率; $b_v = 1/\varepsilon_v^u$, ε_v^u 为其双曲线的渐近值 ($t \rightarrow \infty$ 时的流变体积应变)。同理斜率 $k_s = 1/c_s$, 渐近值 $\varepsilon_s^u = 1/b_s$ 。

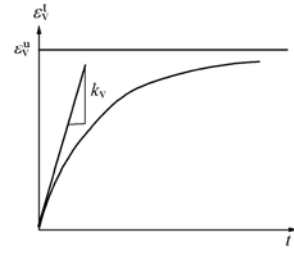


图2 $\varepsilon_v^t - t$ 关系曲线

Fig. 2 $\varepsilon_v^t - t$ curves

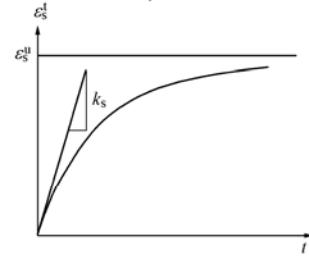


图3 $\varepsilon_s^t - t$ 关系曲线

Fig. 3 $\varepsilon_s^t - t$ curves

3 流变模型公式及参数推导

以下结合流变试验规律及相关假定, 推导与两个屈服面方程相对应的流变公式及模型参数的确定方法。

3.1 第一屈服面相关的流变

各向等压情况下堆石体的弹塑性体积变形以及体积流变均为体积压缩, 仅与第一屈服面相关联。本次堆石流变试验结果表明: 各向等压作用下体积应变渐近值(最终值)与相应压力下的瞬时塑性体积应变 ε_v^p 有较好的线性关系, 如图4所示。

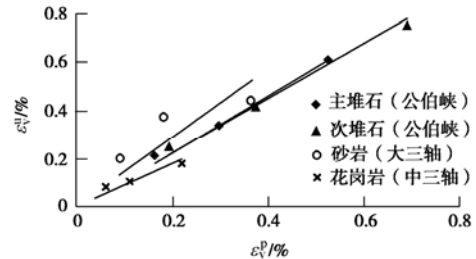


图4 $\varepsilon_v^u - \varepsilon_v^p$ 关系曲线

Fig. 4 $\varepsilon_v^u - \varepsilon_v^p$ curves

各向等压作用下体积流变渐近值可表示为

$$\varepsilon_v^u = \beta_v \varepsilon_v^p \quad (9)$$

李国英等^[11]曾对公伯峡堆石坝主次堆石料流变特性进行试验。本文对其结果整理, 也有相同的规律, 点绘其曲线如图4所示。

相应于第一屈服面的流变体积应变为

$$\varepsilon_v^u = \frac{t}{\frac{1}{k_v} + \frac{1}{\beta_v \varepsilon_v^{p1}} t} = \frac{\beta_v \varepsilon_v^{p1}}{\frac{\beta_v \varepsilon_v^{p1}}{k_v t} + 1} \quad (10)$$

对于一个给定的时刻 t 对式(10)微分, 即在微

分时假定 t 为常量, 则其增量型式为

$$d\varepsilon_v^{pl} = \frac{\beta_v}{\left(\beta_v \varepsilon_v^{pl} / k_v t + 1\right)^2} d\varepsilon_v^{pl} \quad (11)$$

由式 (4)、(5), 与第一屈服方程相应的塑性和流变变形流动法则为

$$\left. \begin{aligned} d\varepsilon_v^{pl} &= d\lambda_1 (\partial f_1 / \partial p), \\ d\varepsilon_v^{pl} &= d\lambda_1^l (\partial f_1 / \partial p), \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

代入式 (11), 可得

$$d\lambda_1^l = \frac{\beta_v}{\left(\frac{\beta_v \varepsilon_v^{pl}}{k_v t} + 1\right)^2} \frac{d\varepsilon_v^{pl}}{\frac{\partial f_1}{\partial p}}, \quad (13)$$

式中,

$$\varepsilon_v^{pl} = p_0 / (m p_0 + h p_a), \quad (14)$$

解得 $d\lambda_1^l$ 后, 代入式 (12) 即可得到任一时刻与第一屈服方程相应的流变分量。

3.2 第二屈服面相关的流变

由剪切流变试验结果可以发现不同应力状态的剪切流变渐近值 ε_s^u 与该应力状态下的瞬时塑性剪切应变 ε_s^p 有较好的线性关系, 如图5所示。令两者之比为常量, 等于 β_s 。

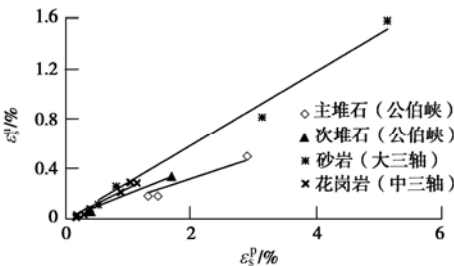


图5 $\varepsilon_s^u - \varepsilon_s^p$ 关系曲线

Fig. 5 $\varepsilon_s^u - \varepsilon_s^p$ curves

瞬时塑性剪切应变 ε_s^p 为

$$\varepsilon_s^p = \varepsilon_s^i - \varepsilon_s^e = \varepsilon_s^i - q / 3G, \quad (15)$$

式中, ε_s^i 表示瞬时剪切应变, q 表示偏应力, G 表示弹性剪切模量,

$$G = K_G p_a (p / p_a)^n \quad (16)$$

由此, 可假定与第二屈服方程相应的剪切流变渐近值和塑性剪切应变, 两者之比与 β_s 值相等。这样可推得与第二屈服方程相应的剪切流变:

相应地有

$$d\varepsilon_s^{l2} = \frac{\beta_s}{\left(\frac{\beta_s \varepsilon_s^{p2}}{k_s t} + 1\right)^2} d\varepsilon_s^{p2}, \quad (17)$$

$$d\lambda_2^l = \frac{\beta_s}{\left(\frac{\beta_s \varepsilon_s^{p2}}{k_s t} + 1\right)^2} \frac{d\varepsilon_s^{p2}}{\frac{\partial f_2}{\partial q}}, \quad (18)$$

式中, ε_s^{p2} 可由式 (3b) 求得。同理解得 $d\lambda_1^l$ 后, 即可得到任一时刻与第二屈服方程相应的流变分量。

3.3 模型参数的确定

上述双屈服面流变模型共包含12个参数: $K_G, n, p_r, M_1, M_2, h, m, a, k_v, k_s, \beta_v$ 和 β_s 。前8个参数为基本的弹塑性模型参数, 后4个参数为与流变有关的参数, 具体的参数推算过程如下。

(1) 弹塑性模型参数

弹塑性模型参数 $K_G, n, p_r, M_1, M_2, h, m$ 和 a 由常规剪切试验确定。因弹性变形所占比例较小, 取弹性泊松比为常量, 对总的变形不会引起多大的误差, 泊松比近似取0.3。堆石体颗粒级配中基本没有粘粒含量, 颗粒间也就不存在凝聚力, 凝聚力 c 为0, 则 p_r 也为0。文献[8]对参数的确定提供了详细的说明, 本文在此不对其他参数的推求做详细叙述。

(2) 相关流变参数流变参数 k_v, k_s, β_v 和 β_s 由

各向等压流变试验和剪切流变试验结果整理而得。

k_v 和 k_s 分别表示为 $\varepsilon_v^i - t$ 和 $\varepsilon_s^i - t$ 双曲线的初始切线斜率。试验结果表明 k_v 和 k_s 与应力状态有关, 但随应力状态的变化并不明显, 作为简化可分别取其平均值。 β_v 为各向等压试验体积流变双曲线渐近值与相同围压对应的瞬时塑性体积应变 ε_v^p 之比, ε_v^p 由式 (14) 求得, 两者的关系曲线见图4。 β_s 为不同应力状态剪切流变渐近值 ε_s^u 与该应力状态瞬时塑性剪切应变 ε_s^p 之比, ε_s^p 由式 (3b) 求得, 两者的关系曲线如图5。

上述4个参数可通过少量几组各向等压体积流变试验以及不同偏应力条件的剪切流变试验获得。根据上述方法对上述4种堆石材料的试验数据进行整理, 其双屈服面堆石流变模型计算参数如表1所示。由表可以看出上述4种材料的流变参数变化幅度并不是很大。 β_v 取值范围为1.0~1.2, β_s 在为0.1~0.3。

表 1 双屈服面堆石流变模型计算参数

Table 1 Parameters of creep model with double-yield surface

试验项目	K_G	n	p_r	M_1	M_2	h	m	a	k_v	k_s	β_v	β_s
花岗岩	1842	0.18	0	2.65	2.33	1791	13.5	0.31	0.30×10^{-3}	0.91×10^{-3}	0.95	0.24
砂岩	1368	0.11	0	1.89	1.80	2230	4.0	0.18	0.81×10^{-3}	0.75×10^{-3}	1.01	0.26
主堆石	768	0.65	0	1.68	1.64	2915	34.4	0.30	0.92×10^{-3}	0.60×10^{-3}	1.17	0.12
次堆石	556	0.47	0	1.64	1.65	3047	15.8	0.28	0.69×10^{-3}	0.77×10^{-3}	1.13	0.15

4 模型的初步验证

笔者用该模型分别对上述文中提到的4种堆石材料的流变结果进行分析, 均有较好的结果。这里仅以本次砂岩试验和分析结果为例。图6分别为大三轴试样800 kPa剪切流变试验体积和剪切应变与时间过程曲线与计算结果的比较, 实线为试验曲线, 虚线为计算曲线。由图可见计算结果和试验曲线是接近的。

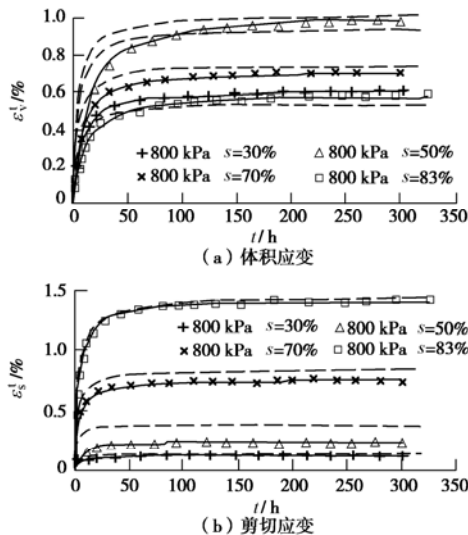


图6 三轴流变试验数据与计算结果比较(砂岩)

Fig.6 Comparison between test and calculated results (sandrock)

5 结 语

结合堆石料的流变特性研究试验, 采用椭圆—抛物线双屈服面流变模型模拟试样在不同应力状态下的流变变形的发展, 并确定了相关流变参数的计算方法, 验证了该模型的合理性。研究结果表明该模型计算结果与试验实测尚能较好地相吻合; 能反映材料的剪胀、剪缩和流变特性, 而且参数简单, 可通过少量的试验获得, 具有较好的推广价值。

参考文献:

- [1] FITZPATRICK M D, LIGGINS T B, BARNETT R H W. Ten years surveillance of Cethana dam[C]// Proc 14th ICOLD Congress. Rio de Janeiro, 1982: 847 - 865.
- [2] 彭正光. 西北口面板堆石坝蓄水7年变形分析[J]. 水利水电科技, 1999, 30(9): 24 - 27. (PENG Zheng-guang. Deformation analysis for Xiebeikou rockfill dam during seven year's reservoir filling[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1999, 30(9): 24 - 27. (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): 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))

- [4] 沈珠江. 土石料的流变模型及其应用[J]. 水利水运科学, 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))
- [5] 沈珠江. 鲁布革心墙堆石坝变形的反馈分析[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(3): 1 - 13. (SHEN Zhu-jiang. Back analysis of deformation of Lubuge earth core rockfill dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16(3): 1 - 13. (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] 殷宗泽. 土工原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007: 402 - 404. (YIN Zong-ze. Soil mechanics[M]. Beijing: China Water Power Press, 2007: 402 - 404. (in Chinese))
- [8] 殷宗泽. 一个土体的双屈服面应力-应变模型[J]. 岩土力学, 1988, 10(4): 64 - 71. (YIN Zong-ze. A double yield surface model for soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 1988, 10(4): 64 - 71. (in Chinese))
- [9] 沈珠江, 左元明. 堆石料的流变特性试验研究[C]//第六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 material[C]// Proceedings of the Conference of the 6th Soil Mechanics and Foundation Engineering. Shanghai: Tongji University Press, 1991: 443 - 446. (in Chinese))
- [10] 汪明元, 丁红顺, 等. 高堆石坝粗粒料的流变特性研究[C]//中国水利水电工程发展与未来. 大连: 大连理工大学出版社, 2002: 381 - 385. (WANG Ming-yuan, DING Hong-shun, et al. Experimental research on creep behaviors of coarse stuff in high rockfill dam[C]// Future and Development of China Hydraulic Engineering. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2002: 381 - 385. (in Chinese))
- [11] 李国英, 米占宽, 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-kun, et al. Experimental studies on rheological behaviors for rockfills in concrete faced rockfill dam[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(11): 1712 - 1716. (in Chinese))