

# 基于工程类比法的面板堆石坝流变变形反馈

黄耀英<sup>①\*</sup>, 田斌<sup>①</sup>, 沈振中<sup>②</sup>

① 三峡大学水利与环境学院, 宜昌 443002;

② 河海大学水利水电学院, 南京 210024

\* E-mail: huangyaoying@sohu.com

收稿日期: 2014-07-03; 接受日期: 2014-11-20

国家自然科学基金(批准号: 51209124, 51179062)资助项目

**摘要** 针对进行堆石体流变分析时, 不同文献给出的轴向应变、体积应变和广义剪切应变的关系式存在差异, 本文假设体积流变和剪切流变变化规律不同, 由推导的三维流变速率计算公式导出了轴向应变、体积应变和广义剪切应变的合理关系式. 然后针对室内试验参数一般与堆石坝实际参数差异较大, 对于待建的面板堆石坝不能及时获得实测变形进行堆石坝参数反馈的问题, 本文采用工程类比法探讨面板堆石坝材料参数反馈, 即选取坝高、上下游坡比、谷形系数、堆石料岩性等相近的已建面板堆石坝的实测资料, 结合堆石坝流变数值计算, 进行待建面板堆石坝材料参数的反馈, 分析表明, 类比已建面板堆石坝的实测特征变形, 待建面板堆石坝的模量系数约为室内试验值的 0.7 倍左右; 考虑流变变形后, 待建面板堆石坝最大沉降为坝高的 0.667%~0.720%, 面板挠度为堆石体最大沉降的 0.252~0.272, 坝顶增量沉降随流变参数  $c$  值的减小而增大, 但量值较小, 运行 3a 后的坝顶增量沉降为 3.537 cm.

**关键词**面板堆石坝  
工程类比法  
流变分析  
参数反馈

## 1 引言

堆石坝实测资料表明, 堆石坝的变形大都在建成后若干年才逐渐沉降稳定, 因此, 一般选用随时间衰减的流变模型来反映堆石坝的流变特性. 依据堆石料的流变试验, 沈珠江和赵魁芝<sup>[1,2]</sup>提出了 3 参数指数流变模型; 程展林和丁红顺<sup>[3]</sup>提出了 9 参数幂函数流变模型. 当采用 Prandtl-Reuss 流动法则, 获得应力张量各分量的三维流变速率时, 不同文献<sup>[1,2,4,5]</sup>给出的剪切流变速率表达式存在差异, 黄耀英等人<sup>[6]</sup>以 3 参数指数流变模型为例, 采用关联流动法则, 同时假设塑性势函数为 Mises 屈服函数, 导出了理论严

谨的三维剪切流变速率计算式, 并通过将三维流变速率计算式退化为单轴流变速率计算式进行了合理性分析. 进一步分析表明, 不同文献<sup>[4,7~9]</sup>给出的常规三轴试验条件下, 堆石体轴向应变、体积应变和广义剪切应变的关系式也存在差异, 为此, 本文对堆石体轴向应变、体积应变和广义剪切应变合理的关系式进行分析.

由于现场条件复杂以及室内试验试件的尺寸效应等, 室内试验参数一般与堆石坝实际参数存在差异. 文献<sup>[4]</sup>基于水布垭面板堆石坝实测变形, 对南水双屈屈面模型中对坝体变形影响较大的参数  $K$  值,  $n$  值进行了反演分析, 反分析得到的参数  $K$ ,  $K_{ur}$  为试

**引用格式:** 黄耀英, 田斌, 沈振中. 基于工程类比法的面板堆石坝流变变形反馈. 中国科学: 技术科学, 2015, 45: 434-442  
Huang Y Y, Tian B, Shen Z Z. The feedback of rheological deformation of concrete face rockfill dam based on engineering analogy method (in Chinese).  
Sci Sin Tech, 2015, 45: 434-442, doi: 10.1360/N092014-00188

验参数的 0.7 倍, 而  $n$  值与试验参数差别不大. 文献 [10] 对鲁布革填筑期的参数进行了反演分析, 得出鲁布革堆石料模量参数为试验参数的 0.71 倍. 与此同时, 文献 [10] 还对株树桥面板堆石坝的参数进行了反演分析, 反演参数为试验参数的 0.65 倍. 由于需要长期加荷, 室内进行堆石料流变试验十分困难. 沈珠江和赵魁芝<sup>[1]</sup>建议堆石体的弹性或弹塑性模型参数宜事先通过室内试验测定, 而堆石体的流变参数则通过反馈分析确定. 目前, 基于实测变形进行堆石坝流变参数反馈陆续有一些报道<sup>[1,4,10,11]</sup>.

对于待建的面板堆石坝, 由于不能及时获得实测变形进行堆石坝参数反馈, 这导致待建面板堆石坝的施工速率、面板浇筑的时机以及蓄水的速率等难以合理确定, 针对这些问题, 本文采用工程类比的方法探讨面板堆石坝材料参数反馈, 即选取坝高、上下游坡比、谷形系数、堆石料岩性等相近的已建面板堆石坝的实测资料, 进行待建面板堆石坝材料参数的反馈, 以指导待建面板堆石坝的现场施工.

## 2 面板堆石坝流变分析

### 2.1 堆石坝的流变模型

由于有关堆石的流变变形的试验资料及实测资料还不多, 一般所选用模型不宜含较多的参数, 以免由于参数的确定误差而影响模型的应用. 因此, 本文选用 3 参数指数流变模型进行面板堆石坝流变分析.

沈珠江和赵魁芝<sup>[1]</sup>对西北口垫层料进行了流变试验, 并用具有衰减特性的指数曲线进行拟合

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_f(1 - e^{-ct}), \quad (1)$$

相应的应变速率为

$$d\varepsilon / dt = c\varepsilon_f e^{-ct}, \quad (2)$$

式中,  $\varepsilon_f$  相当于  $t \rightarrow \infty$  时的最终流变量,  $c$  相当于  $t=0$  时第 1 天流变量占  $\varepsilon_f$  的比值.

最终流变量  $\varepsilon_f$  与应力状态有关. 对于堆石料而言, 其体积流变和剪切流变有不同的规律. 沈珠江根据试验研究结果, 对体积与剪切流变分别建议了如下关系式<sup>[1]</sup>:

$$\varepsilon_{vf} = b \frac{\sigma_3}{p_a}, \quad (3)$$

$$\varepsilon_{sf} = d \frac{S}{1-S}, \quad (4)$$

式中,  $b$  和  $d$  为参数, 前者相当于  $\sigma_3=p_a$  时最终体积流变量,  $d$  为应力水平  $S=0.5$  时的最终剪切流变量, 破坏时  $S=1.0$ ,  $\varepsilon_{sf} \rightarrow \infty$ . 计算时如  $S \geq 1.0$ , 可限定  $S=0.95$ .

假定堆石料的体积流变与剪切流变都可用(2)式描述, 由(2)式得体积变形和剪切变形速率为

$$\dot{\varepsilon}_v = c\varepsilon_{vf} e^{-ct}, \quad (5)$$

$$\dot{\varepsilon}_s = c\varepsilon_{sf} e^{-ct}. \quad (6)$$

假设塑性势函数为 Mises 屈服函数, 采用 Prandtl-Reuss 流动法则, 应变张量的流变速率可以写为<sup>[6]</sup>

$$\begin{pmatrix} \dot{\varepsilon}_x \\ \dot{\varepsilon}_y \\ \dot{\varepsilon}_z \\ \dot{\gamma}_{xy} \\ \dot{\gamma}_{yz} \\ \dot{\gamma}_{zx} \end{pmatrix} = \frac{\dot{\varepsilon}_v}{3} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \frac{3\dot{\varepsilon}_s}{2q} \begin{pmatrix} s_x \\ s_y \\ s_z \\ 2\tau_{xy} \\ 2\tau_{yz} \\ 2\tau_{zx} \end{pmatrix}, \quad (7)$$

或

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = \frac{\dot{\varepsilon}_v}{3} \mathbf{I}' + \frac{3\dot{\varepsilon}_s}{2q} \mathbf{s}', \quad (8)$$

其中,  $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}$  为应变率张量,  $\mathbf{I}' = [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ ,  $\mathbf{s}'$  为  $[s_x \ s_y \ s_z \ 2\tau_{xy} \ 2\tau_{yz} \ 2\tau_{zx}]^T$ , 其与  $\mathbf{s}$  不同,  $\mathbf{s}$  为  $[s_x \ s_y \ s_z \ \tau_{xy} \ \tau_{yz} \ \tau_{zx}]^T$ ,  $q$  为广义剪应力,  $q = \sqrt{3J_2}$ ,  $J_2$  为应力偏量的第二不变量.

### 2.2 流变增量分析

面板堆石坝的施工是分层填筑, 蓄水过程是逐渐完成. 因此, 在面板堆石坝的不同施工及蓄水阶段, 不同单元的流变时间不同. 采用统一时间, 将使时间的记录过程复杂化, 为此, 对时间的计算技术进行改造, 采用相对时间<sup>[1]</sup>进行流变分析.

将(5)和(6)式相应改写为

$$\dot{\varepsilon}_v = c\varepsilon_{vf} \left( 1 - \frac{\varepsilon_{vt}}{\varepsilon_{vf}} \right), \quad (9)$$

$$\dot{\varepsilon}_s = c\varepsilon_{sf} \left( 1 - \frac{\varepsilon_{st}}{\varepsilon_{sf}} \right). \quad (10)$$

而  $\varepsilon_{vt}$  和  $\varepsilon_{st}$  为  $t$  时段已累积的体积和剪切变形, 可以用下式计算:

$$\varepsilon_{vt} = \sum \dot{\varepsilon}_v \Delta t, \quad (11)$$

$$\varepsilon_{st} = \sum \dot{\varepsilon}_s \Delta t. \quad (12)$$

相应 $\Delta t$ 时段内的体积和剪切流变应变增量为

$$\Delta \varepsilon_{vt} = \dot{\varepsilon}_v \Delta t, \quad (13)$$

$$\Delta \varepsilon_{st} = \dot{\varepsilon}_s \Delta t. \quad (14)$$

应变分量的流变增量可以写为<sup>[6]</sup>

$$\begin{Bmatrix} \Delta \varepsilon_x \\ \Delta \varepsilon_y \\ \Delta \varepsilon_z \\ \Delta \gamma_{xy} \\ \Delta \gamma_{yz} \\ \Delta \gamma_{zx} \end{Bmatrix} = \frac{\dot{\varepsilon}_v}{3} \Delta t \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} + \frac{3\dot{\varepsilon}_s}{2q} \Delta t \begin{Bmatrix} s_x \\ s_y \\ s_z \\ 2\tau_{xy} \\ 2\tau_{yz} \\ 2\tau_{zx} \end{Bmatrix}, \quad (15)$$

或

$$\Delta \varepsilon = \frac{\dot{\varepsilon}_v}{3} \Delta t I' + \frac{3\dot{\varepsilon}_s}{2q} \Delta t s'. \quad (16)$$

文献[6]通过将(16)式退化为单轴流变速率计算式, 说明了(16)式的合理性.

### 2.3 广义剪应变及轴向应变和体积应变关系

设常规三轴试验条件下, 应力状态  $\sigma_x = p_1 + q_1$ ,  $\sigma_y = \sigma_z = q_1$ ,  $\tau_{ij} = 0$ , 代入广义剪应力  $q$  和偏应力, 有

$$q = \sqrt{3J_2} = p_1, \quad s_x = \frac{2}{3} p_1, \quad s_y = s_z = -\frac{p_1}{3}. \quad (17)$$

将(17)代入(7)式, 有

$$\begin{Bmatrix} \dot{\varepsilon}_x \\ \dot{\varepsilon}_y \\ \dot{\varepsilon}_z \\ \dot{\gamma}_{xy} \\ \dot{\gamma}_{yz} \\ \dot{\gamma}_{zx} \end{Bmatrix} = \frac{\dot{\varepsilon}_v}{3} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \dot{\varepsilon}_s \\ -\dot{\varepsilon}_s/2 \\ -\dot{\varepsilon}_s/2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}. \quad (18)$$

当把  $x$  轴作为轴向时, 由(18)式可见,  $\dot{\varepsilon}_x$  即为轴向应变率  $\dot{\varepsilon}_1$ , 此时, 轴向应变率、体积应变率和广义剪切应变率之间的关系为

$$\dot{\varepsilon}_1 = \frac{\dot{\varepsilon}_v}{3} + \dot{\varepsilon}_s, \quad (19)$$

或

$$\varepsilon_s = \varepsilon_1 - \frac{\varepsilon_v}{3}. \quad (20)$$

(20)式与文献[4,7~9]给出的轴向应变、体积应变和广义剪切应变之间的关系式不一致.

### 2.4 堆石体流变分析步骤

采用有限单元法进行堆石体流变分析的计算步骤如下<sup>[1,5]</sup>.

Step1, 根据施工及蓄水过程, 采用中点增量法对相应荷载级先采用邓肯 E-B 模型计算瞬时变形, 得到本级末的单元应力及应力水平.

Step2, 根据施工进度安排, 确定该级加荷所经历的时间  $T_i$ , 将该段时间分为若干时段  $\Delta t$ .

Step3, 假定该  $\Delta t$  时段内应力不变, 按(3), (4)式计算对应的剪切流变  $\varepsilon_{sf}$  和体积流变  $\varepsilon_{vf}$ . 用(9)和(10)式计算应变速率, 用(11)和(12)式计算累积流变量, 用(16)式得到相应流变增量.

Step4, 按初应变法进行有限元分析, 得到相应的位移增量、应力增量, 累积得到总位移、总应力.

Step5, 对加荷时段时间进行判断, 如该加荷级时间结束, 则回到 Step1 循环, 否则回到 Step3 循环.

本文采用 Visual Fortran 编制了面板堆石坝流变分析程序.

## 3 实例分析

华中地区某待建面板堆石坝, 设计最大坝高 114, 顶宽 10, 坝顶长 328 m, 面板堆石坝上、下游坝坡均为 1:1.4, 上游设钢筋混凝土防渗面板, 厚度 30~68 cm, 其后分别为垫层、过渡层、新鲜岩石区(上游堆石区)、弱风化岩石区(下游堆石区), 堆石料以灰岩料为主. 由于室内试验参数一般与堆石坝实际参数存在差异, 这导致采用室内试验参数计算的该面板堆石坝最大沉降、面板挠度、坝顶沉降以及随时间的流变特性等具有不确定性, 为此, 本文采用工程类比法反馈该面板堆石坝的流变变形特性.

### 3.1 类比工程及变形监测特性

浙江省宁海县境内的白溪面板堆石坝<sup>[12]</sup>最大坝高 124.4, 坝顶长 398, 顶宽 10 m, 上、下游坝坡 1:1.4, 上游堆石料和下游水下堆石区采用新鲜至微风化含砾熔结凝灰岩. 由此可见, 两座面板堆石坝最大坝高, 坡比, 谷形系数以及采用的堆石料岩性等均较接近, 具有工程类比性, 为此, 基于白溪面板堆石坝实测变形进行华中地区待建面板堆石坝流变变形的反馈.

白溪面板堆石坝 1997 年开始施工准备, 2000 年

10月20日竣工, 2001年6月26日蓄水至正常高水位, 监测表明<sup>[12]</sup>, 白溪面板堆石坝竣工时最大沉降为77.8 cm, 蓄水至正常高水位时, 最大沉降为82.1 cm, 运行至2003年3月时, 最大沉降基本趋于稳定, 最大沉降为88.6 cm; 运行至2003年3月时, 面板不同高程的挠度为16.76~26.85 cm; 2002年1月开始对坝顶沉降进行监测, 至2003年3月坝顶沉降量为2.64~2.66 cm, 从沉降曲线看, 该堆石坝的沉降已渐趋稳定. 由白溪面板堆石坝的变形特征值可见, 该坝蓄水后的后期流变变形不大, 以瞬时变形为主, 因此, 本文依据类比工程的变形特征值, 先通过敏感性分析, 反馈该待建面板堆石坝的邓肯E-B参数, 然后通过敏感性分析, 反馈该待建面板堆石坝的流变参数.

### 3.2 三维非线性有限元计算模型

#### 1) 有限元计算模型

对华中地区该待建面板堆石坝建立三维整体有限元模型, 如图1, 坝体共剖分7817个单元, 8556个节点; 其中, 主堆石体单元4003个, 次堆石体单元1254个, 面板单元604个, 接触面单元和垫层单元1956个.

#### 2) 邓肯E-B模型参数

本文采用工程上使用较广泛的邓肯E-B模型分析该堆石体应力应变非线性关系. 该堆石坝以灰岩料为主, 室内试验的邓肯E-B参数见表1.

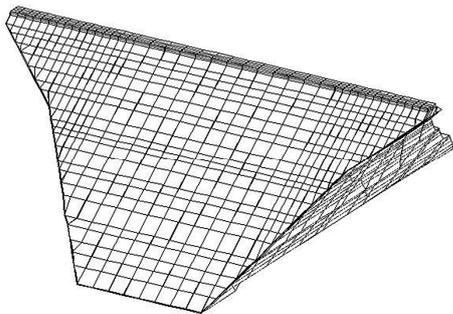


图1 面板堆石坝三维整体有限元模型(坝体部分)

表1 邓肯E-B模型计算参数表

填料	干密度 $\rho_s(\text{g}/\text{cm}^3)$	E-B模型参数						
		$\phi_0$	$\Delta\phi$	$R_f$	$K$	$n$	$K_b$	$m$
主堆石	2.15	52.1	9.6	0.85	1135	0.31	531	0.26
次堆石	2.1	50.9	9.3	0.83	1023	0.24	459	0.22
垫层料	2.17	49.8	6.6	0.83	1200	0.37	560	0.32
过渡料	2.15	48	7.1	0.83	1224	0.22	560	0.21

由于模量参数  $K$  和  $K_b$  对堆石体变形影响较大, 为此, 本文对不同模量参数  $K$  和  $K_b$  进行敏感性分析, 分别对比了室内试验参数的1.0倍、0.9倍、0.8倍、0.7倍下面板堆石坝的变形特性, 然后类比白溪面板堆石坝的变形特征值, 反馈该待建面板堆石坝的邓肯E-B参数特性.

#### 3) 3参数指数流变模型计算参数

本文采用沈珠江<sup>[1,2]</sup>和赵魁芝<sup>[1]</sup>提出的3参数( $b, c, d$ )指数流变模型进行堆石体的流变分析. 由于没有试验流变参数, 堆石料的流变参数参照文献[1,5]选用, 同时对  $b, c, d$  3个参数进行敏感性分析, 然后类比白溪面板堆石坝的流变变形特性, 反馈该待建面板堆石坝的流变参数特性, 见表2. 其中, 由于文献[1]基于实测变形反馈流变参数时, 三维流变应变增量计算式为<sup>[1]</sup>  $\Delta\epsilon = \frac{\dot{\epsilon}_v}{3} \Delta t + \frac{\dot{\epsilon}_s}{q} \Delta t$ , 对比(15)式可见, 剪应力对应的流变应变增量相差3倍, 因此相对文献[1,5]给出的流变参数值, 表2中的流变参数  $d$  除以了3.

#### 4) 计算加荷分级

根据该面板堆石坝设计施工关键线路并略做调整, 分级加荷次序示意图见表3和如图2.

### 3.3 堆石坝变形特性反馈

#### 1) 邓肯E-B模型参数反馈

采用中点增量法对比分析了模量参数  $K$  和  $K_b$  分别为室内试验参数的1.0倍、0.9倍、0.8倍、0.7倍下面板堆石坝的变形特性, 典型时刻堆石体变形和面板挠度见表4. 表中, 堆石体顺河向位移以向下游为正, 向上游为负; 堆石体垂直向位移以上抬为正, 下沉为负; 垂直面板向位移以向坝内为正, 向坝外为负.

由分析可见

(1) 随着模量系数的减小, 堆石体的变形逐渐增大, 面板挠度也逐渐增大. 当模量系数为室内试验值的0.7倍时, 堆石体竣工时最大沉降为0.706, 蓄水后

表 2 三参数流变模型计算参数表

	填料	$b$	$c$	$d$
case1	主堆石	0.0002	0.005	0.003/3
	次堆石	0.0005	0.007	0.004/3
case2	主堆石	0.0004	0.004	0.003/3
	次堆石	0.0006	0.005	0.004/3
case3	主堆石	0.0004	0.003	0.0012
	次堆石	0.0006	0.004	0.0016
case4	主堆石	0.0004	0.003	0.0015
	次堆石	0.0006	0.004	0.002
case5	主堆石	0.0004	0.0026	0.0015
	次堆石	0.0006	0.0036	0.002
case1~	垫层料	0.0003	0.005	0.004/3
case5	过渡料	0.0002	0.005	0.003/3

最大沉降为 0.727 m，最大面板挠度为 16.091 cm。

(2) Montanez Cartaxo 等人认为面板最大挠度和坝体施工期最大沉降  $S_{max}$  关系为  $\delta_n=0.25S_{max}^{[12]}$ 。由本文计算的面板挠度与施工期沉降的比值可见，面板挠度与施工期沉降的比值为 0.228 左右，而面板挠度与蓄水后沉降的比值为 0.221 左右，该比值略小于 Montanez Cartaxo 等人的结论，究其原因尚未考虑堆石体的流变效应，由此可见，本文计算结果是合理的。

(3) 类比白溪面板堆石坝变形特征值可见，当模量系数为室内试验值的 0.7 倍左右时，堆石体最大沉降与白溪面板堆石坝最大沉降在量级上较为接近，即该待建面板堆石坝模量系数与室内试验参数的比

表 3 分级施工进度表

次序	部位	时间(d)	次序	部位	时间(d)
1	坝体全断面填筑至高程 223.582 m	60	10	坝体全断面填筑至 292 m	40
2	坝体上游填筑至高程 238.728 m	40	11	坝体全断面填筑至 310 m	40
3	坝体上游填筑至高程 252.857 m	40	12	浇筑一期面板至高程 285 m	40
4	坝体上游填筑至高程 262 m	40	13	坝体全断面填筑至坝顶	40
5	坝体上游填筑至高程 277 m	40	14	浇筑二期面板	40
6	坝体下游填筑至高程 240 m	40	15	蓄水至水位 260 m	100
7	坝体下游填筑至高程 253.0786 m	40	16	蓄水至水位 290 m	100
8	坝体下游填筑至高程 262 m	40	17	蓄水至正常高水位 313 m	100
9	坝体下游填筑至高程 277 m	40	18	正常高水位 313 m 运行	890

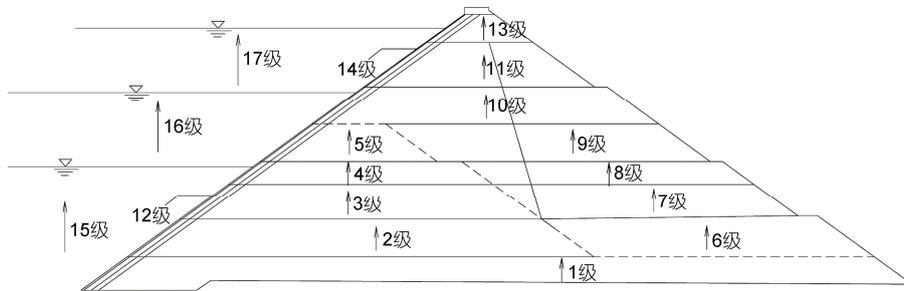


图 2 分级加荷示意图

表 4 不考虑流变时不同参数下面板堆石坝变形对比

模量系数/室内试验值	典型时刻	堆石坝变形			面板挠度(cm)
		向上游(m)	向下游(m)	垂直沉降(m)	
1.0	竣工	-0.155	0.179	-0.495	11.279
	蓄水	-0.085	0.202	-0.510	
0.9	竣工	-0.172	0.199	-0.549	12.539
	蓄水	-0.095	0.224	-0.566	
0.8	竣工	-0.193	0.224	-0.618	14.099
	蓄水	-0.107	0.252	-0.637	
0.7	竣工	-0.219	0.256	-0.706	16.091
	蓄水	-0.122	0.287	-0.727	

值大约在 0.7 左右, 这与文献[4]关于水布垭面板堆石坝的反馈结果 0.7, 以及文献[10]关于鲁布革、株树桥堆石坝的反馈结果 0.71 和 0.65 是一致的.

## 2) 流变参数反馈

假定堆石体邓肯 E-B 模型的模量系数为室内试验值的 0.7 倍, 采用 2.4 节的计算步骤, 对比分析了表 2 中流变参数下面板堆石坝的流变特性, 典型时刻堆石体变形和面板挠度见表 5, 其中, 坝顶沉降是蓄水至正常高水位后的增量沉降. case5 对应的流变参数计算的面板堆石坝在竣工、蓄水至正常高水位以及运行 3a 后堆石体的变形如图 3, 图中位移等值线单位为 m, 蓄水至正常高水位后, 坝顶沉降增量过程线如图 4.

由分析可见

1) 随着流变参数  $b$  的增大, 堆石体的最大沉降逐渐增大; 随着流变参数  $c$  的减小, 堆石体后期最大沉降增量以及后期坝顶沉降增量逐渐增大; 随着流变参数  $d$  的增大, 面板挠度略为减小; 流变参数对堆石体上游侧的影响较下游侧的影响大.

2) 考虑堆石体流变变形后, 蓄水 3a 后面板挠度与施工期沉降的比值为 0.248~0.275 左右, 蓄水 3a 后面板挠度与蓄水 3a 后沉降的比值为 0.240~0.260 左右, 该值较不考虑流变变形时的比值略大, 与 Montanez Cartaxo 等人的结论<sup>[12]</sup>较接近.

3) 类比白溪面板堆石坝最大沉降特征值可见, 当模量系数与室内试验值的比值为 0.7, 3 参数指数型流变模型的参数采用 case5 时, 该面板堆石坝竣工时堆石体最大沉降为 76 cm, 蓄水至正常高水位时堆石体最大沉降为 79.2 cm, 蓄水运行 3a 后堆石体最大沉降为 82.1 cm, 而白溪面板堆石坝竣工时最大实测沉降为 77.8 cm, 蓄水期最大实测沉降为 82.1 cm, 蓄水运行 2a 后实测最大沉降为 88.6 cm, 两者的最大沉降值及增量沉降较为接近, 但待建面板堆石坝蓄水运行后的沉降增量(2.9 cm)较白溪面板堆石坝蓄水运行后的沉降增量(6.5 cm)略小.

4) 类比白溪面板堆石坝面板挠度特征值可见, 当模量系数与室内试验值的比值为 0.7, 流变模型参数采用 case5 时, 该面板堆石坝蓄水至正常高水位时面板挠度为 19.103 cm, 蓄水运行 3a 后面板最大挠度为 20.661 cm, 而白溪面板堆石坝面板挠度为 16.76~26.85 cm, 两者的面板挠度较为接近.

5) 类比白溪面板堆石坝坝顶沉降特征值可见, 当模量系数与室内试验值的比值为 0.7, 流变模型参数采用 case5 时, 该面板堆石坝蓄水至正常高水位后, 坝顶增量沉降为 3.537 cm, 且渐趋稳定, 而白溪面板堆石坝 2001 年 6 月 26 号蓄水至正常高水位, 2002 年 1 月开始坝顶沉降监测, 2003 年 3 月监测坝顶沉降为

表 5 考虑流变时不同流变参数下面板堆石坝变形对比

流变参数	典型时刻	堆石坝变形			坝顶沉降(cm)	面板挠度(cm)
		向上游(m)	向下游(m)	垂直沉降(m)		
case1	竣工	-0.237	0.260	-0.755		
	蓄水	-0.137	0.294	-0.774		18.322
	运行 3a	-0.134	0.293	-0.780	-0.818	18.705
case2	竣工	-0.231	0.258	-0.760		
	蓄水	-0.126	0.294	-0.786		19.874
	运行 3a	-0.122	0.291	-0.802	-1.891	20.882
case3	竣工	-0.232	0.259	-0.759		
	蓄水	-0.130	0.296	-0.789		18.953
	运行 3a	-0.124	0.295	-0.812	-2.782	20.603
case4	竣工	-0.238	0.262	-0.763		
	蓄水	-0.136	0.300	-0.795		19.200
	运行 3a	-0.129	0.300	-0.820	-2.973	20.585
case5	竣工	-0.235	0.261	-0.760		
	蓄水	-0.134	0.299	-0.792		19.103
	运行 3a	-0.127	0.301	-0.821	-3.537	20.661

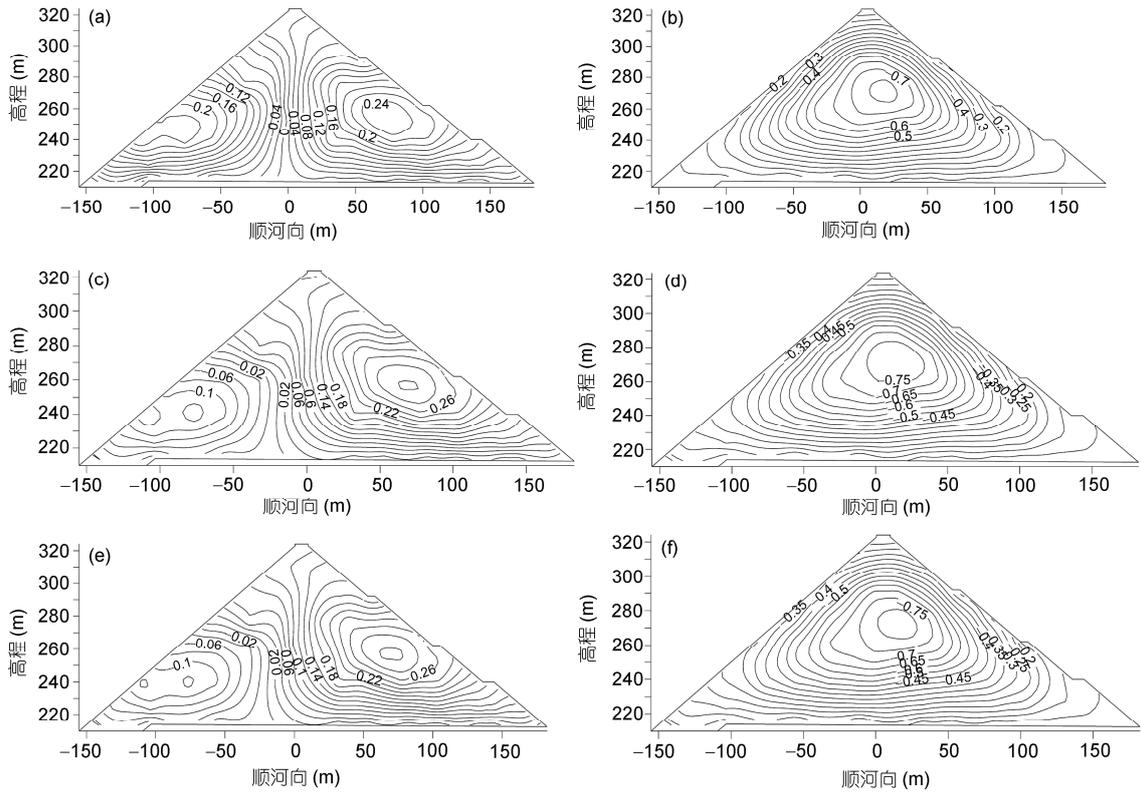


图 3 典型时刻堆石体变形

(a) 竣工时顺河向位移; (b) 竣工时垂直向位移; (c) 蓄水至正常高水位时顺河向位移; (d) 蓄水至正常高水位时垂直向位移; (e) 蓄水至正常高水位运行 3a 顺河向位移; (f) 蓄水至正常高水位运行 3a 垂直向位移

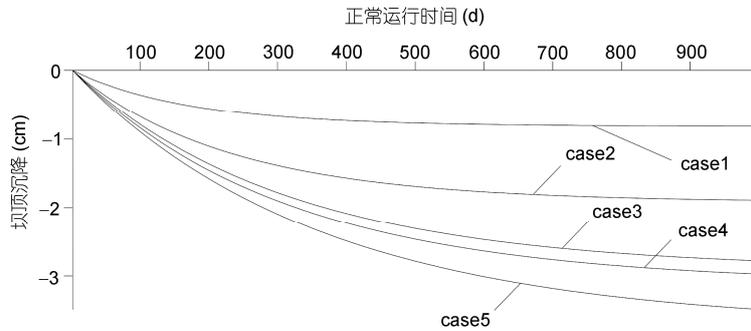


图 4 蓄水至正常高水位后坝顶增量沉降过程线

2.64 cm, 由图 4 可见, 待建面板堆石坝蓄水至正常高水位, 运行 180 d 时, 坝顶增量沉降为 1.445 cm, 即相对于运行 180 d 时的沉降而言, 该待建面板堆石坝坝顶增量沉降为 2.092 cm, 该值与白溪面板堆石坝坝顶增量沉降较为接近. 该计算结果与文献[12]认为相对于抛填堆石面板坝, 碾压堆石面板坝的坝顶沉降较

小, 收敛快的结论也是一致的.

6) 综上所述, 类比白溪面板堆石坝的变形特性, 本文探讨了华中地区待建面板堆石坝的邓肯 E-B 模型参数及 3 参数指数流变模型的参数反馈. 待建面板堆石坝竣工时的最大沉降为坝高的 0.667%, 蓄水至正常高水位时的最大沉降为坝高的 0.695%, 运行 3a

后最大沉降为坝高的 0.720%，运行 3a 后面板挠度分别为施工期和运行 3a 后最大沉降的 0.272 和 0.252，坝顶增量沉降与流变参数  $c$  值减小而增大，但量值较小，运行 3a 后的坝顶增量沉降为 3.537 cm。

#### 4 结论

针对堆石体进行流变分析时，不同文献给出的堆石体轴向应变、体积应变和广义剪切应变的关系式存在差异，以及针对室内试验参数一般与堆石坝实际参数差异较大，本文采用工程类比法探讨了面板堆石坝材料参数反馈，通过分析得到如下结论。

1) 假设体积流变和剪切流变变化规律不同，由推导的三维流变速率计算公式导出了轴向应变  $\varepsilon_1$ 、体积应变  $\varepsilon_v$  和广义剪切应变  $\varepsilon_s$  的关系式  $\varepsilon_s = \varepsilon_1 - \varepsilon_v/3$ 。

2) 类比白溪面板堆石坝变形特征值可见，当模量系数为室内试验值的 0.7 倍左右时，堆石体最大沉

降与白溪面板堆石坝最大沉降在量级上较为接近。

3) 随着流变参数  $b$  的增大，堆石体的最大沉降逐渐增大；随着流变参数  $c$  的减小，堆石体后期最大沉降增量以及后期坝顶沉降增量逐渐增大；随着流变参数  $d$  的增大，面板挠度略为减小；流变参数对堆石体上游侧的影响较下游侧的影响大。

4) 考虑堆石体流变变形后，蓄水 3a 后面板挠度与施工期沉降的比值为 0.248~0.275 左右，蓄水 3a 后面板挠度与蓄水 3a 后沉降的比值为 0.240~0.260 左右，该值较不考虑流变变形时的略大。

5) 类比白溪面板堆石坝的变形特性，待建面板堆石坝竣工时的最大沉降为坝高的 0.667%，蓄水至正常高水位时的最大沉降为坝高的 0.695%，运行 3a 后最大沉降为坝高的 0.720%，运行 3a 后面板挠度分别为施工期和运行 3a 后最大沉降的 0.272 和 0.252，坝顶增量沉降与流变参数  $c$  值减小而增大，但量值较小，运行 3a 后的坝顶增量沉降为 3.537 cm。

#### 参考文献

- 1 沈珠江, 赵魁芝. 堆石坝流变变形的反馈分析. 水利学报, 1998, 29: 1-6
- 2 沈珠江. 理论土力学. 北京: 中国水利水电出版社, 2000
- 3 程展林, 丁红顺. 堆石料蠕变特性试验研究. 岩土工程学报, 2004, 26: 473-476
- 4 杨启贵, 刘宁, 孙役, 等. 水布垭面板堆石坝筑坝技术. 北京: 中国水利水电出版社, 2010
- 5 郭兴文, 王德信, 蔡新, 等. 混凝土面板堆石坝流变分析. 水利学报, 1999, 30: 42-47
- 6 黄耀英, 沈振中, 郑宏, 等. 关于堆石料三维流变速率的一点注记. 岩土力学, 2014, 35: 1569-1571+1592
- 7 米占宽, 沈珠江, 李国英. 高面板堆石坝坝体流变性状. 水利水运工程学报, 2002, 2: 35-41
- 8 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. 岩土力学, 2004, 25: 1712-1716
- 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. 岩石力学与工程学报, 2006, 25: 1043-1048
- 10 《水布垭面板堆石坝前期关键技术研究》编写委员会. 水布垭面板堆石坝前期关键技术研究. 北京: 中国水利水电出版社, 2005
- 11 周伟, 徐干, 常晓林, 等. 堆石体流变本构模型参数的智能反演. 水利学报, 2007, 38: 389-394
- 12 曹克明, 汪易森, 徐建军, 等. 混凝土面板堆石坝. 北京: 中国水利水电出版社, 2008

## The feedback of rheological deformation of concrete face rockfill dam based on engineering analogy method

HUANG YaoYing<sup>1</sup>, TIAN Bin<sup>1</sup> & SHEN ZhenZhong<sup>2</sup>

<sup>1</sup> College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

<sup>2</sup> College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China

In view of relationship for axial strain, volumetric strain and the generalized shear strain are different in different documents

when the rheology deformation of rockfill dam is analyzed. Volume rheology and shear rheology are assumed different, three-dimensional rheology rate of rockfill material is deduced and the reasonable relationship for axial strain, volumetric strain and the generalized shear strain is also deduced. Since the difference between indoor test parameters and rockfill dam's actual parameters is bigger, the measured deformation for the rockfill dam to be built can't timely obtain and the rockfill dam's actual parameters also can't timely feedback. The engineering analogical method is presented for the feedback of rockfill dam's actual parameters. The measured deformation for already built rockfill dam, with similar dam height, upstream and downstream slope rate, valley shape factor and rock behaviour of rockfill material, is selected, and the parameters for rockfill dam to be built is feedback with the rheological numerical calculation. Example analysis shows that, analogy the measured deformation for the already built rockfill dam, the specific value between actual modulus factor of rockfill dam to be built and indoor test modulus factor is about 0.7; the specific value between the largest settlement and the dam height is 0.667%–0.720% when considering rheological deformation; the specific value between concrete face's deflection and the largest settlement is 0.252–0.272, and the incremental settlement of dam crest increases when the rheological parameter  $c$  decreases, but the value is small, the incremental settlement of dam crest is 3.537 cm after running 3 years.

**concrete face rockfill dam, engineering analogy method, rheological analysis, feedback**

doi: 10.1360/N092014-00188