

西流水面板堆石坝三维流变分析

郭兴文¹, 吕生玺², 王德信¹, 董红健²

(1. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 甘肃省水利水电勘测设计研究院, 甘肃 兰州 730000)

摘要 采用考虑堆石料流变性的分析模型, 对西流水混凝土面板堆石坝进行了三维非线性有限元计算, 得到了考虑堆石料流变性后的坝体、面板及接缝的位移和应力, 同时对比分析了堆石料流变性对混凝土面板堆石坝结构性态的影响. 结果表明, 虽然堆石料流变性对大坝工作性态有一定影响, 但对西流水面板坝而言, 在考虑堆石料流变性影响后, 其设计方案在技术上仍是可行的.

关键词 西流水水电站; 面板堆石坝; 流变; 面板应力; 接缝位移; 非线性分析

中图分类号 TV641 **文献标识码** A **文章编号** 1000-198X(2004)02-0159-05

西流水水电站地处甘肃省肃南裕固族自治县境内的黑河大峡谷西流水至榆木沟河段. 电站采用混凝土面板堆石坝方案, 面板堆石坝设计坝顶高程 1924.5 m, 建基高程 1778.0 m, 最大坝高 146.5 m, 坝顶长度 188.0 m, 平面布置如图 1 所示. 坝址区河道呈 Ω 形弯曲, 河谷两岸陡峻, 边坡 $50^{\circ} \sim 80^{\circ}$. 右岸山梁向左岸方向凸出约 420 m, 使得右岸部分坝体跨越右岸山梁, 对坝体结构受力和变形会带来不利影响, 同时堆石料的流变性引起的后期变形也会大坝结构产生影响. 为提供堆石坝体、面板及接缝的位移和应力值, 为论证面板堆石坝方案在技术上的可行性, 本文通过考虑堆石料流变性的三维非线性有限元模型对西流水面板堆石坝进行流变分析.

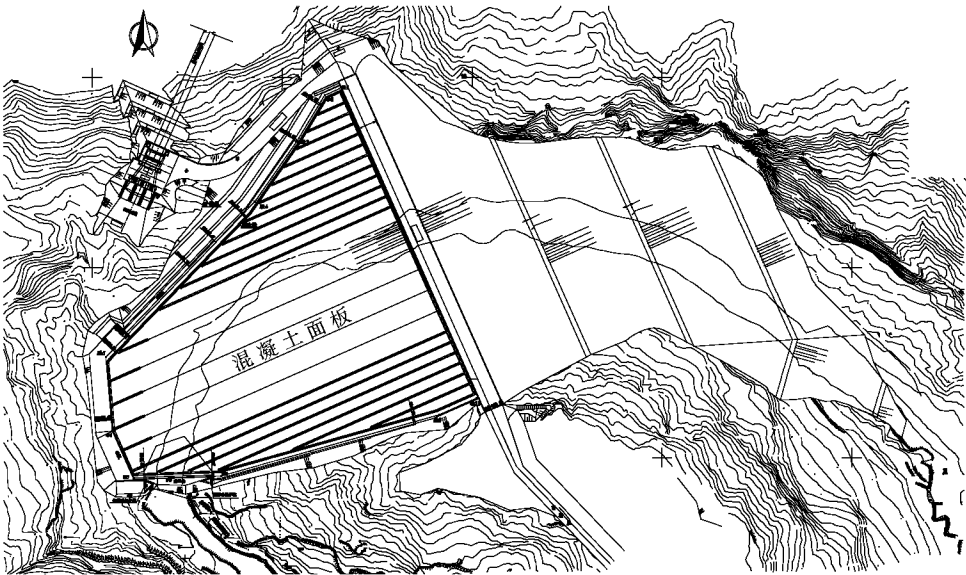


图 1 西流水混凝土堆石坝平面布置
Fig.1 Layout of Xiliushui CFRD

1 三维流变非线性有限元计算

1.1 材料本构模型

1.1.1 堆石料本构模型

堆石料任意时刻的变形, 由瞬时变形与随时间变化的变形组成. 对于瞬时变形, 可采用能较好地反映堆

石料瞬时变形特性的非线性邓肯 E-B 模型或弹塑性双屈服面模型进行模拟.由于目前对堆石料的流变特性研究较少,因此根据文献[1,2]直接采用经验模型,即用如下指数型曲线表示堆石的流变特征.

$$\epsilon(t) = \epsilon_f(1 - e^{-ct})$$

(1)

式中: ϵ_f —— $t \rightarrow \infty$ 时的最终流变量,与应力状态有关; c —— $t = 0$ 时第 1 天流变量占 ϵ_f 的比值.

对堆石材料而言,其体积流变与剪切流变有不同的规律.根据研究结果[1,2],体积与剪切流变计算采用关系式

$$\epsilon_{vf} = b\left(\frac{\sigma_3}{p_a}\right)^{n_1} \quad \epsilon_{sf} = d \frac{S_l}{1 - S_l}$$

(2)

式中: b —— $\sigma_3 = 1 p_a$ (大气压)时的最终体积流变量; n_1 ——反映体积流变随围压 σ_3 变化的幂次; d ——应力水平 $S_l = 0.5$ 时的最终剪切流变量,破坏时 $S_l = 1.0$, $\epsilon_{sf} \rightarrow \infty$.计算时,如 $S_l \geq 1.0$,可限定 $S_l = 0.95$.

假定堆石料的体积流变与剪切流变都可用式(1)来描述,且具有相同的衰减规律,则体积变形和剪切变形的速率分别为

$$\dot{\epsilon}_v = c\epsilon_{vf}e^{-ct} \quad \dot{\epsilon}_s = c\epsilon_{sf}e^{-ct}$$

(3)

计算时,体积流变、剪切流变与直角应力应变之间的关系用 Prandtl-Reuss 流动法则进行转换,具体计算步骤参见文献[1].

1.1.2 接触面计算模型

面板堆石坝中混凝土面板与垫层料的刚度差异较大,在荷载作用下,此接触面会发生滑移.为反映两结构材料间的相互作用,有限元分析时用无厚度接触面 Goodman 单元进行模拟[1].

1.1.3 接缝连接单元数学模型

混凝土面板与面板之间及面板与趾板之间接缝中设有各种止水材料,将其相互连接起来以防止漏水,并允许相对变形.目前主要依据试验结果,采用无厚度连接单元对接缝进行模拟计算.对于建议的止水系统,取文献[1]的结果.

1.1.4 混凝土材料

采用线弹性模型,不考虑混凝土本身的流变性.

1.2 计算参数

坝料计算参数见表 1.

表 1 堆石料 E-B 模型参数和流变模型参数

Table 1 Parameters of E-B model and rheological model of rockfill materials

坝料类型	$\rho/(kg \cdot m^{-3})$	$\varphi/(^{\circ})$	K	n	R_f	k_b	m	$\Delta\varphi/(^{\circ})$	b	c	d	n_1
垫层料	2320	53.3	1090.0	0.49	0.90	470.0	0.14	12.3	0.0002	0.005	0.002	0.5
过渡料	2230	46.5	920.0	0.22	0.93	275.0	0.04	5.7	0.0003	0.005	0.002	0.5
主堆石	2200	48.2	1020.0	0.34	0.77	260.0	0.18	6.8	0.0003	0.005	0.003	0.5
下游堆石	2200	48.2	1020.0	0.34	0.77	260.0	0.18	6.8	0.0003	0.005	0.003	0.5

接触面采用的参数为 $K_1 = 4\,800$, $n = 0.56$, $R'_f = 0.74$, $\delta = 36.6^{\circ}$.混凝土材料包括趾板、面板、挡墙等,参数为:密度 $\rho = 2\,450\text{ kg/m}^3$,弹性模量 $E = 17\text{ GPa}$,泊松比 $\nu = 0.167$.

1.3 单元剖分

三维有限元计算分析范围取坝基岩体为固定边界,根据面板分缝情况,沿坝轴方向取 21 个剖面,坝高程方向分为 13 层.面板网格剖分图及 +120 剖面的网格剖分如图 2、图 3 所示.坝体选用 6 面体等参单元和 5 面体等参单元,面板与垫层之间设置无厚度接触单元,面板伸缩缝间设竖缝连接单元,在面板与趾板间设周边缝连接单元,共剖分出 2503 个单元、3064 个结点.

1.4 计算方案与计算加荷分级

本次计算考虑施工期及蓄水后堆石的流变性,时间分配如表 2 所示.

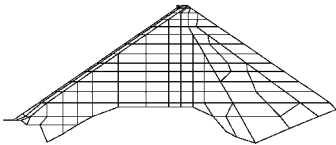


图 2 +120 剖面网格剖分

Fig.2 Mech of +120 section

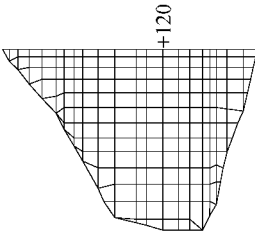


图 3 面板网格剖分

Fig.2 Mech of face slab

表 2 分级施工及蓄水时间进度

Table 2 Time table of dam construction and water filling

次序	部位	时间/d	次序	部位	时间/d
1	坝体全剖面填筑至高程 1819.2 m	120	9	挡水至高程 1852.0 m	60
2	坝体全剖面填筑至高程 1832.0 m	60	10	挡水至高程 1870.0 m	30
3	坝体全剖面填筑至高程 1852.0 m	60	11	坝体全剖面填筑至高程 1892.0 m	60
4	浇筑一期面板至高程 1852.0 m	60	12	坝体全剖面填筑至高程 1909.0 m	60
5	挡水至高程 1852.0 m	30	13	坝体全剖面填筑至高程 1921.5 m	60
6	退水	10	14	三期面板高程 1921.5 m	60
7	坝体全剖面填筑至高程 1872.0 m	60	15	顶部挡墙及坝后堆石	60
8	二期面板至高程 1872.0 m	60	16	蓄水至高程 1920.0 m	60

注：正常高水位后再计算至位移基本稳定。

2 流变计算结果分析

2.1 坝体位移

限于篇幅, 本文只介绍考虑流变后的代表性结果. 图 4 为 +120 剖面的上下游方向水平位移及沉降位移等值线. 与不考虑堆石流变性相比, 考虑堆石流变后堆石体上下游方向的位移和竖向位移均有所增大, 最大值位置与不考虑堆石流变时基本一致. +120 剖面下游区域向下游最大位移为 38.3 cm, 与不考虑堆石流变时的水平向最大位移相比, 增大了 16.75 cm, 水平向位移增加量约为坝高的 0.1%; +120 剖面最大竖向位移为 155.8 cm, 与不考虑堆石流变时的竖向位移相比, 增加了 40.5 cm, 竖向位移增加量约为坝高的 0.27%, 竖向位移的增量大于水平位移增量.

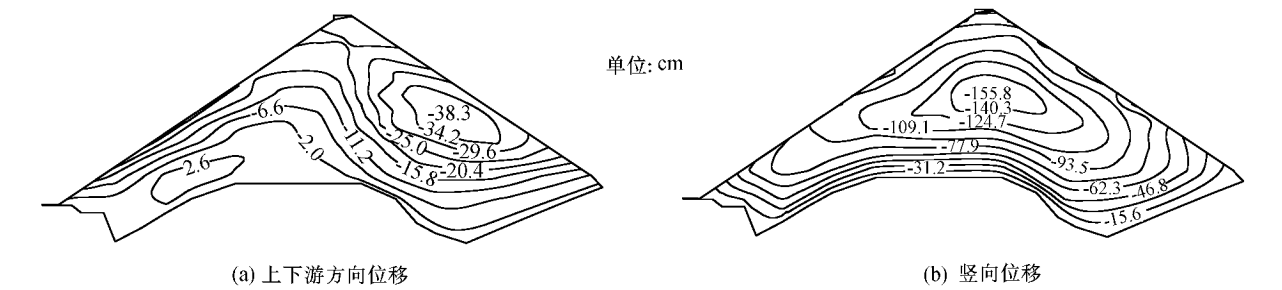


图 4 考虑堆石流变 +120 剖面位移等值线

Fig.4 Displacement contours of +120 section obtained with rheological model

考虑堆石流变后, 整个堆石体中的竖向位移最大值为 173.8 cm, 约为坝高的 1.19%, 发生在 +100 剖面坝轴线附近约 1/2 坝高处.

2.2 面板位移、应力

图 5、图 6 为面板位移与应力等值线. 为了对比分析面板应力的变化, 图 7 给出了不考虑堆石流变性得到的面板应力分布.

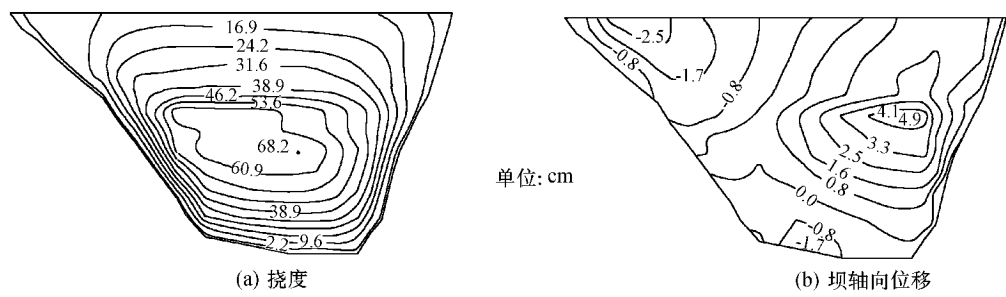


图 5 考虑堆石流变面板位移等值线

Fig.5 Displacement contours of face slab obtained with rheological model

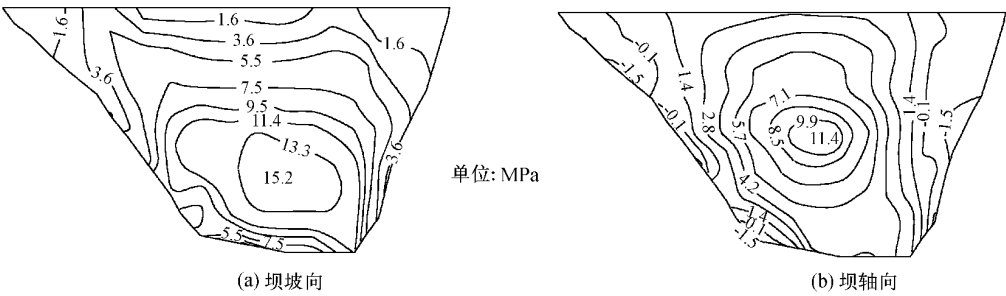


图6 考虑堆石流变面板应力等值线

Fig.6 Stress contours of face slab obtained with rheological model

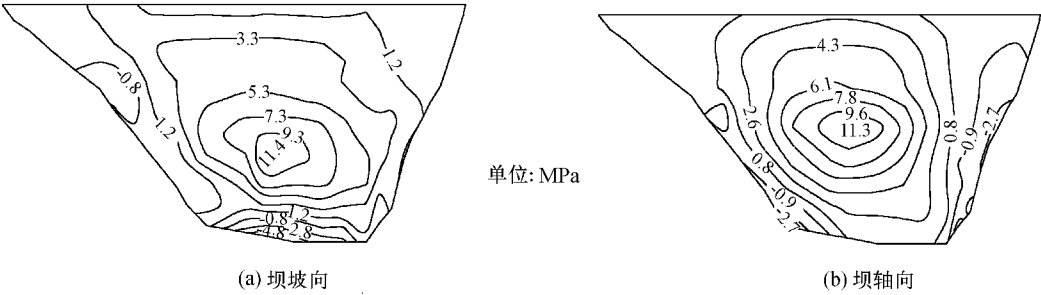


图7 不考虑堆石流变面板应力等值线

Fig.7 Stress contours of face slab obtained with E-B model

面板坝轴向位移向右岸的最大值为 2.7 cm ,向左岸的最大值为 4.9 cm ,与不考虑堆石流变性时相比 ,增加了 1.1 cm .面板挠度的最大值为 68.2 cm ,与不考虑堆石流变性相比 ,增加了 4.6 cm .面板挠度的增加主要是由附加沉降引起的 .考虑堆石的流变性 ,面板位移大值区仍位于河谷部位 ,但其分布范围向上部有一定的扩展 .

堆石流变性对面板应力的影响具有如下特点 (a)堆石流变性使面板坡向压应力增大 ,拉应力减小 .就西流水面板坝顺坡向应力而言 ,在堆石流变基本稳定时 ,面板顺坡向最大压应力为 15.2 MPa ,与不考虑堆石流变性的计算结果相比 ,增加了 3.8 MPa ,面板顺坡向最大拉应力为 0.3 MPa ,与不考虑堆石流变性的计算结果相比 ,减小了 4.7 MPa .同时顺坡向拉应力分布区域变得非常小 .(b)堆石流变性使河谷部位面板中部轴向压应力增大 ,同时使两岸拉应力也有所变化 .总体上表现为左岸面板坝轴向拉应力有所增加 ,右岸附近面板坝轴向拉应力有所减小 .面板中部轴向最大压应力为 11.4 MPa ,与不考虑堆石流变性的计算结果相比 ,增加了 0.1 MPa ,面板坝轴最大拉应力为 2.0 MPa ,与不考虑堆石流变性的计算结果相比 ,减小了 0.7 MPa .对面板坝轴向应力的这种变化可解释为 :由于库水压力作用以及河谷形状的影响 ,堆石体在坝轴向的附加变形基本上是向河谷方向的 ,这种位移必然使得河谷部位面板在坝轴向产生挤压 .而两岸部位的面板变形 ,一方面受岸坡地形的影响 ,另一方面受面板下堆石变形的影响 ,由于西流水面板堆石坝河槽横穿面板 ,左岸位于深河槽 ,右岸位于山梁位置 ,正是由于河槽部位堆石的沉降位移对面板坝轴向应力的影响超过了由于坝轴向位移造成的影响 ,因此面板总体上表现为左岸面板拉应力增加、右岸面板拉应力减小的特点 .这一点与常规河道中面板堆石坝的流变特点有所不同^[3] .

2.3 接缝位移

面板缝 3 种位移分布规律与不考虑堆石流变时大致相同 ,张压位移的分布规律基本一致 ,总的趋势是面板缝在河谷中部处于受压状态 ,在两岸处于受拉状态 .考虑堆石流变性后 ,最大张拉位移为 25.4 mm ,位于右岸 + 160 断面中下部 .考虑堆石的流变性 ,堆石坝轴向位移总体上向河谷发生挤压变形 ,从而带动面板向河谷移动 ,使周边缝的错动位移进一步加大 .特别是考虑施工期堆石的流变性后 ,这种趋势对于一期面板周边缝的影响显著增加 ,最大错动位移为 37.4 mm .堆石的流变性使沉降位移进一步增加 ,但其变化不如错动位移明显 .这可能与面板在端部受到约束有关 .堆石的流变性将使周边缝的张拉位移进一步减小 ,并转为受压状态 .

3 结论和建议

- a. 大坝堆石体位移与应力等值线分布符合一般规律,考虑堆石流变性时位移有一定幅度的增加,在预留超高时应适当加以考虑.
- b. 混凝土面板变形规律较好,面板位移数值都在常规范围内.堆石的流变性使面板坝顺坡向的拉应力减小,改善了面板的受力状态.
- c. 接缝位移规律比较好,考虑堆石流变后接缝位移值有所增加,但最大位移值处于可控范围内.
- d. 西流水面板堆石坝设计在技术上是可行的.

参考文献：

[1] 郭兴文.混凝土面板堆石坝数值分析与接缝止水试验研究[D].南京 河海大学 ,1999 .
[2] 沈珠江,赵魁芝.堆石坝流变变形的反馈分析[J].水利学报 ,1998 (1):1—6 .
[3] 郭兴文,孙林松,于玉莽.堆石流变性对水布垭面板堆石坝性状影响的研究[J].河海大学学报(自然科学版),2001 ,29(3): 88—91 .

3-D rheological analysis of Xiliushui Concrete Face Rockfill Dam

GUO Xing-wen¹, LU Sheng-xi², WANG De-xin¹, DONG Hong-jian¹

(1. College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China ;

2. Gansu Investigation, Design, and Research Institute of Water Resources and Hydropower, Lanzhou 730000, China)

Abstract :The 3-D nonlinear finite element method with consideration of the rheology of rockfill materials is used for simulation of the construction and water storage processes of the Xiliushui Concrete Face Rockfill Dam. The stress and deformation of the dam body, the face slab, and all kinds of joints are obtained. A comparative analysis shows that the rheology of rockfill materials has some influences on the structural performance of the dam, but the design of the Xiliushui dam is still feasible in technology when the rheology of rockfill materials is taken into account.

Key words :Xiliushui Hydropower Station ; concrete face rockfill dam ; rheology ; face slab stress ; joint displacement ; nonlinear analysis