

文章编号: 1000-7598-(2006)08-1389-04

高混凝土面板堆石坝流变的三维有限元数值模拟

周 伟, 常晓林

(武汉大学 水利水电学院 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072)

摘 要: 采用一种新的能模拟高围压条件的堆石料幂函数流变本构模型, 对水布垭面板堆石坝进行了考虑堆石料流变特性的应力-应变仿真分析。结果表明, 考虑堆石料流变特性后的坝体变形有明显的增加, 坝体应力有所松弛。堆石体的流变特性使得面板的挠度有所增加, 面板顺坡向和坝轴向拉应力极值有所增大。对于分期浇筑面板、分期蓄水的高混凝土面板堆石坝, 选用合适的流变本构模型正确地模拟堆石体的流变特性, 其结果可以为大坝填筑进度及面板分期浇筑时间的确定提供参考, 对于正确地预测大坝的应力变形也具有重要意义。

关 键 词: 面板堆石坝; 流变; 有限元; 数值模拟

中图分类号: TV 641

文献标识码: A

Three dimension FEM numerical simulating of the rockfill creep of high concrete face rockfill dam

ZHOU Wei, CHANG Xiao-lin

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Based on a new kind of rockfill power function creep constitutive model which can simulate high confining pressure state of rockfill, the stress and deformation simulation analysis with consideration of rockfill creep are performed for Shuibuya concrete face rockfill dam (CFRD). The computation results show that the deformation of dam shows evident increment and stress of dam relax a little. The creep of the rockfill result to some increase of the normal direction deformation and stress of the concrete face. The reasonable creep model is adopted to simulate deformation of rockfill correctly, the results of which can offer some references for the construction process and the decision of the constructing time. It has also very important significance for that the stress and deformation of CFRD can be forecasted according to simulation analysis results.

Key words: concrete face rockfill dam; creep; FEM; numerical simulating

1 引 言

混凝土面板堆石坝由于其具有可充分利用当地材料、适应性广、施工简单、工期较短、造价较低等优点, 因而在国内外得到广泛应用。据不完全统计, 国外已建成坝高在 100 m 以上的混凝土面板堆石坝有 27 座, 其中最大坝高为墨西哥的阿瓜密尔巴坝, 高 187 m。我国混凝土面板堆石坝起步于 20 世纪 80 年代中期, 据不完全统计, 我国已建成 27 座。西北口坝高为 95 m; 已建的最高面板坝——天生桥一级水电站混凝土面板堆石坝, 坝高达 178 m; 在建的洪家渡面板坝坝高 182.3 m; 在建的最高面板坝——水布垭面板坝, 坝高达 233 m, 在工程规模

和技术水平上都位居世界前列。面板的变形主要取决于堆石体变形, 如果堆石体变形过大, 就会使面板产生裂缝, 从而影响其防渗性能, 甚至危及坝体的稳定。

堆石体的变形, 除通常的瞬时变形外, 还存在着体积流变和剪切流变。对于低坝, 后两种变形占总变形的比例较小, 可以忽略不计; 然而对于高面板堆石坝 (100 m 以上), 特别是 200 m 以上的高面板堆石坝, 其影响不容忽视, 主要表现在由于堆石体流变变形的存在, 使后期变形量较大, 对面板及趾板等防渗体结构造成很大的安全隐患, 且随着坝高的不断增高, 其影响程度越来越大。在已建成的混凝土面板堆石坝的安全监测结果中, 堆石体的流

收稿日期: 2004-11-11

修改稿收到日期: 2005-01-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 50509019)。

作者简介: 周伟, 男, 1975年生, 博士, 讲师, 主要从事水工高坝结构数值仿真计算方面的研究。E-mail: zw_mxx@163.com

变现象都比较明显。例如：罗马尼亚里苏(Lesu)面板堆石坝，坝高 60 m，1972 年建成。该水库运行 2 年后，由于左岸坝肩面板与趾板间产生显著位移，导致周边缝止水破坏，漏水逐渐加大。满库运行 4 年后，靠右岸坝肩面板继续产生了一系列裂缝，后经多方论证，认为堆石体的长期流变引起堆石体沿岸坡的运动是其主要原因^[1]。我国已竣工的天生桥坝面板坝，由于面板混凝土浇筑离堆石填筑完成时间太短，堆石的初期沉降速度很快，堆石的流变变形量大是天生桥坝面板脱空的主要原因^[2]。而天生桥坝实际观测资料表明，施工期雨水渗透到坝体内部，增加了堆石体的破碎率，从而导致了流变变形的加剧。因此，从理论和实践上计入时间效应的坝体应力、位移的分析论证，以便在设计高面板堆石坝时能正确合理地计入堆石体流变变形的影响，并采取相应的施工措施，最大限度地减小堆石体的变形对面板应力、变形的影响，是保证大坝安全的关键问题。

2 堆石体流变本构模型

国内最早（1991 年）的堆石流变试验是沈珠江等人^[3]在应力控制式三轴仪上进行的。试样为西北口垫层料，试样直径为 10 cm，围压控制为 100 kPa 和 200 kPa。由于加载设备能力的限制，无法进行更大围压的试验。经过比较，文献[4]建议在流变分析中，采用指数型衰减模型，同时提出了堆石体的三参数流变本构模型。该流变模型认为，最终体积流变量与围压成正比，最终剪切流变量与应力水平呈双曲线关系，并根据 4 种典型堆石料填筑的堆石坝原型观测资料，反馈分析了几种不同类型土石料的流变模型参数。

三参数指数型流变本构模型通过拟合流变试验曲线而得到，具有一定的实际物理意义，且模型简单，易于进行数值分析。然而，对于最终流变量的计算，后来的几乎所有不同堆石料的试验成果整理方法以及数值分析（见文献[5~7]）始终停留在西北口垫层料流变试验的低围压试验成果上，仅仅对高围压下的体积流变表达式的围压指数项进行了局部修正。

总之，由于堆石体材料复杂的流变性质，在数值分析时宜根据具体堆石体流变变形性状进行具体分析，如果不管什么应力状态，对最终流变量的计算统统沿用低围压下的计算模型，这是不合适的。正因为如此，本文在进行水布垭高面板坝的流变分

析时，选用了一种能模拟高围压的幂函数流变模型^[8]来进行分析计算。此幂函数流变模型是在综合分析多组平行流变室内试验数据的基础上提出来的，试样采用水布垭大坝主堆石料茅口组灰岩河次堆石料栖霞组灰岩，直径为 300 mm，高度为 600 mm，最大围压为 3.0 MPa，最大竖向荷载为 1 500 kN。试验中采用的围压有 0.9 MPa，1.8 MPa 和 2.7 MPa，对应于每级围压分别采用 0.2，0.4，0.6，0.8 四级轴向应力水平。具体的流变试验介绍以及流变模型表达式见文献[8]。

3 水布垭面板坝应力-变形分析^[9]

本次计算完全模拟了水布垭整个坝体以及坝基，沿坝轴线方向共选择了 26 个剖面进行三维有限元网格划分，剖分时主要采用 8 节点 6 面体单元，为适应边界过渡，采用了部分棱柱体单元。其中堆石体单元 18 408 个，节点 18 645 个，地基单元 6 631 个，节点 6 724 个。大坝的三维网格见图 1 和图 2。

水布垭堆石体静力分析的沈珠江双曲服面弹塑性模型参数，采用长江委设计院根据试验结果建议的参数（见表 1）。幂函数流变模型参数见文献[8]。表 2 和表 3 分别给出了考虑流变效应和不考虑流变效应的堆石体和面板的应力、位移的极值，图 3~5 给出了大坝最大剖面的位移、应力等值线图。

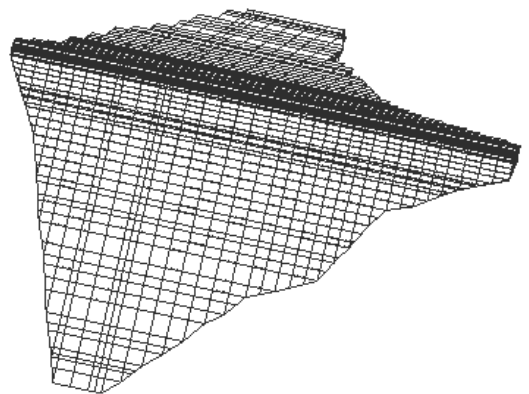


图 1 水布垭面板堆石坝三维有限元网格

Fig.1 Three dimension FEM grid of Shuibuya CFRD

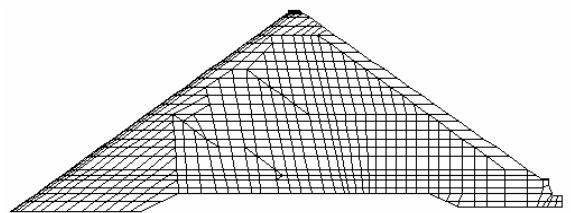


图 2 水布垭面板堆石坝最大剖面有限元网格

Fig.2 The biggest section FEM grid of Shuibuya CFRD

表 1 沈珠江双屈服面弹塑性模型参数
Table 1 Sheng Zhu-jiang double yield face elastic-plastic model parameters

材料	干密度 ρ_0 $/\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	φ_0 $/(^{\circ})$	$\Delta\varphi$ $/(^{\circ})$	K	n	R_f	K_b	m	C_d	n_d	R_d
主堆石	2.15	52.0	8.5	1 100	0.35	600	600	0.10	0.003	0.837	0.716
次堆石	2.15	50.0	8.4	850	0.25	400	400	0.05	0.003	0.978	0.748
过渡料	2.18	54.0	8.6	1 000	0.40	450	450	0.15	0.001	1.107	0.690
垫层料	2.20	56.0	10.5	1 200	0.45	750	750	0.20	0.001	1.145	0.769

表 2 坝体应力、位移最大值
Table 2 Stress and deformation maximum value of dam

坝体计算模型	不考虑流变		考虑流变		
	竣工期	蓄水期	竣工期	蓄水期	基本稳定期
向下游位移/m	0.364	0.517	0.415	0.589	0.686
竖向位移/m	-1.31	-1.52	-1.49	-1.73	-2.09
第 3 主应力/MPa	3.83	4.25	3.80	4.21	4.17
第 1 主应力/MPa	1.68	1.89	1.65	1.86	1.81

注：表中位移符号指向下游为“+”，上游为“-”；应力符号以压为“+”，下同。

表 3 面板应力、位移最大值
Table 3 Stress and deformation maximum value of face

坝体计算模型		不考虑流变		考虑流变	
		竣工期	蓄水期	竣工期	蓄水期
坝轴向位移	向右岸	0.087	0.200	0.100	0.229
/m	向左岸	0.079	0.172	0.904	0.196
法向位移/m	向坝内	0.236	0.621	0.264	0.703
顺坡向正	拉应力	-1.40	-2.51	-1.78	-2.84
应力/MPa	压应力	16.74	18.47	18.29	20.68
坝轴向正	拉应力	-0.67	-2.56	-0.89	-2.94
应力/MPa	压应力	4.01	5.23	6.43	6.14

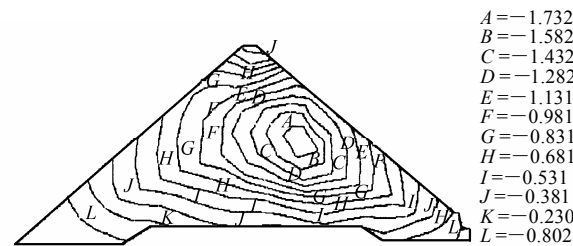


图 3 考虑流变蓄水期最大剖面的铅直位移等值线(单位: m)
Fig.3 The vertical displacement contour of biggest section during operation period with consideration of rockfill creep (unit: m)

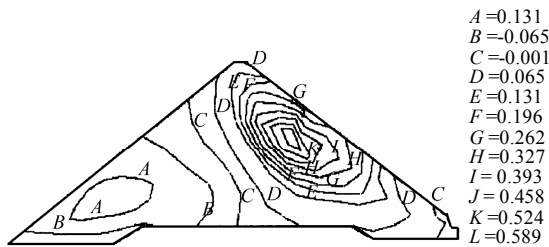


图 4 考虑流变蓄水期最大剖面水平位移等值线(单位: m)
Fig.5 The water flow direction displacement contour of biggest section during operation period with consideration of rockfill creep (unit: m)

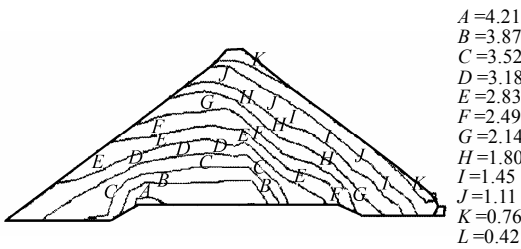


图 5 考虑流变最大剖面蓄水期主压应力等值线(单位: MPa)
Fig.5 The principal compressive stress contour of biggest section during operation period with consideration of rockfill creep (unit: MPa)

3.1 考虑流变效应的坝体应力、位移成果

由表 2 可知，考虑流变效应的蓄水期坝体沉降为 1.73 m，约为坝高的 0.74 %，比不考虑流变效应求得的蓄水期沉降 1.52 m 增加 0.21 m，增加的百分比为 13.8 %。考虑流变效应的竣工期坝体沉降为 1.49 m，约为坝高的 0.63 %，比不考虑流变效应求得的竣工期沉降 1.31 m 增加 0.18 m，增加的百分比为 13.7 %。

由以上分析表明，施工期流变引起的附加沉降为 0.18 m，从施工到正常蓄水位时因流变引起的总附加沉降为 0.21 m，约为坝高的 0.09 %。另外，施工期流变引起的水平位移增量为 5.1 cm，从施工到正常蓄水位时因流变引起的总水平位移增量为 7.2 cm。

从大坝最高剖面的应力等值线图 5 可以看出，由于堆石体的流变变形，坝体应力出现松弛现象。考虑堆石体的流变效应后，但大坝蓄到正常高水位时，堆石体的大主应力和小主应力分别为 4.21 MPa 和 1.86 MPa；保持正常水位至变形稳定期时，堆石体相应的大主应力和小主应力分别为 4.17 MPa 和 1.81 MPa。由此可以看出，堆石体的流变变形将引起堆石体应力的调整，使得堆石体趋于更加密实，应力趋向更加均匀。

3.2 考虑流变效应的面板应力变形成果

考虑堆石体的流变效应后，竣工期面板的最大挠度为 26.4 cm，蓄水期为 70.3 cm，竣工期堆石体流变引起面板的最大挠度增加值为 2.8 cm，从施工到正常蓄水位时因堆石体流变引起的面板最大挠度总增量为 8.2 cm。同时，蓄水期面板顺坡向拉应力由 2.51 MPa 增至 2.84 MPa，压应力由 18.47 MPa 增至 20.68 MPa，坝轴向拉应力由 2.56 MPa 增至 2.94 MPa，压应力由 5.23 MPa 增至 6.14 MPa。总之，考虑堆石体流变后，面板最大挠度有所增加，面板顺坡向和坝轴向压、拉应力极值有所增大。

3.3 考虑流变效应的大坝应力变形评价

考虑流变效应后的计算结果表明,总体上堆石体的流变特性使得坝体的位移增大。坝体不同部位的位移变化规律与施工过程及蓄水过程有关。施工期由于荷载间歇时间短,堆石体的流变变形不能在短时间内达到稳定状态,但从计算结果可以看出,水布垭大坝竣工期的流变变形已经完成了相当大的一部分。从坝内典型部位的位移时间历程曲线(见图 6)可以看出,在大坝蓄水至正常高水位以后,在水压力的长时间持续作用下,在大坝满蓄后 3.5 年左右坝体的变形趋于稳定。

将水布垭面板坝的计算成果与国内外已建、在建的混凝土面板堆石坝的实测值和计算值作一些比较(见表 4)。虽然考虑堆石体的流变效应后,水布

垭大坝坝体的变形有所增加,但与类似已建、在建工程的计算与实测沉降值相比,仍处在设计的控制范围之内。

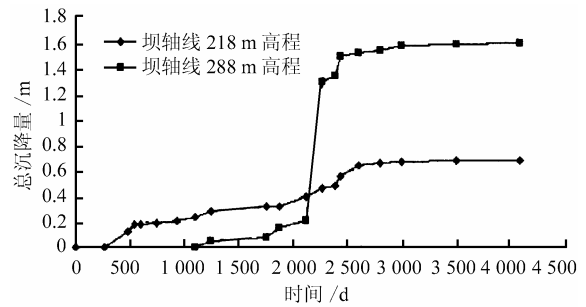


图 6 最大剖面坝轴线不同高程处沉降历时过程线
Fig.6 The vertical displacement process curve of biggest section with consideration of rockfill creep

表 4 水布垭面板坝堆石体沉降量与其他工程的对比表

Table 4 Contrast table of Shuibuya CFRD Stress and deformation maximum value of face with consideration of rockfill creep									
坝名	建设状态	坝高/m	河谷宽高比	堆石体特性		坝体沉降量/m			
				岩性	干密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	竣工期	占坝高的百分比	蓄水期	占坝高的百分比
水布垭(不考虑流变)	在建	233.0	2.8	灰岩	2.15	1.42	0.61	1.53	0.65
水布垭(考虑流变)	在建	233.0	2.8	灰岩	2.15	1.49	0.64	1.73	0.74
天生桥(弹性模型计算值)	已建	178.0	6.4	灰岩	2.12	1.43	0.79	1.48	0.82
天生桥(实测值)	已建	178.0	6.4	灰岩	2.04	3.32	1.86	3.38	1.89
洪家渡	在建	182.0	2.7	灰岩	2.18	0.81	0.45	0.84	0.46
三板溪	在建	178.5	2.4	凝灰岩	2.12	1.85	1.04	2.08	1.16
阿里亚	已建	160.0	5.1	玄武岩	2.12	3.58	2.24	3.87	2.40
安奇卡亚	已建	140.0	2.0	闪长岩	2.28	0.63	0.45	0.77	0.55
塞沙那	已建	110.0	1.9	石英岩	2.10	0.45	0.41	0.56	0.51

4 结 语

本文采用一种新的能模拟高围压条件的幂函数流变本构模型对水布垭面板堆石坝进行了考虑堆石体流变性的应力、变形分析。主要结论如下:

(1) 堆石体的流变特性使得坝体的位移增大。考虑流变效应的蓄水期坝体沉降为 1.73 m, 比不考虑流变效应求得的 1.52 m 增加 0.21 m。基本稳定期坝体的最大沉降为 2.09 m。

(2) 堆石体的流变特性对面板的应力变形状态有较大影响。考虑堆石体的流变效应后, 蓄水期面板的最大挠度为 70.3 cm, 比不考虑流变效应求得的 62.1 cm 增加 8.2 cm。同时, 蓄水期面板顺坡向拉应力由 2.51 MPa 增至 2.84 MPa, 坝轴向拉应力由 2.56 MPa 增至 2.94 MPa。

(3) 在大坝满蓄后 3.5 年左右坝体的变形趋于稳定。

(4) 虽然考虑堆石体的流变效应后, 水布垭大坝坝体的变形有所增加, 但与已建、在建工程的计

算与实测沉降值相比, 仍处在设计的控制范围之内。

(5) 鉴于堆石体的流变特性对于分期浇筑面板、分期蓄水的高面板堆石坝的坝体及面板的应力、变形有较大影响, 笔者将在以后的研究中进一步探讨狭窄河谷形状产生的拱效应及其对坝体和面板的应力与变形的影响。

参 考 文 献

- [1] 付志安, 凤家骥. 混凝土面板堆石坝[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1993.
- [2] 曹克明, 汪易森, 张宗亮. 高混凝土面板堆石坝的设计与施工[J]. 水力发电, 2001, (10): 49—52.
CAO Ke-ming, WANG Yi-seng, ZHANG Zhong-liang. Design and construction of high CFRD[J]. Water Power, 2001, (10): 49—52.
- [3] 沈珠江, 左元明. 堆石料的流变特性试验研究[A]. 第6届土力学基础工程学术会议论文集[C]. 上海: 同济大学出版社, 1991. 443—446.

- [4] 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(6): 1—6.
SHEN Zhu-jiang, ZHAO Kui-zhi. Back analysis of CFRD creep [J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 1998, 6(6): 1—6.
- [5] 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.
- [6] 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(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(11): 42—46.
- [7] 肖化文, 陈传慧. 水布垭面板堆石坝流变初步分析[J]. 人民长江, 2003, 34(6): 17—19.
XIAO Hua-wen, CHEN Chuan-hui. Preliminary analysis on creep nature of faced rockfill dam of Shuibuya hydroproject[J]. **Yangtze River**, 2003, 34(6): 17—19.
- [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.
- [9] 周伟. 高混凝土面板堆石坝流变本构模型理论及其应用 [博士学位论文 D]. 武汉: 武汉大学, 2004.
- [10] 张丙印, 师瑞锋. 流变变形对高面板堆石坝面板脱空的影响分析[J]. 岩土力学, 2004, 8(25): 1 179—1 184.
ZHANG Bing-yin, SHI Rui-feng. Influence of creeping on separation between concrete slab and cushion layer in high concrete face rock-fill dam[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 8(25): 1 179—1 184.