

堆石料填筑标准对狭窄河谷面板堆石坝 应力变形的影响研究

郭兰春¹, 王瑞骏¹, 刘伟²

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2. 甘肃省水利水电勘测设计研究院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 为研究堆石料填筑标准对于狭窄河谷高面板堆石坝应力变形的影响规律, 本文运用三维有限元法, 以某高面板堆石坝工程为例, 进行了堆石料不同填筑标准下的大坝应力变形特性的对比研究。结果表明: 随着堆石料填筑标准的提高, 坝体和面板的应力变形均基本呈现单调递减的变化规律, 且堆石料填筑标准对坝体和面板应力变形的影响存在一个明显的“拐点”, 如本文工程实例的主堆石料干密度影响“拐点”为 2.16 g/cm^3 。因此, 通过提高堆石料填筑标准, 可以明显改善狭窄河谷中高面板堆石坝的应力变形状况, 但应注意堆石料填筑标准对大坝应力变形的影响存在“拐点”这一特性。

关键词: 堆石料填筑标准; 狭窄河谷; 高面板堆石坝; 应力变形; 影响规律

中图分类号: TV641.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)05-0017-05

Influence of rockfill standard on stress and deformation of rock-fill dam in narrow valley

GUO Lanchun¹, WANG Ruijun¹, LIU Wei²

(1. Faculty of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, 710048, China;

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

Abstract: In order to analyze the influence law of rockfill standard on stress deformation of the narrow valley high CFRD, the paper took a narrow valley high CFRD project for example and conducted a comparative study of stress and deformation properties of rockfill dam under different compaction standards based on the three-dimensional finite element method. The results show that as the improvement of rock-fill standard, the stress and deformation of panel are gradually decreased. And there is an obvious “turning point” for the impact of rockfill dam compaction standard on the stress and deformation of the panel. The “turning point” of main rockfill dry density is 2.16 g/cm^3 . Therefore, with the improvement of rock-fill standard, we the stress and deformation conditions of the narrow valley high rockfill dam can be significantly improved. But it should be paid attention that there is the “turning point” which exists in the impact of the rockfill dam compaction standard on its stress and deformation.

Key words: rockfill compaction standard; narrow valley; high CFRD; stress and deformation; influence law

1 研究背景

随着我国水电开发的重点逐步转向西部高山峡谷地带, 越来越多的高面板堆石坝工程将不得不面对狭窄河谷这样的特殊坝址地形条件^[1-2]。研究表明^[3-7], 在狭窄河谷地形约束下, 高面板堆石坝的变

形呈现如下主要特征: 在狭窄河谷两岸山体的支撑作用下坝体和面板将产生三维拱效应; 沿坝轴线方向坝体的应力变形相对较大; 坝体竣工初期变形相对较小, 而后期随拱效应的减弱变形将逐步增大。进一步研究表明^[8-10], 产生上述变形特征的成因, 不仅与河谷地形条件(河谷宽高比)有关, 而且与坝

收稿日期: 2014-04-22; 修回日期: 2014-06-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(50779051)

作者简介: 郭兰春(1991-), 女, 青海海东人, 在读硕士研究生, 主要从事水工结构分析及数值仿真研究。

通讯作者: 刘伟(1988-), 男, 甘肃平凉人, 硕士, 助工, 主要从事水利工程设计及研究。

高及堆石料的填筑标准等因素有关。然而,目前在狭窄河谷高面板堆石坝工程设计中,为了合理选择坝址,往往仅侧重于河谷地形条件对于大坝应力变形的影响规律研究,而对于堆石料的填筑标准,往往只是根据工程现场可用堆石料的物理力学及施工碾压试验成果,通过工程类比进行确定,关于堆石料填筑标准对于狭窄河谷高面板堆石坝应力变形影响规律的研究则相对较少,研究深度也相对有限^[3,5-6]。

本文拟以某建于狭窄河谷的高面板堆石坝工程为例,运用三维有限元法,进行堆石料不同填筑标准下的大坝应力变形特性的对比研究,以期揭示在河谷宽高比及坝高等条件一定的情况下,堆石料填筑标准对于狭窄河谷高面板堆石坝应力变形的影响规律,从而为类似工程合理选择堆石料的填筑标准提供理论参考。

2 分析计算原理

2.1 河谷狭窄程度及堆石料填筑标准的定量描述

在工程实际中,通常用沿坝轴线方向的河谷横断面来对同一工程不同坝址方案处或不同工程坝址的河谷形状进行比较。实际上,影响面板堆石坝应力变形的河谷地形要素并不是绝对的河谷狭窄程度,而是其相对于坝高的狭窄程度,即河谷相对狭窄程度。因此,在定量描述河谷相对狭窄程度方面,我国一些学者^[5,11-12]提出用“河谷宽高比”(坝顶处河谷宽度与最大坝高之比)来定量表示河谷的相对狭窄程度,由于该指标易于确定,因此在工程实际中应用较多。本文也选择采用河谷宽高比来定量表示坝址处的河谷狭窄程度。目前,我国在狭窄河谷中已建的高面板坝是龙首二级坝,最大坝高 146.5 m,河谷宽高比仅为 1.3;在建的高面板坝是猴子岩面板堆石坝,最大坝高为 223.5 m,河谷宽高比仅为 1.27^[1]。

在我国设计规范中^[13],规定各区坝料填筑标准可根据经验初步选定,设计应同时规定孔隙率或相对密度、坝料的级配和碾压参数。根据不少面板堆石坝的设计经验,由于孔隙率指标不易准确检测,也不便于用此来进行施工质量控制,同时考虑到堆石料的干密度与其本构模型(如 E-B 模型)参数密切相关,因此,不少工程设计时往往采用干密度作为硬岩堆石料的设计填筑标准^[8-9,14]。所以,本文也采用干密度来定量表示堆石料的填筑标准,并考虑堆石料干密度与其本构模型参数之间的内在关系。

2.2 计算模型及计算方法

河谷的形状是天然形成的,在坝址方案已经选定的情况下,修建大坝仅是通过坝基开挖对河谷形状进行局部较小的改动。因此,应力变形有限元计算必须基于三维模型来进行,这样才能反映狭窄河谷地形特征。由于坝体堆石料、坝基覆盖层等散粒体材料的变形模量远小于坝基和坝肩岩体的变形模量,相比较而言,坝基和坝肩岩体的变形往往很小,可以忽略不计。因此,有限元计算的模型边界通常只需取至坝基、坝肩基岩开挖面或实际岩面即可^[14-15]。计算时,由坝基、坝肩基岩开挖面或实际岩面所构成的模型边界应施加固定约束。

结合河谷地形特点及大坝结构特点,本文在进行堆石料不同填筑标准的大坝应力变形三维有限元计算时,运用具有强大非线性分析功能的大型通用有限元软件 ADINA 具体实施计算;堆石料的本构模型采用非线性弹性邓肯 E-B 模型,面板及趾板混凝土采用线弹性模型;以低弹模薄层单元模拟面板间的接缝,以无厚度的 Goodman 接触单元模拟面板与垫层之间的接触面;以 ADINA 软件中的时间函数、空间函数、时间步及单元生死等的联合设置模拟施工分级加载及蓄水过程;以中点增量法求解非线性方程组^[15]。

3 工程实例分析

3.1 工程概况

某水电站混凝土面板堆石坝^[14],坝址处河谷地形呈大体对称的 V 形,属狭窄河谷,河谷宽高比仅为 2.38,最大坝高 179.5,坝顶长 427.79,坝顶宽度 10.95,上游坝坡坡比为 1:1.4,趾板建基面高程 968.2 m。水库正常蓄水位为 1 140.0 m。堆石坝体共分 8 期施工(I~Ⅷ期),面板分 3 期施工,各期面板顶高程依次为 1 031、1 100、1 142.7 m。大坝标准横剖面材料分区及堆石坝体施工分期(工序)如图 1 所示。

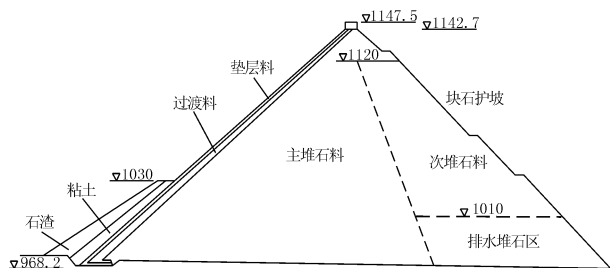


图 1 大坝标准横剖面及施工分期图

3.2 计算模型

按照大坝实际布置情况选择计算范围。其中,河床宽度为 40 m;面板顶部厚度为 0.3 m,底部厚度为 0.9 m;垫层水平宽度为 4 m;过渡区顶部水平宽度为 4 m,底部宽度为 11 m;坝基基岩面取为水平面。大坝共分 5 个材料区,对应 5 个单元组,按 8 节点六面体实体单元进行网格划分。坝基基岩面及左右坝肩基岩面均施加固定约束。坝上游水库正常蓄水深取为 170 m。建立三维有限元模型如图 2 所示。

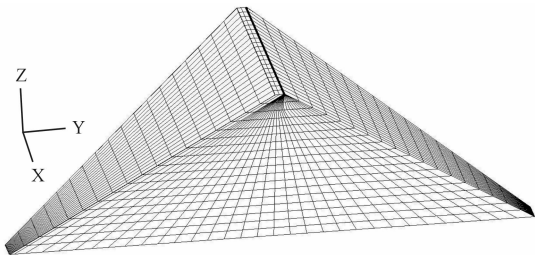


图 2 三维有限元模型

3.3 计算方案及计算参数

由于混凝土面板、垫层区及过渡区在坝体断面上所占范围相对较小,对大坝应力变形的影响相对

较小^[14],因此为适当简化计算,本文拟在假定面板混凝土参数及垫层区和过渡区材料的填筑标准相同的前提下,重点研究主堆石料及次堆石料采用不同填筑标准时大坝应力变形的差异,进而通过对不同填筑标准下大坝应力变形的对比分析,揭示堆石料填筑标准对于大坝应力变形的影响规律。

在工程实际中,不同的干密度对应不同的堆石填筑材料,其模型参数自然不同,而模型参数的确定是影响堆石坝计算分析结果的重要因素。从影响坝体变形的主要参数 K 和 K_b 看^[14],堆石材料参数变化幅度较大,但其总体的变化趋势仍表现出了一定的规律性。对于材料的模量而言,堆石材料的弹性模量数和体积模量数基本上均是随干容重的增加而增加^[14]。另外,从弹性模量数与体积模量数的相关关系看,无论是堆石材料还是砂砾石材料,体积模量数均在弹性模量数的 20% ~ 80% 之间^[14]。所以结合工程实际,同时参考类似工程经验^[8,14],拟定的 5 个主、次堆石料的填筑标准方案见表 1。

根据工程实际^[14],选取各方案的面板混凝土线弹性材料参数见表 2,垫层区及过渡区材料的填筑标准参数见表 3。

表 1 主、次堆石料填筑标准方案 g/cm³, (°)

计算方案		γ_d	ϕ_0	K	n	R_f	K_b	m	K_{ur}	n_{ur}
方案 1	主堆石	2.050	54.000	720.000	0.303	0.798	800.000	0.180	1440.000	0.303
	次堆石	1.640	43.200	576.000	0.242	0.638	640.000	0.140	1152.000	0.242
方案 2	主堆石	2.100	54.000	940.000	0.350	0.849	340.000	0.180	1880.000	0.350
	次堆石	1.680	43.200	752.000	0.280	0.679	272.000	0.140	1504.000	0.280
方案 3	主堆石	2.160	52.800	1250.000	0.630	0.918	530.000	0.300	2500.000	0.630
	次堆石	1.730	42.200	1000.000	0.500	0.734	424.000	0.240	2000.000	0.500
方案 4	主堆石	2.220	57.000	1700.000	0.550	0.929	560.000	0.470	3400.000	0.550
	次堆石	1.780	45.600	1360.000	0.440	0.743	448.000	0.380	2720.000	0.440
方案 5	主堆石	2.280	58.100	1750.000	0.430	0.768	1200.000	0.410	3500.000	0.430
	次堆石	1.820	46.500	1400.000	0.340	0.614	960.000	0.330	2800.000	0.340

表 2 面板混凝土线弹性材料参数 g/cm³, GPa

材料	γ_d	E	μ
面板混凝土	2.450	30.000	0.167

注: γ_d 为干密度; E 为弹性模量; μ 为泊松比。

3.4 荷载施加及计算工况

结合大坝实际施工分期及水库蓄水过程^[14],拟定各方案有限元计算的荷载级依次为:①堆石坝体填筑共分 15 级,从坝基面 968.20 m 高程依次填筑

至坝顶 1 147.5 m 高程,荷载级顺序与实际施工分期顺序基本一致,并对各施工期适当增加荷载级;各荷载级所涉及的材料,严格按坝体材料分区定义其材料属性;②面板施工分 3 级,各级面板顶部高程依次为 1 031、1 100、1 142.7 m;③水库蓄水分 3 级,从库底 968.20 m 高程到正常蓄水位 1 140.0 m 各级蓄水水位依次为 1 027.0、1 095.0、1 040.0 m。计算中坝下游均按无水考虑。

3.5 计算结果及分析

针对上述拟定的 5 个主、次堆石料填筑标准方案,本文按照逐级加载、增量求解的方法,分别进行了各方案大坝应力变形的三维有限元计算。根据前述关于堆石料填筑标准定量描述的分析结果,为便于叙述,以下以主堆石料的干密度作为各填筑标准方案的代表性指标(次堆石料的干密度按表 1 与之对应),进行各方案大坝主要应力变形计算结果的对比分析。

表 3 垫层区及过渡区材料的填筑标准参数									$g/cm^3, (^{\circ})$
材料名称	γ_d	ϕ_0	K	n	R_f	K_b	m	K_{ur}	n_{ur}
垫层料	2.205	52.000	1100.000	0.400	0.865	680.000	0.210	2250.000	0.400
过渡料	2.190	53.000	1050.000	0.430	0.867	620.000	0.240	2150.000	0.430

注:表中参数同表 1。 γ_d 为干密度; ϕ_0 为 σ_3 等于单位大气压力时的内摩擦角; K 为切线模量基数; n 为切线模量指数; R_f 为单位大气压力; K_b 为体积模量基数; m 为体积模量指数; K_{ur} 为卸荷模量基数; n_{ur} 为卸荷模量指数。

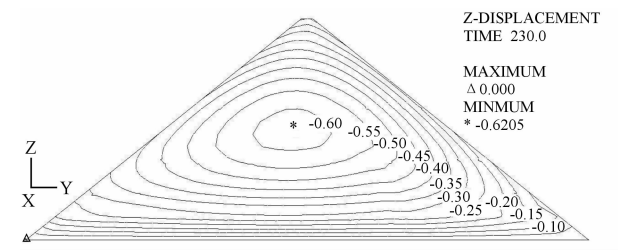


图 3 正常蓄水期坝体标准横剖面垂直位移等值线图(单位:m)

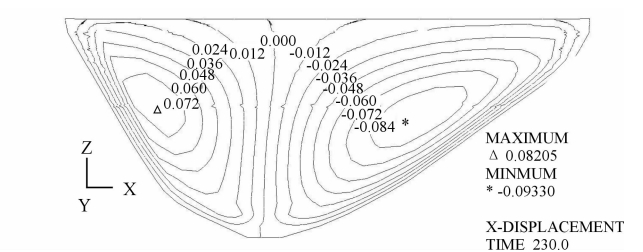


图 4 正常蓄水期大坝纵断面坝轴向位移等值线图(单位:m)

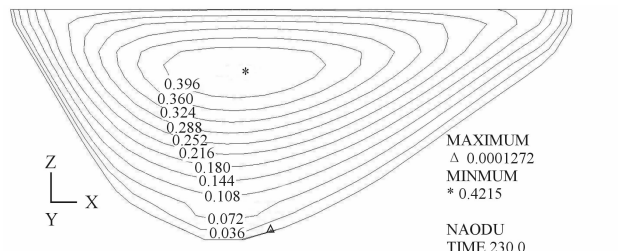


图 5 正常蓄水期面板挠度等值线图(单位:m)

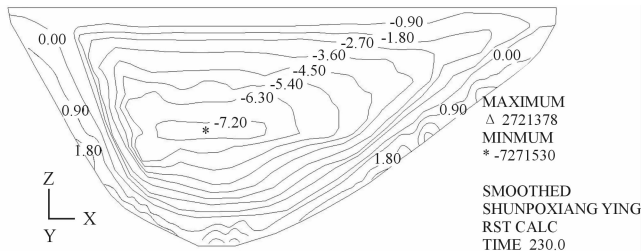


图 6 正常蓄水期面板顺坡向应力等值线图(单位:m)

从图 3、5 可以看出,受狭窄河谷地形的影响,该高面板堆石坝沿坝轴线方向的坝体位移明显较大,从而导致坝体垂直位移、面板挠度及面板顺坡向应力均呈现不同于宽浅河谷的变化特征^[15-16]。

各填筑标准方案的大坝应力变形计算结果比较见表 4。

由表 4 可以看出,从方案 1 至方案 5,坝体最大沉降、坝体坝轴向位移最大值、面板挠度最大值、面板顺坡向应力最大值、面板坝轴向应力最大值均呈现基本相同的变化趋势,即随着主堆石料干密度的增大,均基本呈现单调递减的变化规律。以坝体最大沉降和面板顺坡向应力为例,正常蓄水期(蓄水位 1 140.0 m)坝体最大沉降与主堆石料干密度的

经计算,各填筑标准方案的大坝应力变形分布规律基本相似。以方案 3 为例,正常蓄水期(蓄水位 1 140.0 m)坝体标准横剖面垂直位移、大坝纵断面坝轴向位移、面板挠度、面板顺坡向应力等值线见图 3~6。其中,位移及应力的正负号约定为:坝体横剖面的垂直位移以向下为正,坝体纵断面的坝轴向位移以向右岸为正,面板挠度以向面板内侧法向为正,面板顺坡向应力以受拉为正。

关系见图 7,面板顺坡向应力最大值与主堆石料干密度的关系见图 8。

表 4 各填筑标准方案的大坝应力变形计算结果比较						cm, MPa
	坝体最大沉降	坝体坝轴向位移最大值	面板挠度最大值	面板顺坡向应力最大值	面板坝轴向应力最大值	
方案 1	80.620	5.610	46.380	5.160	5.610	
方案 2	73.930	5.240	47.380	4.830	5.240	
方案 3	37.560	4.070	22.860	3.750	4.070	
方案 4	29.680	3.930	20.130	3.620	3.930	
方案 5	30.940	4.030	21.350	3.710	4.030	

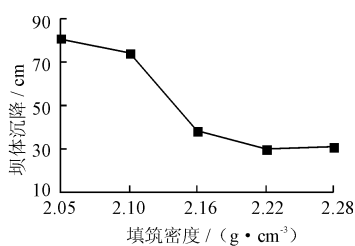


图 7 主堆石料干密度与坝体最大沉降关系图

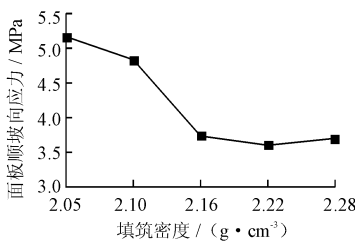


图 8 主堆石料干密度与面板顺坡向应力最大值关系图

从表 4 及图 7、8 可以看出,当干密度从 2.10 g/cm^3 增大至 2.16 g/cm^3 时,坝体最大沉降及面板顺坡向应力最大值均明显减小,当干密度超过 2.16 g/cm^3 时二者则基本趋于稳定。从表 4 可以看出,坝体坝轴向位移最大值、面板挠度最大值及面板坝轴向应力最大值均呈现与此相同的变化规律。因此可以发现,当主堆石料干密度相对较小时,干密度对坝体和面板应力变形的影响较为显著,但当主堆石料干密度超过一定限度以后,干密度对坝体和面板的应力变形基本无影响,即主堆石料干密度对坝体和面板应力变形的影响存在一个明显的“拐点”。不难发现,对于该高面板堆石坝而言,影响坝体和面板应力变形的“拐点”主堆石料干密度为 2.16 g/cm^3 ,即主堆石料的干密度应不小于 2.16 g/cm^3 。

4 结 语

为研究堆石料填筑标准对于狭窄河谷高面板堆石坝应力变形的影响规律,本文采用三维有限元法,以某高面板堆石坝工程为例,进行了堆石料不同填筑标准下的大坝应力变形特性的对比研究。结果表明,随着堆石料填筑标准(主、次堆石料干密度及相应的本构模型参数)的提高,坝体和面板的应力变形均基本呈现单调递减的变化规律;经对不同填筑标准下坝体和面板应力变形的对比分析,发现堆石料填筑标准对坝体和面板应力变形的影响存在一个明显的“拐点”,本文工程实例的主堆石料干密度影响“拐点”为 2.16 g/cm^3 。因此,总体而言,通过提高堆石料填筑标准,可以明显改善狭窄河谷中面板

堆石坝的应力变形状况,但应注意堆石料填筑标准对大坝应力变形的影响存在“拐点”,从兼顾大坝安全与经济合理的要求出发,堆石料填筑标准的提高应适当。在进行实际狭窄河谷高面板堆石坝设计中,应根据坝址河谷地形条件、筑坝材料特性等,在分析确定堆石料填筑标准对大坝应力变形影响“拐点”的基础上,选择适宜的堆石料填筑标准。

参考文献:

[1] 邴能惠,杨泽艳. 中国混凝土面板堆石坝的技术进步[J]. 岩土工程学报,2012,34(8):1361-1368.

[2] 杨泽艳,周建平,蒋国澄,等. 中国混凝土面板堆石坝的发展[J]. 水力发电,2011,37(2):18-23.

[3] Deng Gang, Xu Zeping, Lv Sheng xi, et al. Analysis on long term stress and deformation of high concrete face rockfill dam in narrow valley [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(6): 639-646.

[4] 刘 伟. 狭窄河谷高面板堆石坝应力变形特性研究[D]. 西安:西安理工大学,2012.

[5] 朱亚林,孔宪京,邹德高,等. 河谷地形对高土石坝动力反应特性影响的分析[J]. 岩土工程学报,2012,34(9):1590-1597.

[6] 王 平,赵一新. 狭窄河谷深覆盖层地基高面板堆石坝应力变形特性研究[J]. 水资源与水工程学报,2010,21(4):146-150.

[7] 何 平,王 伟. 洪家渡水电站面板堆石坝施工期沉降监测资料分析[J]. 贵州水力发电,2005,19(4):81-84.

[8] 沈 婷,李国英. 超高面板堆石坝混凝土面板应力状态影响因素分析[J]. 岩土工程学报,2010,32(9):1345-1349.

[9] 曹克明,汪易森,徐建军,等. 混凝土面板堆石坝[M]. 北京:中国水利水电出版社,2008.

[10] 徐泽平. 超高混凝土面板堆石坝建设中的关键技术问题[J]. 水力发电,2010,36(1):51-59.

[11] 李庆生. 峡谷地区高面板堆石坝变形特点[J]. 中南水力发电,2009,(1):8-10+14.

[12] 朱 晟,王继敏. 建造在狭窄河谷上的高混凝土面板堆石坝[J]. 红水河,2004,23(4):81-84+88.

[13] 国家电力公司水电水利规划设计总院. 混凝土面板堆石坝设计规范[M]. 北京:中国电力出版社,2000.

[14] 徐泽平. 混凝土面板堆石坝应力变形特性研究[M]. 郑州:黄河水利出版社,2005.

[15] 邴能惠. 高混凝土面板堆石坝新技术[M]. 北京:中国水利水电出版社,2007.

[16] 王柏乐. 中国当代土石坝工程[M]. 北京:中国水利水电出版社,2004.