

复杂地形条件下高面板堆石坝的应力变形特性

岑威钧,任旭华,李启升

(河海大学水利水电工程学院,江苏 南京 210098)

摘要 运用三维非线性有限元法对某复杂地形条件下高面板堆石坝的应力变形进行预测,重点分析了高陡岸坡和起伏突变的地形边界对分期施工的高面板坝应力变形特性的影响.结果表明,高陡岸坡边界对大坝堆石体的应力变形影响不明显,但对面板应力变形和周边缝的变位影响较大,尤其是高陡斜坡时,对面板有明显的向河床方向的束窄作用,导致该处附近面板呈现较大拉应力区和周边缝基本都呈拉开状态,起伏突变的地形对大坝堆石体的应力变形很不利,应进行相应的技术处理.

关键词 面板堆石坝;高陡岸坡;分期施工;变形;应力

中图分类号:TV641.4 文献标识码:A 文章编号:1000-198X(2007)04-0452-04

从 20 世纪 80 年代至今,我国的混凝土面板堆石坝筑坝技术取得了长足的发展,无论是建坝数量还是建坝高度,都处于世界前列.然而,目前混凝土面板堆石坝的设计和施工水平仍较大程度地依赖于工程经验.尤其是特殊地形地质条件下的高面板堆石坝,目前还没有成熟的工程经验可循,理论研究成果就成为工程设计的重要依据.

某工程可行性研究阶段的推荐坝型为混凝土面板堆石坝.大坝高 107 m,上游坝坡为 1:1.4,下游坝坡按变坡设计,综合坝坡 1:1.487.大坝坝址处岸坡陡峻且起伏变化大,岸坡平均自然坡度约为 1:0.2.在坝轴线处,两岸大部分岸坡几乎直立且上部岸坡突然向两岸拓宽,河谷大致呈对称的复式矩形断面.在面板部位,左岸岸坡几乎直立,右岸为一斜陡坡,且在上部有一水平台地.整个大坝所处河谷,从上游到下游均有多处较大起伏或突变.目前国内外尚未见如此复杂地形条件下的已建面板坝.为此,本文运用三维非线性有限元法分析了这种“恶劣”地形条件下高面板堆石坝的应力变形特性,并研究了复杂地形边界对大坝应力变形可能产生的不利影响及相应对策.

1 材料本构模型和参数

堆石料的变形不仅随荷载大小变化,而且还与加载的应力路径有关,应力应变呈明显的非线性关系.除此之外,堆石料应力应变关系还具有压硬性、剪胀性和各向异性等特征.目前,堆石料常用的本构模型主要有弹性非线性模型和弹塑性模型 2 类.其中弹性非线性模型中的邓肯双曲线模型^[1-3]因使用简便,参数确定经验丰富,计算结果与实测结果较为符合,在工程界得到了普遍应用.文献[4]建议在三维计算时应对该模型进行修正,即用平均主应力 p 代替小主应力 σ_3 ,广义剪应力 q 代替主应力差 $\sigma_1 - \sigma_3$,以考虑中主应力 σ_2 的影响.本文采用按上述方法修正的邓肯 E-B 模型来描述堆石料的应力应变关系.

混凝土面板与坝体垫层料性质相差悬殊,因此可在两者之间设置无厚度的 Goodman 接触单元,以模拟两者之间的相互作用.此外,为了反映面板垂直缝和周边缝中止水材料的力学作用,计算中用六面体连接单元^[5]进行模拟.本文计算中大坝各分区堆石料的材料参数、接触面参数及止水材料连接单元模型参数均借用天生桥一级面板坝工程的相关参数^[6].

混凝土材料采用线弹性模型,材料常数取为: $\rho = 2.45 \text{ g/cm}^3$, $E = 20 \text{ GPa}$, $\mu = 0.167$.

收稿日期:2006-07-10

作者简介:岑威钧(1977—),男,浙江慈溪人,讲师,博士.主要从事高土石坝工程结构静动力安全分析及水工建筑物渗流分析与渗控优化研究.

2 三维非线性有限元计算分析

2.1 计算模型及施工加载模拟

计算域边界选取时完全模拟了现有的复杂地形条件,整个计算域共剖分结点 2 455 个,单元 1 871 个,其中,面板单元和接触单元均为 137 个,面板垂直缝单元 126 个,周边缝单元 27 个,剖分的网格如图 1 所示,计算过程详细模拟了坝体的分期分断面施工、面板的分期浇筑和库水位的分期蓄降,加载次序如图 2 所示。

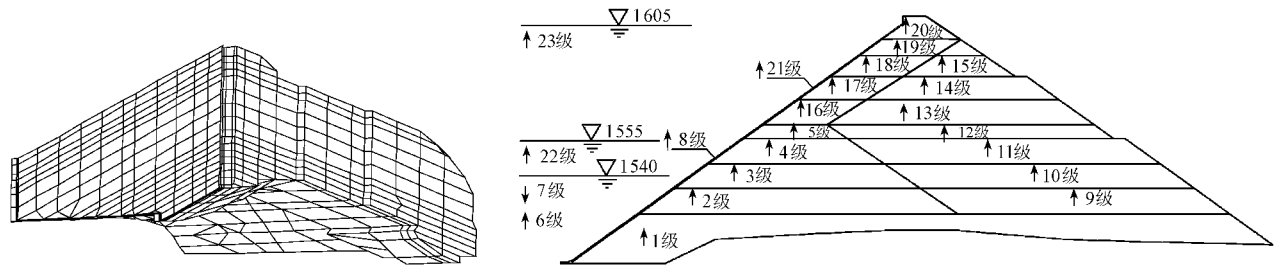


图 1 有限元计算网格

Fig.1 FE mesh of dam

2.2 大坝堆石体变形和应力^[7-8]

竣工期大坝堆石体向上下游最大水平位移分别为 19.2 cm 和 27.7 cm,最大沉降为 67.6 cm,最大沉降点大约位于坝高 2/3 处,沉降率为 0.64%,这些数值均在堆石坝变形的合理范围之内。坝体向上游的水平位移明显小于向下游的水平位移,这主要是由于先期填筑的一期“子坝体”受库水预压后变形模量有所增大且对后期坝体向上游的变形有一定限制作用,以及坝体次堆石料较主堆石料“软”的缘故。也正因如此,坝体的同一沉降值,其等值线范围也偏向于下游次堆石区。蓄水后,堆石体水平位移随库水位的增加而逐渐向下游发展。向上游的水平“鼓出”位移被库水逐渐压回,向下游的水平位移也有一定的增加。向上下游最大水平位移分别变为 7.3 cm 和 29.2 cm,其中向上游的位移改变量明显比向下游的位移改变量要大,这是由于库水通过面板主要作用在上游坝体所致。同样,库水引起的坝体沉降变位增量也主要集中在上游主堆石区内,但由于上游主堆石模量较大,坝体竖向位移因蓄水引起的增量并不大,最大沉降仅增至 70.0 cm。图 3 给出了大坝沿坝轴线纵剖面堆石体在竣工期和蓄水期的沉降等值线。由图 3 可见,大坝堆石体的沉降变形规律较好,等值线分布与河谷轮廓相适应,最值区域位于坝体的中上部。两岸直立岸坡对堆石体变形影响不是很明显,但河床底部的突起对沉降等值线分布影响较大,等值线上凸明显,说明该部位以上堆石体与两侧堆石体变形有较大的沉降梯度,这对坝体受力不利。

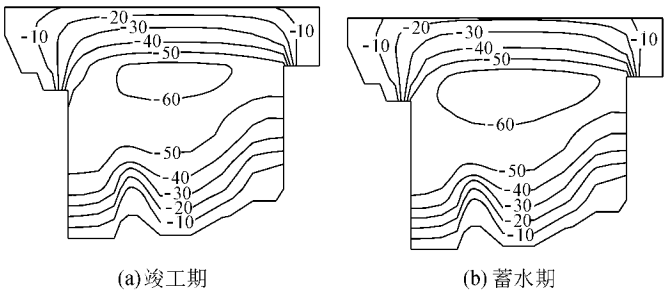


图 3 沿坝轴线纵剖面堆石体沉降等值线(单位:cm)

Fig.3 Isolines of rockfill settlement along longitudinal profile in axial direction of the dam(unit:cm)

大坝堆石体大小主应力分布及变化规律总体

较好,大小主应力极值之比也符合堆石体应力分布的一般规律。竣工期大坝上下游侧的主应力等值线总体上接近平行于坝坡,说明堆石体应力主要与“土柱”质量(高度)相关。水库蓄水后,上游堆石体主应力等值线较竣工期有明显“上抬”,同一数值等值线的包含范围也有所增加,这主要是水压力作用的结果。计算表明,堆石体应力水平小于 1.0,个别部位尤其是边界突变处,应力水平接近于 1.0,说明堆石体在这些部位可能会出现破坏区。因此,施工前最好将突变的地形进行削坡和填塞处理,使建基面能够平缓变化。

2.3 大坝防渗体系变形和应力

2.3.1 面板变形

由于面板支撑于其下部的堆石体,面板的变形很大程度上依赖于堆石体的变形。面板的浇筑是在堆石体填筑完成后进行的,而此时坝体表面的位移已经存在,因此面板在竣工期的变形主要是记忆了前期坝体表面的位移值,这在竣工期一期面板的变形中表现得尤为明显。图 4 为蓄水前后面板最大剖面处变形挠曲线。竣

工期,一期面板凸向外侧(上游),二期面板变位指向坝内侧,整个面板的最大挠度值为脱离坝体6.49 cm,位于一期面板的中上部.蓄水后,面板的最大挠度值为压向坝内 19.24 cm,位于二期面板的中下部,即大约位于整个面板的 1/2 高度处.这些明显反映了坝体复杂加载和面板分期浇筑情况下的面板变形特点,与一般的坝体简单加载和面板一次浇筑情况有实质性区别.在这种情况下,外凸面板的上部因刚体位移有可能会与其下部垫层分离,出现面板脱空现象.蓄水后整个面板全都被库水压向坝内侧,当可能的脱空区域和脱空值较大时,容易引起面板压碎现象,设计和施工时应引起注意.

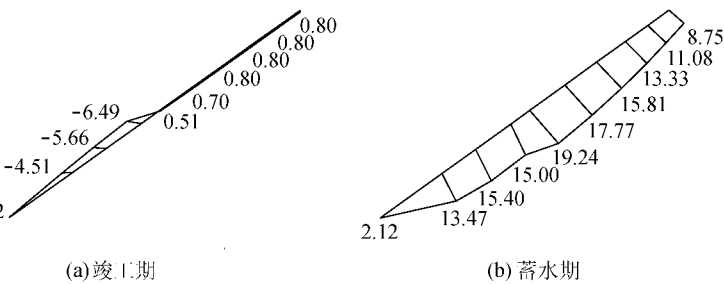


图 4 最大剖面面板挠曲线(单位:cm)
Fig.4 Deflection curve of concrete slab at the maximum profile(unit:cm)

图 5 为蓄水前后面板沿坝轴向位移等值线.由于受河谷右岸陡斜坡的束窄作用,面板向河床方向发生“滑移挤压”变形.竣工期面板,尤其是一期面板,基本上都向左岸河床变形.蓄水后,面板变形特性有所改变,左右两侧面板均向河床变形,使得河岸两侧的面板受拉,河床中间部位的面板受压.

2.3.2 面板应力

竣工期面板应力主要集中在二期面板.二期面板因刚浇筑完工,且自重较小,因此二期面板无论是顺坡向应力还是坝轴向应力数值均很小.整个面板顺坡向应力基本上全为压应力区,最大压应力为 4.71 MPa.另外,从坝轴向应力分布规律(图 6)可以看出,由于受右岸陡斜坡河谷对面板产生向河床方向的束窄作用,在二期面板的右岸部位出现了拉应力,最大值为 0.23 MPa,这与前述竣工期面板坝轴向变位规律相吻合.蓄水后,面板顺坡向应力仍以压应力区为主,但也出现较大的拉应力区,主要集中在面板的顶部、底部及右岸面板局部区域,且 3 个区域连成了一片.顺坡向最大压应力为 6.80 MPa,最大拉应力为 3.75 MPa.面板坝轴向应力呈现出河谷中间部位受压状态,最大压应力为 1.34 MPa,两侧河岸部位呈受拉特性,最大拉应力为 1.25 MPa,这与前述蓄水期面板坝轴向位移分布规律相吻合.

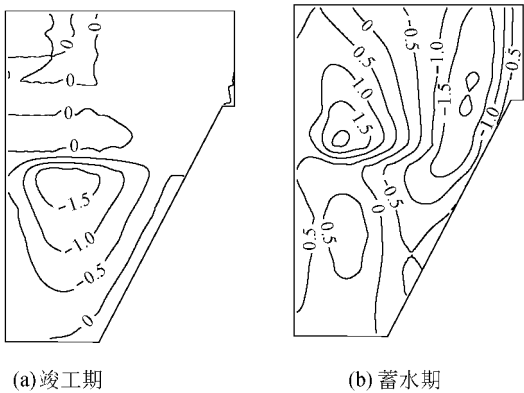


图 5 面板沿坝轴向位移(单位:cm)

Fig.5 Axial displacement of concrete slab(unit:cm)

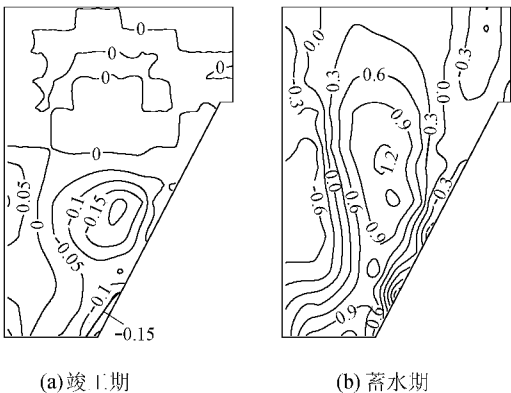


图 6 面板沿坝轴向应力(单位:MPa)

Fig.6 Axial stress of concrete slab(unit:MPa)

2.3.3 大坝接缝变形

竣工期面板接缝的三向变位值较小,大多处于“闭合”状态.蓄水后面板总体上由两侧河岸部位向河床方向变位,这使得河谷中部的面板垂直缝受压,两岸的面板垂直缝受拉,其中拉开位移最大值位于右岸的第 1 条垂直缝,为 0.97 cm.垂直缝的最大剪切位移为 1.47 cm.如果采用一道铜止水片,则有可能出现撕裂现象,因此宜在铜止水片下增设一道氯丁橡胶止水带,以适应两侧面板的相对变形.对于周边缝,左岸直立坡处的周边缝蓄水后全部拉开,右岸顶部也有少许拉开,最大拉开位移为 0.54 cm,大致位于左岸直立坡周边缝的中下部.其余部位的周边缝均是受压位移.蓄水后,在大多数周边缝部位面板向坝内侧发生沉降位移,最大沉陷位移 1.12 cm,大致位于右岸陡斜坡周边缝的中下部.此外,周边缝的剪切位移,基本上为面板相对于趾板向下

剪切,最大剪切变位为 0.64 cm,大致位于左岸直立坡周边缝的中部.蓄水后除部分周边缝的受压位移较大以外,其他各接缝的拉开、沉陷和剪切位移均在 2 cm 以内,此数值小于止水片的通常变形极值,因此周边缝的止水结构能够正常工作.

3 结 语

a. 计算结果表明,两岸高陡岸坡对坝体应力变形影响不是很明显,但河床或河岸较大的起伏突变对坝体应力变形影响较大,容易引起堆石体变形的不协调和应力水平的上升.因此,施工前可采用“削峰填谷”的方法,使大坝建基面平顺过渡.也可采用不同的堆石体填筑标准,使堆石体变形平稳连续.

b. 高陡岸坡对面板的应力变形影响较大,尤其斜陡坡,对面板的束窄作用明显,容易导致面板出现较大拉应力区和周边缝基本都拉开的情况.计算结果表明,对于百米级的面板坝,这些不利情况仍在设计可控范围之内.

c. 对于坝体分期施工和面板分期浇筑的高面板坝而言,坝体和面板应力变形较简单施工加载情况复杂得多.一期面板往往呈双向变形特性,且面板上部容易出现脱空现象.为此,在各分期面板的连接部位可布置双向受力钢筋.同时,为减小前期“子坝体”向上游的鼓出位移导致面板上部的脱空,可适当降低先期浇筑面板顶部高程,使之略低于其下部“子坝体”的顶面高程.

参考文献：

[1] DUNCAN J M, CHANG C Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division , ACSE ,1970 96(5) : 1629-1653.

[2] DUNCAN J M. Strength ,stress-strain and bulk modulus parameters for finite element analysis of stresses and movements in soil masses [R]. Berkrlry :University of California ,1980.

[3] 钱家欢,殷宗泽.土工原理与计算[M].北京 :中国水利水电出版社 ,1996 54-60.

[4] 顾淦臣,黄金明.混凝土面板堆石坝的堆石本构模型与应力变形分析[J].水力发电学报 ,1991(1) :12-24.

[5] 顾淦臣.钢筋混凝土面板堆石坝非线性有限元静动力分析[R].南京 :河海大学 ,1990.

[6] 姜弘道.水工结构工程与岩土工程的现代计算方法及程序[M].南京 :河海大学出版社 ,1992 276-289.

[7] 傅志安,凤家骥.混凝土面板堆石坝[M].武汉 :华中理工大学出版社 ,1993 :139-146.

[8] 岑威钧,朱岳明,罗平平.面板堆石坝有限元仿真计算及参数敏感性研究[J].水利水电科技进展 2005(4) :16-25.

Stress and deformation analysis of high CFRD under complicated topographic condition

CEN Wei-jun , REN Xu-hua , LI Qi-sheng

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract The 3D non-linear FEM was applied to prediction of the deformation and stress of a CFRD under complicated topographic condition with emphasis on analysis of the influences of high steep slope and fluctuant topographic boundary on the deformation and stress behaviors of CFRD by stage construction. The result shows that high steep slope is of little influence on the stress and deformation of rockfill of CFRD , while it is of great influences on stress and deformation of concrete slab and the deformation of peripheral joints. Especially , the high steep inclined slope makes concrete slab become narrow along riverbed , which leads to large tensile stress zone in concrete slab and open state of peripheral joints. It is also concluded that the fluctuant topographic condition is of negative effect on stress and deformation of rockfill , and some technical measures should be taken to overcome the disadvantages.

Key words CFRD ; high steep slope ; stage construction ; deformation ; stress