

黑泉面板坝新型止水结构三维弹塑性分析

郭兴文,王德信,杜荣强

(河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098)

摘要 利用结构模型试验得到的周边缝止水结构的数值分析模型,对黑泉砂砾石面板坝进行三维弹塑性有限元分析,模拟大坝施工及蓄水过程,预测大坝坝体、面板及各类接缝的应力与位移,并将计算结果与止水结构破坏试验结果以及已建面板坝的接缝观测资料进行了对比.结果表明,坝体、面板的变形和应力符合一般规律,面板缝和周边缝位移在正常范围内,新型止水结构有较好的变形能力.

关键词 砂砾石面板坝 止水结构 弹塑性分析 接缝位移

中图分类号 TV640.34

文献标识码 A

文章编号 1000-1980(2003)02-0132-04

黑泉水库面板堆石坝位于青海省境内湟水河支流北川河上游宝库河上,面板堆石坝最大坝高 123.5 m,坝顶长 433.0 m,上下游边坡分别为 1:1.55 和 1:1.40,坝址河谷基本呈 U 形,河谷底宽 240.0 ~ 250.0 m.大坝分区用洪冲积含漂砂砾卵石填筑.

在黑泉水库面板堆石坝的设计中,对接缝止水结构采用一种改进的止水结构形式.为论证其可行性与可靠性,先后进行了多项试验研究,并取得了一定成果^[1,2].本文结合结构模型试验得到的接缝止水结构数值分析模型^[3],对黑泉砂砾石面板坝进行三维弹塑性有限元分析,模拟大坝施工及蓄水过程,预测大坝坝体、面板及各类接缝的应力与位移,并与试验结果以及已建面板坝的接缝位移观测资料进行比较分析.

1 三维有限元计算

1.1 材料本构模型

1.1.1 砂砾石料本构模型

由计算分析比较^[3]可知,以砂砾石料为筑坝材料时,其本构模型以双屈服面模型较为适宜.该模型与 Duncan 模型不同之处在于按弹塑性理论的屈服面概念推导应力应变矩阵,可以考虑砂砾石料的剪胀剪缩特性和应力引起的各向异性.双屈服面由椭圆函数和幂函数组成:

$$f_1 = p^2 + r^2 q^2 \quad f_2 = q^s / p \quad (1)$$

式中: r, s ——屈服面参数,一般取 2; p, q ——八面体正应力与八面体剪应力, $p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$, $q = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$.

在弹塑性分析中,塑性应变增量按下式计算:

$$\{\Delta \epsilon\}_p = A_1 \Delta f_1 \frac{\partial f_1}{\partial \sigma_{ij}} + A_2 \Delta f_2 \frac{\partial f_2}{\partial \sigma_{ij}}$$

式中 A_1, A_2 为塑性系数,是一个非负数.

如果屈服函数 f_1 的历史最大值为 $f_{1\max}$,屈服函数 f_2 的历史最大值为 $f_{2\max}$,则有:当 $f_1 > f_{1\max}$ 且 $f_2 > f_{2\max}$ 时为全加载,有 $A_1 > 0 = A_2 > 0$;当 $f_1 \leq f_{1\max}$ 且 $f_2 \leq f_{2\max}$ 时为全卸载,有 $A_1 = A_2 = 0$;当 $f_1 \leq f_{1\max}$ 或 $f_2 \leq f_{2\max}$ 时为部分加载,有 $A_1 = 0$ 或 $A_2 = 0$.

1.1.2 接触面计算模型

面板坝的混凝土面板与垫层料的刚度差异很大,此接触面会发生错动或滑移.为反映结构材料间的相

互作用,目前一般采用设置无厚度接触面单元(Goodman 单元)或设置薄层单元的途径加以模拟.一些研究表明^[3],在接触面上设置 Goodman 单元或薄层单元后,面板最大拉应力有所改善,且更接近于实际情况.

三维问题中无厚度接触面单元的两个切线方向的劲度为

$$K_{yx} = K'\gamma_w \left(\frac{\sigma_{yy}}{p_a} \right)^{n'} \left(1 - \frac{R_f' \tau_{yx}}{\sigma_{yy} \tan \delta} \right)^2 \quad K_{yz} = K'\gamma_w \left(\frac{\sigma_{yy}}{p_a} \right)^{n'} \left(1 - \frac{R_f' \tau_{yz}}{\sigma_{yy} \tan \delta} \right)^2 \quad (2)$$

式中: K_{yx}, K_{yz} —— x, z 方向的单位长度剪切劲度模量; γ_w ——水的容重; δ ——两接触材料间的摩擦角; K', n', R_f' ——初始剪切劲度无量纲系数、应力指数、破坏比,由直剪试验确定.

用式(2)计算剪切劲度模量时,若两种材料间产生较大位移,使剪应力达到或超过抗剪强度,则需作如下修正:当接触面上 σ_{yy} 为压且 $\tau > \tau_f$ 时,令 $\tau = \tau_f, K = K_{sr}, K_{sr}$ 为残余刚度;当接触面上 σ_{yy} 为拉时,接触面上无剪力作用, K_{sr} 取用很小值,一般取 $K = 10 \text{ kPa/m}$.法向劲度系数 K_{yy} ,当接触面受压时,取较大值(如 $K_{yy} = 10^7 \text{ kPa/m}$);当接触面受拉时,取 K_{yy} 为较小值(如 $K_{yy} = 10 \text{ kPa/m}$).

1.1.3 接缝止水系统数学模型

混凝土面板与趾板间周边缝及混凝土面板间伸缩缝设止水结构,为模拟接缝止水材料力学特性,计算伸缩缝及周边缝的变位,在有限元分析中通过设置缝间连接单元进行模拟.通过拉、压、剪试验,得到力与变形的关系式 $F = F(\delta)$,其对应的切线劲度模量可由 $K = \frac{dF}{d\delta}$ 求得.笔者通过试验得到了新型接缝止水系统受力与变形关系式^[3]拉、压为 $K_{yy} = 0.0027\delta_{yy}^2 + 0.0716\delta_{yy} + 0.533$ 竖剪(垂直缝长)为 $K_{yx} = 0.0016\delta_{yy} + 0.0257$ 横剪(顺缝长)为 $K_{xz} = 10.359\delta_{yy}$.

1.1.4 混凝土材料

混凝土按线弹性考虑.

1.2 单元剖分

沿坝轴分 28 个剖面,沿坝高剖分 12 层,共 2969 个单元,见图 1、图 2.面板与垫层间设无厚度接触面单元,面板与趾板间设置周边缝连接单元,面板伸缩缝间设置竖缝连接单元.

1.3 计算参数

坝料计算参数见表 1.

表 1 弹塑性计算参数
Table 1 Parameters of elastoplastic model

坝料	γ /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	C /kPa	K	K_{sr}	n	R_f	φ_0	$\Delta\varphi$	C_d	n_d	R_d
垫层料	22.0	0.00	1050	1650	0.32	0.88	49.5	7.25	0.0018	0.81	0.58
过渡料	22.4	0.00	1000	1650	0.34	0.89	54.0	12.00	0.0018	0.81	0.58
排水体	22.4	0.00	900	1890	0.34	0.89	53.0	10.70	0.0030	0.85	0.66
砂砾石	22.4	0.00	975	1800	0.36	0.80	47.0	6.75	0.0034	0.70	0.66
堆石	22.2	10.00	550	1000	0.38	0.76	46.0	6.50	0.0034	0.70	0.70
河床料	21.0	0.00	1000	1400	0.40	0.80	50.0	10.70	0.0019	0.85	0.58

接触面参数 $\delta, K', n', R_f', K_{sr}$ 分别取为 $36.6^\circ, 4800, 0.56, 0.74, 7500$.连接单元参数如 1.1.1 中所述.混凝土 $\gamma = 24.5 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}, E = 17 \times 10^4 \text{ MPa}, \mu = 0.167$.

1.4 荷载分级及加荷次序

有限元计算时,加荷考虑施工次序,同时考虑坝体临时度汛水压力作用.对于度汛水压力,通过蓄水至度汛水位作为荷载,然后放空库水卸荷.将整个荷载分 18 级施加.1~12 级模拟坝体填筑,13~14 级模拟面板施工,15~18 级模拟蓄水至正常高水位.

1.5 成果分析

本文的主要目的是通过数值模拟分析预测接缝的位移,限于篇幅,仅给出蓄水期面板应力、挠度以及接缝的位移成果,列于图 3~图 6.其他成果详见文献^[3].

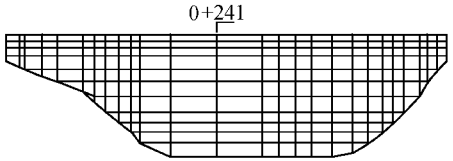


图 1 面板剖分

Fig.1 Meshes of slab

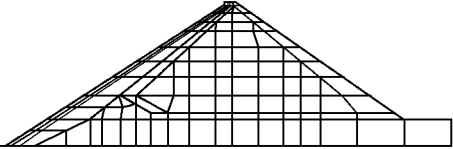


图 2 0+241 断面剖分

Fig.2 Meshes of section 0+241

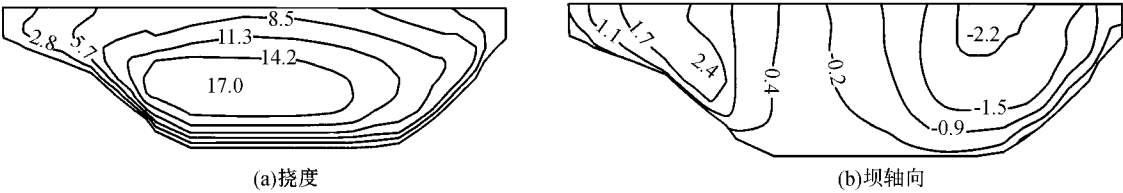


图 3 蓄水期面板位移(单位 :cm)

Fig.3 Displacement of the slab during water storage period(unit :cm)

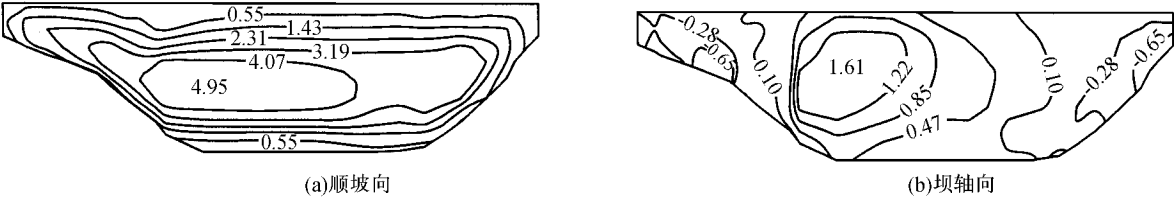


图 4 蓄水期面板应力(单位 :MPa 拉为负)

Fig.4 Stress of the slab during water storage period(unit :MPa “-” means tensile stress)

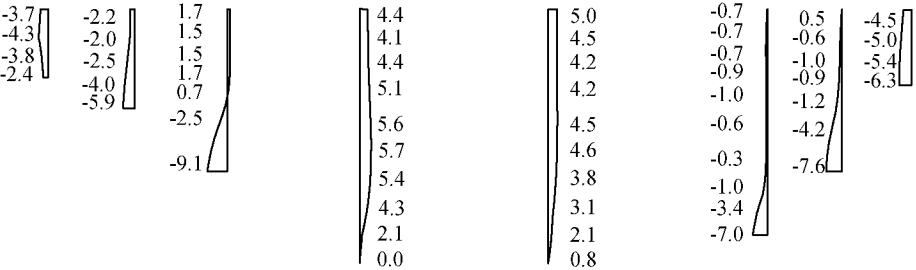


图 5 蓄水期面板缝拉压位移(单位 :mm 拉为负)

Fig.5 Displacement of slab joints during water storage period(unit :mm “-” means tensile stress)

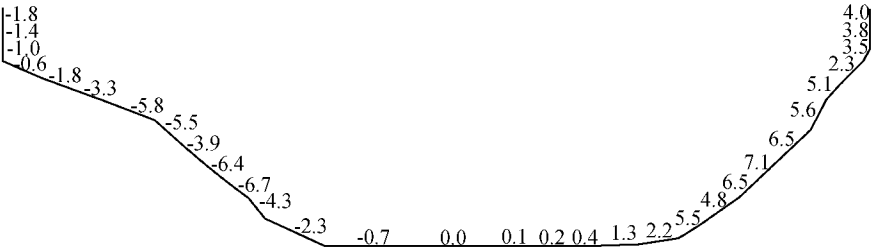


图 6 蓄水期周边缝剪切位移(顺缝长方向)(单位 :mm)

Fig.6 Shear displacement (in joint direction) of peripheral joints during water storage period(unit :mm)

从计算成果和列出的部分成果图可看出,蓄水后,面板挠度变形全部向坝内,河床中间 1/2 坝高区域较大,最大值为 17.0 cm.面板轴向向河中挤压位移最大值为 2.4 cm.面板顺坡向应力最大压应力为 4.95 MPa,位置在靠左岸中部.面板轴向应力在两岸一些区域有拉应力,最大值为 1.05 MPa.

面板缝蓄水期最大竖剪变位(垂直缝长方向)3.00 mm,靠右岸底部;最大横剪变位(沿缝长方向)7.31 mm,靠左岸中部;最大张开变位 9.08 mm,靠左岸底部;最大压紧变位 5.71 mm,位于河谷中部.

周边缝蓄水期最大竖剪变位 4.37 mm,最大横剪变位 7.14 mm,最大张开变位 5.23 mm,最大压紧变位 4.58 mm.周边缝横剪位移的最大值在竣工期及蓄水期均位于左右两岸趾板轴线变坡处,反映了河谷的影响.竖剪及拉压位移分布规律较好.

2 计算结果与观测结果的比较

由数值分析得到的周边缝最大变位值分别为:竖剪 4.37 mm,横剪 7.14 mm,张拉 5.25 mm.为进一步考察面板堆石坝周边缝位移的大小情况,本文将计算结果与表 2 所列出的部分面板堆石坝周边缝的观测资料进行对比分析.

从表 2 可以看出,黑泉面板堆石坝预测接缝位移处于正常范围内,接缝位移处于可控之列,按工程类比推论,新止水结构是可行的.

表 2 面板堆石坝周边缝位移资料
Table 2 Displacement of peripheral joints of CFRD

坝 名	建成年份	坝高/m	堆石类型	止水形式	接缝位移/mm		
					张 开	横 剪	竖 剪
阿里亚	1980	160.0	玄武岩	IGAS,PVC,铜片	22.8	24.4	55.2
萨尔瓦金娜	1984	148.0	砂砾石	玛蹄脂,PVC,铜片	9.7	15.4	19.5
考 兰	1984	130.0	石灰岩	IGAS,PVC,铜片	5.0		8.0
格里拉斯	1978	125.0	砂砾岩	IGAS,PVC,铜片	100.0		36.0
谢罗罗	1983	125.0	花岗岩	橡胶片,PVC	30.0	21.0	50.0
塞沙娜	1971	110.0	石英岩	PVC,铜片	12.0	7.5	
辛 戈	1997	140.0	花岗岩麻岩	玛蹄脂,PVC,铜片	20.0		
成屏一级	1989	74.5	凝灰岩	橡胶片,SR,铜片	13.1	20.6	28.3
东 津	1995	88.5	砂岩	SR,铜片	33.0		48.0
西北口	1990	95.0	灰岩	GB,F 橡胶,铜片	7.2		10.4

3 计算结果与试验结果的比较

已有的研究表明,止水结构适应变位的可靠性取决于横剪变位极限.为进一步论证新型止水结构适应变形的安全富裕度,笔者进行了横剪破坏试验^[3],得到横剪极限变位值为 27.84 mm.此结果远远大于计算预测值 7.14 mm,同时也大于表 2 所列面板堆石坝接缝横剪变位的观测值.因此,新型止水结构能满足黑泉工程的要求.

4 结 语

对黑泉砂砾石面板坝所进行的三维弹塑性有限元分析结果表明,大坝面板缝及周边缝产生的位移以及坝体、面板的变形和应力分布符合一般规律,坝体和面板缝及周边缝位移在正常范围内.与破坏试验结果以及已建面板坝的接缝观测资料所进行的比较分析,论证了周边缝新止水结构有较好的变形能力.建议黑泉水库面板堆石坝接缝采用新型止水结构.

参考文献：

[1] 郭兴文,江泉,王德信.面板坝接缝不锈钢波纹状止水片试验研究[J].水利水电技术,1999,(3) 57—58.
[2] 郭兴文,江泉,蔡新,等.黑泉面板坝周边缝不锈钢波纹止水结构研究[J].河海大学学报(自然科学版),1999,27(5) 53—56.
[3] 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.

3-D elastoplastic analysis of Heiquan CFGD with a new structure of joint seal

GUO Xing-wen, WANG De-xin, DU Rong-qiang

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

Abstract :Based on a new model of peripheral joint designed for the Heiquan concrete faced gravel-filled dam (CFGD), the 3-D elastoplastic finite element method was used for simulation of the construction and water storage processes of the Heiquan CFGD, and the stress and deformation of the dam body, the slab, and all kinds of joints were predicted. The results calculated were compared with those from failure tests on the new water seal structure and the observed data about joints of some existing CFGDs. It is indicated that the deformation and stress distributions calculated are reasonable, and that the new structure is of good behavior of deformation.

Key words :concrete faced gravel-filled dam (CFGD) ; water seal structure ; elastoplastic analysis ; joint displacement