

文章编号 :1007 - 649X(2000)03 - 0037 - 04

碾压混凝土重力坝静动力分析

王宗敏,赵晓西

(郑州工业大学水利与环境工程学院,河南 郑州 450002)

摘 要 :碾压混凝土坝受施工影响,常在混凝土碾压层间出现结合面夹层,影响坝体变形及内应力分布.应用等效模量理论,把层状体结构转换为横观各向同性体进行应力和位移计算.根据 Aboudi 公式预测弹性参数.结合龙滩碾压混凝土重力坝,采用有限元法分析了碾压混凝土的横观各向同性性质对坝体应力分布和动力特性的影响.结果表明,对比各向同性体模型,碾压混凝土重力坝采用横观各向同性体模型,计算的坝基面的坝踵及坝趾处应力集中程度变化明显,坝体位移相对各向同性体计算的位移偏大.进行碾压混凝土坝的静动力分析时,把层状体结构物简化为横观各向同性体的方法是简单可行的.
关键词 :碾压混凝土 ; 层状体结构 ; 重力坝 ; 有限元法 ; 应力分析 ; 动力特性
中图分类号 :TV 642.2 ;TV 31 文献标识码 :A

0 引言

碾压混凝土筑坝采用超干硬性无坍落度混凝土,大面积薄层连续浇筑,在层面上强力振动碾压的施工方法.由于成层碾压施工的特点,层与层之间的结合面夹层难以消除,使得结构易受层间软弱带的影响发生破坏.为了建立合理的坝体结构设计标准,应了解含水平缺陷坝体结构的真实应力状态和动力特性.

混凝土摊铺碾压的层体厚度一般为 20 ~ 40 cm,层状结构的数值分析可以用有限元法把结构划分成许多本体和夹层单元来进行.当进行结构分析时,需按层采用大量的单元,但因实际工作量太大而难以实现.实验证明^[1],碾压混凝土在水平层面方向和竖向呈现出不同的弹性常数,这种类似层状材料的正交各向异性性质在力学特性上称为横观各向同性.本文把层状体结构按照位移等效原则变化成一个均质体,采用微观力学模型求层状体等效弹性参数的方法,并结合龙滩实际工程分析了碾压混凝土的横观各向同性性质对于重力坝坝体应力分布和动力特性的影响.

1 层状体简化计算模型

把碾压混凝土层状体结构简化为碾压混凝土

本体和层间软弱体两部分,且假定这两部分介质均为各向同性弹性体(如图 1(a)所示).根据等效模量理论,在位移等效原则的前提下把这一简化结构转化为横观各向同性体(如图 1(b)所示).

设碾压混凝土本体的弹性模量和泊松比为 E_b, μ_b ,相应的层间软弱体的弹性参数为 E_j, μ_j ,软弱体厚度为 h_j ,考虑到两种相近材料泊松比的变化较小,假定 $\mu_j = \mu_b$,通过位移等效原则,即可确定横观各向同性体的物理方程为:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\varepsilon} &= \boldsymbol{D}^{-1} \boldsymbol{\sigma}; & (1) \\ \boldsymbol{\varepsilon} &= (\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{33}, \gamma_{12}, \gamma_{23}, \gamma_{31})^T; \\ \boldsymbol{\sigma} &= (\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}, \tau_{12}, \tau_{23}, \tau_{31})^T; \\ \boldsymbol{D}^{-1} &= \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\mu_1}{E_1} & -\frac{\mu_3}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_1}{E_1} & \frac{1}{E_1} & -\frac{\mu_3}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_3}{E_3} & -\frac{\mu_3}{E_3} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\alpha(1+\mu_1)}{E_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_3} \end{bmatrix}, & (2) \end{aligned}$$

式中:数字 3 对应于纵向(即垂直于层面方向);1, 2 对应于横向(层面内任意两个互相垂直的方向). E_1, μ_1 为横向弹性模量和泊松比; E_3, μ_3 为

纵向弹性模量和泊松比 ; G_3 为纵横剪切模量.

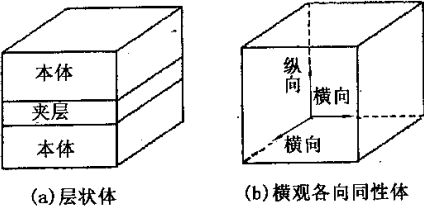


图 1 计算模型

在实际应用中,按位移等效原则,由简化层状体结构弹性参数确定均质横观各向同性体弹性参数是很不方便的,郝巨涛^[2]证明 Aboudi^[3]根据微观力学模型求层状体等效弹性参数的方法与有限元计算得到的结果十分吻合,可以被用来预测弹性参数,其计算公式为:

$$\begin{aligned} E_1 &= 4d_{44} \cdot \frac{d_{33}(d_{11} - d_{44}) - d_{13}^2}{d_{33}d_{11} - d_{13}^2}; \\ E_3 &= \frac{d_{33}(d_{11} - d_{44}) - d_{13}^2}{d_{11} - d_{44}}; \\ \mu_1 &= \frac{d_{33}(d_{11} - 2d_{44}) - d_{13}^2}{d_{11}d_{33} - d_{13}^2}; \\ \mu_3 &= \frac{d_{13}}{2(d_{11} - d_{44})}; \\ G_3 &= d_{66}. \end{aligned}$$

其中:

$$\begin{aligned} d_{11} &= \frac{1}{\Delta}[(h_b + h_j)(\lambda_b + 2v_b)(\lambda_j + 2v_j) + 4h_b h_j(v_b - v_j)(\lambda_b - \lambda_j + v_b - v_j)]; \\ d_{12} &= \frac{1}{\Delta}[(h_b + h_j)(\lambda_b \lambda_j + 2(\lambda_b h_b + \lambda_j h_j)(v_j h_b + v_b h_j))]; \\ d_{13} &= \frac{1}{\Delta}(h_b + h_j)[\lambda_b h_b(\lambda_j + 2v_j) + \lambda_j h_j(\lambda_b + 2v_b)]; \\ d_{33} &= \frac{1}{\Delta}(h_b + h_j)(\lambda_b + 2v_b)(\lambda_j + 2v_j); \\ d_{44} &= \frac{1}{2}(d_{11} - d_{12}); \\ d_{55} &= d_{66} = \frac{v_b v_j(h_b + h_j)}{(v_b h_j + v_j h_b)}; \\ \Delta &= (h_b + h_j)[h_b(\lambda_j + 2v_j) + h_j(\lambda_b + 2v_b)]. \end{aligned}$$

上式中, λ, v 为 Lamé 常数.

$$\lambda = \frac{\mu E}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}, \quad v = \frac{E}{2(1 + \mu)}.$$

2 工程实例

龙滩水电站位于赤水河上游,广西天峨县境

内,是一座大型水电工程.大坝采用碾压混凝土重力坝,坝体计划分两期施工,二期建成后最大坝高 216.5 m,将是世界上最高的碾压混凝土坝.计算的坝体为非溢流挡水坝段,坝顶高程 406.5 m,坝高 196.5 m,坝顶宽度 18 m,上游坝面在 270 m 高程以下设一折坡,坡比 1:0.25,下游坝面坡比 1:0.73,起坡点高程为 382 m,坝底宽 158.45 m.基础设 6 m 厚的常态混凝土(CC)垫层,其上为 8 m 厚的 RCD 碾压混凝土,然后是 RCC 碾压混凝土,计算中上游水位取为正常蓄水位 400 m,下游无水,暂不考虑扬程压力及淤沙作用.

计算区域坝基范围向上、下游延伸 2 倍坝高,向坝基深度延伸 2 倍坝高.地基上游自由、下游侧边设水平向约束,底边设竖向约束.由于地基变形在建坝以前已经完成,采用无质量坝基方案进行分析.坝体碾压混凝土分别采用各向同性与横观各向同性两种模型,以考察碾压混凝土横观各向同性性质对坝体应力及动力特性的影响.基岩假定为均质各向同性线弹性材料,重力坝及基础变形简化为平面应变问题来处理.有限元网格剖分如图 2 所示,采用平面 8 节点单元,单元总数 4530,节点总数 13917.

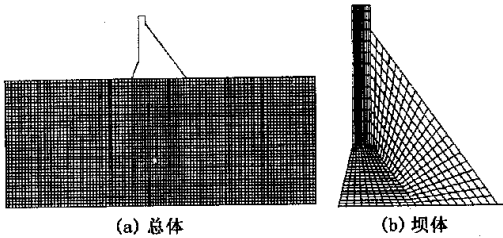


图 2 龙滩碾压混凝土重力坝有限元网格剖分图

2.1 静力分析

计算中材料的常数来自龙滩实测数据^[1],列于表 1. 夹层体参数为^[2] $E_j = 0.322 \times 10^4$ MPa, $\mu_j = 0.2$, $h_j = 1.0$ cm,按上一节叙述的方法用 Aboudi 公式确定横观各向同性体的 5 个弹性参数为: $E_1 = 2.25 \times 10^4$ MPa, $E_3 = 1.69 \times 10^4$ MPa, $\mu_1 = 0.1604$, $\mu_3 = 0.1228$, $G_3 = 0.699 \times 10^4$ MPa.

表 1 材料常数表

材料名称	E/MPa	μ	$\gamma/(\text{MN}/\text{m}^3)$
碾压混凝土本体	2.4×10^4	0.163	0.024
基岩	1.6×10^4	0.27	0.0

分别考虑空库(自重作用下)和满库(在水压和自重共同作用下)两种工况对重力坝进行应力分析.计算结果表明,碾压混凝土的横观各向同性对坝体上部的应力影响较小,各截面应力分布规

律,包括 σ_x 、 σ_y 和 τ_{xy} ,变化不大且基本相同.但坝基面,特别是上游坝踵,下游坝趾处的应力集中程度变化显著.图 3、图 4 和表 2、表 3 给出了部分结果.

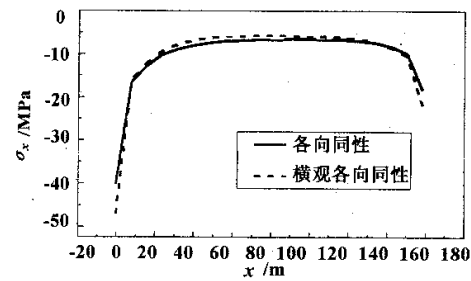


图 3 满库时坝基面 σ_x 分布图

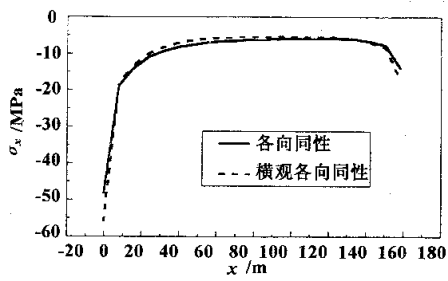


图 4 空库时坝基面 σ_x 分布图

表 2 空库时坝踵、坝趾处应力计算结果

位置	应力/ MPa	各向同性	横观各向同性	相对差异/ %
坝踵	σ_x	-53.691	-48.228	-10.17
	σ_y	-58.021	-49.945	-13.92
	τ_{xy}	-37.668	-32.286	-14.29
	σ_1	-18.125	-16.789	-7.37
	σ_2	-24.616	-19.940	-19.00
坝趾	σ_x	-14.881	-12.616	-15.22
	σ_y	-9.181	-7.592	-17.31
	τ_{xy}	9.389	7.766	-17.29
	σ_1	-2.200	-1.942	-11.73
	σ_2	-5.441	-4.267	-21.58

表 3 满库时坝踵、坝趾处应力计算结果

位置	应力/ MPa	各向同性	横观各向同性	相对差异/ %
坝踵	σ_x	-44.497	-39.520	-11.19
	σ_y	-51.318	-44.038	-14.19
	τ_{xy}	-31.279	-26.474	-15.36
	σ_1	-16.471	-15.208	-7.67
	σ_2	-21.139	-16.986	-19.65
坝趾	σ_x	-19.244	-16.753	-12.94
	σ_y	-11.374	-9.573	-15.83
	τ_{xy}	11.758	9.918	-15.65
	σ_1	-2.910	-2.616	-10.10
	万寿数据	-6.934	-5.574	-19.61

另外,经过计算比较发现,在自重作用下,横观各向同性体模型给出的重力坝顶部位移偏大,向上游的水平位移比各向同性体模型超出 25%,竖向位移比各向同性体模型超出 17%,但应力值差别不大.

在水压力作用下,位移差别也较大,图 5、图 6 分别表示出了沿重力坝迎水面上的水平位移和竖向位移分布,故在进行碾压混凝土坝的结构分析时应采用横观各向同性体模型.

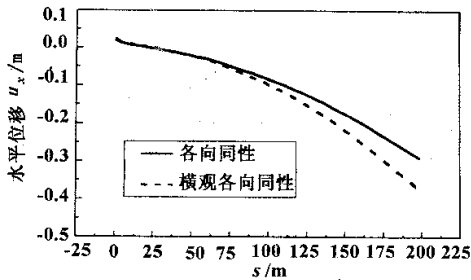


图 5 满库时重力坝迎水面上水平位移分布图

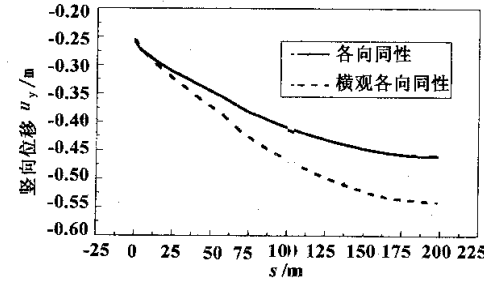


图 6 满库时重力坝迎水面上竖向位移分布图

2.2 动力分析

结构模态计算采用 Block Lanczos 方法,分析了龙滩碾压混凝土重力坝前 8 阶振型的动力特性.第 1、2、4、5、7 阶振型以水平向振动为主,第 3、6、8 阶振型以竖向振动为主.表 4 列出了龙滩碾压混凝土重力坝在各向同性与横观各向同性条件下的自振特性.

表 4 龙滩碾压混凝土重力坝自振特性

振型号	各向同性		横观各向同性	
	固有频率/Hz	周期/s	固有频率/Hz	周期/s
1	0.45064	2.21907	0.41035	2.43694
2	0.89491	1.11743	0.83006	1.20473
3	0.93838	1.06567	0.86290	1.15888
4	1.64210	0.60898	1.40200	0.71327
5	2.67390	0.37399	2.31750	0.43142
6	2.82670	0.35377	2.40410	0.41596
7	3.84490	0.26008	3.34990	0.29852
8	4.20040	0.23807	3.67070	0.27243

由表 4 可以看到 ,混凝土重力坝横观各向同性动力特性与各向同性动力特性基本一致 ,只是由于横观各向同性体弹性模量较各向同性体略低一些 ,自振周期略有延长 ,自振频率略有降低 .

2.3 网格尺寸

结构分析的精度与计算效率在很大程度上取决于有限元模型的建立 ,网格的粗细直接影响到计算的工作量与计算精度 .重力坝坝踵和坝趾处存在特别尖锐的应力集中 ,网格分得愈细 ,这两点附近的应力值愈大 .

本文计算了龙滩碾压混凝土重力坝在自重作用下 ,坝踵附近随着 3 次网格尺寸变化的正应力 σ_x 值变化情况如表 5 所示 .有关结构应力与有限元模型网格尺寸的敏感性问题进行进一步研究 .

表 5 坝踵附近 σ_x 随 3 次网格尺寸变化值

次数	单元数	结点数	最大 σ_x 值/MPa
1	164	497	- 31.47
2	520	1675	- 44.51
3	730	2317	- 49.49

3 结论

碾压混凝土筑坝采用大面积薄层连续浇筑 ,在层面上振动碾压的施工方法 ,坝体材料具有一

定程度的横观各向同性性质 .本文将碾压混凝土层状体结构简化为横观各向同性体 ,采用有限元法分析了龙滩碾压混凝土重力坝应力状态和动力特性 ,获得了一些有益结论如下 :

(1)碾压混凝土横观各向同性性质对坝体上部的应力分布规律影响不大 ,但坝基面的坝踵及坝趾处应力集中程度变化明显 .采用横观各向同性体计算的坝体位移比各向同性体计算的位移偏大 ,在进行碾压混凝土坝的应力位移分析时应采用横观各向同性体模型 .

(2)混凝土重力坝横观各向同性动力特性与各向同性动力特性相比 ,自振周期略有延长 ,自振频率略有降低 .

(3)在进行碾压混凝土坝的静动力分析时 ,本文把层状体结构物简化为横观各向同性体的方法是简单、可行的 .

参考文献 :

[1] 董跃星 .各向异性材料断裂问题的边界单元法及其工程应用 [D].北京 :清华大学 ,1996. 122 - 136 .
[2] 郝巨涛 .成层结构及碾压混凝土坝的应力稳定分析方法 [D].北京 :清华大学 ,1995. 16 - 21 .
[3] JACOB Aboudi .Mechanics of Composite Materials , A Unified Micromechanical Approach[M]. Amsterdam :Elsevier ,1991. 107 - 109 .

Static and Dynamic Analysis of RCC Gravity Dam

WANG Zong - min , ZHAO Xiao - xi

(College of Hydraulic & Environmental Engineering ,Zhengzhou University of Technology ,Zhengzhou 450002 ,China)

Abstract :Due to construction conditions ,RCC(roller compacted concrete) dam often occurs weak intercalated layer defects ,which may lead to changes in the distributions of stress and displacement in the structure .In order to ascertain the stress and displacement state in the layered dam structure , a multilayered element can be transformed to a transversely isotropic one based on the modulus equivalent principle .Aboudi formula is used to calculate the parameters of elasticity .Taking Longtan dam as an example ,the effect of the transversely isotropy of RCC on the stress distribution and dynamic characteristics is analyzed by using finite element method .By comparing the transversely isotropic model with the isotropic model ,the results show that stress concentration degrees of dam heel and dam toe on the surface of RCC gravity dam foundation change obviously ,and the displacement of dam body becomes larger .This paper gives a simple and feasible method which simplifies a multilayered structure to a transversely isotropic one on the research of static and dynamic analysis of RCC gravity dam .

Key words :roller compacted concrete(RCC) ;layered structure ;gravity dam ;finite element method ;stress analysis ;dynamic characteristics