

阿海重力坝倾斜层状地基力学参数敏感性分析

王大胜¹,张燎军¹,张慧星¹,王伟华²

(1.河海大学水利水电工程学院,江苏 南京 210098;2.河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098)

摘要 基于大型通用商业软件 ADINA,研究了倾斜层状岩体地基的有限元模型,并以云南阿海水电站混凝土重力坝为背景,通过调整地基垂直层面和平行层面的力学参数,进行敏感性分析.研究表明,复杂层状地基的力学参数变化对坝体应力和变形有明显影响,随着坝基岩体垂直和平行层面变形模量的改变,坝体应力和变形相应改变.

关键词 阿海水电站;重力坝;倾斜层状地基;本构关系;ADINA;敏感性分析

中图分类号 TV642 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2008)04-0511-05

阿海水电站位于云南省丽江市玉龙县与宁蒗县交界的金沙江中游河段,为金沙江中游河段规划 8 个梯级电站的第 4 个梯级,混凝土重力坝置于岩性以 D_{1a} 为主的基础上,基础条件相对较差,坝基岩体呈现为软硬不均的特性,在平行和垂直层面 2 种情况下变形模量差别较大,各向异性明显,对重力坝稳定有着明显的影响.

在大坝的设计与计算中,地基对大坝的稳定性起着十分重要的作用.倾斜层状地基是一种复杂的地基形式,其平行层面和垂直层面的物理力学性质有较大差异,本构关系相当复杂^[1-3],而对层状地基的研究相对较少,从而大大增加了大坝设计计算的难度.层状地基属于一种特殊的各向异性体,可以采用横观各向同性的力学模型进行模拟.

ADINA 是一种非线性、动力有限元仿真分析软件. ADINA 在计算理论和求解问题的广泛性方面,尤其针对结构非线性、流固耦合、结构抗震等复杂问题的求解具有强大优势.本文运用该软件建立了云南阿海重力坝复杂层状地基的坝-地基有限元分析模型,通过层状地基的物理力学参数的敏感性分析,研究了力学参数变化对大坝变形和应力的影响.

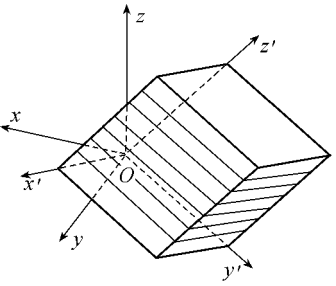


图 1 局部与整体坐标

Fig.1 Local and global coordinate systems

1 本构模型

对于图 1 所示的横观各向同性岩体,以层面为 $x'Oy'$ 平面,法向为 z' 轴,则在局部坐标 $Ox'y'z'$ 中的弹性矩阵^[4-7]为

$$D = R \left[\begin{array}{ccc|ccc} 1 - n\mu_2^2 & & & & & \\ \mu_1 + n\mu_2^2 & 1 - n\mu_2^2 & & & & \\ \mu_2(1 + \mu_1) & \mu_2(1 + \mu_1) & (1 - \mu_1^2)/n & & & \\ 0 & 0 & 0 & G_1/R & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_2/R & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_2/R \end{array} \right] \quad \text{对 称} \quad (1)$$

其中

$$R = \frac{E_1}{(1 - \mu_1 - 2n\mu_2^2)(1 + \mu_1)} \quad n = \frac{E_2}{E_1} \quad G_1 = \frac{E_1}{2(1 + \mu_1)}$$

式中: E_1, μ_1 ——层面内的弹性模量及泊松比; E_2, G_2, μ_2 ——垂直于层面方向的弹性模量、剪切模量及泊

松比.
应力、应变由局部坐标系 $Ox'y'z'$ 转换到整体坐标 $Oxyz$ 中,有

$$\sigma = D\varepsilon$$
$$D = LD'L^T$$

(2)

其中

$$L = \begin{bmatrix} l_1^2 & l_2^2 & l_3^2 & 2l_1l_2 & 2l_2l_3 & 2l_3l_1 \\ m_1^2 & m_2^2 & m_3^2 & 2m_1m_2 & 2m_2m_3 & 2m_3m_1 \\ n_1^2 & n_2^2 & n_3^2 & 2n_1n_2 & 2n_2n_3 & 2n_3n_1 \\ l_1m_1 & l_2m_2 & l_3m_3 & l_1m_2 + l_2m_1 & l_2m_3 + l_3m_2 & l_3m_1 + l_1m_3 \\ m_1n_1 & m_2n_2 & m_3n_3 & m_1n_2 + m_2n_1 & m_2n_3 + m_3n_2 & m_3n_1 + m_1n_3 \\ n_1l_1 & n_2l_2 & n_3l_3 & n_1l_2 + n_2l_1 & n_2l_3 + n_3l_2 & n_3l_1 + n_1l_3 \end{bmatrix}$$

式中: σ ——整体坐标中的应力列阵; ε ——整体坐标中的应变列阵; $l_i, m_i, n_i (i = 1, 2, 3)$ ——局部坐标轴与整体坐标轴之间夹角的余弦.

由于材料输入和应力输出的方向对应于单元坐标方向,一般情况下单元坐标系不平行于整体坐标系或局部坐标系,故应用时通常需要将单元坐标系旋转至与整体或局部坐标系平行后进行求解.在 ADINA 中可以通过定义材料坐标系来完成坐标变换.

2 计算模型及参数

本文选取该重力坝的 10 号坝段、厂坝结合方案进行有限元分析.10 号坝段坝底高程 1372.00 m,坝顶高程 1510.00 m.上游正常蓄水位为 1504.00 m,下游正常尾水位为 1417.48 m,坝前淤沙高程 1480.00 m(年限为 100 a).淤沙浮密度为 950 kg/m^3 ,内摩擦角为 24° .取单位厚度坝体和坝基进行计算分析.计算范围为:上、下游方向和深度方向地基分别取 1.5 倍坝基宽度.坐标选择为: y 轴指向下游, z 轴竖直向上.其中坝基采用平面应变单元,考虑了 15 个材料的分区.坝体采用平面应力单元,考虑了 2 种材料.整个模型共划分单元 2468 个,节点 2598 个,有限元模型如图 2 所示,材料分区及关键点如图 3 所示.坝踵、坝顶、坝趾及厂房下游面底部关键点分别为 A 点、B 点、C 点和 D 点.考虑地基的各向异性特点,对力学参数在其允许值范围内作相应调整后进行有限元计算分析^[8-9].

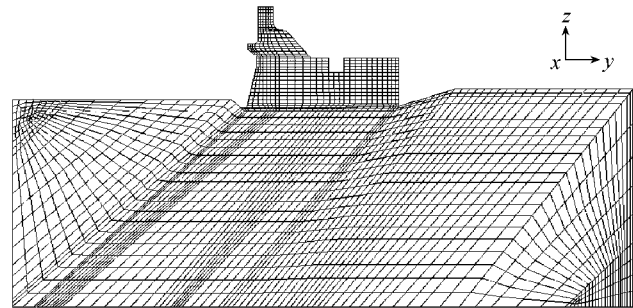


图 2 模型网格
Fig.2 Mesh of the model

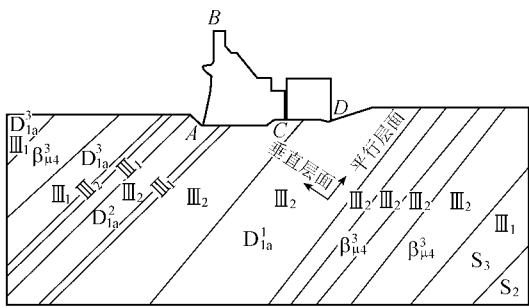


图 3 材料分区及关键点
Fig.3 Material subarea and key points

基于正常运行情况进行计算分析.正常运行工况为:坝体自重 + 正常蓄水位 + 下游水位 + 扬压力 + 淤沙压力.

计算时,坝体混凝土采用 ADINA 中的混凝土材料来模拟,弹性模量取 25.5 GPa ,泊松比取 0.167,岩体泊松比取 0.25.坝基岩体主要为 III_1 和 III_2 类岩体,以 III_2 类岩体居多.而 III_2 类岩体的变形模量相对 III_1 类岩体为小,且 III_2 类岩体平行层面的变形模量与垂直层面的变形模量比更大,各向异性比甚至达到 3 倍.坝基进行敏感性分析的变形模量取值时,更多考虑 III_2 类岩体变形模量变化的情况.具体岩体不同变形模量取值见表 1.考虑坝基自重应力为初始地应力,模型加载采用 ADINA 中的 pressure 方式.其中扬压力的加载由于没有渗流资料,不考虑坝基的渗流作用.

表 1 坝基岩体变形模量

Table 1 Deformation moduli of dam foundation rock

GPa

工 况	Ⅲ ₁ 变形模量		Ⅲ ₂ 变形模量		工 况	Ⅲ ₁ 变形模量		Ⅲ ₂ 变形模量	
	垂直	平行	垂直	平行		垂直	平行	垂直	平行
工况 1	5	5	3	3	工况 6	5	10	4	9
工况 2	5	10	3	8	工况 7	5	10	4	10
工况 3	5	10	3	9	工况 8	6	11	4	10
工况 4	5	10	3	10	工况 9	7	12	5	10
工况 5	5	10	4	8					

注：垂直 指垂直层面的变形模量；平行 指平行层面的变形模量；工况 1 为各向同性岩体。

3 坝基敏感性分析

3.1 变形模量对坝体位移的影响

9 个工况坝体关键点位移见表 2。

表 2 坝基不同变形模量大坝关键点位移

Table 2 Displacements of dam key points for different deformation moduli

cm

工 况	A 点		C 点		D 点		B 点	
	u_z	u_y	u_z	u_y	u_z	u_y	u_z	u_y
工况 1	-5.09	2.77	-6.57	3.36	-4.99	2.81	-6.60	4.59
工况 2	-2.28	2.33	-3.47	2.89	-2.65	2.28	-3.55	4.05
工况 3	-2.09	2.28	-3.21	2.82	-2.43	2.20	-3.33	3.92
工况 4	-1.93	2.22	-2.98	2.75	-2.25	2.14	-3.14	3.79
工况 5	-2.14	2.00	-3.21	2.39	-2.40	1.82	-3.35	3.48
工况 6	-1.96	1.97	-2.97	2.35	-2.22	1.78	-3.13	3.39
工况 7	-1.81	1.93	-2.77	2.30	-2.06	1.74	-2.96	3.31
工况 8	-1.78	1.88	-2.77	2.27	-2.05	1.70	-2.94	3.30
工况 9	-1.76	1.83	-2.76	2.24	-2.05	1.68	-2.92	3.29

由表 2 可知：

a. Ⅲ₂ 类岩体平行层面模量的增加可明显降低坝体的沉降以及建基面的不均匀沉降。假设 Ⅲ₁ 类岩体的变形模量不变(垂直层面取为 5 GPa,平行层面取为 10 GPa),Ⅲ₂ 类岩体垂直层面模量不变(取为 3 GPa),平行层面模量分别取为 8 GPa、9 GPa、10 GPa(对应工况 2、工况 3、工况 4)时,上游面坝底(A 点)的沉降分别为 2.28 cm、2.09 cm、1.93 cm,降低 18%;坝趾(C 点)的沉降分别为 3.47 cm、3.21 cm、2.98 cm,降低 16%;厂房下游面底部(D 点)的沉降分别为 2.65 cm、2.43 cm、2.25 cm,降低 17%。由此可知,Ⅲ₂ 类岩体平行层面模量的增加可明显降低坝体的沉降。同时顺河向位移也有一定减少,如上游面坝底(A 点)的顺河向位移分别为 2.33 cm、2.28 cm、2.22 cm,降低 5%;厂房下游面底部(D 点)的顺河向位移分别为 2.28 cm、2.20 cm、2.14 cm,降低 6%。可见,顺河向位移虽有一定减少,但幅度较沉降为小。对应工况 2、工况 3、工况 4,上下游面坝底的沉降差分别为 1.19 cm、1.12 cm、1.05 cm,降低 13%,明显降低了建基面的不均匀沉降。对应于各向同性岩体(工况 1),上述规律也很明显^[10]。

b. Ⅲ₂ 类岩体垂直层面模量增加对水平位移减少的影响更为显著。假设 Ⅲ₁ 类岩体的变形模量不变,Ⅲ₂ 类岩体平行层面模量不变(取为 8 GPa),垂直层面模量分别取为 3 GPa、4 GPa(对应工况 2、工况 5)时,上游面坝底(A 点)的沉降分别为 2.28 cm、2.14 cm,坝趾(C 点)的沉降分别为 3.47 cm、3.21 cm;厂房下游面底部(D 点)的沉降分别为 2.65 cm、2.40 cm。由此可知,Ⅲ₂ 类岩体垂直层面模量的增加也可明显降低坝体的沉降,降低百分比最大为 10%。对应顺河向位移,上游面坝底(A 点)分别为 2.33 cm、2.00 cm;坝趾(C 点)分别为 2.89 cm、2.39 cm,降低 20%。可见,垂直层面模量增加时水平位移减少更为显著。

c. Ⅲ₁ 类岩体的变形模量变化对坝体位移的影响较小。假设 Ⅲ₂ 类岩体的变形模量不变,Ⅲ₁ 类岩体的变形模量分别从工况 7 的垂直层面 5 GPa、平行层面 10 GPa 增加为工况 8 的垂直层面 6 GPa、平行层面 11 GPa,上游面坝底(A 点)的沉降分别为 1.81 cm、1.78 cm;坝趾(C 点)的沉降分别为 2.77 cm、2.77 cm;厂房下游面底部(D 点)的沉降分别为 2.06 cm、2.05 cm。对应的顺河向位移,上游面坝底分别为 1.93 cm、1.88 cm;坝趾分别为

2.30 cm 2.27 cm ,厂房下游面底部分别为 1.74 cm ,1.70 cm. A , C , D 3 点位移变化最大百分比仅为 2% .可见 , III_1 类岩体的变形模量变化对坝体位移的影响很小.这是因为 III_1 类岩体在坝基中含量较少 ,且其大多分布在坝体建基面下方以外区域.

3.2 变形模量对坝体应力的影响

9 个工况坝基大坝关键点应力值见表 3.

由表 3 可知 :

a. III_2 类岩体平行层面变形模量增加 ,上游面坝底压应力减少、拉应力增加 ,厂房下游面底部压应力减少.假设 III_1 类岩体的变形模量不变(垂直层面取为 5 GPa ,平行层面取为 10 GPa) , III_2 类岩体垂直层面变形模量不变(取为 3 GPa) ,平行层面模量分别取为 8 GPa 9 GPa ,10 GPa(对应工况 2、工况 3、工况 4)时 ,上游面坝底(A 点)的竖向正应力分别为 - 0.16 MPa , - 0.09 MPa ,0.01 MPa ,顺河向正应力分别为 1.85 MPa ,2.16 MPa ,2.45 MPa ,增加 32% ;厂房下游面底部(D 点)的竖向正应力分别为 - 5.23 MPa , - 5.13 MPa , - 5.07 MPa ,减少 3% ,顺河向正应力分别为 - 6.85 MPa , - 6.50 MPa , - 6.22 MPa ,减少 10% .当垂直层面模量不变(取为 4 GPa) ,平行层面模量分别取为 8 GPa 9 GPa ,10 GPa(对应工况 5、工况 6、工况 7)时 ,上游面坝底的竖向正应力分别为 - 0.25 MPa , - 0.16 MPa , - 0.07 MPa ,减少 72% .由此可知 , III_2 类岩体平行层面模量的增加将增大上游坝底的拉应力 ,特别是顺河向拉应力增加较大 ,对上游坝底应力不利.

b. III_2 类岩体垂直层面变形模量增加 ,上游面坝底(A 点)竖向压应力增加、顺河向拉应力减少 ,下游面底部(D 点)压应力减少.假设 III_1 类岩体的变形模量不变 , III_2 类岩体平行层面模量不变(取为 8 GPa) ,垂直层面模量分别取为 3 GPa 4 GPa(对应工况 2、工况 5)时 ,上游面坝底(A 点)的竖向正应力分别为 - 0.16 MPa , - 0.25 MPa ,增加 56% ,顺河向正应力分别为 1.85 MPa ,1.31 MPa ,减少 41% .厂房下游面底部(D 点)的竖向正应力分别为 - 5.23 MPa , - 5.02 MPa ,减少 4% ,顺河向正应力分别为 - 6.85 MPa , - 6.61 MPa ,减少 4% .由此可知 , III_2 类岩体垂直层面变形模量的增加将减少顺河向的拉应力 ,增加上游坝底的压应力 ,下游面底部压应力有一定程度减少.

c. III_1 类岩体的变形模量增加对改善坝体应力有利.比较工况 7 和工况 8 ,假设 III_2 类岩体的变形模量不变 , III_1 类岩体的变形模量分别从工况 7 的垂直层面 5 GPa、平行层面 10 GPa 增加为工况 8 的垂直层面 6 GPa、平行层面 11 GPa ,上游面坝底(A 点)的竖向正应力分别为 - 0.07 MPa , - 0.08 MPa ,顺河向正应力分别为 1.97 MPa ,1.92 MPa ,厂房下游面底部(D 点)的竖向正应力分别为 - 4.75 MPa , - 4.87 MPa ,顺河向正应力分别为 - 5.97 MPa , - 6.16 MPa .由此可知 , III_1 类岩体变形模量的增加将减少上游面坝底的拉应力 ,增加下游面底部的压应力.这虽对改善坝体应力有利 ,但不十分明显.

4 结 语

本文对倾斜层状地基复杂重力坝应力分析的有限元模型和计算方法进行了研究 ,对阿海水电站重力坝坝基力学参数进行了敏感性分析.结果表明 ,复杂层状地基的力学参数变化对坝体的应力和变形有明显的影响.因此 ,研究力学参数变化下的变形和应力变化规律对大坝的设计分析有重要作用.本文的研究方法和研究成果对阿海水电站重力坝设计以及同类工程都有较大的参考意义.

参考文献 :

[1] SERRANO A ,OLALLA C. Ultimate bearing capacity of an anisotropic discontinuous rock mass ,part I :basic modes of failure[J]. Int J Rock Mech Min Sci ,1998 ,35(3) 301-324.
[2] 张玉军 ,刘谊平.层状岩体的三维弹塑性有限元分析[J].岩石力学与工程学报 ,2002 ,21(11) :1615-1619.
[3] 于学馥 ,郑颖人 ,刘怀恒 ,等.地下工程围岩稳定分析[M].北京 :煤炭工业出版社 ,1983 :505-508.

表 3 坝基不同变形模量下大坝关键点应力

Table 3 Stresses of dam key points for different deformation moduli							MPa
工 况	A 点		C 点		D 点		
	σ_z	σ_y	σ_z	σ_y	σ_z	σ_y	
工况 1	- 0.56	0.04	- 1.20	0.03	- 5.73	- 8.69	
工况 2	- 0.16	1.85	- 1.36	- 1.57	- 5.23	- 6.85	
工况 3	- 0.09	2.16	- 1.37	- 0.17	- 5.13	- 6.50	
工况 4	0.00	2.45	- 1.38	- 0.19	- 5.07	- 6.22	
工况 5	- 0.25	1.31	- 1.36	- 0.29	- 5.02	- 6.61	
工况 6	- 0.16	1.66	- 1.37	- 0.29	- 4.89	- 6.26	
工况 7	- 0.07	1.97	- 1.38	- 0.31	- 4.75	- 5.97	
工况 8	- 0.08	1.92	- 1.38	- 0.31	- 4.87	- 6.16	
工况 9	- 0.08	1.91	- 1.38	- 0.31	- 5.03	- 6.43	

[4] 乔世范, 赖志林, 刘宝琛. 横观各向同性地基模型的理论分析及其应用[J]. 岩土工程技术, 2003(4) : 213-219.
[5] 章根德, 朱维耀. 岩土介质横观各向同性的模拟[J]. 力学进展, 1998, 28(4) : 499-508.
[6] JAEGER J C. Shear failure of anisotropic rock[J]. Geol Mag, 1960, 97 : 65-72.
[7] 周维垣. 高等岩石力学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990 : 116-119.
[8] 张勤, 陈志坚, 罗增益. 裂隙岩体结构面力学参数取值的工程地质研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 1999, 27(6) : 114-117.
[9] 李健, 谢守益, 巫德斌, 等. 兰右山边坡岩体力学参数研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2005, 33(4) : 459-462.
[10] 朱小林. 岩土工程参数的评价[J]. 工程勘察, 1989(5) : 37-41.

Sensitivity analysis of mechanical parameters of
sloping layered rock foundation of Ahai gravity dam

WANG Da-sheng¹, ZHANG Liao-jun¹, ZHANG Hui-xing¹, WANG Wei-hua²

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China ;
2. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract : Based on the commercial software ADINA, a finite element model of a sloping layered rock foundation was studied. Using the concrete gravity dam of the Ahai Hydropower Station in Yunnan province as an example, parameter sensitivity analysis was performed by adjusting the mechanical parameters of the vertical layer and parallel layer. The analysis results show that the mechanical parameters have an obvious effect on the dam stresses and displacements, and that the dam stresses and displacements vary with the deformation modulus of the vertical layer and parallel layer.

Key words : Ahai Hydropower Station ; concrete gravity dam ; sloping layered foundation ; constitutive relation ; ADINA ; sensitivity analysis

· 简讯 ·

第 2 届全国环境岩土工程与土工合成材料技术研讨会
将于 2008 年 11 月召开

土木工程建设的发展离不开先进高性能工程材料的研发,土工合成材料技术在土工加筋和加固工程中得到了广泛应用.研发新材料、应用新技术是岩土工程学科发展与技术进步的重要过程.然而,在各种土工合成材料的工程特性和应用于各种工程的土工合成材料的设计理论与计算方法等方面还存在许多未知或不明确的因素,有待于继续探索.为此,作为全国性系列学术会议,继在杭州召开的第 1 届全国环境岩土工程与土工合成材料技术研讨会之后,第 2 届研讨会将于 2008 年 11 月在湖南省长沙市举行.本届会议由中国岩石力学与工程学会环境岩土工程分会主办、长沙理工大学协办、湖南大学承办,研讨的主要内容是:废弃物和污染土的基本特性与处理技术;土壤污染与修复理论及技术;自然及工程活动引起的土工环境问题与对策;计算环境岩土力学、滑坡、泥石流、地震等区域环境问题;土工合成材料工程特性及其改性技术.本届会议将为全国从事环境岩土工程与土工合成材料技术研究和工程实践的学者和工程技术人员提供一个切磋交流的良好机会,将展示 21 世纪我国在环境岩土工程、土工合成材料方面的新材料、新理论、新方法与新技术.

有关会议详情,可访问 http://www.csrme.com/CN/News/2008-03/EnableSite_ReadNews3684581205683200.html.

(本刊编辑部供稿)