

文章编号: 1000-7598-(2006)06-0965-04

ANSYS 在大坝数值模拟中的应用

朱一飞¹, 郝哲², 杨增涛²

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 沈阳 110004; 2. 沈阳大学 建筑工程学院, 沈阳 110044)

摘 要: 阐述了 ANSYS 大型有限元分析软件的功能和分析过程; 基于现场调研和实测收集的相关坝体资料, 用 ANSYS 对阜新电厂四灰场主坝进行了数值模拟及分析, 得出了坝体位移、各种应力等值线、应变、破碎区域等重要信息, 其结论可为土坝运行期间的精密监测提供依据, 并及时向企业单位及设计部门反馈信息, 保证坝体运行安全、经济、合理。

关 键 词: 阜新电厂; 主坝; ANSYS; 数值模拟

中图分类号: O 245

文献标识码: A

Application of ANSYS to numerical simulation of dam

ZHU Yi-fei¹, HAO Zhe², YANG Zeng-tao²

(1. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China;

2. School of Architectural Engineering, Shenyang University, Shenyang 110044, China)

Abstract: The function and process of ANSYS, a large software, are elaborated. Based on the materials which we got from the practical investigation about the dam, used ANSYS to analyze and numerically simulate the major dam of the Forth Tailings Deposit in Fuxin Electric Power Plant. Based on it, displacement, deformation, all sorts of equal stress and the region of cracks and crushing can be drawn from the analysis of the dam. Based on the useful information, it put forward the suggestion on future work. And the factory can take timely action during the time of the dam operating.

Key words: Fuxin Electric Power Plant; major dam; ANSYS; numerical simulation

1 引 言

随着现代技术和管理水平的发展, 计算机技术在大坝安全监测中的应用越来越重要。主要表现在: 监测数据采集中的应用, 利用计算机做土石坝现场监测仪器的监测控制与数据处理设备, 进行自动化数据采集、存储、统计、分析预报等已成为现实; 监测资料数据库的建立可对多年积累起来的大量资料进行计算机管理, 利于资料的及时分析整理和充分发挥已有资料作用; 整理分析方法的计算机化, 通过对传统分析方法中数据整理统计与图表制作, 形成了较为系统的分析软件包; 一些计算处理复杂的新的分析方法更依赖于计算机, 如东武仕、岳城、陆浑等水库坝安全监测的计算机管理。

2004 年 3 月, 阜新发电厂四灰场主坝坝体安全监测课题组对电厂四灰场主坝进行了现场考察, 并查阅了主坝的相关资料。了解了大坝经过 20 多年后

的运行现状, 对大坝外型、边坡养护、水库水位、周围环境、边坡植被等情况进行了考察, 对大坝有了一个整体全面的感性概括, 了解了大坝与设计时的变化, 得出了影响大坝安全的因素, 从而对大坝分析计算模型以及影响因素有了初步设想。

阜新电厂四灰场主坝位于阜新市北 11 km 处, 为土石坝, 是阜新电厂粉煤灰及废水的主要排泄场地。场地地面标高界于 219.40~417.60 m 之间, 为低山丘陵区, 坝址地段为“U”型谷, 谷底较平坦, 宽约 100 m, 沟谷两侧为黄土陡崖, 崖高 6~8 m, 近于直立。东侧坡度较缓, 在黄土分布区冲沟较发育。西侧坝肩山坡坡度约为 12°, 小冲沟较发育, 下切剧烈, 且何源头侵蚀, 形成陡立的“V”型沟, 沟坎高度 4~6 m。东侧坝肩山坡坡度约为 15°。两边山坡上植被比较差, 大雨过后洪水带走大量泥沙, 山谷逐年变宽趋势比较明显。大坝建在原地面标高上, 20 多年的使用, 未出现大的裂缝及位移,

未出现险情。坝体下侧面上侧面用岩石护坡。

2 ANSYS 软件介绍

ANSYS 软件是融结构、流体、电场、磁场、声场分析于一体的大型通用有限元分析软件。由世界上最大的有限元分析软件公司之一的美国 ANSYS 开发, 它能与多数 CAD 软件接口, 实现数据的共享和交换, 如 Pro/Engineer, NASTRAN, Alogor, I-DEAS, AutoCAD 等。本文力图通过对现场的计算分析, 在 ANSYS 的大坝稳定性分析方面做一些有益的尝试。

3 主坝坝体 ANSYS 有限元分析

3.1 计算模型

在计算坝体结构时, 为了使得地基对结构应力的影响反映出来, 必须把那和结构相连的一部分地基区为弹性体, 和结构一起作为计算对象。按照弹性力学中关于接触应力的理论, 所取地基范围的大小, 应视结构底部的宽度如何而定 (与结构的高度无关)。在早期的文献中, 一般都建议在结构的两边和下方把地基范围取为大致等于结构底部的宽度, 即 $L=B$, 如下图 1(a)。但后来的一些文献中, 大都把所取的范围扩大为 $L=2B$ 。在个别的文献中还把它扩大为 $L=4B$ 。此外, 还有一些文献作者认为, 应当把地基范围取为矩形区域 (图 1(b)), 以便将铰支座改为连杆支座, 以减少对地基的人为约束。

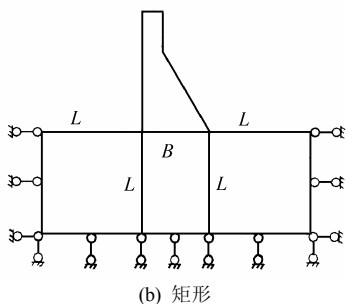
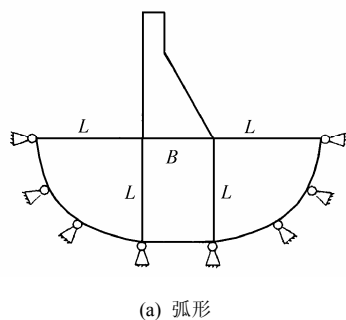


图 1 坝体与地基的取值范围

Fig.1 Computational range of dam body and its foundation

最近的大量分析指出: 在地基比较均匀而且结构与地基的弹性相差不大的情况下, 并没有必要使 L 超过 $2B$, 用连杆支座还不如用铰支座更接近实际情况, 地基范围的形状影响也不大。

阜新电厂四灰场主坝, 坝高 35 m, 坝顶宽 5 m, 坝底宽 45 m 左右, 坝底与两侧斜坡夹角为 60° 。则坝体横断面为等腰梯形。由于坝体为土坝故其结构与地基结构相当, 可取 $L=2B$ 即可。为了便于计算, 取地基为矩形区域比较符合程序要求。则所得计算模型如图 2 所示。

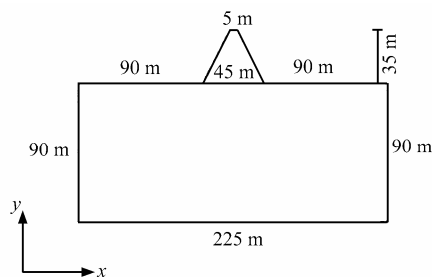


图 2 坝体计算模型

Fig.2 Computational model of the dam body

3.2 网格划分

采用 ANSYS 中自由网格划分, global 取三。

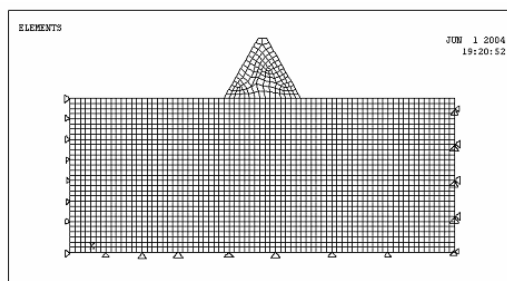


图 3 坝体网格划分及计算模型

Fig.3 Mesh subdivision of dam body and computational model

3.3 物理力学参数分析

根据《阜新电厂四灰场地质勘测资料》, 计算中按 3 层考虑: 坝基土层厚度约为 5.4 m; 砂石层厚度为 10.1 m; 底层为花岗岩。各层物理力学参数如下:

(1) 对于坝体本身, 由勘测资料可知, 筑坝材料为黄土。该土为黄~黄褐色, 含少量碎石、角砾, 稍湿, 硬塑。

该层物理力学参数: 剪切模量 $S=3.79$ MPa, 体积模量 $B=9.26$ MPa, 密度 $\rho=1.47$ g/cm³, 内摩擦角 $\varphi=22.3^\circ$, 凝聚力 $c=0.49$ MPa。

(2) 花岗岩层

该层物理力学参数: 剪切模量 $S = 0.64 \times 10^{-4}$ MPa, 体积模量 $B = 2.54 \times 10^4$ MPa, $\rho = 2.56$ g/cm³, $\varphi = 37^\circ$, $c = 21$ MPa。

(3) 地基土石层 由于该层是由土层和砂石层组成, 且每层厚度较小, 在程序中不能一一表示出来, 所以由土层和砂石层的各项力学参数取其平均值可得出结果。对于土层参数可跟筑坝黄土相仿, 对于砂石层力学参数可根据相关资料查得。

该层物理力学参数: $S = 5.7 \times 10^2$ MPa, $B = 5.6 \times 10^2$ MPa, $\varphi = 30^\circ$, $c = 10$ MPa, $\rho = 2.0$ g/cm³。

3.4 边界条件及外部荷载的加入

由计算模型可知, 由于所选计算区域的边界所受扰动已经很小, 甚至可以忽略不计。故其边界可以看作是固定的刚性边界。对于坝顶边界来说是没有约束的。

由《施工图阶段工程、水文地质勘察任务书》可知, 发展远景坝顶标高为 276.00 m, 最高水位为 271.00 m。故最高水位离坝顶为 5 m, 水深为 30 m。则水对坝体底部侧压力为:

$$F_{\text{侧}} = \rho_{\text{水}} g h = 1.0 \times 10^3 \times 10 \times 30 = 300 \text{ kN}。$$

由勘测资料可知地下水位为 2 m, 即在坝体的有水侧面水深为 30 m, 坝基 15 m 为土砂层和水层, 15 m 以下为花岗岩层。对于坝体无水侧面, 坝基 15 m 为土砂层, 地下水高为 13 m, 15 m 以下为花岗岩层, 该坝体左侧为有水侧面。则对于网格(0, 0)点处的应力为:

$$\sigma_y = \rho_{\text{水}} g (h_1 + h_2) + r_{\pm} h_2 + r_{\text{岩}} h_3 = 2.59 \text{ MPa} ,$$

$$\sigma_x = \frac{u}{1-u} \sigma_y = \frac{0.384}{1-0.384} \times 2.59 = 1.61 \text{ MPa} 。$$

同理, 网格(0, 15)点处的应力为:

$$\sigma_y = \rho_{\text{水}} g (h_1 + h_2) + r_{\pm} h_2 = 2.59 \text{ MPa} ,$$

$$\sigma_x = \rho_{\text{水}} g (h_1 + h_2) + \frac{u}{1-u} r_{\pm} h_2 = 0.55 \text{ MPa} 。$$

网格(0, 18)点处的应力为: $\sigma_x = \sigma_y = 0.3$ MPa。

对于坝体无水侧面, 由于地下水位为 2 m, 在程序中较小, 无法表示出来, 可认为从地基土层到顶部应力为均匀变化的。则对于网格处(45, 0)点处的应力为:

$$\sigma_y = \rho_{\text{水}} g (h_2 - 2) + r_{\pm} h_2 + r_{\text{岩}} h_3 = 2.27 \text{ MPa} ,$$

$$\sigma_x = \frac{u}{1-u} \sigma_y = \frac{0.384}{1-0.384} \times 2.27 = 1.42 \text{ MPa}$$

对于网格(45, 15)点处的应力为:

$$\sigma_y = \rho_{\text{水}} g (h_2 - 2) + r_{\pm} h_2 = 0.35 \text{ MPa} ,$$

$$\sigma_x = \rho_{\text{水}} g (h_2 - 2) + \frac{u}{1-u} r_{\pm} h_2 = 0.23 \text{ MPa} 。$$

网格(45, 18)点处的应力为: $\sigma_x = \sigma_y = 0$ MPa。

3.5 计算结果分析

3.5.1 变形分析

从图 4 中可以看出, 对于整个模型, 最大位移出现在上部坝体上, 最大值是 43 mm, 符合国家大坝安全要求。坝体下侧应变非常小, 可以忽略。坝体竖向位移主要是由自重引起的, 数值不大, 坝体下侧受水面竖向位移主要是水压力所造成的, 对坝体稳定不会造成影响。

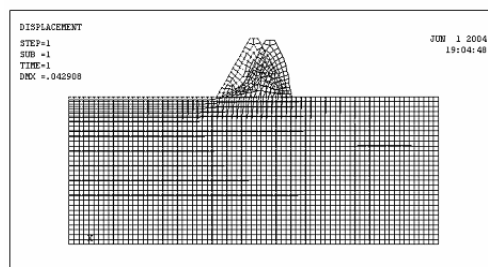


图 4 变形图

Fig.4 Deformation diagram

3.5.2 应力分析

由于自重影响会使竖向出现沉降, 会使土层更加密实, 对渗流等因素起正面影响, 是有利因素, 因此, 只分析水压力对整体的影响即可满足监测要求, 这样会更加保守, 更加安全。

从图 5~图 8 中可以看出, 应力变化比较均匀, 大坝应力主要是水侧压力产生的, 最大应力出现在坝体底部靠水一侧, 其大小为 4.39×10^2 kPa, X 方向应力最大值为 2.43×10^2 kPa, Y 方向最大应力值为 2.96×10^2 kPa。

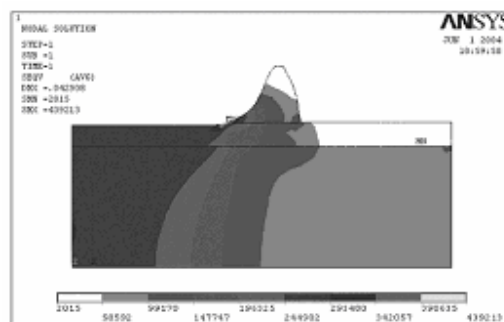


图 5 等效应力

Fig.5 Equivalent stresses

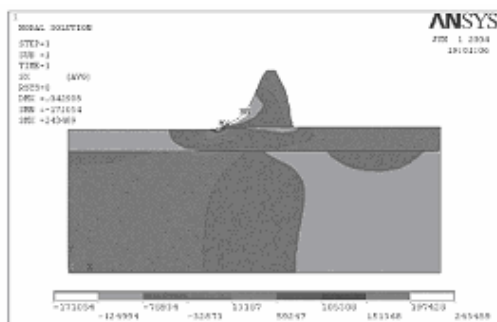


图 6 X 方向应力

Fig.6 Stresses in direction X

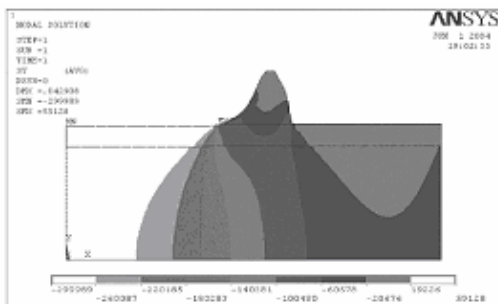


图 7 Y 方向应力

Fig.7 Stresses in direction Y

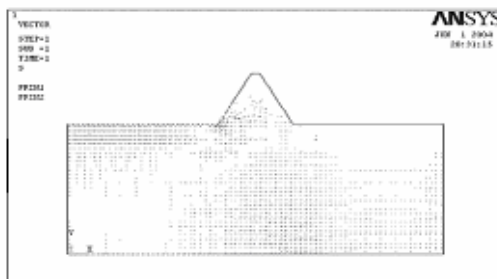


图 8 矢量显示

Fig.8 Display of vector diagram

3.5.3 破碎图

如图 9 所示, 没出现破碎区域 (如出现破碎, 则出现小圆圈)。

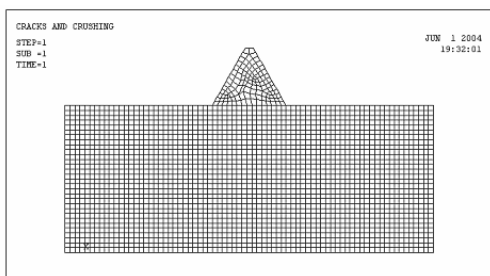


图 9 破碎图

Fig.9 Breakage diagram

4 结 论

本文应用 ANSYS 软件对阜新电厂四灰场主坝进行了数值模拟研究, 得出主要结论如下:

(1) ANSYS 进行坝体分析表明: ANSYS 分析大坝有一定的局限性, 许多方面因素如土层过渡、渗流、水腐蚀等无法建模有待解决。虽然本文土层用了多种材料, 但在网格划分时, 在土层交界处网格单元无法贯穿, 以至在土层分界处应力不连续, 出现了应力集中、收敛性差等问题。

(2) 应用 ANSYS 程序进行主体坝体有限元弹性计算看出, 水的作用主要对坝体有影响, 最大应力和应变都出现在坝体上, 对坝体下面的基础影响不大。本文所取与结构相连的地基区为 2 倍结构底部宽度。在大坝分析中可见, 只要坝体不出现破坏, 最大应力、位移符合国家要求, 坝体与其下接触面不出现滑移, 大坝就是安全的, 因此在计算模型选取上, 没有必要取坝体的影响区域, 只取坝体即可满足计算要求。笔者查阅中华钢结构论坛上对大坝有限元分析时也都只考虑了坝体, 没有考虑影响区域, 故笔者认为可取的、合理的。

(3) 计算分析表明: 最大位移出现在上部坝体上, 最大值是 43 mm, 符合国家大坝安全要求, 坝体竖向位移主要是由自重引起的, 数值不大, 坝体下侧受水一面竖向位移主要是水压力所造成的, 对坝体稳定不会造成影响; 应力变化比较均匀, 大坝应力主要是水侧压力产生的, 最大应力出现在坝体底部靠水一侧, 其大小为 439 kPa, X 方向应力最大值为 243 kPa, Y 方向最大应力值为 296 kPa; 在破碎图中, 没出现破碎区域, 即没有出现塑性区。

(4) 对于坝体的渗流方面, 需要长期的监测, 一般 3~5 年, 甚至 10 多年, 由于时间关系, 本文中没有涉及, 虽然它是坝体监测的一个重要组成部分, 但是该坝水位低、水少, 渗流方面对坝体稳定性的影响比较小, 基本上可以忽略。

(5) 该坝体在应力、位移方面是满足要求的, 是稳定的。由于在计算中比较保守: 例如边坡有一层岩石, 护坡上长的植被都可以增强坝体的稳定性; 计算按照最高设计水位考虑, 而平时坝内水位很低, 且库水离坝体比较远, 所以大坝计算结果偏于安全, 在长时间内不会出现问题。

参 考 文 献

- [1] 李皓月, 周田朋, 刘相新. ANSYS 工程计算应用教程 [M]. 中国铁道出版社, 2003.

-
- [2] 博嘉科技. 有限元分析软件—ANSYS 融会与贯通[M]. 中国水利水电出版社, 2002.
- [3] 徐芝纶. 弹性力学简明教程[M]. 高等教育出版社, 1983.
- [4] 方朝阳, 夏富洲. 土石坝安全监测综合评判准则研究[J]. 武汉大学学报, 2001, 34(3): 27—31.
- [5] 傅琼华, 黄真. 土石坝安全监测及其资料整理分析方法综述[J]. 江西水利科技, 1997, 23(2): 124—128.
- [6] 方卫华. 综论土石坝的安全监测[J]. 红水河, 2002, 21(4): 64—67.
- [7] 吴中如, 顾冲实. 大坝安全综合分析和评价的理论、方法及其应用[J]. 水利水电科技进展, 1998, 18(3): 2-6.
- [8] 阎中华. 土石坝稳定计算方法评述[J]. 人民黄河, 1995, (7): 33—37.
- [9] 唐寿同. 土石坝安全评估[J]. 大坝与安全, 1996, 8(4): 1—6.
- [10] 董翠兰, 季学培. 尾矿坝治理技术[J]. 世界地质, 2003, 22(2): 172—175.
- [11] 王焕定, 吴德伦, 林家骥. 有限单元法及计算程序[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [12] 北京有色冶金设计研究院. 阜新电厂灰渣库设施施工图、阶段工程水文地质勘测任务书[R], 1983.