

清江隔河岩重力拱坝与复杂地基 三维有限元非线性分析

谷先荣 郑 宏 葛修润

(中国科学院武汉岩土力学研究所)

提 要

本文对清江隔河岩重力拱坝与复杂地基相互作用进行了三维有限元分析,并着重研究了坝体的应力和变位,地基中结构面的应力和位移规律以及 F_{10} 断层不抗拉特性对坝体应力的影响。分析成果对该重力拱坝的优化设计和指导施工有所裨益。此外,这也是我们首次利用个人微机进行岩土工程大型复杂的三维课题有限元非线性分析的一个成功实例。

一、工程概况

隔河岩水利枢纽是长江中游的重要支流清江上的水利水电开发骨干工程。该枢纽采用混凝土重力拱坝,左岸布置斜面升船机,右岸引水电站为地面厂房。电站总装机容量为120万kW。为了使拦河大坝这项主体工程能够适应河谷地形和工程地质条件,将坝型设计为上重下拱的三心单曲变截面重力拱坝。大坝外半径312m,最大坝高151m(基底高程为55m,坝顶高程为206m),坝长653m,共分30个坝块,第23—26号坝块设置重力墩。设计方案的坝块间横缝灌浆高程从150m(两拱端)逐渐升至180m(中部溢流坝段);对比方案的封拱灌浆缝为平直线,高程为150m(分别以虚线示于图1),以下简称为斜拱和平拱封拱方式。坝体结构型式

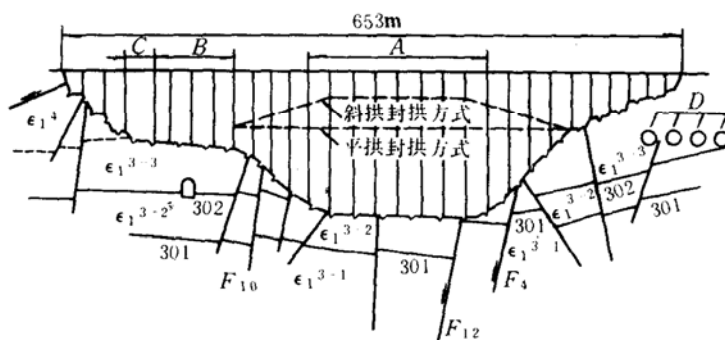


图1 重力拱坝上游展视图

A——溢流坝段; B——重力墩; C——斜面升船机; D——电站引水隧洞

特殊, 在封拱高程以上为重力坝, 以下才是重力拱坝。

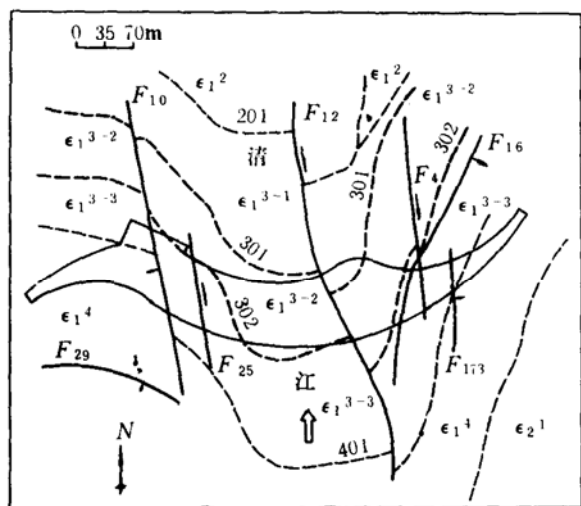


图2 坝基工程地质构造简图

以及温度变化荷载的作用, 进行了三维有限元分析。

坝址区河谷走向近南北, 两岸地形不对称。出露地层为中、下寒武系海相碳酸盐岩和碎屑岩, 灰岩与页岩互层。岩层走向大致为 $N70^{\circ}E$, 与河流近于正交, 倾向上游, 倾角 $25^{\circ}-30^{\circ}$ 。规模大的软弱夹层有201, 301, 302, 401等。断层发育, 以NNW和NNE两组为主, 倾角均陡。其中NNW组的 F_{10} , F_{12} 和 F_4 断层规模大, 顺河分布, 溶蚀强烈。坝基地质构造概况见图2。

由于坝型特殊, 坝地质情况复杂, 为了解决坝体设计和工程施工中的关键技术问题, 受水利部长江流域规划办公室的委托, 我们对清江隔河岩重力拱坝、复杂岩基, 考虑正常蓄水静水压力、泥沙压力、坝体自重

二、重力拱坝与复杂岩基三维有限元计算模型

图3(a)所示的计算模型规模大, 涉及的因素多, 有效地模拟了重力拱坝的特殊体型, 且反映了复杂地基的主要工程地质特征。图3(b)、(c)分别为斜拱和平拱方式的坝体计算模型。

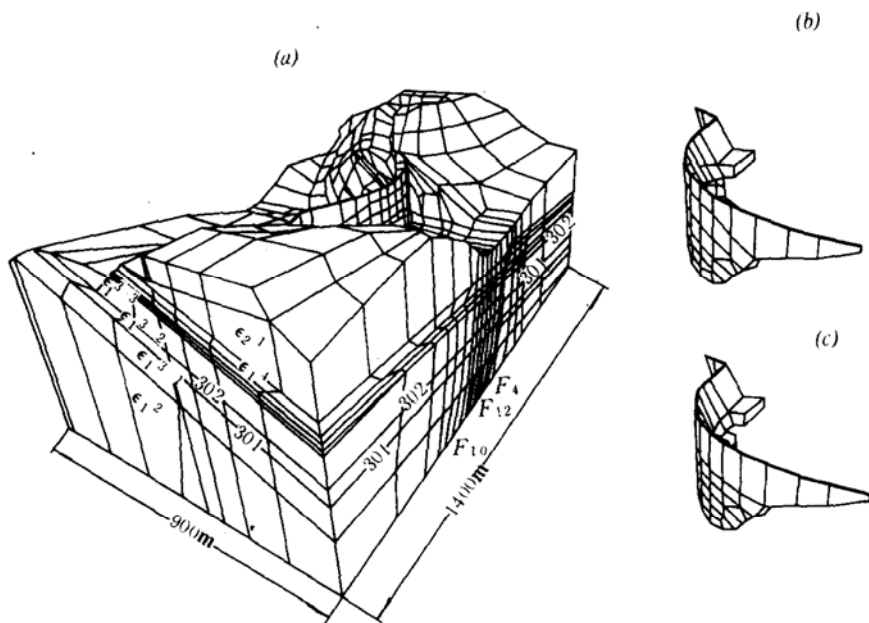


图3 重力拱坝与复杂地基的计算模型

对分析的主体部位——重力拱坝采用高精度20结点等参元离散, 并在坝体厚度方向布置

两排单元, 这样可以准确地拟合坝体的复杂形状。为简化起见, 模型中省略了溢流中孔和表孔, 对坝块也作了适当的合并。由于采用了双排结点来标识坝块间未灌浆的横缝, 因而使重力坝段坝块分缝效应得到了很好的反映。

计算模型模拟了地基中多层介质以及与坝体工程关系密切又具代表性的软弱夹层301, 302及断层 F_{10} , F_{12} , F_4 等。单元网格布局基本符合岩层、夹层以及断层的产状特征和空间展布特征。岩层和软弱夹层沿 F_{12} 断层错位, 错距达数十米, 致使河床右侧岩体非均一的情况都明显地体现在计算模型上。

计算模型基底 $1400\text{m} \times 900\text{m}$, 高 600m 。包括8—20结点等参元1428个; 8—16结点节理等参元417个。结点总数3280个(其中坝体954个)。假定模型底面固定, 环绕岩基四面为滑动支座约束条件。坝体、地基岩石以及结构面的力学参数列于表1, 表2。

表1 软弱夹层及断层的力学参数

结构面	法向刚度 K_N (MPa/m)	切向刚度 K_S (MPa/m)	抗拉强度 σ_T (kPa)	粘结力 c (kPa)	摩擦系数 f
301夹层	429	71	0	25	0.3
302夹层	1284	296	0	40	0.4
F_{10} 断层	401	93	0	30	0.4
F_{12} 断层	5385	1539	0	50	0.6
F_4 断层	379	35	0	10	0.2

表2 混凝土和岩石的力学参数

介质	混凝土	红溪灰岩 ϵ_2^1	平善坝灰页岩 ϵ_1^4	石龙洞灰岩 ϵ_1^{3-3}	石龙洞灰岩 ϵ_1^{3-2}	石龙洞灰岩 ϵ_1^{3-1}	石牌页岩 ϵ_1^2
变形模量 E (GPa)	20	18	3.0	18	8.0	18	0.7
泊松比 ν	0.17	0.25	0.30	0.25	0.25	0.25	0.35

三、荷载条件、计算方案及JRNA 3 程序简介

委托单位要求考虑的荷载因素有正常蓄水静水压力、泥沙压力、坝体自重以及温度变化荷载等。在具体计算中采用上游正常蓄水水位为 200m , 相应的下游水位为 78.5m ; 淤沙高程为 124m (平淤坝前), 淤沙浮容重为 5 kN/m^3 , 摩擦角 $\phi=0^\circ$; 筑坝混凝土容重为 24.5 kN/m^3 。此外, 上游和下游坝面温度随高程变化情况见表3。

由于温度变化有温升和温降两种情况, 因此上述荷载因素构成两种组合方式, 我们称之为温升综合荷载和温降综合荷载。

表3 坝面温度随高程的变化

高 程(m)		206	180	150	131	112	93	74	55
温降情况 (℃)	上游面	-8.58	0.33	-2.77	-2.69	-0.59	-1.14	-0.61	-1.03
	下游面	-8.58	0.71	-0.61	2.29	-0.28	0.56	-0.79	-0.53
升温情况 (℃)	上游面	8.40	-1.85	-5.98	-5.31	-2.76	-3.02	-1.37	-1.71
	下游面	-8.40	8.71	7.34	7.71	4.18	4.45	0.77	0.87

主要计算方案、相应的计算条件和要求列于表4。

表4 主要计算方案

方案	封拱方式	荷载条件	分析方法	主 要 目 的
1 2	斜拱	温升综合荷载 温降综合荷载	弹性	探讨坝体应力、变位及地基结构面应力、位移规律, 研究温度变化影响。
3		温降综合荷载	非线性	探讨断层不抗拉特性对坝体的影响。
4 5	平拱	温升综合荷载 温降综合荷载	弹性	与斜拱方式相应方案进行对比, 研究不同封拱方式的效果。

鉴于大坝设计要求考虑坝体自重应力, 但不计筑坝引起的坝体与地基的变形。因此上述方案采用分步加载和叠加算法。

非线性方案采用德鲁克(Drucker)屈服准则和增量迭代应力转移方法。考虑了地基中主要断层 F_{10} 的拉、剪破坏以及拉开后又重新闭合的反复特性, 特别是不抗拉特性。

综上所述, 显见清江隔河岩重力拱坝与复杂岩基三维有限元分析是个大型而复杂的分析课题。

该分析工作系采用我所研制的三维非线性有限元分析程序 JRNA 3 和绘图软件 TDFEP 及 RMGSM.BAS 在 PC/AT 型微机(配置 DSI-780 加速板)上完成的。JRNA 3 程序特别适宜于带有节理岩体的大型工程, 其功能强、效率高。程序中关于软弱结构面的力学非线性特性的处理原则, 计算模型和模拟方法及节理单元模型的详细情况请参考文献[1—3]。该程序可以在微机上解大型课题, 又有与之相配合使用的图形软件^[4]及数据生成和转换子过程, 提高了分析工作的效率和质量。

由于没有工程区域地应力的实测资料, 故未能进行初始应力场的拟合与分析。如不计地基初始应力, 对弹性方案, 坝体应力和变位并无影响; 而计算所得岩石单元和节理单元的应力, 实际上只是综合荷载作用在地基中引起的应力增量。因为它自身的初始应力未被计入。鉴于分析的重点是坝体, 因此弹性计算方案是有价值的。非线性方案也有意义, 它给出了地基中主要断层不抗拉特性对坝体的最不利影响程序。我们可以设想, 如果计入初始地应力, 这种影响会小些, 因为初始地应力通常是压应力。

四、重力拱坝与地基主要计算结果分析

由于篇幅所限, 本文仅简单介绍温降综合荷载情况下部分计算结果, 讨论设计部门最关心的几个问题。关于各计算方案所得成果的详细情况和系统分析讨论请参阅文献[5]。

(一) 坝体应力

图4、图5分别给出了温降综合荷载引起的斜拱方案2与平拱方案5的坝面主应力分布规律, 反映出重力坝段的分缝影响十分明显。由图4知, 斜拱方式的拱作用效果很好, 整个坝体以压应力为主。坝址区压应力较大, 特别是左右岸坡部位的压应力已超过4MPa, 最大值分别位于左岸107m高程处(5.7MPa)与右岸129m高程处(5.8MPa)。拉应力主要分布在坝踵部位, 一般约为2MPa, 最大值达2.9MPa(位于拱坝左岸69m高程处)。

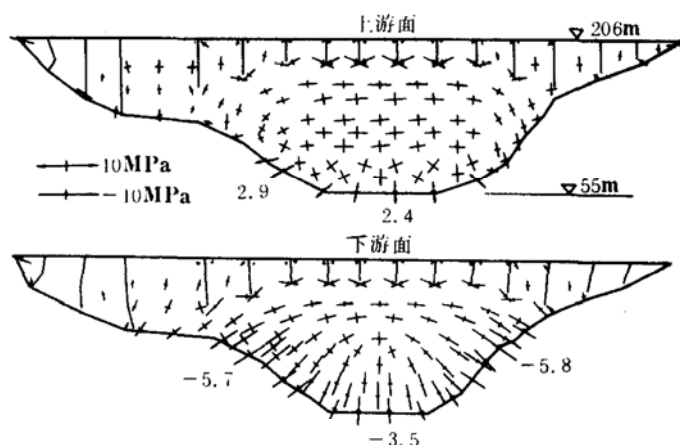


图4 斜拱方案2坝面主应力

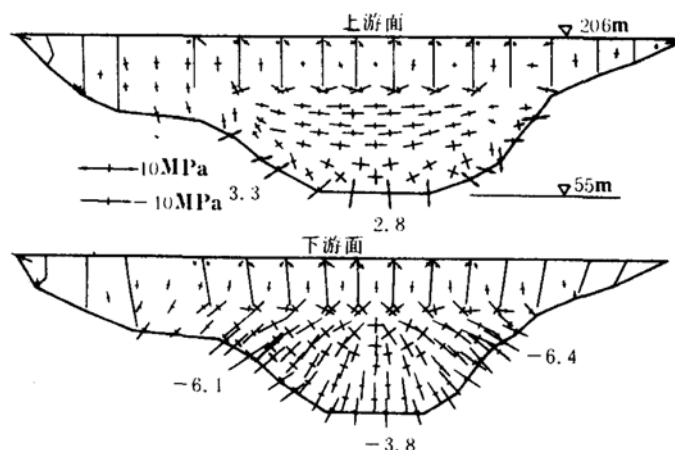


图5 平拱方案5坝面主应力

比较图5与图4, 不难看出, 由于封拱方式的改变, 坝面主应力的量值和方向均发生了很大的变化。平拱方式与斜拱相比, 拱效应明显地减弱, 坝踵拉应力一般增大0.4MPa左右, 其中左拱端增大最突出, 达1.1MPa。从坝址区压应力值来看, 平拱比斜拱方式大0.3—0.6MPa。因此采用斜拱封拱方式, 坝体应力状态得到明显地改善。

斜拱方式的坝体应力基本符合拱坝设计规范要求。但在重力拱坝坝段的坝底局部区域,

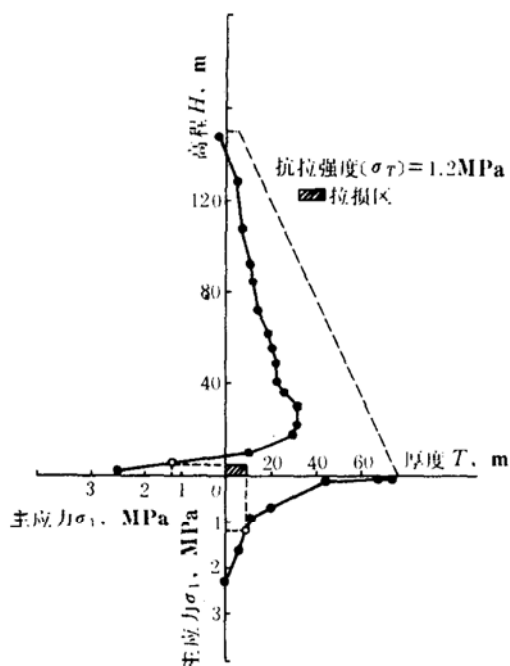


图6 斜拱方案2拱冠梁

向拱冠剖面。另外, 由于平拱方案的拱效应大大减弱, 坝体位移比斜拱方案明显增大, 尤其是在坝中央顶部 $v_{\max}$ 值比斜拱方案增大约2cm(见图8)。这也就是说, 在坝体中部升高封拱高程的斜拱方式, 在限制坝体变位方面亦起着良好的作用。

特别在坝踵部位的拉应力已超过规范允许范围 ($[\sigma_T] = 1.2\text{MPa}$)^[6]。图6给出了斜拱方案2拱冠梁剖面主应力 σ_1 沿坝高 H 和沿坝厚 T 方向的变化规律。由图见, 拉应力随着高程急剧衰减, 很快消失; 随厚度变化要缓慢些。 σ_1 超过允许抗拉强度 $[\sigma_T]$ 的范围是在离基底约5m, 距坝前约8m的区域内。也就是说, 在重力拱坝段底部非常狭窄的U形河谷带内(带宽5m, 从上游面向下游方向延伸8m)需考虑采取适当的局部加强措施。

(二) 坝体变位

图7是坝体计算网格三维变形图。图8为拱冠梁变位图。它们揭示了斜拱和平拱方式的坝体变位的共同规律。坝体以指向下游方向的水平位移(位移分量 v)为主, 而且最大值 $v_{\max}$ 产生在中央拱冠梁的顶端; 大坝左右部位的水平位移分量 u 均指

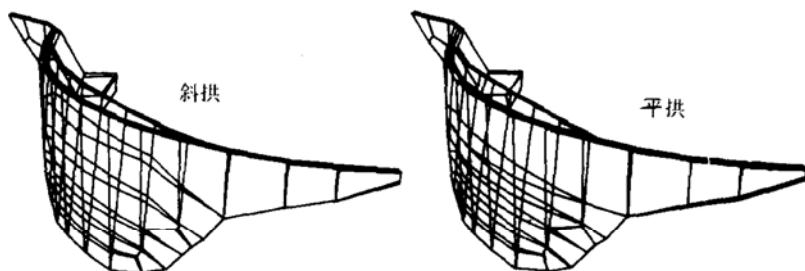


图7 坝体三维变位图

(三) 重力墩受力分析

斜拱方案2和平拱方案5重力墩承受的推力和剪力列于表5。斜拱方式, 重力墩承受的轴向推力和竖向剪力都大于平拱方式。然而斜拱方式的重力墩承受合力的作用方向显然更加倾向于地基和山里。这就说明, 斜拱方式的重力墩受力的方向比平拱方式更合理。

对于温升综合荷载的作用, 这里不拟赘述。通过斜拱方案1和平拱方案5的对比分析。同样可以得出上述结果: 斜拱可改善坝体应力状态, 限制坝体变位, 使重力墩受力方向更合理。

因此斜拱封拱方式比平拱封拱方式明显的优越。

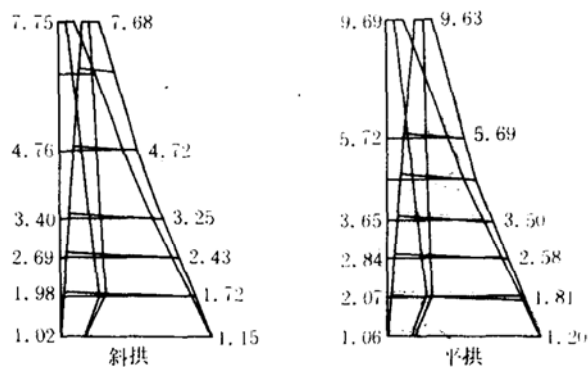


图8 拱冠梁变位图

表5

重力墩承受的推力和剪力 (GN)

计算方案	轴向推力	径向剪力	竖向剪力
斜拱方案2	1.55	0.41	0.60
平拱方案5	1.18	0.40	0.33

(四)地基中软弱夹层的位移和应力分布规律

图9展现了301夹层顶层相对于底层的位移情况。相对切向位移十分有规律地指向坝址中心, 其值为0—0.3mm。相对法向位移以压密为主, 相对拉开的情况仅出现在坝前个别单元。相对法向位移的量值一般小于相应部位的相对切向位移量值。302夹层位移有类似于301夹层的规律, 不过量值比301夹层小。这是因为302夹层法向和切向刚度系数比301夹层大的缘故。

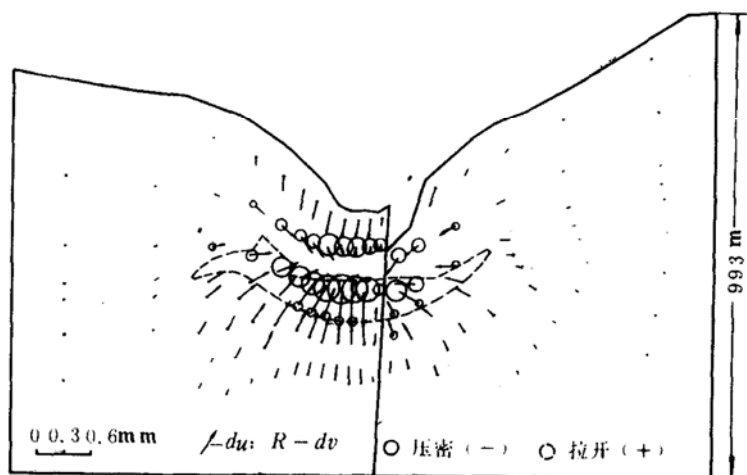


图9 301夹层相对位移

由于软弱夹层的应力状态取决于它的相对位移及刚度特性, 因此301和302夹层的应力亦

类似有图9显示的某些特征。例如, 剪应力亦十分有规律地指向坝址中心。由于坝体受综合荷载作用、特定的工程地质条件及坝体与地基结构面的空间关系等影响, 软弱夹层呈现了上述应力与位移的规律。揭示这种规律, 将为地基处理和加固设施的选择提供了依据。

(五) 地基中断层的应力状态

图10给出了断层 F_{10} 的应力分布。断层与坝体相连, 且断层附近相当大范围都出现法向拉应力。其值一般小于0.05MPa, 最大值达0.26MPa, 断层法向最大张开位移为0.25mm。剪应力在0.1MPa左右。断层右侧相对于左侧向下游滑移。最大相对切向位移为1mm。

断层 F_{12} 和 F_4 的应力情况与 F_{10} 断层类似。

由于断层大面积出现拉应力, 同时 F_{10} 受拉区域和最大拉应力量值都比 F_{12} 或 F_4 大, 因此研究断层 F_{10} 与302夹层组合结构的力学性状成为研究左岸坝肩稳定的关键。因此, 选定 F_{10} 断层, 考虑其不抗拉

特性进行非线性分析, 探讨断层对坝体应力和稳定性的不利影响具有典型意义。

(六) F_{10} 断层无拉分析对坝体应力的影响

通过斜拱方式弹性计算方案2和非线性方案3的对比分析, 我们发现 F_{10} 断层不抗拉特性对坝体应力影响最明显。其影响范围和程度由图11给出了直观的描述。增量主应力等值线

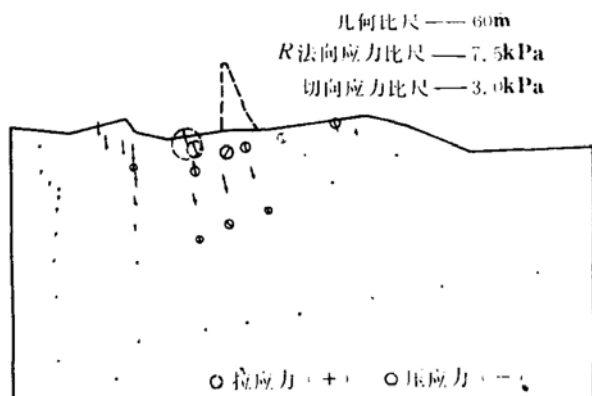


图10 断层 F_{10} 应力分布图

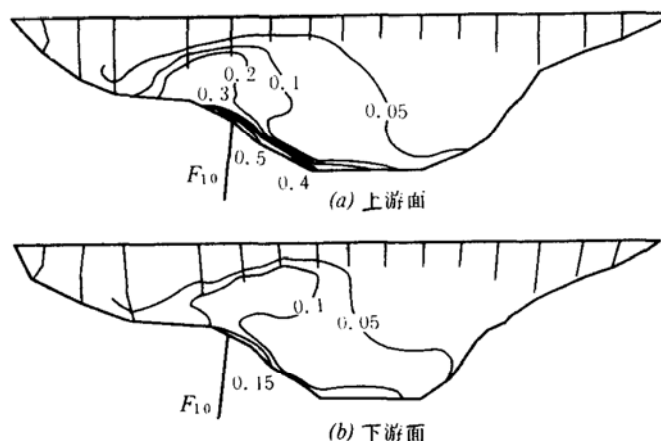


图11 对应于断层 F_{10} 无拉分析的坝面 $d\sigma_1$ 等值线图

(单位: MPa)

密集的部位在坝左斜坡段, 尤其是坝踵区坝体与 F_{10} 断层邻近处。拉应力增量最大值达0.58MPa。考虑 F_{10} 不抗拉特性的非线性方案5的坝体应力发生了变化, 特别是坝踵区拉应

力出现坝左明显大于坝右的趋势。这种情况在坝体设计和施工中应予考虑。

五、结 语

本文给出了清江隔河岩重力拱坝应力和变位以及岩基结构面的应力和位移规律, 论证了斜拱封拱方式比平拱方式更为优越。探讨了地基中主要断层无拉分析对坝体的影响。分析成果已被设计部门采纳, 用于重力拱坝优化设计。并对工程施工和地基处理亦有指导意义。

另外, 以上工作也是我们首次利用个人微机进行大型复杂的三维岩土工程有限元非线性分析的一个成功实例。它表明我所研制的JRNA3程序具有处理节理岩体大型工程问题的能力, 显示出微机对于岩土工程数值分析的现实意义和广阔的应用前景。

本研究工作始终得到了长江流域规划办公室的大力支持, 张邦圻总工、徐麟祥和燕盛德高工、万学军工程师等在许多方面给予了密切的合作和热情的帮助; 本计算模型的单元网格和结点数据是在中国科学院武汉岩土力学研究所杨家岭和冯树仁助理研究员前期工作的基础上, 经调整修改得到的。丰定祥副研究员亦曾为研制 JRNA 3 程序付出了辛勤劳动。特一并致以诚挚的谢意。

参 考 文 献

- [1] Ge Xiurun, Non-linear Analysis of a Joint Element and Its Application in Rock Engineering, Int. J. for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 5, 1981, pp. 229-245.
- [2] Ge Xiurun, Gu Xianrong, Feng Dingxiang, Three-dimensional Infinite Domain Elements and Their Application, Proc. 5th Int. Conf. on Numerical Methods in Geomechanics, Nagoya, Vol. 1, 1985, pp. 229-238.
- [3] 谷先荣、葛修润, 等参数节理单元及其应用, 岩土力学, No.2, 1980, pp.19-32.
- [4] 王川婴、葛修润, 三维图形处理程序TDFEP及在岩石力学中的应用, 第三届全国岩土力学数值分析与解析方法讨论会论文集, Vol.2, 1988, pp.718-728.
- [5] 葛修润、谷先荣等, 清江隔河岩重力拱坝考虑复杂地基主要断层不抗拉的三维有限元非线性分析, 中国科学院武汉岩土力学研究所科研报告(88)156号, 1988.
- [6] 中华人民共和国水利电力部, 混凝土拱坝设计规范编制说明, 水利电力出版社, 1985, p. 19.

Nonlinear Analysis of Three-dimensional Finite Element for Gravity Arch-dam and Complicated Foundation of the Geheyan in Qingjiang River

Gu Xiangrong, Zheng Hong, Ge Xiurun

(Institute of Rock and Soil Mechanics, Academia Sinica, Wuhan)

Abstract

Three-dimensional finite element analysis has been carried out for the interactions between the

gravity arch-dam and the complicated foundation of Geheyan in Qingjiang River. Special attentions have been paid on the stress and displacement of the dam body, the regularity of stress and displacement of structural surface in the foundation and the influence on the dam body stress by the no-tension characteristic of fault F_{10} . The results of the analysis are helpful for the optimal design and construction of the dam. Moreover, it is also the first successful case for us to employ the PC/AT microcomputer with a DSI-780 coprocessor board to make nonlinear analysis of three-dimensional finite element for the large scale and complicated subject in rock and soil engineering.