

水电站典型厂坝区渗流场分析探讨

吴梦喜¹ 杨连枝¹ 伍小玉²

(1 中国科学院力学所 北京 100190;

2 中水顾问集团成都勘测设计研究院 四川 成都 610072)

【摘要】 高坝和地下厂房是地处高山峡谷的水电站的一种典型开发模式。其渗流计算域大、介质多,内部洞室与排水孔多,其渗流数值计算是一个大规模的非线性求解问题。渗流场计算的收敛性和排水孔幕处理方法是厂坝区渗流计算的关键问题。本文结合长河坝水电站工程,分析了采用饱和-非饱和渗流有限元算法求解渗流场时遇到的计算不收敛问题,指出介质接触面的孔压不连续现象是造成这种不收敛的原因。设置界面单元模拟孔压不连续,能获得合理的结果。本文还对电站厂坝区的排水孔幕的数值模拟方法进行了探讨。论证了“以沟代井”的附加单元法对排水孔列是一种简单而有效的方法。

【关键词】 孔压不连续 收敛 排水孔幕 附加渗径 附加单元

1 引言

地处高山峡谷的水电站,高坝和地下厂房是典型的开发模式。弄清楚厂坝区的渗流场是渗流控制设计的关键。水电站厂坝区地质条件复杂,地下洞室和排水孔幕等水工结构物繁多,渗流数值计算涉及的范围也很大,因而必须采用有限元或有限差分等数值计算软件进行数值计算才能获得比较符合实际的渗流场。水电站渗流的特点是计算范围内存在一个地下水面,其上为非饱和渗流区,其下为饱和渗流区,可以采用饱和-非饱和算法求解。对于水电站的稳定渗流场来说,非饱和渗流对饱和区域的渗流场影响不大,非饱和渗流的模拟一般是不重要的。因而也可以采用有自由面渗流的饱和算法求解。由于岩土体的渗透系数与饱和度有关,而水电站渗流计算域内的饱和区域的范围以及非饱和区域的饱和度在求解前均是未知的,所以无论采用饱和算法还是饱和-非饱和算法,渗流场计算都需要迭代求解。因此水电站的渗流场求解是一个大型非线性问题。水电站渗流计算还存在外部边界和地下洞室边界等需要迭代求解的溢出面问题,因而要获得收敛的计算结果往往是比较困难的。

此外,电站厂坝区布置了大量的排水孔,这些排水孔构成了一道道排水孔幕,如何在保证计算精度的情况下对这些排水孔幕进行近似模拟也是水电站厂坝区渗流计算的一个关键问题。

基金项目:国家自然科学基金重点项目(项目批准号:10932012)与科技部专项经费(项目编号:0820)资助

本文结合长河坝水电站工程,分析了典型厂坝区的渗流计算不收敛的一些原因,并给出了相应的处理方法,同时探讨了排水孔幕的模拟方法。

2 渗流基本理论

本文采用饱和-非饱和算法对渗流场进行求解。

饱和-非饱和渗流方程的一般形式为理查森 (Richards)^[1]方程,即

$$\frac{\partial \theta(\psi)}{\partial t} - [K_{ij} k_r(\psi) (\psi + z)_{,j}]_{,i} = Q \quad (1)$$

式中: $\theta(\psi)$ 为含水量; ψ 为压力水头; z 为位置水头; t 为时间; K_{ij} 为介质的饱和渗透张量; $k_r(\psi)$ 为介质的非饱和相对渗透系数; Q 为源项; 下标 $i, j=1, 2, 3$, 为空间直角坐标下标。该公式遵循求和约定。

对于方程式 (1), 只有在补充饱和度与吸力水头的关系和饱和度与非饱和渗透系数的关系之后, 才能求解。饱和度与孔隙水压力关系常采用 Van Genuchten 公式 (VG 公式)^[2]描述, 其计算公式为

$$s_e(\psi) = \frac{s(\psi) - s_r}{1 - s_r} = \begin{cases} (1 + |\alpha\psi|^n)^{-m} & \psi < 0 \\ 1 & \psi \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

饱和度与渗透系数的关系常使用 Mualem 模型^[3]描述, 其计算公式为

$$k_{ij}(s_e) = k'_{ij} s_e^{1/2} [1 - (1 - s_e^{1/m})^m]^2 \quad (3)$$

其中

$$m = 1 - 1/n$$

式中: s 为饱和度; s_e 为有效饱和度; s_r 为残余饱和度; α 为与平均粒径大小相关的参数; n 为与粒径均匀性相关的参数。

对上述公式具体的有限元处理方法, 参见文献 [4]。

3 水电站典型厂坝区的渗流计算

长河坝水电站采用心墙堆石坝、首部式地下引水发电系统的开发方式, 地下厂房位于左岸山体内。图 1 为坝轴线截面的岩体渗透分区和结构布置情况。岩体渗透性分为几个区域, 山体内部的渗透系数较小, 靠近河岸的渗透系数较大。由于外部风化程度大而内部小, 这种渗透性特征在位于高山峡谷地带的坝址是很典型的。该水电站在厂房防渗帷幕后和厂房洞室顶部设置了大量的排水孔, 形成了多道排水孔幕。在左岸, 除了厂房洞室之外, 还有三个影响区域较大的隧洞, 其一为高程约 1739~1727m 的金康电站的引水隧洞, 位于电站地下厂房以东约 125m 处; 其二为便于水电站施工而开挖的 1 号公路交通洞, 在厂区的高程约为 1450m; 其三为 3 号公路交通洞, 在厂区的高程约为 1700m。这三个隧洞的存在使得该水电站厂区的渗流计算变得更加复杂。

3.1 孔压不连续现象及其对收敛性的影响

天然渗流场的分析和反演是水电站渗流计算的基础, 以获取模型截断边界的地下水位和确定一组比较符合实际的岩体渗透参数。天然渗流场左右岸地下水均向河谷排泄, 河谷

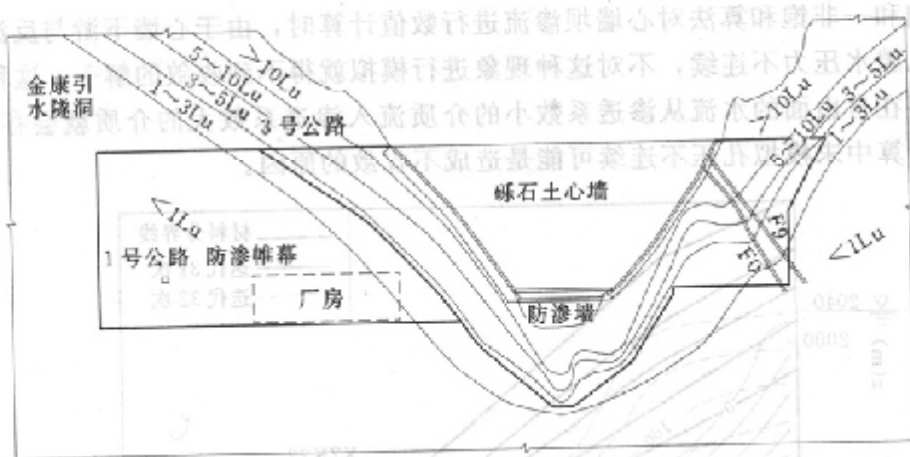


图1 坝轴线截面岩体渗透分区图

中心剖面上的渗流量很小，所以两岸的天然渗流场反演可以单独进行。以左岸为例来分析天然渗流场反演计算中遇到的非线性迭代收敛问题。

计算采用的岩体非饱和土水特征曲线见图2。虽然图中的曲线是假定的，但由于相对渗透系数采用了非常小的值，如吸力水头大于2m时，相对渗透系数小于 5×10^{-3} ，这样非饱和区域的渗流量是很小的，因而模拟了非饱和渗流对饱和区域的渗流影响很小的情况。

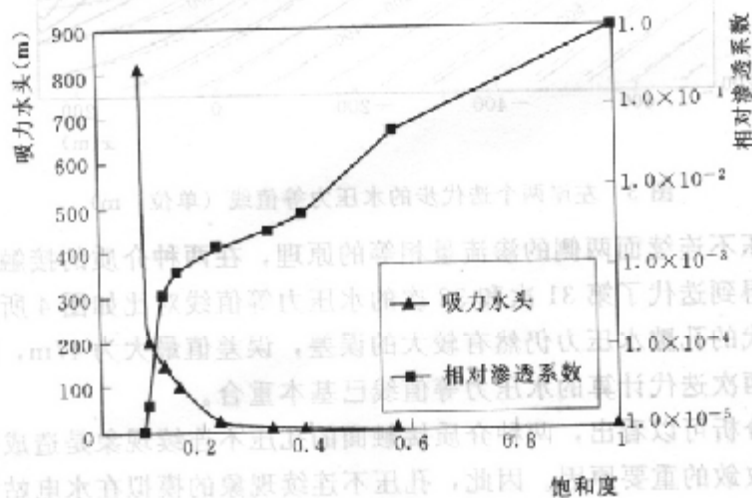


图2 岩体的非饱和土水特征曲线

岩层的饱和渗透系数由山体内外分别取为 1×10^{-5} cm/s、 3×10^{-5} cm/s、 6×10^{-5} cm/s、 20×10^{-5} cm/s、 30×10^{-5} cm/s。左侧截面和河床覆盖层顶部按照定水头边界处理，水头值分别是2040m和1478m，河谷边坡按照可能的逸出面边界处理，其余边界按照不透水边界处理。

采用8节点六面体单元对左岸进行天然渗流场的有限元计算，如图3所示，非线性迭代了31次和32次的水压力差最大值达到了151m。增加迭代次数后，相邻两次迭代的孔隙水压力的迭代误差并不随迭代次数的增加而减小，出现了非线性迭代不收敛的现象。

采用饱和—非饱和算法对心墙坝渗流进行数值计算时，由于心墙下游与反滤过渡层接触面存在孔隙水压力不连续，不对这种现象进行模拟就得不到收敛的解^[9]。这种不连续现象只要是存在自由面的水流从渗透系数小的介质流入渗透系数大的介质就会存在。因此，上述渗流计算中未模拟孔压不连续可能是造成不收敛的原因。

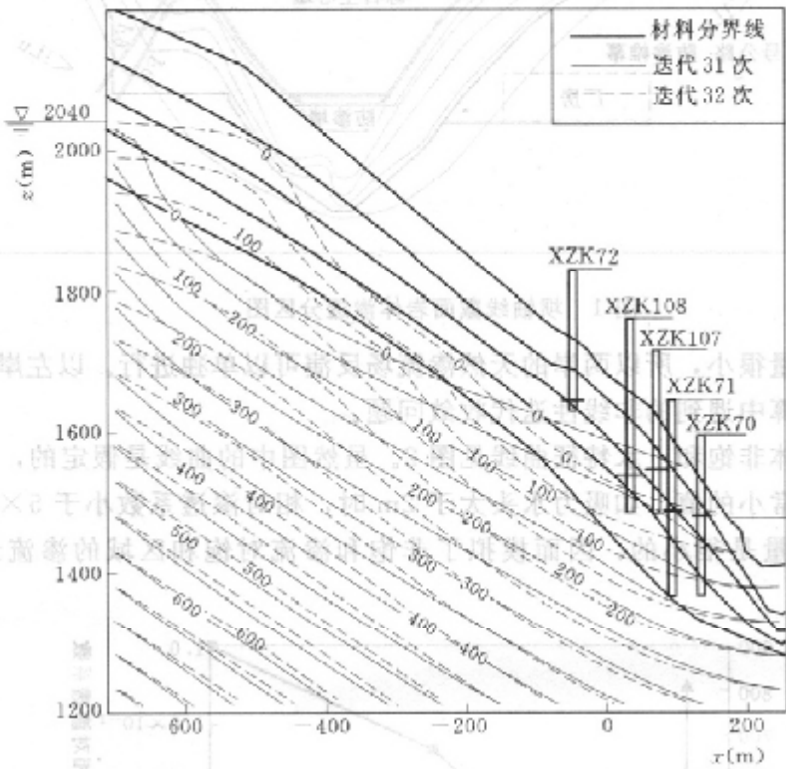


图3 左岸两个迭代步的水压力等值线(单位: m)

根据流过孔压不连续面两侧的渗流量相等的原理，在两种介质的接触面设置三维渗流接触单元计算。得到迭代了第31次和32次的水压力等值线对比如图4所示。虽然在0压线附近，两次迭代的孔隙水压力仍然有较大的误差，误差值最大为47m，但除0压线附近区域外，正压区两次迭代计算的水压力等值线已基本重合。

通过上面的分析可以看出，两种介质接触面的孔压不连续现象是造成饱和—非饱和渗流非线性计算不收敛的重要原因。因此，孔压不连续现象的模拟在水电站厂坝区有自由面的渗流计算中是很重要的。

3.2 排水孔幕的处理办法

厂区的排水孔很多，若对每个孔都进行直接模拟是不现实的，因而必须对排水孔幕进行近似处理。许多学者已经提出了对排水孔幕或排水并列的处理办法，如子结构法^[6]、解析解与有限元结合法^[7]、“以缝代井法”^[8]、“以沟代井”的附加单元法^[9]等。“以沟代井”的附加单元法，通过沟和孔列渗流量相等的原则，在排水并列所在的位置设置附加单元延长渗径，附加单元外表面按照排水孔的边界条件来处理。附加单元法概念清楚，有限元建模和计算也比较容易实现，可用于水电站厂坝区的排水孔幕的模拟。

对于贯穿承压含水层的完整并列，附加渗径 ΔL 的计算公式为

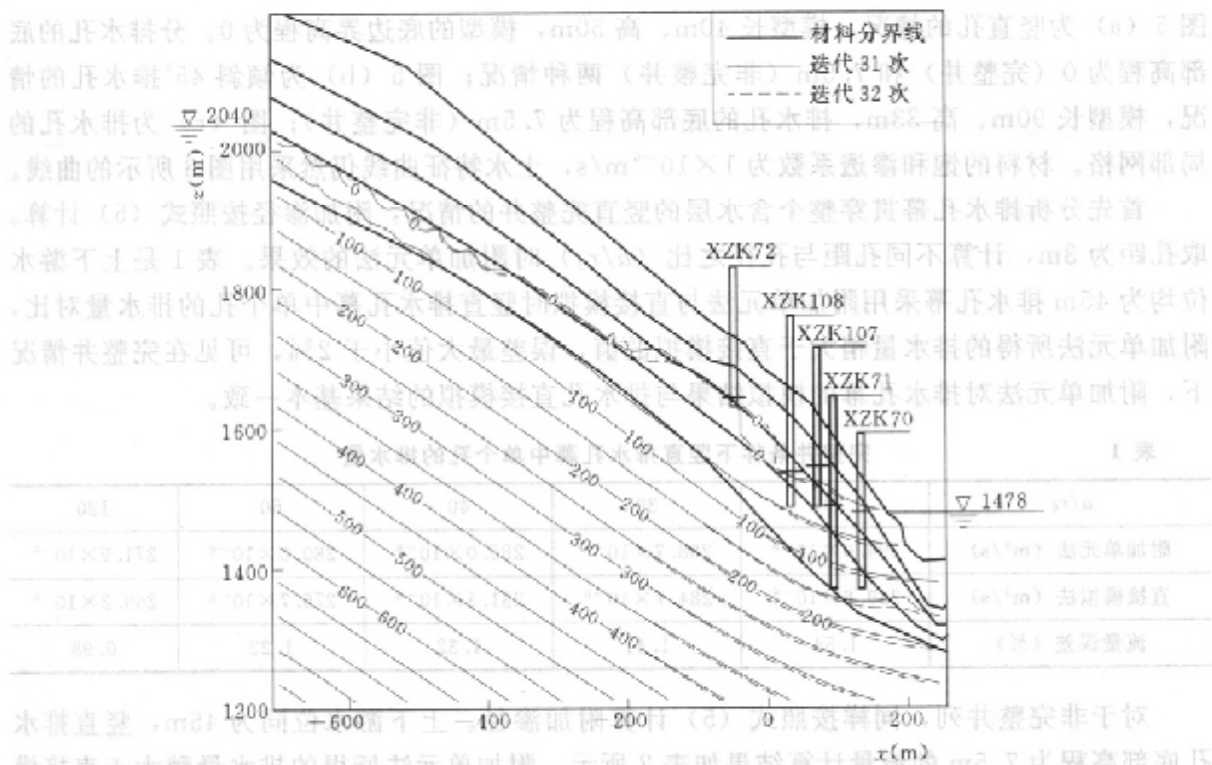


图 4 模拟孔压不连续后两次迭代的水压力等值线 (单位: m)

$$\Delta L = \frac{a}{2\pi} \ln\left(\frac{a}{2\pi r_0}\right) \quad (4)$$

式中: a 为排水孔的孔距; r_0 为排水孔的半径即孔径。

分析排水孔幕竖直和倾斜 45° 两种布置的情况, 按照附加单元法计算, 并和排水孔幕直接模拟 (每一个排水孔均模拟) 的结果进行对比, 分析附加单元法的模拟效果。

可以通过对单个排水孔的有限元模拟来实现二维外边界条件下排水孔幕的有限元计算, 模型的厚度即为排水孔幕的孔距 a , 图 5 为用 8 节点六面体单元剖分的有限元模型。

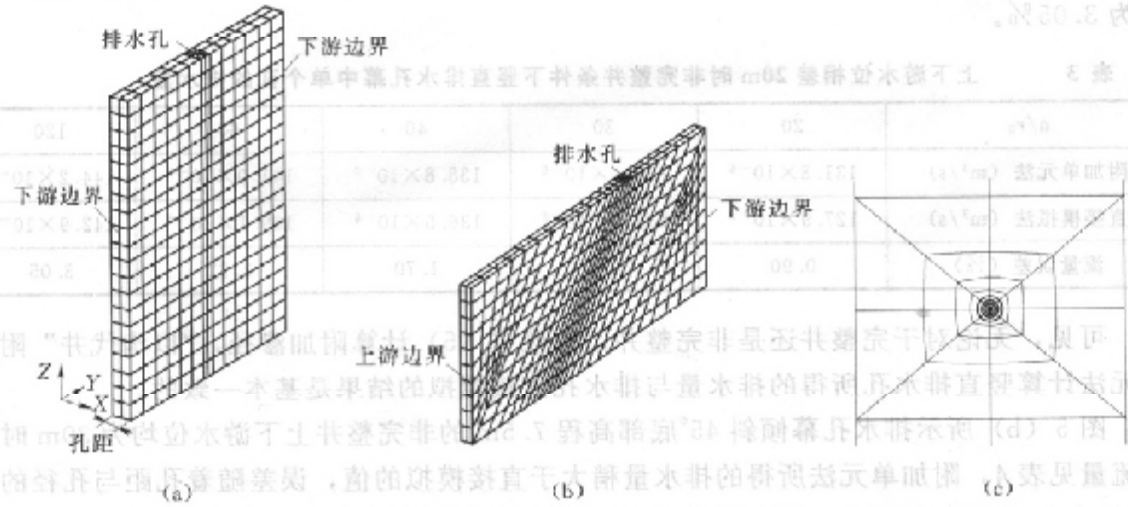


图 5 排水孔幕的计算模型

(a) 竖直孔; (b) 倾斜孔; (c) 孔局部网格

图 5 (a) 为竖直孔的情况, 模型长 40m、高 50m, 模型的底边界高程为 0。分排水孔的底部高程为 0 (完整井) 和 7.5m (非完整井) 两种情况; 图 5 (b) 为倾斜 45°排水孔的情况, 模型长 90m、高 33m, 排水孔的底部高程为 7.5m (非完整井); 图 (c) 为排水孔的局部网格。材料的饱和渗透系数为 1×10^{-6} m/s, 土水特征曲线仍然采用图 3 所示的曲线。

首先分析排水孔幕贯穿整个含水层的竖直完整井的情况, 附加渗径按照式 (5) 计算, 取孔距为 3m, 计算不同孔距与孔径之比 (a/r_0) 时附加单元法的效果。表 1 是上下游水位均为 45m 排水孔幕采用附加单元法与直接模拟时竖直排水孔幕中单个孔的排水量对比, 附加单元法所得的排水量稍大于直接模拟的值, 误差最大值小于 2%, 可见在完整井情况下, 附加单元法对排水孔幕的模拟结果与排水孔直接模拟的结果基本一致。

表 1 完整井条件下竖直排水孔幕中单个孔的排水量

| a/r_0 | 20 | 30 | 40 | 60 | 120 |
|-------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 附加单元法 (m^3/s) | 294.0×10^{-6} | 288.7×10^{-6} | 285.0×10^{-6} | 280.0×10^{-6} | 271.9×10^{-6} |
| 直接模拟法 (m^3/s) | 289.6×10^{-6} | 284.7×10^{-6} | 281.3×10^{-6} | 276.7×10^{-6} | 269.2×10^{-6} |
| 流量误差 (%) | 1.54 | 1.41 | 1.32 | 1.22 | 0.98 |

对于非完整井列, 同样按照式 (5) 计算附加渗径。上下游水位同为 45m, 竖直排水孔底部高程为 7.5m 的流量计算结果如表 2 所示, 附加单元法所得的排水量稍大于直接模拟的值, 误差最大值小于 2%。

表 2 上下游水位相同时非完整井条件下竖直排水孔幕中单个孔的排水量

| a/r_0 | 20 | 30 | 40 | 60 | 120 |
|-------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 附加单元法 (m^3/s) | 233.0×10^{-6} | 228.0×10^{-6} | 224.7×10^{-6} | 220.4×10^{-6} | 213.3×10^{-6} |
| 直接模拟法 (m^3/s) | 231.8×10^{-6} | 226.1×10^{-6} | 222.3×10^{-6} | 217.2×10^{-6} | 209.2×10^{-6} |
| 流量误差 (%) | 0.54 | 0.84 | 1.07 | 1.47 | 2.00 |

上下游水位相差 20m 时非完整竖直排水孔幕的排水量计算结果如表 3 所示, 最大误差为 3.05%。

表 3 上下游水位相差 20m 时非完整井条件下竖直排水孔幕中单个孔的排水量

| a/r_0 | 20 | 30 | 40 | 60 | 120 |
|-------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 附加单元法 (m^3/s) | 131.8×10^{-6} | 136.1×10^{-6} | 138.8×10^{-6} | 141.0×10^{-6} | 144.2×10^{-6} |
| 直接模拟法 (m^3/s) | 127.9×10^{-6} | 133.1×10^{-6} | 136.5×10^{-6} | 139.1×10^{-6} | 142.9×10^{-6} |
| 流量误差 (%) | 0.90 | 1.35 | 1.70 | 2.22 | 3.05 |

可见, 无论对于完整井还是非完整井, 按照式 (5) 计算附加渗径, “以沟代井” 附加单元法计算竖直排水孔所得的排水量与排水孔直接模拟的结果是基本一致的。

图 5 (b) 所示排水孔幕倾斜 45°底部高程 7.5m 的非完整井上下游水位均为 30m 时的渗流量见表 4, 附加单元法所得的排水量稍大于直接模拟的值, 误差随着孔距与孔径的比值 (a/r_0) 的增加而增大, 最大误差小于 5%。这说明附加单元法对倾斜排水孔幕的模拟精度也是很高的。

表 4

倾斜 45°非完整井条件下竖直排水孔幕中单个孔的排水量

| a/r_0 | 20 | 30 | 40 | 60 | 120 |
|---------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 附加单元法 (m^3/s) | 47.2×10^{-6} | 48.1×10^{-6} | 48.8×10^{-6} | 49.3×10^{-6} | 49.9×10^{-6} |
| 直接模拟法 (m^3/s) | 49.2×10^{-6} | 49.8×10^{-6} | 50.1×10^{-6} | 50.4×10^{-6} | 50.8×10^{-6} |
| 流量误差 (%) | 1.77 | 2.32 | 2.76 | 3.36 | 4.17 |

图 6 是孔距为 3m, 孔径为 0.1m 时, 穿过孔中心垂直于排水孔列截面和平行于排水孔列截面上的等压力水头线。可以看出, 附加单元法的渗流场仅在排水孔附件与直接模拟存在一定差异。

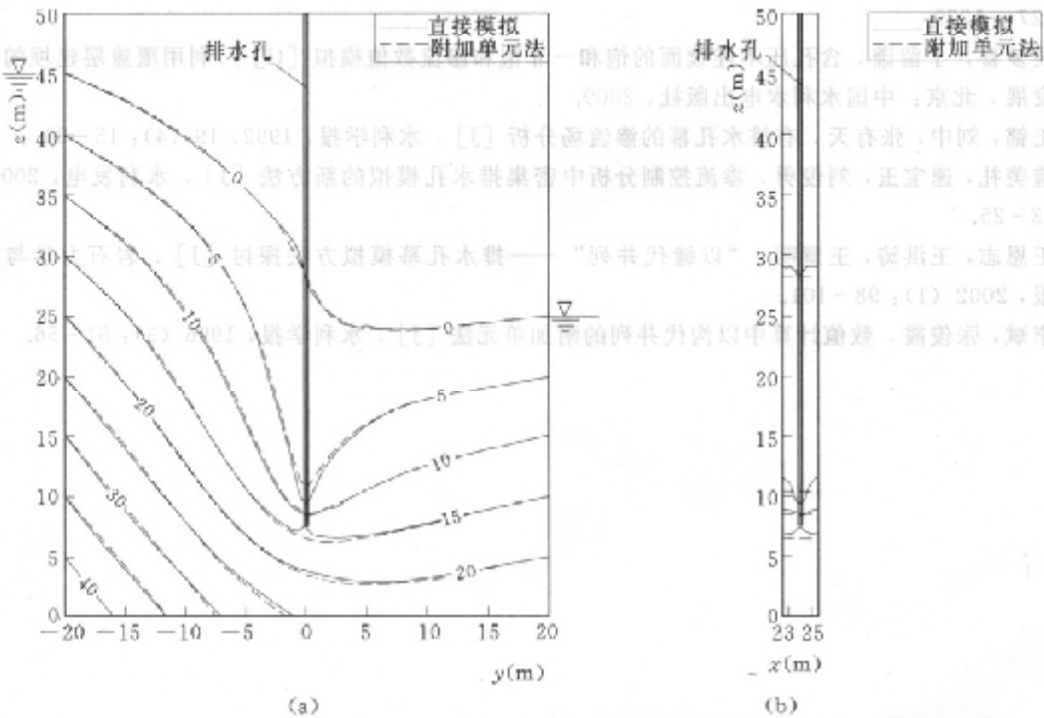


图 6 过排水孔中心线 (单位: mm)

(a) 垂直排水孔幕截面; (b) 平行排水孔幕截面的水压力等值线

从上面的分析可以看出, “以沟代井”的附加单元法, 对于竖直和倾斜的情况, 无论上下游水位是否存在差异, 无论排水孔是否穿透含水层都是合适的, 说明能适应复杂的渗流场情况。附加单元法是一种简单而可靠的排水孔幕模拟方法。

4 结论

水电站典型厂坝区的渗流场, 在两种渗透系数介质界面, 当渗流从渗透系数小的一侧流入渗透系数大的一侧, 只要浸润面与界面相交, 界面上就存在孔隙水压力不连续现象。采用界面单元对这种现象进行模拟, 可以有效消除渗流非线性迭代中的不收敛性现象, 得到合理的渗流场数值模拟结果。附加单元法是一种简单而有效的排水孔幕模拟方法, 能够适应复杂的渗流情况。

参 考 文 献

- [1] Richards, L. A. Capillary conduction of liquids through porous mediums [J]. Journal of applied Physics, 1931, 1: 318 - 333.
- [2] Van Genuchten, M. T.. A closed form equation of prediction the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44 (5): 892 - 898.
- [3] Mualem Yechezkel, A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, 1976, 12 (3): 513 - 522.
- [4] 吴梦喜. 饱和-非饱和中渗流 Richards 方程有限元算法 [J]. 水利学报, 2009, 40 (10): 1274-1279.
- [5] 吴梦喜, 丁留谦. 含孔压不连续面的饱和-非饱和渗流数值模拟 [G] // 利用覆盖层建坝的实践与发展. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [6] 王韬, 刘中, 张有天. 有排水孔幕的渗流场分析 [J]. 水利学报, 1992, 19 (4): 15 - 20.
- [7] 詹美礼, 速宝玉, 刘俊勇. 渗流控制分析中密集排水孔模拟的新方法 [J]. 水利发电, 2000 (4): 23 - 25.
- [8] 王恩志, 王洪涛, 王慧明. “以缝代井列”——排水孔幕模拟方法探讨 [J]. 岩石力学与工程学报, 2002 (1): 98 - 101.
- [9] 李斌, 张俊霞. 数值计算中以沟代井列的附加单元法 [J]. 水利学报, 1996 (3): 51 - 56.

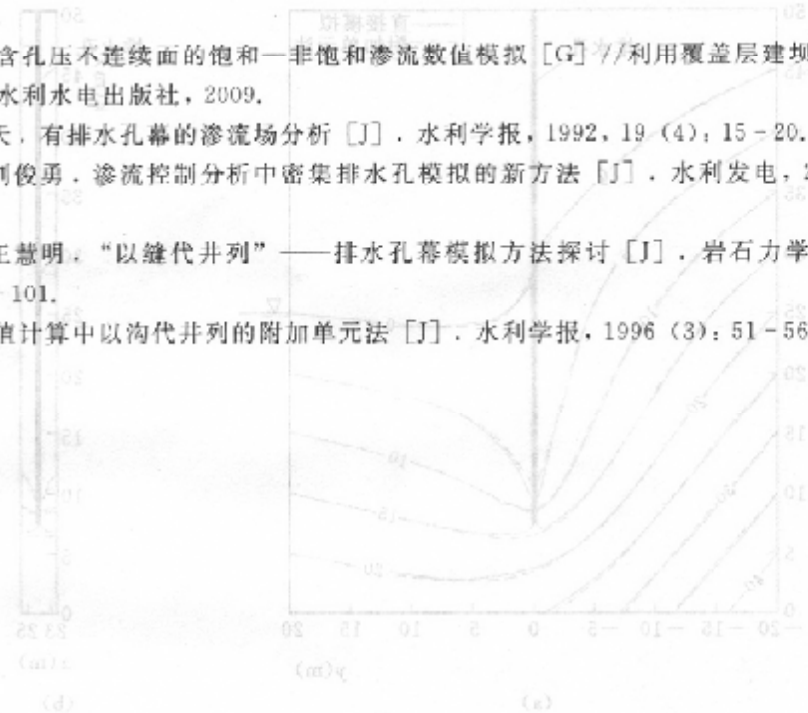


图 4 (mm, 单位) 缝心中孔水头分布 (a) 图
缝中孔水头分布 (a) 图; 缝中孔水头分布 (b) 图

当天, 另需由缝中孔水头分布, 表示单元网格“共升曲线”, 出管以可得代的面土从
缝中孔水头分布, 缝中孔水头分布, 缝中孔水头分布, 缝中孔水头分布, 缝中孔水头分布
缝中孔水头分布, 缝中孔水头分布, 缝中孔水头分布, 缝中孔水头分布, 缝中孔水头分布

缝中孔

缝中孔水头分布, 缝中孔水头分布, 缝中孔水头分布, 缝中孔水头分布, 缝中孔水头分布
缝中孔水头分布, 缝中孔水头分布, 缝中孔水头分布, 缝中孔水头分布, 缝中孔水头分布
缝中孔水头分布, 缝中孔水头分布, 缝中孔水头分布, 缝中孔水头分布, 缝中孔水头分布
缝中孔水头分布, 缝中孔水头分布, 缝中孔水头分布, 缝中孔水头分布, 缝中孔水头分布

水工结构自主 CAE 软件开发的 思考与实践

吴梦喜 何蕃民 杜 斌

(中国科学院力学所 北京 100190)

【摘 要】 CAE 技术对于现代产业发展十分重要。目前,国内外尚无一款功能较完备的通用的水工结构 CAE 软件,国内水工结构 CAE 分析在实际应用方面还存在着诸多不足。本文在简要介绍计算机辅助相关技术的基础上,分析了国内外水工结构 CAE 软件现状,着重探讨了开发水工结构 CAE 软件的必要性,并给出了具体的开发设想。最后,通过介绍本单位水工结构 CAE 软件的开发与应用情况,呼吁行业协会、规划设计院、科研单位与高校协作,共同培育和推动我国水工结构 CAE 软件的开发与应用。

【关键词】 水工结构 CAE 软件 有限元 仿真

1 前言

随着计算机技术的快速发展,虚拟制造和数字化设计等技术不断成熟,人们越来越多地采用计算机作为产品研发和工程研究的辅助工具,从而产生了一系列与计算机辅助有关的技术,如计算机辅助设计(CAD; Computer Aided Design)、计算机辅助工程(CAE; Computer Aided Engineering)、计算机辅助制造(CAM; Computer Aided Manufacturing)以及产品数据管理(PDM; Product Data Management)等。

CAD 是指以计算机为主要手段来辅助设计者完成某项设计工作的建立、修改、分析和优化、信息输出等全部任务的综合性高新技术,如草图绘制、零件设计、装配设计等^[1]。CAE 通常指有限元分析和机构的运动学及动力学分析。有限元分析可完成力学分析(线性、非线性、静态、动态)、场分析(渗流场、温度场、电场、磁场等)、频率响应和结构优化等。机构分析可完成机构内零部件的位移、速度、加速度和力的计算,机构的运动模拟及机构参数的优化。CAM 是用于管理产品信息的所有系统^[2]。

对于新产品的设计及加工,一般先由设计人员借助 CAD 建立起产品的雏形,随后进入 CAE 仿真分析阶段,从而发现新产品设计中的不足。当 CAE 仿真分析确认设计无误时,即可以由 CAM 根据 CAD 中的模型生产具体的实物样品。在整个设计生产过程中,PDM 肩负着 CAD/CAE/CAM 中产品的数据管理,包括产品各个零件的组织关系及明细(如材料、重量、件数等)。由此可见,通过 CAD/CAE 技术,可以实现“不必真的把设备制造出来,就可以在计算机进行模拟时发现不足、及时修正”,即在生产前借助计算机

对设计方案进行模拟,得到精确的分析和论证,从而达到优化设计的目的^[3]。

计算机硬件快速升级使桌面电脑的高性能计算得以实现,同时网络技术的飞速发展促成了制造企业的信息化,可以料想在不远的将来用户不再需要单一的 CAD/CAE/CAM/PDM 系统,而是由它们组成的具有专业特色的集成化仿真系统。CAE 软件是用计算机对工程结构与产品的性能及其生产加工过程,进行分析、模拟、预测、评价、优化和控制的一类应用软件,是工业装备和产品创新设计的核心技术^[4]。在产品的设计中,工程师们可以借助 CAE 软件实现“提高设计质量,降低研究开发成本,缩短研究开发周期”^[5]。

由于 CAE 技术在现代生产中扮演着至关重要的角色,因此,国内外都对发展此项技术寄予高度的重视。从 20 世纪 60 年代初开始在 NASA 的宇航计划中就要求利用计算机进行仿真分析,之后更是若干次将“计算机仿真与建模”列为优先发展的“服务于国家利益的关键技术”^[6]。在国内,CAE 技术的发展也引起很多人的关注。2006 年中国科学院技术科学部和信息技术科学部在上海召开“CAE 自主创新发展战略”论坛。2007 年中国科学院向国务院呈送《关于发展事关国家竞争力和国家安全战略的 CAE 软件产业的建议》的报告^[7]。2008 年 12 月在北京召开主题为“发展 CAE 软件产业的战略对策”的第 339 次香山科学会议。CAE 是建设新型工业体系的核心要素,是理论创新和科技成果的载体^[4]。发展自主知识产权 CAE 软件及技术是提高工程设计与装备制造业核心竞争能力的关键,是国家战略安全和建设创新型国家的需要^[8]。

2 水工结构 CAE 软件的现状

2.1 国外水工结构 CAE 软件的现状与特点

国外针对水工结构及其相关领域的 CAE 软件大多起步较早。在 20 世纪 70 年代,数家针对岩土和水利领域有限元仿真分析的商业公司已具有雏形,如加拿大的 GEO-SLOPE 公司。随着新千年的到来,计算机应用开始普遍,一些 20 世纪八九十年代成立的 CAE 软件公司开始壮大,如成立于 1988 年的 GGU 公司、成立于 1997 年的 SoilVision 公司、成立于 1993 年的 Plaxis 公司等。数十年的财富和市场运作经验的积累使得公司的规模不断壮大、软件核心功能不断扩充,模块组件日趋完善、前后处理界面愈加人性化、多场耦合功能逐渐增强,多数公司可以提供给客户一套全面完整的有限元解决方案。仅以 SoilVision 公司最新推出的 SoilOffice2009 版为例,就包含了渗流分析、应力应变分析、边坡稳定性分析、热分析等诸多模块,所有模块间可以相互耦合计算,其前处理程序已具有较为完善的自动网格剖分功能,软件包同时提供了详尽的帮助文档及相关应用领域的知识库。对于具有一定相关知识基础的用户而言,参考其提供的入门指南、操作手册和相关知识库文档,可以很快入门;同时应该注意,由于软件界面及其相关文档全部采用英文,这就要求用户具有较高的英语水平。

水工行业使用的 CAE 软件,不仅限于专业 CAE 软件,还包括一些通用 CAE 软件,如 ANSYS、ABAQUS、COMSOL 等。这些通用 CAE 软件公司实力雄厚,开发人员完备,销售团队完善,有着数十年的经营历史。同时,软件涉足领域较广,系列产品丰富。值得注意的是,这些大型通用 CAE 软件都具有相当完整的帮助文档和比较丰富的标准用户子程序接口,用户可以对通用 CAE 软件进行二次开发以满足具体的行业应用需求,相

比于自行编写程序,开发难度明显降低、效率大幅提高。以 ABAQUS 对用户开放的自定义材料本构模型的子程序接口 UMAT 为例,可以通过添加一些国内土工计算常用的本构模型,如邓肯-张模型^[3]、沈珠江模型^[4]等,实现对土工材料应力变形问题的分析。

2.2 国内水工结构 CAE 软件现状

早在 20 世纪 60 年代初期,为进行大型水利工程刘家峡大坝的应力分析,中国科学院计算技术研究所三室成立了专门的大坝计算系统研究组,应用有限元方法最终解决了实际问题。那时我国就已经开始发展自己的 CAE 软件。然而由于受到计算机硬件条件的限制,加之文化大革命等政治社会环境的影响,在相当长的一段时间内,我国 CAE 技术的开发和应用完全停顿。文化大革命后,有限元软件的开发和应用才开始启动^[10]。随后的岁月中,在我国学者的努力下,出现了一批具有自主知识产权的有限元分析软件,如国产大型通用有限元分析和优化设计的集成化软件 JIFEX,郑州机械研究所等开发的紫瑞 CAE 等。在此,特别要提到的是在建筑结构等方面的专用软件,得益于设计规范是我国自行制定的,中国建筑科学研究院的软件 PKPM 系列受到业界的欢迎,有的商品化软件几乎占领了相关领域大部分市场。然而在水工结构及相关领域,仅有几款小型的 CAE 软件,如同济曙光系列软件(如 SLOPE、GeoFBA 等)、河海大学 AutoBank、水科院岩土所 STAB 等。当然还有一些在高校科研机构中广为使用的 DOS 程序,严格来说,这种 DOS 程序仅仅构成了 CAE 软件内核的一部分——求解器,而不能称作一款完整的 CAE 软件。相比于国外软件,我们的行业 CAE 软件在若干方面差距巨大:首先是前后处理器非常简陋;其次,国产商用 CAE 应用软件大多功能比较单一,各个模块间不能进行有效的耦合计算;另外有些国产 CAE 软件仅仅是一个二次开发的软件包,其程序主体严重依赖于其他商用软件,这就限制了软件的发展。可以说国内的水工结构 CAE 软件现状很弱,不但从事自主开发的单位凤毛麟角,且投入都不大。有些单位甚至将原有自主开发的程序弃而不用,转而将自己有特色的本构模型或计算方法通过二次开发嵌入国外商业软件。由此可见,我国水工行业 CAE 软件开发的形式十分严峻。这一现状亟待引起行业领导单位和科研人员的高度重视。

3 水工结构 CAE 软件开发设想

3.1 开发水工结构 CAE 软件的必要性与思考

当然,在国内的科研院所内,并不缺乏具有自主知识产权的有限元分析软件,有些软件还很有特色,但缺乏资金支持、研发投入严重不足,致使软件商品化困难,而实际计算分析的需要促使不同单位甚至同一单位不同研究小组之间低水平重复开发的现象十分突出。目前我国相当一部分水工结构 CAE 分析都是依靠高校和科研单位自主研发的计算程序进行的。这些程序主要是针对一些具体的工程问题而开发的。由于缺乏必要的系统的测试和充分的验证,这些程序势必存在不少的问题。因此,利用这些程序进行计算存在很大的风险。各单位在进行工程问题计算分析时,根据已有知识来分析计算结果的合理性,从而发现程序中存在的一些问题,并加以改进。但这一工作除了程序的开发者外,其他人往往难于胜任。由于这些程序往往缺乏可视化建模等和计算结果的图形化表现等前后处理功能,一方面建模效率低,前处理中的几何信息、材料信息、边界条件等情况难以检查,出

错的可能性大,对于特别复杂的情况,不出错误几乎是不可能,这样不但工作效率低且计算结果的可靠性得不到充分的保证;另一方面由于计算结果的可视化程度低因而表现力弱,往往需要花费大量时间做计算结果的整理和分析,分析周期长,影响设计与计算分析之间的有效互动。因此,从行业发展的角度而言,迫切需要开发集成强大前后处理功能且计算可靠的 CAE 软件。

虽然国外软件相比于国内软件在功能、易用性、集成度上具有诸多优点,但在国内设计院中也没有广泛使用,设计院一般还是选择外委方式进行仿真分析。

参看国内几个著名的 CAE 论坛,不难发现语言障碍首当其冲。国外 CAE 软件功能固然强大,怎么用好了成了用户最为关切的问题。相比于日常外语而言,熟练使用 CAE 软件对用户的外语能力要求更高,尤其是专业术语的理解上存在很大的困难。另外一个重要原因则来自于国外软件对我国土建领域规范的不适用性。如我国的相关设计规范指出,在抗滑稳定计算中,极限平衡方法为规定的基本计算方法,有限元强度折减法可以作为验算方法,这就使得很多大型通用 CAE 软件不能按照规范方法分析实际问题,解决问题需要联合使用多个软件,这样势必增加了用户解决问题的难度。再次,若要应用大型通用 CAE 软件进行计算分析,往往需要进行二次开发才能满足国内水工结构领域对诸如土的本构模型等的要求。这就需要既了解有限元基本理论,又熟悉 CAE 软件,还具有利用对应软件中的计算语言编程的能力的专业人才,这也成为了设计院应用的障碍。最后,更应该看到我国水利工程的建设有诸多特有的问题和地质条件,国外 CAE 软件的适用性也是需要考

虑的重要因素。目前国内设计院大多选择外委方式进行 CAE 分析,这种模式有一些优点。一方面高校和科研单位有深厚的理论基础,对复杂问题有较强的分析能力,容易将国内外最新的科研进展和自己的科研成果结合到所接受的委托分析工作中来;另一方面工程实践中需要解决的科学问题也是科研的源泉。因此,对于新的结构形式和复杂的情况,委托高校和科研单位进行研究分析是很必要的。同时,对于比较有经验的结构或情况相对比较简单的问题,如果也采用外委的形式,其弊端是很明显的。首先高校和科研单位的管理部门对一般的工程计算分析工作评价不高,势必影响对受托任务深入分析研究的积极性;其次也要看到具体的计算工作往往是由研究生在导师的指导下完成的,这些研究生是边学边做,这会使分析工作需要较长的时间;另外由于这些人员往往对工程的实际情况缺乏足够的了解,如具体施工过程、对特殊部位的处理以及施工材料的特征等,体现在 CAE 分析上,在对模型的概化、边界条件的设定、特殊部位的处理、材料参数的确定等方面,可能与实际情况存在一定的差异,致使某些分析结果脱离实际。因此,常规问题的外委分析,效率比较低,还可能存在分析质量的问题。

目前国内很多专家学者都充分认识到发展自主知识产权的 CAE 软件的重要性,并且给出了很多建议及对策^[6-12]。如果自主知识产权的 CAE 软件能够像 CAD 软件一样易学易用,设计人员是乐于接受的。设计人员边设计边计算分析,设计与计算分析成为一个交互的过程,势必大大提高设计效率和设计水平。因此发展面向设计人员的 CAE 软件是十分必要的。

3.2 水工结构 CAE 软件开发的内容

主要的水工结构,包括坝、闸、溢洪道、地下厂房和地下洞室等,其数值计算主要是

渗流场、温度场、应力场（或位移场）及这三个场之间的耦合作用计算。对结构安全性的分析主要有坝基和填筑土体的渗透稳定性分析、边坡稳定性分析、围岩稳定性分析和结构物强度分析等。当然，还有一些其他的分析，如心墙堆石坝的水力劈裂安全性、过水通道的抗冲蚀和抗空化分析等。应力场的分析包括静力分析和动力分析两个部分。国内在上述分析方面具有足够的技术积累，具备开发一款水工结构通用有限元 CAE 分析软件的条件。

CAE 软件主要包括三部分。第一部分是前处理，包括几何建模、有限元网格生成、材料参数、荷载、初始条件和边界条件的设定等。第二部分是有限元计算，即求解器，这是软件的核心。有限元计算部分往往由多个计算模块组成，如渗流场、温度场、应力场（或应变场）的单场计算或多场耦合计算，应力场还分为静力计算与动力计算两个模块。第三部分是后处理分析，包括对计算结果的进一步分析和可视化输出，包括强度分析、渗透稳定性分析、边坡稳定分析、洞室围岩稳定性分析等。有限元计算结果和分析结果都以可视化技术生成的云图或等值线显示。

软件开发的界面友好、易学易用、结果可靠。然而要达到这些基本要求，必须充分结合计算机图形技术和有限元计算技术。目前，这方面没有难以逾越的技术障碍，国外已经做得很好，国内研究人员也是完全可以做到。

4 已有的工作基础及进展

笔者自 20 世纪 90 年代初开始从事有限元程序的研究开发与应用工作，一方面依据工程实际计算分析的需要，发展与维护了有限元程序；另一方面将最新的计算技术应用到工程实际，提高了解决工程实际问题的能力。但自用的有限元程序没有前后处理功能，需要借助其他商业软件进行前处理生成数据文件，有限元计算的结果也要通过其他软件进行后处理分析与图形输出。一方面这种“数据—有限元分析—数据”实现模式，前后处理计算文件多、工作量大、检查费时以及错误率高，另一方面这些程序也很难提供给其他单位使用，因此，这种模式是一种低效率的方式。将计算机软件的最新技术与数值计算技术相结合，把软件改造发展成人机交互方便、界面友好、易学易用的软件，既是必要的，也是可能的。采用可视化图形技术，可将以往有限元程序的实现模式变为“图形—有限元分析—图形”^[13]，从而实现有限元计算程序到有限元计算软件的转变。这样既有利于软件的开发和维护，又极大地方便了用户。2009 年开始，笔者在已有的有限元程序的基础上，开始利用有限元软件（LinkeSoft）的开发工作，增加前后处理可视化功能及用户界面。下面对已有的开发工作进行简单的介绍。

4.1 前后处理模块

前处理模块主要功能在于绘制几何模型和生成有限元网格。一般地，用户先通过对话框输入或屏幕拾取这两种方式在屏幕视图区域内交互式绘图，能够准确且方便地建立实体模型。在设定材料和边界等信息后，通过前处理模块中网格生成器生成有限元网格模型。

LinkeSoft 前处理模块提供两种几何模型创建方式，第一种是用户根据计算对象的几何坐标等信息，创建点、线、面到体“自下而上”生成几何模型；另一种是直接 CAD 平面设计图导入软件之中，再据此生成几何模型。然后设定材料参数和边界及荷载等计算

条件后,再对模型进行有限元网格剖分,进而生成前处理数据文件。目前已基本实现二维前处理功能,三维前后处理功能预计在 2011 年开发出来。新的补土筑坝地基模型主要涉及后处理模块的主要功能是将计算结果以图形的形式显示出来,一般主要采用等值线图和云图这两种方式。目前,本模块已经基本具备等值线图与云图的绘制等功能。图 1 为 LinkSoft 前处理模块绘图系统建立该均质坝模型,几何建模、材料设置、网格剖分、分析步设置的截图分别如图 1~图 4 所示,可以在界面内完成有限元前处理所需要的所有信息。

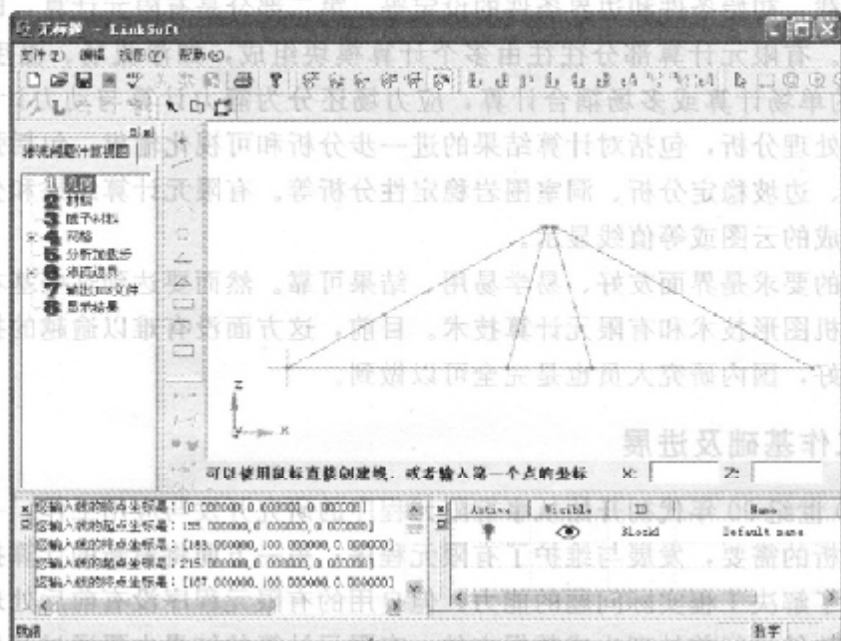


图 1 几何建模图

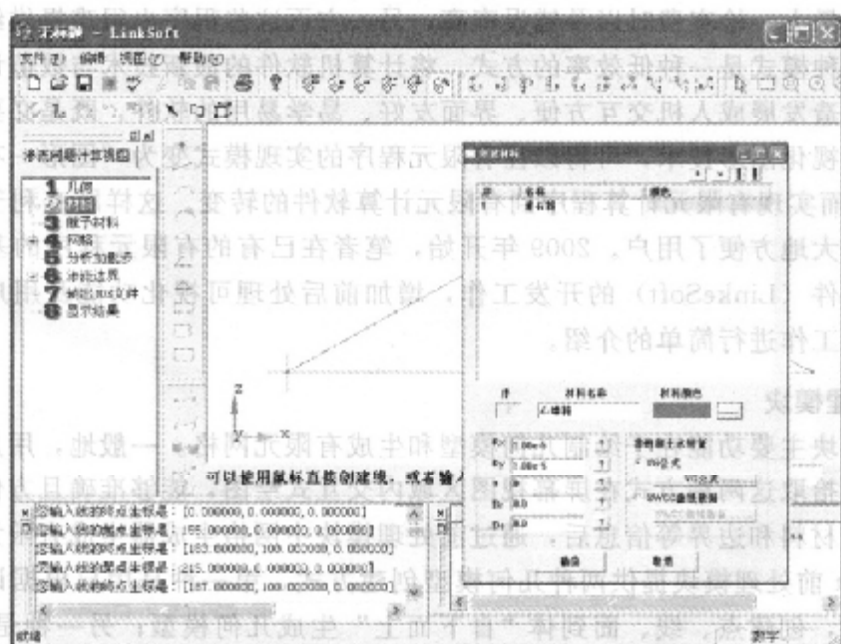


图 2 材料设置图

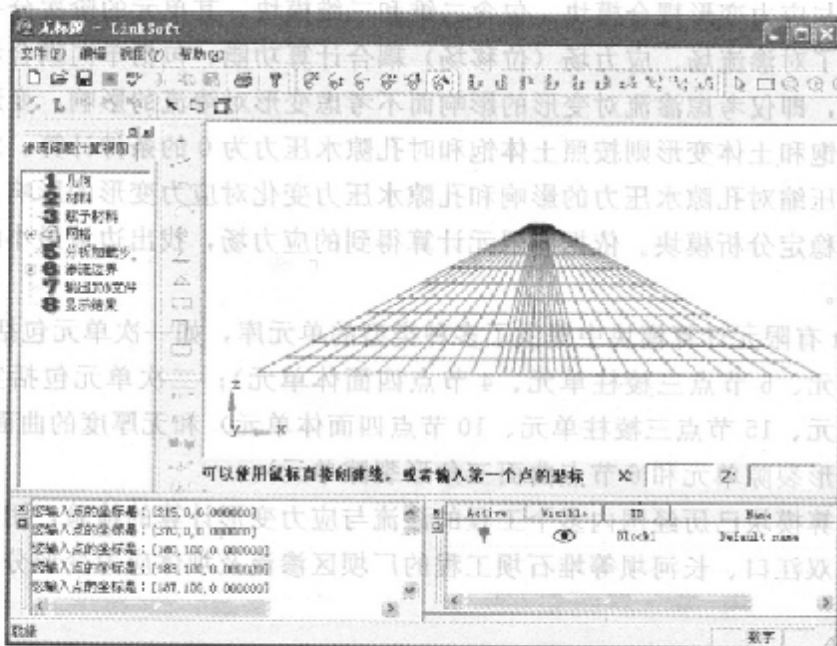


图 3 网格剖分图

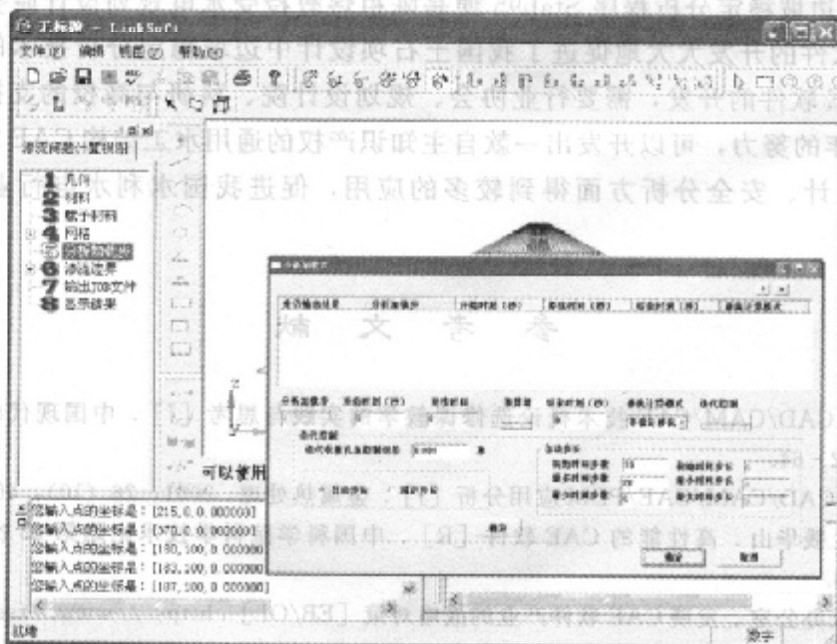


图 4 分析步设置

4.2 有限元计算模块

核心计算模块包括两个有限元模块和一个边坡稳定分析模块。有限元模块是渗流分析、应力变形及其与渗流耦合分析。

(1) 渗流分析模块。包含二维和三维模块，其单元的阶次分一次单元和二次单元，计算功能包括稳定非稳定、饱和非饱和渗流的计算，且能考虑降雨入渗问题。

(2) 渗流与应力变形耦合模块。包含二维和三维模块,其单元的阶次分一次单元和二次单元,提供了对渗流场、应力场(位移场)耦合计算功能,包括单向耦合和双向耦合计算。单向耦合,即仅考虑渗流对变形的影响而不考虑变形对渗流的影响,变形按有效应力方法计算,非饱和土体变形则按照土体饱和时孔隙水压力为0的条件计算。双向耦合,即同时考虑土体压缩对孔隙水压力的影响和孔隙水压力变化对应力变形的影响。

(3) 边坡稳定分析模块。依据有限元计算得到的应力场,找出边坡最小的安全系数和相应的滑移面。

LinkeSoft 有限元计算模块中提供了多种类型的单元库,如一次单元包括实体单元(8节点6面体单元、6节点三棱柱单元、4节点四面体单元);二次单元包括实体单元(20节点6面体单元、15节点三棱柱单元、10节点四面体单元)和无厚度的曲面裂隙单元(8节点曲面四边形裂隙单元和6节点曲面三角形裂隙单元)。

有限元计算模块已历经国内多个工程的渗流与应力变形计算的检验,用于毛尔盖、扎雪、瀑布沟、双江口、长河坝等堆石坝工程的厂坝区渗流及坝体应力变形分析之中。

5 展望

早在20世纪80年代我国便开展了土石坝边坡稳定分析程序的规划研制工作。当前国内应用较广的边坡稳定分析程序 Stab95 便是陈祖煜教授受水电规划设计院委托着手研制的^[1]。这一软件的开发大大地促进了我国土石坝设计中边坡稳定分析技术的应用。水工结构通用 CAE 软件的开发,需要行业协会、规划设计院、科研与高校的支持与合作。期望通过3~5年的努力,可以开发出一款自主知识产权的通用水工结构 CAE 软件,并在我国水工结构设计、安全分析方面得到较多的应用,促进我国水利水电行业设计技术的发展。

参 考 文 献

- [1] 刘广君. CAD/CAM/CAE 技术概论选修课教学的实践与思考 [J]. 中国现代教育装备, 2009 (14): 62-64.
- [2] 胡玲凤. CAD/CAM/CAE/PDM 应用分析 [J]. 金属热处理, 2001, 26 (10): 46-47.
- [3] 梁国平, 钱华山. 高性能的 CAE 软件 [R]. 中国科学院科学技术论坛第 23 次学术报告会会议, 2006.
- [4] 香山会议办公室. 发展 CAE 软件产业的战略对策 [EB/OL]. <http://www.xssc.ac.cn/web/listeons/ConfBrief.asp?rno=1217>.
- [5] 崔俊芝. 计算机辅助工程 (CAE) 的现在和未来 [J]. 计算机辅助工程, 2000, 6: 3-7.
- [6] 钟万勰, 陆仲绩. CAE: 事关国家竞争力和国家安全的战略技术 [J]. 中国科学院院刊, 2007 (22): 115-119.
- [7] 中国科学院. 关于发展事关国家竞争力和国家安全的 CAE 软件产业的建议 [R]. 北京: 中国科学院, 2007.
- [8] 张欣, 丁秀丽, 李术才. ABAQUS 有限元分析软件中的 Duncan-Chang 模型的二次开发 [J]. 长江科学院院报, 2005, 4 (8): 45-47.
- [9] 岑威约, 朱岳明. 基于 ABAQUS 的土石料本构模型二次开发及其应用 [J]. 水利水电科技进

