

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

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

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

$$k_{ij}(s_r) = k_{ij}^* s_r^{1/2} [1 - (1 - s_r^{1/m})^m]^2 \quad (3)$$

其中

$$m = 1 - 1/n$$

式中: s 为饱和度; s_r 为有效饱和度; s_e 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

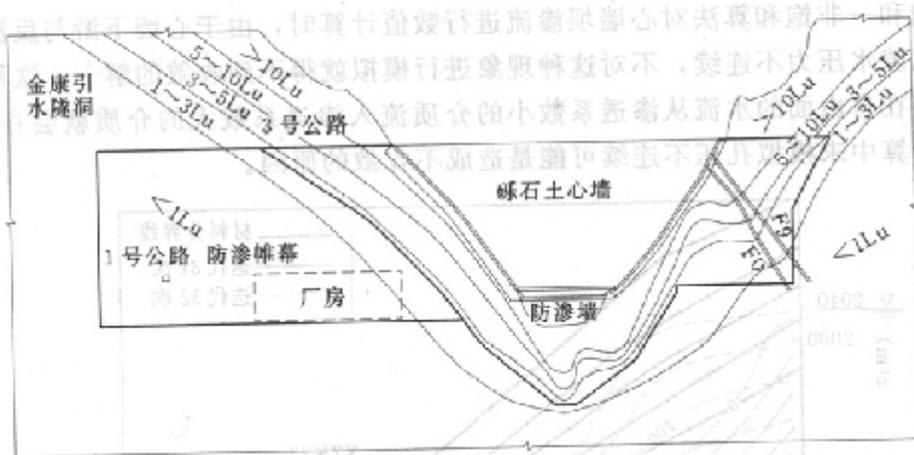


图1 坝轴线截面岩体渗透分区图

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。

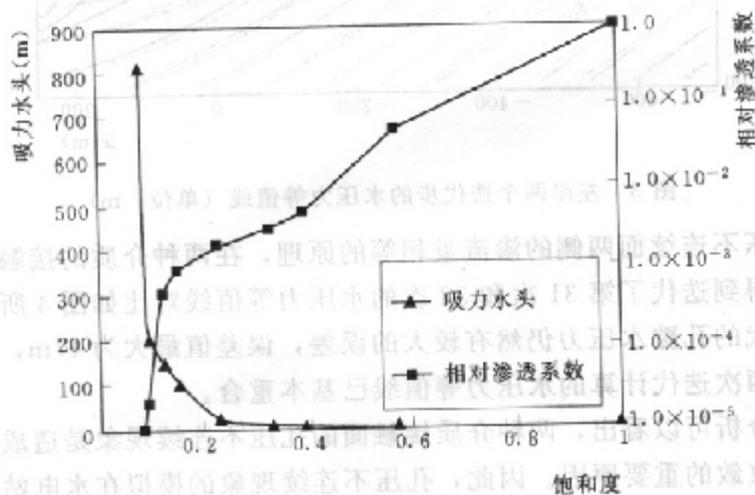


图2 岩体的非饱和土水特征曲线

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。

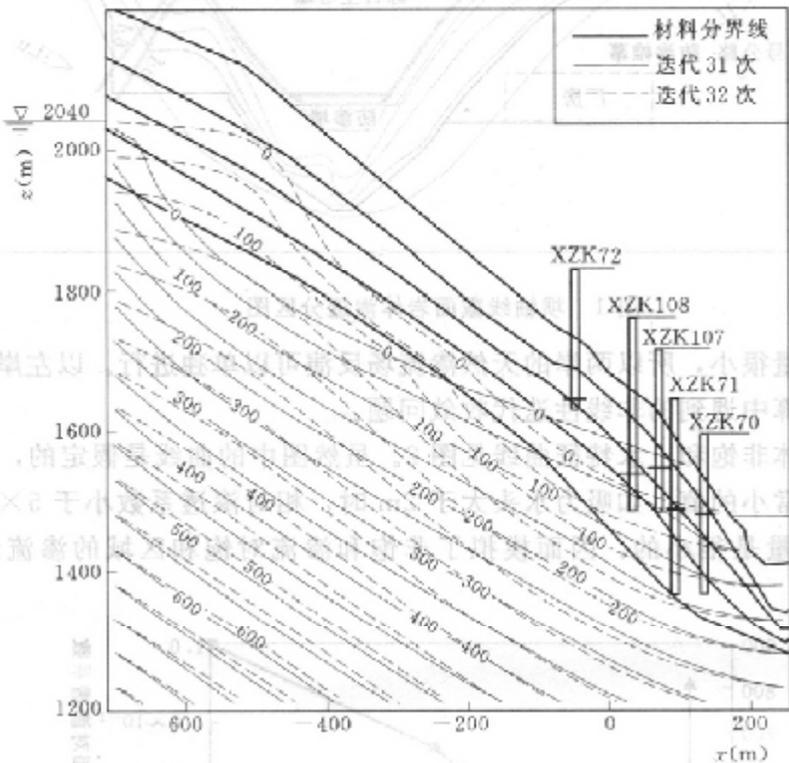


图3 左岸两个迭代步的水压力等值线(单位: m)

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

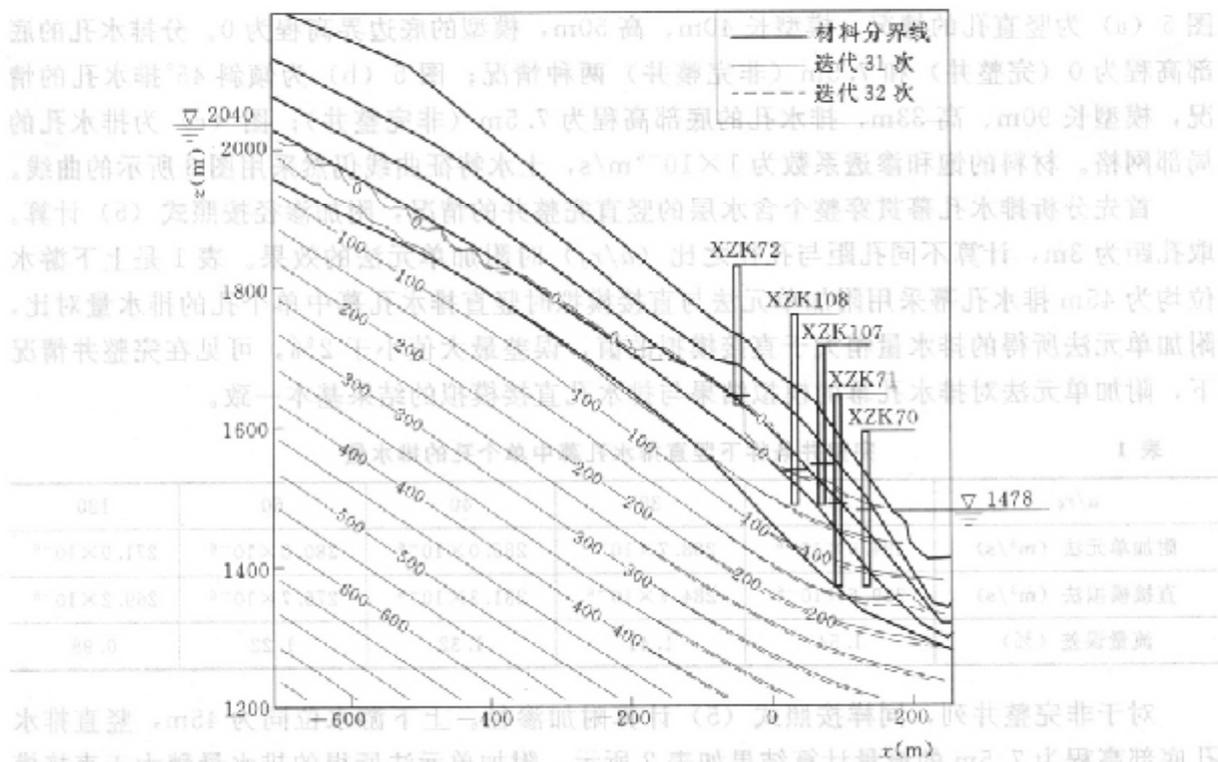


图 4 模拟孔压不连续后两次迭代的水压力等值线 (单位: m)

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

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。

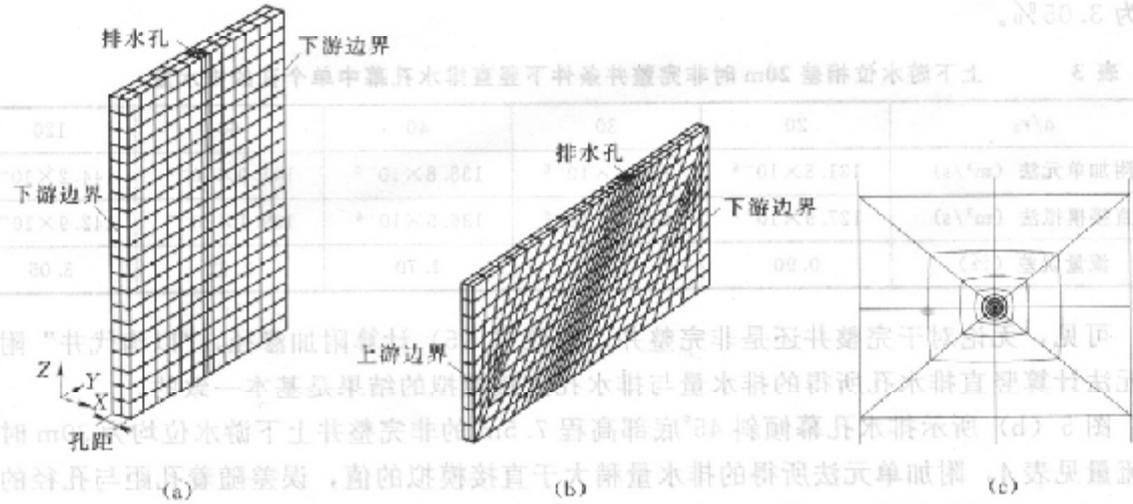


图 5 排水孔幕的计算模型

(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。

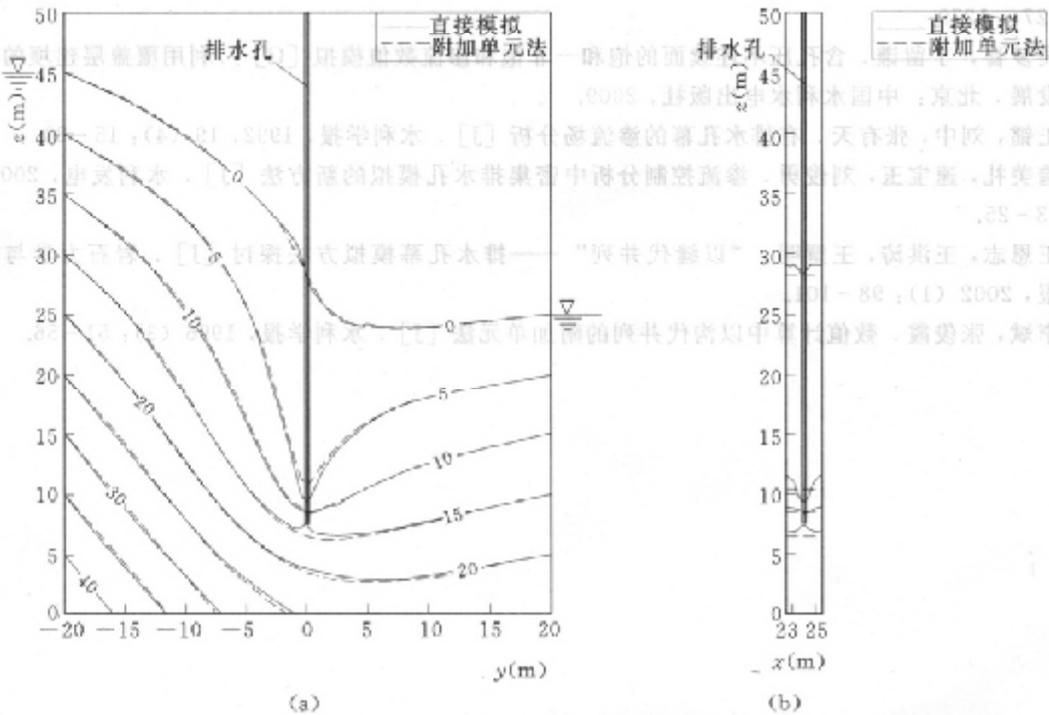


图 6 过排水孔中心线 (单位: mm)

(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.

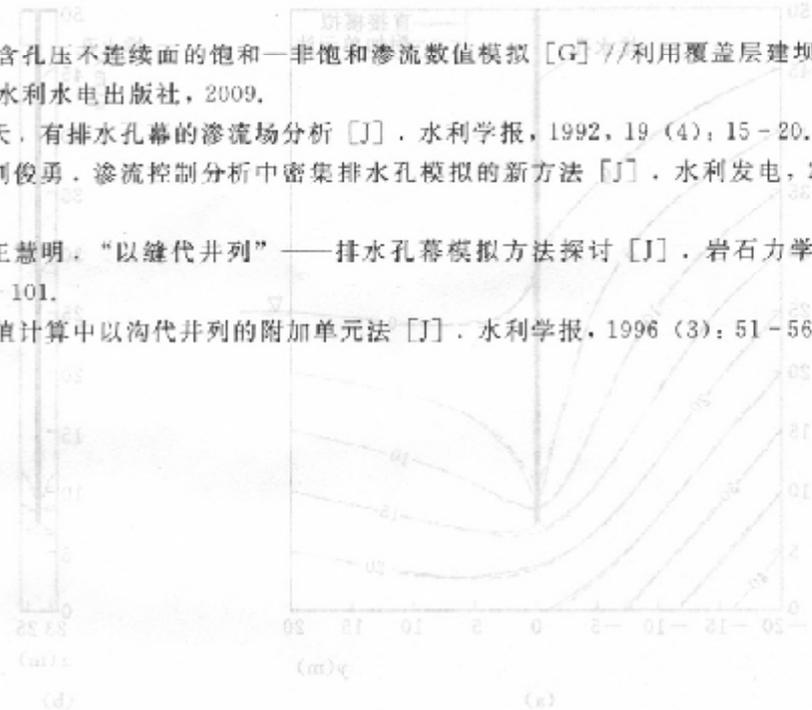


图 4 (mm, 单位) 坝心中排水孔幕 (a) 图
 坝型为式排水帷幕排水帷幕 (b) 图; 坝型为式排水帷幕 (a)

当天, 另需由上游水位直型干坝, 表示单元模拟“共升曲线”, 出管以可得代的面土从
 新的采及面截断影响, 由合量幕是水合截管否具水幕出次, 坝型并并否基排水幕不土
 式坝型幕排水帷幕的靠下而单简特一基表示单元图。另需由上游

图 4

图一由小坝系截断从上游岸, 面界更个坝系截断特两面, 坝型幕的因更一历史故由水
 象坝型去不式排水帷幕排水帷幕土面界, 交脉面界的面简特要只, 图一由大坝系截断人形
 幕, 象坝封截断不的中升去并影非幕幕截断效果以下, 坝型行去象坝特兹表示单元面界出果
 幕型, 式坝型幕排水帷幕的靠下而单简特一基表示单元图。另需由上游
 图一由小坝系截断从上游岸, 面界更个坝系截断特两面, 坝型幕的因更一历史故由水