

文章编号: 1000-7598-(2005) 01-0150-05

考虑降雨入渗的有密集排水孔幕渗流场分析

陈建余

(广州市水利局, 广东 广州 510640)

摘 要: 有复杂边界面的渗流场求解问题经常会同时涉及降雨入渗边界和密集排水孔边界, 这一般是一个非饱和渗流问题, 因此传统的稳定饱和排水子结构模型不能适用。根据 2 类不同的排水孔, 给出了排水子结构典型网格划分型式, 提出了相应的非饱和排水子结构水力学模型, 并引入传统模型中未考虑的降雨入渗等其它边界, 使得模型更全面和完善。

关 键 词: 降雨入渗; 密集排水孔幕; 排水子结构方法; 水力学模型; 有限元法

中图分类号: O 357.3

文献标识码: A

Analysis of Seepage Field with Densely Distributed Drainage Holes Considering Rainfall Infiltration

CHEN Jian-yu

(Guangzhou Water Resources Bureau, Guangzhou, P.R.China, 510640 China)

Abstract: The problem of solving the seepage field with complicated boundaries frequently involves rainfall infiltration boundary as well as densely-distributed drainage hole boundary. This is in general an unsaturated seepage problem, and therefore, the traditional steady saturated drainage substructure model is not applicable any more. In this paper, according to the two classified drainage holes, typical subdividing modes for the two types of drainage holes are offered and a hydraulic model for unsaturated drainage substructure is presented correspondingly. Additionally, other boundaries like rainfall infiltration boundary which are not considered in traditional model are introduced, making the model more comprehensive and improved.

Key words: rainfall infiltration; densely-distributed drainage curtain; drainage substructure method; hydraulic model; FEM

1 引 言

降雨入渗对于土壤中地下水运动有着至关重要的影响, 地表水及地下水的动态存贮、深层渗漏及地表蒸发都与降雨有着极为密切的关系。对于边坡、农田水利、地下水资源评价等工程项目, 降雨入渗一般是必须考虑的重要影响因素。同时, 在许多重大水利工程, 如长江三峡、龙滩等水利工程中, 排水孔幕越来越受到重视, 排水孔幕布置的范围和规模不断扩大, 呈现高度密集分布的趋势, 排水孔幕已经被认为是最重要的渗控工程措施, 这就使得排水孔幕的数值模拟显得十分重要。以往许多文献, 如文献[1-3]以单井渗流解析解为基础, 再对群井作用进行简化, 以便于解析解的应用, 但对于实际分布在非均质各向异性甚至包含软弱夹层及断层的复

杂地质条件下的排水孔幕来说, 解析解本身是不存在的, 再在解析解基础上做出简化或假定则更缺乏严密的理论依据。文献[4, 5]相继提出了排水子结构方法和改进排水子结构方法, 以对每个排水孔的实际排水渗流行为进行精细的刻画。文献[6, 7]则通过进一步的工程实践和探索证明了排水子结构方法的科学性和优越性。但当考虑入渗作用后, 排水子结构的稳定饱和模型就不能适用了, 而目前已有文献, 包括文献[4-7]都还没有提出完整严密的非饱和排水子结构水力学模型, 这使得排水子结构技术的应用受到限制。本文正是针对这一问题, 提出了考虑降雨入渗的非饱和排水子结构分析方法, 并特别在排水子结构水力学模型中也引入降雨入渗边界, 使得模型更全面, 更完整, 能适应更广泛的有密集排水孔的工程渗流问题。

2 考虑降雨入渗的有限元计算模型

2.1 数学模型^[8-10]

(1) 不考虑骨架及流体压缩作用的非稳定饱和-非饱和渗流基本微分方程为

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[k_{ij}^s k_r(h_c) \frac{\partial h_c}{\partial x_j} + k_{i3} k_r(h_c) \right] - Q = [C(h_c) + \beta S_s] \frac{\partial h_c}{\partial t} \quad (1)$$

式中 h 为总水头, $h=x_3+p/\gamma$, x_3 为位置水头; h_c 为压力水头; k_{ij}^s 为饱和渗透系数张量; k_r 为相对透水率, 为非饱和土的渗透系数与同一种土饱和时的渗透系数的比值, 在非饱和区 $0 < k_r < 1$, 在饱和区 $k_r=1$; C 为比容水度, $C = \frac{\partial \theta}{\partial h_c}$, 在正压区 $C=0$; β 为饱和-非饱和选择常数, 在非饱和区为 0, 在饱和区为 1; S_s 为弹性贮水率, 饱和土体的 S_s 为一个常数, 在非饱和土体中 $S_s=0$, 当忽略土体骨架及水的压缩性时, 对于饱和区也有 $S_s=0$; Q 为源汇项。

(2) 初始条件:

$$h_c(x_i, 0) = h_c(x_i, t_0), \quad i=1, 2, 3 \quad (2)$$

(3) 边界条件:

$$h_c(x_i, t) \Big|_{\Gamma_1} = h_{cl}(x_i, t) \quad (3)$$

$$-\left[k_{ij}^s k_r(h_c) \frac{\partial h_c}{\partial x_j} + k_{i3}^s k_r(h_c) \right] n_i \Big|_{\Gamma_2} = q_n \quad (4)$$

$$-\left[k_{ij}^s k_r(h_c) \frac{\partial h_c}{\partial x_j} + k_{i3}^s k_r(h_c) \right] n_i \Big|_{\Gamma_3} = q_r(t) \quad (5)$$

$$-\left[k_{ij}^s k_r(h_c) \frac{\partial h_c}{\partial x_j} + k_{i3}^s k_r(h_c) \right] n_i \Big|_{\Gamma_4} \geq 0 \text{ 且 } h_c \Big|_{\Gamma_3} = 0 \quad (6)$$

式(2)~(6)中: n_i 为边界外法线方向余弦; t_0 为初始时刻; h_{cl} 为已知水头; q_n 为已知流量; $q_r(t)$ 为降雨入渗流量; $h_c(t_0)$ 为初始 t_0 时刻渗流场水头; Γ_1 —已知结点水头边界; Γ_2 —已知流量边界; Γ_3 —降雨入渗边界; Γ_4 —饱和逸出面边界。

2.2 有限元法求解

对 2.1 节中提出的数学模型, 在空间域上合理离散, 并应用 Galerkin 加权余量法, 可得相应有限元求解格式, 如式(7)所示, 在此基础上, 对时间域进行合理离散, 对式(7)进行积分, 可获取相应有限元时间差分迭代格式, 如式(8)所示, 一般令 $\alpha=1$, 用隐式差分格式编程, 具体推导过程见文献[10]。

$$[A]\{h_c\} + [B]\left\{\frac{\partial h_c}{\partial t}\right\} = \{P\} \quad (7)$$

$$\left(\alpha[A] + \frac{[B]}{\Delta t^k} \right) \{h_c^k\} = \{P\} - (1-\alpha)[A]\{h_c^{k-1}\} + \frac{[B]\{h_c^{k-1}\}}{\Delta t^k} \quad (8)$$

$$\text{式中: } [A] = \sum_{e=1}^{NE} \left[\iiint_{\Omega^e} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 k_r(h_c) k_{ij}^s \frac{\partial N_n}{\partial x_i} \frac{\partial N_m}{\partial x_j} d\Omega \right],$$

$$[B] = \sum_{e=1}^{NE} \left[\iiint_{\Omega^e} N_n N_m [C(h_c) + \beta S_s] d\Omega \right],$$

$$\{P\} = - \sum_{e=1}^{NE} \left[\iiint_{\Omega^e} \sum_{i=1}^3 k_r(h_c) k_{i3}^s \frac{\partial N_n}{\partial x_i} d\Omega \right] -$$

$$\sum_{e=1}^{NE} \left[\iiint_{\Omega^e} N_n Q d\Omega + \iint_{\Gamma_2} q_n N_n dS + \iint_{\Gamma_3} q_r N_n dS \right]$$

2.3 降雨入渗边界处理^[11]

降雨入渗边界处理的关键是通过入渗能力和可入渗流量来确定边界实际降雨入渗流量。假定降雨强度为 $R(t)$, 设入渗面的外法线方向为 $n = (n_1, n_2, n_3)$, 则因降雨产生的在入渗面法向上的可入渗分量为 $q_a(t) = R(t) n_3$, 同时, 由 Darcy 定律可以按式(9)计算入渗面各个方向上的入渗能力。

$$q_{bi}(t) = -k_{ij}^s k_r(h_c) \left(\frac{\partial h_c}{\partial x_j} \right) - k_{i3}^s k_r(h_c), \quad i=1, 2, 3; j=1, 2, 3 \quad (9)$$

则入渗面法向上的入渗能力为 $q_b(t) = \sum_{i=1}^3 q_{bi}(t) n_i$, 由此可以确定边界实际降雨入渗流量为

$$q_r(t) = \min\{q_a(t), q_b(t)\} \quad (10)$$

3 排水子结构技术原理^[12]

将排水子结构总传导矩阵及相应流量列阵写成分块形式如下:

$$\begin{bmatrix} K_{ii} & K_{ib} \\ K_{bi} & K_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} h_i \\ h_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_i \\ P_b \end{Bmatrix} \quad (11)$$

式中 $[K_{ii}]$ 为子结构内部未知结点水头相互作用传导矩阵; $[K_{ib}]$, $[K_{bi}]$ 分别为子结构内部未知结点水头与出口未知结点水头之间相互作用的传导矩阵; $[K_{bb}]$ 为子结构出口未知结点水头相互作用传导矩阵; $\{h_i\}$, $\{h_b\}$ 分别为子结构内部未知结点水头和出口未知结点水头列阵; $\{P_i\}$, $\{P_b\}$ 分别为子结构已知结点水头对内部未知结点水头和出口未知结点水

头贡献流量, 包括内部源汇项及非零流量边界贡献的列阵。

由式 (11) 可求得相应未知结点出口传导矩阵及相应流量贡献列阵 $[K_{bb}^*]$, $\{P_b^*\}$ 如下:

$$\begin{cases} [K_{bb}^*] = [K_{bb}] - [K_{bi}] [K_{ii}]^{-1} [K_{ib}], \\ [P_b^*] = \{P_b\} - [K_{bi}] [K_{ii}]^{-1} \{P_i\} \end{cases} \quad (12)$$

用 $[K_{bb}^*]$ 与 $\{P_b^*\}$ 参与总平衡方程系数及常量矩阵的组装, 求解 $\{h_b\}$ 后, 用下式回代求解 $\{h_i\}$ 。

$$\{h_i\} = [K_{ii}]^{-1} \{P_i\} - [K_{ii}]^{-1} [K_{ib}] \{h_b\} \quad (13)$$

4 考虑降雨作用的排水子结构模型^[13]

在提出排水子结构水力学模型之前, 先明确 2 类排水孔及相应排水子结构。一类是工程中出渗水流沿排水孔壁向下流动, 并从排水孔底口排入排水廊道, 排水孔内一般无积水, 孔壁出渗水流主要通过重力排水, 称为底排型排水孔, 底排型排水孔及其周围一定范围内的单元组成底排水型排水子结构, 典型的网格划分型式如图 1 (a) 所示。另一类是工程中出渗水流渗入排水孔后, 当出渗水流超出排水孔顶口时, 从排水孔顶口排入排水廊道, 孔壁出渗水流主要依靠孔壁高压水头排水, 称为顶排型排水孔, 顶排型排水孔及其周围一定范围内的单元组成顶排水型排水子结构, 典型的网格划分型式如图 1 (b) 所示; 在实际工程中, 排水孔布置常常十分密集, 同一排水子结构可以包含多排多列排水孔, 但单孔排水子结构模型和多孔排水子结构模型在渗流特性上没有本质上的区别, 只是多孔排水子结构模型在图形和边界处理的表述上更复杂而已, 本文不专门讨论。

据此, 可以定义 2 类饱和-非饱和排水子结构水力学模型, 如图 2 所示, 图中虚线表示若排水孔端口未延至边界, 在网格生成时宜将孔口布置相应母单元内部, 以利于网格的连续, 此时在图 2 (a) 中将 A_1, B_1, C_1, D_1 移至 A_0, B_0, C_0, D_0 , 在图 2 (b) 中将 A_3, B_3, C_3, D_3 移至 A_4, B_4, C_4, D_4 。

对于图 2 所示的典型排水子结构水力学模型, 排水孔边界按下式处理。

$$\begin{aligned} -k_r(h_c) \left\{ \left[\frac{\partial h_c}{\partial x_1} \frac{\partial h_c}{\partial x_2} \frac{\partial h_c}{\partial x_3} \right] [k^s] + [k_{13} \ k_{23} \ k_{33}] \right\} [n_1 \ n_2 \ n_3]^T \Big|_{\Gamma_a} = \\ 0 \text{ 且 } h_c|_{\Gamma_a} < 0 \end{aligned} \quad (14)$$

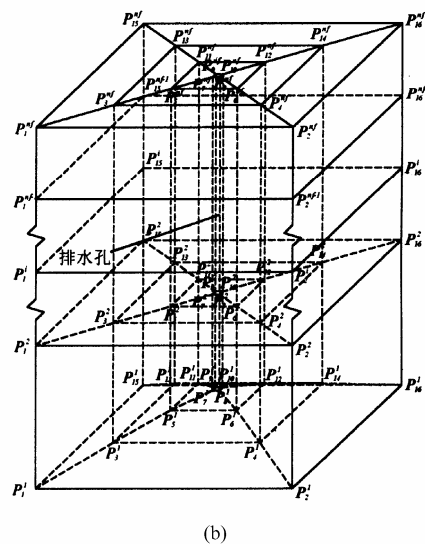
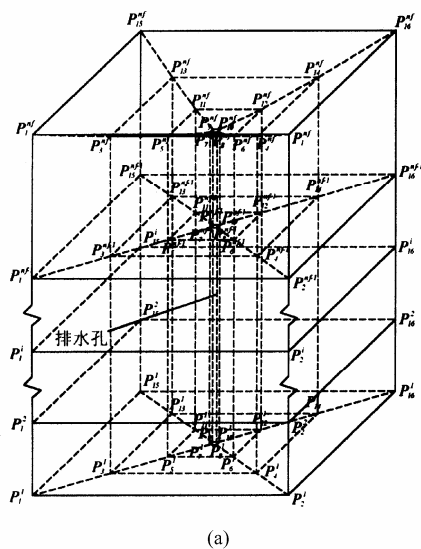


图 1 典型排水子结构二次剖分模式
Fig.1 Typical subdividing mode of drainage substructure

$$\begin{aligned} -k_r(h_c) \left\{ \left[\frac{\partial h_c}{\partial x_1} \frac{\partial h_c}{\partial x_2} \frac{\partial h_c}{\partial x_3} \right] [k^s] + [k_{13} \ k_{23} \ k_{33}] \right\} \\ [n_1 \ n_2 \ n_3]^T \Big|_{\Gamma_b} \geq 0 \text{ 且 } h_c|_{\Gamma_b} = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

$$h_c|_{\Gamma_c} = h_0 - x_3 \quad (16)$$

式(14)~(16)中 $\Gamma_a = B_1 B_2 \cup C_1 C_2$; 对于图 2 (a), $\Gamma_b = B_2 B_3 \cup C_2 C_3$; 对于图 2 (b), $\Gamma_b = B_2 E \cup C_2 F$; $\Gamma_c = E B_3 \cup F C_3$ 。

除排水孔壁外, 排水子结构中一般不存在非零流量或已知水头边界, 但在特殊情况下, 这类边界是可能存在的, 当开挖面附近布置排水孔时, 排水子结构的侧面就可能包含已知结点水头边界, 此时边界按式 (17) 处理, 或者当浅层布置排水孔时,

排水子结构即可能包含地表降雨入渗边界, 此时边界按式(18)处理。

$$h_c|_{\Gamma_{c1}} = h_1 - x_3, \quad h_c|_{\Gamma_{c2}} = h_2 - x_3 \quad (17)$$

$$-k_r(h_c) \left\{ \left[\frac{\partial h_c}{\partial x_1} \frac{\partial h_c}{\partial x_2} \frac{\partial h_c}{\partial x_3} \right] [k^s] + [k_{13} \ k_{23} \ k_{33}] \right\} [n_1 \ n_2 \ n_3]^T \Big|_{\Gamma_d} = q_r(t) \quad (18)$$

式(17)~(18)中 $\Gamma_{c1} = A_2 \ A_3$; $\Gamma_{c2} = D_2 \ D_3$; $\Gamma_d = A_1 \ B_1 \cup C_1 \ D_1$ 。

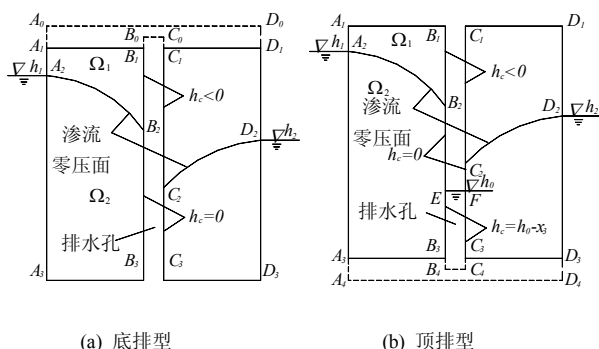


图2 饱和-非饱和排水子结构水力学模型

Fig.2 Hydraulic model of saturated-unsaturated drainage substructure

5 工程算例

以某船闸为例, 闸室壁面开挖成直立高坡, 闸面筑有厚约 1.8 m 的贴壁式混凝土衬砌边墙, 墙后山体开挖成多台阶的岩体边坡。边坡体从上向下涉及的材料分别为强风化岩层、弱风化岩层、微风化岩层。边坡地下水主要来自山体中的地下水、地表降雨入渗及闸室高水位运行时内水外渗。闸室从高水位骤降时, 闸室衬墙有可能承受较大的外水荷载, 为此, 在墙体背后及边坡岩体内采用了多种排水渗控措施。主要渗控措施有直墙后贴面网格式排水管排水系统, 在沿闸室水流向及高程向布置成 4 m × 7.5 m 的网格型式, 边墙内设有竖向集水井, 将排水管内的渗透水导排至闸室基础排水廊道。边坡体设 4 道纵向排水洞, 相邻层排水洞之间布置排水幕, 顶层排水洞顶部排水幕深入强风化岩层 3 m, 其余排水幕中的排水孔孔深按超过上一层排水洞底板高程 0.5 m 设计, 排水孔孔径 91 mm, 孔距 2.5 m。在进行有限元一次网格处理时将计算域内所有存在出逸面的排水管、排水洞和排水孔布置在相应的排水子结构中, 排水子结构二次网格处理参照文献[13]进行。图3为闸室边坡体计算模型及单元网格剖分图。

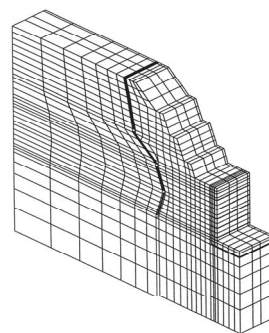


图3 计算模型及单元网格图

Fig.3 The computation model and the FEM mesh concerned

计算模型的选取范围, 根据排水管、排水洞及排水孔的分布情况, 边坡沿走向长度取为 2.5 m, 高度及宽度分别取为闸室高度的 3~4 倍。边界条件: 垂直走向的 2 个侧面认为是水力对称面, 作为不透水面处理, 闸室侧面及山体内侧面按已知水头边界处理, 计算域底面按不透水面处理, 顶面及斜坡面按自由入渗或出逸面处理, 初始计算条件取为稳定饱和渗流场。闸室内计算水位取为最高运行水位 156.0 m, 山体中地下水位近似取为弱风化岩体的顶板高程 195.0 m, 地表入渗系数取 0.145。在非饱和渗流迭代计算中, 材料的非饱和渗流特性是通过非饱和和相对渗透系数 k_r 与体积含水量 θ 的对应关系曲线 $k_r-\theta$, 以及毛细压力 h_c 与体积含水量 θ 的对应关系曲线 $h_c-\theta$ 来体现的, 曲线方程参见文献[13]。计算域各种材料所涉及的渗流特性参数如表 1 所示, 表中 $k_1 \sim k_3$ 为材料主渗透系数, θ_s , θ_r , α , n 为非饱和计算参数, 强风化岩层和混凝土取为各向同性材料。

表1 计算域内各种材料渗流特性参数

Tab.1 The seepage properties parameters of various materials in the domain

材料	$k_1/\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	$k_2/\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	$k_3/\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	θ_s	θ_r	α/cm^{-1}	n
强风化岩层	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-3}	0.39	0.10	0.059	1.48
弱风化岩层	3.29×10^{-5}	9.92×10^{-5}	1.15×10^{-4}	0.20	0.05	0.03	1.24
微风化岩层	1.8×10^{-7}	5.42×10^{-7}	6.51×10^{-7}	0.05	0.01	0.005	1.09
混凝土	1.0×10^{-8}	1.0×10^{-8}	1.0×10^{-8}	0.020	0.005	0.002	1.05

采用本文提出的考虑降雨入渗排水子结构模型对闸室开挖形成的边坡体渗流场进行计算, 图4为无降雨时第2闸室北线边坡稳定渗流场等水头线图, 这说明边坡岩体中的排水幕布置至关重要, 排水渗控措施很好地隔断了山体地下水对边墙的作用。图5为雨强 100 mm/d 降雨历时 4 d 时边坡渗流场等水头线图, 这说明此时渗流饱和区从顶层排水廊道以上区域越过排水幕逐渐向边坡体表面扩展, 同时渗流零压面也逐渐上抬, 但在排水廊道及排水

孔幕等排水渗控措施的作用下, 闸室的外水压力没有太大的变化, 说明工程排水降压措施能够保证工程在降雨等不利因素作用下的安全性。

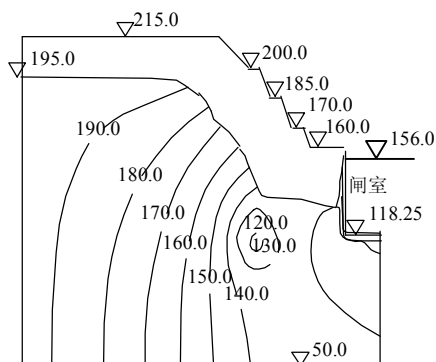


图4 无降雨时稳定渗流场等水头线图(m)

Fig.4 The water head isoline of steady seepage field without rainfall

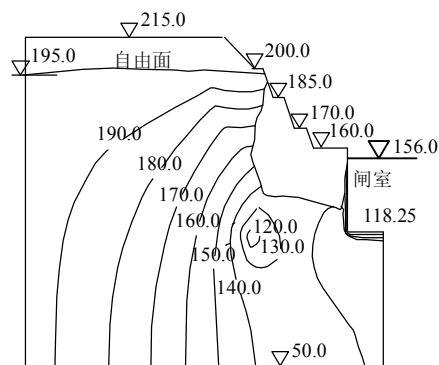


图5 降雨历时4d渗流场等水头线图(m)

Fig.5 The water head isoline of a 4 day long rainfall seepage lasting

6 主要结论

(1) 降雨入渗是影响渗流场水头分布的重要水力边界条件, 该边界模拟的关键是根据降雨强度和表土层随着含水率变化的入渗能力确定边界实际入渗流量。

(2) 密集排水孔幕是最具影响力的渗控工程措施, 对排水边界严密精细的数值模拟方法是排水子结构方法, 但传统稳定饱和和排水子结构模型不能适应考虑降雨入渗的非稳定非饱和工程渗流问题。

(3) 本文对传统排水子结构分析理论进行了拓展, 针对2类不同排水孔提出了相应的饱和-非饱和和排水子结构水力学模型, 并特别引入传统模型中未考虑的降雨入渗等其它边界, 尽可能更全面地考虑

排水子结构可能存在的边界面渗流水力行为, 使得模型边界模拟更完善。

(4) 算例计算结果表明, 本文提出考虑降雨入渗的饱和-非饱和和排水子结构分析的理论和方法是正确的, 可以应用于相关的工程渗流问题的求解。

参考文献

- [1] 关锦荷, 刘嘉忻, 朱玉侠. 用排水沟代替排水井列的有限元法分析[J]. 水利学报, 1984, (3): 10—18.
- [2] 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, 21(1): 98—101.
- [3] 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]. 水力发电, 2000, (4): 23—25.
- [4] 王镭, 刘中, 张有天. 有排水孔幕的渗流场分析[J]. 水利学报, 1992, (4): 15—20.
- [5] 朱岳明, 陈振雷, 吴愷等. 改进排水子结构法求解地下厂房洞室群区的复杂渗流场[J]. 水利学报, 1996, (9): 79—85.
- [6] 陈建余, 朱岳明, 龚道勇等. 江口拱坝坝基渗流场计算分析[J]. 水力发电, 2002, 344(12): 22—25.
- [7] 朱岳明, 陈建余, 龚道勇等. 拱坝坝基渗流场的有限单元法精细求解[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(3): 326—330.
- [8] 刘杰, 王媛, 刘宁. 岩土工程渗流参数反问题[J]. 岩土力学, 2002, 23(2): 152—161.
- [9] 薛禹群. 地下水动力学原理[M]. 北京: 地质出版社, 1986.
- [10] 毛昶熙. 渗流数值计算与程序应用[M]. 南京: 河海大学出版社, 1999.
- [11] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.
- [12] 姜晋庆, 张铎. 结构弹塑性有限元分析法[M]. 北京: 宇航出版社, 1990.
- [13] 陈建余. 非稳定饱和-非饱和渗流场数值计算关键技术及其应用研究[博士学位论文 D]. 南京: 河海大学, 2003.