

文章编号: 1000_0887(2005) 03_0325_08

碾压混凝土坝渗流场与应力场耦合模型研究^{*}

顾冲时, 苏怀智, 周 红

(河海大学 水利水电工程学院, 南京 210098)

(谢和平推荐)

摘要: 针对碾压混凝土坝存在众多施工层面问题, 提出了确定影响层厚度以及相应物理力学参数的方法; 在此基础上, 探讨并建立了碾压混凝土坝渗流场与应力场两场耦合模型, 研制了相应的三维有限元程序。研究表明, 结合试验和理论分析确定的碾压混凝土坝层面影响层的厚度、弹性模量和泊松比等参数更切合实际; 提出的碾压混凝土坝渗流场与应力场两场耦合模型, 能较好地体现两场耦合作用, 开发的三维有限元模型能较充分反映碾压混凝土坝施工层面的特性。通过研究, 为分析施工层面对碾压混凝土坝变化性态影响, 以及了解大坝的应力和渗流的相互作用提供了科学依据。

关键词: 碾压混凝土坝; 层面; 渗流场; 应力场; 耦合分析

中图分类号: TV642.3 **文献标识码:** A

引 言

碾压混凝土坝由薄层浇筑碾压而成, 由于层层碾压, 存在众多的水平施工层面, 若层与层之间胶结不好, 形成一相对薄弱面, 成为影响碾压混凝土坝强度和稳定的关键部位。此外, 碾压混凝土层面也是坝体防渗的薄弱部位, 对碾压混凝土坝而言, 层面的防渗状况, 决定着整个坝体的防渗能力。与此同时, 大坝建成蓄水以后, 在坝体中形成渗流场, 该渗流场的作用将影响坝体的应力场, 应力场的改变会引起坝体孔隙和裂隙的改变, 从而导致坝体渗流性能的改变, 两者相互影响。碾压混凝土坝由于存在水平施工层面, 层面的存在改变了坝体的渗流场和应力场分布, 因此, 在结构和渗流计算分析时, 应尽可能较为客观地模拟层面的影响, 包括层面影响带厚度的确定、层面的物理力学参数选取等, 以便较正确地分析碾压混凝土坝的应力和渗流的相互作用。目前, 对碾压混凝土坝施工层面的模拟分析还在进一步研究之中。本文从最基本的结构和渗流分析以及试验相结合等方法入手, 探讨了层面影响厚度以及相应物理力学参数的确定, 在此基础上, 建立了碾压混凝土坝的渗流场和应力场两场耦合分析模型。

* 收稿日期: 2003_07_21; 修订日期: 2004_11_27

基金项目: 国家自然科学基金(重点)资助项目(50139030); 国家重点基础研究发展规划资助项目(2002CB412707); 教育部博士点基金资助项目(20020294005); 教育部“跨世纪优秀人才培养计划”基金资助项目

作者简介: 顾冲时(1962—), 男, 江苏启东人, 教授, 博士, 博士生导师(联系人, Tel: + 86_25_83786957; Fax: + 86_25_83713059; E_mail: damsaf@ sina. com)。

1 碾压混凝土坝施工层面参数的确定

对于碾压混凝土而言,其层面影响带的厚度 b_a , 以及其对应的弹性模量 E_a 、泊松比 μ_a 和剪切模量 G_a 等用试验精确模拟比较困难;相反,对于本体以及碾压混凝土层的弹性模量、泊松比和剪切模量等较方便地通过相应的试验即可确定。下面讨论碾压混凝土层面 b_a 、 E_a 、 μ_a 和 G_a 的确定方法。

1.1 施工层面影响带厚度 b_a 的确定

图1为分析层面影响带厚度 b_a 的示意图,设 B 为碾压层厚度, b_c 为碾压混凝土本体的厚度, k_c 为碾压混凝土本体的渗透系数, k_a 为对应层面影响带的等效渗透系数,则在某一水力梯度 J 作用下,通过单位宽度碾压混凝土本体的渗水量 $q_c = k_c b_c J$, 通过层面影响带的渗水量 $q_a = k_a b_a J$, 总渗水量为 $q = q_c + q_a$ 。设碾压层水平方向综合渗透系数为 k , 则有^[1,2]:

$$k(b_a + b_c)J = k_c b_c J + [gb^3_a / (12\nu m)]J \quad (1)$$

由于 b_a 相对 B 甚小,可以认为 $B \approx B - b_a$ 即 $b_c \approx B$, 则 b_a 为:

$$b_a = [12\nu m B (k - k_c) / g]^{1/3} \quad (2)$$

式中: g 为重力加速度; ν 为水的运动粘滞系数; m 为与层面影响带水力粗糙度有关的参数。

根据上述原理,结合试验可以确定层面影响层厚度 b_a 。

1.2 施工层面的弹性模量 E_a 、泊松比 μ_a 和剪切模量 G_a 的确定

为分析方便,将碾压混凝土的弹性模量分成两大类,垂直于层面方向的弹性模量 E_v 和平行于层面方向的弹性模量 E_L , 并假定碾压混凝土本体及层面影响带的厚度分别为 b_c 和 b_a , 相应的弹性模量和泊松比分别为 E_c 、 μ_c 和 E_a 、 μ_a 。图2为确定垂直碾压混凝土层面方向的弹性模量的串联模型^[3], 图中 σ 为垂直于层面方向的正应力;图3为确定平行碾压混凝土层面方向的弹性模量的并联模型^[3], 图中 F 为施加在平行于层面方向的作用力。在分析时,图2和图3沿 y 方向的厚度取单位长度,且假定本体和层面的横截面积相等,同时本体和层面为分区均质材料。

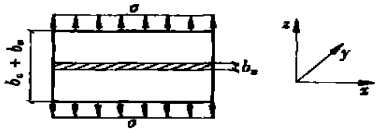


图2 确定垂直碾压混凝土层面方向的弹性模量的串联模型

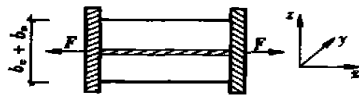


图3 确定平行碾压混凝土层面方向的弹性模量的并联模型

不失一般性,下面重点分析在图2、图3状态下的碾压混凝土本体及层面的变化情况。

1.2.1 由串联模型推求层面的 E_a 、 μ_a 、 G_a

由图2求垂直于碾压混凝土层面方向的弹性模量的串联模型,可得到本体和层面的伸长量 Δb_c 和 Δb_a 分别为:

$$\Delta b_c = \sigma(b_c / E_c), \quad \Delta b_a = \sigma(b_a / E_a) \quad (3)$$

则本体和层面总的变化量 ΔB 为:

$$\Delta B = \Delta b_c + \Delta b_a = \sigma(b_c/E_c + b_a/E_a), \tag{4}$$

此外,

$$\Delta B = (\sigma/E_v)(b_c + b_a), \tag{5}$$

则由式(4)和式(5)得:

$$E_a = b_a E_c E_v / [E_c(b_c + b_a) - b_c E_v] \tag{6}$$

类似上述的推导,可求得层面的泊松比 μ_a 为:

$$\mu_a = [\mu_v(b_a E_c + b_c E_a) - b_c \mu_c E_a] / (b_a E_c), \tag{7}$$

此外,由 E_a 、 μ_a 和 G_a 的关系可求得为:

$$G_a = E_a / [2(1 + \mu_a)] \tag{8}$$

1.2.2 由并联模型推求层面的 E_a 、 μ_a 、 G_a

为了确定平行于纤维方向的弹性模量,假设在荷载 F 作用下,相邻的本体和层面的长度为 l 所产生的变形为 Δl ,因为二者刚度不同,故所承受的轴力不同,分别设为 F_c 和 F_a , $F = F_c + F_a$, 且有:

$$\Delta l = F_c l / (E_c b_c \times 1) = F_a l / (E_a b_a \times 1), \tag{9}$$

由式(9)得到:

$$F_c = E_c b_c (\Delta l / l), F_a = E_a b_a (\Delta l / l), \tag{10}$$

此外,

$$\Delta l = (F_c + F_a) l / [E_L (b_c + b_a) \times 1], \tag{11}$$

则

$$F_c + F_a = E_L (b_c + b_a) (\Delta l / l), \tag{12}$$

由式(10)、式(11)、式(12)得到:

$$E_a = [E_L \times (b_c + b_a) - E_c b_c] / b_a, \tag{13}$$

类似上述分析,可得到对应于层面的泊松比 μ_a 为:

$$\mu_a = [\mu_L (b_c + b_a) - b_c \mu_c] / b_a, \tag{14}$$

此外,根据 E_a 、 μ_a 和 G_a 的关系可得到 G_a 为:

$$G_a = E_a / [2(1 + \mu_a)] \tag{15}$$

1.2.3 层面弹性模量 E_a 、泊松比 μ_a 及剪切模量 G_a 的确定

式(6)和式(13)分别通过不同的途径得到的层面弹性模量,式(6)、式(13)中的 E_c 、 E_v 、 E_L 通过试验可得到,而 b_a 则由上面的式(2)确定, $b_c = B - b_a$ 。因此,层面弹性模量 E_a 终值可取式(6)和式(13)的平均值,即:

$$E_a = \frac{1}{2} \left\{ b_a E_c E_v / [E_c (b_c + b_a) - b_c E_v] + [E_L (b_c + b_a) - E_c b_c] / b_a \right\}, \tag{16}$$

由式(7)、式(14),同理可得,层面泊松比 μ_a 为:

$$\mu_a = \frac{1}{2} \left\{ [\mu_v (b_a E_c + b_c E_a) - b_c \mu_c E_a] / (b_a E_c) + [\mu_L (b_c + b_a) - b_c \mu_c] / b_a \right\}, \tag{17}$$

此外,层面剪切模量 G_a 与层面的弹性模量 E_a 和泊松比 μ_a 有如下关系:

$$G_a = E_a / [2(1 + \mu_a)] \tag{18}$$

将式(16)、式(17)代入式(18)可确定剪切模量 G_a 。

2 坝体应力场与渗流场的耦合模型

2.1 基本方程

在推导基本方程以前,为便于分析,对坝体作如下简化假设:

- 1) 本体和层面是分区均质的、分区各向同性的连续介质,而且水的渗流运动符合达西定律。
- 2) 坝体骨架变形微小,其变形主要来源于裂隙和孔隙变形。
- 3) 惯性力影响忽略不计。

由上面的假定,可得到其平衡方程为:

$$\begin{cases} \partial \alpha_x / \partial x + \partial \tau_{xy} / \partial y + \partial \tau_{xz} / \partial z + X = 0, \\ \partial \alpha_y / \partial y + \partial \tau_{xy} / \partial x + \partial \tau_{yz} / \partial z + Y = 0, \\ \partial \alpha_z / \partial z + \partial \tau_{xz} / \partial x + \partial \tau_{yz} / \partial y + Z = 0, \end{cases} \quad (19)$$

式中: α_j 为总应力张量, i, j 表示 x, y, z ; X, Y, Z 为 x, y, z 向的体力。

由太沙基(Terzaghi)有效应力原理有:

$$\{\sigma\} = \{\sigma'\} + \{p\}, \quad (20)$$

式中: $\{\sigma\}$ 为总应力, $\{\sigma\} = [\alpha_x \quad \alpha_y \quad \alpha_z \quad \tau_{xy} \quad \tau_{yz} \quad \tau_{zx}]^T$; $\{\sigma'\}$ 为有效应力, $\{\sigma'\} = [\alpha'_x \quad \alpha'_y \quad \alpha'_z \quad \tau'_{xy} \quad \tau'_{yz} \quad \tau'_{zx}]^T$; $\{p\}$ 为孔隙水应力, $\{p\} = [p \quad p \quad p \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T$ 。

则坝体的应力与应变关系为:

$$\{\sigma'\} = [D] (\{\varepsilon\} - \{\varepsilon_0\}), \quad (21)$$

式中: $\{\varepsilon\}$ 为应变, $\{\varepsilon\} = [\varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \varepsilon_z \quad \gamma_{xy} \quad \gamma_{yz} \quad \gamma_{zx}]^T$; $\{\varepsilon_0\}$ 为考虑非线性时岩体的初应变; $[D]$ 为弹性矩阵或弹塑性矩阵。

由几何方程,应变与位移的关系为:

$$\{\varepsilon\} = [B] \{u\}, \quad (22)$$

式中: $\{u\}$ 为位移, $\{u\} = [u_x \quad u_y \quad u_z]^T$; $[B]$ 为几何矩阵,且有:

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial z} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix}. \quad (23)$$

为便于推导,下面暂取弹性本构关系。将式(20)至式(23)代入式(19),则得到的位移分量和孔隙水应力表示的平衡方程:

$$\begin{cases} \frac{E}{2(1+\mu)} \left\{ \frac{1}{1-2\mu} \frac{\partial e}{\partial x} + \dots^2 u_x \right\} + \frac{\partial p}{\partial x} + X + X_0 = 0, \\ \frac{E}{2(1+\mu)} \left\{ \frac{1}{1-2\mu} \frac{\partial e}{\partial y} + \dots^2 u_y \right\} + \frac{\partial p}{\partial y} + Y + Y_0 = 0, \\ \frac{E}{2(1+\mu)} \left\{ \frac{1}{1-2\mu} \frac{\partial e}{\partial z} + \dots^2 u_z \right\} + \frac{\partial p}{\partial z} + Z + Z_0 = 0, \end{cases} \quad (24)$$

式中: E, μ 为本体或层面的弹性模量和泊松比; X_0, Y_0, Z_0 为由初应变 $\{\varepsilon_0\}$ 引起的等价体力, e 为体积应变;

$$\dots^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}.$$

若用总水头 h 表示孔隙水应力 p , 根据 h 与 p 的关系则有:

$$-p = \gamma_w h - \gamma_w z, \quad (25)$$

式中: $\gamma_\omega = \rho_w g$; z 为位置高程。

为方便起见, 仍将 $\gamma_\omega h$ 记为 h , 即下文的总水头的单位与应力单位相同。将式(25)代入式(24)有:

$$\begin{cases} \frac{E}{2(1+\mu)} \left\{ \frac{1}{1-2\mu} \frac{\partial e}{\partial x} + \dots^2 u_x \right\} - \frac{\partial h}{\partial x} + X + X_0 = 0, \\ \frac{E}{2(1+\mu)} \left\{ \frac{1}{1-2\mu} \frac{\partial e}{\partial y} + \dots^2 u_y \right\} - \frac{\partial h}{\partial y} + Y + Y_0 = 0, \\ \frac{E}{2(1+\mu)} \left\{ \frac{1}{1-2\mu} \frac{\partial e}{\partial z} + \dots^2 u_z \right\} - \frac{\partial h}{\partial z} + Z + Z_0 + \gamma_\omega = 0. \end{cases} \quad (26)$$

根据质量守恒定律及达西定律, 则可得到流体的连续性方程:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = \gamma_\omega \frac{\partial e}{\partial t} + \gamma_\omega n \beta \frac{\partial h}{\partial t}, \quad (27)$$

式中: k_x, k_y, k_z 分别是 x, y, z 向的渗透系数; n 为坝体混凝土的孔隙率; β 为水的体积压缩系数, 它等于水的弹性模量的倒数。

由式(26)和式(27)联立求解, 由此组成应力场和渗流场耦合的基本方程。由于坝体内的应力状态 σ_{ij} 决定了坝体的渗透张量 k_{ij} , 即 $k_{ij} = F(\sigma_{ij})$ 。此外, 渗透张量 k_{ij} 通过渗透水压力影响着坝体的应力状态, 即 $\sigma_{ij} = G(k_{ij})$ 。因此, 坝体应力场与渗流场是相互耦合作用的, 需要反复迭代, 才能使在某一边界条件下耦合的应力场达到稳定。

所以, 应力场与渗流场耦合方程为:

$$[L(u)] \{h\} = \{p\}, \quad [K] \{u\} = \{R\}, \quad (28a, b)$$

其中: 式(28a)为坝体渗流场控制方程, 其形式见式(27)。式(28b)为坝体的位移场控制方程, 其形式与式(26)相同。

式中: $[L(u)]$ 为总体渗透矩阵, 与结点位移有关; $\{h\}$ 为结点水头列阵; $\{p\}$ 为等效结点流量列阵; $[K]$ 为总体劲度矩阵; $\{u\}$ 为结点位移列阵; $\{R\}$ 为等效结点荷载列阵, 与外荷载、结点水头等有关。

对于上述耦合分析的基本方程, 一般用数值解求解。对于渗透系数的变化, 通常假设与应力呈指数函数关系。并假设渗流主向与应力主向重合, 则主渗透系数为:

$$[k'] = k_0 \begin{bmatrix} e^{\lambda \sigma'_1} & 0 & 0 \\ 0 & e^{\lambda \sigma'_2} & 0 \\ 0 & 0 & e^{\lambda \sigma'_3} \end{bmatrix}, \quad (29)$$

式中: k_0 为坝体对应各部位的表面渗透系数; λ 为影响系数, 由试验确定; σ'_i 为有效主应力, $i = 1, 2, 3$ 。

设主应力与整体坐标系之间的旋转矩阵为 $[A]$, 则在整体坐标系下的渗透张量为:

$$[k] = [A]^T [k'] [A], \quad (30)$$

此外, 渗流对介质应力的影响, 考虑渗流体力 F 作用于介质上, 即

$$F = F_s(z) + F_d(h), \quad (31)$$

式中: $F_s(z)$ 为静水压力, 其作用效果可用有效应力考虑; $F_d(h)$ 为动水压力, 计算时作外荷载考虑。

2.2 有限元数值分析

设场变量 u_x, u_y, u_z 和 h 可用离散点上的值, 即

$$u_x = \sum_{i=1}^{M_1} N_i(x, y, z) u_{xi}(t), \quad u_y = \sum_{i=1}^{M_1} N_i(x, y, z) u_{yi}(t), \quad u_z = \sum_{i=1}^{M_1} N_i(x, y, z) u_{zi}(t), \quad (32)$$

式中: M_1 为离散结点总数; $N_i(x, y, z)$ 为整体形函数。

将 u_x 、 u_y 、 u_z 、 h 代入, 由偏微分方程转化得来的式(28)中, 方程左右端不能完全平衡, 出现余量, 则可用伽辽金(Galerkin)方法, 将该余量乘以某种权函数 $W_i(x, y, z)$ 后在全区域 Ω 内积分, 并令其等于零, 并将对 Ω 的积分改为对单元 Ω_i 积分的累加和, 并相应地将整体形函数 $N_i(x, y, z)$ 改为单元形函数 $G_i(x, y, z)$, 若单元的形函数的符号仍用 $N_i(x, y, z)$ 表示, 则可得渗流和位移(或应力)的耦合方程为:

$$[K'] \left\{ \frac{du}{dt} \right\} + [S] \left\{ \frac{dh}{dt} \right\} + \frac{1}{\gamma_w} [K] \{h\} = \frac{1}{\gamma_w} [F_2], \quad (33a)$$

$$[K] \{u\} + [K'] \{h\} = \{F_0\} + \{F_1\}, \quad (33b)$$

其中: 式(33a)主要体现整个坝体渗流场的作用; 式(33b)表示渗流场与应力场耦合作用下的总体平衡方程。

式中: $[K]$ 为总体劲度矩阵,

$$[K] = \sum_{i=1}^{M_2} A [K]_i, \quad [K]_i = \int_{\Omega_i} [B_u]^T [D] [B_u] d\Omega_i;$$

$[K']$ 为总体耦合矩阵,

$$[K'] = \sum_{i=1}^{M_2} A [K']_i, \quad [K']_i = \int_{\Omega_i} [B_u]^T [M] [N_h] d\Omega_i;$$

$[S]$ 为总体压缩矩阵,

$$[S] = \sum_{i=1}^{M_2} A [S]_i, \quad [S]_i = \int_{\Omega_i} [N_h]^T n_i \beta_i [N_h] d\Omega_i;$$

$[K]$ 为总体渗透矩阵,

$$[K] = \sum_{i=1}^{M_2} A [K]_i, \quad [K]_i = \int_{\Omega_i} [B_h]^T [K] [B_h] d\Omega_i;$$

$\{F_0\}$ 为初应变等效结点荷载, $\{F_0\} = \sum_{i=1}^{M_2} A \{F_0\}_i$; $\{F_1\}$ 为等效结点荷载, $\{F_1\} = \sum_{i=1}^{M_2} A \{F_1\}_i$; $\{F_2\}$ 为等效结点流量, $\{F_2\} = \sum_{i=1}^{M_2} A \{F_2\}_i$; M_2 为单元总数; B_u 、 B_h 为几何矩阵; A 为组合算子, 由它将单元结点的贡献对号入座地累加到总体特性矩阵和结点荷载列阵之中; $\{M\}$ 为转化矩阵, $\{M\} = [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$; $\{N_h\} = [N_1 \ N_2 \ \dots \ N_n]$ 。

由式(33)经反复迭代可求得最终的耦合应力场。

3 实例分析

3.1 最危险滑动面及稳定分析的技术路线

下面以某碾压混凝土拱坝为例进行分析, 图4为该坝及右岸最危险滑动体示意图, 该坝坝顶高程为827 m, 其最大坝高87 m, 各碾压层之间的厚度为0.3 m, 在分析时层面的厚度由式(2)来确定, 共划分了84 781个6面体单元, 101 073个结点。经分析其右岸以 F_4 断层与 F_{21} 断

层为底滑面,以NW28°陡倾角成组裂隙为侧滑面的稳定安全度较小,下面对其最危险滑动体进行稳定分析,其滑动体的示意图见图4(b)。

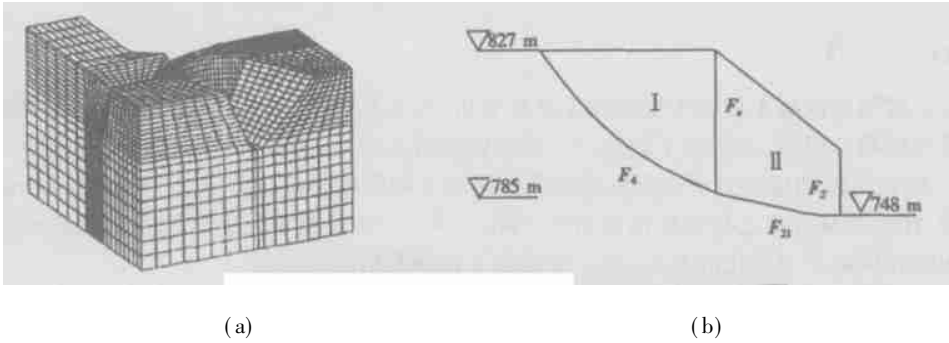


图4 某碾压混凝土拱坝及危险滑动体示意图

由上述提出的方法,利用式(33a)、式(33b)的基本公式,编制了渗流场与应力场耦合分析程序,对计算区域进行应力分析计算,求出区域内各部位的应力值,由此推求危险滑动面上的综合安全系数 K 以及该面上的各部分安全系数 K_i 的变化,以此对最危险滑动面进行稳定安全评估。

3.2 稳定分析的基本公式

采用剪摩公式分析,其稳定安全系数 K 计算公式如下:

$$K = \frac{R}{S} = \left[\sum_{i=1}^{n_1} f_i \sigma_{ni} \Delta A_i + \sum_{i=1}^{n_1} c_i \Delta A_i + \sum_{i=1}^{n_1} S_i \Delta B_i \right] / \left(\sum_{i=1}^{n_1} \sigma_{\tau i} \Delta A_i \right), \quad (34)$$

式中: R 为抗滑力; S 为滑动力; σ_{ni} 、 $\sigma_{\tau i}$ 为计算荷载工况下,各单元应力 (σ_{xi} , σ_{yi} , σ_{zi}) 在各滑动面上的法向 n 和切向 τ 分量; ΔA_i 为各滑裂面上的各单元的面积; c_i 、 f_i 为对应 ΔA_i 的凝聚力及摩擦系数; n_1 为各滑裂面上的单元总数; S_i 为侧滑裂面上各单元的凝聚力; ΔB_i 为侧滑力各单元的侧滑面面积。

3.3 考虑坝体渗流场与应力场耦合的分析成果

图5为某碾压混凝土拱坝右坝肩在校核洪水水位(826.5 m)工况下坝体考虑渗流场与应力场耦合作用下,沿最危险滑动各高程的稳定安全系数分布图。由图5看出:在滑动面上,在高程785 m与810 m之间地质条件较好,对应的安全系数较高,其余部分地质条件相对较差,局部安全系数较低,是整个右坝肩最薄弱带。此外,经对右坝肩整体稳定分析,在校核洪水水位工况下,右岸以 F_4 断层与 F_{21} 断层为底滑面,以NW28°陡倾角成组裂隙为侧滑面的稳定安全系数 K 为4.207,满足安全的要求。

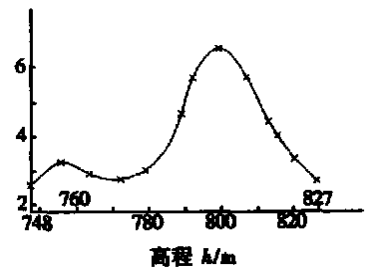


图5 校核洪水水位情况下稳定安全系数沿高程变化图

3.4 不考虑渗流场与应力场耦合作用的分析成果

在上述计算工况时,若不考虑渗流场与应力场耦合作用的影响,水荷载直接作用在坝体上游表面,则求得在校核水位工况下,稳定安全系数 K 为4.057。因而,比上述考虑渗流场与应力场耦合作用情况时安全系数要小,即计算成果偏于安全。

3.5 成果分析

由上分析,当考虑渗流场与应力场耦合作用以及仅将水荷载作为面力作用,两者存在一定

的差异,对于碾压混凝土坝将渗流影响作为面力考虑显然与实际情况有出入。而将渗流场与应力场耦合作用后的应力场来推求大坝的稳定安全度,从理论上说更接近实际。

4 结 语

以上对碾压混凝土坝施工层面作了详细分析,在此基础上,研究了碾压混凝土坝渗流场与应力场两场耦合模型,并研制了相应的三维有限元分析程序,经分析得到下列主要结论:

1) 结合试验和理论分析成果确定的碾压混凝土坝层面影响层的厚度、弹性模量和泊松比等参数,比单纯从理论上仿真模拟更切合实际;此外,从垂直和平行于层面方向试验成果确定的层面弹性模量和泊松比的方法,进一步提高了选择参数的可靠性。

2) 提出的碾压混凝土坝渗流场与应力场两场耦合模型,由于渗流与应力进行联合耦合求解,因而能较好地体现两场耦合作用。与此同时,基于文中提出的层面影响层参数的确定方法建立的有限元分析模型,能较好地反映碾压混凝土坝施工层面的特性,为分析施工层面对碾压混凝土坝变化性态影响创造了良好条件。

[参 考 文 献]

- [1] 吴中如,顾冲时,吴相豪.碾压混凝土坝安全监控理论及其应用[M].北京:科学出版社,2001,41—42.
- [2] 吴相豪.沙牌碾压混凝土拱坝渗流转移特征[J].水电能源科学,2002,20(2):10—12.
- [3] 沈观林.复合材料力学[M].北京:清华大学出版社,1996,36—39.

Study on Coupling Model of Seepage Field and Stress Field for RCCD

GU Chong_shi, SU Huai_zhi, ZHOU Hong

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hhai University,
Nanjing 210098, P. R. China)

Abstract: Based on the construction interfaces in RCCD, the methods were proposed to calculate the influence thickness of construction interfaces and the corresponding physical mechanics parameters. The principle on establishing the coupling model of seepage field and stress field for RCCD was presented. A 3_D FEM program was developed. Study shows that such parameters as the thickness of construction interfaces, the elastic ratio and the Poisson's ratio obtained by tests and theoretical analysis are more reasonable, the coupling model of seepage field and stress field for RCCD may indicate the coupling effect between the two fields scientifically, and the developed 3_D FEM program can reflect the effect of the construction interfaces more adequately. According to the study, many scientific opinions are given both to analyze the influence of the construction interfaces to the dam's characteristic, and to reveal the interaction between the stress field and the seepage field.

Key words: RCCD; interface; seepage field; stress field; coupling analysis