

三向电阻网渗流模型试验原理及其应用

杜 延 龄 许 国 安

(水利水电科学研究院)*

提 要

本文较系统地介绍了三向电阻网渗流模型试验原理及其实际应用,提出了较合理的模型电阻计算方法和测试技术和水力坡降计算公式。该试验方法的优点是电场稳定,成果可靠,能适应复杂的边界和地质条件。它是求解三维渗流场问题的有效工具之一。文末附有试验实例。

一、前 言

从1965年开始,原水利水电科学研究院土工研究所就着手利用三向电阻网模型试验求解渗流场问题,先后与有关单位协作对映秀湾水电站闸基、刘家峡水电站黄土付坝和一个援外工程进行了试验。实践表明,它是解三维渗流问题的有效工具之一,其优点是电场稳定,成果可靠,能适应复杂的边界和地质条件。其缺点是对急变渗流区模拟较为困难,往往需要辅助试验或者理论解的配合。本文较系统地介绍上述试验原理及其应用。

二、试验原理

所谓三向电阻网渗流试验模型,就是用电阻元件所构成的空间电阻网络来代替连续的透水介质。其试验原理是基于电流在电阻网络中的流动方程和以差分形式表示的渗流控制方程之间的数学相似。

现在我们来研究图1所表示的电阻网络中的电流流动情况。根据欧姆定律,通向结点O的各电阻中的电流分别为:

$$\left. \begin{aligned} i_1 &= \frac{U_1 - U_0}{r_1}, & i_2 &= \frac{U_2 - U_0}{r_2}, \\ i_3 &= \frac{U_3 - U_0}{r_3}, & i_4 &= \frac{U_4 - U_0}{r_4}, \\ i_5 &= \frac{U_5 - U_0}{r_5}, & i_6 &= \frac{U_6 - U_0}{r_6} \end{aligned} \right\} \quad (2-1)$$

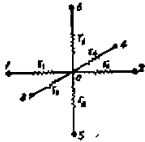


图 1

* 原水利水电科学研究院土工研究所参加过这项工作的有徐世果、杜延龄、凌均熙、戴强、臧真等同志。模型设计与制造由徐世果同志负责主持。本文由杜延龄、许国安编写。

或写成下式:

$$i_n = \frac{U_n - U_0}{r_n} \quad (2-2)$$

应用克希荷夫第一定律 $\sum_{n=1}^6 i_n = 0$ 于结点 O , 则得出电流在电阻网络中的流动方程为:

$$\frac{U_1 - U_0}{r_1} + \frac{U_2 - U_0}{r_2} + \frac{U_3 - U_0}{r_3} + \frac{U_4 - U_0}{r_4} + \frac{U_5 - U_0}{r_5} + \frac{U_6 - U_0}{r_6} = 0 \quad (2-3)$$

对于各向异性无源汇稳定渗流场, 满足如下二阶偏微分方程:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0 \quad (2-4)$$

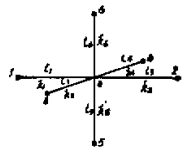
式中 h ——水头; k_x 、 k_y 、 k_z ——分别为 x 、 y 、 z 三个方向的渗透系数。

将式(2-4)写成差分形式, 则有:

$$\begin{aligned} & \frac{2}{l_1 + l_2} \left[\frac{k_1}{l_1} (h_1 - h_0) + \frac{k_2}{l_2} (h_2 - h_0) \right] + \frac{2}{l_3 + l_4} \left[\frac{k_3}{l_3} (h_3 - h_0) + \frac{k_4}{l_4} (h_4 - h_0) \right] \\ & + \frac{2}{l_5 + l_6} \left[\frac{k_5}{l_5} (h_5 - h_0) + \frac{k_6}{l_6} (h_6 - h_0) \right] = 0 \end{aligned} \quad (2-5)$$

式中各符号的意义表示在图2中。

将式(2-5)中的各项同乘围绕结点 O 的单元体积, 即 $(l_1 + l_2)(l_3 + l_4)(l_5 + l_6)/8$, 并展开, 则得:



$$\begin{aligned} & \frac{k_1(l_3 + l_4)(l_5 + l_6)}{4l_1} (h_1 - h_0) + \frac{k_2(l_3 + l_4)(l_5 + l_6)}{4l_2} (h_2 - h_0) \\ & + \frac{k_3(l_5 + l_6)(l_1 + l_2)}{4l_3} (h_3 - h_0) + \frac{k_4(l_5 + l_6)(l_1 + l_2)}{4l_4} (h_4 - h_0) \\ & + \frac{k_5(l_1 + l_2)(l_3 + l_4)}{4l_5} (h_5 - h_0) + \frac{k_6(l_1 + l_2)(l_3 + l_4)}{4l_6} (h_6 - h_0) = 0 \end{aligned} \quad (2-6)$$

将式(2-3)与式(2-6)加以比较, 就不难发现其间的相似性。所以只要使由空间电阻网络所构成的电场与实际渗流场的边界条件保持相似, 并使电阻网络中的电阻 r 与渗流场中相应的 l 、 k 值间保持如下关系, 则电场与渗流场间的物理量是完全对应的, 即:

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= \frac{4l_1}{k_1(l_3 + l_4)(l_5 + l_6)} A, & r_2 &= \frac{4l_2}{k_2(l_3 + l_4)(l_5 + l_6)} A, \\ r_3 &= \frac{4l_3}{k_3(l_5 + l_6)(l_1 + l_2)} A, & r_4 &= \frac{4l_4}{k_4(l_5 + l_6)(l_1 + l_2)} A, \\ r_5 &= \frac{4l_5}{k_5(l_1 + l_2)(l_3 + l_4)} A, & r_6 &= \frac{4l_6}{k_6(l_1 + l_2)(l_3 + l_4)} A \end{aligned} \right\} \quad (2-7)$$

式中 A 为选用电阻元件用的任意常数。

若所研究的渗流场为缓变流情况, 可将实际三维渗流问题简化为水平面渗流问题来研究, 其控制方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = 0 \quad (2-8)$$

式中, T_x 、 T_y 为含水层厚度。这时, 其电阻网络中的电阻 r 与渗流场中相应的 l 和 k 值之间的关系为:

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= \frac{2l_1}{k_1 T_1 (l_3 + l_4)} A; & r_2 &= \frac{2l_2}{k_2 T_2 (l_3 + l_4)} A; \\ r_3 &= \frac{2l_3}{k_3 T_3 (l_1 + l_2)} A; & r_4 &= \frac{2l_4}{k_4 T_4 (l_1 + l_2)} A \end{aligned} \right\} \quad (2-9)$$

电阻网模型试验存在两种误差, 其一是电阻元件的误差, 其二是差分解的固有误差。对于正规的长方体网格, 差分解固有误差为含 Δx 、 Δy 和 Δz 的偶次幂的幂级数, 主要误差部分为:

$$\frac{1}{12} \left(\Delta x^2 \frac{\partial^4 \phi}{\partial x^4} + \Delta y^2 \frac{\partial^4 \phi}{\partial y^4} + \Delta z^2 \frac{\partial^4 \phi}{\partial z^4} \right) \quad (2-10)$$

三、模型规划与电阻计算

三向电阻网模型规划原则同导电液模型基本相同。首先根据给定的地质资料划分水文地质区域, 并适当作若干合理简化。对于由多层地层构成的含水层, 当其下层渗透系数小于上层100倍时, 可将其视为相对不透水层。当各土层交界线为曲线时, 应将曲线简化为直线或折线。两相邻土层的渗透性相近时, 应将它们合并为一层。对地层简化的目的是为试验工作提供便利, 减轻试验模拟的复杂程度, 但必须使简化后的地层仍能较好地反映实际情况。

试验中所截取的模型范围应足够大, 以致不致使渗流状态失真。通常, 在横断面上所截取的模型长度 L , 应不小于建筑物地下轮廓水平投影总长度 (B) 与三到四倍透水层的厚度 (T) 之和, 即 $L \geq B + (3 \sim 4)T$ 。为使进水面与出水面相等, 模型上下游延伸长度应大体相等。试验模型在平面图上的形状和范围应根据实际地质条件来确定。若根据地质条件难以确定时, 可采用圆弧形状, 其圆心为建筑物边线与轴线的交点, 圆弧半径可选取为 $R \geq 1.5B'$ (B' 为建筑物在平面图上的投影长度)。上述选取模型范围的方法仅适用于均质地层或接近均质地层的情况。当所研究的渗流区域的地质条件较为复杂时, 最好先以大步长的三向电阻网模型进行大范围的试验, 或者进行大范围的水平面试验, 然后根据所求得的渗流状态截取适当模型范围再进行试验。

对所研究渗流区域的不同位置, 可根据实际流态变化情况采用不同步长的网格。但为便于计算电阻, 最好各种网格步长间成整数倍数。对流态变化较大的区域, 网格应适当加密。反之, 网格尺寸可加大些, 以减小试验工作量。为提高试验精度, 应尽量采用等步长网格 ($\Delta x = \Delta y = \Delta z$), 而若流态比较平顺, 如长铺盖下面的渗流情况, 也可采用正长方体网格 ($\Delta y = \Delta z < \Delta x$) 或扁长方体网格 ($\Delta z < \Delta y < \Delta x$)。

对于所研究渗流区域中的井或沟, 除适当加密网格外, 尚需根据辅助试验或理论解答来计算井、沟周围电阻或以挂附加电阻的方法来模拟, 不然试验精度很难达到要求。例如, 我们在井的试验中曾将网格加密到其尺寸与井径接近, 但其井间势能同导电液模型试验结果相比, 仍有10%左右的误差。

当所研究的渗流场接近缓变流情况时, 也可采用简化研究方法, 即首先进行整个渗流区域的水平面试验, 然后再根据所求得的流态截取若干流槽 (参见第五节图13) 进行局部三向试验。

将模型规划好后, 就可根据下述方法计算各种不同情况的模型电阻。

1) 基本计算公式

通常我们采用 $l_1 = l_2 = \Delta x$, $l_3 = l_4 = \Delta y$, $l_5 = l_6 = \Delta z$, 同时认为所研究单元内, 其 x, y, z 方向上的渗透性是相同的, 即 $k_1 = k_2 = k_x$, $k_3 = k_4 = k_y$, $k_5 = k_6 = k_z$, 则根据式 (2-7) 模型电阻的基本计算公式可写作:

$$R_x = r_x \frac{\Delta x}{\Delta y \Delta z}, \quad R_y = r_y \frac{\Delta y}{\Delta x \Delta z}, \quad R_z = r_z \frac{\Delta z}{\Delta x \Delta y} \quad (3-1)$$

式中, r_x, r_y, r_z 为模型基本电阻。

对于所研究渗流区域内具有不同渗透系数的各土层的 x, y, z 方向的基本电阻可由如下关系式确定:

$$\frac{1}{r_{ij} k_{ij}} = c \quad (3-2)$$

式中 $i = x, y, z$; $j = 1, 2 \dots n$, 即表示各土层编号; c 为常数。

2) 大小网格过渡区的电阻计算

采用电流分配法来计算过渡区上各电阻。现首先研究均质土层和正方体网格情况。当一平行电流流过大网格过渡区时, 其电流分配情况如图 3 所示。

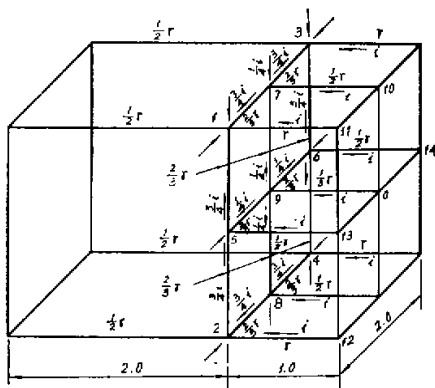


图 3

过渡区上各电阻的计算方法与步骤为:

(1) 求平面 1—2—3—4 上的各电阻, 根据基本计算公式 (3-1) 得:

$$R_{1-7} = r \frac{1}{1.5 \times 1} = \frac{2}{3} r$$

同理, 该平面上的其它电阻均为 $\frac{2}{3} r$ 。

(2) 求 R_{7-10} : 当电流由右向左平行流动时, 显然, 结点 11—1 间的电位差与结点 10—7—1 之间的电位差应保持相等, 则根据这一条件有:

$$R_{7-10} \cdot i + \frac{3}{4} i \cdot \frac{2}{3} r = r i$$

从上式把 R_{7-10} 解出得, $R_{7-10} = \frac{1}{2} r$ 。同理, 其它相应位置的电阻均为 $\frac{1}{2} r$ 。

(3) 求 R_{0-0} : 同样当电流由右向左平行流动时, 结点 0—9—7—1 间的电位差与结点 11—1 间的电位差应保持相等, 从而有:

$$R_{0-0} \cdot i + \frac{1}{4} i \cdot \frac{2}{3} r + \frac{3}{4} i \cdot \frac{2}{3} r = r i$$

从上式把 R_{0-0} 解出得 $R_{0-0} = \frac{1}{3} r$ 。

当所研究的土层为非均质土层时, 为便于计算过渡区上的电阻, 应使两相邻土层的接触面置于小网格或大网格结点相应位置上。当两相邻土层 (其渗透系数分别为 k_1 和 k_2) 的接触面位于小网格结点时, 其电流分配情况如图 4 所示, 并可按如下方法和步骤求得过渡区上各电阻值:

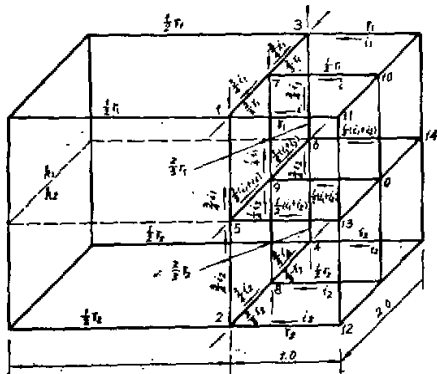


图 4

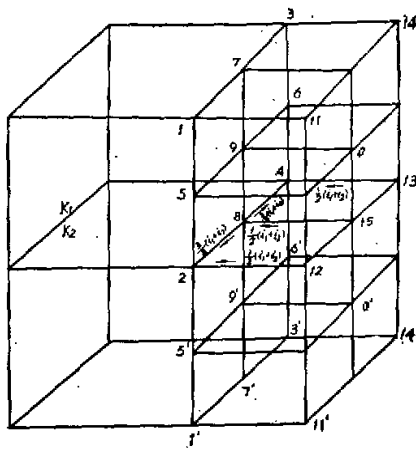


图 5

(1) 求平面1-2-3-4上各电阻。显然, $R_{1-7} = R_{7-3} = R_{1-5} = R_{7-9} = R_{3-8} = \frac{2}{3}r_1$;
 $R_{2-8} = R_{8-4} = R_{2-5} = R_{8-9} = R_{4-8} = \frac{2}{3}r_2$, 而交界面上的电阻值为:

$$R_{9-5} = R_{9-8} = \frac{1}{\frac{3}{4r_1} + \frac{3}{4r_2}} = \frac{4}{3} \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}$$

(2) 求电阻 R_{5-13} 。根据13—5—1间的电位差与11—1间的电位差应保持相等的条件, 则有:

$$R_{5-13} \cdot \frac{1}{2}(i_1 + i_2) + \frac{2}{3}r_1 \cdot \frac{3}{4}i_1 = r_1 i_1$$

将 $i_2 = i_1 r_1 / r_2$ 代入上式, 并就 R_{5-13} 求解该式可得出:

$$R_{5-13} = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}$$

同理, 当使13—5—2之间的电位差与12—2间的电位差保持相等时也可得到相同的结果。同 R_{5-13} 位置相应的 R_{6-14} 的电阻值也为 $r_1 r_2 / (r_1 + r_2)$ 。

(3) 求电阻 R_{0-9} 。根据0—9—7—1间的电位差与1—11间的电位差保持相等的条件, 则有:

$$R_{0-9} \cdot \frac{1}{2}(i_1 + i_2) + \frac{2}{3}r_1 \cdot \frac{1}{4}i_1 + \frac{2}{3}r_1 \cdot \frac{3}{4}i_1 = r_1 i_1$$

将 $i_2 = r_1 i_1 / r_2$ 代入上式, 并解出 R_{0-9} 得:

$$R_{0-9} = \frac{2}{3} \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}$$

同理, 当使0—9—8—2间的电位差与2—12间的电位差保持相等时也可得到相同的结果。

当两相邻土层的交界面位于大网格结点时, 其电流分配情况如图5所示。对于这种情况, 只计算2-8-4-13-15-12平面上的各电阻即可, 上下两土层其余各电阻值分别与相应均质情况相同。

$R_{2-12} = R_{4-13} = 2r_1r_2/(r_1+r_2)$; $R_{8-2} = R_{8-4} = 4r_1r_2/3(r_1+r_2)$ 。根据使结点 15-8-2 间的电位差与结点 2-12 间的电位差保持相等的条件, 可得出:

$$R_{8-15} \cdot \frac{1}{2}(i_1+i_2) + \frac{4r_1r_2}{3(r_1+r_2)} \cdot \frac{3}{8}(i_1+i_2) = \frac{2r_1r_2}{(r_1+r_2)} \cdot \frac{1}{2}(i_1+i_2)$$

从上式中解出 R_{8-15} 得:

$$R_{8-15} = \frac{r_1r_2}{(r_1+r_2)}$$

如果对试验精度要求不高, 也可采用模型分割法来处理大小网格过渡问题, 即先把大、小网格区分别视为单独的渗流区计算好电阻后, 再用导线将相应点连接起来。但这将使过渡区附近结点的电位产生一定误差。

3) 水平面试验的电阻计算

当 $l_1 = l_2 = \Delta x$, $l_3 = l_4 = \Delta y$ 时, 根据式(2-9)水平面模型试验的电阻计算公式为:

$$R_x = r_x \frac{\Delta x}{\Delta y T_x}; \quad R_y = r_y \frac{\Delta y}{\Delta x T_y} \quad (3-3)$$

式中 r_x 、 r_y 为模型基本电阻; T_x 、 T_y 为含水层厚度。

若研究的含水层在平面图上为非均质土层时, 其各区域的基本电阻可按式(3-2)确定。当所研究的含水层在断面图上为非均质土层时(但其渗透系数相差不大时), 可化为均质土层来研究, 其含水层厚度和渗透系数可分别由下列公式求得:

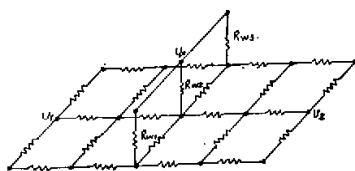


图 6

$$T_p = \sqrt{\sum_1^n (T_i k_{H1}) \sum_1^n (T_i / k_{B1})} \quad (3-4)$$

$$k_p = \sqrt{\frac{\sum_1^n (T_i k_{H1})}{\sum_1^n (T_i / k_{B1})}} \quad (3-5)$$

式中 T_i ——第 i 含水层的厚度; k_{H1} ——第 i 层含水层水平渗透系数; k_{B1} ——第 i 层含水层垂直渗透系数。

当水平面模型中含有排水减压井时, 应将井置于网格结点上, 并以挂附加电阻 (R_w) 的办法(图 6)来近似地考虑井的绕流阻力。根据井的局部阻抗概念, 渗流在井附近的绕流作用可用一附加渗径 ΔL 来代替, 因此排水减压井的流量公式可写作如下形式:

$$Q_w = \frac{kT(H_p - H_0)a}{L_p + \Delta L} \quad (3-4)$$

式中 L_p 和 H_p 分别为计算渗径长度和水头; H_0 为井水位; k 、 T 分别为渗透系数和含水层厚度; a 为井的间距。

由式(3-4)可看出, 我们只要用理论解或辅助试验求得相应情况的 ΔL 值, 并在网格结点上挂以与渗径 ΔL 等效的附加电阻, 就可大体上获得在排水减压井作用下的渗流场的流态。附加电阻 (R_w) 可按式计算:

$$R_w = r \frac{\Delta L}{Ta} \quad (3-5)$$

式中 r 为模型基本电阻。

若试验模型中含有排水沟,也可按上述方法予以近似模拟。

四、测试与资料整理

将已计算好的各区域模型电阻布置在模型板上,并用导线将各模型间的相应结点连接起来,就可开始测试工作。测试工作可用渗流电拟试验仪(惠斯顿电桥装置)进行。测试与资料整理工作主要包括浸润面求测、断面各点势能测量与等地下水水位线绘制以及流量和水力坡降计算等,现分别叙述如下:

1) 浸润面求测

由于浸润面压力为零,其位置高低即代表其位势,即 $\varphi = z$,所以它应满足关系式 $U = Az$ (z 为浸润面已知点的高度, A 为常数)以及不透水边界条件 $\frac{\partial h}{\partial n} = 0$ 。若以下游水位为基面,则它也满足条件

$$\frac{U - U_2}{U_1 - U_2} = \frac{h}{H} = \frac{z}{H} \quad (4-1)$$

式中 $(U - U_2)/(U_1 - U_2)$ 为电位差的相对比值; z/H 为测点高度的比值。

求测浸润面的步骤是:先根据经验假定浸润面的位置,而后据此浸润面的位置计算和布置该区域的模型电阻并进行测试。若经实测发现所假定的浸润面不符合式(4-1)条件,即偏高或偏低,则应重新假定浸润面的位置,重新计算、布置该区域模型电阻,这样循环下去,直到在给定误差范围内满足上述条件为止。

2) 渗流区域内各点势能的测量

利用电桥平衡原理可测出模型中各点的势能。根据实测结果就可利用直线插比法绘出渗流区域内等水位线图和断面各断面的等势线图。断面等势线上的各点也可用补插电位器直接测出。这种装置的电路连接方法如图7所示。若寻找图7上两相邻结点间势能为80%的等水头

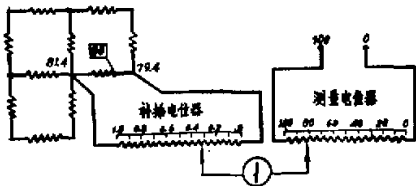


图 7

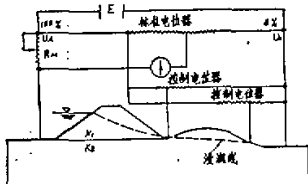


图 8

线的位置,只要转动补插器使零指示器指零时,就代表等水头线在两点间的相对位置,即离开右结点0.3倍的网眼间距处为80%的电位。

还应当着重指出,在测量大小网格过渡区上的结点电位时,只测量大小网格所共用的结点的电位,不测量其余小网格结点的电位,它不代表渗流区域内各相应点的真实势能值。

3) 模型电阻测量与流量计算

测量模型电阻可用较精确的电阻测定仪进行。在测量模型电阻过程中,必须以原渗流场的流态不受歪曲或不受破坏为原则。因此,当模型中无中间控制电位,或有中间控制电位但采用内电路控制方式时,可将模型上下游直接接入电阻测定仪测量模型电阻。当模型中的中间电位以外电路控制时,其模型电阻不能直接测量,应以如图8所示的电路进行测试。测试的

步骤是：首先使模型中各中间控制电位的势能降低一半，例如原来为50%的现降为25%。然后，在模型前面串一电位器 R_M ，并调该电位器使 R_M 与模型之间的势能恰等于50%。这时将电位器 R_M 取出并测量其电阻值，该电阻值就是所测的模型电阻值。

在测得模型电阻后，就可按下式计算流量：

$$Q = \frac{r l k H}{R_M} \quad (4-2)$$

式中 R_M 为模型电阻， l 、 r 、 k 分别为模型中网格尺寸、基本电阻和相应土层的渗透系数，它们的乘积对于各不同土层均为常数； l 为模型长度比例尺； H 为上下游水头差。

4) 水力坡降计算

利用三向电阻网模型进行试验，可方便地根据所测得的渗流区域内各点的水头值计算各点的水力坡降。对于渗流区域内某点 O (参见图2) 的水力坡降在 x 、 y 、 z 三个方向上的分量可由下式求得：

$$\left. \begin{aligned} J_x &= \frac{(h_1 - h_0)}{l_1} \cdot \frac{l_2}{(l_1 + l_2)} + \frac{(h_0 - h_2)}{l_2} \cdot \frac{l_1}{(l_1 + l_2)} \\ J_y &= \frac{(h_3 - h_0)}{l_3} \cdot \frac{l_4}{(l_3 + l_4)} + \frac{(h_0 - h_4)}{l_4} \cdot \frac{l_3}{(l_3 + l_4)} \\ J_z &= \frac{(h_5 - h_0)}{l_5} \cdot \frac{l_6}{(l_5 + l_6)} + \frac{(h_0 - h_6)}{l_6} \cdot \frac{l_5}{(l_5 + l_6)} \end{aligned} \right\} \quad (4-3)$$

若 $l_1 = l_2 = l_x$ ， $l_3 = l_4 = l_y$ ， $l_5 = l_6 = l_z$ ，则

$$J_x = \frac{h_1 - h_2}{2l_x}, \quad J_y = \frac{h_3 - h_4}{2l_y}, \quad J_z = \frac{h_5 - h_6}{2l_z} \quad (4-4)$$

水力坡降 J 则是 J_x 、 J_y 、 J_z 三个向量和的模，即

$$J = \sqrt{J_x^2 + J_y^2 + J_z^2} \quad (4-5)$$

当求两相邻土层交界面附近 O 点 (图9) 的水力坡降时，显然不能采用 h_5 值，而应采用土层交界面上 h' 值。现推导求 h' 的公式。由边界上流量连续的条件得出：

$$\frac{h_5 - h'}{h' - h_0} = \frac{k_1 \Delta l_2}{k_2 \Delta l_1} \quad (4-6)$$

由式(4-6)解出 h' 值得：

$$h' = \frac{h_5 k_2 \Delta l_1 + h_0 k_1 \Delta l_2}{k_1 \Delta l_2 + k_2 \Delta l_1} \quad (4-7)$$

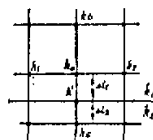


图 9

在计算时，差分步长也要相应地改为 Δl_1 。

在求得水力坡降 J 后，就可进行渗流区域内各部分的渗透稳定校核。若 J 值小于或等于给定的允许水力坡降，则其在渗透稳定方面是安全的，否则就是不安全的，需进一步考虑处理措施。

五、实 例

1. 刘家峡水电站黄土付坝坝区渗流试验

黄土付坝为宽式心墙坝，它位于大坝溢洪道右侧，与联结付坝组成溢洪道右侧的主要挡水建筑物。该坝左端与联结付坝之间以顶长为22.5m的刺墙相连接，而坝的右端插入地质沟内。该坝主体部分坝高为20~45m。坝地质情况自左至右为变质岩，第三纪红砂岩，第四

纪砂砾石。自坝右0+678以左地质沟内填土和心墙底部均切断砂砾石层。该断面以右砂砾石地基深约10m。为加长坝头绕流渗径,该段地基中做有60m长的粘土水泥灌浆帷幕。联结付坝基础做固结灌浆(深5~6m)和帷幕灌浆(深15m),与溢洪道防渗帷幕相接。黄土、红砂岩、变质岩和砂砾石的渗透系数分别为0.0026、0.025、0.04和13.0m/d。

鉴于该坝区地质条件复杂,三向绕流影响较大,故采用三向电阻网模型进行试验。试验目的主要是了解正常库水位1735.0m时,该坝区地下水动态及相应的水力坡降,以校核地基的渗透稳定性;同时验证右坝肩砂砾地基中灌浆帷幕的效果。试验模型截取范围如图10所示。模型的进水边界为红柳沟右侧陡坡,坝前区100m的边线及过渡段。其左侧边界为溢洪道底面纵向排水暗沟中心线延长线。在平面图上,模型范围以 $R=460\text{m}$ 为半径,以坝右0+378断面与坝轴线的交点 O 为圆心作圆弧交于模型左侧边界线 C 点和坝轴线 B 点,并于 B 点作圆弧切线交于进水边界线上 A 点。 ABC 即为模型的绕流边界。模型采用两种网格尺寸,即 $10\times 10\times 10\text{m}$ 和 $10\times 10\times 5\text{m}$ 。

具有代表性的试验成果示于图10和图11上。图10示出坝区的地下水流动情况,而图11则示出几个代表性断面等水位线图。由图10可看出,右坝肩砂砾地基中防渗帷幕的作用是极小的,其主要原因是帷幕长度太短,不能有效地截堵渗流,而且帷幕线的方向也不尽合理。根据右坝肩设有灌浆帷幕的试验资料,坝区绕渗水流全部排向溢洪道右侧,总流量为139 l/s。流线 CD (参见图10)以右地区渗流自由面大部在砂砾石层内并中途潜入红砂岩,只在右0+678附近渗水从大水沟边坡逸出。该地区渗流的平均水力坡降为0.05左右,不致发生管涌现象。流线 CD 以左 $E45F$ 和 $G67H$ 两渗流断面的水力坡降分别为0.130和0.165左右,而据初步估算,相应处砂砾料的允许水力比降分别为0.07和0.07~0.11左右,故该坝区有可能发生管涌,应予充分注意。试验结果表明,刺墙上游面几乎没有水头损失,端部水头损失20m,占总水头的67%;刺墙下游面水头损失10m,占总水头的33%。刺墙绕流平均水力坡降为0.40,在保证填土质量的情况下绕流允许比降可采用0.45,故刺墙附近土体的渗透稳定问题是不大的。

2. 丘砂基付坝坝区渗流试验

丘砂基付坝为心墙式土坝,最大坝高46.4m。该坝建筑在具有弱透水覆盖层的较深厚的砾岩地基上。地基各土层和坝体各部分填土的渗透系数为:砾岩, $1\times 10^{-3}\sim 5\times 10^{-3}\text{cm/s}$;覆盖层, $1\times 10^{-4}\sim 1\times 10^{-5}\text{cm/s}$;心墙和铺盖填土, $1\times 10^{-6}\text{cm/s}$;坝壳砂砾石, $4.63\times 10^{-2}\text{cm/s}$;灰岩, $1\times 10^{-2}\text{cm/s}$ 。原认为该砂砾地基较好,故在渗流控制方面除只在上游坝体范围内铺筑0.5m厚的粘土以加强原天然铺盖和在下游留有打排水减压井的位置(井距为10m)外,未给予特别考虑。但心墙基坑开挖后,发现该砾岩地基十分破碎,似散体状。因此,该坝区渗流状况如何,以及如何考虑防渗措施等问题需要通过试验研究加以解决。

该渗流区顶部弱透水覆盖层在坝下游为无限长,渗流唯一出路是电站尾水渠,因此该区域中的渗流问题是一个典型的三向渗流问题。但由于当时不具备进行整体三向试验的条件,故采用了水平面试验与流槽试验相结合的近似方法,即先进行水平面试验,然后根据所求得的流态绘制具有代表性的若干个流槽,并将整个流槽从渗流区域中取出再进行局部三向试验。水平面模型中井的模拟是利用第三节中所介绍的方法进行的。利用该研究方法要有试解过程,即水平面模型中所采用的井深、井距与根据流槽试验所确定的供设计上采用的井深、井距的一致性是通过逐步试解达到的。

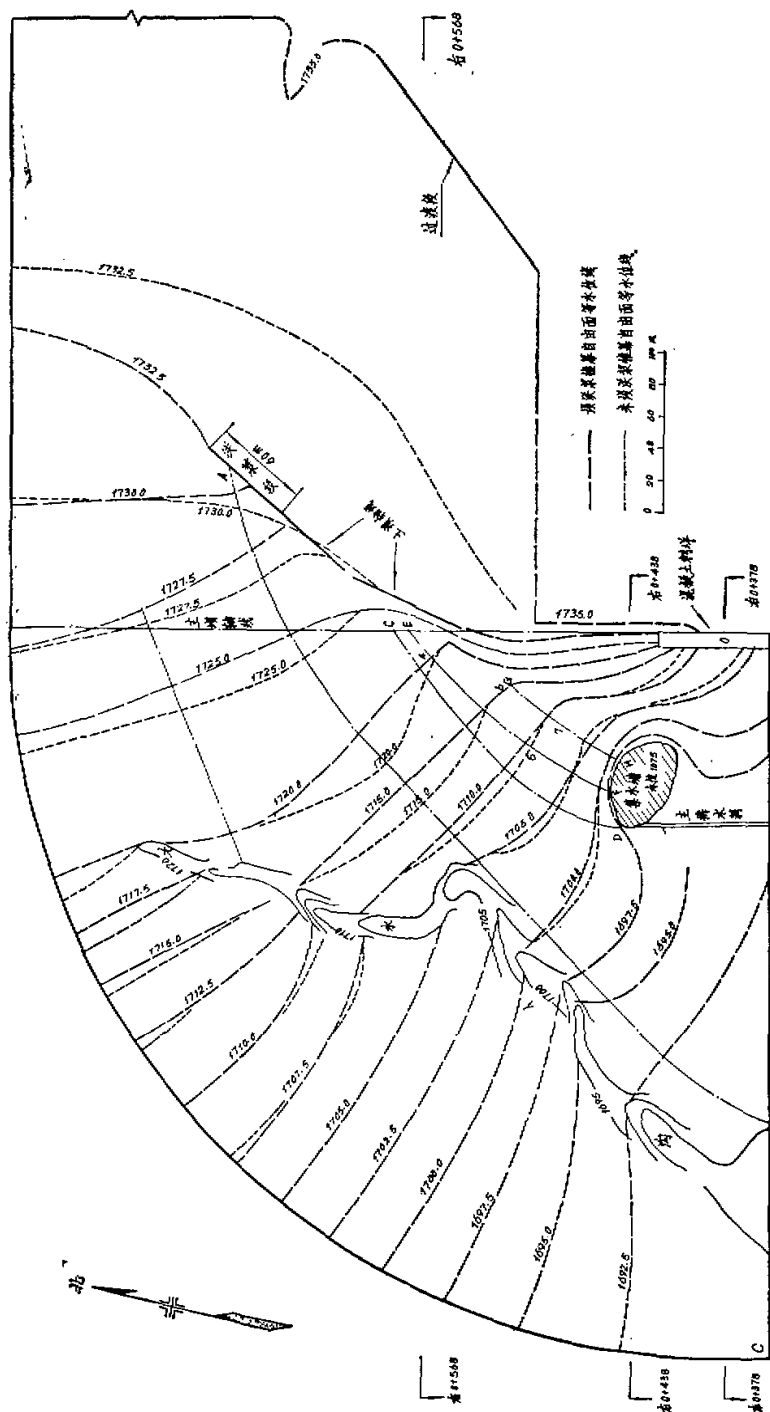


图10 刘家峡黄土付坝自由面等水位线图

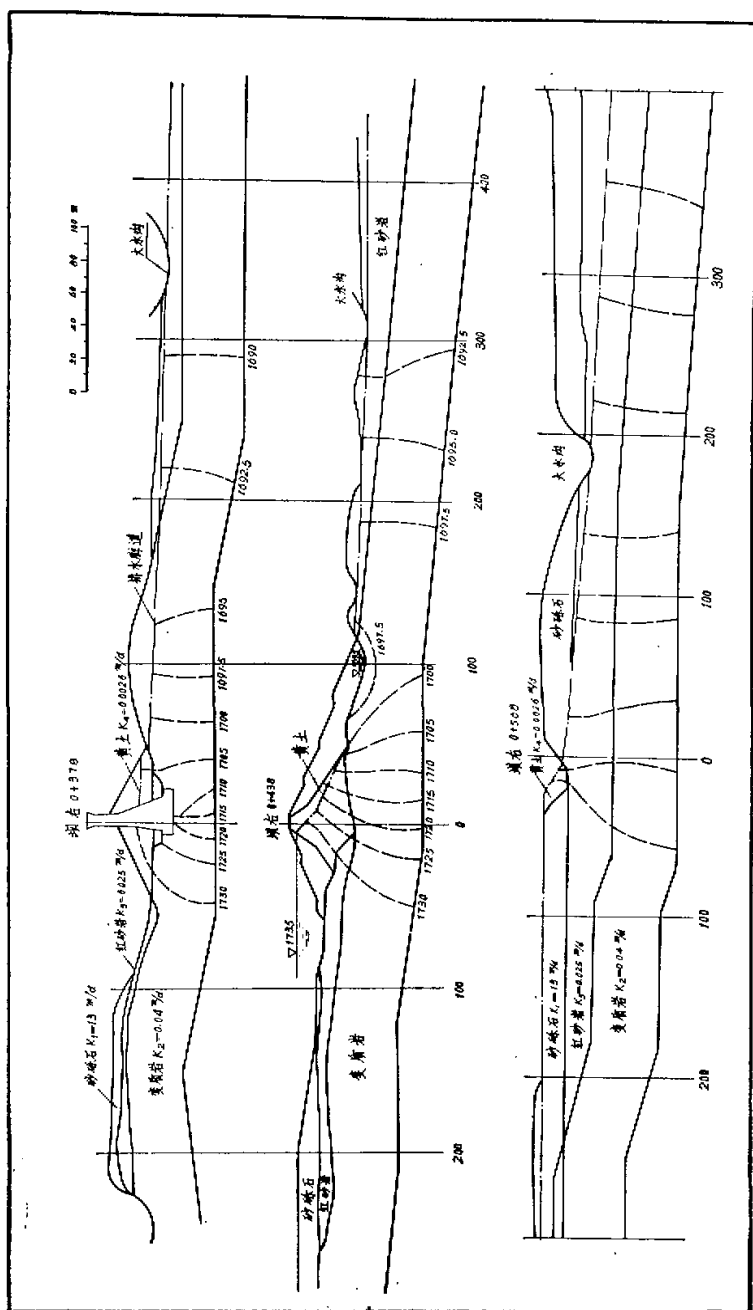


图11 刘家峡黄土付坝断面(0+378、0+438、0+508)等水位线图(左坝后砂砾石层中设灌浆帷幕)

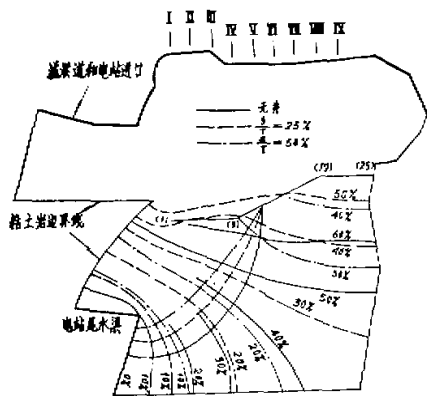


图12 丘砂基付坝水平面试验成果

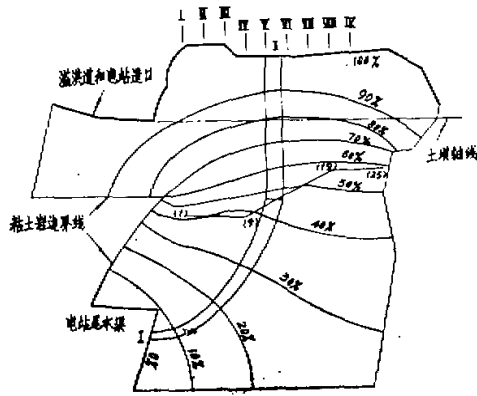


图13 丘砂基付坝渗流试验I-I流槽位置

具有代表性的水平面试验成果示于图12。由该图可看出,井的贯入度对流槽长度是颇有影响的。根据水平面模型测定的流量是:无井时为 $17090\text{m}^3/\text{d}$,当井的贯入度为25%和50%时分别为 27800 和 $33177\text{m}^3/\text{d}$ 。从渗流区域中共取三个流槽进行试验。I-I和I-II流槽分别通过12号井和5号井,目的是为了研究坝后覆盖层的浮托稳定和确定相应井的合理深度。II-II流槽是沿土坝与电站进口联接墙截取的,目的是为了确定沿墙的水力坡降。作为例子,现将I-I流槽的平面位置、排水井所在断面上的渗流状态及其坝下最大水力坡降($J_{\max}$)、下游覆盖层底面上的测压管水位(H)、流槽和井的流量(Q 、 Q_w)与井的贯入度的关系分别表示在图13、图14和图15上。为简化起见,I-I流槽穿过坝体部分是沿土坝横断面截取的。试验结果表明,若坝下游不打减压井,其覆盖层浮托稳定安全系数仅为 $0.89\sim 1.40$,显然不能满足要求。当对1~9号井和10~19号井分别采用贯入度为20%和25%时(井距采用10m),下游覆盖层浮托稳定安全系数为2.0左右,坝下最大水力坡降为0.24左右。对于该工程,覆盖层浮托稳定安全系数可采用 $1.5\sim 2.0$ 。通过试验确定的破碎砾岩不发生管涌的允许水力坡降为0.32,可见采用上述井的贯入度已满足渗透稳定要求。20~25号井由于井口位置较高,对流

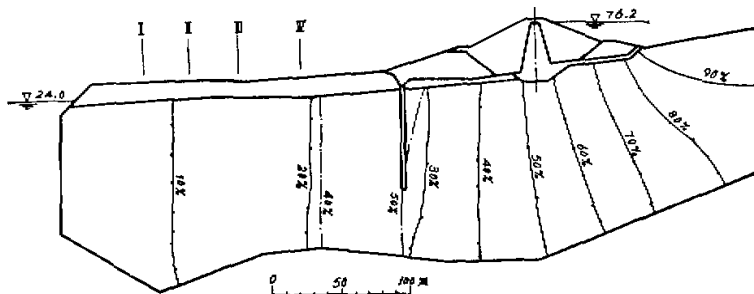


图14 丘砂基付坝渗流试验I-I流槽等势线图

—·— 无井时的等势线;
—— $\frac{s}{T} = 70\%$ 的等势线。

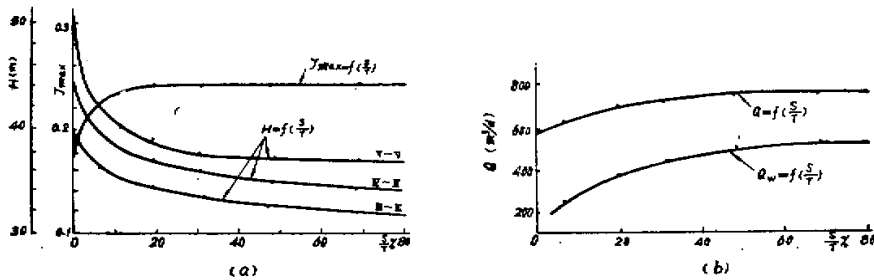


图15 丘砂基付坝渗流试验I-I流槽

$$J_{max} = J\left(\frac{s}{L}\right), H = f\left(\frac{s}{L}\right), Q = f\left(\frac{s}{L}\right) \text{ 和 } Q_w = f\left(\frac{s}{L}\right) \text{ 曲线}$$

态影响不大, 故建议不打。上游坝体内的渗透系数对坝基水力坡降影响很大, 当其渗透系数由 $1 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ 增加到 $1 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 时, 水力坡降差不多增加31倍, 因此对该铺盖必须作为正式防渗措施来对待, 应切实保证其质量。

参 考 文 献

- [1] 水利水电科学研究院、南京水利科学研究所, 渗流电拟试验指南, 中国工业出版社, 1965年。
- [2] 水利水电科学研究院, 伐乌-代耶水电站主坝三向电阻网渗流试验模型初步设计说明, 1968年。
- [3] 水电部第四工程局设计院, 刘家峡黄土付坝三向电拟试验报告, 1977年。

致 读 者

本刊文章欢迎读者参加讨论。有关创刊号及本期文章的讨论稿请于1980年9月底以前寄到本刊编辑部。讨论稿恕不退回。编辑部地址: 南京虎踞关34号南京水利科学研究所院内。

The Principles and Applications of the Model Test Techniques Using the Electric-resistance Networks to Simulate the Threedimensional Seepage Problems

Du Yan-ling and Xu Guo-an

(Research Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Běijīng)

Abstract

The paper describes systematically the principles of the model test techniques using the electric-resistance networks to simulate the three-dimensional seepage problems and its practical applications. Reasonable methods for calculating the model resistances, measuring techniques and formulas for calculating the hydraulic gradients are presented. The main advantages of this test procedures are the stable electric field, reliable test results and available for complex geological and boundary conditions. It is one of the useful tools for solving the three-dimensional seepage problems. The test results on such models relating to two dam sites are introduced in last section of this paper as the examples of its application.