

# 碾压式土石坝设计手册

下 册

---

能源部 水利部 水利水电规划设计总院

一九八九年 北京

# 碾压式土石坝设计手册

下 册

能源部  
水利部 水利水电规划设计总院

北 京

一 九 八 九 年

## 前 言

《碾压式土石坝设计手册》多年以来几经修改、补充，于中华人民共和国成立四十周年之际，把它奉献给水利水电战线上的广大读者。

由于建筑土石坝，可就地取材；节省大量水泥、钢材和木材；便于群众修建；用料广泛且对坝址地质条件要求较低；造价比较便宜。因此，我国各地兴建了大量的土石坝工程。据统计，我国现有大型水库 340 多座；中型水库 2400 多座，其中，90% 左右为土石坝；小型水库 80000 多座，其中绝大多数为土石坝。我国已为世界上拥有土石坝最多的国家。

《碾压式土石坝设计手册》系在总结我国土石坝建设经验的基础上，并收集了国内外土石坝工程大量资料编写的。书中，结合有代表性的工程实例，对筑坝材料、坝址坝型选择、设计条件和方法做了介绍；对坝基处理和抗震设计也提供了一些具体的工程措施；为了适用起见，还列举了一些计算实例。

众所周知，由于土石坝的天然筑坝材料各地差异很大，具有多变性，设计理论也不尽完善，所以土石坝工程的设计既不能套用定型设计，也不宜以类似的工程用简单的类比方法进行设计，而必须结合科学试验，用现代技术加以分析计算。本书不可能代替设计人员对某一工程设计作判断，而可供设计人员作判断时参考。

《碾压式土石坝设计手册》系水利水电规划设计总院委托原水利电力部昆明勘测设计院主编的。参加编写的单位还有：西北勘测设计院、黄河水利委员会勘测设计院、广西水利水电厅；陕西、辽宁、黑龙江等省水利水电勘测设计院；南京水利科学研究所、浙江省水利科研所、浙江大学、成都科技大学和广西大学等。

《碾压式土石坝设计手册》编写过程中，曾得到原水利部副部长、总工程师冯寅同志的指导以及许多专家的帮助，在此一并致以谢意。水利水电规划设计总院曾对本书稿组织了审查工作，参加总体审查的有毛昶熙、杨荫华、卞富宗、张槐、朱建业、王寿昌等同志。

《碾压式土石坝设计手册》中可能存在有论述不够全面、不妥或错误之处，恳切希望广大读者提出并给予指正。

水利水电规划设计总院

1989年10月

## 编写者

### 第七篇

第一~七章	周保中	沙金焯
第八、十二章 <sup>①</sup>	徐 诚	
第九、十章	周保中	沙金焯
第十一章 <sup>②③</sup>	席德鋈	

### 第八篇

第一、三章	王复来
第二章 <sup>④</sup>	李秦生

### 第九篇

第一、四、五章	杜士斌
第二章	彭学志
第三、六章	甘宪章

### 第十篇

第一~二章	刘 峻
第三~五章	徐 诚

①第十二章由徐诚执笔并得到毛昶熙的指导和校审；

②参加本章编写工作的还有张发中；

③第十一章第五节系徐诚编写，素材由南京水利科学研究院水工研究所吴凤影提供并校核

## 内 容 提 要

本书是在总结我国土石坝建设经验基础上并收集了国内外土石坝工程大量资料编写成的，是一本具有实用价值的土石坝设计手册。

全书分上、下两册。本书为下册，主要内容包括：流渗计算；稳定分析、沉陷计算及应力应变数值分析；抗震设计；土石坝观测等。

本书主要供水利水电工程技术人员参考，也可供高等院校水利水电专业的师生参考。

# 目 录

## 第七篇 渗流计算

第一章 土石坝渗流计算和设计的一般概念	1
第一节 渗流计算的 任务	1
第二节 达西定律及计算条件简化	1
第三节 地下水渗流的基本方程式	4
第四节 各向异性土和层状土的渗流	6
第二章 不透水地基上土石坝的渗流计算	8
第一节 均质坝	8
第二节 斜墙土石坝	12
第三节 心墙土石坝	13
第四节 混合式土石坝	16
第三章 透水地基上均质坝的渗流计算	17
第一节 无限深透水地基上的均质坝	17
第二节 有限深透水地基上的均质坝	18
第四章 透水地基上有铺盖的土石坝渗流计算	21
第一节 铺盖的渗流计算和设计	21
第二节 铺盖斜墙土石坝	25
第三节 铺盖心墙土石坝	30
第四节 铺盖均质坝	31
第五章 透水地基上具有截水墙的土石坝渗流计算	33
第一节 截水墙的水平等效长度	33
第二节 有截水墙的斜墙土石坝	34
第三节 有截水墙的心墙土石坝	34
第四节 有截水墙的均质坝	35
第五节 具有铺盖和截水墙的土石坝	35
第六章 有排水减压沟井的土石坝渗流计算	37
第一节 设排渗沟的渗流计算	37
第二节 设排水减压井的渗流计算	39
第七章 库水位下降时土石坝的渗流计算	41
第一节 计算原则	41
第二节 心墙土石坝上游坝壳中浸润线位置计算	41
第三节 均质坝浸润线位置的确定	43
第八章 流网图绘法及运用	45

第一节	流网的性质	45
第二节	流网图的绘制	45
第三节	流网的应用	50
第四节	绕坝端渗流量的计算	51
<b>第九章</b>	<b>出渗坡降和允许坡降的计算</b>	<b>52</b>
第一节	出渗坡降的计算	52
第二节	允许坡降的计算	53
<b>第十章</b>	<b>土的渗透变形</b>	<b>55</b>
第一节	渗透变形的类型	55
第二节	流土和管涌的判别方法	55
第三节	流土和管涌的临界坡降计算	57
<b>第十一章</b>	<b>滤层, 井滤层及护坡垫层设计</b>	<b>60</b>
第一节	概述	60
第二节	保护无粘性土的滤层设计方法	61
第三节	保护粘性土的滤层设计方法	70
第四节	井滤层及护坡垫层	73
第五节	土工织物滤层	76
<b>第十二章</b>	<b>排水减压沟井的设计</b>	<b>85</b>
第一节	排水减压沟的计算	85
第二节	排水减压井的计算	91

## 第八篇 稳定分析、沉陷计算及应力应变数值分析

<b>第一章</b>	<b>稳定分析</b>	<b>103</b>
第一节	概述	103
第二节	荷载组合与允许安全系数	104
第三节	抗剪强度	105
第四节	土和水的荷载与计算转换	112
第五节	孔隙压力的计算	115
第六节	条分法的稳定分析	132
第七节	无限长边坡的稳定分析	214
<b>第二章</b>	<b>沉陷计算</b>	<b>216</b>
第一节	沉陷计算的任务	216
第二节	坝体和坝基的应力	218
第三节	沉陷计算	225
第四节	沉陷随时间发展过程的计算	241
第五节	坝体沉陷量实测统计资料及影响沉陷因素的分析	250
<b>第三章</b>	<b>应力与应变的数值分析</b>	<b>266</b>
第一节	概述	266
第二节	应力与应变以及破坏准则	267
第三节	线性弹性模型	275

第四节	非线性弹性模型	278
第五节	有限单元法	319
第六节	各运用期中土石坝的荷载	332
第七节	土石坝的应力与变位场以及分析实例	335

## 第九篇 抗震设计

第一章	地震与土石坝抗震设计	349
第一节	地震波	349
第二节	地震震级	352
第三节	地震烈度	356
第四节	地面震动的卓越周期与持续时间	360
第五节	设计地震运动的加速度历时曲线	362
第六节	碾压式土石坝的抗震设计	363
第二章	场地选择	364
第一节	强震地面破坏的类型	369
第二节	影响地震烈度异常的主要因素	364
第三节	水库诱发地震	372
第三章	地基液化问题	378
第一节	地基液化破坏的物理概念	378
第二节	地基液化破坏的土类	378
第三节	地基液化的试验研究	383
第四节	影响地基液化的因素	390
第五节	判别地基液化可能性的方法	394
第六节	在坝体荷载下地基液化可能性的估算	414
第七节	防止土石坝地基液化破坏的工程措施	420
第四章	抗震计算原则和依据	423
第一节	抗震计算原则	423
第二节	土的抗剪强度指标的测定和选用	425
第三节	振动作用下土的模量和阻尼	427
第四节	土石坝的自振特性	430
第五节	按设计地震系数计算地震惯性力	435
第六节	确定地震荷载的动力分析法	441
第五章	抗震稳定分析	444
第一节	拟静力法	444
第二节	有限元动力分析	448
第三节	纽马克法	451
第四节	根据试样变形估计坝体的安全度	454
第五节	极限平衡动三轴法	458
第六节	估算土石坝地震变形的简化法	459



第七节 土石坝地震反应的简化计算.....	462
第六章 抗震结构和工程措施 .....	467

## 第十篇 土石坝观测

第一章 坝面变形观测 .....	475
第一节 观测设备的布置.....	476
第二节 观测设备的结构形式和埋设.....	478
第三节 观测方法.....	483
第四节 资料整理.....	487
第二章 坝内变形观测 .....	497
第一节 测点布置.....	497
第二节 坝内竖向位移观测.....	498
第三节 坝内水平位移观测.....	509
第四节 资料整理.....	518
第三章 应力观测 .....	528
第一节 土压力观测 .....	528
第二节 孔隙水压力观测 .....	535
第四章 渗流观测 .....	545
第一节 碾压式土石坝浸润线观测.....	545
第二节 碾压式土石坝渗透流量观测.....	555
第三节 绕过建筑物两岸的渗透观测.....	565
第四节 坝基渗水压力观测.....	566
第五节 导渗降压效能观测.....	570
第六节 渗水的透明度观测及化学分析.....	571
第七节 资料的整理与分析.....	573
第八节 渗透观测设备的检查和养护修理.....	577
第五章 其它观测 .....	580
第一节 碾压式土石坝的裂缝观测.....	580
第二节 浆砌石及混凝土防浪墙的裂缝观测 .....	582
第三节 地震观测 .....	584
附 录 .....	604

# 第七篇 渗流计算

## 第一章 土石坝渗流计算和设计的一般概念

### 第一节 渗流计算的任务

土石坝渗流问题是土石坝设计中十分重要的问题之一，一般情况下需通过渗流计算确定下列参数：

- 1) 通过坝身及地基的渗流量；
- 2) 坝身浸润线的位置；
- 3) 渗流动水压力或水力坡降的大小。

——过大的渗流量因增加水库的水量损失而明显降低工程效益，因此，当坝身或地基透水性较大或坝体较长时，渗流量的大小往往是坝型及防渗、排渗方案设计选定的决定性因素。在一般情况下，渗流量的大小也直接关系到坝体及地基排水结构型式和断面的设计。

坝身浸润线位置是校核坝体整体稳定的必须资料。如果浸润线在下游坝坡坡面出渗或者浸润线与下游坝坡间的距离小于冰冻层厚度，都将危害下游坝坡的局部稳定。当上游库水位以较快速度下降时，则需根据不同时刻坝身浸润线的位置来校核上游坝坡的稳定性。

渗流的动水压力或坡降是分析坝身及地基渗透稳定的主要依据，求得该值就可以与允许值比较来判定有无发生管涌或流土破坏的可能性。在设计中需特别注意渗流的出口坡降，以便合理地出口部位设计滤层或滤层盖重，防止管涌和流土的发生。坝体内土层与刚性建筑如岸墩、涵洞等的接触层面以及土体与地基、岸边基岩的接触面，往往是渗流的薄弱环节，需根据实际坡降的大小来校核渗径的长短是否满足安全需要。为确定防渗体的厚度和渗透稳定性，也需要确定渗流通过防渗体的坡降，如斜墙、心墙、铺盖、防渗帷幕、粘土齿槽等。对透水地基，需特别注意其中软弱夹层所受的渗流坡降是否超过允许值，而沿整个地基的渗流平均坡降大小也常常作为校核安全的指标。如地基为有弱透水表层的双层地基，除应保证覆盖层不致被下层渗流压力顶穿破坏外，还需保证农田或工业设施不致受到浸没破坏。

### 第二节 达西定律及计算条件简化

#### (一) 达西定律

达西定律给出线性阻力的渗透规律，也就是渗流的平均流速 $U$ 与渗透坡降 $J$ 的一次方成

比例, 即

$$U = -k \frac{dh}{dl} = kJ \quad (7-1-1)$$

式中  $h$ ——测压管水头;

$l$ ——渗径长度;

$J$ ——渗流的水力坡降;

$k$ ——渗透系数。

渗透系数取决于土体颗粒的大小、排列紧密程度以及与温度有关的水的粘滞性等, 可通过野外或室内试验测定。近似估计  $k$  值可查表 7-1-1, 或者对砂土可用太沙基 (K. Terzaghi) 公式计算

$$k = 2d_{10}^2 e^2 \quad (7-1-2)$$

式中  $k$ ——渗透系数, cm/s;

$d_{10}$ ——土的有效粒径, mm;

$e$ ——砂土的孔隙比。

表 7-1-1 各种土类的渗透系数

土质类别	$k(\text{cm/s})$	土质类别	$k(\text{cm/s})$
粗砾	$10^0 \sim 5 \times 10^{-1}$	黄土(砂质)	$10^{-5} \sim 10^{-4}$
砂质砾	$10^{-1} \sim 10^{-2}$	黄土(泥质)	$10^{-8} \sim 10^{-6}$
粗砂	$5 \times 10^{-2} \sim 10^{-2}$	粘壤土	$10^{-4} \sim 10^{-6}$
细砂	$5 \times 10^{-2} \sim 10^{-2}$	淤泥土	$10^{-6} \sim 10^{-7}$
粘质砂	$2 \times 10^{-3} \sim 10^{-4}$	粘土	$10^{-8} \sim 10^{-6}$
砂壤土	$10^{-2} \sim 10^{-4}$	均匀富粘土	$10^{-8} \sim 10^{-10}$

达西定律只在一定的渗流运动范围内适用, 它的上限常用临界雷诺数来表示。由于颗粒形状及排列情况的差异, 试验的结果没有一个十分确切的分界点。纳吉 (I. V. Nagy) 和卡拉地 (G. Karadi) 由试验研究提出的达西定律适用范围为

$$\text{Re} = \frac{U d_{10}}{\nu} \leq 5 \quad (7-1-3)$$

式中  $U$ ——渗流速度;

$\nu$ ——水的运动粘滞系数。

当渗流速度增大,  $\text{Re} > 5$  时, 进入水力学中的层流紊流过渡区域 ( $U = kJ^{0.74}$ ); 当  $\text{Re} > 200$  时, 就转变为完全的紊流状态 ( $U = kJ^{0.5}$ )。

从更为实用的角度, 欧德 (J. Ohde) 和布林日 (E. Prinz) 直接用粒径或渗透系数与水力坡降而分别给出达西定律的适用范围如表 7-1-2 及图 7-1-1。

表 7-1-2 达西定律的适用范围

有效粒径 $d_{10}(\text{mm})$	0.05	0.1	0.2	0.5	1
水力坡降 $J$ 的上限	800	100	12	0.8	0.1

在粘性土中的地下水运动，由于粘土颗粒周围束缚水薄膜的影响，只有当水力坡降较大时才符合达西定律。因此，对粘性土存在达西定律适用范围的下限，在较紧密的粘性土中的渗流，也不符合达西定律。

但是在一般情况下，如果与达西定律偏离不远，或者渗流场中仅有局部较小的区域不满足达西定律，为使工程实用简便和满足工程精度的目的，仍可用达西定律进行计算。

### (二) 渗流计算条件的简化

一般渗流计算所研究的地下水

渗流，是地下水中的重力水的运动，并且在研究中基于下列假定条件：

- 1) 渗流服从达西定律；
- 2) 不考虑土体和水的压缩性，渗透时土体的孔隙尺寸不变；
- 3) 土体内水的饱和度不变。

土石坝渗流计算成果的精度，在很大程度上取决于计算条件与实际情况之间差异的大小。对于实际的工程计算，一般认为当坝体渗透系数大于 $10^{-5}$  cm/s，相对不透水防渗体厚度较小时，实际状态与上述假定条件相近，计算结果与实际发生的渗流情况也能较好符合。此外，虽然渗透系数无论是通过野外或室内试验确定总很难准确，但渗透系数值的误差，主要仅影响渗流量的计算结果，而计算得到的渗流水头或坡降值将仍然有较高的精度。

工程中发生的渗流问题，通常都是非常复杂的。因此，在计算中还需注意对于下列问题所作的简化条件：

实际土石坝渗流都是复杂的三向（空间）渗流，仅当沿坝轴长度土层透水性无明显变化，并且坝体较长在离坝端的边墩和岸边绕渗影响距离以外，才可简化为二向问题进行计算。不透水边墩的影响距离可近似取为

$$B = (0.2 \sim 0.5) L \quad (7-1-4)$$

式中 $L$ 为上下游坝坡水边线间的投影距离。透水岸边绕渗的影响范围，除与 $L$ 有关外，还与上下游水面宽度差 $b$ 以及岸侧土或岩石的渗透系数 $k_0$ 和坝体的渗透系数 $k_1$ 的比值有关。

当 $\frac{k_0}{k_1} \geq 1$ 时可用下式估算（图7-1-2）

$$B = (1.3b + 0.34L) \left( \frac{k_0}{k_1} \right)^{\frac{1}{5}} \quad (7-1-5)$$

因此，在靠近坝端边墩或岸边影响范围以内的坝体，以及当坝体较短两端影响长度之和已

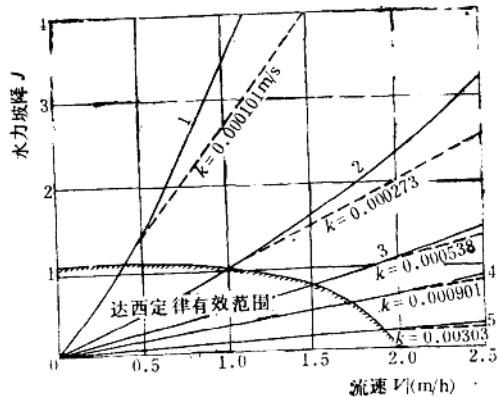


图 7-1-1 达西定律的适用范围

1—极细砂；2—细砂；3—中砂；4—粗砂；5—砾

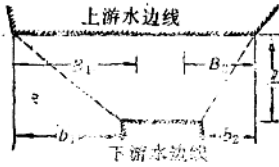


图 7-1-2 岸边绕渗的影响长度

等于或大于坝体长度时，都应考虑由于绕渗而使浸润线明显抬高的影响。若仍按一般二向问题的方法计算，求得的浸润线将明显偏低。

对于弱透水地基，只有当地基的透水性小于坝体50~100倍以上时才允许简化为不透水地基进行计算。否则，将使计算得到的浸润线偏高和渗流量偏小。

当地基透水性较大或者排水体的底宽较小（排水体底宽小于透水地基的深度）时，由排水体下面的地基呈潜流而泄向下游地基的渗流量将占有较大比重。因此，计算求得的由排水体泄出的渗流量将比实际偏大。

最后需要指出，只要所作的假定在许可范围以内，并充分注意渗流计算的适用条件，计算结果是完全可以满足工程精度要求的。

### 第三节 地下水渗流的基本方程式

#### 1. 描述稳定渗流场的拉普拉斯方程

一般情况下的二向稳定地下水运动，可用下式微分方程式来描述

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial h}{\partial y} \right) = 0 \quad (7-1-6)$$

式中测压管水头 $h$ 和渗透系数 $k$ ，均为 $x$ 、 $y$ 的函数； $x$ 、 $y$ 为平面坐标，分别表示水平和铅直方向。

对各向异性的均匀土层，上式变为

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad (7-1-7)$$

式中 $k_x$ 、 $k_y$ 分别为 $x$ 及 $y$ 方向的渗透系数，且在渗流场内到处相同。

对各向同性的均匀土层，即 $k_x = k_y$ 且到处相同，得到拉普拉斯方程式。

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad (7-1-8)$$

在满足边界条件的情况下求解微分方程式，就可得到渗流的坡降、水头以及渗流量等要素。

如果引用速度势

$$\phi = -kh \quad (7-1-9)$$

则渗流场内任意一点 $x$ 及 $y$ 方向上的速度为

$$U_x = \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad U_y = \frac{\partial \phi}{\partial y} \quad (7-1-10)$$

将式(7-1-9)代入到式(7-1-8)，得势函数的拉普拉斯方程式为

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \quad (7-1-11)$$

由于势函数 $\phi$ 是渗流场内的解析函数,因而它与另一个函数 $\psi$ 之间满足柯西黎曼方程式,即有

$$U_x = \frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{\partial \psi}{\partial y} \quad (7-1-12)$$

$$U_y = \frac{\partial \phi}{\partial y} = -\frac{\partial \psi}{\partial x}$$

函数 $\psi$ 的全微分与渗流量的全微分相等,即

$$d\psi = \frac{\partial \psi}{\partial x} dx + \frac{\partial \psi}{\partial y} dy = dq$$

因此 $\psi$ 称之为流函数。由式(7-1-12),又可得到流函数的拉普拉斯方程式

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = 0 \quad (7-1-13)$$

从式(7-1-11)(7-1-13)可知势函数与流函数互为共轭调和函数,在渗流场内已知其中的一个解答就可以推求另一个解答。求出 $\phi$ 、 $\psi$ 后,将渗流场内具有相同 $\phi$ 以及相同 $\psi$ 值的各点连成的线称之为等势线(等水头线)及流线,并知在稳定渗流的情况下,流线表示水流质点运动的迹线,流线上任一点的切线方向表示渗流速度的方向。

## 2. 边界条件及计算方法

土石坝渗流的边界条件(参见图7-1-3)

可以分为以下几种:

(1) 透水边界。边界线为等势线,水头及速度势等于常数,如边界1—2,若以不透水层面为基面,则 $h=H_1$ 及 $\phi=-kH_1$ 。

(2) 不透水边界。边界线为流线,流函数等于常数且在边界的法线方向上渗流速度为零。如边界1—4,若流函数值定义为由上向下增大,则有 $\psi=q$ 。 $q$ 为通过坝体的单宽渗流量,并且有 $\frac{\partial h}{\partial n} = 0$ 及 $\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0$ , $n$ 表示内法线方向。

(3) 浸润线边界。浸润线为坝体渗流的自由水面线,为一流线,如边界2—3,因而在浸润线上有 $\psi=0$ 及 $\frac{\partial h}{\partial n} = \frac{\partial \phi}{\partial n} = 0$ 。同时浸润线任意一点的测压管水头与该点的位置坐标 $y$ 相等,因而又有 $h=y$ 及 $\phi=-ky$ 。

(4) 渗出段边界。该段边界既不是流线也不是等势线,如边界3—4。在渗出段边界上,任意一点的水头与点的位置坐标相等,即有 $h=y$ 以及 $\phi=-ky$ 。

上述边界条件或可分为两类。第一类边界为已知边界的水头值,例如土石坝上下游水

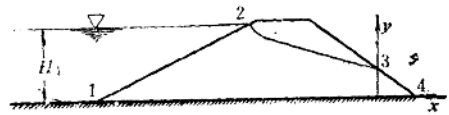


图 7-1-3 土石坝渗流的边界条件

面以下的边坡、河床底面或渗出段边界；第二类边界为已知或可算出流函数等于常数的流量边界，如浸润线和不透水边界。

求解土石坝渗流要素的方法，可以分为解析法、图解法和试验法几类。其中解析法还分流体力学的方法，水力学的方法，差分法及有限单元法的数值计算等。图解法也就是手绘流网法。试验法常用的有电模拟试验、砂槽试验及狭缝槽试验等。

#### 第四节 各向异性土和层状土的渗流

##### (一) 各向异性土的渗流

各向异性土的土层，可以通过坐标变换转化为各向同性土的虚拟土层进行解析法或图解法的计算研究。求得解答后，再通过坐标变换变为原来的计算图形，得各向异性土层的渗流解答。

例如，当保持垂直坐标 $y$ 不变，而引用新的水平坐标

$$x' = x\sqrt{k_y/k_x} \quad (7-1-14)$$

将上式代入微分方程式(7-1-7)，得新坐标系下拉普拉斯方程式：

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad (7-1-15)$$

因此，就可以按各向同性的情况进行研究。这时的计算图形。 $y$ 方向尺寸不变， $x$ 方向的尺寸需乘以比数  $a = \sqrt{k_y/k_x}$ ，相对于原计算图形，在 $x$ 方向变态。求出浸润线或流线与等势线的流网图形后，再将 $x'$ 的坐标除以比数 $a$ 转换为原计算图形上的计算结果。

如保持水平方向 $x$ 的坐标不变而变换 $y$ 方向，同理，可将 $y$ 方向的尺寸乘以比数  $\sqrt{k_x/k_y}$ ，进行渗流计算后，再除以比数 $a$ 恢复为原来的图形。

无论变换 $x$ 坐标还是 $y$ 坐标，转换为各向同性虚拟土层的情况下等效渗透系数应为

$$k = \sqrt{k_x k_y} \quad (7-1-16)$$

按各向同性土的虚拟情况和上式确定的 $k$ 所求得渗流量，就为各向异性土情况的渗流量值。

##### (二) 层状土的渗流

在承压流动的假定条件下（如计算通过坝基的渗流，而坝基为层状土），可先将层状土转化渗透系数为 $k_x$ 及 $k_y$ 的各向异性土（图7-1-4），然后再转化为各向同性土进行研究。 $k_x$ 及 $k_y$ 分别按下式计算。

$$k_x = (k_1 T_1 + k_2 T_2 + \dots + k_n T_n) / (T_1 + T_2 + \dots + T_n) \quad (7-1-17)$$

$$k_y = (T_1 + T_2 + \dots + T_n) / \left( \frac{T_1}{k_1} + \frac{T_2}{k_2} + \dots + \frac{T_n}{k_n} \right) \quad (7-1-18)$$

当将层状土转化为各向异性土时， $x$ 及 $y$ 坐标均不变。

**【例】** 如图7-1-5所示层状土地基设有贯入深度为 $W$ 的减压排水沟（或井），且每

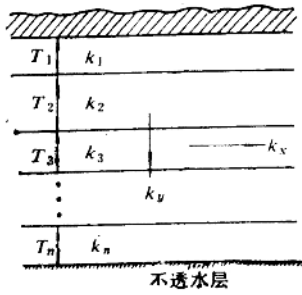


图 7-1-4 层状土层的渗流

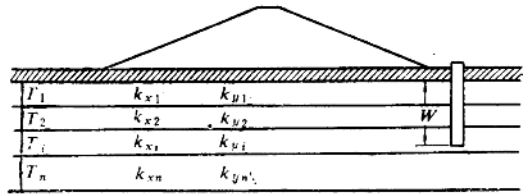


图 7-1-5 层状土地基设有减压沟(井)

层土层也为各向异性的, 试化为均质土层。

转化中保持水平方向的尺寸不变。首先将各个各向异性土层按下式化为均质土层

$$T'_i = T_i \sqrt{k_{xi}/k_{yi}}$$

$$k'_i = \sqrt{k_{xi} k_{yi}}$$

式中脚标*i*表示任一土层,  $i=1, 2, \dots, n$ ;  $T'_i$ 及 $k'_i$ 表示转化后第*i*层的厚度及渗透系数。

再将由各均质土层组成的层状土化为均质各向异性土, 其渗透系数分别为

$$k'_x = \frac{\sum_1^n k'_i T'_i}{\sum_1^n T'_i}$$

$$k'_y = \frac{\sum_1^n T'_i}{\sum_1^n \frac{T'_i}{k'_i}}$$

均质各向异性土的层厚为

$$T'' = \sum_1^n T'_i$$

减压沟井贯入的深度应为

$$W'' = \frac{\sum_1^n T'_i k'_i}{\sum_1^n T'_i k'_i} T''$$

最后再将各向异性土化为均质各向同性土, 渗透系数为

$$\bar{k} = \sqrt{k'_x k'_y} = \sqrt{\frac{\sum_1^n T_i k_{xi}}{\sum_1^n \frac{T_i}{k_{yi}}}}$$

层厚为

$$\bar{T} = T'' \sqrt{k'_x/k'_y} = \sqrt{\sum_1^n T_i k_{xi} \sum_1^n \frac{T_i}{k_{yi}}}$$

减压沟井贯入的深度为

$$\bar{W} = W'' \sqrt{k'_x/k'_y} = \frac{1}{\bar{k}} \sum_1^n T_i k_{xi}$$

如果图7-1-5所示地基每层土均为各向同性的情况,  $\bar{k}$ 、 $\bar{T}$ 、 $\bar{W}$ 的计算式仍然有效, 只需代入 $k_{xi}=k_{yi}=k_i$ 进行计算。



## 第二章 不透水地基上土石坝的渗流计算

### 第一节 均质坝

对坝体上游水面以下  $1:m_1$  的斜坡部分, 计算中可用具有相同渗流阻力的虚拟矩形体代替而使计算简化。无论坝体采用何种型式的排水设备, 虚拟矩形体的宽度可按米哈依洛夫 (Т·К·Михайлов) 建议的下式确定

$$\Delta L = \frac{m_1}{2m_1 + 1} H_1 \quad (7-2-1)$$

式中  $H_1$ ——坝体上游的水深。

(一) 有贴坡排水 (或无排水) 的均质坝

当下游有垂直边坡 ( $\alpha=90^\circ$ ) 时 (图 7-2-1), 根据柯钦娜的流体力学解, 下游垂直边坡上渗出段长度  $a$  可由图 7-2-2 所示  $\frac{a}{H_1} = f\left(\frac{L_1}{H_1}, \frac{H_2}{H_1}\right)$  的曲线确定。

当  $\frac{L_1}{H_1} \geq 1$  时, 通过坝体的单宽渗流量由下式计算

$$q = k \frac{H_1^2 - H_2^2}{2L_1} \quad (7-2-2)$$

当  $\frac{L_1}{H_1} < 1$  同时  $H_2 = 0$  时, 渗流量近似为

$$q = k \frac{\pi}{2} a \quad (7-2-3)$$

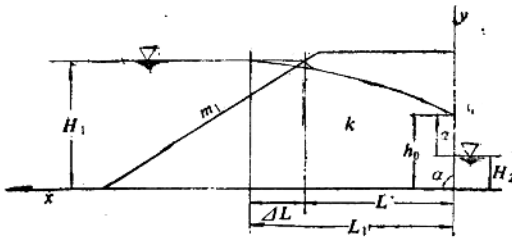


图 7-2-1 下游有垂直边坡的均质坝

当下游有倾斜的边坡 ( $\alpha < 90^\circ$ ) 时 (图 7-2-3), 渗流量按下式计算

$$q = k \left[ \frac{(H_1 - H_2)^2}{L_1 - m_2 H_2 + \sqrt{(L_1 - m_2 H_2)^2 - m_2^2 (H_1 - H_2)^2}} + \frac{(H_1 - H_2) H_2}{L_1 - 0.5 m_2 H_2} \right] \quad (7-2-5)$$

式中  $k$ ——坝体的渗透系数。

坝身浸润线可由下式近似确定

$$y^2 = \frac{H_1^2 - h_0^2}{L_1} x + h_0^2 \quad (7-2-4)$$

求得的浸润线在上游坝坡附近需按与坝坡正交的流线趋势描绘修正。

(见图 7-2-1)。