

**DUOCENGDIJI HE JIANYAGOUJING DE
SHENLIU JISUANLILUN**

多层地基和减压沟井的 渗流计算理论

安徽省水利科学研究所

水利出版社

多层地基和减压沟开的 渗流计算理论

安徽省水利科学研究所

水利出版社

多层地基和减压沟井的渗流计算理论

安徽省水利科学研究所

*

水利出版社出版

(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

850×1168毫米 32开本 14 $\frac{1}{2}$ 印张 381千字
1980年2月第一版 1980年2月北京第一次印刷

印数 00001—3720册 每册 2.35元

书号 15047·4010

内 容 提 要

本书的主要内容是论述堤防、涵闸工程中多层地基的渗流计算理论。全书分三篇：一、多层地基；二、减压沟；三、减压井。第二、三篇关于减压沟井的渗流计算，也考虑了地基的多层性。书中对三向渗流、梯形断面沟和不完整井等问题，也作了比较详细的分析和研究。为了便于应用，大部分计算公式已列成图表，并附有大量算例。

本书可供水利水电科研和设计人员使用，其中的某些章节，也可供石油开采、地下水开采、水文地质勘探和农田排水等有关方面的科技人员参考。

* * *

本书系由吴世余编写，书中的研究工作也系由吴世余担任，参加本书的整理、计算和绘图的分别有赵昌俊、康炯芳和丁学慎。

2009/12

前 言

为了实现我国的四个现代化，科学技术要大上，迫切地要求我们去研究一些新的领域。关于多层介质中的渗流理论，目前尚缺系统性的专门论述。随着我国水利和油田等建设事业的飞跃发展，生产上遇到的多层渗流问题，将日益增多，亟待我们去研究解决。本所十余年来，在堤防、涵闸渗流试验研究和减压沟井设计等工作的基础上，积累了一些资料，今加以整理，并引入其他作者的一些有关论述，整编成较有系统的完整的多层地基和减压沟井渗流计算理论的专门论述，以供有关方面参考。

本书的主要内容是论述堤防、涵闸上下游多层地基中地下水的运动规律，计算地基在设置减压沟井前后的水头分布、流量和出逸坡降，为堤防、涵闸的稳定分析、渗漏量计算和防渗方案比较提供资料。书中的部分公式也可应用于土坝的渗流计算，某些章节还可供石油开采、地下水开采、水文地质勘探和农田排水等有关方面的工作参考。

本书理论与应用并重。理论推导的方法和过程，力求阐述清楚，对某些问题的解，还并列了几种方法，其目的是希望读者能掌握解题手段，举一反三，解答在工作中遇到而本书又未能论及的一些问题。为便于应用计，提出了一些简化的计算方法，不可避免的繁冗计算，也已列成图表，还附有大量算例，用以说明解题的具体演算方法和结果。

为使理论能紧密地联系实际工程，除充分考虑地基多层性外，还比较详细地研究了工程上常见的梯形断面沟问题和三向渗流问题。对目前研究未臻完善的不完整井问题，也作了进一步的研究。

本书的资料来源包括三部分：一、本所的研究工作，约占百

分之五十；二、系统整理的工作，约占百分之三十；三、引用并加以评述的资料，约占百分之二十。引用的研究结果，其解题方法可能与原著的不同，或有所改进。至于一般的解，则均系独立推导，以便纳入本书自身的论述系统。

本书提出的新的研究结果，虽经部分专业工作者审阅，和室内试验验证，但终究未经广泛的讨论和应用，一定还有某些错误和应用不便之处；由于理论和编写水平所限，书中的其他一些地方，也会有不少的缺点和错误，希读者指正。

作者

1979年8月

主 要 符 号

$A = \sqrt{\frac{k'}{kT'T'}}$	双层地基的越流系数
$A_m = \sqrt{\frac{k'_m}{k_m T'_m T'_m}}$	多层地基第 m 砂层的上越流系数
$A'_m = \sqrt{\frac{k'_{m+1}}{k_m T'_m T'_{m+1}}}$	多层地基第 m 砂层的下越流系数
a	半沟长; 数值符号
B_{mi}	多层地基的特征向量 (m 指层次, i 指特征值编号)
b	沟和截水槽的半顶宽; 数值符号
b_0	沟和截水槽的半底宽
c	半井距; 数值符号
c_0	砂层顶板水头分布曲线与其渐近线间的起始截距 (沟边)
c_{a_1}	砂层顶板水头分布曲线与其渐近线间的截距 (离沟边距离为 a_1)
d^+, d^-	沟的正、反对称流从沟边量起的附加渗径长度
d_0^+, d_0^-	沟井的正、反对称流从沟井中心量起的附加渗径长度
F	面积
f_0	不完整井的附加阻力系数
H_1, H_2	上、下游水位 (选平均地面, 或地面的最低点, 或下游水位为基准零点)
H	上、下游水位差; 如下游水位选为基准零点, H 也代表上游水位
h	沿程变化的水位或水头
$\frac{h}{H}$	比位势; 如乘以 100, 为百分比位势; 又

均简称位势

$h' = H - h$	损失水头
h_a	打井前的井位水头
h_β	井水位或井壁水头
h_0	沟井的水位降深；注水沟井的水位上升高度
h_μ	井间水头
h_e	剩余水头
I	出逸坡降；点坡降
J	坡降
J^+, J^-	沟井正、反对称流水头分布曲线的渐近线的坡降
J_1, J_2	沟井上、下游水头分布曲线的渐近线的坡降
k, k'	强、弱透水层的渗透系数
L	上、下游渗流边界间的距离
L_1, L_2	上、下游渗流边界到堤中心线或堤脚的距离
L_0	堤基或闸基宽度
l_1, l_2	上、下游渗流边界到沟井中心的距离
l_a, l_b	上、下游渗流边界到沟边的距离
l_0	双列井的列距
$m = \frac{k'}{k' l' n}$	变厚度铺盖的越流系数；数值符号
n	变厚度铺盖的斜率；数值符号
Q	流量
q	单宽、单厚流量；线分布、面分布的单位流量
q'	覆盖层的单宽流量
q_0	半无限长沟和定长沟沟端的附加流量

R	井的补给距离
R_1	圈堤中心线的径距
R_0, R_2	圈堤内、外渗流边界的径距
r_0	井的计算半径, 简称井半径
S	沟井深度
T, T'	强、弱透水层的层厚
u, u'	强、弱透水层中水平向的分流速
v, v'	强、弱透水层中垂直向的分流速, v 还用 作流速符号
w, w'	强、弱透水层中的流速
θ	坡角; 角度
λ	特征方程的根, 简称特征值
$\phi = kh$ ①	位势, 势函数
$\phi' = kh'$	损失位势
ψ	流函数
U	向量场
G	满足椭圆微分方程的格林函数
$\alpha(x) = \sqrt{x} I_1(2\sqrt{x})$	第一类变厚度铺盖函数
$\beta(x) = \sqrt{x} K_1(2\sqrt{x})$	第二类变厚度铺盖函数
$I_0(x), I_1(x)$	第一类零阶、一阶虚变元柱函数
$K_0(x), K_1(x)$	第二类零阶、一阶虚变元柱函数
$F(\theta, \kappa^2)$ ②	$= \int_0^\theta \frac{d\theta}{\sqrt{1 - \kappa^2 \sin^2 \theta}}$ 第一类椭圆积分

① 势函数一般定义为: $\phi = -kh$, 本书省去负号。这是由于在减压沟井的分析中, 主要考虑的是水头分布, 这样定义, 就使势函数与水头两个概念统一起来。

② 椭圆积分符号与常用的不同, 常用的在小括号内标以 κ , 本书标以 κ^2 。这一更改有两点原因: 一、椭圆积分表中标出的是 κ^2 , 而不是 κ , 更改之后, 查表比较方便; 二、本书很多地方 κ 以根号形式出现, 如改为 κ^2 则可省去根号, 使式子的形式简化。

$$K(\kappa^2) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\theta}{\sqrt{1 - \kappa^2 \sin^2 \theta}} \quad \text{第一类完全椭圆积分}$$

$$E(\theta, \kappa^2) = \int_0^{\theta} \sqrt{1 - \kappa^2 \sin^2 \theta} \, d\theta \quad \text{第二类椭圆积分}$$

$$E(\kappa^2) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - \kappa^2 \sin^2 \theta} \, d\theta \quad \text{第二类完全椭圆积分}$$

$$\Pi(\theta, N, \kappa^2) = \int_0^{\theta} \frac{d\theta}{(1 - N \sin^2 \theta) \sqrt{1 - \kappa^2 \sin^2 \theta}} \quad \text{第三类椭圆积分}$$

$$z = x + iy \quad \text{运动平面}$$

$$\zeta = \xi + i\eta \quad \text{辅助平面}$$

$$f = \phi + i\psi \quad \text{复势平面}$$

$$\omega^* \quad \omega \text{ 的等效折合值}$$

$$\tilde{\omega} \quad \omega \text{ 的无量纲值}$$

$$\bar{\omega} \quad \omega \text{ 的平均值}$$

目 录

主要符号

绪 论	1
-----	---

第一篇 多 层 地 基

第一章 双层地基	12
第一节 双层地基的平面渗流	12
第二节 双层地基的轴对称渗流	37
第三节 双层地基的三向渗流	50
第四节 变厚度铺盖和盖重	66
第二章 四层地基和多层地基	75
第一节 四层地基的平面渗流	75
第二节 四层地基的轴对称渗流	94
第三节 四层地基的三向渗流	105
第四节 多层地基	122

第二篇 减 压 沟

第三章 无限长沟	131
第一节 正反对称流叠加法	131
第二节 浅沟	136
第三节 窄沟	151
第四节 矩形断面沟	156
第五节 梯形断面沟	167
第四章 非无限长沟	193
第一节 半无限长完整沟	193
第二节 定长完整沟	198
第三节 不完整沟	209

第四节	短沟	214
第五章	多层地基中的沟	223
第一节	双层地基中的无限长沟	224
第二节	双层地基中的半无限长完整沟	229
第三节	双层地基中的定长完整沟	243
第四节	双层地基中的不完整沟	258
第五节	多层地基中的无限长沟	261

第三篇 减压井

第六章	完整井	267
第一节	关于源点和汇点的解题理论	267
第二节	单井	275
第三节	长列井	287
第四节	群井	312
第五节	入井的水头损失	320
第七章	不完整井	325
第一节	浅井	327
第二节	井底透水的完整井	342
第三节	井底不透水的完整井	380
第四节	小井距的不完整井	387
第八章	多层地基中的井	391
第一节	双层地基中的单井	391
第二节	双层地基中的长列井	398
第三节	双层地基中的群井	404
第四节	多层地基中的单井	408
第五节	多层地基中的长列井	411
第六节	多层地基中的群井	417
附录 I	不完整截水槽	422
附录 II	变厚度铺盖函数表	438
参考文献		451

绪 论

一、概 述

水工建筑物及其地基的渗流，与水工建筑物的安全直接有关，是水工建筑物设计中的重要问题。为能得出安全、经济的正确设计方案，渗流问题必须根据实际的水文地质条件进行分析。河床及其两岸的滩地和冲积平原，常系多层沉积，建筑在多层地基上的水工建筑物，它的渗流分析和计算，远较单层地基的复杂，须作专门研究。

多层地基大致可分为这样三种类型：（1）页片状多层地基，特征是层次多而层厚薄，层厚仅数毫米，或不到一毫米；（2）强、弱透水层相互间隔的多层地基，层厚从数分米、数米到数十米，这是常见的一种多层地基；（3）层次零乱，或排列次序无一定规则的多层地基。

关于页片状多层地基的渗流计算已早有论述，它是水平各向同性、而竖向和水平向异性的均质问题，只要改变运动平面的纵横座标比例，即可按均质和各向同性的地基求解，方法简单，本书不再讨论。本书的主要研究对象，是强、弱透水层相互间隔的多层地基。至于层次零乱，排列次序无一定规则的多层地基，则可经过并层、分段处理等方法，将部分问题转化为本书所论述的计算图式，余下的另一部分问题，因过于复杂，须应用其他计算方法或试验方法求解，不在本书的讨论范围以内。

强、弱透水层相互间隔的多层地基，按层次的多少分，又可分为双层、四层、六层等类型。地表是粘性土覆盖层，下面是下卧砂层，再下面是不透水层，这种类型称为双层地基。自地表以下，层次的排列次序是：粘性土覆盖层、上砂层、粘性土隔层、下砂层和不透水层，这种类型称为四层地基，余类推。多层地基中，如地下水位既低于地面而又高于粘性土覆盖层的底板，那么

在稳定流的情况下，地面既无补给，又无排出，渗流分析时，可将粘性土覆盖层视作完全不透层，因此参与渗流分析的层次减少了一层，原先的双层地基问题，转化为单透层问题，四层地基问题，转化为两强一弱的三透层问题，余类推；由于地下水位尚高于粘性土覆盖层的底板，故仍系有压流问题。如地表不是粘性土覆盖层，而是砂层，这类多层地基的渗流分析，要分两种情况区别对待：如在地表砂层内，上、下游间无截渗建筑物，那么经由下面各层次的渗水量，与地表砂层的渗水量相比甚微，故可视为单层地基分析；如有截渗建筑物，则地表砂层的存在与否，对渗流场的影响甚微，故可按余下的层次作多层地基的渗流分析。

多层地基，常由于弱透水性覆盖层的阻水作用，使处于水工建筑物下游或基坑的下卧砂层水压过大，以致地基发生渗透变形，而影响到水工建筑物的安全。渗透变形有两种类型：（1）流土：水压过大，超过其上部土体的自重，压力不平衡，发生土体壅起的现象，称为流土；（2）管涌：渗透坡降过大，土中细颗粒发生逐渐流失的现象，称为管涌。不致发生管涌的允许坡降，可根据土的密度、结构和颗粒组成曲线估算，或经渗透变形试验直接求得。流土和管涌，最终都可能形成渗流的集中通道，并在地表引起砂沸现象，严重的，还可能导致水工建筑物的破坏。此外，紧靠着水工建筑物下游的地基，还会由于水压的顶托，减小了土体的有效压力，使土体处于半悬浮状态，从而减小了水工建筑物的抗滑稳定性。

为使水工建筑物的地基稳定，必须消除或降低下游地基中的水压力。最有效的减压措施，莫过于在水工建筑物下游设置减压沟井，直接地降低下游地基中的水压力。诚然，也可在水工建筑物基础之下设置截水槽、板桩等截渗工程，或在上游做粘土铺盖等防渗工程，拦截部分或大部分渗流，以延长有效渗径，间接地降低水工建筑物下游地基中的水压力；但减压沟井由于存在着工程量小、材料省、费用低、效果显著和施工期可与水工建筑物主

体工程错开等优点，所以，在水利工程上，经常地、广泛地采用减压沟井或配合其它防渗、截渗工程作为地基的降压措施。当然，减压沟井也有它的缺陷，其主要缺陷是容易淤塞，以致逐渐失效。但如管理妥善，年年清淤洗井，当可延长使用寿命。如已部分失效或完全失效，则由于减压沟井施工方便，造价低廉，也可增添或重新设置新的减压沟井。

下面将从计算分析的角度上，详细阐述减压沟井的类型和定义，这对如何应用本书的计算图式，是有帮助的。

减压沟的类型，按沟的断面型式分，有浅沟、窄沟、矩形断面沟和梯形断面沟等类型。浅沟只有宽度，没有深度。由于水下砂层的开挖比较困难，要挖深必须有井点排水设备，所以浅沟是经常被采用的沟型之一。窄沟只有深度，没有宽度，这一沟型实际上并不存在。但在渗流分析时，由于窄沟的边界条件简单，所以常先分析窄沟，然后将其结果加以校正，引用到其它沟型的渗流计算上。矩形断面沟既有宽度，也有深度，但由于沟壁是垂直的，所以在实际工程上也比较少见。除非沟壁施工采用预制透水混凝土块砌筑，或在沟内置以反滤体填实，并在反滤体内部置以导流管，方能施工成具有垂直沟壁的矩形断面沟。梯形断面沟是实际工程上最常见的沟型，因此，本书作了较详细的分析和研究。

减压沟的类型，按沟的长短分，有无限长沟、半无限长沟、长沟、定长沟和短沟等类型。无限长沟是两端都没有尽头的沟，其渗流计算属于竖向平面渗流问题。半无限长沟是一端有尽头，而另一端没有尽头的沟，其渗流计算的目的，主要是分析沟端的绕流问题。这两种沟型，实际上是不存在的，但在渗流计算上，必须先分析这类最简单的沟型，其分析的结果，可足够精确地移用于某些实际沟型的渗流计算。横贯整个河床的沟，且河床两岸又为不透水岩石所组成，这时不论沟的长短，均按无限长沟计算，因为这属于竖向平面渗流问题。长沟指沟长超过二到四倍等效补给距离的沟。长沟的中间部分，可按无限长沟计算；沟端部

分，可按半无限长沟计算。定长沟指沟长小于二到四倍等效补给距离的沟。短沟指沟长小于五分之一等效补给距离的沟。

减压沟的类型，按沟的深浅分，有完整沟、不完整沟和浅沟等类型。沟深与沟所在的透水层层厚之比，称为相对沟深。相对沟深等于1的为完整沟；小于1的为不完整沟；等于零的为浅沟。

减压井的类型，按井的深浅分，也同减压沟一样，有完整井、不完整井和浅井等类型。井深与井所在透水层层厚之比，称为相对井深。相对井深等于1的为完整井；小于1的为不完整井；等于零的为浅井。

减压井的类型，按井管的构造分，有井底透水和井底不透水的两种类型。对于井径小而井深大的井，排水主要依靠井壁，井底透水与否，对渗流场没有什么明显的影响；但对于井径大而井深小的不完整井，井底一般都系透水的，排水主要依靠井底，因此，必须计入井底的排水作用。

减压井的组合型式，有单井、长列井和群井三类。单井指整个渗流场中只有单一的井。长列井指井位按直线排列、并按等距离间隔的无穷个井所组成的井列。群井指两个以上井位任意分布的井所组成的井群。长列井按井列的数目又可分为单列井、双列井和多列井。在实际工程中，井列线上井的数目总是有限的，只有当井列线的长度超过二到四倍等效补给距离时，井列线的中部方可按长列井计算；至于井列线的两端，由于绕流的影响，不论井列线多长，均须按群井计算。井列线横贯整个河床的长列井，且河床两岸又为不透水岩石所组成，这时不论井列线长短，均应按长列井计算，因为渗流场不存在绕流的问题。

二、课题研究的方法和基本假定

本书的全部理论推导遵从达西定律。并假定地基的单一层次是等厚、均质和各向同性的（仅变厚度铺盖和盖重考虑了层厚的变化）；多层地基是强弱透水层相互间隔的。

论述范畴仅限于稳定有压流。因为水工建筑物上游滩地淹没，多层地基中地下水的运动，除淹没的开始阶段外，一般多属稳定有压流。淹没的开始阶段，由于土骨架的弹性，以及下游地下水位的逐渐上升，属不稳定流，水压的传递有个滞后过程，但这不是工程的最危险阶段。

多层地基是相互联系，相互渗透，不可分割的。通常为了便于分析，常取出某些层次单独来分析，这在一般情况下是不够精确的。仅当渗流区域的大小与越流系数的倒值 $\frac{1}{A}$ 相比甚小的情况下，方可将弱透水层视作完全不透水，而仅分析强透水层中的渗流。对于大面积的渗流，微弱透水层单位面积的越层补给量虽然很少，但面积广，积少成多，总的越层补给量仍不能忽视。

多层渗流的研究方法可归纳为：（1）严格解：关于双层地基，已解出一些在极简单边界条件下的严格解。由于边界条件的限制，这些严格解的实际应用价值不大，但可校核各近似理论解的精度。（2）试验：包括电模拟、狭缝槽和砂模等方法。它的优点是可模拟较复杂的边界条件。但试验的工作量较大，如不予特别注意，试验精度也不易得到保证。（3）数值解法：常用的为有限差分法和有限单元法。数值计算可制成标准程序电算，计算速度快，是研究多层渗流的一个方向。但对某些问题，如不完整井问题和群井问题，由于存在着很多的渗流急变区，致使划分单元的节点过多，而涉及到计算机的容量是否满足的问题，因此数值解法不一定适用，有时反不及通常的计算方法方便正确。（4）近似理论解：适用于强、弱透水层相互间隔的多层地基。只要强、弱透水层的渗透系数比大于100，近似理论解就具有足够的精确度。近似理论解是本书研究多层渗流的主要方法，兹将其所依据的基本假定、求解的方法、解的形式和适用范围等，论述于下。

由于强、弱透水层的渗透系数比值很大，故在一般条件下，可假定强透水层中的流线基本上是水平的，而弱透水层中的流线则基本上是垂直的。这一简化假定（以下称本奈特假定），大大