

水下及淤泥中施工与 地基处理

杨光照 著

海洋出版社

1998年·北京

水下及淤泥中施工与 地基处理

杨光照 著

海洋出版社

1998年·北京

内 容 简 介

本书汇集杨光照同志 30 余年来从事水利水电、供水工程,以及海堤、码头、机场工程设计与研究工作中有关水下及淤泥中施工与地基处理方面的论文共 39 篇。内容涉及水下及淤泥中施工原理,水下工程爆破,水下灌注沥青混凝土,新奥法施工,淤泥中开挖与填筑工程,淤泥、粉细砂、砂砾及岩石地基处理,深基坑支护,及大江大河截流工程。

本书可供海洋开发、交通运输、水利水电等部门从事水下及淤泥中施工、结构设计、地基处理的设计、施工及研究人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

水下及淤泥中施工与地基处理/杨光照著. —北京: 海洋出版社, 1998. 2

ISBN 7-5027-4404-5

I. 水… II. 杨… III. ①水下建筑物-工程施工-文集
②水下基础-地基处理-文集③软土地基-地基处理-文集
IV. TU753. 8-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 28033 号

责任编辑 赵士青
责任校对 张丽萍
责任印制 李惠玲

海洋出版社 出版发行

(100081 北京市海淀区大慧寺路 8 号)

北京市燕山联营印刷厂印刷 新华书店发行所经销
1998 年 7 月第 1 版 1998 年 7 月北京第 1 次印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 19.625

字数: 471 千字 印数: 0—1 400 册

定价: 42.00 元

海洋版图书印、装错误可随时退换

序 言

《水下及淤泥中施工与地基处理》是作者 30 余年来参加或主持设计、施工的十余项国家重点工程中解决水下及淤泥中施工技术、建筑结构及地基处理方面的研究成果和实践经验总结。

我与作者共事 34 年，深感水利工程建设中水下及淤泥中作业复杂困难。在围堰保护下，基础处理完毕，工程出水面，才觉得松了一口气。作者应用基础理论扎实，事业心强，长期深入现场，善于理论联系实际，以创新精神，使理论与应用相结合，提出新颖的设计施工方案。

作者运用水动力学、土动力学、爆炸力学、气液双相流理论、流变与填充理论、结构与介质相互作用理论及近代施工技术，结合工程实践，在许多方面进行开拓性研究，提出诸如流水中直接造混凝土坝（围堰）、水下灌注沥青混凝土、新奥法处理水下倒悬岩体、水下定向爆破与径裂爆破、保护层一次爆除、大江大河立堵截流与防冲、淤泥深基坑支护、挤淤置换地基、淤泥上的路堤填筑与开挖、淤泥及水下抛土铺盖、粉细砂地基处理、防渗墙造孔期槽壁稳定分析，以及地基上的过渡层与过渡段等方面的设计原则、计算方法及实施措施，不仅解决了作者所承担设计工程关键技术，也为类似工程提供了可资借鉴的成功经验。

该论文集最大特点是集理论、实践经验与工程实例于一体。虽是论文集，读后却感到前后呼应，自成一体，系统性强，摒弃了常规的设计、计算理论与方法，汇集了工程界所关注的工程难点的具体解决措施与设计计算方法，既不累赘，又倍感新颖。不论从事岩土还是混凝土工程，从事上部结构，还是地基基础的设计、施工及科研人员，都有可读性。因此，欣然命笔作序，向广大读者推荐。

长江水利委员会技术委员会主任
中国工程院院士

文伏波

1996 年元月于武汉

前 言

作者参加工作 30 余年来,有幸参加了长江三峡、葛洲坝、汉江丹江口及赣江万安等水利枢纽和贵州乌江渡水电站、深圳国际机场、珠海国际机场、深圳河治理工程、黄河禹门口提水工程、武汉青山热电厂灰堤加固等国家重点工程建设,主持结构与施工设计,承担施工导流与围堰工程、海堤、码头、公路、地基处理、深基坑支护及加固工程设计与研究工作;参与广东北江飞来峡、四川紫坪铺、湖南五强溪等水利枢纽和白云面板堆石坝、上海浦东国际机场、浙江瑞安海堤、珠海直升飞机场海堤加固等工程设计咨询工作。

作者在从事上述工程设计与咨询工作中,取得了一些关键技术问题的研究成果与实践经验,并先后发表了《水下灌筑混凝土》、《水下工程爆破》(获水利部第二届全国优秀水利科技图书二等奖)、《砂砾地基防渗工程》三部专著及 80 余篇论文(其中四篇被评为省部级及学会优秀论文),主编《三峡工程施工研究》。这些工作得到了许多同行与读者的热心支持与鼓励。

我国地域辽阔,工程地质及水文地质条件复杂,又是一个滨海国家。在工程建设中经常遇到水下施工、淤泥中施工的结构设计与施工技术及地基处理方面的疑难问题。为起到抛砖引玉的作用,作者从已发表的论文中,选择有关上述内容的论文共计 39 篇,汇成本文集,兼以弥补已发表三部专著的不足。

水下施工受到水环境强烈影响;淤泥的低强度,流动性及触变性造成结构与构筑物施工困难;地基处理必须妥善解决土体、基础与上部结构三者之间的变形协调、应力传递关系。这些均要求设计者有一定理论基础和较丰富的工程经验。

随着我国改革开放和社会主义建设事业的发展,大力开发沿海、沿江城市,开发海洋,兴建水利、桥梁、码头,在水中及淤泥地基上建造工程的规模和数量都越来越大,遇到的工程难点也越来越多。如何妥善解决水环境及淤泥影响,处理好各种复杂情况下的地基,已成为迫在眉睫的研究课题。因此,本文集所涉及内容也是我国工程界普遍关心和亟待解决的关键技术问题。

为使叙述具有系统性,本文集没有按照论文发表的时间排序,而是按照下述四方面内容汇集有关论文,以有利于读者借鉴参考。

(1) 水下及淤泥中施工及地基处理原理研究。水下及淤泥中施工与地基处理技术的发展,往往先有工程实例,通过研究工程效果、试验结果,探讨设计及计算原理,提出经验或半经验半理论公式,再运用到工程中,不断完善设计、计算方法。

作者正是遵循这条道路,从工程实践经验出发,运用气液两相流、爆炸力学、土动力学原理、渗滤理论、流变理论、散体介质极限平衡理论、结构与介质相互作用理论,探讨水下及淤泥中施工及地基处理的设计计算原理。

通过对渗流流网性质分析,总结渗流流网的绘制方法及渗流要素计算方法;通过气液两相流的工程应用研究,探讨气泡帷幕用于水下爆破防震、防冰、防浪及水下清基原理;通过淤泥在重力及外部荷载作用下的流动与变形研究,提出挤淤理论,压载、卸荷、强夯、射水

置换、爆破及振动六种整式挤淤措施；通过土工网格及软土地基上的过渡层与上部结构及周围土体的界面效应研究，提出软土地基上的各种过渡层型式、土工网格在软土地基处理中的设计原理与结构型式。混凝土防渗墙（地下连续墙）造孔期槽壁稳定分析方法，也可用于其他抽槽及水下开挖形成的边坡稳定分析。该成果的论文被评为省部级优秀论文。

（2）水下施工结构与施工技术。海洋及其他水域面积占地球表面积 70% 以上。人们为了扩充生存空间，在水域中兴建了各种工程。在水利界运用水下施工技术建造水工建筑物具有悠久的历史。但近代水下施工技术的发展却是由海洋开发推进的，逐步发展成为近代三大技术工程之一。

水下施工的工作环境由空气转变为水体，使水下施工强烈受到水环境影响。水的密度比空气大得多、透光性又比空气差得多，缺乏氧气，水流引起的动水压力和冲击力等都给水下施工带来困难。因此，水下施工以及质量控制措施都必须克服水压、黑暗、缺氧及水侵蚀影响。人们尽管在水下施工结构与施工技术方面有了很大进展，但仍有许多课题期待我们开拓。

水下施工，要求设计及施工人员充分了解施工环境、地形、地质及气象条件；事先要有完善、详尽的施工计划、施工措施，复核水下施工结构在各种情况下的稳定及应力情况，制定可靠安全措施和质量检验制度。

该部分文集汇集了作者从事水下工程爆破、水下岩体处理、动水中立模、水下灌筑混凝土与沥青混凝土、流水中直接填筑与直接建造混凝土挡水建筑物的实践经验，包括常用工业炸药、起爆材料在水下工程爆破中的应用、水下定向爆破及水下径裂爆破、气泡帷幕防震设计与计算、新奥法处理水下倒悬岩体、水下灌筑沥青混凝土、流水中直接建造溢流式混凝土拱围堰、立堵截流施工及深水抛投填筑技术。《深水抛投法填筑研究》评为学会优秀论文。

作者在 70 年代初主持设计的乌江渡水电站上游混凝土拱围堰，采用水下爆破、水下清基、动水立模及灌筑水下混凝土技术，首先直接在流水中建成高 45m 的溢流式混凝土拱坝，为流水中直接建造混凝土挡水建筑物提供了成功经验。该成果获得全国科学大会奖、国家科技进步一等奖（组成部分）。葛洲坝大江截流成功，标志着我国立堵截流设计及施工技术处于世界先进水平，该项目获得了国家建委优秀设计金质奖。

（3）游泥中施工技术与淤泥工程。含水量大于液限、孔隙比大于 1.5 的流塑状淤泥，广泛存在于浅海区、内陆湖泊区、河流两岸及其他地势低洼区。淤泥是自然界含水量最大、强度最软弱、工程性质最差、由固液气有机质等四相物质组成的土体，因此也是物理、力学及化学性质最为复杂的土类。随着我国沿海、沿江地区经济的快速发展，未来几十年将是对淤泥工程性质研究及淤泥中兴建工程最活跃时期。

自然条件、人为破坏对淤泥工程性质影响很大，招致不同地区，即使同一地区，不同部位、深度，淤泥工程特性也往往有较大差异，至今难以找到普遍适用的准确设计数据和计算公式。因此，在淤泥中建造工程，必须进行详细勘探和调查，测定不同部位、不同深度的淤泥工程特性，充分研究各施工阶段建筑物稳定及应力状况，妥善考虑施工道路、施工平台的建造方法。为降低工程造价、确保施工安全，尽可能将结构设施与施工措施一并考虑。当需利用淤泥承载力时，采用的施工方法应避免或减少对淤泥的扰动和破坏。建造时，应采取信息化施工，加强监测，并根据监测结果，调整、改善施工方法、施工程序。

该部分文集着重介绍作者在深厚淤泥中采用大型施工机械进行快速施工的淤泥工程结构设计与施工经验。包括淤泥中开挖与填筑路堤方法，淤泥地基基坑开挖中的新型挡土支护方

目次

第一篇 水下及淤泥中施工与地基处理原理研究	(1)
渗流流网及其渗流要素计算	(1)
气液两相流的工程应用研究	(19)
淤泥在重力及外部荷载作用下的流动与变形研究	(27)
挤淤	(36)
压载挤淤研究	(42)
强夯挤淤的原理、方法及工程实践	(47)
软土地基上的过渡层	(55)
夯击法填筑	(61)
混凝土防渗墙（地下连续墙）造孔期槽壁稳定分析	(71)
土工网格的工程特性及其在地基处理中的界面效应研究	(84)
第二篇 水下施工结构与施工技术	(95)
常用工业炸药在水下工程爆破中的应用	(95)
常用起爆材料在水下工程爆破中的应用	(101)
水下定向爆破方法及计算	(105)
采用水下径裂爆破增加供水井出水量	(114)
气泡帷幕防震设计与计算	(117)
新奥法处理禹门口提水工程水下倒悬岩体	(122)
水下灌注沥青砂浆或沥青混凝土的方法和计算	(128)
在流水中直接建造溢流式混凝土拱围堰	(136)
从葛洲坝、万安水电工程的截流实践谈立堵截流施工中的几个问题	(145)
三峡大江深水截流工程的关键技术探讨	(159)
三峡二期围堰深水抛投风化砂施工期稳定分析及抛投技术	(166)
第三篇 淤泥中施工技术与淤泥工程	(175)
在淤泥中开挖与填筑路堤的方法	(175)
淤泥地基基坑开挖中的新型挡土支护方法	(183)
拦淤堤	(192)
在透水地基上采用淤泥铺盖防渗方法	(198)
深圳国际机场飞行区土面处理措施	(205)
在珠海机场应用高强度塑料网的结构设计	(215)
第四篇 淤泥、砂砾及岩石地基处理	(219)
挤淤置换地基	(219)
深圳机场拦淤堤封闭式换填地基设计与施工实况	(224)
深层搅拌桩复合地基的过渡层与过渡段	(229)
强夯消除粉细砂液化与强夯挤淤	(234)

珠海国际机场站坪复杂地基的综合处理措施..... (239)

三峡一期土石围堰深厚粉细砂地基的防护结构与施工措施..... (247)

板桩灌注墙及施工参数的计算..... (255)

万安水电站低水土石围堰钢板桩防渗帷幕设计与施工..... (264)

水下抛土铺盖防渗原理及其工程性质..... (271)

砾质土的防渗性能及其设计..... (282)

水下及饱和土爆炸法处理软土地基..... (292)

基岩保护层一次爆破机理及工程措施..... (298)

第一篇 水下及淤泥中施工与地基处理原理研究

渗流流网及其渗流要素计算

在地下水的平面渗流中，表示液体质点运动的轨迹称为流线，势能（或测压管水头）相等的曲线称为等势线。流线与等势线组成流网。

流网可以采用图解法、数学法或通过电拟试验求出。采用图解法绘制流网为流体力学的一种近似解法，由流网确定的渗流要素可以满足一般工程设计要求，避免繁杂数学推导过程，解决许多数学上难以解决的复杂地基的渗流问题。

一、流网性质

流网中的等势线实际上是等水头线，任意两条相邻等势线 Φ 之间的水头损失 Δh 应等于常数，各点渗流速度的向量与等势线正交。

流函数的意义可从研究 A 、 B 点（图 1）之间的流动得出。越过 ds 的流量为

$$dq = U_x dz - U_z dx$$

于是在 A 、 B 两点之间

$$\begin{aligned} q &= \int_A^B dq = \int_A^B (U_x dz - U_z dx) \\ &= \int_A^B \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} dz - \frac{\partial \psi}{\partial x} dx \right) \end{aligned} \tag{1}$$

故

$$q = \psi_B - \psi_A$$

因此，任意两流线之间的流量等于这两流线的流函数之差。

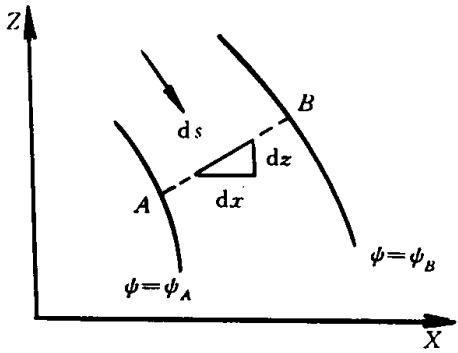


图 1 流函数意义

（一）流网的边界条件

绘制流网时，必须满足的重要进口、出口、土层交界面边界条件如图 2 所示。分述如下：

（1）不透水边界条件（图 3 中的 $A-E$ ）：是确定的边界条件。由于水流不能流过不透水边界面，所以不透水边界面的垂流速为 0。设 n 为不透水边界面的垂直方向， t 为切线方向，则

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \Phi}{\partial n} &= 0 \\ \frac{\partial \psi}{\partial t} &= 0 \\ \psi &= \text{constant} \end{aligned} \right\} \tag{2}$$

这表明不透水边界面是一条流线。

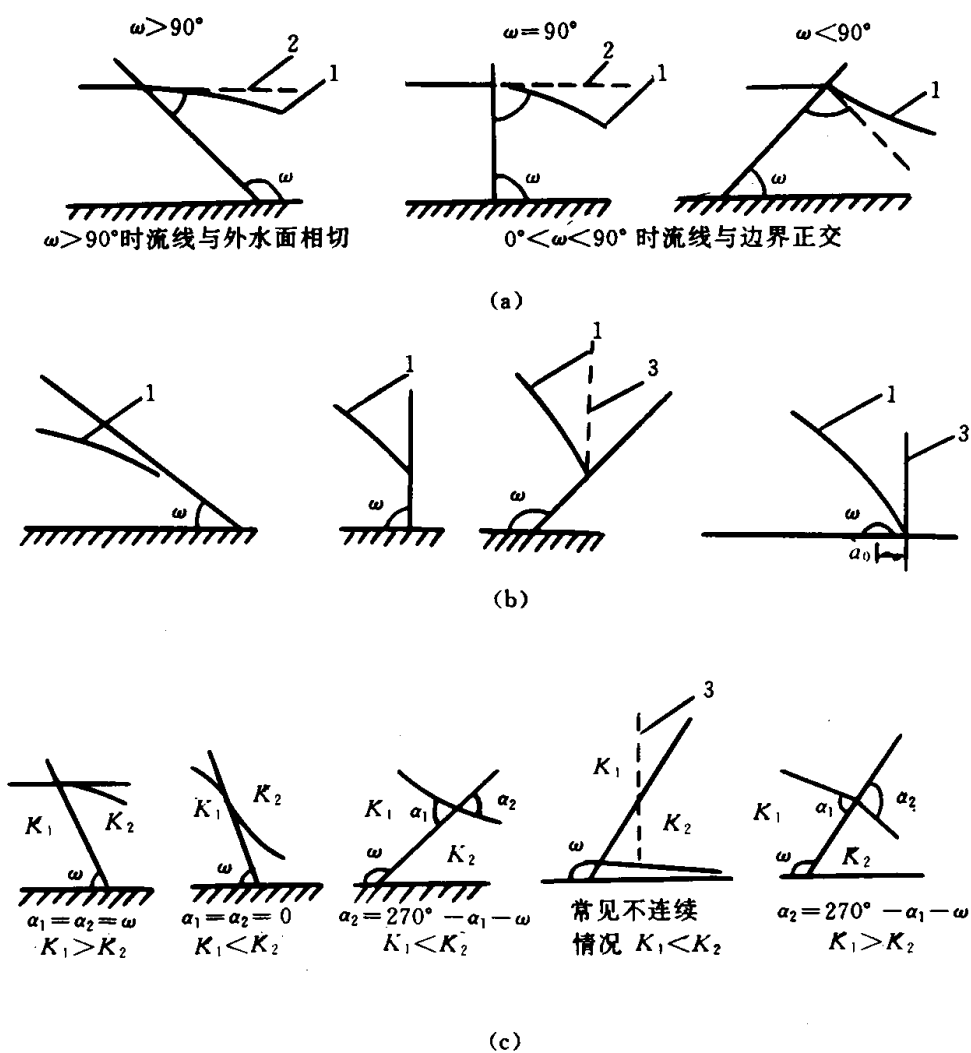


图 2 进出口和交界面的流线条件

(a) 流线经过入口的条件；(b) 流线经过出口的条件；

(c) 流线穿过不同透水层交界面的折射条件 ($\operatorname{tg} \alpha_2 / \operatorname{tg} \alpha_1 = K_1 / K_2$, ω 为交界面的倾角)

1——流线；2——水平线；3——铅垂线

(2) 浸水透水边界条件 (图 3 中的 A—B 及 D—E)：边界上的水压力按静水压力分布。

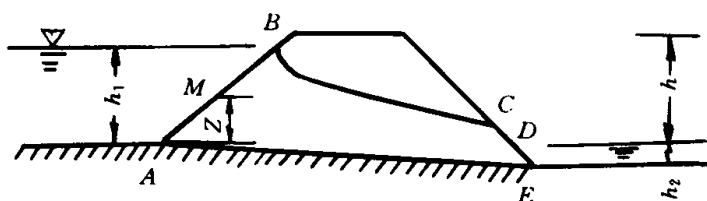


图 3 边界面

图 3 M 点的水压力 p 为

$$p = \gamma_w (h_1 - z)$$

动水势能为

$$\Phi = -Kh_1 = -K \left(\frac{p}{\gamma_w} + z \right) \quad (3)$$

K , h_1 为定值, 则 Φ 也为定值, 即

$$\Phi = \text{constant} = -Kh_1$$

因此, 浸水的透水面为一条等势线。

(3) 渗出面边界条件 (图 3 中的 C—D)：该边界面是渗水区域的水渗出到空气中的面。在该边界面的压力为大气压, 即 $P = 0$, 故:

$$\Phi + KZ = \text{constant}$$

在这面上的孔隙压力为 0, 则

$$\Delta\Phi = -K\Delta h = -K\Delta Z$$

$\Delta\Phi$ 是常值，表明各等势线交于渗出面处有相等的垂直间距。

(4) 浸润面(自由面,图 3 中的 B-C): 为不确定边界,是渗流最上部边界。在这个边界面上,作用着同等的大气压、孔隙压力为 0, 故

$$\Delta\Phi = -K\Delta Z$$

表明同渗出面一样,各等势线交于浸润线处有相同的垂直间距(图 4)

同时, $\psi = \text{常值}$, 表明浸润线是一条流线。

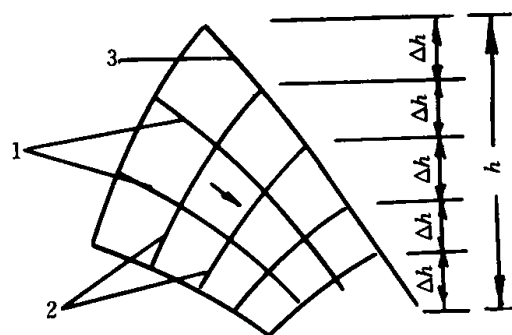


图 4 等势线与浸润线交点的关系

1——流线; 2——等势线; 3——浸润线

(二) 成层地基上的流网折射

对于稳定渗流,在具有不同透水性的两种土层交界面两边的任两流线之间的流量必定相等(图 5), 则

$$\Delta q = \frac{a}{a} K_1 \Delta h = \frac{d}{c} K_2 \Delta h$$

$$\text{故} \quad \frac{K_1}{K_2} = \frac{d}{c} \quad (4)$$

$$\text{同时} \quad AB = \frac{a}{\sin \alpha_1} = \frac{d}{\sin \alpha_2},$$

$$AC = \frac{a}{\cos \alpha_1} = \frac{c}{\cos \alpha_2}$$

$$\text{所以} \quad \frac{d}{c} = \frac{\tan \alpha_2}{\tan \alpha_1} \quad (5)$$

比较 (4)、(5) 式可知

$$\frac{\tan \alpha_2}{\tan \alpha_1} = \frac{K_1}{K_2} \quad (6)$$

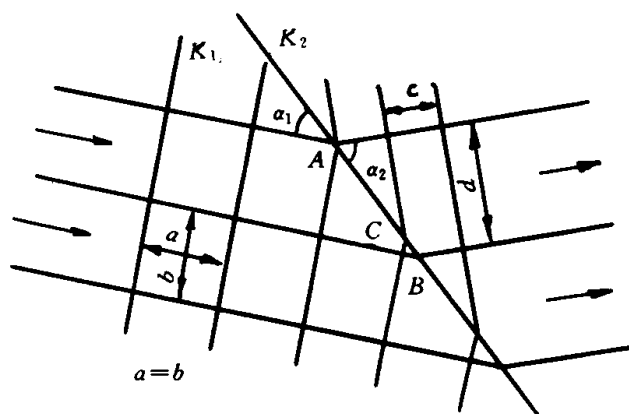


图 5 不同透水性土层边界上的流网折射

表明在具有不同透水性的两种土层边界上,流线会折射,而不能在边界的两边绘成一个流网的方格。通过同样大小的流量,在高透水层内只需较小的面积和较低的水力梯度。因此,当水流从低透水性土层流入高透水土层时,方形网格必须加长[图 6(a)];反之,方形网格必须缩短[图 6(b)]。伸长或缩短比值与两个土层的渗透系数成比例[(4)式]。

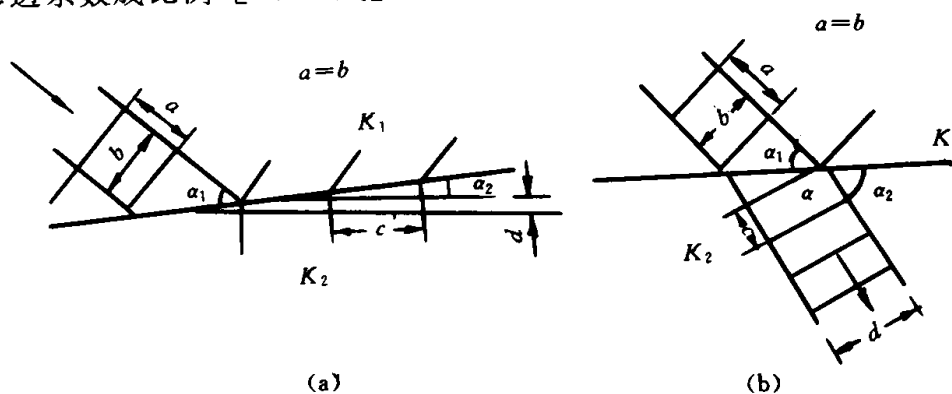


图 6 流网穿过两种不同透水性土层交界
(a) $K_1 < K_2$; (b) $K_1 > K_2$

(三) 各向异性土层中的流网特点

前述两向流拉普拉斯方程是建立在水平方向(X方向)与竖直方向(Z方向)的透水性相等基础上的。大多数天然沉积土以及填筑土不仅或多或少成层状,且沿水平层向的透水性比竖直向要大得多。根据达西定律,渗流速度与渗透系数成正比,可写成

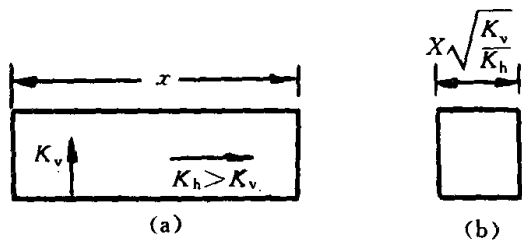
$$K_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + K_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \tag{7}$$

为了将上式变换成拉普拉斯方程,需变换坐标。令 $\bar{X} = \frac{X}{\sqrt{K_x}}$, $\bar{Z} = \frac{Z}{\sqrt{K_z}}$, 上式变为

$$\frac{\partial^2 h}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial \bar{z}^2} = 0 \tag{8}$$

(8) 式即为各向异性土层渗流拉普拉斯方程。表明,绘制这种情况的流网,只要将渗透系数较大方向的断面尺寸缩小即可。若竖直方向的渗透系数为 K_v , 水平方向为 K_h , 则水平方向长度应

乘以 $\sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$ (图 7)。如果水平方向的透水性大于竖直方向,则变换后断面为缩小水平方向的尺寸。



(四) 奇点附近的流线处理

图 7 调正比尺,以适应各向异性土层条件

地下轮廓突然转折地方的隅角,为比流量为 0

或为 ∞ 的奇点。比流量为 0 的奇点称为驻点 [图 8(a)、(d) 中的 A、D 点], 比流量为 ∞ 的奇点称为空穴点 [图 8(b)、(c) 中 B、C 点]。

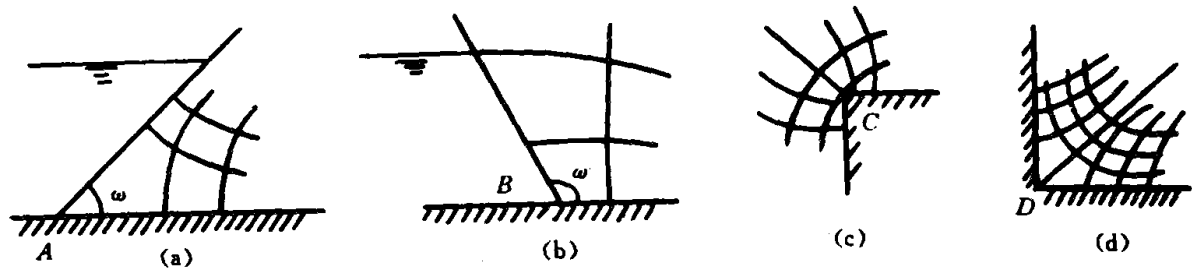


图 8 奇点

(a) $\omega < 90^\circ$, $q_A = 0$; (b) $\omega > 90^\circ$, $q_B = \infty$; (c) $\omega = 270^\circ$, $q_C = \infty$; (d) $\omega = 90^\circ$, $q_D = 0$

在奇点上,流线和等势线正交原则被破坏。流线通常不相交,而在奇点上,它们可以相交。因此,附近奇点的流线要作特殊处理:

隅角往往由边界流线组成,或由边界等势线与边界流线组成。由边界流线组成的隅角奇点附近的流网,具有等势线与边界流线相垂直的性质,且对称于隅角平分线。由边界流线和等势线组成的隅角奇点附近的流网等势线垂直于流线边界,而流线垂直于等势边界。比流量为 0 的奇点,流线远离隅角;比流量为无穷大的奇点,流线在隅角相对密集。

(五) 不同防渗措施的流网处理

砂砾地基的防渗措施可分为水平防渗与垂直防渗两大系统。垂直防渗措施又分为着底式

(完整式)、悬挂式两类。按防渗材料透水性又分为弱透水性材料（粘性土、灌浆帷幕、板桩灌注墙等）、相对不透水材料（钢板桩、木板桩、混凝土等）。

1. 水平防渗措施

铺盖的流网处理：当渗透系数小于地基渗透系数 $1/100$ 时，可按不透水铺盖绘制流网。将铺盖视为地下轮廓线 [图 9(c)]。当渗透系数大于地基渗透系数 $1/100$ 时，铺盖与地基视为透水性不同土层绘制流网。

2. 着底式垂直防渗措施

对于弱透水性材料，采用实际渗透系数和墙厚作为计算渗透系数及厚度。相对不透水材料的板桩根据锁口互锁后可能形成的最大缝隙面积与阻水面积之比 n ，按下式计算折算渗透系数作为计算渗透系数：

$$K_d = n \cdot K \tag{9}$$

式中： K_d ——折算渗透系数； K ——地基土的渗透系数。

计算厚度为锁口的啮合长度，然后按不同透水性土层处理方法绘制流网。

3. 悬挂式垂直防渗措施

悬挂式的防渗效果比着底式差得多。主要研究绕底渗流情况及其渗透量、渗透稳定情况，因此，可视为防渗体本身不透水，按地下防渗轮廓线处理。悬挂帷幕底部为由边界流线组成的奇点，产生流线集中现象 [图 9 的(a)、(b)、(d)]。

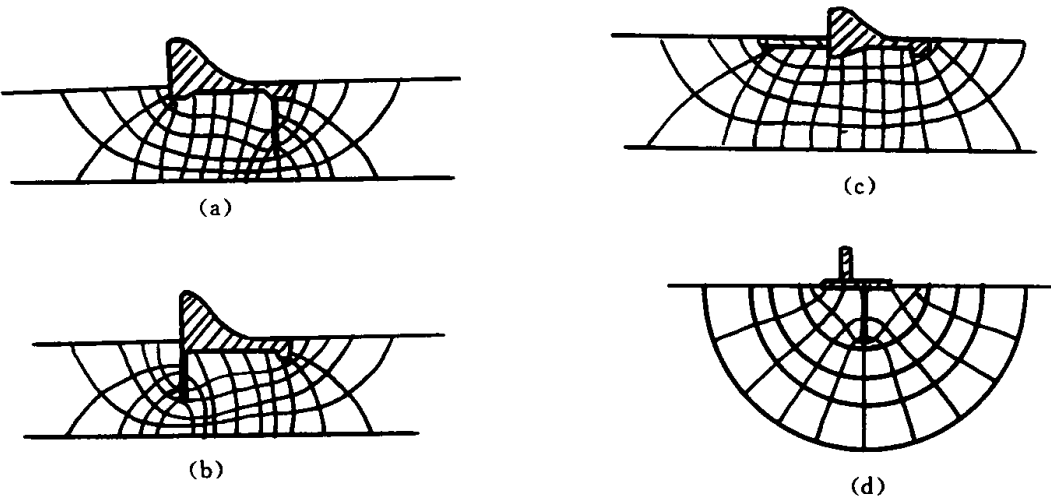


图 9 不同防渗措施的流网

二、流网绘制方法

绘制的流网应满足以下基本要求：

- (1) 等势线与流线正交；
- (2) 流网应是连续的、由曲线矩形或曲线正方形组成；
- (3) 流槽数在整个流网中应保持相等；
- (4) 流线和等势线形状应满足渗流边界条件。

为满足工程设计精度要求，流槽数不应小于 3。当地基透水层很深时，不必将流网一直绘

到不透水层表面。最后一条流线可认为是半圆，圆心在地下轮廓线中心，半径等于地下轮廓水平投影长度的 2.0~2.5 倍。当有板桩或帷幕时，则取建筑物最大地下垂直尺寸的 3~5 倍为半径。

绘制流网时，宜将所要研究的横断面绘制在透明纸上，然后将流网绘制在纸的反面，经修改后，再将流网描绘在正面上。尽可能采用正方形网格。针对不同情况采用显试探法、内切圆法、对角线正交法、等梯度法绘制和校核流网。所画线条不宜过多或过少。当需详细了解流网某一部分特征时，可以将该部分流网局部加密。在绘制前，应先确定重要的边界条件和流网中须画的线条数，尽可能根据已知边界条件确定一些流线和等势线。画细部时，不要过分注意总的形状，必须在流网大致形状符合基本原理和规则后，再修改和过细描绘局部。

现将不同情况的流网绘制方法分别介绍如下。

(一) 均一渗透系数流网绘制

1. 无自由水面情况

这种情况下的流网图形状只与渗流区的边界条件有关，与上、下游水位及渗透系数大小无关。

绘制时，首先找出流网中已知流线和等势线，按边界流线形状大致绘出中间的 3~4 条流线和相应的等势线，然后再严格地根据流线与等势线都是光滑曲线，且彼此相互正交原则，用两条对角线的长度相等又正交或绘制内切圆方法反复修正。修正时，要照顾到整体，除在某些紧靠地下轮廓线为折线的网格，以及最靠底部的一条流带的格子（图 10 的流线 4' 与 5' 之间的格子）可能出现 $a > b$ 的曲线矩形外，其他网格都要符合要求。在地下轮廓突然转折的地方，不可避免地要出现三角形或多角形等不规则的网格形状，但对整个流网精度影响不大。

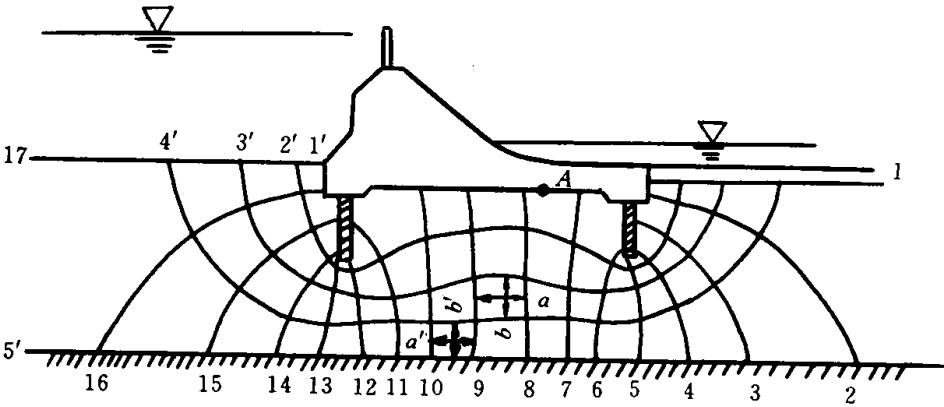


图 10 均一渗透系数地基流网

比如，对图 11 所示渗透图形，首先大致画出紧靠建筑物地下轮廓线的第一条流线 1—1' 并把它和建筑物轮廓线间所形成的流带分成若干个正交的曲线正方形网格（图中为 9 个）。量度每个方格对边中线长度是否相等（或在网格内画内切圆来检验是否为正方形）以检验流线与等势线的正交性和各个网格长宽比的不变性。

试绘出第一条流线后，将绘好的各曲线方格的等势线向下延长，给出第二排曲线正方形。

如果得出的第二条流线 2—2' 不连续,就需对第一条流线进行修正(如图中虚线所示),直到第二条流线达到连续为止。这样顺序下去,直到下面不透水层。

最后一排网格可能不正好是曲线正方形网格,而呈曲线长方形。这时,只要检验这一排每个网格的长宽比是否相等,而不要求与以上各排有相同的长宽比值。

初学者绘制流网中一些常见错误见图 12。

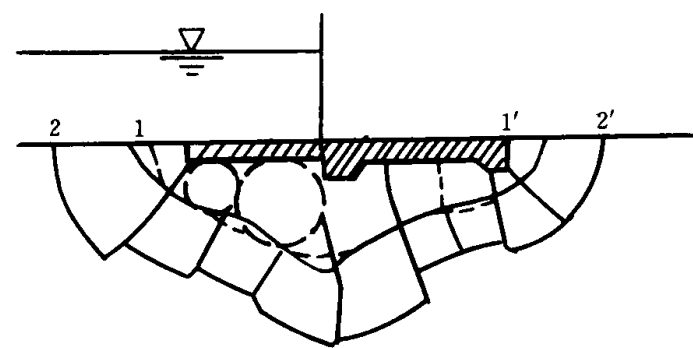


图 11 流网绘制方法

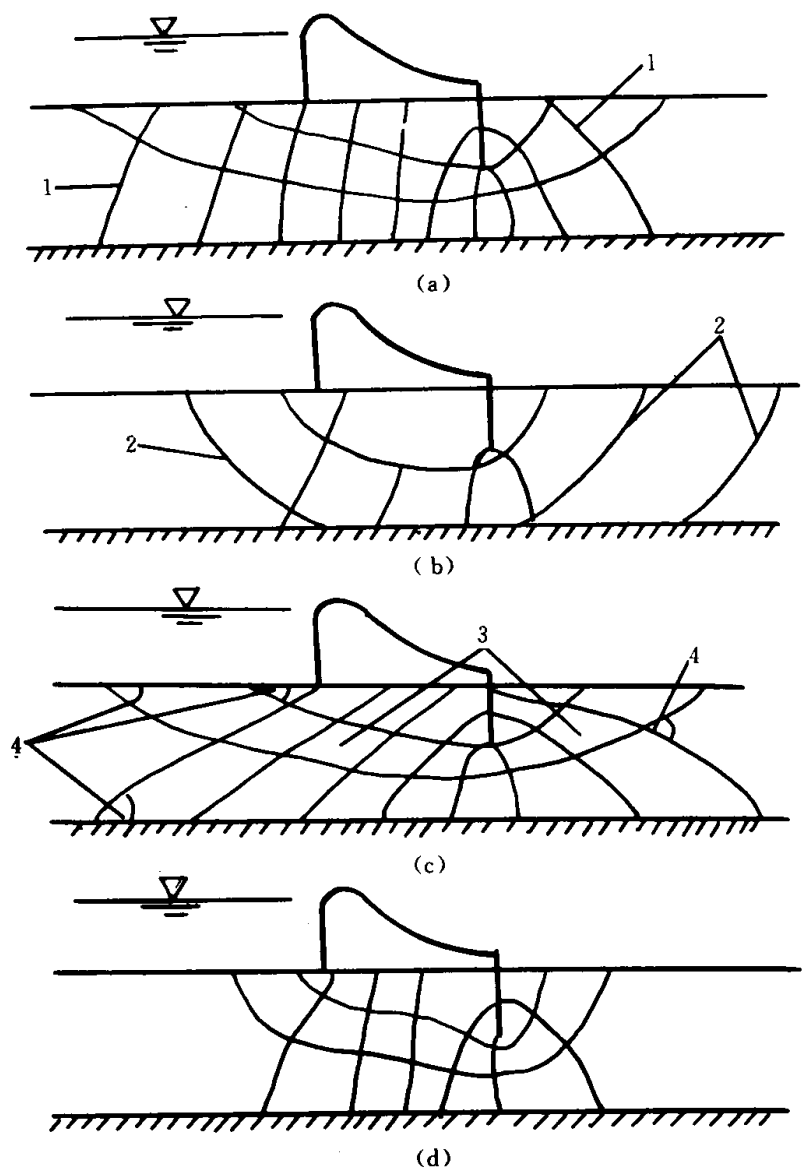


图 12 初学者绘制流网常见错误

(a) 不必要的等势线; (b) 逐渐消失的流线; (c) 许多菱形和其他非正方形; (d) 正确流网
1——不必要的等势线; 2——逐渐消失的流线; 3——非正方形; 4——不成 90°

2. 有自由面的土坝无压渗流

须先假定浸润线的位置。沿浸润线分成若干等水头差的间隔，并顺着边界形状画等势线与下一条流线组成曲线正方形网格（图 13）。在修正网格的同时，根据所有等势线必须与自由水面（浸润线）在相等的竖直距离处相交（图 4）的原则，修改浸润线的位置，并且检验浸润线与等势线的交点是否满足等水头差的条件。

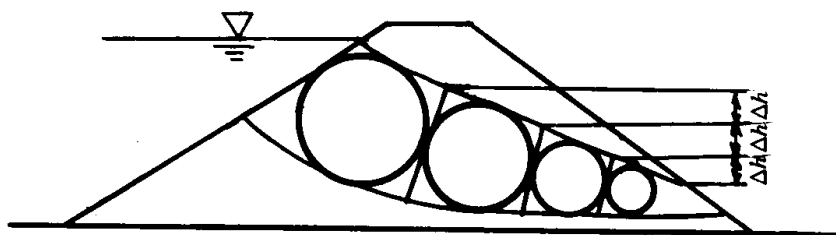


图 13 有自由面的土坝无压渗流网绘制方法

(二) 复杂地基流网绘制

1. 各向异性土

绘制这种情况下的流网，应将渗透系数较大方向断面尺寸缩小，即水平方向长度乘以 $\sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$ [图 7(b)]。对变换后断面，按前述均一渗透系数地基方法绘制流网。然后将所作的流网转画到按原来比尺所画的断面上，即将流网图的水平尺寸除以 $\sqrt{\frac{K_v}{K_h}}$ ，便得到原剖面尺寸各向异性土的流网图（图 14）。这时，流网就不是由正方形网格组成，而是由长方形网格组成。沿透水性大的方向为加长了的长度。

上述作图方法也可推广到沿任意相互垂直两方向渗透系数不相同，分别为最大值 $K_{\max}$ 、最小值 $K_{\min}$ 情况。只须将上述的水平方向和垂直方向分别以渗透系数最大值、最小值方向代替、 K_v 与 K_h 值分别以 $K_{\max}$ 、 $K_{\min}$ 代替。

2. 具有一种以上渗透系数的复杂断面

由于各层土的渗透系数不同，流线在不同土料交界面处发生转折。转折时流线与交界面的夹角应满足 (6) 式所示关系，两层流网网格边长应满足 (4) 式所示关系。

同一土层内的流网绘制方法与均一渗透系数断面流网绘制方法相同。对不同土料交界面，

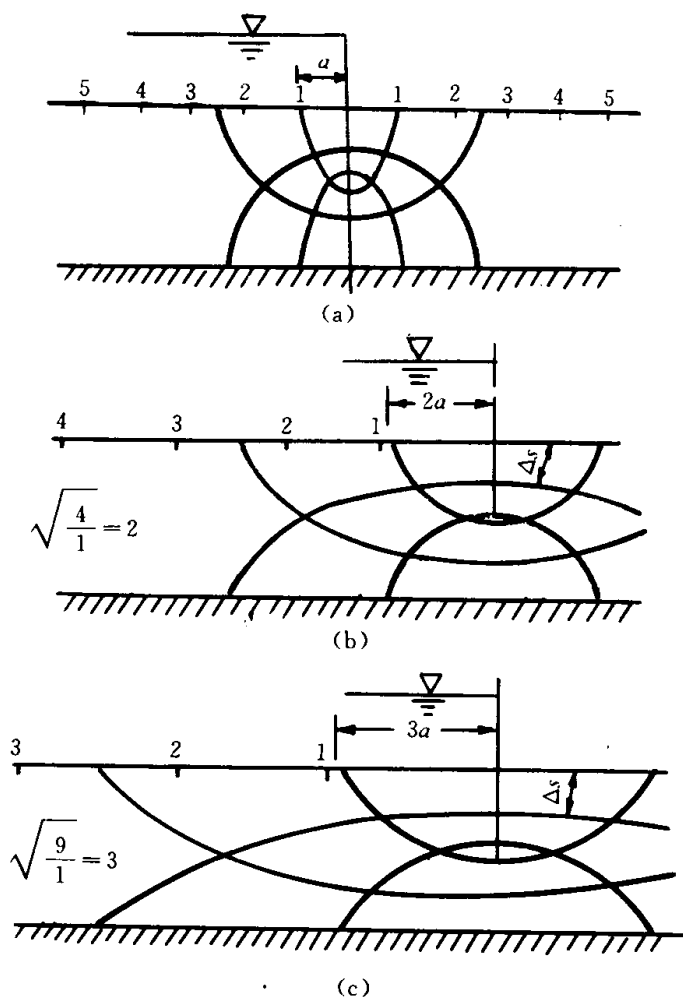


图 14 各向异性土流网绘制

(a) $K_h = K_v$ 断面；(b) 对断面 a 的流网经 $K_h = 4K_v$ 变换后的断面；(c) 对断面 a 的流网经 $K_h = 9K_v$ 变换后的断面

可先作对渗透稳定分析最主要的那一区土料流网。绘制另一区流网时，除了转折角 α 和曲线矩形的边长要符合(4)式和(6)式所示关系、曲线矩形的对角线非正交外，其余作法与一般流网相同(图15)。

图16所示混凝土坝下的砂砾地基中， HI 线以上土层的渗透系数为其下层土的五倍。绘制流网时，首先将已知的边界条件和流线、等势线的起始方向绘出[图16(a)]。最上一条流线为 $BCDEF$ ，最长的流线为 JL 线。由于 HI 线以上土层的渗透系数是下层土的五倍，流线会在 HI 线上发生偏斜。

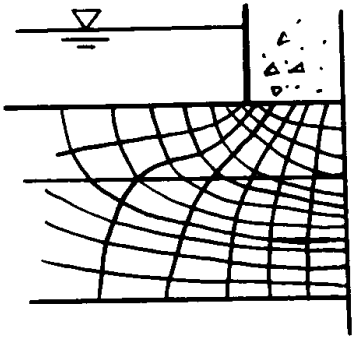


图15 具有两层不同土区的地基流网

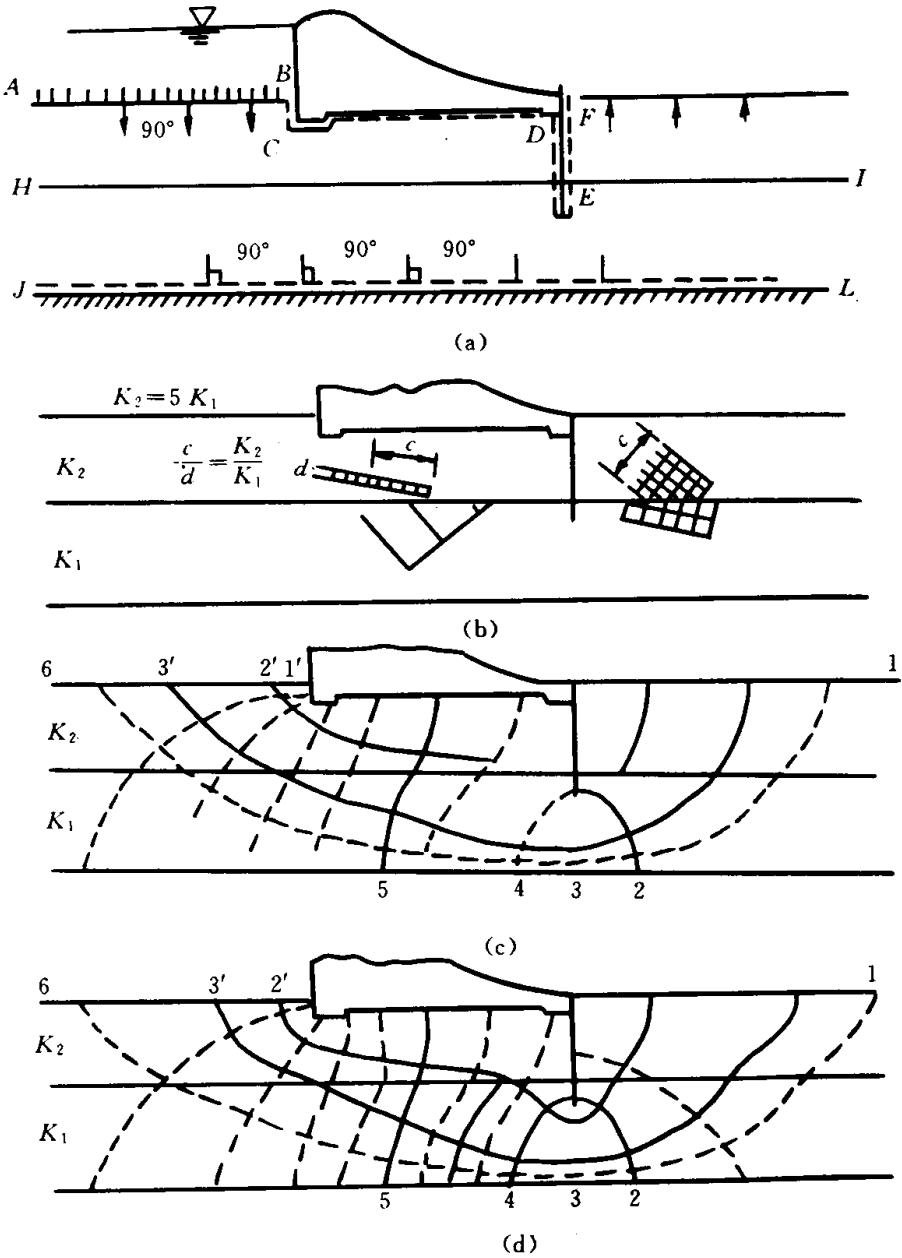


图16 复杂断面地基流网绘制

- (a) 标出已知条件；
- (b) 标出两层地基间的变换条件；
- (c) 第一次试绘流网；
- (d) 擦去和重画线条直至获得合理精确的流网