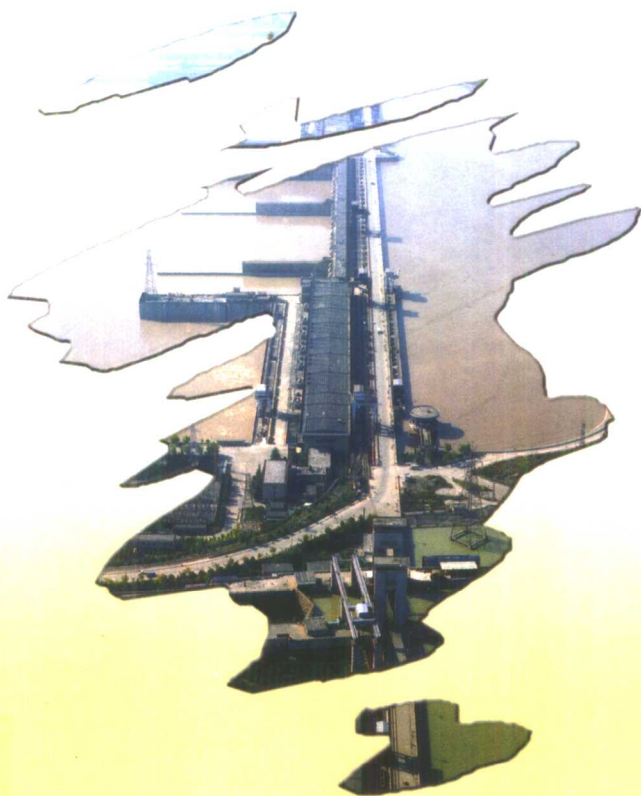


闸坝渗流管涌控制 与农田排水设计

沙金煊 著



闸坝渗流管涌控制 与农田排水设计

沙金煊 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是作者长期研究渗流的部分成果,书中涉及闸坝、堤防、水库的渗流控制及计算、设计等方面内容,如渗流扬压力、渗流出逸坡降、管涌流土的临界坡降与防治技术、堤坝下游减压沟井、堤坝不稳定渗流、各向异性渗流及非线性渗流等,基本上涵盖了水工建筑物渗流的各个领域。此外本书还对农田排水沟的计算及设计提出了系统的计算方法,包括各种补给条件(蒸发或降雨及承压水)下的明沟、暗管排水计算。

本书可供从事工程设计、科研、教学及工程管理等方面的专家、教授、工程师们参考。

图书在版编目(CIP)数据

闸坝渗流管涌控制与农田排水设计/沙金焯著. —北京:中国水利水电出版社, 2003

ISBN 7-5084-1689-9

I. 闸… II. 沙… III. ①水工建筑物渗流-渗流控制 ②水工建筑物-管涌-处理 ③农田水利-排水-设计 IV. ①TV223.4 ②S276

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 080015 号

书 名	闸坝渗流管涌控制与农田排水设计
作 者	沙金焯 著
出版 发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市地矿印刷厂
规 格	850mm×1168mm 32 开本 7 印张 185 千字
版 次	2003 年 10 月第 1 版 2003 年 10 月第 1 次印刷
印 数	0001—1000 册
定 价	18.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

作者简介



沙金煊 (Sha Jinxuan), 江苏省吴江市人, 1954 年考入武汉大学水利系, 1958 年毕业于河海大学, 同年进入水利部南京水利科学研究院, 1987 年任高级工程师, 1990 年任教授级高级工程师, 1992 年起享受国务院特殊津贴。

在各学术组织中, 历任水利部第二届科学基金会委员, 中国水利学会农田水利专业委员会委员, 江苏水利学会农田水利专业委员会副主任, 国际灌溉排水委员会 (ICID) 排水组教授 (1990~1996), 江苏农学院水利系兼职教授 (1989~1991), 水利部南京水利科学院第五届学术委员会委员、第一届技术委员会委员, 《水利水运科学研究》学报编委等职。长期从事渗流及地下水运动理论研究, 曾多次担任渗流及管涌方面重点项目负责人, 在国内外公开刊物上发表论文 60 多篇, 先后在瑞典、意大利、日本等国举办的国际学术会议上发表及宣读论文, 并应邀与德国、匈牙利及罗马尼亚等国进行国际科技合作交流, 其研究成果曾先后获得国家科技进步三等奖及水利部科技进步二等奖、三等奖, 国家农委科技推广奖, 中国水利学会优秀论文奖 10 余次。1983 年出版专著《农田地下水排水计算》; 1990 年参加编著《渗流计算分析与控制》。1989 年在日本东京召开的第七届亚非地区灌溉排水大会第四次全体会议上被推选为主席团专家 (penelist)。

2ACB/01

前言

水工建筑物的渗透破坏问题，主要表现在两个方面：一是在水库水位或江河水位下降过程中，堤坝迎水坡内的渗透力将驱使坡体失去稳定而形成大面积滑坡；二是当汛期高水位持续期间，堤坝背水坡侧地面，由于渗流出逸而产生管涌或流土。上述两种渗透破坏造成的后果都是非常严重的。特别是后一种，其危害之大，涉及千百万人民的生命财产安全。本书作者长期从事渗流研究，在渗流控制方面曾提出过一些设计计算方法，今将其中主要部分收入本书，以供科研、设计、教学人员参考。

对滑坡问题，本书提供了两种坝型的浸润线下降计算方法：一种是最常见的江河大堤及均质土坝的浸润线下降计算，这是作者根据浸润线在下降中会出现峰点（分水岭）而提出的计算方法；另一种是心墙坝迎水坡砂壳内浸润线下降分析。作者针对过去

只能求解垂直心墙这一不足，提出了结合实际的一定边坡的心墙坝型来求解。这些方法可供滑坡计算参考。

对混凝土闸坝地基的渗流出逸坡降计算，过去只有浅基的解答，而对于较深地基的渗流出逸坡降计算，涉及甚少。为此本书作了补充，并较系统地提出了各种闸型的计算方法。

对混凝土闸坝地下轮廓的渗流扬压力计算方法，本书在前人的基础上提出了两种新的计算方法，其中的直线展开法是对柯斯拉的独立变数法的一种改进，计算比较方便，根据此法，还论证了古老的布莱—莱茵方法的不足之处。

管涌、流土是最为人们关心的问题。作者在 20 世纪 70 年代，对它们的分类、判别及土的临界坡降计算方法，提出了一套计算公式，这些成果现已列入有关的设计手册中。这次再将非线性管涌的临界流速计算列入书中，这是因为高土石坝都建在高山峡谷砂卵石地基上，属紊流管涌范畴，一般常用的管涌临界坡降公式已不再适用了。20 世纪 70 年代末作者根据非线性渗流求得了紊流管涌的临界流速公式，并从理论上证明该流速可还原为泥沙力学中的颗粒沉速。

对不完整单井、减压井群、排渗减压沟等的渗流计算方法，在学习前人的基础上，作者提出了一个新的附加阻力概念，以此来计算渗流量。作者首先将此概念用在不完整承压单井及潜水电单井的理论推导中，该法不仅大大简化了复杂的数学推演，而且又提高了精确度。同样情况，作者引

用这一概念还分别求解了减压沟井的渗流计算。

农田排水理论是渗流力学中的一个分支。过去对农田排水明沟暗管的设计布局计算均是按稳定渗流运动来考虑的，而事实恰好相反，任何情况下的农田地下水排水，从来都是不稳定渗流运动，除非是当降雨或灌溉入渗的补给水量恰好与明沟排水量相等时，才能保持稳定状态，但是这种平衡则是瞬间的。此外在农田地下水排水计算中，还必须结合蒸发、蒸腾、降雨或灌溉入渗，才能符合天然状态。在这一科研领域中，我国学者走在了世界前列，1963年中国工程院院士、武汉大学水利系教授张蔚榛，在国内外首先提出了在变量蒸发补给下的排水计算方法。随后不久，1964年本书作者在学习该文的基础上，将这一问题作了补充深入，把一元流动扩展到二元流动，对排水理论有了提高，提出了在多重补给条件下地下水排水的二元不稳定运动，及河沟水位变化的排水计算，“文革”后这些论文于20世纪70年代末、80年代初才陆续刊登在中科院力学学报及水利学报上。据此二元不稳定运动理论，作者还推求出了农田排水布局设计中的二元流动与一元流动的界限，这个界限可以给农田排水系统布局的设计带来较大的经济效益。

限于作者水平，书中难免有不少谬误之处，竭诚欢迎读者们的赐教指正为幸。本书由水利部南京水利科学研究院出版基金会资助出版，谨此表示感谢。

作 者

2003年6月

目 录

前言

用展开法解闸坝地基有压渗流	1
计算渗流扬压力的新方法	
——直线展开法	15
水闸地基下游渗流出逸坡降近似	
计算	29
堤坝背水侧渗流出逸坡降计算	47
土的渗透变形及临界坡降计算	52
多孔介质中的管涌研究	66
不完整井渗流的近似计算	74
堤坝下游减压井的渗流近似计算	90
堤坝不稳定渗流计算	96
心墙坝壳中自由水面变化的分析	105
各向异性土渗流的转化问题	117
江河大堤背侧管涌预警	133
压盖层设计方法论证	143
防治堤防管涌及流土的排渗减压沟	
设计	154
多重补给下的地下水二元不稳定	
流动	165
农田地下排水系统的近似计算	183
江河水位变化对地下水上升的影响	195
非线性渗流问题	208

用展开法解闸坝地基有压渗流

闸坝透水地基有压渗流计算方法,分为有限深及无限深地基两种,前者适用于地基深度 $T < 0.5l_0$, 后者适用于 $T \geq 0.5l_0$, 这里 T 代表地面至不透水层面之距离, l_0 代表地下轮廓线的水平投影长度。

对于有限深地基的计算方法,常见的有 H.H. 巴甫洛夫斯基的分段法, C.H. 努米罗夫的渐近线法, P.P. 丘加也夫的阻力系数法。南京水利科学研究所毛昶熙、周保中在总结上述各法的基础上,特别是对丘加也夫的阻力系数法作了研究,提出了阻力系数改进法^[1], 克服了丘加也夫方法不能求出板桩尖水头的缺点,其精确度也较该法为好。

对于无限深地基或较深厚覆盖层地基的计算方法,目前仍采用柯斯拉的独立变数法^[2], 1964 年 B.C. 布鲁辛提出了图解法^[3], 但某些特殊点的误差较大。

本文根据 H.T. 麦列申科的展开法原理^[4], 对无限深地基或较深厚地基的有压渗流, 提出求解渗流扬压力的计算方法, 方法的要点是将渗流域 (z 平面) 上带有不透水板桩 (或防渗墙、窄齿墙等, 下同) 的地下轮廓, 通过保角变换, 转化为不带板桩的下半平面 (ζ 平面), 然后根据巴甫洛夫斯基的平底板水头分布的理论解, 求出轮廓上各点的水头值。本方法不需备有专门的图表, 也不必进行各种修正计算, 较其他方法简易, 切于实用, 经用试验资料验证, 能得到令人满意的结果。

一、基本原理与计算方法

由复变函数可知, 下列许瓦兹—克利斯多菲积分

$$z = A \int_0^{\zeta} (\zeta - b_1)^{\alpha_1-1} (\zeta - b_2)^{\alpha_2-1} \cdots (\zeta - b_n)^{\alpha_n-1} d\zeta + B$$

可将半平面 ζ 变换为具有多边形的 z 平面。若在 z 平面中有任意点, 例如 b_n 位于无穷远处, 则上式积分号内就不出现其相应项, 故有

$$z = A \int_0^{\zeta} (\zeta - b_1)^{\alpha_1-1} (\zeta - b_2)^{\alpha_2-1} \cdots (\zeta - b_{n-1})^{\alpha_{n-1}-1} d\zeta + B \quad (1)$$

令设有多边形 $\infty-2-3-4-\infty$ 的 z 平面 [图 1 (a)], 它有三个顶角分别为 $\angle 2 = \frac{\pi}{2}$, $\angle 3 = 2\pi$, $\angle 4 = \frac{\pi}{2}$ 。另外尚有一些顶角位于无穷远处。由此可得 $\alpha_2 = 1/2$, $\alpha_3 = 2$, $\alpha_4 = 1/2$ 。而在 ζ 平面内, 可选择实轴 ξ 上点 2 及点 4 离原点之距为 s [图 1 (b)], 且有 $b_2 = -s$, $b_3 = 0$, $b_4 = s$ 。现将各 α 值及各 b 值代入式 (1) 得

$$z = A \int_0^{\zeta} \frac{\zeta d\zeta}{\sqrt{\zeta^2 - s^2}} + B$$

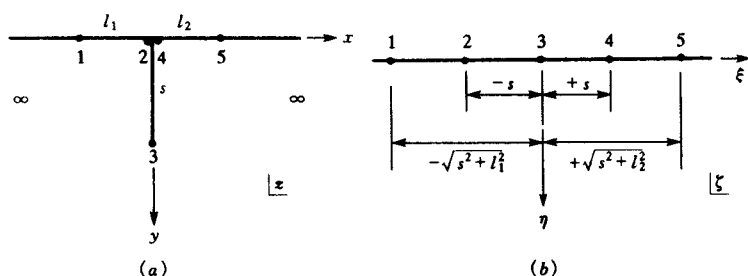


图 1

积分上式得

$$z = A \sqrt{\zeta^2 - s^2} + B$$

在点 4, $z = 0$, $\zeta = s$, 代入上式得到 $B = 0$; 在点 3, $z = is$, $\zeta = 0$, 代入上式, 得到 $A = 1$ 。因而上式化为^{[3][5]}

$$z = \sqrt{\zeta^2 - s^2}$$

或

$$\zeta = \sqrt{s^2 + z^2} \quad (1')$$

式 (1') 可将 z 平面上的渗流域保角变换到下半平面 ζ 中去; 反之亦然。

今将式 (1') 的实部和虚部分开则得

$$\left. \begin{aligned} \xi &= \pm \sqrt{\sqrt{\frac{1}{4}(s^2 + x^2 - y^2)^2 + x^2 y^2} + \frac{1}{2}(s^2 + x^2 - y^2)} \\ \eta &= \sqrt{\sqrt{\frac{1}{4}(s^2 + x^2 - y^2)^2 + x^2 y^2} - \frac{1}{2}(s^2 + x^2 - y^2)} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: 正号表示 $X > 0$ 点的映射; 负号表示 $X < 0$ 点的映射。若当 z 平面上坐标点位于横轴上, 则 $y=0$, 于是可得

$$\left. \begin{aligned} \xi &= \pm \sqrt{s^2 + x^2} \\ \eta &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

若当 z 平面上坐标点位于纵轴上, 则 $x=0$, 于是可得

$$\left. \begin{aligned} \xi &= \pm \sqrt{s^2 - y^2} \\ \eta &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

对于具有两道板桩以上的 z 平面渗流域, 同样可应用上述各式进行变换 [图 2 (a)], 先展开上板桩 DGP , 将其变换为只带有受了展开影响的下板桩 QRU 的 ζ 平面 [图 2 (b)]。

由图 2 (a) 变换到图 2 (b) 的具体计算如下, 在图 2 (a) 上以底板作为横坐标轴, 以被展开的上板桩 DGP 作为纵坐标轴, 按式 (2)、式 (3)、式 (4) 展开上板桩, 即可得到下列对应关系:

$$\begin{array}{ll} z \text{ 平面 [图 2(a)]} & \zeta \text{ 平面 [图 2(b)]} \\ D \begin{cases} x_D = 0 \\ y_D = 0 \end{cases} & D \begin{cases} \xi_D = -\sqrt{s_1^2 + 0^2} = -s_1 \\ \eta_D = \sqrt{\frac{1}{2}(s_1^2 - s_1^2)} = 0 \end{cases} \\ G \begin{cases} x_G = 0 \\ y_G = 0 \end{cases} & G \begin{cases} \xi_G = \sqrt{s_1^2 - s_1^2} = 0 \\ \eta_G = 0 \end{cases} \end{array}$$

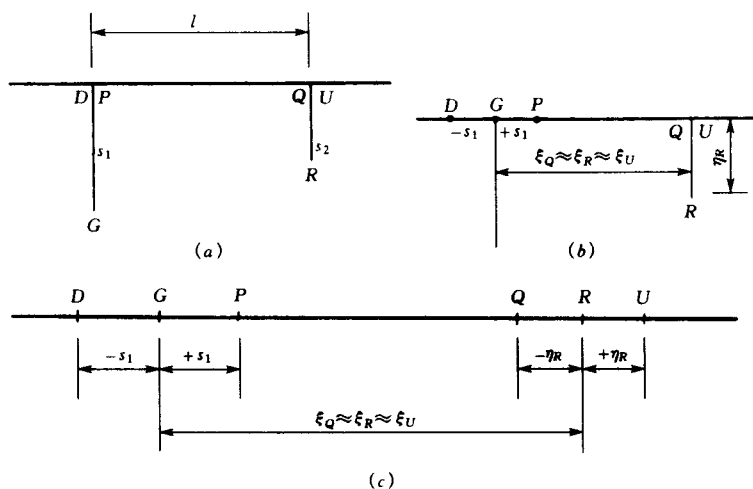


图 2

$$\begin{aligned}
 P \begin{cases} x_P = 0 \\ y_P = 0 \end{cases} & \quad P \begin{cases} \xi_P = +\sqrt{s_1^2 + 0^2} = +s_1 \\ \eta_P = \sqrt{\frac{1}{2}(s_1^2 - s_1^2)} = 0 \end{cases} \\
 Q \begin{cases} x_Q = l \\ y_Q = 0 \end{cases} & \quad Q \begin{cases} \xi_Q = +\sqrt{s_1^2 + l^2} \\ \eta_Q = \sqrt{\frac{1}{2}(s_1^2 + l^2) - \frac{1}{2}(s_1^2 + l^2)} = 0 \end{cases} \\
 R \begin{cases} x_R = l \\ y_R = s_2 \end{cases} & \quad R \begin{cases} \xi_R = +\sqrt{\sqrt{\frac{1}{4}(s_1^2 + l^2 - s_2^2)^2 + l^2 s_2^2} + \frac{1}{2}(s_1^2 + l^2 - s_2^2)} \\ \eta_R = \sqrt{\sqrt{\frac{1}{4}(s_1^2 + l^2 - s_2^2)^2 + l^2 s_2^2} - \frac{1}{2}(s_1^2 + l^2 - s_2^2)} \end{cases} \\
 U \begin{cases} x_U = l \\ y_U = 0 \end{cases} & \quad U \begin{cases} \xi_U = +\sqrt{s_1^2 + l^2} \\ \eta_U = \sqrt{\frac{1}{2}(s_1^2 + l^2) - \frac{1}{2}(s_1^2 + l^2)} = 0 \end{cases}
 \end{aligned}$$

一般情况下, 特别当 $l \geq (s_1 + s_2)$ 时, 在 ξ 平面内 $\xi_Q \approx \xi_R$

$\approx \xi_U$ 。应该指出,当展开上板桩时,下板桩受到影响,此时图 2 (b) 上的下板桩不仅发生位移,而且发生变形,成为曲线板桩^[4]。但因板桩变形极微,故可视为直板桩(其长度为 η_R) 计算。

再将图 2 (b) 上的下板桩展开,得到图 2 (c) 的不带板桩的平底板。具体变换如下,将图 2 (b) 作为 z 平面,而将图 2 (c) 作为 ζ 平面,在图 2 (b) 上以下板桩为纵轴并展开之:

z 平面 [图 2 (b)]

ζ 平面 [图 2 (c)]

$$\begin{aligned} Q & \begin{cases} x_Q = 0 \\ y_Q = 0 \end{cases} & Q & \begin{cases} \xi_Q = -\sqrt{\eta_R^2 + 0^2} = -\eta_R \\ \eta_Q = \sqrt{\frac{1}{2}(\eta_R^2 - \eta_R^2)} = 0 \end{cases} \\ R & \begin{cases} x_R = 0 \\ y_R = \eta_R \end{cases} & R & \begin{cases} \xi_R = \sqrt{\eta_R^2 - \eta_R^2} = 0 \\ \eta_R = 0 \end{cases} \\ U & \begin{cases} x_U = 0 \\ y_U = 0 \end{cases} & U & \begin{cases} \xi_U = +\sqrt{\eta_R^2 + 0^2} = \eta_R \\ \eta_U = \sqrt{\frac{1}{2}(\eta_U^2 - \eta_U^2)} = 0 \end{cases} \end{aligned}$$

在展开下板桩时,同前面一样,也会对原来已被展开过的上板桩 D 、 G 、 P 三点产生影响,由于影响较第一次小,可忽略不计。

对于具有两道以上的多板桩底板,仍可应用上法逐道展开而消去。但在展开时,应以板桩长短为序先后展开之。例如带有上、中、下三道板桩的地下轮廓,若中板桩较长,则可将中板桩作为纵轴,底板作横轴,先展开中板桩,然后再分别展开上、下两道板桩。在消去各道板桩变换为一假想平底板后,就可应用式 (5)^[4] 求出各点之水头比值 h/H

$$\frac{h}{H} = \frac{1}{\pi} \arccos \frac{2x}{l} \quad (5)$$

式中 h ——展开后底板上任意点之水头与下游水头之差;

H ——上下游水头差;

x ——任意点离底板中点之距,左端为负,右端为正;

l ——展开后的底板长度。

按式 (5) 求出之水头比值 h/H , 即为 z 平面渗流域上各对应点之值。当采用各点之水头绝对值 h 后并连接之, 即得作用于地下轮廓上渗流压力图, 若再在各点加上相当于下游水深的数值后, 即得渗流扬压力图。

若底板或铺盖并非平卧于地面而嵌入地面下某一厚度 d 时, 则必须消去此嵌入段。布鲁辛提出近似方法^[3], 他将 d 转向 90° , 然后乘上一个系数 $\beta = 0.64$ 。本文将其修改为先乘上 $\beta = 0.64$, 然后转向 90° , 使位于底板或铺盖之延长线上。

顺便指出, 在消去了板桩及底板嵌入段后, 此时变为一平卧于地面的假想平底板。其长度 l 就相当于原来带有板桩及嵌入段时地下轮廓的渗径长度, 以此渗径长度 l 除以上下游水位差 H , 即为地下轮廓线与地基土壤接触面之平均渗流坡降 J

$$J = \frac{H}{l} \quad (6)$$

式 (6) 的倒数即为渗径系数 C

$$C = \frac{1}{J} = \frac{l}{H} \quad (7)$$

按式 (6) 或式 (7) 式求出的 J 和 C 值必须满足下式

$$\left. \begin{array}{l} J < J_{\text{允许}} \\ C > C_{\text{建议}} \end{array} \right\} \quad (8)$$

式中 $J_{\text{允许}}$ 及 $C_{\text{建议}}$ 值按有关文献查得。如不能满足式 (8), 则必加长渗径。

按本文方法求得的渗径长度, 其垂直渗径和水平渗径之比是一个变量, 随着板桩的位置及深度而变, 并不像布莱和莱因那样假定是一常量。

二、计算步骤及算例

在进行计算之先, 将解题步骤概括为如下次序:

(1) 展开板桩。按长短次序展开, 以被展开之板桩 (或防渗

墙)作为纵坐标轴,以垂直于该板桩之底面为横坐标轴,按式(2)、式(3)、式(4)展开(倾斜底板解法则按几何关系求出倾斜长度,参见例2)。

(2) 消去嵌入段。将上或下板桩之嵌入段长度,乘上 0.64 倍,并转向 90° ,使位于底板铺盖底面之延长线上。

(3) 求各关键点的横距。消去嵌入段后,即得假想平底板(也即相应于原地下轮廓线之渗径长度),然后以此假想平底板之中点作为坐标原点,逐点求出横距。

(4) 求各点水头比值。按式(5)计算,求出各点水头后,连接之即为闸坝地下轮廓线上的渗流压力图,再在各点上加上相当于下游水深的数值,即为渗流扬压力图。

(5) 求渗流下游出口处的坡降。以最后一个关键点的水头值,除以该点至下游出渗处的距离即得。

现在,我们根据上列求解步骤,求解下列两个例题,这些例题的布置形式,均为闸坝地下轮廓线设计中常见的富有代表性之实例。至于其他一些形式的例题,均可参考。

例 1 如图3所示,试求解带有两道板桩(或防渗墙),并具有上游铺盖之地下轮廓线上的渗流扬压力及渗流下游出逸处之坡降。

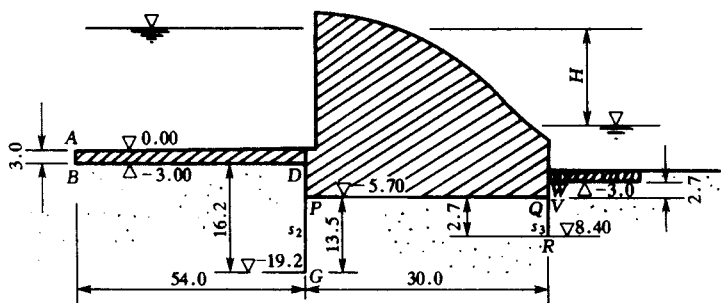


图 3

1. 先展开板桩及消去嵌入段

(1) 以 BD 为横轴, DG 为纵轴, 展开 DG 及嵌入段 AB

$$\xi_D = -\sqrt{16.2^2 + 0^2} = -16.20 \text{ (m)},$$

$$\xi_B = -\sqrt{16.2^2 + 54^2} = -56.50 \text{ (m)},$$

$$\xi_A = -56.50 + (-0.64 \times 3) = -58.42 \text{ (m)}.$$

这里的正负号，以纵轴左侧为负，右侧为正（下同）。

(2) 以 PQ 为横轴， PG 为轴纵，展开 PG

$$\xi_P = +\sqrt{13.5^2 + 0^2} = +13.50 \text{ (m)}$$

$$\begin{aligned} \xi_R &= +\sqrt{\sqrt{\frac{1}{4} \times (13.5^2 + 30^2 - 2.7^2)^2 + 2.7^2 \times 30^2} + \frac{1}{2} \times (13.5^2 + 30^2 - 2.7^2)} \\ &= 33.00 \text{ (m)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \eta_R &= \sqrt{\sqrt{\frac{1}{4} \times (13.5^2 + 30^2 - 2.7^2)^2 + 2.7^2 \times 30^2} - \frac{1}{2} \times (13.5^2 + 30^2 - 2.7^2)} \\ &= 2.59 \text{ (m)} \end{aligned}$$

(3) 横轴不变，而以被影响后的下板桩 ($s_3 = \eta_R$) 作纵轴，展开下板桩及嵌入段 VW

$$\xi_Q = -\sqrt{\eta_R^2 + 0^2} = -\sqrt{2.59^2 + 0^2} = -2.59 \text{ (m)}$$

$$\xi_V = +\sqrt{\eta_R^2 + 0^2} = +2.59 \text{ (m)}$$

$$\eta_W = 2.59 + (0.64 \times 2.7) = 4.32 \text{ (m)}$$

(4) 板桩及嵌入段均已消去，最后得一卧于地表的假想平底轮廓，如图 4 所示。

该假想轮廓总长

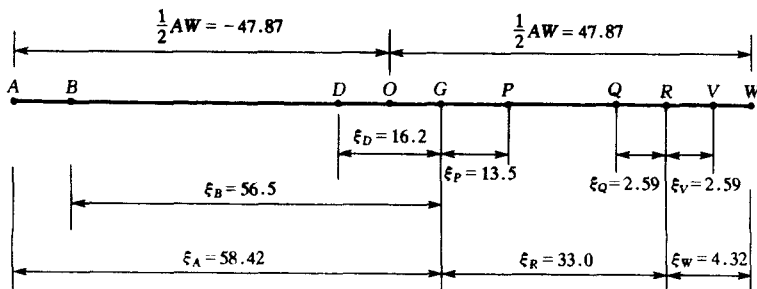


图 4

$$AW = \xi_A + \xi_R + \xi_W = 58.42 + 33.0 + 4.32 = 95.74 \text{ (m)}$$

此即渗径长度 l ，以此 l 除以上下游水头差 H ，则得平均渗流坡降 $J = H/l$ ，而渗径系数 $C = l/H$ 。

2. 求各关键点横距

以 $\frac{1}{2}AW = 47.87$ 为原点，由图 4 立即可算出各点横距

$$x_B = -45.95\text{m} \quad x_P = 24.05\text{m} \quad x_V = 46.14\text{m}$$

$$x_D = -5.65\text{m} \quad x_Q = 40.96\text{m}$$

$$x_G = 10.55\text{m} \quad x_R = 43.55\text{m}$$

3. 按式 (5) 求各关键点水头比

$$\frac{h_B}{H} = \frac{1}{\pi} \arccos\left(-\frac{45.95}{47.87}\right) = \frac{1}{\pi} \left(\frac{180^\circ - 16.3^\circ}{180^\circ}\right) \pi = 0.910$$

(试验值 0.911)

$$\frac{h_D}{H} = \frac{1}{\pi} \arccos\left(-\frac{5.65}{47.87}\right) = \frac{1}{\pi} \left(\frac{180^\circ - 83.2^\circ}{180^\circ}\right) \pi = 0.537$$

(试验值 0.538)

$$\frac{h_G}{H} = \frac{1}{\pi} \arccos\left(+\frac{10.55}{47.87}\right) = \frac{1}{\pi} \left(\frac{77.3^\circ}{180^\circ}\right) \pi = 0.430$$

(试验值 0.432)

$$\frac{h_P}{H} = \frac{1}{\pi} \arccos\left(\frac{24.05}{47.87}\right) = \frac{1}{\pi} \left(\frac{59.85^\circ}{180^\circ}\right) \pi = 0.332$$

(试验值 0.337)

$$\frac{h_Q}{H} = \frac{1}{\pi} \arccos\left(\frac{40.96}{47.87}\right) = \frac{1}{\pi} \left(\frac{31.2^\circ}{180^\circ}\right) \pi = 0.173$$

(试验值 0.183)

$$\frac{h_R}{H} = \frac{1}{\pi} \arccos\left(\frac{43.55}{47.87}\right) = \frac{1}{\pi} \left(\frac{24.5^\circ}{180^\circ}\right) \pi = 0.136$$

(试验值 0.150)

连接各关键点水头绝对值 h ，即得作用于地下轮廓线上的渗流压力图，再在各点加下游水深的数值，即得渗流扬压力图。任意点的渗流坡降可在图上求得，下游渗流出口坡降为