

无限深 透水地基上土石坝 渗流计算与分析

毛海涛 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

无限深透水地基上土石坝 渗流计算与分析

毛海涛 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP) 数据

无限深透水地基上土石坝渗流计算与分析/毛海涛著. —武汉: 武汉大学出版社, 2014. 5

ISBN 978-7-307-13039-5

I. 无… II. 毛… III. ①土石坝—透水地基—渗流—计算 ②土石坝—透水地基—渗流—分析 IV. TV698.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 061810 号

责任编辑: 刘小娟 孙 丽

责任校对: 路亚妮

装帧设计: 吴 极

出版发行: 武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件: whu_publish@163.com 网址: www.stmpress.cn)

印刷: 武汉武铁印刷厂

开本: 787×1092 1/16 印张: 9 字数: 222 千字

版次: 2014 年 5 月第 1 版 2014 年 5 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-13039-5 定价: 42.00 元



前 言

随着国家对水资源的进一步开发和配置,良好坝址越来越少,许多大坝不得不建在无限深透水地基上。无限深透水地基属于不良坝基,坝体和坝基渗流计算和控制难度相对较大,已建工程也出现许多问题亟待解决。但目前对此类地基上建造土石坝的渗流理论研究还远远不够,在渗流计算和防渗体选择等方面还没有形成一套系统的理论和方法。本书以无限深透水坝基和坝体渗流问题为研究对象,通过数值建模、理论推导、试验和工程实例相结合的研究方法,以水库渗透安全和经济为目标,以采用不同类型防渗体时坝体和坝基的渗透坡降和渗流量控制为基本切入点,系统研究无限深透水坝基和坝体渗流计算问题,探索因地制宜的防渗体形式和控渗方案,提出一套保障大坝渗流安全的建模技术、求解方法和防渗体选型优化方案,为提高此类地基上建造土石坝的安全性提供理论支持和技术支撑。

本书的研究工作得到国家自然科学基金项目“无限深透水地基上土石坝及坝基渗流非线性问题建模理论研究”(51309262),国家自然科学基金项目“内陆干旱区平原水库防渗节水与周边次生盐渍化影响研究”(50969010)的资助,新疆维吾尔自治区教育厅重点科研计划项目基金(XJEDU2005109),重庆市教委科学技术研究基金(KJ121104)等的资助。

本书倾注了多人心血,重庆三峡学院王晓菊负责第8章和渗流编程的编写,以及参考文献的整理工作;新疆农业大学的李建华、陈亮亮、尹海华、常卓强等对本书原始文件进行系统整理和归纳;华北水利水电学院水利学院袁莹,石河子大学水利建筑工程学院姜海波,重庆三峡学院何运祥、樊哲超、程龙飞等对本书文字进行多次校核。在最终完稿时,本书还得到了武汉大学水利水电学院邵东国的审核指正,并提出许多宝贵意见,在此深表谢意。

本书主要是本人的研究成果,部分内容取材于相关文献和专著。限于作者本人水平,书中难免存在不足和错误,敬请广大科研工作者和读者批评指正。

毛海涛

2014年3月

目 录

1 绪论	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 渗流破坏及控制的研究现状	(4)
1.3 无限深透水地基概念的理解	(7)
1.4 研究现状评述	(11)
1.5 本书研究的目的和内容	(14)
参考文献	(14)
2 无限深透水地基上土石坝坝基渗流计算的保角变换法	(17)
2.1 保角变换理论发展概况	(17)
2.2 保角变换理论简介	(18)
2.3 坝基垂直防渗体渗流计算模型的建立	(20)
2.4 渗流计算公式的推导	(23)
2.5 算例分析	(26)
2.6 本章小结	(32)
参考文献	(32)
3 无限深透水地基上土石坝坝基渗透坡降的计算与分析	(34)
3.1 无限深透水地基渗透坡降计算	(34)
3.2 对莱茵法的改进	(36)
3.3 无限深透水地基及坝坡出逸坡降的计算	(37)
3.4 无限深透水地基后滤层铺设范围的确定	(41)
3.5 本章小结	(45)
参考文献	(45)
4 无限深透水地基上土石坝坝基渗流计算的有限单元法	(47)
4.1 有限单元法概述	(47)
4.2 有限单元法渗流计算的原理	(47)
4.3 坝基采用垂直防渗体时渗流计算模型的建立	(53)
4.4 非均质坝基采用水平铺盖时渗流计算模型的建立	(59)
4.5 本章小结	(64)
参考文献	(64)
5 无限深透水地基上土石坝坝基渗流计算的边界元法	(66)
5.1 边界元理论概述	(66)
5.2 坝基采用垂直防渗体时边界元法模型的建立	(69)
5.3 坝基采用水平铺盖防渗体时边界元模型的建立	(73)

5.4 本章小结	(78)
参考文献	(79)
6 土工膜水平铺盖防渗体对无限深透水地基渗流控制的影响	(80)
6.1 土工膜防渗体发展概况	(80)
6.2 土工膜水平铺盖有效长度的确定	(83)
6.3 土工膜水平铺盖生态长度的确定	(88)
6.4 本章小结	(94)
参考文献	(95)
7 悬挂式垂直防渗体对无限深透水地基渗流控制影响的研究	(96)
7.1 垂直防渗墙综述	(96)
7.2 对悬挂式防渗墙防渗效果的讨论	(98)
7.3 悬挂式防渗墙位置变化对无限深透水地基渗流量的影响	(99)
7.4 悬挂式防渗墙深度变化对无限深透水地基渗流量的影响	(101)
7.5 本章小结	(104)
参考文献	(105)
8 无限深透水地基上土石坝坝基渗流问题的试验研究	(107)
8.1 渗流模拟试验研究成果概述	(107)
8.2 无限深地基砂槽模型试验的设计	(108)
8.3 均质坝基采用水平铺盖防渗体时模型试验研究	(111)
8.4 非均质坝基采用水平铺盖防渗体时模型试验研究	(114)
8.5 坝基采用悬挂式防渗墙时模型试验研究	(119)
8.6 砂槽渗流试验模型的理论计算	(122)
8.7 理论与试验数据对比	(124)
8.8 水平和垂直防渗体防渗效果比较	(125)
8.9 无限深透水地基上防渗体选择的讨论	(126)
8.10 本章小结	(127)
参考文献	(128)
9 结论与展望	(130)
9.1 总结	(130)
9.2 研究成果纵览	(132)
9.3 有待进一步研究的问题	(133)
附录 坝基采用垂直防渗体时渗流计算程序	(134)

1 绪 论

1.1 引 言

1.1.1 土石坝的发展

土石坝又称“当地材料坝”，主要由坝址附近的土石料填筑而成，根据坝体所用的材料不同又可分为土坝和堆石坝。坝体材料以当地土料和砂、沙砾、卵砾为主的称为土坝，以石碴、卵石、爆破石料为主的称为堆石坝。土石坝是传统的坝型，历史悠久，使用较为普遍。至 19 世纪已经具有较高的水平，最大高度达 50 m，到 20 世纪 50—60 年代，土石坝施工技术有所发展，大型碾压设备如振动碾的出现，使得各种粒径的土、砂、沙砾、石碴、堆石能方便地碾压密实，土石坝建造的数量不断增加，高度也不断增加。新中国成立以来，我国共修建各类水库数十万座，在所建的坝型中土石坝占的比重最大。这些工程在防洪、灌溉、发电、航运、城镇供水和水产养殖等方面都产生了巨大的经济效益和社会效益。国际大坝委员会已有数据显示，全世界共建 15 m 以上的大坝中土石坝占 82.7%；而在土石坝中，中国占半数以上，达 58.3%（表 1-1）。

表 1-1 已建坝型的分类及各国土石坝的数量（国际大坝委员会 1986 年统计数据）

世界大坝按坝型分类统计		
坝型	已建坝数量/座	占建坝总量的百分数/%
土石坝	29974	82.7
重力坝	4180	11.5
拱坝	1592	4.4
支墩坝	489	1.4
总计	36235	100

世界土石坝按国家或地区分类统计		
国家或地区	已建坝数量/座	占建坝总量的百分数/%
中国	17473	58.3
美国	4694	15.7
欧洲（含俄罗斯）	1918	6.4
日本	1484	5.0
印度	998	3.3
南美	629	2.1
其他	2778	9.2

从以上数据可见,土石坝是应用最为普遍的一种坝型。不论是在全世界其他国家或地区,还是在我国,与其他坝型相比较,土石坝在数量上都占绝对的优势。土石坝一直是大多数工程首先考虑和优选的坝型,主要得益于以下优点:

① 经济效益好。方案论证和实践对比证明,土石坝工程的综合性指标比混凝土重力坝优越。

② 施工机械化,施工中配合采用新的工艺流程,可提高施工效率和质量。

③ 土石坝的设计质量和安全可靠性和在不断提高,得益于岩土力学理论、测试手段和电算技术的发展。

④ 土石坝大多就地取材,有利于挖填平衡和节约资金。

⑤ 土石坝坝基对各种地形、地质条件的适应性较强,对于不良的地基,经处理后一般均可修建土石坝。

⑥ 较能适应不良的气候条件,一般堆石坝可以在严寒低温或炎热多雨的地区建造。

⑦ 抗震性能较好。

⑧ 土石坝工程的导流、泄洪问题随着施工机械、施工技术和导流技术的发展(如坝体临时断面漫洪导流、高围堰导流等)已得到较好解决。

⑨ 土石坝寿命长久,运行费用低廉,通常只有护坡需要维修。

随着科学技术的迅猛发展和大型施工机械广泛应用于采掘、运输、填筑、碾压等施工过程,土石坝以其显著的经济性(我国当前每立方米碾压堆石的造价仅为混凝土的 1/10 左右)和对地质条件良好的适应性成为世界坝工程建设中发展最快的坝型。各项经济技术指标均体现出土石坝广阔的发展前景。

1.1.2 土石坝事故原因统计分析

土石坝的任务是壅高水位,拦蓄河水,有计划地利用河水。在河水壅高后,上下游的水头差会引起水库水渗过坝体、坝基及两岸坡,流向下游。土石坝的渗流问题与水库的经济效益和大坝安全运行密切相关。

我国的土石坝大多是在新中国成立后的第一个五年计划(1953—1957 年)和第二个五年计划(1958—1962 年)“大跃进”时期以及十年“文革”期间修建的,这些工程都是在“三边”(边勘测、边设计、边施工)工作方式下进行并完成的。特别是小型水库更是存在“四不清”(来水域、流域面积、库容、基础的地质情况均未调查清楚)情况下就动工修建。不少工程虽然完成,但工程质量很差,后遗症很多,留下了隐患,经过了近 50 年的运行,造成了大批的病险水库。土石坝的安全与否将直接影响人民生命财产安全。在影响土石坝安全与稳定的各种因素中,地下水的渗流作用不可小视。根据国内土石坝事故统计资料显示(表 1-2),在 241 座大型水库的 1000 次事故中,由于渗透变形造成的约占总事故的 31.7%;在 2391 座水库溃坝事故中,由于渗透变形而造成的约占 30%。与渗流有关的破坏形式主要有以下六种:地基渗流管涌通道、堤身或坝体中管涌通道、背水坡脚湿软滑坡、坡面渗流冲刷、水位骤降滑坡、波浪冲击淘刷坡面。因此,加强对现行土石坝渗流分析研究是一项极为迫切的任务。

表 1-2

我国土石坝事故破坏比例

破坏类型	所占比例/%
裂缝	25.3
渗漏、管涌	31.7
滑坡、踏坑、护坡破坏	17.4
冲刷、气蚀	14.2
闸门失灵	4.8
其他	6.6

注：表中数据来源于参考文献[48]。

此外,国外此类统计数据显示(表 1-3),Reinus 对 119 座土坝失事原因分析(1948),由于渗透变形而造成的占总数的 40%;Middlebrooks(1953)对美国 206 座土坝失事原因分析,因渗透变形而造成的占总数的 39%;Sherard 对美国 214 座土石坝破坏原因分析(1963),渗流破坏占总数的 41%;Gruner 对瑞士大坝调查分析(1963),渗流破坏占总数的 41%;Takase 对日本土坝失事调查分析(1967),渗流破坏占总数的 44%;Babb and Mermel 对大坝失事原因分析(美国肯务局,1968),渗流破坏占总数的 30%;美国大坝委员会对大坝失事调查分析(1975),渗流破坏占总数的 44%;Vogel 调查分析 309 座大坝失事原因(1982),由于渗透变形而造成的占总数的 34%;Hinderlider 对 159 座大坝失事原因分析(1986),由于渗透变形而造成的占总数的 26%。从国内外统计数据来看,由于渗透变形而造成的事故或溃坝,占事故总数的 30%~40%,所以近二三十年各国都特别重视土石坝的渗流破坏问题。

表 1-3

国外垮坝原因调查分析表

资料来源	失事类型/%			
	浸坝顶	渗漏 管涌	滑坡 裂缝	其他(压实质量差、管理不当、 溢洪道冲刷、滤料流失等)
Reinus 对 119 座土坝 失事原因分析(1948)	30	40	10	20
Middlebrooks 对美国 206 座土坝失事原因分析(1953)	27	39	18	17
Sherard 对美国 214 座 土石坝破坏原因分析(1963)	28	41	11	20
Gruner 对瑞士大坝调查分析(1963)	23	40	2	35
Takase 对日本土坝失事 调查分析(1967)	28	44	10	18

续表

资料来源	失事类型/%			
	浸坝顶	渗漏管涌	滑坡裂缝	其他(压实质量差、管理不当、溢洪道冲刷、滤料流失等)
Babb and Mermel 对大坝失事原因分析(美国肯务局,1968)	36	30	15	19
美国大坝委员会对大坝失事调查分析(1975)	38	44	9	9
Vogel 调查分析 309 座大坝失事原因(1982,维也纳大坝失事数)	36	34	12	18
Hinderlider 对 159 座大坝失事原因分析(1986)	33	26	4	37

20 世纪以来,渗流对水利工程的影响已为工程界广泛重视,相关人员从理论和实践两方面进行了大量的研究,并取得了许多有价值的成果。随着人类工程活动类型的增多,出现的工程渗流问题日益广泛和复杂,所造成的经济方面的损失也越来越严重,因此渗流设计已成为工程设计、施工以及安全使用的重要因素,也是评价工程效益、经济效益和环境效益的重要内容。

1.2 渗流破坏及控制的研究现状

1.2.1 土石坝坝基渗流破坏的原因及主要形式

概括来看,渗流破坏的原因主要可分为以下两类:

- ① 因渗流量太大,引起对坝基冲刷造成的破坏;
- ② 因孔隙水压力太高,引起坝基承载力降低乃至崩塌造成的破坏。

坝基的渗流破坏形式及其发生发展过程,与地质条件、土粒级配、水力条件,防渗排渗措施等因素有关,通常有管涌、流土、接触冲刷和接触流失四种类型。其类型示意图如图 1-1 所示。

① 管涌:在渗透水流作用下,土中的细颗粒在粗颗粒形成的孔隙中移动,以致流失;随着土的孔隙不断扩大,渗透流速不断增加,较粗的颗粒也相继被水流逐渐带走,最终导致土体内形成贯通的渗流管道,造成土体塌陷,这种现象称为管涌。管涌主要发生在内部结构下稳定的沙砾石层中。

② 流土:在向上的渗透水流作用下,表层土局部范围内的土体或颗粒群同时发生悬浮、移动的现象称为流土。任何类型的土,只要水力坡降达到一定大小,就会发生流土破坏。流土主要发生在渗流出口无任何保护的部位。

③ 接触冲刷:渗流沿着两种不同的介质接触面流动时,把其中颗粒层的细粒带走。这里所指的接触面,其方向是任意的。

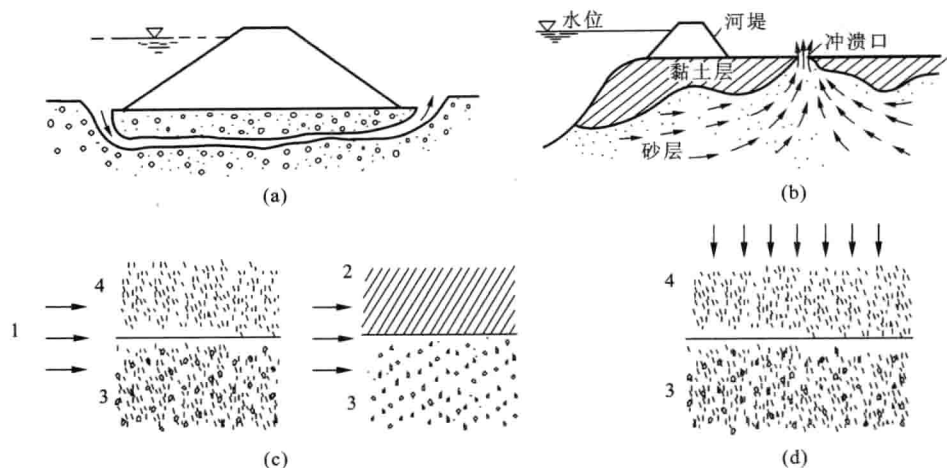


图 1-1 坝基渗透变形类型示意图

(a) 坝基管涌; (b) 坝基流土; (c) 接触冲刷; (d) 接触流失

1—渗流; 2—黏性土; 3—沙砾; 4—砂土

④ 接触流失: 渗流垂直与两种不同介质的接触面流动时, 把其中一层的细粒, 移入到另一层中去, 例如, 反滤层的淤塞就是这种变形。

但就单一土层来说, 渗透变形主要有流土和管涌两种基本形式。

1.2.2 渗流控制的措施

渗流控制的基本方法是防渗和排渗, 并在渗流出口等部位设滤层保护。防渗有垂直和水平两种基本形式。对于土石坝来说, 垂直防渗有心墙、斜墙、截墙、截水槽、灌浆帷幕等防渗体; 水平防渗主要是上游水平铺盖。防渗体由透水性很小的材料组成, 如黏土、混凝土、沥青混凝土、土工织物等。

排渗也可分为垂直与水平两种形式。垂直排渗有坝体内稍倾斜的直立式排水、贴坡排水以及深入地基的减压沟和减压井排水; 水平排渗主要有坝体内的褥垫式排水、管式排水和下游坝趾出渗排水。排水体由强透水的材料组成, 主要有沙砾石料、土工织物、化纤布等。

防渗措施的位置一般要靠近坝体上游或中部以消除大部分渗流能量, 再让渗水从下游排渗出口流出。基于这种要求, 通常把土石坝材料分区堆筑, 使前部透水弱, 后部透水强, 这种布置的本身也是一种好的渗流控制方法。

1.2.3 土石坝渗流控制计算的主要任务

土石坝渗流控制计算的主要任务可归纳为以下五点:

① 计算通过土石坝和坝基的渗流量, 以确定大坝上游水库的渗漏损失水量, 分析该损失对水库蓄水的影响, 以及是否需要采取防渗措施来减少渗漏损失。

② 计算土石坝坝体内的浸润线, 以便分析土石坝坝坡的稳定性。

③ 计算土石坝及其地基内各点处的水头和压力, 并确定其分布和变化, 用以预测产生渗透变形的可能性。

④ 计算作用在土石坝底部的扬压力, 以便分析大坝的稳定性及应采取的防渗、排渗措施。

⑤ 计算土石坝及其地基内各点处的渗透流速和水力坡降,特别是渗流出逸处的渗透流速和水力坡降,以便分析其渗透稳定性,并为采取防渗、排渗措施提供计算依据。

1.2.4 渗流控制的计算方法

渗流理论发展至今,已经形成了很多种计算方法,但归纳起来就是两大类,分别是理论分析法和试验分析法。

1.2.4.1 理论分析法

理论分析法可分为解析法、数值法和图解法三类。

(1) 解析法

所谓解析法,是指利用有关数学手段直接求解基本微分方程的方法。通过解析,可以得出关于水头函数在所研究区域内分布的表达式,它既要满足基本方程,又必须满足给定的边界条件。一般来说,解析解是比较精确的,但实用性较差,因为大部分的解析解都是针对各向同性均质渗流介质和简单边界条件而建立的。解析法又可分为直接解法、复变函数法、组合法。

① 直接解法是采用直接解渗流基本微分方程的方法来计算渗流要素的一种方法。

② 复变函数法是利用复变函数保角变换理论,将实际的渗流问题变换为一个有解的区域,从而使问题得以解答。

③ 组合法是将复杂的渗流区域划分为几个简单的渗流区段来进行计算的一种方法。

(2) 数值法

数值法目前主要有有限单元法、边界元法和差分法。这些方法都是将偏微分方程的边值问题转化为代数方程问题,然后用计算机求出基本未知量的值。

① 有限元法的基本思想是用一个较简单的问题代替复杂的问题后再求解。随着各种商业软件的发展(如 ANSYS),有限元法已经是目前工程应用最为广泛的数值方法。

② 边界元法是继有限元法之后的又一种有效的数值计算方法,它的特点是降低问题的维数,只以边界的未知量作为基本未知量,通过把求解域的边界剖分为若干个单元,化边界积分方程为线性代数方程组来求解,域内未知量可以通过边界未知量来求出。

③ 差分法是从微分方程出发,将研究区域经过离散处理后,近似地用差分 and 差商来代替微分和微商,即将渗流基本方程转变为差分方程,并采用逐步逼近的计算方法来求得渗流场中各点的水头。

(3) 图解法

图解法是通过绘制渗流区流线和等势线的网状图形,并以此来计算渗流要素的一种方法。

1.2.4.2 试验分析法

目前常采用的试验方法有:砂槽(土槽)模型法、缝隙水槽法(也称黏滞流模型法)、水力网模型法和水力积分仪法、电拟试验法和电阻网模型法等。

(1) 砂槽试验

砂槽试验是用砂或砂性土做模型,放置在木质或钢制的槽内,当模型的上下游保持与建

筑物上下游相应的水位时,由于上下游水头差的作用,模型内即产生渗流。此时可以通过量测工具实测出渗流参数(如水头、流量等)。

(2) 缝隙水槽模型试验

缝隙水槽模型试验是用两块玻璃板或有机玻璃板做成模型,相互平行地安装在试验槽内,并使两块板之间保持一定的缝隙宽。缝隙水槽试验观测的方法,一般是在玻璃板上顶先画上方格,然后在上游液体的不同高程处添入颜色,以使模型中流线能明显地显示出来,便于观测。

(3) 电拟法

电拟法是基于电场和渗流场符合同一种形式的控制方程而进行求解的。电拟模型对渗流场来说是个数学模型,而不是物理模型。电拟法目前有两种模型,即导电液模型和电网络模型。由于导电液模型为连续介质模型,故便于模拟急变渗流区问题,但它无法模拟非均质各向异性渗透介质,也不能适应复杂的地质和边界条件。为了模拟更加复杂的渗流场,逐步发展和研究了电网络模型,即电网络法。该方法既可基于差分原理建立,也可基于变分原理建立。电网络法还吸收了有限元法的优点,该方法在模拟曲线边界和各向异性介质渗透性方面得到一定的改进。

1.3 无限深透水地基概念的理解

《碾压式土石坝设计规范》(SL 274—2001)中对无限深透水地基的界定是:“当透水地基深度大于建筑物不透水底部长度的 1.5 倍以上时,可视为无限深透水地基。”由此可见,所谓“无限深透水”并非地基真的深不可测且全是透水层,它只是一个相对的概念,是相对“有限深”和“不透水”而言的。作者认为要真正理解无限深透水地基的内涵,还需要从地质的角度出发,了解透水覆盖层形成过程,并根据地质状况的不同,将无限深透水地基进行分类,以便研究时具有针对性。

1.3.1 覆盖层的形成过程

自然界松散的沉积层组成了地球最表面的覆盖层,这些覆盖层是原生岩石经过机械风化和化学风化作用产生了黏结程度不同的集合体,遭到风化的岩石在热胀冷缩的物理作用及重力的影响下,会向坡下滑动,并在局部地方堆积起来成为崩积物。许多松散堆积的崩积物被水、风或冰川及冰川融化了的河水,从不同距离的来源地搬运到停积场所而沉积,而且只有少数搬运来的沉积物是颗粒均匀的,大多数是质地不均匀的沉积层。

松散沉积物经过沉积和埋藏逐渐压密,并被黏结起来。有些地方沉淀在颗粒孔隙间的胶结物,把松散沉积物胶结成坚硬的似岩石状物体,有些地方不含黏性胶结物,颗粒孔隙却较大。

松散物质的特殊分类,随分类的目的而异。在水利工程上分类的重点放在松散物质的特性方面。这些特性关系到土体作为地基或开挖坡度的性能等,以及作为建筑材料的性能。

根据沉积物的不同颗粒级配,可表示为分选很差的、分选不良的、分选好的和分选很好的四类。分选不良的松散沉积物,如含有黏土的砂;分选好的松散沉积层,如沙丘层、海砂和河砂。这些砂中的极细颗粒已被去掉(表 1-4)。

表 1-4 松散沉积物的颗粒分级(地质分类)

名称	粒径/mm	名称	粒径/mm
漂砾卵石	>60	细砂	0.06~0.2
粗砾	20~60	粗粉粒	0.02~0.06
中砾	6~20	中粉粒	0.006~0.02
细砾	2~6	细粉粒	0.002~0.006
粗砂	0.6~2	黏粒	<0.002
中砂	0.2~0.6		

自然界的松散沉积物在其颗粒大小及矿物学性质方面的变化是不同的。在工程实践中,松散沉积物常被泛称为“土”。不论为了坝体填筑还是为了大坝基础,这些土在垂直和水平方向上的非均质性、渗透性等对坝体和坝基的渗流都有着重要的作用。

目前所修建的各种水工建筑物都是在地球表面的覆盖层上,只不过有的覆盖层较浅,可开挖到新鲜的岩基;有的覆盖层土质条件良好,可直接在上面修建水工建筑物;有的覆盖层存在较浅的透水层或承载力差的岩层,通过简单的工程措施,可以满足设计要求等。而无限深透水地基的地质情况相对上述几种情况都要差些。

1.3.2 无限深透水地基的讨论

随着社会经济的迅猛发展,世界上很多地区都修建大量的水利工程设施来满足生产、生活要求,因而许多良好的坝址已被利用。有些坝址,常因坝基地质条件缺陷或库区地质条件不好,需要在工程设计之前及施工中,使用科学的方法和工程措施对其进行精心地勘察和研究分析,来保证大坝的可靠蓄水和方便分流,以便在水库失事时,使人民的生产和生产所受的损失最小。

“无限深透水地基”就属于坝基地质条件存在缺陷的情况之一,有学者曾提出:“无限深透水地基按理论计算渗透流量将很大,所以不宜在其上建坝。”可是实际中,建在无限深透水地基上的大坝却早已存在,而且通过合理的渗控措施,这些水库运行良好,说明在无限深透水地基上建坝其渗流是可防可控的。

那么,何为“无限深透水地基”?

首先从“透水”角度出发,严格地说,世界上所有的土都是透水的,所谓“不透水”,只是说其渗透系数很小,透水性可以忽略不计而已。各种松散沉积物的相对透水性见表 1-5。

表 1-5 各种沉积物按透水性分类

1. 低渗透性
A. 冲积黏土、淤泥和粉砂堆积物;
B. 已蚀变的火山灰;
C. 具有致密黏土质的冲积砂土和砾石层;
D. 具有致密黏土或岩粉基质的冰碛物;
E. 泥石流堆积物;
F. 滑坡堆积物,常由致密黏土夹有少量岩石碎块组成

2. 中等透水性——足以引起潜在的渗漏

- A. 冲积砂或砾石,其分选不良并含有少量黏土的物质;
- B. 很细的砂土;
- C. 未经蚀变的火山灰;
- D. 含有一定量的黏土或粉岩的冰碛物;
- E. 由岩屑或黏土基质组成的滑坡物,可能存在一些孔隙,但并不相互连通;
- F. 黄土

3. 强透水性

- A. 冲洗或分选良好的冲积砂层或砾层;
- B. 中粒及粗粒的角砾状火山碎屑沉积物;
- C. 夹有冲积层透镜体或不规则的冰碛层;
- D. 埋藏地下的古沙丘;
- E. 含较多岩石碎块的滑坡堆积物,并不相互连通的孔隙

按照透水性强弱可将地基分为不透水地基、有限深透水地基、无限深透水地基三类。其中有限深透水地基又分为较浅覆盖层透水地基和深厚覆盖层透水地基两种类型。

通常说的不透水地基,表明其地基地质情况良好,大都属于低渗透性的岩土;有限深透水地基即表明地基上存在一层(或浅或深)渗透系数较大(中等透水或强透水)的覆盖层,但覆盖层下面又属于低渗透性的岩土(不透水层或弱透水层)。以此类推,无限深透水地基表明透水层对工程渗流的影响比深厚覆盖层透水地基还要大,也就是说用于不透水层地基或有限深透水地基的渗流理论或工程措施其中一部分已经不能适用于无限深透水地基的情况,需要重新研究。世界上大多数坝体是建在前两种地基上,而且其渗流计算的理论和渗控技术的发展都已经基本成熟,但对于无限深透水地基的渗流计算和渗流控制措施都还没有形成体系。

作者从地质结构的角度出发,将无限深透水地基分为三类,如图 1-2 所示。

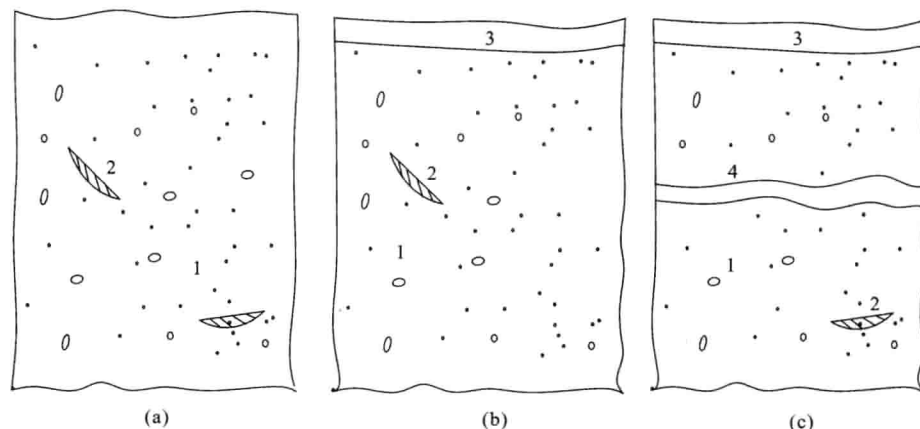


图 1-2 无限深透水地基地质剖面图

(a) 单层结构无限深透水地基;(b) 二元结构无限深透水地基;(c) 多元结构无限深透水地基

1—强透水层;2—淤泥质夹层;3,4—弱透水层

(1) 单层结构无限深透水地基

此类地基中从上而下都是强透水层或中等透水层,深度大于或远远大于水工建筑物不透水底部长度的 1.5 倍。地基中可能夹杂有透镜体状的淤泥夹层或大的孤石,但不影响地基整体中强透水性的特点。

(2) 二元结构无限深透水地基

此类地基上层存在一层深度不大且连续的相对弱透水层,该层渗透系数应不小于 1×10^{-5} cm/s,可以近似认为是天然铺盖。但其下为深度很大的强透水层,地基整体呈透水性。

(3) 多元结构无限深透水地基

此类地基上面或中间存在不连续的一层或几层相对弱透水层,其他部位为深度巨大的强透水层,这些弱透水层在局部能起到防渗的作用,但强透水层对地基的渗流影响起着主导作用。

总之,不管是单层结构、二元结构还是多元结构,虽然形式不同,但其共同特点都是深度巨大的透水层在地基渗透中占主导作用。当然,对于二元结构和多元结构的相对弱透水层,在设计坝基防渗体时要根据实际情况充分考虑。

1.3.3 无限深透水地基与深厚覆盖层透水地基的区分

无限深透水地基是相对的,并非真的是无限深。从无限深透水地基的概念来看,人们往往很难辨别出深厚覆盖层(有限深透水地基)和无限深透水地基的区别。首先,应该清楚无论是深厚覆盖层还是无限深透水地基都属于特殊的地基,都是岩性不连续,结构松散,成因类型复杂,物理力学性质呈不均匀性质变化的第四纪松散堆积物。深厚覆盖层一般是指堆积物厚度大于 30 m 的透水层;无限深透水地基与其的区别很难用具体的数字来衡量,所以作者从两个方面对此问题进行探讨。

1.3.3.1 从渗流计算关注的角度来区分

我国水利专家毛昶熙在研究有限深透水地基的渗流计算时发现,随着地基深度加大,地基深度变化引起浸润线位置的改变,这种改变仅在一定范围深度内显著。当地基更深时,浸润线位置实际已不再改变。其推出了引起坝体浸润线变化的地基深度 T_1 的计算公式如下:

$$T_1 = (0.5 \sim 1.0)(L + m_1 H_1) \quad (1-1)$$

式中 L ——坝底宽度, m;

m_1 ——上游坝坡边坡系数;

H_1 ——上下游水头差, m。

应当注意的是,无限深透水地基的深度若按式(1-1)计算,仅能确定出浸润线位置,而不能计算出真正的渗流量。也就是说,当地基的实际深度 $T > T_1$ 时,按式(1-1)计算深度所确定的渗流量并不是实际的渗流量。

从上述角度出发,若渗流计算更看重的是坝体浸润线的变化,而对地基渗流量并不太关注(如拦河坝),就可将 T_1 作为临界值,大于 T_1 的为无限深透水地基,小于 T_1 的为深厚覆盖层透水地基。

若渗流计算对坝体和坝基的渗流量要求必须控制在很小的范围内,这样再以 T_1 作为判别标准就没有说服力了,因此必须从渗流量的角度出发寻找一个新的临界值 T_2 。当地基深度 $T = T_2$ 时,坝基渗流计算的渗流量可以代表实际的渗流量,坝体和地基的渗透坡降满足

渗透稳定的要求。此时若透水地基的深度 $T > T_2$, 可以认为地基为无限深透水地基, 反之为深厚覆盖层透水地基, 若此时 T_2 相对较深, 可认为其为深厚覆盖层透水地基。

因此, 从渗流计算关注的角度来看, 无限深透水地基与深厚覆盖层透水地基的区别, 主要以地基深度对渗流计算结果的影响以及渗流计算关注的主要问题来决定。

1.3.3.2 从工程措施(垂直防渗体)的角度来区分

地基防渗的主要工程措施是垂直防渗墙和水平铺盖, 水平铺盖因为在上游面铺设, 施工难度小, 尺寸控制也相对容易。而地基垂直防渗墙要嵌入地基内, 其控制渗流的能力和地基深度的关系更为密切, 所以本小节主要从垂直防渗措施的角度出发来探讨无限深透水地基与深厚覆盖层透水地基的区别。

对于透水地基来说, 垂直防渗墙能直接截断透水层对水库的蓄水, 大坝安全是最理想的, 但很大一部分地基由于深度较大, 垂直防渗墙只能做成悬挂式或半封闭式, 不能完全截断渗流。随着社会经济的不断发展, 垂直防渗体新的施工机械和施工工艺在不断地更新, 垂直防渗墙的深度可以做到 200 m 甚至 250 m, 但在此基础上再加深几乎不可能了, 并且造价会非常高。可以这样说, 垂直防渗体的深度能达到多深, 除了与地基的深度有关外, 还要看施工机械和施工工艺的先进程度、工程造价和当地经济的承受能力, 所以可以从垂直防渗的施工水平来将无限深透水地基和深厚覆盖层地基区分开来。

若存在两个完全一样的土石坝, 坐落在深度较大的透水地基 A 和 B 上, 两地基除深度不同外, 其他参数相同。在施工机械、工艺及经济条件完全相同的条件下, 所能修建的防渗墙最大深度为 s , 而此深度刚好可以截断 A 地基深度, 而 B 地基采用该防渗墙仍不能满足设计要求, 我们可以认为 B 地基为无限深透水地基, 而 A 地基可以认为是深厚覆盖层透水地基。

这样论述和区分两种地基, 只是表明适用于有限深透水地基的防渗体尺寸, 不能完全解决无限深透水地基的渗流问题。目前, 工程实际中防渗墙做成悬挂式和半封闭式的也比较多, 只要能根据工程实际的地质、水文、材料等情况, 设计出合理的防渗体, 也能起到事半功倍的效果。

此外, 为了能使本书的计算结果具有普遍性和代表性, 本书在不同的数学模型建立中均认为地基不存在隔水层, 为真正的无限深透水地基。此外, 试验模型中也尽可能地加大透水层的深度, 以满足“无限深”条件。

1.4 研究现状评述

无限深透水地基是基于深厚覆盖层地基渗流研究的, 而且两者在理论研究和实际工程的处理方法也如出一辙。因此, 追溯无限深透水地基渗流研究的起源, 就必须从深厚覆盖层坝基的工程应用和理论研究说起。

20 世纪六七十年代, 是世界各国在河谷深厚覆盖层(按定义许多可视为无限深透水地基)上建坝最多的时期, 著名的 Aswan 大坝, Manic-III 大坝, Serre-Ponco 大坝及我国川西的映秀湾、渔子溪及南桠河拦河闸, 浙江的长潭坝、桥墩坝, 密云水库的白河主坝……都是在这时期修建的。20 世纪 80 年代后, 随着我国大力发展水利水电事业, 一大批高坝修建于河谷深厚覆盖层上。如四川南桠河冶勒水电站、四川大渡河瀑布沟水电站、新疆下坂地水利枢纽工程等。