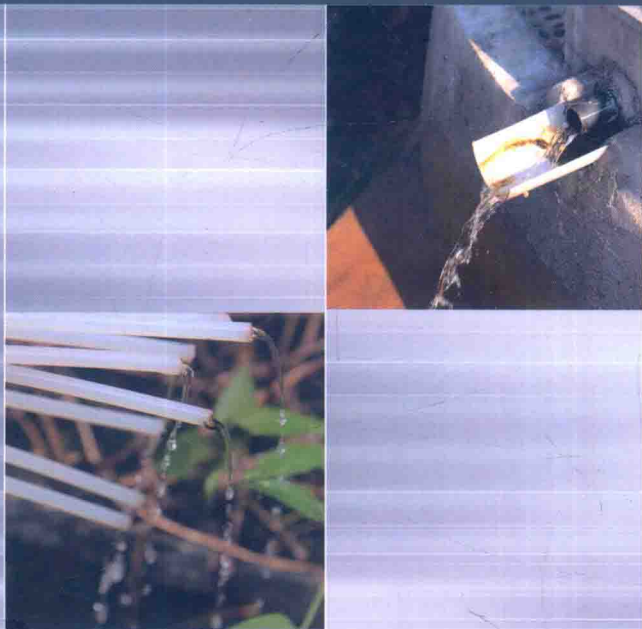




斜坡虹吸排水理论与实践

孙红月 尚岳全 蔡岳良 著



科学出版社

斜坡虹吸排水理论与实践

孙红月 尚岳全 蔡岳良 著

“十二五”国家科技支撑计划(No. 2012BAK10B06)成果专著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

虹吸具有免动力实现水体高效跨越输送和流动过程由液位变化自动控制特性,具有布孔位置选择方便和经济性好的优势,适合斜坡地下水位控制的需要。本书通过模型试验、数值模拟和理论分析及工程实践,揭示了虹吸系统气泡积累导致排水中断的原因,提出了保障虹吸持续有效的技术措施,建立了斜坡虹吸排水技术体系,建设了国际上首个免维护的滑坡虹吸排水示范工程。

为便于虹吸排水技术方法的应用,编制了“斜坡虹吸排水技术指南”,作为附录列于书中,为规范使用斜坡虹吸排水技术提供了必要的技术标准。

本书论述了斜坡虹吸的基础理论和相关技术问题,构建了斜坡虹吸排水方法,编制了必要的技术标准,可供滑坡地质灾害防治领域中的勘察、设计、施工、监理等技术人员和管理人员及大专院校相关专业师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

斜坡虹吸排水理论与实践/孙红月,尚岳全,蔡岳良著. —北京:科学出版社,2016.6

ISBN 978-7-03-048334-8

I. ①斜… II. ①孙…②尚…③蔡… III. ①斜坡-道路工程-排水系统-研究 IV. ①U417.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 112610 号

责任编辑:刘宝莉 乔丽维 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 伟 / 封面设计:左 讯

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 6 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2016 年 6 月第一次印刷 印张:11 3/4

字数:240 000

定价:80.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

降雨是诱发滑坡的主要环境因素,大量滑坡表现出雨季滑动、旱季又相对稳定的特征,它们的变形动态与降雨过程的关系十分密切。降雨强度和前期降雨积累程度往往决定着滑坡的启动时间,岩土渗透率分布决定着许多斜坡的变形破坏特征。因此,控制坡体地下水位上升,对提高滑坡稳定性有着十分重要的作用。然而,当前在控制坡体地下水位上升方面,却面临诸多困难,显得力不从心。地表截排水沟效果不佳,排水盲沟施工困难,水平排水孔往往需要很长的钻孔且使用过程中易堵塞,地下排水隧洞体系建设工期长、费用高。所有这些排水措施均对地形条件或岩土结构特征有较高的要求。只有排水井,可以高效排水且位置选择方便,但存在抽水需要动力能源、维护管理困难等缺点。

有没有一种技术能同时满足:经济高效又无需动力、排水点选择方便、后期使用可靠性好且维护简单?回答是肯定的,这种技术就是虹吸排水技术。虹吸能免动力实现水体的高效跨越输送,且流速和流动过程由液位变化自动控制,这些特性非常适合坡体地下水位控制的需要,且具有布孔位置选择方便和经济性好的优势,应该成为斜坡排水的主要手段。

将虹吸技术应用于斜坡排水,已有 30 年的发展历史,但至今仍然未能得到推广应用,其原因在于没能解决如何避免虹吸系统崩溃的问题。斜坡虹吸具有间歇性、缓慢流动性以及需要高扬程等特性,虹吸管内的低压环境必然导致水流析出空气,如不能及时使析出的气泡随水流排出虹吸管,就会造成管内空气积累,最后导致虹吸过程中断。解决间歇性高扬程虹吸过程持续有效的技术保障问题,是推广虹吸方法应用于斜坡排水的基础。

本书全面讨论斜坡虹吸的基础理论问题和相关技术问题。通过模型试验和理论分析,揭示虹吸过程中气泡的形成与运动规律;基于试验研究、数值模拟和理论分析,揭示不同虹吸管直径的流态特征,发现 4mm 内径虹吸管是形成段塞流的临界管径;通过虹吸管空气溶入与扩散理论研究,计算获得长期停流状态下管顶气泡的积累量值;采用数值模拟方法,论述斜坡虹吸排水的作用效果及其影响因素;探讨斜坡虹吸排水设计施工的相关技术问题,提出相应的技术实施方案;建设国际上首个免维护的斜坡虹吸排水示范工程,显示出斜坡虹吸排水具有强大的优势。

由于斜坡虹吸排水是一项新技术,目前还缺乏相关技术标准。为提高斜坡排水能力,减少滑坡灾害发生,推广虹吸排水技术方法的应用,规范虹吸排水技术工

作,编制了“斜坡虹吸排水技术指南”。主要内容包括:斜坡工程地质条件调查分析与测试方法、虹吸管空气积累原因分析与控制措施、虹吸排水系统设计、虹吸排水系统建设要求、虹吸排水效果监测技术方法等。指南阐述了相关内容的概念、实施过程中应注意的问题、提出技术要求的原因,为规范使用斜坡虹吸排水技术提供了必要的技术标准。

在本书完成之际,作者特别感谢朱定勤、万毅宏、王江平、赵荐、周斌、何强、李仁志、方坤平、邱庆生、方东苏、何云、张灵军、王晓星、郭艳明等在虹吸排水示范工程建设中给予的大力支持和帮助;感谢课题组研究生任姗姗在斜坡虹吸排水效果和影响因素研究、熊晓亮在虹吸管气液两相流型数值分析、张世华在地下水浸润线分析及虹吸排水效果研究等方面的重要贡献;感谢课题组研究生潘攀、魏振磊、梅成、吴梦萍、赵权利、何婷婷、张文君、陈晓辉等等相关试验研究和虹吸排水示范工程建设中做出的贡献。

构建免维护持续有效的斜坡虹吸排水系统,是一项新技术探索。课题组成员开展了大量的模型试验、数值模拟和理论分析工作,并在此基础上建设了斜坡虹吸排水的示范工程,用工程实践验证了理论和技术研究成果的正确性。但构建完整的斜坡虹吸排水体系是一项富有挑战性的工作,限于著者水平,书中难免存在不足之处,恳请读者批评指正。作为首部系统论述斜坡虹吸排水理论与技术方法的专著,总结研究成果并出版,希望对我国的斜坡地质灾害防治有所帮助,并在新的实践中不断提高和完善。

孙红月

于杭州浙江大学

2016年2月10日

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 斜坡排水意义与面临困难	1
1.2 虹吸原理	3
1.3 虹吸排水的优势	5
1.4 斜坡虹吸排水发展现状	7
第 2 章 虹吸过程气泡产生原因与流态特征模型试验	10
2.1 虹吸过程气泡形成原因与特点	10
2.2 虹吸下水管段气泡运动特征	12
2.3 气液两相流型	14
2.3.1 上水管中的流动型式	14
2.3.2 下水管中的流动型式	16
2.3.3 $\cap$ 形弯管段流动型式	16
2.3.4 流型的过渡及其与管径的关系	17
2.4 不同管径虹吸流态模型试验	19
2.4.1 试验装置及虹吸基本特征	19
2.4.2 虹吸管顶部流态特征	20
2.4.3 虹吸管内气泡的兼并与积累	23
2.4.4 形成段塞流的管径条件	24
第 3 章 不同虹吸管径流态特征数值模拟	27
3.1 计算模型及边界条件	27
3.2 数值计算方法	28
3.2.1 二维瞬态问题方程离散方法	28
3.2.2 表面张力和壁面黏附离散方法	30
3.2.3 体积分数连续性方程与动量方程	32
3.2.4 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型	32
3.3 数值模拟结果分析	33
3.3.1 虹吸管径 8mm 流态模拟	33
3.3.2 虹吸管径 4~6mm 流型数值模拟	36

第4章 形成段塞流临界管径理论分析	39
4.1 水中最大稳定气泡直径分析	40
4.1.1 分析计算模型	40
4.1.2 液面的能量法推导	41
4.1.3 气泡极限大小与临界管径的关系	45
4.2 虹吸越过管顶点段塞流临界管径分析	46
4.2.1 分析计算模型	46
4.2.2 弯管液面的能量法推导	47
4.2.3 避免出现贴壁流态的管径选择	50
第5章 停流期虹吸管空气积累问题	52
5.1 停流期虹吸管空气积累原因	52
5.2 停流期虹吸管空气积累试验	53
5.2.1 管径 8mm PU 虹吸管顶部空气积累	53
5.2.2 细管径 PU 虹吸管顶空气积累试验	54
5.2.3 细管径虹吸管气泡上升过程	56
5.3 虹吸管壁空气渗入理论分析	57
5.4 定温条件下管端空气溶入扩散速率的计算	61
5.5 管内水中空气析出	64
5.5.1 虹吸管内压力减少引起空气析出	64
5.5.2 温度变化引起空气析出	65
第6章 斜坡虹吸排水效果有限元模拟	70
6.1 地下水渗流理论	70
6.1.1 渗流基本概念	70
6.1.2 达西定律	71
6.1.3 渗流连续方程	72
6.1.4 潜水运动微分方程	73
6.1.5 地下水运动定解条件	74
6.2 斜坡虹吸排水有限元模拟方法	75
6.2.1 有限元计算模型	75
6.2.2 虹吸排水系统模拟方法	76
6.2.3 验证虹吸排水系统模拟方法的合理性	78
6.3 斜坡虹吸排水效果数值分析	80
6.3.1 斜坡自然渗流场	80
6.3.2 虹吸排水作用后的斜坡渗流场	81
6.4 虹吸排水效果的影响因素研究	82

6.4.1 排水孔位置对排水效果的影响	82
6.4.2 排水孔的间距对排水效果的影响	84
6.4.3 排水孔倾斜角度对排水效果的影响	85
第7章 斜坡虹吸排水系统建设	87
7.1 虹吸排水孔布置	87
7.1.1 钻孔倾角和孔深	87
7.1.2 虹吸排水孔数量	88
7.1.3 虹吸排水孔间距选择	90
7.1.4 虹吸排水孔的平面布置	94
7.2 虹吸排水流量	97
7.2.1 管流水力特性	97
7.2.2 虹吸流速试验测试	98
7.2.3 虹吸孔需要的排水能力	101
7.3 虹吸启动方法	101
7.3.1 出水口抽水启动虹吸	101
7.3.2 出水口逆向压水启动虹吸	102
7.3.3 U形管逆向灌水启动虹吸	103
7.4 虹吸排水检测	103
7.4.1 虹吸排水孔的孔口与孔底高差检测	103
7.4.2 单孔流量检测及排水总流量监测	104
7.4.3 斜坡地下水位监测	105
7.5 钻孔和透水管及虹吸管	106
7.6 虹吸系统布置其他注意事项	109
第8章 斜坡虹吸排水应用工程实例	111
8.1 斜坡地质环境条件	111
8.1.1 自然地理	112
8.1.2 工程地质条件及滑坡成因	112
8.2 斜坡虹吸排水系统建设	113
8.2.1 倾斜虹吸排水孔钻探	114
8.2.2 透水管与排水管制作安装	115
8.2.3 引导初始虹吸	116
8.2.4 修建集水槽进行流量监测	116
8.3 斜坡虹吸排水效果监测	118
8.3.1 斜坡地下水位监测孔	118
8.3.2 斜坡表面变形监测系统	120

8.4 斜坡虹吸排水效果	121
8.4.1 降雨过程监测结果	121
8.4.2 虹吸排水监测结果	122
8.4.3 钻孔地下水位监测结果	123
8.4.4 钻孔地下水位与虹吸排水流量变化关系	124
8.4.5 排水效果	127
第9章 结语	128
参考文献	130
附录A 斜坡虹吸排水技术指南	133
A1 斜坡工程地质	133
A1.1 斜坡工程地质条件调查	133
A1.2 水文地质调查与测试	136
A1.3 土的水理性质指标经验值	139
A1.4 滑坡及其稳定性影响因素	140
A2 虹吸管空气积累原因与控制	145
A2.1 斜坡虹吸特点与气泡产生原因	145
A2.2 虹吸管内气泡运动	147
A2.3 选择合理管径避免气泡积累	150
A2.4 虹吸管材选择	154
A3 虹吸排水系统设计	156
A3.1 虹吸排水孔布置	156
A3.2 斜坡虹吸排水基本要求	158
A3.3 虹吸排水孔间距	159
A3.4 虹吸排水流量计算	163
A4 虹吸排水系统建设	166
A4.1 孔底储水管靴与透水管	166
A4.2 钻孔施工与高差检测	168
A4.3 虹吸排水系统安装	169
A4.4 虹吸启动方法	171
A4.5 虹吸系统布置其他要求	173
A5 虹吸排水效果检测与建设工程验收	175
A5.1 虹吸流量监测	175
A5.2 降雨量和地下水位监测	177
A5.3 斜坡变形监测	178
A5.4 质量检查与验收	179

第 1 章 绪 论

1.1 斜坡排水意义与面临困难

我国是多山国家,斜坡是基本的地质环境,滑坡灾害经常威胁着人类生生产生活安全。大多数滑坡灾害的诱发因素是由于地下水位_的上升,而坡体地下水位上升又是一个降雨入渗的积累过程。许多滑坡表现为雨季滑动、旱季又处于相对稳定,或随雨季过程出现多期分区滑动,它们的变形动态受降雨影响十分明显。图 1.1 为新昌县下岩村滑坡 10 号测点的位移速率与附近钻孔地下水位变化的对应关系,充分说明了滑坡的滑动变形与地下水位变化的关系密切,滑坡变形速率变化滞后于地下水位变化,并呈正相关。

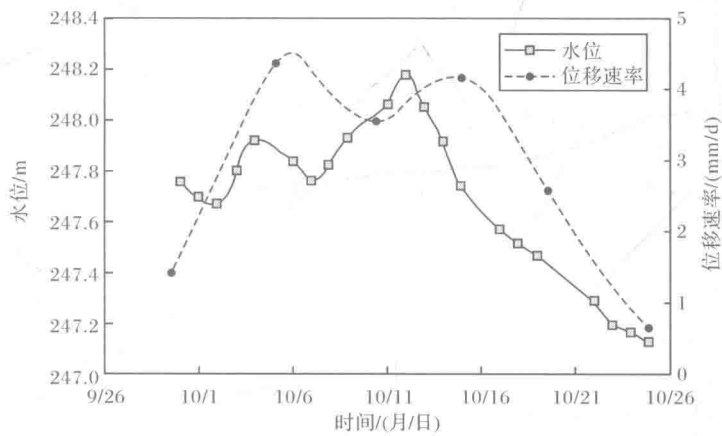


图 1.1 10 号测点位移速率与附近 SK41 钻孔地下水位变化关系

关于滑坡与降雨之间的关系及地下水位变化对滑坡稳定性影响等,已开展了多方面研究(李德心等,2012; Cascini et al., 2010)。在降雨历时、降雨量、降雨强度对滑坡稳定性影响方式等方面,进行了大量研究,但对控制坡体地下水位上升的研究相对薄弱。当前滑坡主要排水措施有:地表排水沟、排水盲沟、水平排水孔、地下排水洞、集水井抽水等,无法满足快速经济地实现滑坡地下水位有效控制的目标。地表排水沟应用最普遍,但效果不佳;排水盲沟开挖施工困难;水平排水孔往往需要很大的钻孔长度,且使用过程中容易堵塞;地下排水隧洞体系效率最

高,但施工周期长、费用高;集水井抽水需要动力,维护困难。

对于一个较大规模的滑坡,如果前期没有明显的降雨积累,那么一次短时间的强降雨过程,将不会导致坡体地下水位的大幅上升,也不会引起滑坡的启动。但有前期降雨积累时,坡体的含水量高且有较高的初始地下水位,就会因强降雨过程进一步引起地下水位上升而导致滑坡启动。因此,及时排出坡体地下水,就能有效防止多数滑坡灾害的发生。但许多滑坡排水面临困难。

图 1.2 是浙江省龙游县渡贤头村滑坡的地貌环境特征,滑坡后缘有大范围的汇水斜坡区域,且表层岩土结构松散,降雨入渗条件良好。滑坡地质剖面如图 1.3 所示,滑体组成物质为碎石土、含碎石粉质黏土,主体部分属古滑坡堆积,接受大气降水和山坡土体地下水渗流补给,地下水埋深 3.2~21m,滑床为较完整的中风化晶屑凝灰岩,属隔水层。古滑坡宽 650m,最大斜长约 260m,投影面积约 11.3 万 m^2 ,按平均厚度 20m 计,体积约 226 万 m^3 。2002 年年底,由于坡脚公路建设开挖施工,在降雨影响下,开挖坡面出现了小规模塌方并有泉点出露,坡面出现裂缝,并随时间过程变形破坏范围逐渐增大。随后采取了削坡卸荷、抬高路面等措施,但坡面仍有新的裂缝不断出现,原有裂缝继续扩展,护面墙出现裂缝,公路内侧路基隆起,滑坡产生进一步的活动变形。2003 年采用了水平排水孔,对该滑坡进行深部排水治理,最深水平排水孔达 120m(见图 1.3),初时排水效果良好,滑坡变形得到了有效遏制,但随着时间的推移,排水孔出水量逐渐减小,排水效果不再明显。2005 年,坡体上又出现了部分新的裂缝,原有裂缝局部再次变形,公路边沟变形、路面隆起。最后花费巨额资金,采用地下排水洞和抗滑桩相结合的方法才控制了该滑坡的变形发展。



图 1.2 浙江省龙游县渡贤头村滑坡的地貌环境

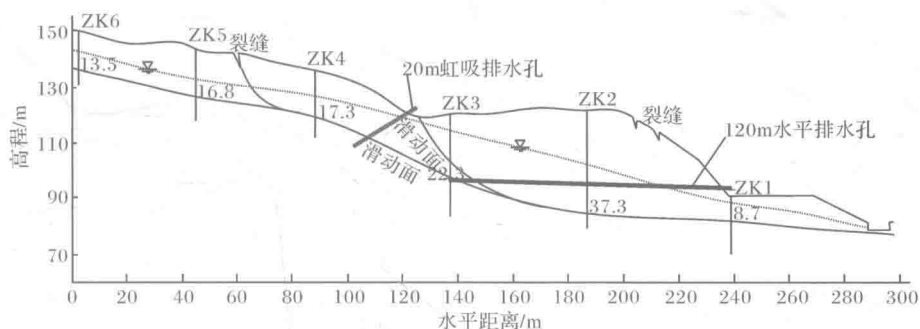


图 1.3 滑坡地质剖面及排水系统布置图

渡贤头村滑坡是典型的降雨诱发型滑坡,其变形发展与降雨关系极其密切,变形加速总是发生在经历了一段时间的持续降雨之后,在相对于旱季节滑坡又恢复稳定。在滑坡治理设计期间,就充分认识到该滑坡治理应该优先采用排水措施,但排水工作的实施却面临很大的困难,事实上,许多滑坡排水都会遇到相似的困难。在渡贤头村滑坡排水中,采用现有排水措施的困难主要表现为:

(1) 地表截排水沟:由于地表岩土的强大渗透性,基本起不到截排降雨入渗的作用,而且滑坡的降雨入渗汇水区在滑坡体后缘广大的斜坡区,后缘的地下水入渗才是导致滑体地下水位上升的关键因素,地表截排水沟的作用非常有限。

(2) 排水盲沟:如图 1.3 所示,即使斜坡上部堆积体厚度较小的 ZK6 钻孔,松散堆积层厚度也达 13.5m,勘探期间地下水埋深大于 7m,排水盲沟需要开挖的深度很大,工程造价将很高,更主要的问题是施工开挖安全性无法保证,很难采用排水盲沟达到排水目的。

(3) 水平排水孔:为了有效降低地下水位,渡贤头村滑坡治理工程采用了水平排水孔(胡启芳,2009),施工的水平排水孔进入滑面以下,如图 1.3 所示,采用上倾 5% 的坡率,孔深 80~120m,成孔之初排水效果良好,但经历一段时间后,就因为排水孔堵塞而失效,导致滑坡再次复活。

(4) 井点抽水:对渡贤头村滑坡采用滑坡中部井点排水,显然也是可行的方案,钻孔深度不会超过 20m,只是作为永久性工程,井点抽水需要动力且管理十分困难。

考虑到渡贤头村滑坡面临的困难,在经历水平排水孔排水失效后,工程上不得不采用地下排水洞系统,才使滑坡恢复到稳定状态。

1.2 虹吸原理

虹吸是一种利用液面高度差的作用力推动液体流动的物理现象,如图 1.4 所

示。先将液体充满一根 U 形管,然后将其一端置于装满液体的容器中,另一端置于低于该容器液面高程的位置,容器内的液体就会持续通过虹吸管从液面高的容器内流向液面低的容器内,直到 U 形管两端的液面高度相同。虹吸的实质是因为重力和分子间黏聚力而产生液体流动。虹吸管内顶点液体在重力作用下向低位管口处移动,产生负压导致高位管口的液体被吸进管内并流向顶点,从而使液体源源不断地流入低位置容器。

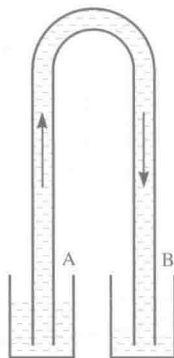


图 1.4 虹吸现象

人们很早就发现了虹吸原理,并开始在日常生活中应用。应用虹吸原理制造的虹吸管,在中国古代称“注子”、“偏提”、“渴乌”或“过山龙”。东汉末年出现了灌溉用的渴乌。西南地区的少数民族用一根去节弯曲的长竹管饮酒,也是应用了虹吸原理。宋朝曾公亮《武经总要》中,有用竹筒制作虹吸管把峻岭阻隔的泉水引下山的记载。中国古代还应用虹吸原理制作了唧筒,它是战争中一种守城必备的灭火器。宋代苏轼《东坡志林》卷四中,记载有四川盐井中用唧筒把盐水吸到地面的案例。

当前对虹吸现象已经有很明确的认识,虹吸现象是液态分子间引力与位能差所造成的,即利用大气压力,将液体往上压后再流到低处的一种现象。在大气压力相同的情况下,由于液面存在高差,液体进口管端压力大于出口管端压力,导致液体在压力差作用下流动,容器间的液面变成相同高度时,液体便会停止流动。由图 1.4 可以看出,当容器 A 液面高于容器 B 液面,且虹吸管内充满液体时,受液体重力作用,虹吸管顶点处的压力下降,而容器 A 液面处于大气压力作用下,从而使管口和管顶有一个明显的压力差,驱动容器 A 的液体向管内流动。考虑重力影响,一个标准大气压为 101.325kPa ,水的容重为 9.8kN/m^3 ,在标准大气压条件下,容器 A 内的液面距离顶点的高差不能大于 10.336m ,否则水流不能越过顶点,就不能启动虹吸。

山区坡面的大气压力会随高程增加而有所下降,虹吸的最大跨越扬程将小于

10.336m,不同高程对应的最大跨越扬程如表 1.1 所示。当虹吸启动后,虹吸过程进入一个稳态流动过程。由于 A、B 之间的液面高差,两侧的虹吸管末端有一个压强差形成驱动力,使得容器 A 的液体向容器 B 流动,不考虑沿程水头损失和局部压降,理想状态下,当两侧液面持平时,虹吸现象停止。通过对虹吸现象的描述,我们知道要保证虹吸过程的持续进行,必须满足三个基本条件:

- (1) 保证虹吸管顶部处于低压状态,即虹吸管内不能积聚过多的空气。
- (2) 虹吸管顶点距离进水容器液面的高度,不能超过当地大气压所能维持的水柱的高度。
- (3) 出水口液面高度必须低于进水口液面高度。

表 1.1 不同高程大气压折算水柱高度

海拔高度/m	200	500	1000	2000	3000
大气压力/mH ₂ O	10.09	9.74	9.16	8.16	6.97

1.3 虹吸排水的优势

虹吸具有免动力实现水体的高效跨越输送特征,而且流速和流动过程由液位变化自动控制,虹吸流量随坡体地下水位上升而加大,这些物理特性非常适合坡体地下水位控制的需要,且具有绿色环保和经济性好的优势,应该成为滑坡排水工程的主要手段。相比于传统排水方式,斜坡虹吸排水具有明显的优势:排水孔布置方便、集水能力强、截排水效果好、需要的钻孔长度小、工程建设速度快等。因此,应用虹吸排水方法可以实现快速、经济、有效排水的目标。

斜坡表层岩土往往结构松散,降雨容易入渗,地表截排水系统一般只是拦截地表径流,虹吸排水则可以有效排除入渗到斜坡岩土中的地下水,克服了降雨入渗水的拦截困难问题,对防止地下水位上升将更有效。事实上,大量斜坡潜在滑坡区的地下水是来自斜坡后缘坡体的入渗,如图 1.2 和图 1.5 所示,对于这类潜在滑坡问题,在斜坡工程区修建地表截排水沟,对拦截降雨入渗地下水基本没有什么作用。但采用虹吸排水方法在潜在滑坡后缘进行截排地下水,就可有效降低潜在滑坡区的地下水位。如图 1.6 所示的斜坡,不排水的地下水位如图 1.6(a)所示,潜在滑坡区地下水位较高,可能导致滑坡启动,但进行虹吸排水后,坡体的地下水位如图 1.6(b)所示,将使斜坡处于稳定状态。

虹吸排水不同于水平排水孔,虽然两种排水方法均采用了钻孔深入坡体内部,排出深部地下水,但水平排水孔依靠水的重力势能,使地下水沿缓倾坡外的水平孔流动,由于水力坡度小,流动水中的细小颗粒容易沉积并最终堵塞排水孔,而虹吸排水以细管流的形式排水,水的流动速度大,能够携带细小颗粒流出排水孔,

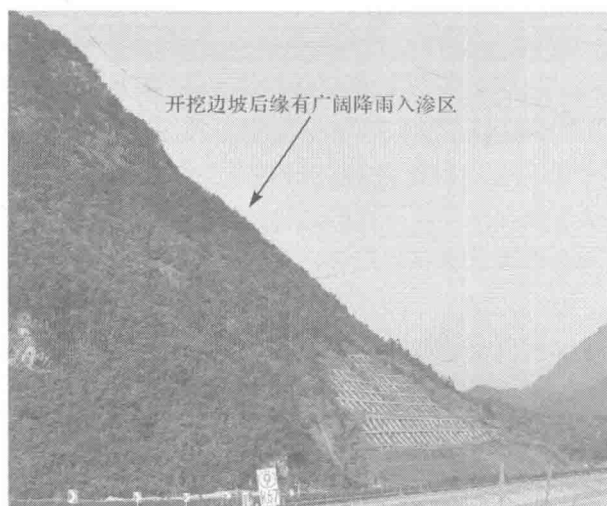


图 1.5 潜在滑坡区后缘广阔的降雨入渗区

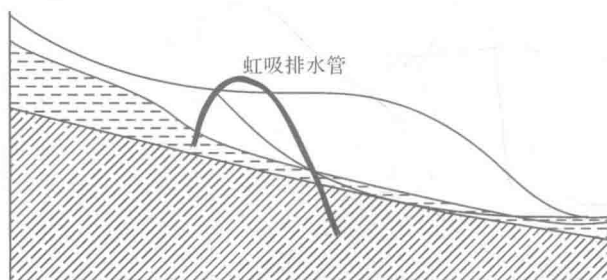
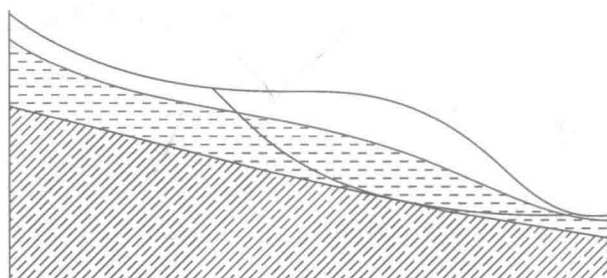


图 1.6 虹吸排水能有效降低潜在滑坡区的地下水位

从而避免排水系统的堵塞。同时,下倾的虹吸排水孔具有更好的集水能力,如图 1.7 所示,虹吸排水孔四周的地下水均可进入,而水平排水孔只有钻孔高程以上的地下水可以进入,且在地下水沿水平排水孔外流的过程中可能回流到坡体。与水平排水孔相比,虹吸排水孔的最大优势还在于大大减小了钻孔长度,如图 1.7 所示的陡倾斜坡,实现相同的地下水拦截深度,虹吸孔的深度为 9.8m,而水平孔的深度为 15m,对于缓倾坡,这种优势将更为显著,图 1.3 所示的龙游县渡贤头村滑坡,如果采用虹吸排水系统,在滑坡中后部设置虹吸排水孔,排水孔的深度不会超过 20m,远小于水平排水孔深度(120m),将可以极大地降低排水孔施工成本。另外,斜坡地形条件复杂,各种截排水措施的实施均可能受到地下条件的制约,但虹吸排水孔布置则容易实施。

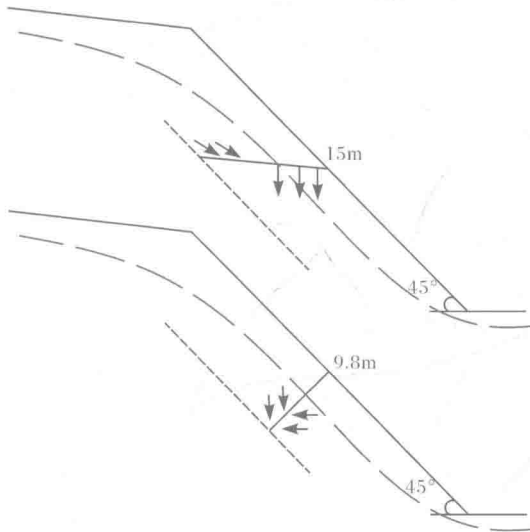


图 1.7 下倾虹吸排水孔具有更好的集水能力

虹吸排水具有诸多优势,但也有诸多制约虹吸排水应用的不利因素。

1.4 斜坡虹吸排水发展现状

将虹吸应用于斜坡排水,至今已有 30 年的发展历史,其间参与研究的人员并不多。国际上对斜坡虹吸排水方法进行系统研究的有法国学者 Gress 团队,他们首先认识到溶于水的空气在虹吸过程中会析出,形成的气泡在浮力作用下会在虹吸管的顶部积累,如果任其发展就会导致虹吸断流。因此,Gress(1991)提出在虹吸出水口设置扰流系统,利用可上下转动的刚性管产生出水口高度的周期性改变,使虹吸管的水流速度产生波动性变化,将虹吸管内气泡排出。该技术于 1991

年获得美国发明专利授权,利用该专利技术建设的斜坡虹吸排水系统,取得了成功应用。1992年,Gress首次发表了“虹吸排水”一文,介绍了法国第戎(Dijon)附近一处公路滑坡于20世纪80年代末采用虹吸排水取得了预期的效果,使路面以下地下水位埋深由2m降低至8m,从而保证了公路稳定。运动性器件需要维护的特点使得该虹吸排水系统存在致命缺陷。

由于虹吸最大跨越高度为当地大气压的水柱高度,一般地区约为10m,大量滑坡的地下水位埋深可能大于10m,在此情况下,简单的虹吸就无法工作。为了实现深部排水,Gress研究团队在利用虹吸排水技术优势的基础上,发展了结合电子气囊泵(electropneumatic pumps)的虹吸排水方法。当地下水位上升时,地下水通过置于钻孔内的泵腔底部单向阀进入,泵腔内水位由智能传感器感知,当水位上升到腔顶时,发送信号启动空气压缩机,把高压空气压入泵腔,推动腔内的水经由腔内管流向顶部单向阀后进入虹吸管,并由虹吸管排出到地表。当地下水降深在坡面以下小于11m时,通过虹吸管直接排水;如果大于11m时,则用电子气囊泵的空气压力,把地下水压入虹吸管排出到地表。

基于虹吸排水方法研究和扰流系统及电子气囊泵装置,Gress研究团队先后对多处滑坡灾害进行了排水应用(Bomont,2008)。英国怀特岛一古滑坡由于海岸侵蚀以及高地下水位而复活(Gillarduzzi,2008),2004年采用了125个虹吸排水孔和35个电子气囊泵虹吸排水孔,改善了滑坡稳定性。2000年在里昂南部地区发生约30m深、300m宽、方量达到120万 m^3 的滑坡(Mrvík et al.,2012),其后清坡60万 m^3 ,但监测结果表明坡体仍有变形,2006年安装了47套电子气囊泵虹吸排水孔,使地下水位从0~8m降低到11~15m,使滑坡恢复稳定。

张永防研究团队在我国最早开展了斜坡虹吸排水方法研究,在1996年湘黔线K93路堑滑坡整治施工期间,进行了滑坡浅表部虹吸排水(张永防等,1999),采用井距12m的竖直虹吸排水井,降低浅层滑坡滑动面以上粉砂类以及砂岩类岩层的地下水。在集排水井的虹吸管出口处安装高压手动水泵,用于定期虹吸启动。1997年3月1日开始形成虹吸排水,最高时11个虹吸孔的排水量为 $0.139\text{m}^3/\text{d}$ 。该滑坡雨季时地下水位在坡面以下4~5m,利用虹吸排水降低地下水位至7~8m,地下水位降低幅度约3m。使得在雨季时作用在挡土墙上的作用力减小而使挡土墙趋于稳定,达到了预期目的,存在的问题是需要专职人员进行检查和雨季前的虹吸恢复工作。期间配合滑坡虹吸工程实践,张永防研究团队对虹吸排水系统的相关问题进行了研究(张永防,1999),完成了虹吸排水形成和恢复方法的研究和试验,认为虹吸排水适合于排除埋藏较浅的地下水($\leq 8\text{m}$),虹吸管宜采用直径10~40mm的镀锌水管,保证进水口和出水口常年都在水中是保证虹吸作用恢复状态和动态平衡状态较好的虹吸管路结构形式。

随后的斜坡虹吸排水研究较少,舒群等(2005)对虹吸法排除滑坡深层地下水