

METHOD OF
INFLATABLE DRAINAGE
IN SLOPE

边坡充气 截排水方法

孙红月 谢 威 杜丽丽 尚岳全◎著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

边坡充气截排水方法 / 孙红月等著. — 杭州: 浙江大学出版社, 2019.12

ISBN 978-7-308-19693-2

I. ①边… II. ①孙… III. ①滑坡—排水—灾害防治—技术方法 IV. ①P642.22

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第241471号

边坡充气截排水方法

孙红月 谢威 杜丽丽 尚岳全 著

责任编辑 张凌静

责任校对 汪志强 陈静毅

封面设计 续设计-雷建军

出版发行 浙江大学出版社

(杭州市天目山路148号 邮政编码310007)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

排 版 杭州兴邦电子印务有限公司

印 刷 虎彩印艺股份有限公司

开 本 710mm×1000mm 1/16

印 张 13

字 数 224千

版 印 次 2019年12月第1版 2019年12月第1次印刷

书 号 ISBN 978-7-308-19693-2

定 价 65.00元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社市场运营中心联系方式: (0571) 88925591; <http://zjdxcsb.tmall.com>

内容简介

边坡充气截排水是一种新技术,以快速控制潜在滑坡区地下水位上升为目标。该技术利用钻孔向坡体内充气,改变边坡部分区域岩土体饱和度和地下水渗流方向,形成非饱和阻渗区,减少边坡后缘地下水流入潜在滑坡敏感区。边坡充气截排水技术具有布孔位置选择方便和经济性好的优势,可望成为滑坡截排水的主要方法之一。

本书以岩土体的透气特性和气驱水理论研究为基础,以高压气体在坡体环境中的扩散方式及其影响因素研究为重点,以压入气体对岩土体渗透性和对渗流场的改变作用研究为核心,探讨充气截排水技术的基础理论问题,着眼于开拓滑坡充气截排水新方法,解决充气截排水技术在滑坡治理工程中应用的可行性问题。本书可供滑坡地质灾害防治领域的工程技术人员和大专院校相关专业师生作为边坡截排水技术研究和学习的参考。

前 言

降雨是诱发滑坡的主要因素,大量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的状态。它们的变形动态受降雨影响较大。近百年来,全球范围内发生的灾难性崩滑地质灾害,约80%与气候条件直接或间接相关,约55%直接由长期持续强降雨或突发性特大暴雨诱发。降雨强度和前期降雨积累程度决定滑坡的启动时间,岩土渗透率分布决定许多斜坡的破坏特征。因此,控制坡体地下水位上升,对滑坡防灾具有重要作用。许多滑坡的地下水主要来源于降雨形成的丰富的后缘地下水入渗。因此,拦截坡体后缘的地下水入渗补给,对此类滑坡防治具有重要的意义。

本书讨论一种截排坡体地下水的主动方法,即在潜在滑坡区外围或者在滑坡区的中上部,钻探形成压气孔,向坡体压入高压气体,利用气驱水技术形成非饱和区,降低坡体的含水量和渗透性,降低坡体地下水位和减少地下水流向潜在滑坡区。通过理论分析、模型试验和数值模拟,论证了对土体充气排水和充气阻渗截水的可行性,揭示了充气过程中地下水位的变化规律、非饱和阻水区的形成机理及气水两相流特征,研究了充气压力、充气位置、土体渗透性等关键参数对截排水效果的影响,探讨了土体的充气破坏机理,为边坡充气截排水技术的推广应用奠定了理论基础。

本书是课题组成员集体研究的成果总结。感谢课题组研究生刘长殿在土柱的充气阻渗试验研究、钱文见在边坡充气渗流特征及截排水影响因素模拟的研究、余文飞在边坡充气截排水模拟的研究、陈永珍在工程滑坡充气截排水数值模拟分析、江海华在充气截排水可能引起的边坡破坏方式分析等方面的重要贡献。特别感谢尚岳全教授在理论方法研究、模型试验和数值模拟研究技术方案制定、研究成果分析总结等方面给予的指导和帮助。感谢课题组研究生潘攀、魏振磊、康剑伟、安妮、张文君、陈晓辉、王翔宇、梅成、吴梦萍、吕俊俊等等相关试验研究中作出的贡献。

边坡充气截排水是一项新技术。通过大量模型试验、数值模拟和理论分析工作,论证了技术方法的可行性,具有主动截排水和快速形成截水帷幕及实施

设备简单等优势,并且经济性好、施工建设速度快、对斜坡形态改变小,所以积极推进充气截排水技术走向成熟并运用于工程实际,对降雨型滑坡的治理意义重大。限于著者水平,书中缺点和错误在所难免,恳请读者批评指正。

孙红月
于浙江大学

目 录

第1章 绪 论	1
1.1 边坡截排水的意义与存在的问题	1
1.2 压缩空气在工程中的应用现状	3
1.2.1 含水层型地下储气库	3
1.2.2 压气新奥法隧道施工	4
1.2.3 地下水曝气法	5
1.2.4 空气注入技术治理液化	6
1.3 边坡充气截排水方法	6
第2章 充气截排水方法的基础理论	9
2.1 非饱和土的渗透特性	9
2.1.1 非饱和土的土-水特征曲线	9
2.1.2 非饱和土的渗透系数函数	11
2.2 入渗过程中的气体阻渗机理	13
2.2.1 降雨入渗过程	13
2.2.2 入渗过程中的气体阻渗机理分析	14
2.3 充气排水运动机理分析	16
2.3.1 充气排水运动细观机理	17
2.3.2 充气排水运动宏观机理	19
2.4 充气排水压力的确定	20
2.4.1 充气排水渗流理论分析	20
2.4.2 充气排水起始气压力的确定	21
2.4.3 充气排水压力上限的确定	22

2.4.4	充气排水方法的适用性	24
2.5	边坡充气阻渗截水理论分析	25
2.5.1	成层土渗流分析	25
2.5.2	边坡充气阻渗截水分析	26
第3章	土体中充气截排水可行性试验	27
3.1	充气排水可行性试验	27
3.1.1	充气排水试验装置	27
3.1.2	充气排水的可行性分析	28
3.2	饱和土柱充气截水试验	29
3.2.1	充气截水试验装置及试验步骤	30
3.2.2	充气截水效果分析	31
3.3	非饱和土柱充气阻渗试验	33
3.3.1	充气对入渗影响的试验方法	34
3.3.2	入渗现象与湿润锋面发展过程	35
3.3.3	入渗过程中土体容积含水量变化	38
3.3.4	阻渗效果评价	39
3.4	粉质黏土渗透性及导气率物理模型试验	41
3.4.1	土体导气率公式	42
3.4.2	模型试验条件和步骤	43
3.4.3	试验现象和基本认识	47
3.4.4	导气率与饱和渗水系数之间的关系	48
第4章	砂土边坡充气截排水模型试验	52
4.1	砂土边坡充气截水效果分析	52
4.1.1	试验模型及过程	52
4.1.2	充气截水效果分析	56
4.2	砂土边坡最佳充气压力研究	59
4.2.1	试验模型及方法	59
4.2.2	最佳充气压力的试验分析	62

4.2.3	最佳充气压力的数值分析	65
第5章	粉质黏土边坡充气截排水模型试验	74
5.1	充气过程中坡体地下水位的变化规律	74
5.1.1	试验模型与试验方案	74
5.1.2	充气过程中地下水位变化的阶段性	79
5.1.3	初始地下水位对充气过程的影响	84
5.1.4	充气压力对地下水位变化的影响	87
5.2	边坡充气形成非饱和阻水区的过程分析	90
5.2.1	边坡充气模型试验	91
5.2.2	充气非饱和区形成过程分析	93
5.3	非饱和区的长度和宽度对截水效果的影响	98
5.3.1	充气非饱和区长度	100
5.3.2	充气非饱和区宽度	103
第6章	充气过程中气水两相流基本特征数值模拟	107
6.1	气水两相流数值分析基础理论	107
6.1.1	控制方程	107
6.1.2	土水特征函数与渗透系数函数	109
6.2	气体对入渗影响的数值分析	109
6.2.1	不考虑气体影响的降雨入渗分析	110
6.2.2	考虑气体影响的降雨入渗分析	111
6.2.3	考虑气体影响的自由入渗与积水入渗对比	114
6.2.4	不同土体中孔隙气体的阻渗效果	116
6.3	一维土柱中充气截排水方法的数值分析	118
6.3.1	充气对体积含水量的影响	119
6.3.2	充气对孔隙水压力的影响	119
6.3.3	充气对孔隙气压力的影响	120
6.4	边坡充气截排水方法的气水两相流基本特征数值模拟	122
6.4.1	坡体充气数值计算模型	122

6.4.2	坡体充气过程中非饱和区扩展特征	123
6.4.3	非饱和区孔隙气压力的变化规律	125
6.4.4	非饱和区孔隙水流速的变化规律	127
6.4.5	非饱和区孔隙气体流速的变化规律	129
6.4.6	非饱和区体积含水量的变化规律	130
6.5	充气非饱和阻水区的形成机理分析	131
6.5.1	数值分析模型	132
6.5.2	非饱和阻水区形成机理分析	133
第7章	充气截排水影响因素数值模拟	136
7.1	充气位置	136
7.1.1	模型计算参数的反演确定	136
7.1.2	充气点沿渗流方向上的相对位置	138
7.1.3	充气点深度	140
7.2	坡体渗透性	141
7.2.1	渗透系数对截排水效果的影响	142
7.2.2	渗透系数对截排水效果上限用时的影响	143
7.3	土体孔隙率	143
7.3.1	孔隙率对截排水效果的影响	144
7.3.2	孔隙率对截排水效果上限用时的影响	145
7.4	充气压力	146
7.4.1	充气压力对截排水效果的影响	146
7.4.2	充气压力与相应的截排水上限用时的关系	147
7.4.3	渗透性、孔隙率及充气压力对截排水效果影响的对比	148
7.5	充气非饱和区宽度	149
7.6	非饱和土层厚度	152
7.6.1	非饱和土层厚度对允许充气压力的影响	153
7.6.2	非饱和土层厚度对坡体地下水位的影响	155
7.6.3	非饱和土层厚度对地下水渗流场的影响	157

第8章 土体充气变形破坏机理研究	164
8.1 土体充气破坏物理模型试验	164
8.1.1 试验装置及试验步骤	164
8.1.2 单层土的充气变形破坏	166
8.1.3 双层土的充气变形破坏	167
8.1.4 三层土的充气变形破坏	168
8.2 土体充气破坏机理分析	171
8.2.1 土体裂隙扩展理论	171
8.2.2 松散颗粒类土体破坏分析	173
8.2.3 气囊影响区形成机理分析	174
8.3 充气截排水渗流与变形耦合的数值分析	175
8.3.1 控制方程与模型建立	176
8.3.2 坡体非饱和区气水运移过程及变形特征	177
8.3.3 充气压力与坡体变形的关系分析	179
第9章 边坡充气截排水工程实例分析	183
9.1 滑坡概况及成因分析	183
9.2 数值计算模型参数确定	184
9.2.1 模型物理力学参数确定	184
9.2.2 充气压力确定	186
9.3 数值模拟结果分析	187
第10章 结 语	190
参考文献	193

第1章 绪 论

1.1 边坡截排水的意义与存在的问题

降雨诱发滑坡已获共识。降雨强度和前期降雨积累量程度决定了滑坡的启动时间(Rahimi et al., 2011; Ray et al., 2010), 岩土渗透系数分布决定了坡体的破坏特征(Cho et al., 2001; Rahardjo et al., 2010), 降雨量超过阈值时往往在区域上发生大量滑坡。多数滑坡的变形动态表现为雨季时滑动、旱季时又处于相对的稳定状态, 它们的稳定性受地下水位变化影响。降雨向坡体补给地下水, 其水源包括边坡表面降雨入渗和潜在滑坡区后缘地下水入渗, 大多数滑坡降雨入渗的汇水区是在滑坡后缘山坡, 后缘地下水入渗是导致滑坡地下水位上升的关键因素(黄润秋, 2007)。因此, 防止滑坡外围地下水入渗, 对确保滑坡治理工程施工期间的安全和实现滑坡治理的目标具有十分重要的意义。

边坡截排水在滑坡治理过程中具有效果快和费用低的优势。因此, 边坡截排水技术一直受到人们的关注。边坡截排水工程措施经历了从地表到地下、从单一到综合的发展过程。排水工程用于滑坡治理的发展初期是以地表排水为主, 有截水沟、排水沟、疏通自然沟等形式。为提高排水效果, 在工程实践中逐渐引入了地下排水措施, 有盲沟、支撑盲沟、渗沟等。随着人们对排水工程重要性认识的提高, 各种排水工程措施的耦合使用研究日益受到人们的重视, 洞、孔、井相结合的立体排水思想得到了发展, 地下排水洞和水平排水孔得到了推广应用。水平排水孔是一种通过在打设的水平钻孔中安放滤水管, 将滑坡体内的地下水排出以稳定滑坡的方法, 其优点是施工安全、造价低。国外在 20 世纪三四十年代已经开始使用, 我国在 1965 年由铁道部首先应用。由于施工工艺水平的提高, 目前超长水平排水孔得到了推广应用, 并在排水效果的量化研究方面取得了可喜的进步, 在提高排水效率的同时也大大地节省了工程费用。由于水平钻孔容易塌孔和使用过程中容易堵塞, 所以目前的使用范围仍局限于

一些特殊的滑坡治理工程。在各种排水措施中,排水隧洞体系效率最高,对提高滑坡的稳定性起到了很好的作用。许多大型滑坡采用了排水洞排水,如丽龙高速公路的官家村滑坡、杭金衢高速公路K103滑坡、宝鸡簸箕山滑坡、漫湾水电站左岸滑坡等。孙红月等(2008)对杭金衢高速公路K103滑坡的地下水位监测结果分析表明,破碎岩质边坡中采用地下排水隧洞,可有效降低坡体内地下水位。排水洞排水最主要的问题是施工周期长、费用高,不能满足滑坡抢险过程中的排水需要。

当前滑坡的排水措施主要有地下排水洞、水平排水孔、集水井、地表排水沟、排水盲沟和虹吸排水等。这些排水措施大都是利用水的重力势特性,使坡体的地表水和地下水向低水位区排泄。存在的主要问题可总结为:

- 1) 排水措施对坡体的排水环境要求较高,许多边坡往往缺乏有利的地形条件,导致排水措施的有效性难以保证;
- 2) 截排水过程利用地下水的重力势,无法加载提高水力梯度,截排水的速度慢,各排水点的控制区域范围小;
- 3) 至今没有主动的滑坡快速截排水技术措施,无法在面对滑坡险情时经济、快速地形成截排水系统,降低滑坡抢险治理过程中降雨对边坡稳定性的影响。

多数滑坡的治理总是在出现了明显变形破坏的情况下才实施的,如果在治理期间出现明显的强降雨过程,就可能导致治理工程失败。也就是说,许多滑坡治理是一个抢险过程,如图 1.1 所示的是降雨诱发的杭新景高速公路边坡变形破坏,当时不得已采用了占路压脚的临时抢险措施。该滑坡发生在雨季,干旱季节又相对稳定,抢险过程中最怕出现新的连续降雨过程,地表截排水沟又因为坡体表部岩土的强大渗透性而起不到应有的效果。

目前坡体排水技术的被动性和环境条件的制约性,限制了滑坡抢险过程的快速作为,使得滑坡抢险过程有着诸多的无奈,经常听到滑坡治理工程技术人员抱怨一下雨就寝食不安,总是祈求上天别下雨。因此,探索可快速截排地下水入渗



图 1.1 滑坡抢险占路压脚

的技术措施,防止滑坡的启动或者为滑坡灾害处置赢得时间,是当前亟须解决的问题。

1.2 压缩空气在工程中的应用现状

土是三相体,气和水在土体中的分布影响着土的物理力学特性。目前,采用高压充气方式改变岩土体的气、水运动规律和分布,使气体进入饱和土变成非饱和土的研究日益受到人们的重视,并且已经在含水层型地下储气库的建造、压气新奥法隧道施工、曝气法处理土壤及地下水中污染物及空气注入技术治理液化等工程领域得到了广泛应用。

1.2.1 含水层型地下储气库

含水层型地下储气库的存储机理是当天然气气量过剩时,通过加压将多余的气体由气井注入地下含水岩层中,高压的气体将会驱开含水岩层中的水,在需要使用的时候再从气井中采出。含水层型地下储气库是人为地将天然气注入地下合适的地层中而形成的人工气藏,从结构上由三部分组成,即盖层、储气区和底层,如图 1.2 所示。与大型地上储气库相比,地下储气库具有储气量大、安全可靠、受气候影响小、维护管理简单、能合理调节用气不平衡等优点。含水层储气库建设的关键是气驱水的驱动机理,即气水界面的控制。影响气水界面移动的主要因素有地层倾角、渗透率、储层的非均质性、毛细管力和注气速率等。目前,数值模拟已成为指导各种类型储气库的主要手段,而且正逐步与经济分析模型和地质力学模型相结合,达到在不增加储气费用的情况下,提高储库的储存能力和注采应变能力,建立储库优化运行模式,带来更大的经济效益。

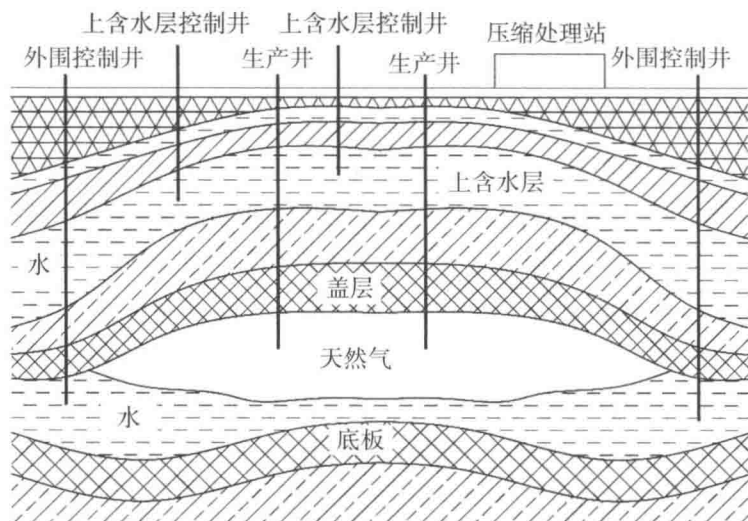


图 1.2 含水层型地下储气库剖面

1.2.2 压气新奥法隧道施工

压缩空气作为一种支护和截水措施,应用于地下水位线以下地层中的竖井和隧道的施工中,已经有一百多年的历史。在欧美、中东等地区及澳大利亚等国家,许多主要的隧道及沉箱工程作业中使用了压气技术。目前,压缩空气与新奥法相结合的压气新奥法,在城市隧道和洞室工程中有着广泛的应用。压气新奥法是在具有压缩空气的环境下按照新奥法的基本原理进行隧道施工;压缩空气的主要作用是保持隧道中空气压力等于地下水压力这一平衡状态,防止围岩中的地下水进入隧道(见图 1.3)。此外,压缩空气还有以下作用:显著减少地面沉降,防止地面以上结构损坏;平衡加在隧道一次衬砌上的部分荷载,降低衬砌成本;对开挖临空面有附加支护作用;流动的压缩空气对降低施工中的粉尘有显著作用,有利于改善施工环境。目前,相关研究多集中于借助数值模拟分析压气过程中土骨架-水-气三相作用机理,注气速率及表面变形等问题上。Snee 和 Javadi(1996)针对压气新奥法隧道施工的空气损失问题建立了一个数值模型,用于预报隧道内的空气损失,并对压气新奥法隧道施工过程中空气流量对土体抗剪强度的影响进行了研究(Javadi 和 Snee, 2001)。刘辉等(2006)采用有限元法模拟了在地下水位以下压气隧道法施工中气体的运移规律。Nagel 和 Meschke(2010)针对压气新奥法隧道施工建立了弹塑性三维有限元模型,对隧

道周围土体的稳定性进行评价,并对掘进面前方隧道地面沉降进行预测。

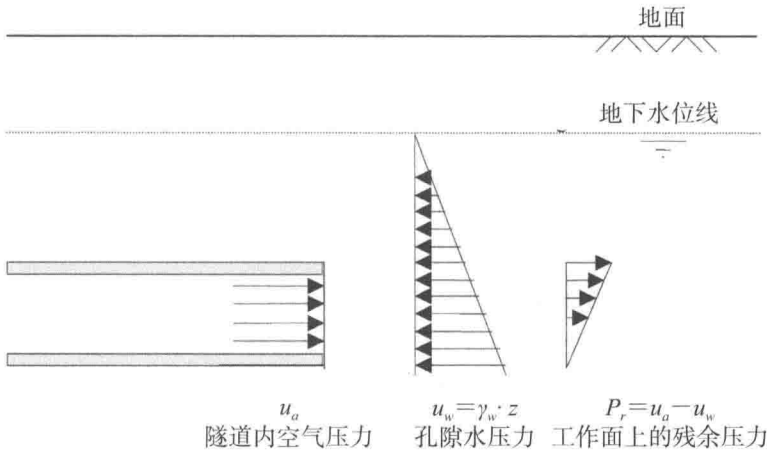


图 1.3 压气新奥法隧道施工图示

1.2.3 地下水曝气法

曝气法是指将空气注入污染区域以下,利用易挥发性有机物质的快速挥发特性及气体浮力作用,通过气泡与污染物的接触将地下水及土壤中的可挥发性污染物带出。目前在工程实践中,对土壤及地下水中易挥发性有机污染物的清除常采用抽气曝气组合清除法。地下水曝气法工作原理如图 1.4 所示。

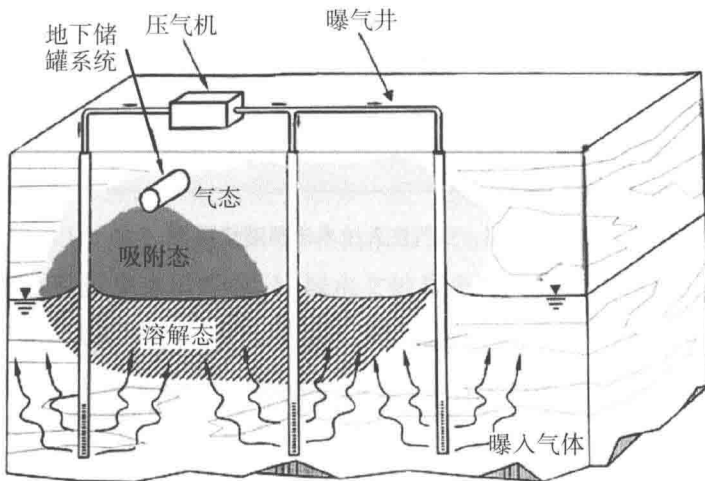


图 1.4 地下水曝气法工作原理

目前,曝气法处理土壤及地下水中有有机污染物的技术已经相当成熟。由于多孔介质的存在,所以很难对曝气过程中的空气流型进行直观的观察,此方法的研究主要是通过数值模拟和物理实验完成。Semer等(1998)对不同曝气压力和空气流量下的气体流型进行了实验室研究;张英等(2003)采用乙炔示踪法来研究在不同渗透率土体和不同曝气流量下气体的流型,对粗砂中污染物的传质过程进行了研究,而且建立了三维空间下的轴对称气体流动模型。随着计算机技术的发展,数值模拟逐步成为分析气、水两相流型以及工程实践中曝气井优化布置研究的主要方法。

1.2.4 空气注入技术治理液化

防止地震引起土壤液化的措施对于缓解液化危害具有重要意义,但应用于现有结构的液化技术大都十分昂贵。空气注入技术可能是一种简单而廉价的液化治理方法。这种方法是将压缩空气注入可能液化的土壤中,如图 1.5 所示,压缩空气使得饱和土变为不饱和土,提高土体的液化强度。研究表明,向地下注入空气可以大大降低底土的饱和度,并使土壤的不饱和状态持续很长时间,而且即使土壤仅有少量的饱和度下降,也会使抗液化能力得到有效提升(Okamura et al., 2006; Yasuhara et al., 2008; Okamura et al., 2011)。

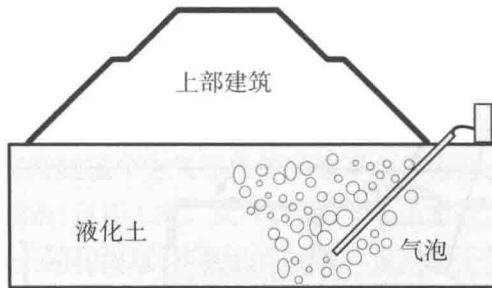


图 1.5 空气注入技术治理液化图示

1.3 边坡充气截排水方法

对于大多数滑坡,降雨入渗汇水区在滑坡体后缘广大的斜坡区内,后缘的地下水入渗才是导致滑体地下水上升的关键因素。针对潜在滑坡体内地下水

主要来源于后缘地下水入渗的此类滑坡,在后缘入渗路径上设置截水帷幕阻止后缘来水入渗到潜在滑坡区,将是一种最快速有效的方法。

基于非饱和土渗透特性及岩土体中气驱水原理的成功应用,我们提出了一种新的截排坡体地下水的主动方法——充气截排水方法。如图 1.6 所示,充气截排水方法是在边坡的中上部潜在滑坡区外围或者在长度较大滑坡区的上部,钻探形成压气孔,通过压气孔向坡体内压入气体,形成经气、水置换的局部非饱和区域。由于土体的渗透性具有随饱和度降低而快速降低的特性,故滑坡后缘非饱和区域将起到减缓上游坡体地下水流向潜在滑坡区的作用,从而降低潜在滑坡区的地下水位,提高滑坡的稳定性,最终实现防止滑坡启动或者为滑坡抢险其他治理工程的实施赢得宝贵时间。

边坡充气截排水方法相比于其他截排水措施具有基本设备简单、施工简单的优势,设备除一般的地质钻机外,需要增加的设备是空压机和配套的柴油发电机(一般也可接入民用电网)及输气管道系统。充气孔可利用已勘探钻探孔或者重新钻孔,将充气管插入钻孔,开启空气压缩机就可以实现截排水的目的。

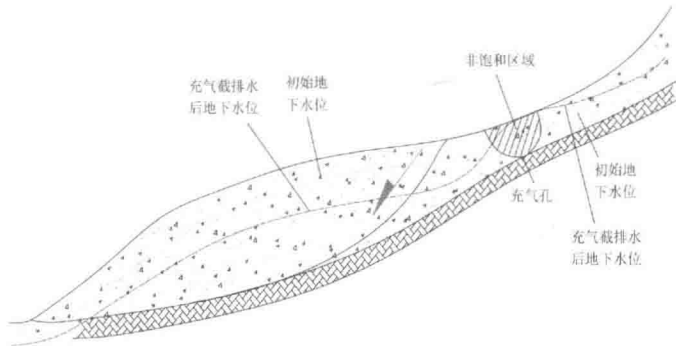


图 1.6 边坡充气截排水方法图示

由充气排水形成的非饱和截水帷幕一般可选择设置在潜在滑坡区的外围,其具体位置应以气体扩散范围不影响到滑坡体为原则。对于一些长度大的滑坡或实施外围截排水有困难时,根据水文地质条件分析和滑坡稳定性计算结果,也可考虑在潜在滑坡区内采用此方法实施截水工程,例如小旦滑坡和上三公路 6# 滑坡等。如图 1.7 所示是瓯青公路小旦滑坡,由于小规模坡脚开挖引起坡体内原有的渗流通道被堵塞而破坏,造成滑坡体内地下水位上升,引发大规模坡体失稳。针对这个滑坡,如果在滑坡体的中上部实施充气排水,使透水性良好的古滑坡堆积 delQ3 土层中形成临时性的气体帷幕(如图中非饱和区