

新世纪学习专著丛书

路基边坡水岩 相互作用机理 及病害防治

徐则民 扬立中 黄润秋 ● 著

西南交通大学出版社



本书得到以下基金资助：

四川省应用基础研究项目——

地质灾害防治与工程地质环境保护国家专业实验室开放基金

路基边坡水岩相互作用机理 及病害防治

徐则民 杨立中 黄润秋 著

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

路基边坡水岩相互作用机理及病害防治 / 徐则民等著.

—成都: 西南交通大学出版社, 2000.3

ISBN 7-81057-435-3

I. 路... II. 徐... III. 铁路路基—边坡—路基加固
IV. U213.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 19007 号

路基边坡水岩相互作用机理及病害防治

徐则民 杨立中 黄润秋 著

*

出版人 宋绍南

责任编辑 李彤梅

封面设计 唐利群

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段 111 号 邮政编码: 610031 发行科电话: 7600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

E-mail: cbs@center2.swjtu.edu.cn

四川省印刷技术协会印刷厂印刷

*

开本: 787 mm × 1092 mm 1/16 印张: 8.75

字数: 206 千字 印数: 1 ~ 500 册

2000 年 3 月第 1 版 2000 年 3 月第 1 次印刷

ISBN 7-81057-435-3 / U · 028

定价: 15.00 元

前 言

受到线形标准的限制,无论是铁路还是公路,除了平原区外,大部分路段都是无法在地面上直接铺筑的,必须对地基进行开挖或填筑,形成路堤或路堑边坡。交通工程建设所面临的重要任务之一,就是保证开挖及填筑形成的大量线状分布的人工边坡及构成地基的天然斜坡能够在一定时期内保持稳定或不发生灾害性破坏。

从严格意义上说,无论是人工边坡还是天然斜坡都是不稳定的,都具有通过变形、破坏来实现降低坡度、坡高和系统能量的趋势,其最终结果是坡度变小,甚至完全被夷平。根据具体条件的差异,边坡的夷平过程可能表现为掉块、坍塌、风化层溜坍及整体性滑坡等,而且这些表现形式可能是交替或重复出现的。从地质历史的角度看,人类是无法阻止边坡的夷平过程的,边坡一旦形成,最终总会消失,然后又形成新的边坡,如此循环往复。尽管边坡的演化、破坏趋势不可扭转,但是,我们可以通过对这一过程的认识,选择适当途径,引导或影响这一过程,达到减缓其演化速率、改变其演化方式或对此过程中可能发生的灾害性事件进行超前预报的目的。

根据边坡发生显著变形的时间、季节和整体性滑坡多发区的地理位置判断,水岩相互作用是路基边坡演化及破坏过程中的最主要机制。对于岩土工程问题,水岩作用可以分为两个方面:一是水岩之间的化学作用,成岩、成矿及水文地球化学等领域对水岩作用的研究涉及的主要是这类作用;二是水岩之间的力学作用,岩土工程领域研究较多的是这类作用。在边坡演化及变形破坏过程中,地下水的化学及力学作用同时存在,本书将它们合称为广义水岩相互作用。

水岩之间的化学作用具有显著的长期性,其结果是:第一,在降低结构面及岩体强度的同时,削弱岩块之间的联系,增加岩块的自由度及活动度,加快岩体向碎裂—松散介质转化的进程,从而使岩体的强度和变形特性发生根本性变化;第二,由于化学作用主要发生于不同成因、不同规模的结构面及其附近,因此,可以显著提高岩体的有效空隙度,增强其贮水和导水能力,从而提高岩体应力场及稳定性对渗流场变化的敏感度。化学作用是地下动态剧变诱发岩体失稳的前提与基础。水岩之间的力学作用对边坡稳定性的影响主要是通过地下水水量动态剧变使边坡应力环境恶化来体现的。通常情况下,边坡岩土体中渗流场与应力场通过某种方式维系着一种动态平衡关系,当其中任何一方发生变化时,另一方都会通过它们之间的联结方式自动调整,以达到新的平衡。如果某一方的变化超过一定幅度,这个平衡体系就有可能被破坏,从而诱发边坡病害。

本书以成渝铁路 K442 斜坡变形体为依托,对我国南方铁路沿线广泛分布的风化壳型层状岩质路基边坡演化过程中的广义水岩相互作用进行了多尺度的深入研究,并以此为基础,开发出一套效果良好、成本低廉的边坡维护(滑坡防治)方案。

全书共六章,第一章简要介绍了路基、路基边坡、路基边坡演化及相关病害的研究现状;第二章系统介绍了地下水促进边坡演化的化学机理及量化评价方法;第三章论述了风化壳型路基边坡渗流场和应力场对不同降雨过程的水力学及力学响应的物理模拟方法;第四、五章介绍了边坡渗流场和应力场耦合模拟的基本理论、基本方法及地下水富集边坡稳定性评估

的离散化方法；第六章介绍了以路基边坡广义水岩相互作用理论为基础开发出的一套边坡维护方案。

本书的主体为第一作者在西南交通大学的博士学位论文，后来，在成都理工学院从事博士后研究期间又进行了一些补充和完善。在撰写过程中，得到中国工程院王梦恕院士、中国科学院袁道先院士、西南交通大学关保树教授、蒋爵光教授以及成都理工学院张倬元教授、王士天教授、孔得坊教授、聂得新教授、刘汉超教授等的悉心指导，在此向他们表示忠心感谢！

西南交通大学刘丹副教授、郑黎明副教授及黄涛副教授参与了部分现场工作；同时，在本书的撰写过程中，也曾和他们进行过多次有益的探讨，在此深表谢意。

徐 则 民

1999 年 10 月于成都理工学院

目 录

1 绪论	1
1.1 远距离陆路交通工程及其病害	1
1.2 路基、路基边坡及其演化	3
1.3 路基边坡演化及灾害预报的研究现状	5
1.3.1 地下水对边坡固相介质的弱化效应	5
1.3.2 边坡稳定性评估中水力学因素的纳入	6
1.3.3 地下水影响下边坡变形破坏的物理模拟	8
1.3.4 区域性滑坡预报	8
2 边坡岩体腐蚀与准连续介质演化	10
2.1 K442 斜坡变形体水文地质条件的精细描述	11
2.1.1 边坡介质的水力传导特性	12
2.1.2 地下水的动态与补给	16
2.2 边坡水岩体系的质量传输模拟研究	22
2.2.1 溶液状态的热力学计算	22
2.2.2 水岩交换相的确定	24
2.2.3 质量反应平衡模拟	26
2.2.4 模拟结果的辨识(验证)	29
2.3 地下水对边坡岩体的腐蚀强度评价	31
2.3.1 边坡地下水总径流量的计算	31
2.3.2 地下水对边坡岩土的年淋溶总量	32
2.3.3 结 论	33
2.4 岩体腐蚀与岩体强度衰减	33
2.4.1 岩体腐蚀与岩块强度衰减	33
2.4.2 岩体腐蚀与结构面强度衰减	34
2.5 快速饱水对腐蚀砂岩强度的影响研究	36
2.5.1 腐蚀砂岩岩块强度对含水率的敏感度研究	36
2.5.2 快速饱水对腐蚀岩体结构面强度的影响研究	40
2.5.3 岩体腐蚀及快速饱水对岩体强度的综合影响	41
2.6 结 论	44
3 边坡应力场及形变场突变的物理模拟	46
3.1 原型特征	46
3.2 相似条件	47
3.3 模型材料和模型制作	47
3.4 试验过程及结果	49

3.5 结 论	54
4 EPM 中渗流场应力场的平衡模拟研究	55
4.1 裂隙岩体中地下水渗流的数学模型	55
4.1.1 岩体渗流模型判别标准及 REV 尺寸研究	55
4.1.2 裂隙岩体的渗流模型	59
4.1.3 波动边界问题	60
4.2 K442 边坡岩体渗流场研究	62
4.2.1 浸润曲面边界的预报	62
4.2.2 固定边界内三维稳定渗流问题的求解	65
4.3 渗流场应力场相互关系中的几个基本问题	67
4.4 承压含水系统中渗流场应力场的平衡模型	69
4.4.1 完全的封闭体系	69
4.4.2 开放的承压含水体系	70
4.5 潜水含水系统中渗流场应力场的平衡模拟	72
4.5.1 渗流场相对快速变化条件下的双场平衡模拟	72
4.5.2 应力场相对快速变化条件下的双场平衡模拟	73
4.6 渗流场剧烈变化条件下 K442 边坡的双场平衡模拟	74
4.6.1 固定边界内渗流场的数值模拟	75
4.6.2 单元动水压力计算	76
4.6.3 应力场的数值模拟	80
5 水岩综合体系的静力学平衡与边坡稳定	85
5.1 地下水影响边坡稳定性的概念模型	85
5.2 地下水渗流影响下裂隙化岩质边坡的稳定性评价	86
5.2.1 稳定性分析模型	86
5.2.2 边坡地下水浸润曲面预报与柱体动水压力计算	88
5.2.3 饱水条件下潜在滑动面的 C 、 ϕ 值	89
5.2.4 K442 边坡稳定性预报	90
5.3 结 论	92
6 基于边坡演化及失稳机理的滑坡防治方案研究	93
6.1 滑坡防治的研究现状	93
6.2 边坡防渗屏障的实验研究	94
6.2.1 砂粘土最佳防渗方案的实验研究	94
6.2.2 Na_2CO_3 溶液的最佳浓度	103
6.2.3 用 Na_2CO_3 处理砂粘土的副作用评价	105
6.3 Na_2CO_3 溶液的防渗机理研究	108
6.3.1 Na_2CO_3 溶液对粘土矿物的活化能力试验	108
6.3.2 Na_2CO_3 溶液在干燥粘土中的渗透试验	109

6.3.3 某些普通钠盐的防渗效果	110
6.3.4 某些碱性溶液的防渗效果	110
6.3.5 Na_2CO_3 溶液引起的粘土矿物及土体显微结构变化	111
6.3.6 成都粘土的防渗研究	114
6.3.7 主要结论	122
6.4 防腐屏障的实验研究	123
6.4.1 酸性渗入水腐蚀边坡岩土体的模拟实验	124
6.4.2 防腐屏障模拟实验	125
6.5 结 论	127
参考文献	129

1 绪论

1.1 远距离陆路交通工程及其病害

铁路和公路作为现代化的远距离陆路交通工具,在我国国民经济发展中起着重要的作用。

从 1881 年在唐山至胥各庄之间开始修建第一条铁路到 1949 年的近 70 年间,我国共修建铁路 2.2×10^4 km。50 年代中后期,是我国解放以来铁路建设的第一次高潮,新建线路多、速度快,如丰沙线、兰银线、成渝线、黎湛线、宝成线、宝兰线、包兰线、鹰厦线及川黔线等。“文化大革命”期间,为了备战以及政治上的需要,掀起了我国铁路建设的第二次高潮,这一时期修建了成昆线、襄渝线、贵昆线、湘黔线、黔桂线、焦枝线、枝柳线等铁路。

80 年代至今,由于国民经济的高速发展,我国铁路建设又进入了一个新的高潮时期。目前全国铁路运营里程已达 6.6×10^4 km (含合资、地方铁路),复线率 33%,电气化率 20%。尽管如此,铁路建设不仅和世界水平有很大差距,而且还不能适应我国国民经济发展的需要,还有很大的发展空间。

(1) 尽管经历了 120 年的发展,但至今人均拥有铁路仅为 5.5 cm,不及一根香烟长,在世界上排在 100 位之后。

(2) 布局不合理,铁路网分布极不平衡,东部多,西部少。西部地区(西南、西北)9 省区占国土面积的 54.7%,每 10^4 km² 拥有铁路 23 km,仅为全国平均水平的三分之一。

为了保持铁路行业的健康发展,满足国民经济发展的需要,国家在“九五”期间投资 2500 亿人民币,加快铁路建设,作出“决战西南、强攻煤运、建设高速、扩展路网、突破 7 万”的总体规划与部署;同时在“九五”规划和 2010 年远景目标纲要中还明确指出:“…下个世纪前十年,着手建设京沪高速铁路,进行进藏铁路的论证工作;重点加快铁路高速客运和重载技术步伐…”;铁道部《关于九五期间全路提速初步设想》中提出了不同条件下的提速目标值,繁忙干线有条件提速地段快速列车最高时速 140 km,其它地区旅客列车为 80~100 km,货物列车最高时速 80~85 km。

公路在我国中短途运输中一直居于主导地位,目前全国公路通车里程已经达到 130×10^4 km,其中国道主干线 10.7×10^4 km。1984 年中国第一条高速公路——全长 375 km 的沈大高速公路正式开工建设;1988 年全长 18.5 km 的上海—嘉定高速公路通车,标志着中国高速公路通车里程实现了零的突破;进入 90 年代,高速公路真正跨入高速发展的阶段,随着沈大、京津唐、京石、成渝、沪宁、杭宁(波)、济青、广深及南(宁)

钦（洲）防（城港）等高速公路的相继开通，截至 1999 年 7 月，全国高速公路通车里程已达到 8 733 km，跃居世界第 8 位，在建高速公路项目总里程 126×10^4 km，取得了举世瞩目的成就。

尽管我国高速公路建设在过去 10 余年内取得了巨大成就，但与发达国家相比还有很大差距，距离形成高效的公路运输网络体系还有很大距离。一是数量少，按每 10^4 km² 所具有的高速公路计算，德国为 313.90 km，美国为 94.69 km，加拿大为 16.62 km，我国仅为 9.1 km；在我国 10.7×10^4 km 国道中，已通车和在建高速公路仅占 20% 左右。二是未成网，目前已经建成的高速公路多数都是省际的，一般是以省会城市为起点向省内主要城市辐射，跨省高速公路还很少（1993 年通车的全长 143 km 的京津唐高速公路是中国第一条跨省高速公路），更未形成全国性的大动脉。我国公路规划中的“两纵两横三条线”，即：同江至三亚、北京至珠海、上海至成都、连云港至新疆霍尔果斯的“两纵两横”及北京至上海、北京至沈阳和重庆至三亚“三条线”（总长 1.8×10^4 km）中还没有一条贯通；除此之外，在国道网中还有 2.5×10^4 km 年平均昼夜交通量超过 8 800 辆的路段需要修建高速公路（一般地说，现有日交通量大于 5 000 辆，交通量增长又较快的路段就需要修建高速公路）。

21 世纪将迎来交通工程建设的新高潮，而且这一高潮不仅仅是数量的增长，更重要的是质量的提高。铁路高速化、重载化，公路高速化将成为未来陆路交通工程发展的主流。

交通工程作为一种带状结构物，都是修建在地表及近地表的岩土工程环境之中。无论是什么等级、什么形式的工程都必然对地质环境造成扰动，而环境本身也必然对这种扰动作出反应，反应的形式和规模取决于工程对环境的扰动程度，而其反应形式就是通常所说的工程病害。

对于已经投入运营的交通工程来说，明线路段的主要病害形式可以分为边坡病害和基床病害两大类，前者包括滑坡、泥石流、崩塌落石等，后者包括翻浆、下沉变形、道渣陷槽等；隧道的主要病害包括漏水、隧底翻浆冒泥、仰拱破裂及洞门塌方等。相比之下，明线病害要比隧道病害普遍得多，也严重得多。

据统计，宝成线宝广段全长 247 km，自 1957 年交运至 1984 年，地质灾害整治费用就已达 3.85 亿元，平均 110.95 万元/km，已达该线修建造价的 93.3%；陇海线宝天段全长 147 km，1945 年交运，从 1949 到 1984 年，整治地质灾害的费用达 3.14 亿元，平均 213.6 万元/km，为修建造价的 4.3 倍。而上述病害主要都是以边坡破坏为主的明线病害。

降低工程对环境的扰动程度一直是人们追求的目标，因为，这样不仅可以减轻运营后的病害程度，而且可以有效降低工程造价，人们为此还总结了诸如“宁填勿挖”、“宁作栈桥，不作深挖”及“山可凿不可挖”等成功经验。实现这一目标的最理想路基形式是采用低路堤，这在地势平坦且地基稳定的平原区是能够实现的。但是，由于我国是一个多山的国家，山岭重丘区占国土面积的三分之二，而且平原地区的路网布局已经接近饱和，加之受到技术经济条件的限制，“逢山打洞”还不能完全实现，因此，无论是在过去还是今后相当长的时期内，特别是在未来的高速铁路和高速公路建设中，为了达到要求的平、纵断面线形标准，路基土石方施工中的深挖、高填仍是不可避免的。因此，深刻认识病害的发生机制，并采取合理有效的防治措施是十分重要的。

1.2 路基、路基边坡及其演化

路基作为轨道和路面的基础,无论对于一般的等级铁路和公路,还是对高速铁路和高速公路,均具有重要的作用。除桥梁、隧道外,明线路基基本可以分为填方路基(图 1.1a)、挖方路基(图 1.1b)和半填半挖路基(图 1.1c)三大类。

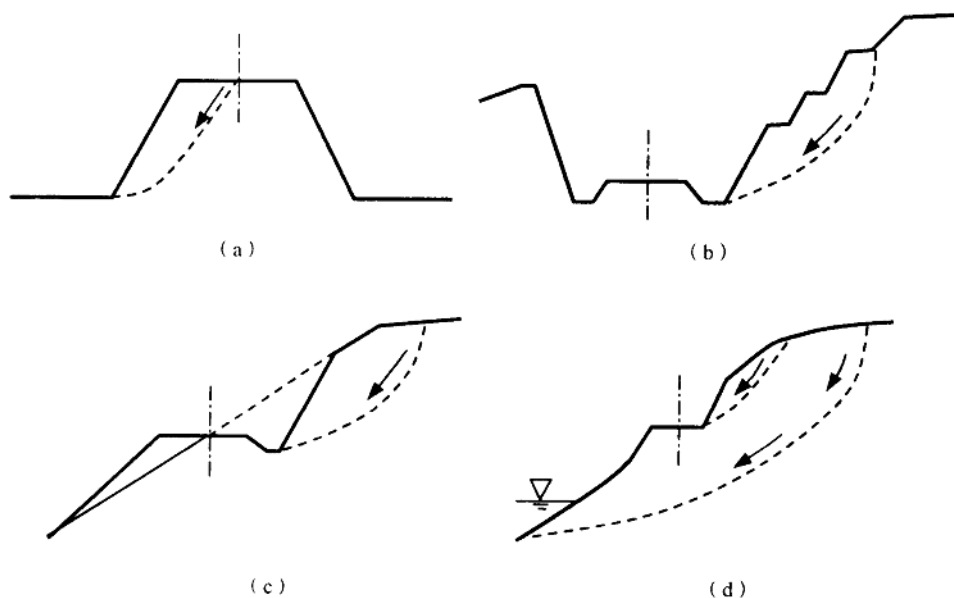


图 1.1 路基边坡破坏形式

在不均匀沉陷、基床翻浆冒泥等各类路基病害中,以边坡的破坏,即滑坡,最难预测、整治费用最高、危害也最大,经常引起断道和列车颠覆等严重事故。路基边坡的破坏形式可以归纳为图 1.1 的四种形式,前三种为人工边坡,第四种为天然边坡(斜坡)。由于填方高度一般不超过 20~30 m,加之可以设置挡墙等支挡结构,堤坡(图 1.1a)滑坡的规模和几率相对较小。严重的路基滑坡主要是深路堑构成的各种堑坡(图 1.1b、c)和沿溪线、沟谷线上构成路基基座的天然斜坡(图 1.1d)。这些边坡一旦失稳,轻则覆盖路基,造成断道,重则引起线路整体滑移,不仅断道,而且难于修复。

图 1.1(d)所示的路基形式,在线形设计中被称为陡坡挂线,在过去的山岭重丘区铁路、公路设计中被广泛采用,而且在今后相当长的时期内,在没有完全实现山区铁路地铁化、公路隧道化之前,仍将是一种主要的布线方式。这种路基的最大弊端是可能发生多级滑坡,其中最低一级的剪出口就是挖方坡角。60 年代通车的成渝铁路 70% 以上的路段都为沿溪线,成内段几乎全部是沿沱江展线,内渝段从油溪到重庆则是沿长江展线。即将开工的渝怀线是国家 I 级干线电气化铁路,酉阳县城以北的圆梁山特长隧道横穿毛坝盖和圆梁山,全长约 11 km(图 1.2),隧道东口为龙潭河河谷。根据目前的经济技术条件,隧道不可能继续穿越天龙山,因此,顺龙潭河河谷展线应该是最为合理的选择。

但是，从出口到甘溪车站 10 km 以上的路段全部在龙潭河西岸陡坡挂线，天然边坡坡角 $20^{\circ} \sim 45^{\circ}$ ，边坡高度达到数百米。线路中心挖方大于 5 m 的路段超过 5 km，最大挖高达到 20 m。如此险峻的陡坡挂线是比较少见的，如何保持边坡稳定将成为今后施工和运营期间的重要问题。

从严格意义上来说，无论是人工边坡还是天然边坡，都是不稳定的，都具有通过变形、破坏来实现降低坡度、坡高和系统能量的趋势，其最终结果是，坡度变小，以至于完全被夷平。随着具体条件的差异，边坡的夷平过程可能表现为掉块、坍塌、风化层溜坍及整体性滑坡等，而且这些表现形式可能是交替或重复出现的。

从地质历史的角度来看，人类是无法阻止边坡的夷平过程的。一个边坡一旦形成，最终总会消失，然后又形成新的边坡，如此循环往复，这可以从两个方面来理解。第一，保持系统能量最低是地球表面所有物体的一个基本属性。边坡形成需要能量，这些能量要么是人为的机械能，要么是自然的机械能，如流水的

动能等，这些能量除了将原地的岩土移动而做功外，还有一部分被转化为边坡岩土体的势能。岩土体由于具有了势能而变得不稳定，其最终趋势是，这部分岩土体从坡顶转移到坡角，在移动过程中，所具有的势能被转化为动能而消耗掉，系统的能量达到最低。第二，边坡的形成，使得坡面附近岩土体内出现平行坡体表面的切应力 (σ_{θ}) 集中 (图 1.3)。在边坡形成初期，由于岩体强度较高，集中后的切应力还不足以引起岩体屈服，但是随着边坡表面附近岩体的不断演化，强度逐渐衰减，最后发生屈服破坏。这种演化是渐进性的，无论表现方式是崩塌落石还是整体性滑坡，其最终结果都是将边坡夷平，但随着坡度的变缓，夷平速度会变得越来越小。

尽管边坡的演化、破坏趋势是不可扭转的，但是，我们可以通过对这一过程的认识，通过适当途径，引导或影响这一过程，达到减缓其演化速率、改变其演化方式或对此一过程中可能发生的灾害性事件进行超前预报之目的。

滑坡作为边坡夷平过程中的一个环节、一种特定的表现形式，由于其规模一般都比较大，而且具有突发性，因此，危害性最大。一般说来，一次较大规模滑坡事件的发生都要经历较长时间的孕育过程，如何认识、调整、减缓这一过程，并最终实现防止滑坡，使系统积蓄的

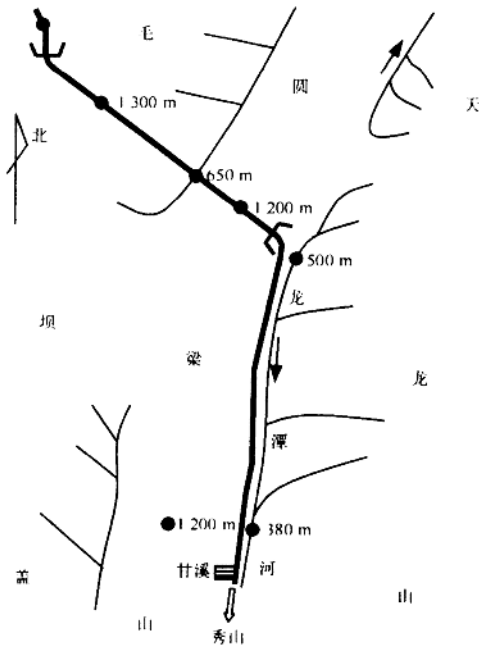


图 1.2 渝怀线圆梁山特长隧道东口展线

能量以其它方式释放或及时预测滑坡是我们面临的中心任务。

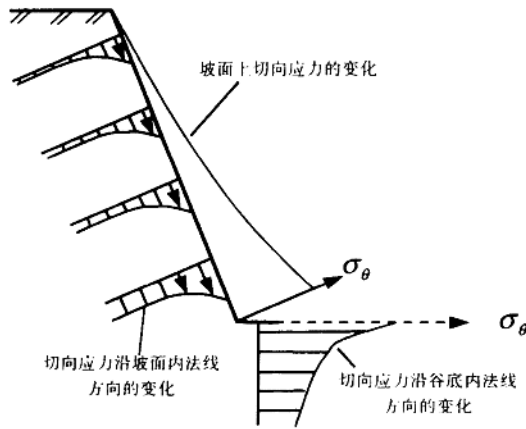


图 1.3 边坡附近的切应力集中

1.3 路基边坡演化及灾害预报的研究现状

应该说，在路基边坡演化及灾害预报方面，已经积累了许多研究成果，并且已经取得了一些一致的认识。这些认识和研究成果可以概括为以下几个方面。

1.3.1 地下水对边坡固相介质的弱化效应

地下水对边坡固相介质的弱化效应被认为是边坡演化的一个重要环节。关于岩石材料因饱水诱发的强度衰减具有很长的研究历史。Bueshtein (1969) 研究了含水量对若干俄罗斯石英砂屑岩和富含粘土矿物砂岩的强度和变形性的影响，他发现对于石英砂屑岩，含水量从 0~4%， UCS (单轴抗压强度) 损失 50%；而富含粘土矿物砂岩的含水量从 0~1.5%， UCS 便降低到原来的三分之一；Van Eekhout and Pend (1975) 研究了采自煤矿内的若干泥岩样品的强度和变形特性对含水量的反应。他们指出，随着含水量的增加， UCS 和杨氏模量降低，而泊松比增大；Priest and Selvakumar (1982) 建立了两种砂岩和三种灰岩的 UCS -含水量关系式；Dyke and Dobereiner (1991) 研究了三种 UCS_{dry} (干单轴抗压强度) 介于 34~74 MPa 的石英砂屑岩的 UCS 与含水量的关系，他们认为，岩石强度越低，对含水量反应越敏感。Hawkins A.B. 等 (1992) 对 35 种不同砂岩的 UCS_{dry} 和 UCS_{sat} (饱和单轴抗压强度) 的研究表明，不同砂岩的强度损失是高度变化的，一般介于 8.2%~78.1%，平均 31%；强度损失率主要受控于岩石中石英与粘土矿物的比例；根据干燥、中等含水量及饱和状态下的 UCS 测定结果判断，砂岩的大部分强度损失在 1%

含水量以前就完成了。此外, Barton M.E. (1974)、Dobereiner L.等 (1983) 也曾对砂岩强度与含水量的关系进行过研究; Van Eeckhout E.M. (1976)、Taylor, R.K. (1981)、Steward, H.E. (1983) 及 Shakoor, A. (1987) 等曾对含水量与泥岩强度的关系进行过广泛研究。

我国大多数学者一般根据部分试验资料或经验类比法, 采用强度衰减系数来反映岩石饱水后的强度降低。喻学文 (1989) 指出, 川东红层砂岩的饱和抗压强度一般在 68.6 MPa 以上, 软化系数在 0.35 左右; 泥岩的饱和抗压强度一般在 29.4 MPa 以下, 软化系数介于 0.88 ~ 0.15 之间。

上述研究的一般过程是, 在实验室内利用真空设备或其它加压设备在较短时间内使岩石饱水后, 对试件进行力学性质测试。试验过程及其结果仅反映了地下水对固相介质强度影响的一个侧面, 和真实情况之间还存在着较大的出入。主要表现在:

(1) 试验样品多为新鲜岩石, 较少涉及表生带最为普遍的腐蚀岩石。

(2) 实验室快速饱水仅可以模拟边坡地下水水位变动带内岩石在地下水位上升时的含水量的变化。由于天然条件下的水位波动幅度不可能很大, 围压较低, 一般达不到实验室条件下的“饱和状态”。因此, 实验室内得出的衰减系数可能大于实际的强度衰减系数。

(3) 地下水对边坡固相介质强度的影响的最主要方面在于, 在漫长的边坡演化过程中, 地下水通过化学的、水力学的方式, 促使岩石的矿物成分及显微结构发生变化, 从而引起岩石强度发生连续衰减, 该种方式的强度衰减具有典型的时效性。以往的研究并未涉及这一重要问题。

(4) 岩块和岩体是两个不同的概念, 对边坡稳定性影响最大的是岩体强度而不是岩块强度, 但以往的研究主要集中于含水量与岩块强度衰减的关系方面。

因此, 这些研究成果还不能完全满足边坡稳定性研究的要求。

1.3.2 边坡稳定性评估中水力学因素的纳入

边坡稳定性评价或称稳定性预测已有相当长的研究历史, 并已开发出许多预测与评价方法。对于散体介质斜坡, 其评价方法有瑞典圆弧法、瑞典条分法、Bishop 法、基于折线形滑动面的不平衡推力法、简布普遍条分法等; 对于岩体斜坡, 其评价方法有, 单一滑面极限平衡法、双滑面的等 K 法和刚体平衡法、滑体内存在结构面的分块极限平衡法及不平衡推力传递法等。此外还有近年来被广泛采用的既适用于土坡又适用于岩质边坡的 Sarma 法。

这里要讨论的并不是边坡稳定性评价方法, 而是在边坡稳定性评价中, 如何考虑水力学因素。人们很早就已发现 (Terzaghi, 1950), 在雨季或紧跟着大的降雨之后, 经常发生边坡破坏。据统计, 有 90% 以上的岩质滑坡及更大比例的半岩质—土质滑坡与地下水有关。因此, 地下水动态变化是滑坡最关键的诱发因素。但是, 在各类边坡稳定性评价方法中, 水力学因素还没有受到足够的重视, 有的处理过于理想化, 有的干脆没有考虑。边坡变形、破坏过程中水力学因素研究的滞后, 在某种程度上制约了斜坡稳定性评价及滑坡预报理论的发展, 并已引起许多学者的关注。

晏同珍 (1989) 提出了图 1.4 所示的分析模型。图中, W 、 U 、 V 分别为单宽滑体的体重、滑面承受的扬压力和滑体承受的静水压力。由于滑体被概化为不透水的岩块, 该分析模型不能用于自然界广泛分布的裂隙发育的裂隙化岩质边坡。此外, 模型假定, 由于后缘拉裂缝充水而对坡体施加一侧向静水压力。据观测, 在通常情况下, 由于降雨强度及汇水面积的限制, 后缘拉裂缝中的水柱高度是很难达到较高水平的。因此模型 1.4 的适用范围是有限的。

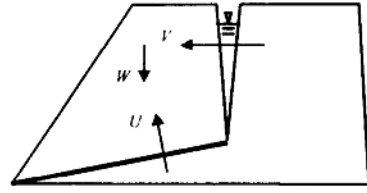


图 1.4 边坡受力分析
(据晏同珍 1989, 略有修改)

周志芳 (1990) 提出用下列数学模型来模拟边坡地下水的浸润曲面动态

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \varepsilon &= \mu \frac{\partial h}{\partial t} \\ h(x, y, t) \Big|_{\Gamma_1} &= h_1(x, y, t), (x, y) \in \Gamma_1, t > 0 \\ h(x, y, t) \Big|_{t=0} &= h_0(x, y), (x, y) \in \Omega, t = 0 \\ T_x \frac{\partial h}{\partial x} \cos(n, x) + T_y \frac{\partial h}{\partial y} \cos(n, y) &= -q(x, y, t), (x, y) \in \Gamma_2, t > 0 \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

将滑体分成若干小柱体, 柱体分割与模型 (1.1) 求解时的三角形平面单元吻合, 把三角形单元三个节点的平均水头作为柱体水头。分别计算每个小柱体的抗剪力 (S_τ^k) 和剪应力 (τ^k)

$$S_\tau^k = C_k + (W_k - \bar{h}_k \gamma_w A_k) \cos^2 \alpha \tan \varphi_k / A_k \quad (1.2)$$

$$\tau^k = (W_k - \bar{h}_k \gamma_w A_k) \cos \alpha \sin \alpha / A_k + \bar{h}_k \gamma_w \cos \alpha \sin \alpha \quad (1.3)$$

式中, C_k 、 φ_k 、 W_k 、 A_k 分别为 k 单元滑面上的凝聚力、内摩擦角、岩块重量、水平投影面积; α 、 γ_w 分别为滑面倾角和水的容重。

整个边坡体的稳定性系数为

$$F_s = \frac{\sum [(W_k / A_k - \bar{h}_k \gamma_w) \operatorname{ctg}^2 \alpha \tan \varphi_k + 2C_k / \sin 2\alpha]}{\sum [(W_k / A_k - \bar{h}_k \gamma_w) + \bar{h}_k \gamma_w]} \quad (1.4)$$

由 (1.1) 式求得不同时刻的浸润曲线后, 利用 (1.4) 式就可以进行边坡稳定性的动态预报了。

上述算法的优点在于把渗流场有限元分析和边坡稳定性计算中的条分法进行了结合, 并注意到浸润曲面波动引起的边坡稳定性的变化。但也存在不足之处, 它忽略了边坡地下水的三维渗流特征, 没有考虑动水压力效应, 这对于一些地下水动态变化剧烈的高陡边坡是不合适的。

地下水影响边坡稳定性的另一重要方式——潜在滑面因饱水引起的强度衰减, 有过不少研究。试验资料表明, 滑带土的强度分量 C 随含水量的增加而降低, 而 φ 值变化不大。一般地说, C 与含水量 (w) 之间具有以下关系

$$C = C_0 e^{-\beta u}$$

式中, β 为强度衰减系数; C_0 为含水量变化前的粘聚力。

此外, 周叔举 (1990)、吴旭君 (1991) 等也在这方面进行了研究。

从上面的分析可以看出, 尽管水力学因素在滑坡、溜坍等突发性地质灾害中的关键性作用已经引起人们的关注, 但仍有许多重点、难点问题有待解决。

(1) 地下水影响边坡稳定性的重要力学方式——动水压力的计算及如何纳入稳定性评估模型, 至今未能很好地解决。

(2) 对边坡地下水运动的三维特性缺乏足够的认识。

(3) 对概念模型缺乏系统研究, 导致在稳定性评估方面还存在一些误区。如有些作者指出, 坡体会受到地下水的浮力及孔隙水压力的联合作用等。

1.3.3 地下水影响下边坡变形破坏的物理模拟

尽管边坡变形破坏机理的模型试验研究具有较长时间的历史 (铁科院西北所, 1987), 但这些模型试验所追求的大多是力学相似, 对于诱发滑坡的水力学因素则考虑得不多。

任光明等 (1991) 对镇江寺土质滑坡进行了室内模拟研究。重点模拟了长江水位变化和降雨对边坡稳定性的影响。相似条件中包含了孔隙水压力, 但并未考虑介质的渗透性相似。结果表明, 江水位的涨落, 特别是最高洪水位的涨落和地下水的渗入是导致坡体变形的诱发因素。

丁多文等 (1994) 对某排土场边坡变形过程中地下水及地表径流的作用进行了模型模拟分析。选定的相似条件包括: 几何形状和尺寸, 废石土的物质组分、物理力学性质和渗透性, 降雨强度和方式, 地表水流态, 地下水流态五个方面。模型材料为现场的扰动松散土。结果表明, 随着降雨时间的加长, 边坡主要以溜坍的形式发生破坏。

目前, 对于裂隙发育的岩质边坡变形破坏过程中的水力学因素的模型试验还未见报道。其主要难点在于如何同时满足岩体结构、物理力学性质及渗透性相似。

1.3.4 区域性滑坡预报

滑坡主要发生于降雨或暴雨期间, 是地下水影响边坡稳定性的最直观表现。因此, 多年来, 有许多学者致力于发生滑坡的临界降雨量研究, 即以降雨量为因子, 进行滑坡的区域性预报。

美国的德里派克 (Delhi Pike) 土质滑坡被公认为是地下水诱发形成的。从 80 年代初开始, 这里便成为多项科研项目的研究基地。Fleming (1981)、Roestenberg (1983、1987)、Murdoch (1987)、Baum (1991)、Gokce (1991) 等均在此开展过研究, 几乎所有的项目都集中于确定发生滑坡的降雨强度和降雨量临界值方面。Williamm (1991) 从地下水形成与转化的视角, 对德里派克滑坡所在地区的植被对浅层斜坡失稳的影响进行了研究。他结合土壤层厚度、渗透系数及雨前湿度确定了斜坡对降水产生水力学响应的时滞 (t')。他认为, t' 介于几周或几个月的斜坡将对季节性降雨作出反应; t' 为几小时至几分钟的斜坡易于在短暂的暴雨过程中失稳。

我国也有许多学者从事斜坡失稳的临界降雨量研究。1980~1984年,原成都地质学院和中科院成都地理所对四川盆地西部、东部和北部地区因暴雨引起的滑坡进行了广泛的调查研究。研究结果发现,当一次降雨过程的累计降雨量达到50~100mm时,可能诱发浅层堆积层滑坡;当累计降雨量达到150mm时,可能触发松动岩体滑坡;当累计降雨量达到250mm以上,平均降雨强度达到每小时8mm时,可能触发大量的岩石滑坡。

曲焰(1989)在对蠕变滑坡与降雨量的关系进行研究时发现,蠕变位移(y)与月降雨量(x)具有以下关系

$$y = ae^{bx}$$

鄢毅(1993)对宝成铁路滑坡与降水量的关系进行了研究。

郑黎明、杨立中(1994)对铁路沿线雨季滑坡与降雨量、降雨天数的关系进行了研究,并进行了区段预测。

这种利用降雨量来预报滑坡的方法本身说明,地下水是滑坡发生的关键性控制因素。但是,由于降雨与滑坡之间仅具有间接关系,而不具直接联系,该方法未能充分考虑地下水的形成条件及坡体内水岩之间复杂的作用过程,只注重输入与响应之间的关系,因此,主要适用于大区域的滑坡预报。

综上所述,可以得出以下几点结论:

(1) 滑坡的发生一般是瞬时的、突发性的,但这种灾害的发生通常都要经历一个相当长的孕育过程,这一点至今并未受到足够的重视。

(2) 地下水对边坡介质的弱化效应,最重要的方面是地下水的长期腐蚀对岩体强度及潜在滑面强度的影响,但是这方面的研究程度是较低的;地下水水位波动引起的岩块强度衰减对边坡稳定性有一定影响,但并非关键因素。

(3) 边坡渗流场研究是水岩动力学平衡研究的基础,但是由于介质本身的复杂性以及渗流区边界的波动性,该方面还有许多问题有待解决,诸如模型辨识、波动边界的处理等。

(4) 稳定性评估中,对于水力学因素的考虑还不系统,甚至比较凌乱,动水压力、潜在滑面的强度衰减等重要因素的纳入问题还有待进一步研究。

(5) 以“治水”为主的滑坡防治工作主要集中于即将失稳的边坡,对于现今仍处于稳定状态,但将来有可能破坏的边坡的治理力度还比较小。我国建国初期兴建的一些铁路干线,投入运营后不久,边坡变形体就陆续出现。尽管治理力度逐年加大,但是,不仅既有病害不能根治,而且变形体越来越多。这种被动局面不能说与以往在滑坡研究和治理上“重结果、轻过程”的做法没有任何联系。

水岩相互作用是边坡演化及失稳的关键性控制因素,应该成为滑坡机制研究、预报及治理的主攻方向。由于水岩相互作用是一个由无机化学、平衡热力学、矿物学、连续介质力学、散体介质力学、裂隙水力学及岩体力学等多个学科相互交叉、彼此渗透形成的一个高度复杂的研究领域,尽管已有较长时间的研究历史,但仍有许多重大问题有待解决,诸如岩体腐蚀强度评价、裂隙岩体中的波动边界渗流、水岩动力学平衡模型的模拟精度等等。