

MECHANISM FOR TOPPLING DEFORMATION AND TREATMENT
ENGINEERING EXAMPLES OF SOFT ROCK SLOPE

软质岩边坡倾倒变形机理 及处治工程实例

◎ 丁小军 刘卫民 王 佐 夏旺民 编著



人民交通出版社
China Communications Press

软质岩边坡倾倒变形机理 及处治工程实例

丁小军 刘卫民 编著
王 佐 夏旺民



人民交通出版社

内 容 提 要

本书主要阐述了软质岩倾倒变形边坡的综合勘察方法和防治技术措施。全书共分七章,内容包括倾倒变形边坡的危害、类型及特征,倾倒变形边坡的勘察,倾倒变形边坡的破坏机理研究,倾倒变形边坡的稳定性分析,倾倒变形边坡的主要治理措施和辅助治理设计,以及阿尔及利亚东西高速公路泥灰岩倾倒变形边坡治理工程实例。

本书适用于边坡工程设计、施工、监理等技术人员阅读,也可作为高等院校岩土工程相关专业研究生的参考书使用。

图书在版编目(CIP)数据

软质岩边坡倾倒变形机理及处治工程实例/丁小军
等编著. —北京:人民交通出版社,2011.8

ISBN 978-7-114-09347-0

I. ①软… II. ①丁… III. ①公路路基—边坡防护
IV. ①U418.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 163039 号

书 名: 软质岩边坡倾倒变形机理及处治工程实例

著 作 者: 丁小军 刘卫民 王 佐 夏旺民

责任编辑: 吴有铭 卢 珊

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011) 北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010) 59757969 59757973

总 经 销: 人民交通出版社发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京市密东印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 10.25

字 数: 248 千

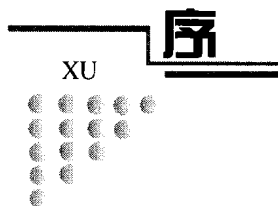
版 次: 2011 年 8 月 第 1 版

印 次: 2011 年 8 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-09347-0

定 价: 45.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)



边坡的倾倒变形和破坏是山区高边坡变形的一种,它虽不像崩塌、滑坡那样普遍,但在自然界也是广泛分布的。在工程建设中遇到的倾倒变形,其危害是十分严重的,故美国人瓦恩斯(D. Varnes)1978年在边坡变形分类中将倾倒单独列为一类。

在自然界的河流和沟谷两岸,由于河沟下切,山坡侧向卸荷,陡倾的中薄层软质岩层向临空面方向发生弯曲变形,俗称“点头哈腰”现象,较为常见,但它们并未破坏。当这种变形达到一定程度,即会发生倾倒破坏,成为一种灾害,可以转化为崩塌或滑坡。

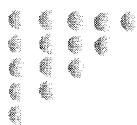
在工程建设中,也曾遇到不少倾倒变形破坏,如京珠高速公路粤北段 K35 和 K36 曾发生两处薄层石灰岩的倾倒破坏;徽杭高速公路富溪隧道进口遇片岩倾倒体造成进洞困难;雅砻江锦屏一级电站建设中也遇到大型片岩倾倒体……这些倾倒变形,延误了工期,增加了投资。

近年来,国内学者和工程技术人员逐渐重视了倾倒变形的产生条件、发生机理和防治措施的研究,但在深度、广度和系统化方面还远远不够,有的甚至将倾倒变形与崩塌、滑坡相混淆,使防治缺乏针对性。

丁小军、刘卫民、王佐、夏旺民编著的《软质岩边坡倾倒变形机理及处治工程实例》一书在收集、阅读、分析国内外前人研究资料的基础上,结合自身工程实践,第一次较系统地论述了软质岩层倾倒变形边坡的产生条件、发育过程和机理、稳定性评价方法、勘察技术及其防治的主要措施和辅助措施,并通过阿尔及利亚东西高速公路上几处倾倒变形边坡的成功治理实例验证了所提出的理论和方法,同时还引入了法国的重力罩面治理措施。如此系统地论述边坡倾倒变形及其防治,在国内尚属首例,填补了国内在这一领域的空白。它必将对我国边坡倾倒变形的深入研究和防治起到促进作用。

作为从事地质灾害特别是滑坡灾害研究和治理工作已达 50 年之久的科技工作者,我热烈祝贺这本专著的出版,并愿为其作序,目的是希望本书的作者和这一领域的同仁,特别是中青年一代科技工作者共同努力,深入实践,调查研究,科学试验,不断创新,为我国的防灾减灾事业作出新的贡献。

王恭先
2011 年 7 月



随着人类工程活动的发展,大量公路、铁路、水利、矿山、城镇等的建设,不可避免地带来了众多的边坡灾害,如中陡倾反向或陡倾同向层状软质岩边坡的倾倒变形失稳问题,危害严重,由于倾倒变形失稳而造成重大事故的工程更是屡见不鲜。在阿尔及利亚东西高速公路建设期间,多处泥灰岩边坡发生倾倒变形,甚至转化成为滑坡,成为制约其工程建设的瓶颈,对项目进程造成了重大的不利影响,所以,必须研究倾倒变形边坡的机理,分析其稳定性进而实施治理,或在边坡发生倾倒变形之前实施预加固工程,保证边坡的稳定。

本书比较系统地阐述了软质岩倾倒变形边坡的综合勘察方法和防治技术措施,内容深入浅出,是一本实用的倾倒变形边坡综合防治的参考书籍。全书共分为七章,内容包括倾倒变形边坡的危害、类型及特征,倾倒变形边坡的勘察,倾倒变形边坡的破坏机理研究,倾倒变形边坡的稳定性分析,倾倒变形边坡的主要治理措施和辅助治理措施,最后辅以阿尔及利亚东西高速公路丰富、翔实的泥灰岩倾倒变形边坡治理工程作为例证。本书具有两大亮点,其一是采用离散元法对软质岩边坡倾倒变形过程进行了数值模拟,对其稳定性进行了数值分析,对其主要影响因素进行了数值评价;其二是结合工程实例介绍了欧洲(法国)软质岩倾倒变形边坡的处治新方法,内容新颖,有足够的深度和广度。

本书由中交第一公路勘察设计院有限公司资助编写,且被纳入了“中交一公院‘两跨’战略专题研究计划项目——基于欧洲标准体系的高速公路勘察设计关键技术研究”成果系列。各章节的编写者如下:

- | | | |
|-----|-----|-----|
| 第一章 | 丁小军 | 刘卫民 |
| 第二章 | 吴振林 | 王 佐 |
| 第三章 | 刘卫民 | 夏旺民 |
| 第四章 | 夏旺民 | 李宝田 |
| 第五章 | 怀 超 | 丁小军 |
| 第六章 | 李宝田 | 王 佐 |
| 第七章 | 岳永利 | 刘卫民 |

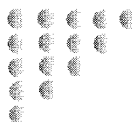
本书在编著过程中,得到了中交第一公路勘察设计院有限公司霍明院长、贾志裕院长

助理、赵永国副总工程师、喻林青教授级高级工程师的指导和帮助。此外,王恭先先生为本书提出了建设性的修改完善意见并作序,人民交通出版社对于本书的出版给予了大力支持,在此一并表示感谢。

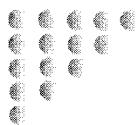
限于编著者的水平和经验,书中难免有错误和不当之处,敬请专家和读者批评指正。

编著者
2011 年 7 月

目录 MULU



第1章 绪论	(1)
1.1 倾倒变形边坡的危害及防治	(1)
1.2 倾倒变形边坡的类型	(6)
第2章 倾倒变形边坡的勘察	(11)
2.1 倾倒变形边坡勘察的基本要求	(11)
2.2 倾倒变形边坡的勘察内容	(12)
2.3 倾倒变形边坡勘察报告的编制	(23)
第3章 倾倒变形边坡破坏机理研究	(24)
3.1 软质岩反倾人工边坡的倾倒变形特性	(25)
3.2 倾倒变形边坡离散元法数值分析	(29)
3.3 边坡倾倒变形影响因素分析	(47)
3.4 倾倒变形边坡变形机理	(64)
第4章 倾倒变形边坡稳定性分析	(66)
4.1 稳定性评价工作程序	(67)
4.2 定性分析方法	(67)
4.3 定量分析方法	(69)
4.4 软质岩边坡稳定性分析计算算例	(77)
第5章 倾倒变形边坡的主要治理措施	(82)
5.1 设计原则	(82)
5.2 设计标准	(83)
5.3 主要治理措施	(85)
第6章 倾倒变形边坡的辅助治理设计	(99)
6.1 边坡截排水工程	(99)
6.2 坡面防护设计	(103)
第7章 阿尔及利亚东西高速公路泥灰岩倾倒变形边坡治理工程实例	(111)
7.1 工程概况	(111)
7.2 区域工程地质条件	(112)
7.3 PK137 + 035 ~ PK137 + 420 段倾倒变形边坡治理工程	(119)
7.4 PK133 + 650 ~ PK133 + 855 段倾倒变形边坡治理工程	(136)
7.5 RPK136 + 540 ~ RPK136 + 955 段边坡的预加固治理工程	(144)
参考文献	(152)



1.1 倾倒变形边坡的危害及防治

1.1.1 倾倒变形边坡的含义

边坡泛指自然或人工形成的斜坡坡体,按照构成边坡的物质种类可以分为土质边坡、岩质边坡和岩土混合边坡。岩质边坡整个边坡坡体均由岩体构成,按岩体的强度可以分为硬质岩边坡、软质岩边坡和风化岩边坡等,按岩体结构可以分为整体状(巨块状)边坡、块状边坡、层状边坡、碎裂状边坡和散体状边坡等。

层状岩质边坡在自然界中的分布十分广泛,是露天矿边坡顶帮、水利水电边坡、公路边坡、铁路边坡中常见的结构类型。按照地层成因类型层状岩质边坡可以划分为两类:一类是以沉积岩为代表的,主要为与原生建造有关的原生层状结构,其组成岩层是以复理式碎屑沉积岩或碎屑生物、化学沉积岩为主,一般具有软弱层相间的互层状结构,如砂页岩互层、灰岩与泥灰岩互层等;另一类是以变质岩为代表的,主要为与构造成因有关的板裂层状结构,其组成岩层以深变质的千枚岩和片岩为主,由于经受了强烈的构造运动,常形成大范围平行发育的劈理、片理、层间错动带等。根据岩体的完整性、单层厚度和结构面间距,层状结构又可以分为四个亚类,即整体层状结构、块层状结构、互层状结构和薄层状结构等。

实际上,由于岩质边坡在长期的地质历史环境中接受改造,形成很多结构面,如层面、裂隙面、节理面等,其稳定性很大程度上取决于此,破坏也往往是沿着这些结构面发生的。具有不同性状的控制性结构面,其失稳模式存在明显的差别。因此,岩体结构面是决定岩质边坡的稳定性和可能的失稳模式最直接和最重要的因素。针对层状岩质边坡内部控制性结构面的性状特点,伍法权提出了关于层状岩质边坡的分类方案(表 1-1),即以边坡介质类型(岩性)+边坡控制性地质结构面倾角(α)+控制性地质结构面与边坡主临空面的倾向夹角(δ)三个要素来分类命名。如定名为泥灰岩陡倾反向坡表示该边坡由层状泥灰岩构成,岩层结构面的倾向与边坡的倾向相反,岩层结构面的倾角大于 60° 。

层状岩质边坡的结构分类

表 1-1

$\alpha(^{\circ})$	$\delta(^{\circ})$			
	$0 < \delta < 30$	$30 \leq \delta < 60$	$60 \leq \delta < 120$	$120 \leq \delta < 180$
$\alpha \leq 30$	缓倾同向坡	缓倾斜向坡	缓倾侧向坡	缓倾反向坡
$30 < \alpha < 60$	中倾同向坡	中倾斜向坡	中倾侧向坡	中倾反向坡
$\alpha \geq 60$	陡倾同向坡	陡倾斜向坡	陡倾侧向坡	陡倾反向坡

随着人类工程活动的发展,大量铁路、公路、水利、矿山、城镇等的建设,不可避免地带来了众多的边坡工程问题。因此,边坡的稳定性问题在岩土工程中占了很大的比重,是一个重要的地质和环境问题。研究边坡变形破坏机制,分析评价边坡稳定性,并采取合理的处治方案进行治理,对于边坡的工程建设具有重要的意义。

研究边坡变形破坏机制,首先要确定边坡的变形破坏类型。边坡变形破坏的分类,国内外已有许多不同的方案。E. Hoek 教授(1973)在《岩石边坡工程》一书中,将岩石边坡变形破坏类型分为圆弧破坏、平面破坏、楔体破坏和倾倒破坏,并详细论述了边坡破坏机制、破坏方式、破坏类型以及如何抽象边坡稳定性分析力学模型等问题。20 世纪 80 年代,国际工程地质协会(IAEG)滑坡委员会建议,采用瓦恩斯(D. Varnes, 1978)的滑坡分类作为国际标准方案,将边坡按运动方式划分为崩落(塌)(Falls)、倾倒(Topples)、滑动(落)(Slides)、侧向扩展(Lateral Spreads)和流动(Flows)5 种基本类型,具体见表 1-2。

边坡运动的简要分类

表 1-2

运 动 形 式			物 质 种 类		
			基 岩	工 程 土	
				粗粒为主	细粒为主
崩落类			岩石崩落	碎屑崩落	土崩落
倾倒类			岩石倾倒	碎屑倾倒	土倾倒
滑动类	旋转滑动	一单元	岩石转动滑塌	碎屑转动滑塌	土转动滑塌
	平移滑动		岩石块体滑塌	碎屑块体滑塌	土块体滑塌
		多单元	岩石滑塌	碎屑滑塌	土滑塌
侧向扩展类			岩石扩展	碎屑扩展	土扩展
流动类			岩石流(深部蠕动)	泥石流(土石蠕动)	泥流(土蠕动)
复合移动类			两个或两个以上主要运动形式的组合		

倾倒变形是岩质边坡的一种主要变形破坏形式,是指中~陡倾反向或陡倾同向的层状岩体(包括似层状岩体)在自身重力为主、外营力为辅的作用下绕其底部某点向临空方向弯曲倾倒的现象。发生倾倒变形后,岩层层面之间互相错动并伴有拉裂,弯曲岩体后缘出现拉裂缝,并形成平行于岩层走向的反坡台坎和槽沟(图 1-1)。随着倾倒变形的加剧,倾倒变形边坡可以转化成滑坡和崩塌,也可以停留在倾倒变形阶段。

层状岩质边坡发生倾倒变形破坏必须满足以下条件:一是岩体结构须符合一定的条件,包括岩层厚度、倾角、岩层层间摩擦力及黏聚力、岩层的弹性参数等;二是外营力作用。只有边坡满足了上述两个条件,才有可能产生倾倒破坏。

倾倒变形边坡有以下特点:

(1) 当反倾层状边坡岩体岩层倾角小于 30° 时,岩层在自重作用下向临空面产生的弯矩较小,不易产生倾倒破坏。岩层倾角大于 30° 的中~陡倾反向边坡一般很容易产生倾倒破坏,如果反倾边坡存在另一组顺坡向缓倾角节理、裂隙时,倾倒破坏更易发生。另外,当顺倾层状边坡岩体岩层倾角大于 60° 且其他条件满足时,也会发生倾倒变形破坏。倾倒变形边坡赤平投影示意图如图 1-2 所示。

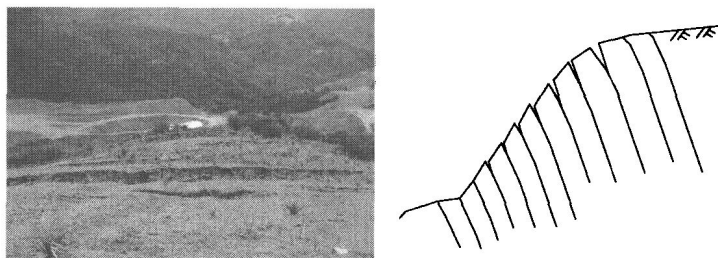


图 1-1 倾倒变形边坡广为发育的反坡台坎

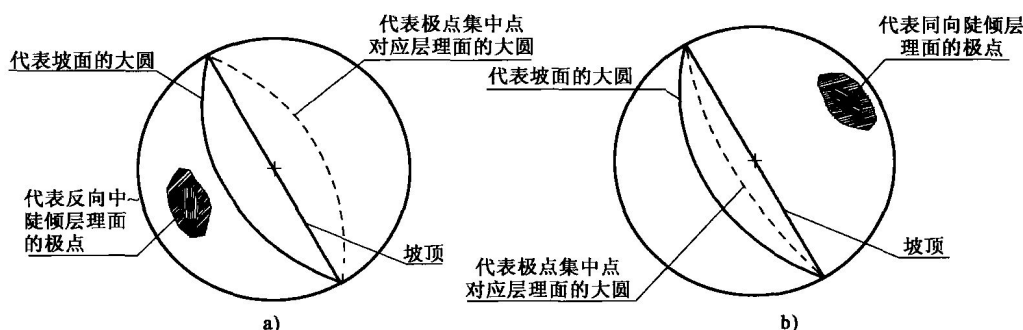


图 1-2 倾倒变形边坡赤平投影示意图

a) 中 ~ 陡倾反向边坡; b) 陡倾同向边坡

(2) 倾倒变形边坡由于岩层顺层面之间发生错动, 形成一系列的反坡台坎或裂缝, 台坎和裂缝在顶部较宽大, 往下逐渐变窄小。

(3) 层状岩体边坡倾倒变形破坏与岩性软弱程度、单层厚度等有着密切的关系,通常发生在具有“柔性”特点的中~陡倾薄层状地层中,尤以薄层状的板岩、片岩、板岩与薄层状的砂岩、薄层状大理岩、泥质灰岩等岩性或岩性组合为典型。实际上,在所看到的陡立板岩(尤其是炭质板岩)、片岩地层和页片状泥灰岩中,还没有不发生向临空面倾倒变形的情况,只不过倾倒的程度和规模有所不同而已。特殊情形下,当陡倾的坚硬地层中含有大量的软弱片岩时,由于其刚度可能大大降低,也有发生大规模倾倒的可能。

(4) 通常情形下,大规模倾倒变形破坏都有一个很长的孕育演化过程,在这个过程中,岩层可发生很大的柔性弯曲而不折断,而其破坏一定是变形发展到极致的产物。也就是说,这类边坡发生倾倒滑移完全是自身演化的结果,而不是像顺倾边坡那样,具有一些先天存在的潜在滑动面。也正是因为这样,这类边坡的变形现象比较常见,而演化到形成滑坡的情形并不常见,但一旦演化到滑坡阶段,由于其长期的地质历史积累,必然是深层的、大规模的。这也就是在反倾地层中见到滑坡比较少,而一旦见到,规模都比较大的根本原因。

(5)与“柔性”特点的地层发生大规模倾倒变形破坏相对应,陡倾的坚硬中~厚层状边坡岩体也常见倾倒破坏,但通常情况下,其变形和破坏的深度均不大,一般为30~40m;且与柔性地层时效变形的特点不同,这类地层通常发生的是“结构性质”的变形,即通过节理裂隙的“弯

折”而表现出“倾倒”的特征。两者的稳定性含义也有很大差距:前者岩层可发生持续的大变形弯曲,从变形到破坏可孕育很长的时间(地质历史的尺度),从人类工程活动的意义上来说,其变形阶段的稳定性状态也是较好的;后者的情形则完全不同,结构的变形可在较短的时间内发生,其稳定性也表现出较强的突发性特点。

1.1.2 倾倒变形边坡的危害

一般认为,边坡倾向与结构面倾向相反时,边坡处于稳定状态,但是,层状反倾结构岩质边坡一旦发生倾倒变形失稳,其危害也是非常严重的。由于倾倒变形失稳而导致发生重大事故的工程屡见不鲜,常常造成交通中断、河道堵塞、建筑物坍塌、厂矿掩埋等事故,既对工程建设形成不利影响,带来工程投资的增加和工期延误,又致使生命财产的重大损失。

如我国最早发现的倾倒变形破坏的边坡——位于河西走廊的镍矿基地金川露天矿上盘西区边坡。该露天矿边坡高度约400m,边坡上部为绿泥石片岩,中部为混合岩,下部为大理岩,岩层反倾,倾角为 70° 。岩体内存在一巨大的挤压破碎带,挤压带中部存在一个宽30余米的断层带,同时,大理岩内部还发育有一组反倾的小断层,断层面倾角为 45° 左右,断层带内物质为皂石,浸水后强度很低。露天矿在开挖过程中,由于卸荷作用,边坡岩体发生了大规模的弯曲倾倒变形,在1973~1977年,山体位移达15m,最大水平位移达17m,垂直位移达7m,对露天矿的开采形成了严重威胁。

再如渝黔高速公路K13+500~K14+000段向家坡滑坡,地处重庆南岸区4km以东著名的南山南坡地段,地形东高西低,为起伏不大的阶状斜坡地貌。高速公路位于南山西坡陡缓相接处,以路堑形成通过。

向家坡滑坡在地质构造上属南温泉背斜西翼,为单斜构造,出露地层为下侏罗纪珍珠冲组泥岩夹薄层砂岩,上覆第四系覆盖层,为崩坡积土层。泥岩质软,网状裂隙发育,结构面极为发育,力学强度低,砂岩质地坚硬,节理发育。岩层产状较陡,中下部岩层产状近直立,产状为 $NE10^{\circ}\sim 20^{\circ}/NW70^{\circ}\sim 80^{\circ}$;上部岩层产状为 $NE20^{\circ}/NW40^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 。地层产状自上而下的这种变化,也就是局部倒转,主要由于岩层产状较陡,岩质软弱,在卸荷的作用下产生蠕变和发生倾倒变形所致。正是由于岩层的倾倒变形,在岩层产状变化的过渡部位,岩层产状紊乱,岩性破碎,裂隙发育,是形成岩质滑坡浅层、中层滑带的地质基础。

由于高速公路开挖路堑形成40余米陡倾临空面,使得边坡应力失衡,坡体发生松弛,形成多层、多类型的复合式滑坡。滑带有四层,分别是堆积层底面即岩层表面,岩层浅层、中层和深层滑面。岩层浅层滑坡厚约10m,中层滑面深约20m,深层滑带深25~30m,主要活动的滑坡为堆积层滑坡和岩层的浅层、中层滑坡。

边坡工程于1998年3月开工,首先是工程开挖诱发了堆积层滑坡,尽管及时变更,实施了放坡减载、截排水工程和支挡、锚固工程,但是由于抗滑桩桩长不足,加之施工存在一定的问题,堆积层滑坡未得到抑制。随着地下水的进一步下渗和前部开挖临空面的形成,引起了泥岩强风化层为主体的浅层滑坡,造成抗滑桩位移,边坡开裂,坡体下滑。在进一步勘察后,采用了加固处理,增加了两排抗滑桩和预应力锚索框架,稳定了堆积层滑坡,但是由于没有考虑到中层滑带的存在,在历时3年的地下水作用下,中层滑坡产生了蠕变变形。而后又对该滑坡进行勘察设计,进一步实施了加固,又增加了两排抗滑桩等工程。整治工程竣工后,2002年底公路通车。2004年7月,滑坡体上的地表位移监测点监测结果显示,滑坡还存在不同程度的变形,后又进一步论证,补充勘察设计,再次进行了加固。增设

了一排预应力锚索抗滑桩,桩长 38~47m,在坡面重新设置了预应力锚索框架,在滑坡后部增加了一条截水盲洞。整治后,滑坡稳定,公路畅通,并经历了 2006~2007 年特大暴雨考验,使滑坡得到了彻底根治。

该滑坡先后经历四次治理,影响了公路的通行,实施了多排抗滑桩,投资巨大。

另外,大量工程案例表明,边坡内部倾倒变形~折断过程往往是形成大型滑坡的先兆。如四川雅砻江中游的锦屏一三滩河段,沿江两岸长达 10km 范围内的三叠系变质砂、板岩地层发生大规模的倾倒变形,在锦屏一级水电站左岸揭露的水平深度范围达到近 300m,而且在其上游约 10km 的水文站处,更可见到两岸地层均向河谷倾倒,并在左、右岸分别发育两个由于倾倒变形所导致的大型滑坡,即水文站滑坡和胛巴滑坡。同样的大规模倾倒变形现象还在澜沧江苗尾水电坝址区的变质砂、板岩地层中观察到。由于发生倾倒变形,岩层倾角可从原始状态的近直立逐渐变化到 $40^{\circ}\sim 0^{\circ}$ 。其倾倒发育的水平深度达到约 200m,垂直深度达到约 100m,并且由于大规模的深度倾倒在坡体顶部形成缓坡平台和多级的拉裂塌陷区。

倾倒变形破坏在国外边坡工程中也 very 常见。如在阿尔及利亚东西高速公路建设期间,由于当地复杂多变的地质条件及特大降雨,中标段 M3 六处反倾页片状泥灰岩路堑边坡发生倾倒变形失稳,影响公路长度约 1.9km。一处由倾倒变形转化成岩质滑坡,滑体平均厚度约 10m,总方量为 60 万 m^3 。这些边坡的倾倒变形破坏严重影响了项目进程,成为制约东西高速公路工程建设的瓶颈,对工程建设造成了重大的不利影响。在日本九州的一个水电站建设过程中,边坡开挖时遇到了反倾岩层,开始未引起足够重视,仅根据规范进行了常规支护,但在边坡支护后的当天夜里,就发生了滑坡。经事后调查发现,这也是一次很典型的弯曲倾倒破坏。

1.1.3 倾倒变形边坡的防治

如前所述,倾倒变形失稳一直是工程地质学和岩石力学领域亟待解决的问题之一。研究该类边坡变形发展规律及防治手段,对于积累关于倾倒变形边坡病害的经验教训,指导类似工程地质条件下预防倾倒变形病害的发生和对于已发生的倾倒变形病害的治理具有重要意义。

倾倒变形边坡的防治,首先要从该边坡所在地的自然地理条件和区域地质条件入手,同时对倾倒边坡的特征进行调查和勘探,确定倾倒变形边坡的破坏机理,接着采用工程地质分析方法和数值分析方法评价其稳定性,再进行治理工程设计。在治理工程设计过程中,要进行多方案比选,保证治理方案技术可行、经济合理、便于实施。最后实施治理工程,在施工过程中,要加强倾倒变形边坡的监测,信息化施工,保证施工和治理工程的安全。倾倒变形边坡的具体防治流程如图 1-3 所示。

总结国内外对倾倒变形边坡的防治措施,可以归纳为以下几类。

(1) 绕避措施

对大型复杂倾倒变形边坡区域,可以采用调整结构物位置的方法避开,将结构物的平面位置放在倾倒变形边坡危害影响范围以外。

(2) 消除、削弱或改变使边坡稳定性降低的各种因素

倾倒变形与地表水、地下水的关系密切,可以采取防排水措施,消除、削弱地表水、地下水对边坡的影响,还可以采取防护措施,避免边坡岩土体强度的降低,进而造成边坡稳定性降低。

(3) 提高倾倒变形边坡的稳定性

主要采用支挡、置换或锚固等多种措施进行综合治理,提高倾倒变形边坡的稳定性。

鉴于边坡的倾倒变形有其发生、发展和消亡的过程,是动态的而不是静态的,因此,倾倒变形边坡的治理宜根据其变形发展阶段选择合适的治理措施。

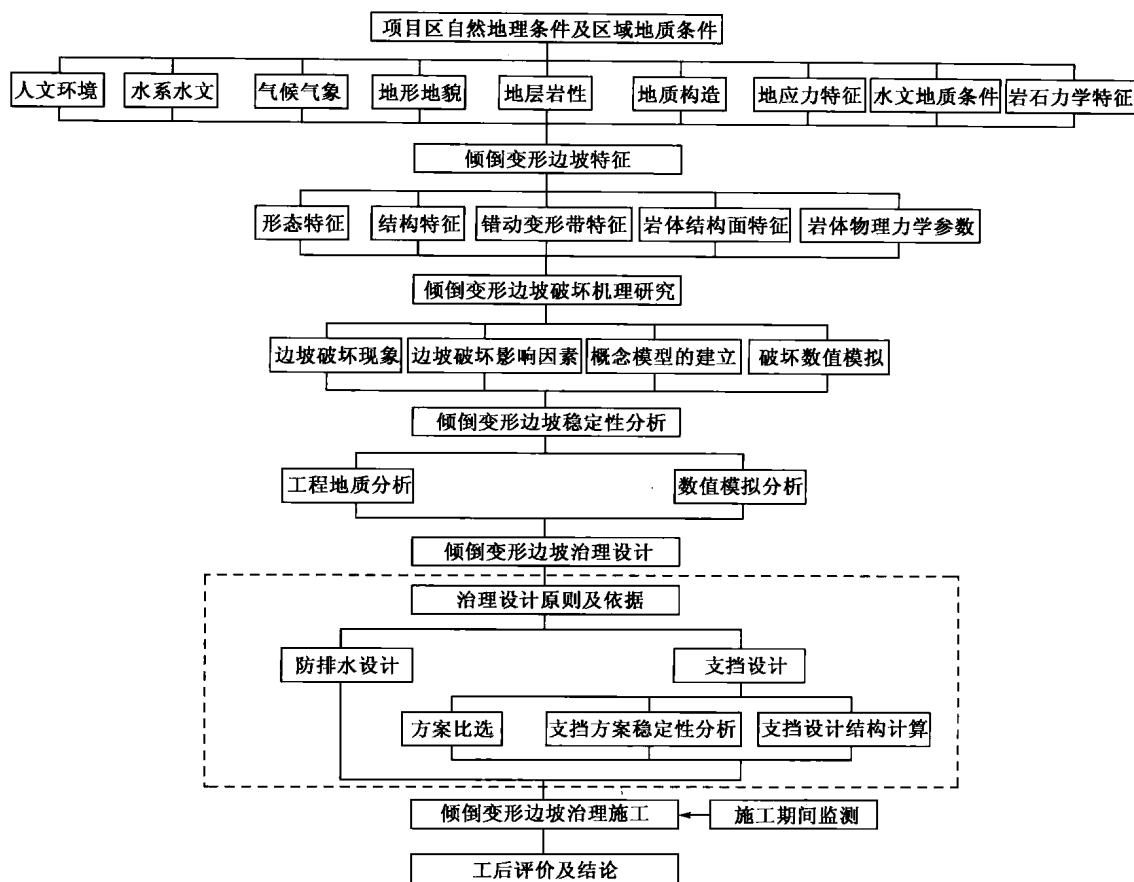


图 1-3 倾倒变形边坡防治流程

1.2 倾倒变形边坡的类型

1.2.1 Goodman 和 Bray 关于倾倒变形的分类

根据倾倒边坡的变形特征,Goodman 和 Bray (1976) 曾将岩体的倾倒破坏分为弯曲式倾倒、岩块式倾倒和岩块弯曲复合式倾倒三种类型(图 1-4)。自然界边坡的倾倒变形,往往是上述三种基本变形破坏类型的复合产物。

(1) 弯曲式倾倒(Flexure Toppling)

弯曲式倾倒是由于边坡根底滑动、挖空或被侵蚀,层状岩层向临空侧弯曲,并随着深宽张裂缝的形成而逐渐向岩体深部发展,产生弯曲式破坏,变形表现为岩层连续的弯曲变形,从顶部到底部变形量逐渐减小。弯曲式倾倒又称为延性破坏(Ductile Failure),由于岩层具有延性弯曲的特点,通常折而不断,并持续变形很长时间,有的甚至会经历很多年。

弯曲式倾倒主要发育在中~陡倾角的中等坚硬~较软弱的薄层岩层中,发生弯曲式倾倒后,岩层发生类似悬臂板梁的弯曲变形,层间产生滑移,形成一系列向坡体后方的反坡台坎。一般而言,这类倾倒可能变形范围较大,其发育规模、发育程度除受边坡地质结构控制外,良好的临空条件是一个很重要的因素。

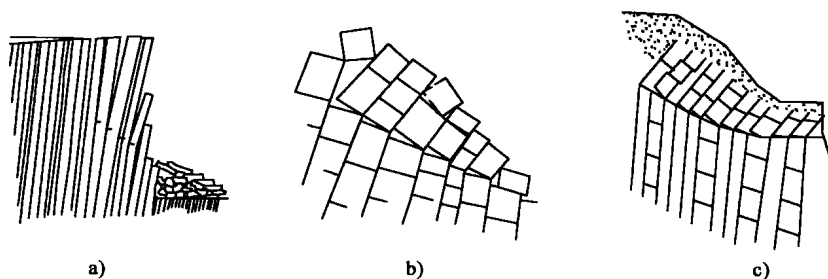


图 1-4 倾倒破坏边坡的类型

a) 弯曲式倾倒; b) 岩块式倾倒; c) 岩块弯曲复合式倾倒

(2) 岩块式倾倒 (Block Toppling)

岩块式倾倒主要发育在陡立或极陡倾坡内的坚硬、厚层板状岩体中,当坚硬的单个岩柱被大间距的正交节理切割时,就会产生岩块式倾倒破坏。构成边坡坡脚的短岩柱,由于受到从其后翻倒下来的长岩柱的载荷作用而被向前推出,从而产生坡脚滑移。这种坡脚滑移使得倾倒破坏进一步向边坡更高的部位发展。岩块式倾倒破坏底面清晰,通常由一个个横切节理所形成的上向阶梯构成。

根据大量的现场实地调查,岩块式倾倒由于在节理裂隙的作用下通常表现为“折而立断”,形成明显的根部折断面,因此岩块式倾倒也称为脆性破坏 (Brittle Failure)。由于根部折断面呈锯齿状,形态较为复杂,一般不会发生沿该折断面的滑动,所以,这类倾倒很难表现为整体破坏,而多表现为下部开挖失去“支撑”后的逐级后退式破坏,可能变形影响的范围较小。

另外,岩块式倾倒破坏具有很大的突然性,可以未经倾倒破坏的连续变形阶段,而表现为边坡临空面形成过程中沿某一组节理面转动的“瞬间倒塌”。尽管层状岩体边坡的破坏形式与“崩塌”相同,但是由于倾倒变形边坡下部有一些破碎岩体作为支撑,其变形破坏过程与“崩塌”还是有所区别的。

(3) 岩块弯曲复合式倾倒

岩块弯曲复合式倾倒破坏发生在许多横节理切割的长岩柱上,主要表现为似连续性弯曲的特征。该破坏并不是由连续岩柱的弯曲而造成,而是由于沿横节理的累积位移造成的。因为岩块弯曲复合式倾倒破坏产生大量的微小位移,所以出现的张裂缝比弯曲式倾倒时小,而其棱与面间的接触及间隙又比岩块式倾倒时小。

1.2.2 根据岩层结构对倾倒变形边坡的分类

根据边坡岩层的结构,可以将倾倒变形边坡分为中~陡倾反向层状倾倒边坡、缓倾反向层状倾倒边坡、陡倾同向层状倾倒边坡和似层状倾倒边坡。

倾倒变形边坡主要发生在中~陡倾反向层状岩质边坡中,但是,缓倾反向层状岩质有时也会发生倾倒变形,基本上皆是外营力作用的结果。如矿山开采工程中,一方面爆破震动使矿洞上部缓倾岩体进一步松弛,另一方面矿洞采空坍塌或收缩加剧了上部岩体的变形,上部岩体在弯曲拉裂作用和拉剪破坏作用下发生倾倒变形。

另外,在陡倾同向层状边坡中,也有极少数倾倒变形破坏的现象发生。陡倾同向岩质斜坡倾倒变形是在河谷演化、成坡过程中,岩层在平行坡面的最大主应力作用下由坡脚开始从下至上作悬臂梁弯曲,最终导致岩层根部折断,形成倾倒体;当坡体内折断带的剪应力超过其抗剪强度时,坡体将发生倾倒滑动形成滑坡。如黄河上游羊曲水电站中坝址近坝区发育的倾倒变形体,变形体岩性为二叠系下统深灰~灰黑色变质长石砂岩、粉砂岩、千枚状粉砂质板岩、千枚岩夹灰岩及不稳定的二云石英片岩、混合岩等,岩层产状为 $NW30^{\circ} \sim 60^{\circ}/NE64^{\circ} \sim 80^{\circ}$,其走向与河谷边坡走向夹角为 $5^{\circ} \sim 10^{\circ}$,属于陡倾同向坡。

似层状反倾岩质边坡一般是指边坡走向与优势结构面或岩层走向近于平行,而倾向相反的类型层状结构的边坡,这种边坡开挖后也常常发生倾倒变形。如云南澜沧江糯扎渡水电工程右岸导流洞进口似层状反倾岩质边坡,边坡岩性为完整性较差的花岗岩,岩石较软弱,较为破碎,且结构面发育。总体结构面具有较大规律的似层性,以中~陡倾角为主,绝大多数反倾坡内,其次是断续发育的缓倾角裂隙,连通率较大。在自重应力的长期作用下,破碎岩体沿临空面方向发生倾倒变形,即“点头”现象,局部产生垮塌。

1.2.3 根据倾倒变形发展阶段对倾倒变形边坡的分类

根据边坡倾倒变形的发展阶段可以把倾倒变形分为弯曲变形期、倾倒弯曲变形期、折断破裂期、倾倒崩塌或倾倒滑坡(图1-5)。

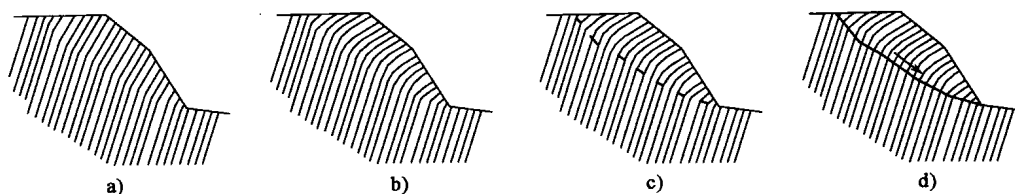


图1-5 根据倾倒变形阶段对倾倒变形边坡的分类

a) 弯曲变形期; b) 倾倒弯曲变形期; c) 折断破裂期; d) 倾倒崩塌或倾倒滑坡

(1) 弯曲变形期

在重力弯矩作用下,坡体前缘向临空方向发生重力倾倒,并逐渐向坡内连续发展,反倾层状岩体内部沿结构面发生层间相互错动。岩层倾角受控于层间相互错动,变形表现为依次连续倾倒变化,无倾角突变现象发生,其力学性质应属塑性连续变形。

(2) 倾倒弯曲变形期

在自重弯矩作用下,弯曲变形期倾倒边坡继续发展,层间相互错动亦随之进一步发展,岩层向临空方向发生悬臂梁式弯曲。岩层倾角发生了较大变化,却未出现不连续性破裂现象,其力学性质仍属塑性连续变形。

(3) 折断破裂期

在重力弯矩作用下,同时可能加上外营力的作用,岩层在弯曲部位出现拉张破裂并产生横切弯曲“梁板”的悬臂梁式折断破裂,形成倾向坡外、断续延展的张性或张剪性折断带,岩层倾角发生突变,其力学属性为不连续脆性破裂。

(4) 倾倒崩塌期或倾倒滑坡期

当岩层倾倒折断后,随着变形的发展,岩体向临空面倾倒变形加剧。在降雨、地震和人工开挖等诱发因素作用下,部分倾倒边坡进一步转动发生崩落或沿层面发生滑移崩落,这种失稳破坏的基本模式可概化为倾倒崩塌;部分倾倒变形边坡当折断面附近有倾向坡外的节理、裂隙

等发育时,折断面易追踪这些结构面相互贯通并形成倾向坡外的断续拉裂面,坡体将沿该拉裂面发生蠕滑变形,最终形成蠕滑—拉裂型滑坡。

一般来说,倾倒崩塌主要发生在硬质岩边坡中,由于具有很大的突然性,有时变形阶段没有明确的划分,而倾倒滑坡主要发生在软质岩边坡中,基本经历了以上所述的倾倒变形的各个阶段。

1.2.4 次生倾倒模式

(1) Goodman 和 Bray 提出的次生倾倒形式

根据倾倒变形边坡的外营力因素,Goodman 和 Bray (1976)提出了几种可能的次生倾倒变形机制,具体有以下几种模式(图 1-6),即坡底倾倒、坡基倾倒、坡顶倾倒、压缩倾倒和由于张裂缝产生的倾倒。坡底倾倒是指边坡上部失稳而使大角度反倾的坚硬岩层受到荷载作用向坡底发生的倾倒;当上覆岩体失稳而使下部大角度反倾的坚硬岩层受到荷载作用向外位移时产生坡基倾倒;当边坡下部位移而使坡脚翻倒的岩块解除约束时产生坡顶倾倒;压缩倾倒是指由于下部岩层软弱,受风化作用而使上部层状岩体发生的倾倒现象;黏结性岩石中由于张裂缝也会产生倾倒。

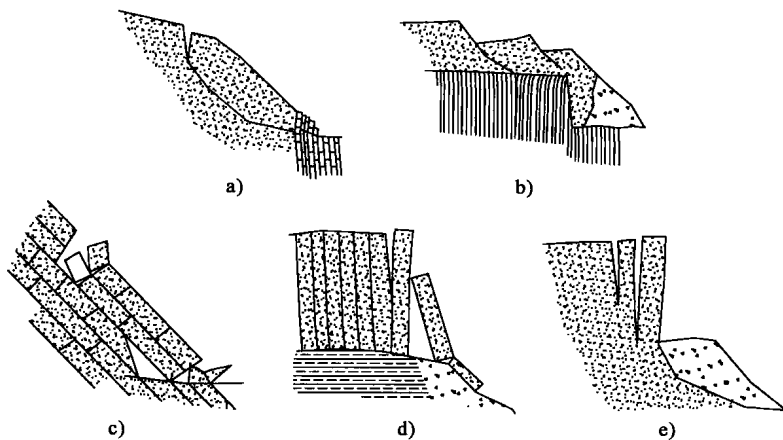


图 1-6 Goodman 和 Bray 提出的次生倾倒机理

a) 坡底倾倒; b) 坡基倾倒; c) 坡顶倾倒; d) 压缩倾倒; e) 由于张裂缝产生的倾倒

在以上这些次生倾倒模式中,压缩倾倒是自然界广为发育的倾倒变形模式,一般发育在中陡倾角的上硬下软型类岩层构成的反向边坡中。由于下部软弱基座的力学强度低,流变性能强,抗风化能力差,是整个坡体内的最薄弱部位,且又处于受力最大之处,当其受到外力作用时,发生变形,进而引发上部岩体发生倾倒。因此,压缩倾倒变形模式是一种复合模式,这类边坡的变形,基本上是以软弱基座的变形为先导,下部的这种不均匀压缩变形为其上部坚硬岩体的变形提供了有利的空间,从而使上覆岩体在自重应力下发生倾倒,并沿已有中等倾坡外节理产生张剪破裂。

如清江隔河岩水电站厂房边坡,该边坡高 185m,上部为灰岩,下部为页岩,断层及节理发育,边坡坡角上部为 73° ,下部为 30° ,岩层反倾,倾角为 $25^\circ \sim 32^\circ$,受下部页岩及其软弱夹层控制,上部坡体发生拉裂—倾倒变形。

(2) 典型的次生倾倒变形边坡

自然界发生的大部分次生倾倒变形破坏,基本上都起源于边坡坡脚的切割,其原因主要是受人为因素影响。如人工切坡或开挖矿石在坡脚下部形成采空区,导致边坡失去支撑而倾倒。

下面结合工程实例,介绍一些典型的次生倾倒变形破坏边坡。

①坡脚采空区影响导致的倾倒变形。随着矿山资源的开发,由于坡脚采空引发的倾倒变形破坏问题已越来越多地呈现在工程技术人员面前。采矿引起的倾倒滑移变形问题是在特定的地质构造和采矿工程条件下产生的,这类次生倾倒变形主要因坡脚以下存在可利用的矿产资源,如煤矿、磷矿等,由于坡脚矿洞的采矿开挖,一方面因爆破震动使上部岩体进一步松弛,另一方面开采资源后形成采空区,由于未对其进行治理,上部边坡岩体失去支撑,加剧了上部岩体的变形,因而发生倾倒变形。其中较为典型的有抚顺西露天矿北帮西区倾倒滑移变形、金沙江向家坝水电站马步坎边坡等。

如金沙江向家坝水电站马步坎边坡,该边坡坡高约600m,坡角为 55° ,岩性为砂岩、粉砂质泥岩互层,间夹薄层煤层,岩层反倾,倾角为 $2^\circ \sim 5^\circ$ 。由于坡脚煤层开采、河谷下切,坡体应力调整释放,使得边坡发生倾倒变形,坡顶和岩体内产生拉裂缝。

②坡脚开挖造成的倾倒变形。工程建设中,边坡坡脚不可避免要进行开挖,形成高陡的人工边坡。由于坡脚应力的调整和支撑力的减弱,边坡发生倾倒变形的案例很多。如南盘江天生桥水电站厂房南侧边坡,边坡高度约70m,岩性为薄~中厚层泥岩、粉砂岩和砂岩互层,岩层反倾,倾角为 65° 。由于在软硬相间的层状陡倾的岩层中开挖边坡,且边坡开挖后坡度较陡,坡率一般为 $1:0.8 \sim 1:0.5$,加之在施工过程中又未能及时喷锚治理,使开挖后的泥页岩边坡暴露时间过长,遭受风化。同时,由于边坡由软硬相间的地层组成,在边坡上部岩体自重应力的作用下,使得坡脚的应力集中,并产生软岩的压缩变形,致使该段边坡于1988年8月22日~10月28日先后三次发生岩体倾倒的现象,并伴随有滑动破坏,倾倒的体积有 $8\,000\text{m}^3$ 。

富溪隧道位于安徽省黄山市徽州区富溪乡境内,是汤(口)—屯(溪)高速公路的一座双连拱隧道,全长649m,最大埋深122.0m。隧址区属于构造侵蚀中山区,山体陡峻,隧道围岩地层为中元古界黟县系浅变质岩,主要岩性为变质砂岩,岩体节理裂隙及风化裂隙发育。有5组节理,第1组产状 $47^\circ \angle 40^\circ$,节理密度4条/m;第2组产状 $103^\circ \sim 114^\circ \angle 76^\circ \sim 80^\circ$,节理密度3~4条/m;第3组产状 $132^\circ \angle 21^\circ$,节理密度3~4条/m;第4组产状 $172^\circ \angle 69^\circ$,节理密度2~3条/m;第5组产状 $312^\circ \angle 18^\circ$,节理密度2~3条/m。由于隧道出口段岩体呈角砾状、碎石状松散结构,构造破碎、风化强烈,为一大型变形倾倒体,在施工过程中,坡面出现了大面积滑塌现象,并在截水沟附近出现裂缝。后来采用坡脚反压、仰坡注浆、喷射混凝土及大管棚等工程措施进行综合治理,保证了隧道施工和运行安全。

另外,阿尔及利亚东西高速公路建设过程中路堑边坡出现的倾倒变形病害也是由于坡脚开挖卸荷引发的。