

反倾向岩质边坡变形破坏规律分析*

黄润秋 王峥嵘 许 强

(成都理工学院工程地质研究所)

摘 要 反倾向层状结构边坡,是一种比较常见且危害极大的边坡类型。大量事实表明,这类边坡变形破坏的显著特点是:滑动面的形成一般都需要经历较长的时效变形孕育过程,一旦失稳,其破坏形式通常是剧烈的,造成的危害也相当严重。本文通过对国内外大量反倾向边坡变形破坏实例的分析研究,得出了反倾向边坡变形破坏的一般规律。同时,依据岩层倾角和岩体结构,将这类边坡划分为五大类结构类型,并分析了不同类型边坡的变形破坏特征。实例分析结果表明,岩层倾角、边坡坡角以及坡体结构等,是控制反倾向层状结构边坡变形破坏的主要因素。

关键词 反倾向边坡 变形破坏机制 边坡稳定性

一、前 言

近几年,随着我国国民经济建设的飞速发展,能源需求量在不断增加,政府部门正在修建和拟建一批大中型水利水电工程,尤其是在西南、西北一些水能资源集中、开发条件又较好的地区更将大力开发。但是,在这些地区由于晚近期以来,地壳长期隆起抬升,河流急剧下切形成高山深谷,岸坡高度小则百余米,大则近千米,加之现代构造活动强烈,自然地质作用发育,因此,斜坡环境多数较为恶劣。而这些地区拟建和修建中的大型、巨型水电工程大坝高度已接近或将超过 300m,电站装机容量正从数十万向数百万千瓦过渡,蓄水库区长度也将达数十至数百公里,对这样的大型工程,斜坡稳定性工程地质问题将会对工程修建的可行性决策起到重要的控制作用,并在很大程度上影响工程修建及投产运营效益。因此,从 80 年代以来,人们进一步加强对斜坡稳定性的理论及应用研究。

在组成边坡的岩体中,以层状结构类型最为多见,因而在实际工程中对此类岩体结构边坡的研究也最为广泛。其中又可分为由顺倾坡外岩层构成的顺向坡和由反倾坡内岩层构成的反向坡两类。通常认为反倾向边坡都较顺倾向边坡稳定,不易形成贯通滑面,因而对其稳定性的研究远不如对顺倾向边坡深入,许多有关边坡变形破坏类型和机制的概念性模型也都是针对顺倾向边坡建立的,对它的失稳机理、稳定性评价及预测也有了较为清楚的认识。但随着人类工程活动的日益频繁及范围的扩大,在许多国内外在建或拟建中的水利水电及其它工程中,却出现了大量与反倾向边坡有关的工程地质问题,对工程设计、施工和运营都造成了较大危害。天然反倾向边坡失稳破坏的事例也屡见不鲜,且其所导致的崩滑过程都是突发性的、大规模的、灾难性的。据统计,国内仅 80 年代以来,这类边坡失稳导致一次性伤亡

* 本研究获国家自然科学基金委员会优秀中青年人才专项基金资助。

人数在数十人以上或直接经济损失在数百万元以上的灾难性事件就达十余起,如 1980 年盐池河岩崩、1982 年洒勒山滑坡、1985 年巫溪滑坡、1987 年白沙滑坡、1989 年溪口滑坡、1992 年昭通滑坡、1994 年乌江鸡冠岭滑坡等。仅这些灾害造成的人员伤亡就在千人以上,直接经济损失近亿元,善后处理及整治费用则高达近十亿元,而由于灾害对社会所带来的影响(如中断水、陆路交通)所产生的间接损失则更是无法估量。国内外部分典型实例如表 1 所列。

表 1 部分反倾向边坡失稳危害情况

序号	实例名称	地点	时间	规模 ($\times 10^4 \text{m}^3$)	损失
1	金川露天矿边坡	中国	1969~	30 (1990.3)	采场被迫停产,坑底机器毁坏
2	宜昌盐池河磷 矿山体崩塌	中国	1980.6	100	整个工业场区和民用建筑物被摧毁埋没,死亡 284 人
3	天生桥二级水电站 南厂房边坡倾倒	中国	1988.6~10	0.8	阻碍了厂房基抗的开挖
4	华蓥山溪口镇滑坡	中国	1989.7	20	转化为碎屑流,运动 1.5km,毁 4 个村,6 个企业房屋、设备。损失 600 万元,死亡 221 人
5	Frank 滑坡	加拿大	1903.4	3650	发展为碎屑流,在 100 秒内运动 32.5km,覆盖加拿大太平洋铁路及下部矿坑,摧毁 Frank 镇南部,死亡 70 人
6	Ghurgar 岩崩	秘鲁	1971.3	10	由岩崩引起的涌浪高 30m,摧毁了湖沿岸 churgar 矿公司的驻地,死亡 400—600 人
7	Brilliant 开挖边坡	美国	1941.3	8	使二条铁轨移位并使一列火车脱轨

从表 1 中可以看出,反倾向边坡稳定性问题在水利水电、矿山、铁路边坡开挖以及城市环境灾害等方面都广泛存在。但是,这类边坡的变形破坏现象,只是在近 20 年才被人们所认识和研究(Müller, 1968; de Froitras and Watters, 1973; Bakovansky et. al, 1974; Goodman and Bray, 1976)。从 60 年代初人们开始对反倾向边坡变形破坏现象具初步认识起,至今对这类边坡的研究仍局限于单个事例的分析,对于控制影响这类边坡稳定性因素和变形破坏类型缺乏系统的总结和分类,对变形破坏机理也尚没有清晰的认识。随着人类活动广度与深度的不断加大,相信还会出现许多与此类边坡相关的工程地质问题,因而系统、深入地对反倾向边坡进行研究,较全面地了解其变形破坏类型与机制,并寻找出对其行之有效的稳定性分析评价方法和工程处理措施,无疑对今后的工程实践具有很强的理论及实践指导意义。

据统计和大量反馈信息,80 年代以来,我国大型工程建设中的反倾边坡变形失稳问题或灾难性崩滑地质事件,具有以下两个突出特点:

(1) 变形过程的时效性,失稳破坏过程的突发性、灾难性。据统计,基岩崩滑灾害大多发生在反倾向或近水平岩层构成的岩质斜坡中(如溪口、巫溪、盐池河、昭通、虎丘山、漫湾、天生桥、鸡冠岭及未失稳但已发生变形的黄腊石等)。这是一个很发人深思的问题,传统的观点往往认为顺倾向边坡更易于发生破坏,因而,产生灾害也应更频繁。实际上,这是一个误区,从地质历史演变观点来分析,顺倾向边坡大多沿已有结构面(层)发生失稳破坏,其层面一旦由于外动力地质作用而与地面贯穿,则有顺其滑动的可能。因此,对顺倾向边坡来说,大多数情况下不存在坡体自身的累积时效变形问题(或者说,这不是一个主要问题),从而在破坏之前,不可能积累过大的形变应变能,因而,破坏过程往往不剧烈,故此,成灾的可能性较小。

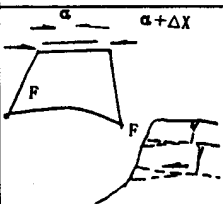
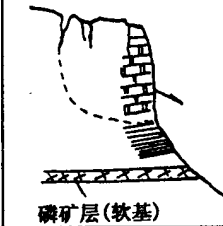
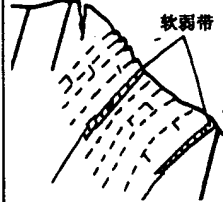
反倾向边坡则不然,它本身没有现存的可供滑动的有利结构面,其滑动面或破坏面往往是在漫长的地质历史过程中通过坡体自身的累积时效变形,导致破坏面逐渐孕育,最后累进性贯穿。也就是说,它在失稳之前有一个漫长的自组织演化过程(时效变形破裂),从而积蓄形变应变能,最终通过脆性剪断(或张剪破坏)潜在滑动面上残存的“锁固段”,导致坡体突然失稳、剧烈释放应变能,以致坡体高速下滑,产生灾害。

(2) 已有的灾害表明,反倾向边坡的失稳所伴随的灾难性地质过程,常常与人类工程活动是紧密联系在一起的。上述列举的实例中,大多数都是由于人类工程活动(如采矿,修筑公路等)或不适宜的生活活动所诱发。

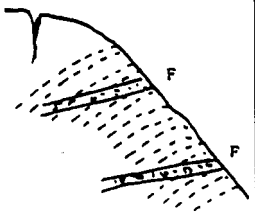
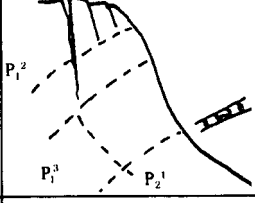
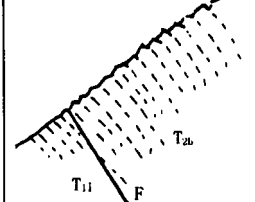
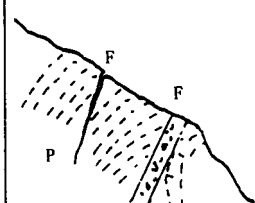
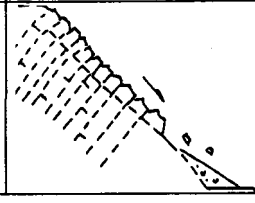
二、国内外反倾向边坡变形破坏实例总结

由于反倾向边坡在岩层倾向与边坡坡向组合上的特殊性,其变形破坏控制因素也有别于其它边坡类型。为寻找出影响和控制这类边坡变形破坏的主要因素,我们共收集了 16 个较为典型的反倾向边坡实例。各实例边坡坡体结构特征及变形破坏特征见表 2;同时进一步把各实例中的坡体岩性、岩层倾角、坡角、破坏规模等经概括整理后列入表 3。

表 2 国内外典型反倾向边坡变形、失稳实例

岩层倾角	实 例	岩性及岩体结构	变形破坏类型及过程	示 意 图	备 注
$<2^\circ$	金沙江向家坝马步坎高边坡	坡体由 T_3-1 、 T_1-2 砂岩、粉砂质泥岩夹煤线组成、坡高 600m, 平均坡度 55°	该区由于河谷下切,地应力由弱到阵发性增强,使坡体沿已有结构面滑移,并在后缘拉开		变形发育水平深度大于 356m
$3\sim5^\circ$	龙羊峡大型滑坡群	坡体由杂色粘土、壤土、砂壤土及砂土组成,坡高 300 ~ 500m。坡角 $35\sim45^\circ$	滑移—拉裂—剪断机制。随河谷下切,坡体向临空面方向卸荷回弹,产生层间错动,在后缘产生拉裂并不断扩展,坡体锁固段被剪断后形成高速滑坡		$1.0\sim10\times10^6\text{m}^3$, 拉裂面发育深度 $\approx 0.5\times$ 坡高
15°	盐池河磷矿山体崩塌	矿区主要由前震旦纪混合花岗岩、震旦纪陡山沱含磷岩系及灯影组白云岩组成,崩塌山体相对高度为 350m	为滑移倾倒机制。由于采场底板的软弱结构岩体与地下开矿的共同影响,使上部岩体沿已有裂隙拉开并向扩展,在降水的影响下,发生大型的崩塌		
$25\sim32^\circ$	清江隔河岩厂房高边坡	坡体主要由寒武系下统灰岩与页岩组成,上部岩层坡角 73° ,下部 30° ,坡体中、小断层及节理发育	以倾倒—张裂变形为主,主要是受下部页岩垫层及软弱夹层的控制,使边坡上部产生拉裂		裂缝垂直发育深度 15~20m

续表 2

岩层倾角	实 例	岩性及岩体结构	变形破坏类型及过程	示 意 图	备 注
30~50°	资 水 敷 溪 口 右 岸 边 坡	边坡由元古界浅变质中厚层板岩、砂质板岩组成,坡高270m,坡角30~45°,坡脚与坡体中部有缓倾坡内的断层通过,破碎带未胶结	为蠕变倾倒性质的变形。坡角未胶结的断层破碎带构成山体的软基,在上部坡体自重作用下,产生不均匀压缩变形,使上部岩体弯曲		变形水平发育深度30~70m
40~50°	雅 鲁 江 锦 屏 水 电 站 三 滩 坝 址 左 岸 边 坡	边坡由二叠系变质砂岩与板岩互层构成,坡角45~55°	为倾倒—变曲—拉裂性质的变形。变形仍是由于板岩的力学性质较差而在上覆岩体自重作用下发生时效变形而弯曲		现存弯曲变形发育深度为60m
45~60°	乌 江 渡 水 电 站 黄 崖 边 坡	边坡上部为下二叠统阳新灰岩,坡角70~80°,下部二叠统乐平煤组硅质灰岩、碳质泥岩、页岩及煤层,坡角20~40°	为塑流拉裂机制的破坏。软弱的乐平煤组地层在坡脚由于上部岩体自重作用而产生不均匀压缩变形,使上部岩体拉裂并扩展,最后形成崩塌		裂缝水平发育深度约100m
50°	加 拿 大 Frank 滑 坡	坡体上部为厚层状灰岩,下部为薄层页岩夹煤层,中间为断层接触,坡角45°	为塑流拉裂机制的破坏。下部页岩层的强度低且存在人工开采的矿井,因而产生不均匀压缩变形而使上部岩体拉裂,并最终形成崩塌		
60~63°	红 水 河 龙 滩 水 电 站 左 岸 边 坡	边坡上部为砂岩、粉砂岩与泥板岩,下部为泥板岩夹不纯灰岩及粉砂岩。坡体内发育有一系列陡倾坡内的断层	为倾倒—蠕变形式的变形。受下部软弱岩层及未胶结断层破碎带的控制,使上部岩体产生弯曲倾倒蠕变,并不断地加剧		总体积 12.88× 10 ⁶ m ³
60°	沅 水 五 强 溪 水 电 站 左 岸 边 坡	坡角30°,在120m高程以上坡体主要为P ₁ 千枚状板岩。坡体中断层等倾坡内的软弱结构面发育	为倾倒—蠕变形式的变形。主要是受坡角断层破碎带的控制,使上部坡体产生弯曲倾倒变形		变形水平发育深度30~70m
60~70°	天 生 桥 二 级 水 电 站 厂 房 南 边 坡	边坡由中三叠系泥岩及砂岩组成,坡角65°	为倾倒(弯曲)—蠕变形式变形。由于泥岩软弱的力学性质,使得上覆砂岩产生弯曲,倾倒而导致崩塌		变形破坏深度3~5m

续表 2

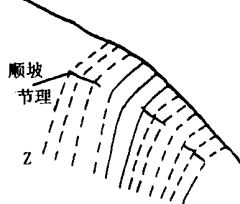
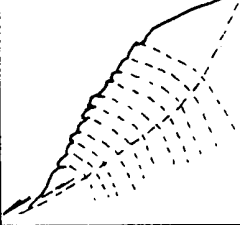
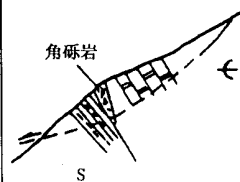
岩层倾角	实 例	岩性及岩体结构	变形破坏类型及过程	示 意 图	备 注
70°	金川露天矿边坡	边坡由前震旦纪变质岩地层组成,上部为绿泥石英片岩,中部为大理岩、下部为混合岩,整个坡体节理、层间错动、断层破碎带交叉发育,坡角 39°	为弯曲—拉裂形式的变形破坏。由于整个坡体较为破碎,又有缓倾坡内的断层破碎带通过,在上覆岩体自重作用下产生不均匀压缩变形,而使上部岩体发生弯曲、倾倒		坡 高 264m, 体积 $3.0 \times 10^6 \text{m}^3$
70~80°	碧口水电站坝区倾倒体边坡	边坡由震旦系的绢云千板岩与变质凝灰岩交互出现构成。属互层结构,坡体内有一组缓倾坡外的节理,坡角 30~38°	变形破坏是由于河谷被切割,岩体应力释放后,反倾岩层向河谷临空方向发生弯折并沿缓倾坡外的节理面拉开		变形破坏水平深度平均 ± 20m
70~90°	雅鲁江锦屏水电站水文站坝址左岸滑坡	边坡由三叠系中统及二叠系下统泥质板岩为主组成,边坡坡角为 35~40°	为弯曲(倾倒)—拉裂—滑移机制的破坏。随河谷下切,岩层在重力作用下向河谷临空方向发生弯曲倾倒—拉裂变形。当倾坡外的切层拉裂缝贯通后,形成滑坡		弯曲变形深度 > 200m, 滑带水平深度 > 80m, $1800 \times 10^4 \text{m}^3$
35~47°	华蓥山溪口滑坡	坡体上部主要为寒武系上统白云岩,灰质白云岩。下部为志留系页岩及泥质粉砂岩。坡体中部发育有一断层,下覆软弱泥岩	由于下部岩体力学性质较差,使上部坡体重量作用于钙质胶结的角砾岩上,长期时效使锁固段岩体内部损伤、缺陷累进性扩展,产生突发脆性破坏,形成高速滑坡,为塑流、剪断型式破坏		转化为高速碎屑流

表 3

典型实例重要参数简表

序号	实例名称	岩 性	岩层倾角 (°)	坡 角 (°)	岩层与 坡面夹角 (°)	破坏深度 (m)	规 模 ($\times 10^4 \text{m}^3$)	坡 高 (m)
1	向家坝	砂岩、粉砂泥岩夹煤线	2	55	123	水平 < 356		600
2	龙羊峡	杂色粘土及砂土	3~5	35~45	136	垂直 150~250	100~1000	300~500
3	盐池河	白云岩、页岩	15	85	80	垂直 157m 水平 94m	100	350
4	隔河岩	灰岩、页岩	25~32	下 30 上 73	121.5 78.5	垂直 15~20		185
5	敦溪口	板岩、砂质板岩	30~50	30~45	102.5	水平 30~70	630.43	270

续表 3

序号	实例名称	岩 性	岩层倾角 (°)	坡 角 (°)	岩层与 坡面夹角 (°)	破坏深度 (m)	规 模 ($\times 10^4 \text{m}^3$)	坡 高 (m)
6	水文站	泥质板岩	45~55	35~40	92.5	水平>200	1800	460
7	三滩左岸	变质砂岩、板岩	40~50	45~55	85	水平 60		150
8	金川(东采场)	大理岩、混合岩	70	39	71		30	264
9	黄 崖	灰岩、泥岩、 页岩、煤层	45~60	上 70~80 下 20~40	52.5 97.5	垂直 150~200		300
10	Frank	灰岩、页岩	50	45	85		3650	625
11	龙 滩	砂岩、泥板岩	60~63	30~40	83.5	水平 53~76	1288	400
12	五强溪	千枚岩	60	30	90	水平 30~70	12.5	83
13	天生桥	泥岩、砂岩	65	65.2	49.8	水平 3~5	0.8	70
14	溪 口	白云岩、页岩、 泥质粉砂	35~47	35	104		20	350
15	碧 口	千枚岩、凝灰岩	70~80	40~70	40~70	水平 20±		70~80
16	Churgar		40~45	45	90~95		10	400
17	Brilliant		10	45	125	垂直 30.56	8	50
18*	北泥盆(美)	砂页岩互层	60~70	50	60~70			
19*	GlenPean(英)	片 岩	80	40	60			
20*	北威尔士采石场	板 岩	70	50	60			
21*	西班牙公路	灰岩、砂岩	60	40	80			
22*	陕南褒河	片岩、千枚岩	55~60	40	80~85			

注：* 据王思敬、肖远。

三、反倾向边坡变形破坏的一般规律

根据表 2、表 3, 可得到以下几点认识。

1. 岩层倾角在很大程度上影响到边坡变形破坏发生的类型, 同时也决定了不同岩层倾角条件下变形破坏控制因素的差异。在近水平层状结构岩体边坡中, 主要是由于应力(构造残余应力)释放引起岩体松弛, 使坡体沿已有软弱结构面产生卸荷回弹。金沙江向家坝马步坎高边坡的变形及龙羊峡滑坡群初期变形均属此类; 对于缓—中等倾角反倾向边坡, 自重应力与软基效应对边坡变形破坏起了重要控制作用, 表中岩层倾角大于 25° 的边坡无一例外都受到这两个因素的控制, 边坡岩体的变形破坏主要表现为典型的弯曲—拉裂型或受软基控制的软基压缩—拉裂型。在岩层倾角较陡的情况下, 由脆性岩层构成的反倾向边坡, 其失稳破坏主要表现为陡倾岩层的弯曲—拉裂—折断—崩塌型, 而柔性岩层构成的反倾向边坡, 此时亦可发生强烈的塑性弯曲变形。

2. 岩层倾角同样控制了反倾向边坡变形破坏发生的深度。从图 1a 中可以看出, 在所有类型反向坡中, 尤以中等倾角(或中偏陡倾角)反倾向边坡最易发生变形破坏, 且变形孕育时间长、规模也较大。发生破坏的起始岩层倾角一般大于 25°; 且图 1a 清晰地表明, 在中等倾角

范围内($35^{\circ} \sim 65^{\circ}$),边坡变形破坏发育的深度最大。根据 $\ddot{o}$ Aydan 及 T. Kawamoto 通过对 32 个实例总结(图 2)可以看出,反倾向边坡破坏多发生在岩层倾角大于 35° 范围内。

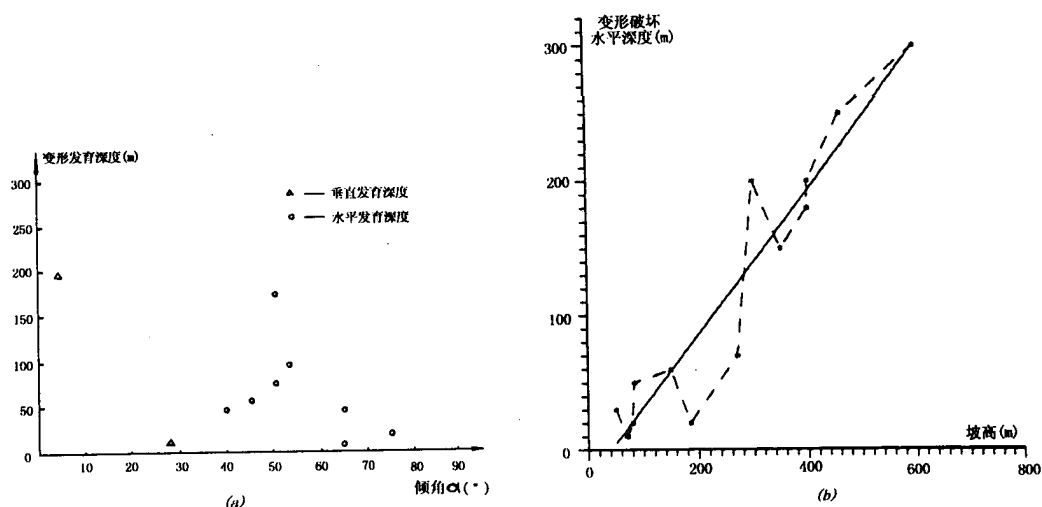


图 1 边坡岩层倾角、坡高与变形破坏深度关系图
(a)岩层倾角与破坏深度关系;(b)坡高与破坏深度关系

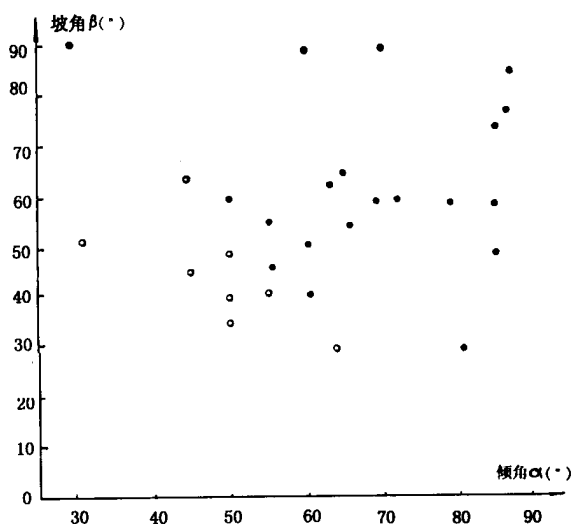


图 2 边坡破坏时岩层倾角与坡角关系图

3. 坡高与反倾向边坡变形破坏有着直接的关系,如图 1b 所示。可见,随着坡高(H)的增大,边坡变形破坏发生的水平深度(D)成直线变化,两者具有如下的相关关系:

$$D = 0.53659H - 21.7969$$

4. 边坡坡角对边坡变形破坏具有较大程度的影响。在所列实例中,发生变形破坏边坡的坡角都在 30° 以上,图 2 也清楚地说明了这一点。一般而言,在岩层倾角相同的条件下,坡角越大,岩层变形深度愈浅,反之亦然。例如,天生桥南厂房与金川露天矿边坡,同为陡倾角

层状岩体构成的反倾向边坡,天生桥南厂房边坡坡角为 65.2° ,金川露天矿边坡坡角为 39° ,前者比后者坡角陡近 30° ,两者变形发育深度就不相同,前者只在坡体表部 $3\sim 5\text{m}$ 深度发育变形破坏,而后者却可形成较深的不连续面。

5. 反倾向边坡的变形破坏,大都发生在软硬岩层交互出现的岩体结构、或有软基存在的坡体中。

四、反倾向边坡结构类型划分及各类变形破坏特征分析

从以上分析中可以看出,影响反倾向边坡变形破坏因素中,岩层倾角占了主导地位,其次为岩体结构和坡角。正是由于这些边坡本身所具有的内在因素(岩层倾角、岩体结构)决定了反倾层状结构岩体边坡具有不同的变形破坏特征。从图 2 中可以知道,边坡坡角小于 30° 的反倾边坡,很少有失稳现象发生,产生变形破坏的反倾边坡其坡角一般都在 30° 以上。从已有资料来看,反倾向边坡变形失稳与坡角关系较为随机,一般规律尚不清楚,故在以下的反倾向边坡结构类型划分中,坡角因素不做为划分依据。但应当指出,这里所进行划分的边坡,坡角都大于 30° 。基于以上认识,可以根据组成边坡岩体岩层倾角、岩性结构差异,同时考虑变形控制因素的不同,对反倾层状结构岩体边坡结构类型进行划分。具体划分方案见表 4。

在表 4 划分中,以岩层倾角为一级划分,在此基础上,根据具体岩体(岩性)结构特征,做二级划分。共划分出了四个大类:

I. 近水平—缓倾层状结构岩体边坡(岩层倾角 $< 25^{\circ}$)

I—1. 均质(似均质)近水平层状结构岩体反倾向边坡(无岩性分异);

I—2. 互层状近水平层状结构岩体反倾向边坡;

I—3. 软基状近水平层状结构岩体反倾边坡。

II. 缓—中倾角层状结构岩体反倾边坡(岩层倾角 $25\sim 65^{\circ}$)

II—1. 似均质层状中等倾角反倾向边坡;

II—2. 互层状中等倾角反倾向边坡;

II—3. 软基状中等倾角反向坡。

III. 陡倾角反倾向边坡(岩层倾角 $> 65^{\circ}$)

III—1. 厚层状陡倾角反向坡;

III—2. 中~薄层状陡倾角反向坡。

IV. 特殊类型反向坡

从以上对反向坡结构类型划分可以看出,反倾向边坡变形破坏一般是受岩层倾角与岩体结构控制的,不同结构类型边坡有其特定的变形破坏形式和控制因素。现就不同结构类型边坡分述如下。

(一) 类型 I——近水平—缓倾层状结构岩体边坡

类型 I 是指由岩层倾角小于 25° 的层状结构岩体构成的近水平—缓倾岩层反倾边坡。这类边坡由于岩层倾角缓,岩层不具备发生弯曲变形的空间,仅有与岩层近于垂直的河谷临空面,因而总体上讲这类反倾边坡没有弯曲变形发生。其变形破坏主要取决于岩性结构和某些特定的内动力因素。边坡的变形破坏主要表现为沿已有结构面、层面的拉开、错动、滑移。

表 4

反倾层状结构岩体边坡结构类型划分

类 型	岩层倾角	变形破坏类型	岩体结构	变形控制因素	实 例	示意图	变形破坏特征	备 注
I	I-1	<25°	卸荷回弹	互 层	向家坝		沿后缘已有的裂隙拉开	应力不变时,变形减速发展,水平深度<325m,坡度 55°
	I-2		滑移-拉裂-剪断	似均质层状	龙羊峡		在后缘产生拉裂,有层间错动	破坏深度为坡高的 1/2,规模 100~1000×10 ⁴ m ³
	I-3		滑移-倾倒-崩塌	软 基	盐池河		沿已有构造裂隙进一步拉开	规模 100×10 ⁴ m ³
II	II-1	25~65°	弯曲(倾倒)-拉裂-(滑移)	均质层状	五强溪		在坡面形成反阶台坎,层间错动发育,层面发育切层,楔形张裂,坡顶后缘产生拉裂,坡体岩体产生弯曲、倾倒变形	变形水平发育深度 60m(三滩),破坏零星,规模 1288×10 ⁴ m ³ (龙滩);变形水平发育深度 30~70m(敷溪口);拉裂垂直深度 15~20m(隔河岩)
	II-2		弯曲(倾倒)-拉裂	互 层	锦屏三滩 龙 滩 敷溪口 隔河岩			
	II-3		塑流-拉裂	软 基	加拿大 Frank 乌江黄崖			
III	III-1	>65°	弯曲-拉裂-(倾倒)-滑移	均值层状	锦屏水文站		坡体岩层产生大弯曲变形,层间错动切层张裂发育,岩体折断倾倒而整体失稳	滑面水平深度>80m,规模 1800×10 ⁴ m ³
	III-2		倾倒-蠕变	互 层	天生桥 金 川 碧 口		在坡面形成反阶台坎,层间错动与切层张裂发育,易沿顺坡向节理面产生倾倒	弯曲倾倒深度 3~5m(天生桥);倾倒蠕变厚度平均 20m±(碧口);破坏规模 30×10 ⁴ m ³ (金川)
IV	35~80	塑流-剪断	软 基	坡体内 特殊岩体结构	溪口滑坡		中部钙质胶结角砾层形成锁固段,累进性破坏而失稳	滑坡转化为高速碎屑流

但是,由于岩性结构不同,边坡变形破坏的控制因素和表现形式也不尽相同。因此,根据岩性结构不同,又将此类边坡进一步划分为三个亚类:即 I-1、I-2 及 I-3。

I-1 型: 均质(似均质)近水平层状结构岩体边坡。这类边坡由于岩性结构较均一,因而其变形破坏一般不受岩性结构的控制,而是表现为由于应力释放及卸荷回弹而导致的层间错动和在坡体后缘产生拉裂,随着拉裂缝逐渐向下扩展而发生滑移—拉裂—剪断型变形破坏。如龙羊峡滑坡群的变形破坏(参见表 2)。

I-2 型: 互层状近水平层状结构岩体边坡。虽然这类边坡在岩性结构上表现为力学性质不同的软、硬两种材料相间出现,但由于较缓的岩层倾角使得岩性结构表现的控制作用不明显,而主要表现为应力释放型表生时效变形机制,当应力释放减弱时,边坡岩体变形即趋于减弱或终止。如金沙江向家坝马步坎高边坡岩体变形就属此类(参见表 2)。

无论是 I-1 型还是 I-2 型边坡,不考虑其它因素,仅就沿弱面回弹变形而言,总体上讲都将随着应力减弱而呈减速发展。

I-3 型: 软基状近水平层状结构岩体边坡。这类边坡坡体中具有软弱基座,软基在上覆岩体自重作用下发生塑性挤出,为上覆岩体提供了变形空间,使得整个边坡呈现塑流—拉裂性质的破坏(如美国 Brillnat 边坡)。由于下部泥页岩存在,使边坡呈现软基岩体结构类型,上部坡体产生拉裂,并由于水的冻融作用影响使裂缝不断向下扩展,直到与下部软弱层贯通形成崩塌。又如宜昌盐池河磷矿山体,由于采场底板软弱结构岩体与地下采空区共同影响,上部岩体沿已有构造裂隙拉开并向下扩展,在暴雨等因素诱发下发生滑移—倾倒—崩塌形式的破坏(参见表 2)。

对于 I-3 型边坡,控制边坡变形破坏发展的主要因素是坡体中的软弱基座。同样,由于岩层倾角很缓,整个坡体变形中岩层弯曲现象不显著。

(二) 类型 II——缓—中倾角反倾边坡

类型 II 是指组成坡体岩层倾角在 $25^{\circ}\sim 65^{\circ}$ 之间的边坡,这是反倾向边坡中最为常见的类型。这类边坡在漫长的地质历史时期过程中,其变形破坏以重力时效变形为主,只是由于岩体结构不同造成了边坡变形破坏特征的差异。根据岩体结构不同此类边坡又可分为三类: II-1 为似均质(均质)层状中等倾角反向坡; II-2 为互层状中倾角反向坡; II-3 为软基状中倾角反向坡。

II-1 型: 反倾边坡的岩体结构主要为均质或似均质层状,边坡变形控制因素主要为岩体自重应力,变形破坏主要为弯曲—倾倒—蠕变形式。其表现为岩层在自重作用下向河谷方向发生弯曲(倾倒),在坡面上形成反坡阶坎,层面发育切层张裂隙,当切层张裂隙随时间发展而贯通时,边坡将产生整体失稳。如沅水五强溪水电站开挖边坡,为由千枚岩组成的似均质反倾边坡,坡体中存在的反倾向断层带更加剧了变形破坏发生(参见表 2)。

II-2 型: 互层状中等倾角反向坡,其发生变形破坏的特征与 II-1 型相似,多为弯曲(倾倒)—拉裂形式变形破坏。但由于其软、硬相间的特殊岩体结构,岩体在自重作用下,力学性能较差岩层将产生较强的压缩变形,使得上覆坚硬岩体因板梁弯曲折断而发育切层张裂。张裂缝一般只切穿坚硬岩层,至软弱层时终止。如在雅砻江锦屏水电站解放沟坝址左岸 JD4[#] 洞中 22.5~24.5m 的岩体变形现象。

II-3 型 具软基存在的中倾角反向坡,由于坡体内具特殊岩性结构,因而此类反向边坡的变形破坏往往是受岩体结构与岩体自重应力的共同作用。其变形破坏特点与 I-3 型相似,多为塑流—拉裂形式变形破坏。不同之处在于这类反向坡的较大岩层倾角使得边坡在

变形破坏时,都不同程度地表现出岩层向河谷临空面的弯曲和倾倒(参见表 2),而在 I—3 型中则没有这种变形破坏发生。Ⅱ—3 型反向坡岩体弯曲变形发育到一定程度,后缘切层裂隙贯通边坡将发生整体失稳。

从整体上讲,类型Ⅱ中反倾边坡岩体在变形破坏时都有岩层的弯曲—倾倒现象发生,并在坡体后缘、切层产生拉裂,在岩体自重和岩体结构共同作用下变形进一步发展,直至边坡发生整体破坏。

(三) 类型Ⅲ——陡倾角反倾向边坡

类型Ⅲ是组成边坡岩层的倾角大于 65° 的反倾向边坡。从整体上看,这类边坡破坏特点与类型Ⅱ相似,总体上仍发现为蠕变—倾倒(弯曲)—拉裂形式,但变形破坏的最终表现形式和规模都因岩体结构不同而不同。因此,又可分为两种类型,即Ⅲ—I 与Ⅲ—Ⅱ。

Ⅲ—I 型: 互层状中厚层状陡倾角反倾边坡。这类边坡由于互层岩体中脆性岩体存在,加之岩层倾角较陡这一因素,使得边坡岩体弯曲变形发育不充分。岩层在弯曲变形很小时就会在根部发生脆性拉张,岩层折断、倾倒。因此这类边坡从整体上多表现为倾倒—崩塌形式的破坏。如天生桥南厂房以及金川露天矿边坡的变形破坏即属此类(参见表 2、表 4)。

Ⅲ—Ⅱ 型: 中—薄层状陡倾角反倾边坡。这类陡倾角反倾边坡与Ⅲ—I 型不同之处在于其坡体岩体在变形破坏时,可以产生很大的弯曲变形而不发生岩体拉开折断。这类边坡多是由柔性较好的中—薄层状岩体组成的均质边坡。如锦屏水电站水文站滑坡,是由泥板岩构成的均质边坡,岩层倾角近于直立,在这种不利的倾角条件下,其变形破坏深度仍可达 200m 左右。造成这一现象的原因主要是由于泥板岩具有较好柔性,岩层可以在产生很大的弯曲变形后才发生折断(图 3,表 2)。

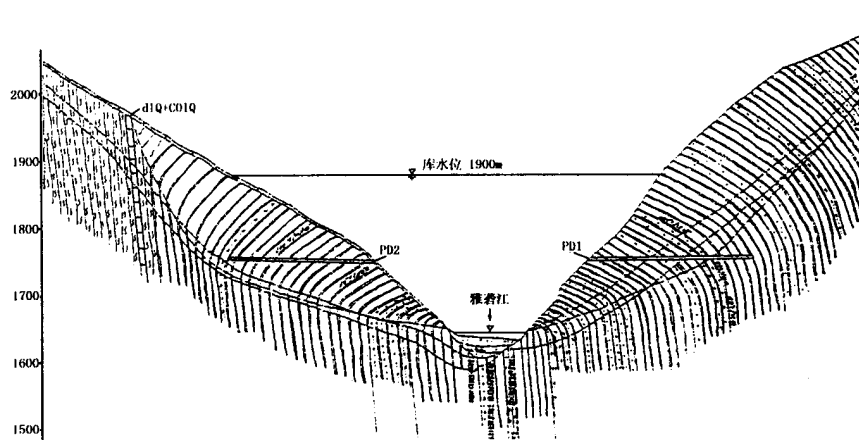


图 3 锦屏水文站弯曲拉裂变形体

(四) 类型Ⅳ——特殊类型的反向坡

类型Ⅳ为一组特殊类型的反向坡。这类反向坡尽管总体上也具有反倾层状结构,但是其变形破坏已不再受岩层层面影响,而主要受一些特殊的岩体(性)结构所控制。

在本类型中较典型的为一类“挡墙式”反向坡。这类边坡在坡体底部或中部发育有一层较为坚硬的岩体,形成“锁固段”,在上覆岩体自重应力作用下发生累进性破坏,最终使锁固

段被剪断,坡体发生破坏。如华蓥山溪口滑坡,该滑坡滑前在坡体下部较软的志留系页岩层软基上,覆盖有一层较为坚硬的钙质角砾岩,角砾岩层以上为一强风化岩体段,因而角砾岩层象“挡土墙”一样阻挡了上部坡体变形,形成“锁固段”;随时间推移角砾岩层发生累进性破坏,最终被剪断,坡体整体失稳并形成高速滑坡。

五、结 论

通过以上对反倾层状岩体边坡结构类型划分及变形破坏特征的分析,可得出以下结论。

1. 在所有类型反向坡中,尤以中等坡角中陡倾角反向坡变形破坏最为常见,且变形发育孕育时间长,规模也较大,从图2可以看出,破坏边坡多发生在岩层倾角大于 40° ,坡角 $50^\circ \sim 70^\circ$ 的范围内。

2. 由图1可以看出,坡体变形发育深度随着岩层倾角增大而增大,在 $50^\circ \sim 60^\circ$ 时变形发育深度最深,而后随着岩层倾角增大而逐渐变浅。这说明岩层倾角在很大程度上控制与制约着反向坡变形破坏的发育规模。

3. 当在岩层倾角、坡体结构及岩性相似的边坡中,坡角对变形破坏规模起到控制作用,即坡角越陡($>60^\circ$)变形破坏发育规模越小(如天生桥南厂房边坡与金川露天矿边坡)。

4. 在边坡具有岩层倾向坡内这一特殊结构条件下,边坡岩体(性)结构决定了边坡变形破坏类型。一般地讲,具软基状层状结构岩体反向坡一般为塑流—拉裂—(崩滑)型破坏;具互层状与均质(似均质)层状结构反向坡,多为弯曲—蠕变—倾倒—(滑移)型破坏。

5. 人类工程活动,尤其是坡脚下部的采掘致使采空区的出现,是反倾向边坡失稳破坏的主要影响因素。这种影响通常出现在坡脚具有缓倾或近水平含煤软层的边坡中,采空区的出现从力学效应来看,实际上相当于广义的“软基效应问题”。

参 考 文 献

- [1] 黄润秋等,黄河拉西瓦水电站高边坡稳定性的系统工程地质研究,成都科技大学出版社,1991。
- [2] Heck 等著、卢世宗译,岩石边坡工程,煤炭工业出版社。
- [3] 中国典型滑坡,科技出版社,1992。
- [4] 肖远、王思敬,边坡岩体弯曲破坏研究,岩石力学与工程学报,Vol. 10, No. 1, 1991。
- [5] 杜永廉,边坡块体结构破坏机制的模拟试验,岩体工程地质力学问题(三),科学出版社。
- [6] O. Aydan and T. Kawamoto, The stability of slopes and Underground Openings Against Flexible Toppling and Their Stability. Rock Mech and rock Eng. (1992) 25 (3), 143-165。
- [7] C. Sagaseta, On the Models of Instability of a Rigid Block on an Inclined Plane, Rock Mech. and Rock Eng. 19 261-262(1986)。