

某电站缓裂控制边坡的变形特征及其机理探讨

史新鹏^{1,2}, 杨绪波¹, 张 敏¹, 杨根兰¹

(1. 成都理工大学地质灾害防治及地质环境保护国家专业实验室, 成都 610059;
2. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830052)

要: 某电站 4# 山梁为“缓裂控制边坡”, 其中 SN 向中- 缓节理对边坡的稳定具有决定性的控制作用。该边坡失稳模式为浅表部阶梯状滑动和深部阶梯状滑动(深部蠕滑- 拉裂)。边坡切脚开挖后, 主要是下部块体滑动牵引上部块体变形滑动。采用三维离散元数值模拟, 重点分析了这类边坡在开挖过程中缓倾角结构面的倾角变化、连通率变化对这种阶梯状滑动的影响。进一步验证了上述机理模型。
关键词: 缓裂控制边坡; 阶梯状滑动; 变形机理; 离散元
中图分类号: P642. 2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-3409(2006)02-0157-05

Characteristics and Mechanism of Slope Deformation Controlled by Slow Dips Joint at No. 4 of Xiaowan Hydropower Station

SHI Xin-peng^{1,2}, YANG Xu-bo¹, ZHANG Min¹, YANG Gen-lan¹

(1. National Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection,
Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: The slow dips joint with south-north strike is the crucial factor in the slope stability at No. 4 of a hydropower station. The model of deformation and destruction is ladder sliding in shallow earth and creeping-sliding and fracturing in deep. It usually happen that sliding underside rocks mass draught upside ones. Finally, it is the important of analysis that the effect for the ladder sliding caused by changing of structure planes with low dips and persistence ratio. Beside three dimensional distinct element code calculation is used to analyze the changing and to demonstrate the mechanism of this deformation.
Key words: slope controlled by slow dips joint; ladder sliding; mechanism of deformation; distinct element

1 引言

在建的云南澜沧江某水电是国家实施“西电东送”战略和云南西部大开发的标志性工程。主体工程为混凝土双曲拱坝, 最大坝高 292 m, 坝顶高程 1 245 m, 总装机容量为 4 200 MW, 电站以发电为主兼有防洪、灌溉和库区水运等综合效益。

电站 4# 梁为拱坝下游左岸抗力体, 同时也是水垫塘边坡, 该边坡三面临空, 北侧为龙潭干沟, 南侧为 F5 沟, 两沟切割地形较深, 西侧临河。坝体左端拟建在 4# 山梁北部, 深切入龙潭干沟。平均自然坡度 40~50°。区内岩性主要为 M^{IV-2} 角闪斜长片麻岩、M^{IV-1} 黑云花岗片麻岩、云母角闪片岩夹层。构造线方向以 NWW 向为主, 其次以 SN 向构造线为辅。有 NWW 向陡倾的一级结构面 F₁₁ 贯穿边坡下游, 一级软弱结构面主要是一系列顺层的断层、挤压带(面), 按产状可分为两组: N80W/NE 80~90°; N70W/SW 48~63°; V 级结构面以陡倾角类型为主, 占有 V 级结构面总量的近 69%, 其次为中- 缓倾角结构面, 占有 V 级结构面总量的近

30%。陡倾角结构面按照其发育优势方位又可分三组, 分别为走向近 SN 向倾 W、E 的陡倾角结构面, 和走向近 EW 向倾 N 的陡倾角结构面。同样, 中- 缓倾角结构面按其发育优势方位又可分为两组, 分别为 N15~31 W, SW 26~35 和 N30~47 E, NW 26~33°。

根据前期的勘察资料, 从目前的边坡开挖情况及出现的破坏现象揭示了 4# 山梁边坡属于“缓裂控制边坡”, 即是指近 SN 向中- 缓倾角倾坡外的节理较发育、并控制边坡的强度稳定的一类边坡。因此本文紧密结合工程施工开挖, 通过现场调研, 研究此类边坡的变形机理, 应用三维离散元数值模拟, 揭示了此类边坡在分期开挖状态下岩体变形发生的规律及变形破坏模式, 对保证 4# 山梁边坡合理支护及其安全运营都具有重要的现实意义。

2 缓裂的形成及其分布规律

2.1 SN 向缓裂的形成

SN 向中- 缓节理对 4# 山梁边坡稳定性起控制作用。边坡中- 缓节理延伸较长(十余米至数十米), 贯通程度较

① 收稿日期: 2005-09-15

作者简介: 史新鹏(1974-), 男, 新疆农业大学水利与土木工程学院讲师, 现就读成都理工大学研究生, 主要从事地质灾害与地质工程方面的研究。

高。这种中缓节理是早期构造应力场作用下所形成的剖面“x”型剪节理受后期表生改造形成的。其表生改造过程可用图 1 的机制模型解释:河谷下切前,缓倾角结构面的发育状态是断续延伸的,连通段与非连通段之间由相对完整的“岩桥”相连接。随着河谷的下切,岸坡应力释放,岩体产生向临空方向的回弹变形,相对完整的“岩桥”部位必产生较之连通段的裂隙部位更为强烈的弹性恢复,从而导致沿结构面产生非均匀“弹胀”或差异回弹,这样结果必在对应差异回弹的裂隙端点部位出现残余拉应力。在残余拉应力作用下,岩桥被拉断,从而造成各断续延伸段相互连通,形成贯穿的中-缓倾角结构面^[1]。

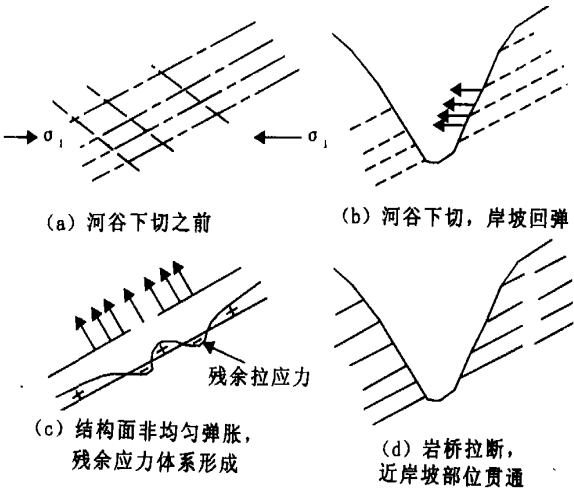


图 1 缓倾角结构面表生改造机制模型

2.2 SN 向缓裂发育规律

通过现场开挖坡面调查并结合前期平硐勘察资料,SN 向中-缓节理具有以下发育特征。首先该组节理的发育程度具有从岸坡表层向内部逐渐减弱的特点。其次 SN 向中-缓节理和 SN 向陡节理的发育程度表现出一定的负相关性,即在同一个部位,若前者很发育,则后者常常不发育;反之亦然。第三 SN 向中-缓结构面延伸一般受片岩夹层、挤压面限制,当挤压面宽度大于 20 cm 时,延伸中断。第四,该组结构面在空间分布上具有明显分区性:以 F₁₁ 为界,其下游边坡较上游边坡多;以高程 1 160 为界,下部边坡的较上部边坡多,特别在 1 115 高程、1 100 高程发育最为密集,延伸规模较大。第五在不同风化、卸荷部位的发育差异也间接表现为相关性,即风化、卸荷强度越强,其连通率一般也较高;风化、卸荷强度越弱,其连通率也较低(见表 1)。

表 1 不同风化状况岩体中缓倾角结构面连通率建议值(一般值)

风化状况	强风化	弱上风化	弱下风化	微风化
连通率建议值/%	75~85	65~75	60~65	40~50

3 边坡破坏迹象及机制分析

3.1 边坡开挖变形破裂现象

该边坡在开挖前已经发生了变形,在前缘高程 1 010 m,后缘高程 1 280 m,SN 宽 30 m,平均高差约 270 m 的部位已存在明显的蠕滑-拉裂变形,并具有较为明确的边界底部呈阶梯形滑裂面。边坡开挖后在 F₁₁ 下游 I-2# 变形体中下部位分别出现一系列的变形破坏,其共同特征都是在缓倾角结构面集中发育段出现,变形块体底部沿缓倾角结构面发生滑动变形。其变形迹象如下:

(1) 1 115~1 130 马道桩号水 0+221 m~0+257 m
边坡块体受 SN 向缓倾角结构面控制,局部块体沿 SN 向缓倾角结构面切出,发生向河谷方向的剪胀错动,张开 10~15 mm,填充岩屑、岩块,后部沿 SN 向陡倾角结构面发生拉裂,局部强烈地段将岩体拉裂,宽度 17 cm,填充由于拉裂而松弛的岩块。并有流水从这些松弛裂隙流出。破坏后形成阶梯状陡坎。如图 2。

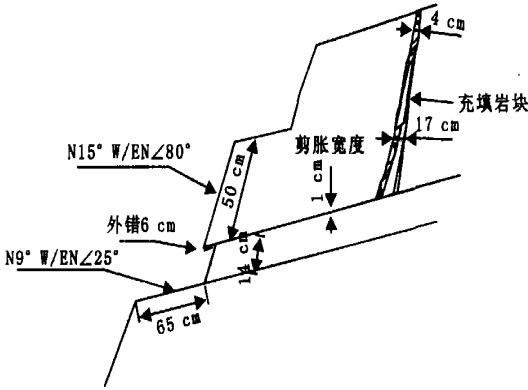


图 2 1 115 m 马道桩号水 0+247.0 m 破坏迹象
(2) 1 100~1 115 马道桩号水 0+220 m~0+250 m
受 SN 向缓倾角结构面、SN 向陡倾角结构面和 EW 向陡倾角结构面切割的块体沿着 SN 向缓倾角结构面发生向河谷方向剪胀错动变形,而 SN 向的陡倾角结构面普遍被拉裂,形成一系列的 SN 向拉裂缝,宽度 2~5 cm 不等,充填有岩屑、岩块。同时错动块体的上边界被拉裂 1~3 cm。

(3) 1 070~1 085 马道桩号水 0+246 m~0+287 m
岩体沿着 SN 向缓倾角结构面(N 10 W, SW 35~40°)切出 1 070~1 085 m 马道,形成一个延伸较长的光面,与 SN 向陡倾角结构面交割形成陡坎状阶梯,结构面微张 1~5 mm。

3.2 边坡变形机理分析

根据 4# 山梁边坡的地质条件、岩体结构分析,结合其变形迹象和变形机制分析,边坡存在的变形破坏模式主要为阶梯状滑动模式。根据其潜在滑裂面发育深度的不同,其可能存在两种失稳模式即:浅表部阶梯状滑动和深部阶梯状滑动(深部蠕滑-拉裂)。前者虽然失稳范围较小,但在缓裂控制边坡中是一种常见失稳模式;后者虽然并不多见,但可能失稳范围较大。因此,有必要对两者进行区分。

(1) 浅表部阶梯状滑动模式。由一系列近 SN 向陡缓结构面构成,具有逐级向上传递变形,边坡破坏由前部向后扩展的特征。在工程区,这类失稳模式的发育总体具有以下两个特点:一是,由于其潜在滑裂面在强卸荷带内发育,使得其可能失稳范围比平面滑动的失稳范围明显要小;二是,由于工程区的缓裂控制边坡多属陡缓控制边坡,使得这类失稳模式极可能具有普遍性。其变形破坏可概化为图 3。

(2) 深部蠕滑-拉裂变形破坏模式。此类变形破坏模式不同于浅表部的阶梯状变形破坏模式,它主要是一种时效变形,变形深度较深,一般位于河谷下切急速、表生改造强烈的边坡、岸坡中的弱卸荷带内,其滑动底界由特定的陡缓结构面交切贯通情况控制。后缘一般由于蠕变体底面的剪切变形和陡倾角结构面拉张而形成张陷落带。这种时效变形是边坡岩体进入破坏阶段前的一个重要阶段。其变形失稳可由切角开挖、底滑面贯通而导致,变形失稳范围也较大。其变形破坏可概化为图 4。

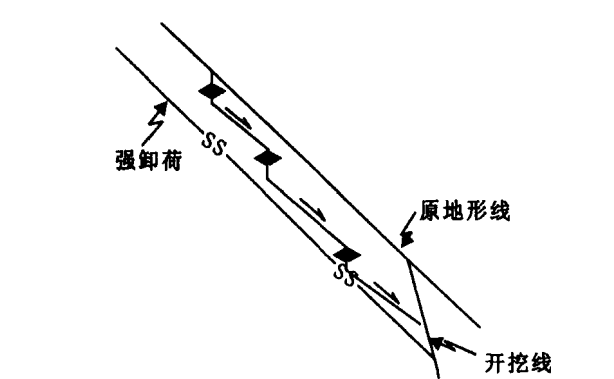


图 3 浅层阶梯状滑动变形破坏模式示意图

4 数值模拟

根据阶梯状滑动特征, 其变形破坏主要由缓倾角结构面的发育程度控制。因此, 阶梯状滑动模式的概念模型主要考虑缓倾角结构面倾角变化和连通率变化对其变形破坏模式的影响。依据这一变形模式特点, 采用离散单元法进行模拟分析, 重点研究缓倾角结构面的倾角变化、连通率变化等对这种阶梯状滑动的影响。

4.1 缓倾角结构面倾角变化对阶梯状滑动的影响分析

模型坡高 110 m, 坡度 45°; 开挖坡度 55° (图 5)。y 方向为模型高度方向, x 正方向是东方向, z 正方向是北方向。根据边坡模型高度, 在模型上、中、下三个部位 (110 m、80 m、50 m) 不同深度 (0 m、10 m、20 m、30 m、40 m、50 m) 设置变形、应力跟踪点。

边坡受三组结构面切割, 产状分别是 SN/W 80°EW/90°SN/W (30°40°50°60°), 假设结构面连通率都是 100%, 即都完全贯通, 间距分别是 5、10、10, 即切割的块体 5 m×10 m×10 m。深部蠕滑界限为一个明确的贯通界面。根据模拟计算, 探讨复合阶梯状破坏特别是浅层阶梯状破坏与缓倾角(α)变化的关系。计算参数见表 2。

表 2 缓倾角模型结构面参数

类型	蠕变体	SN 陡倾角结构面 (连通率= 100%)	SN 缓倾角结构面 (连通率= 100%)	EW 陡倾角结构面 (连通率= 100%)
参数	底面	(连通率= 100%)	(连通率= 100%)	(连通率= 100%)
C/kPa	20	100	54	300
φ/°	41	35	28	37

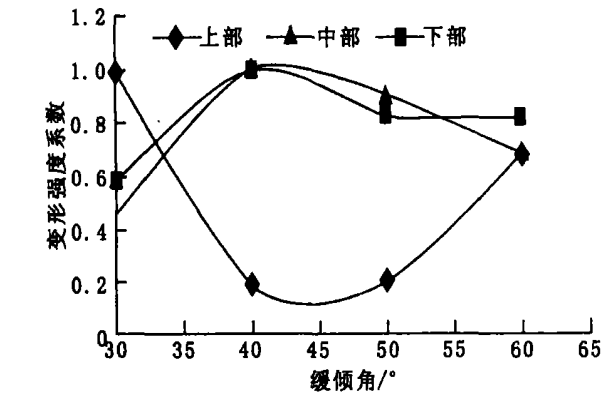


图 6 变形强度系数- 缓倾结构面倾角变化关系

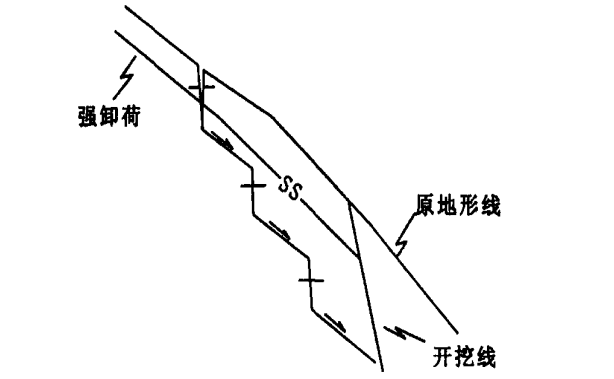


图 4 深部蠕滑- 拉裂变形破坏模式示意图

(1) 变形特征。下部和中部的变形强度总体上随缓倾角结构面倾角的增大而逐步增大, 当缓倾角大于 40°后变形强度逐步降低; 上部变形强度随缓倾角结构面倾角的增大而逐步减小, 当缓倾角大于 40°后变形强度逐步增大。因此, 当缓倾角到达 40°~50°时, 边坡具有最大的变形强度。(图 6)

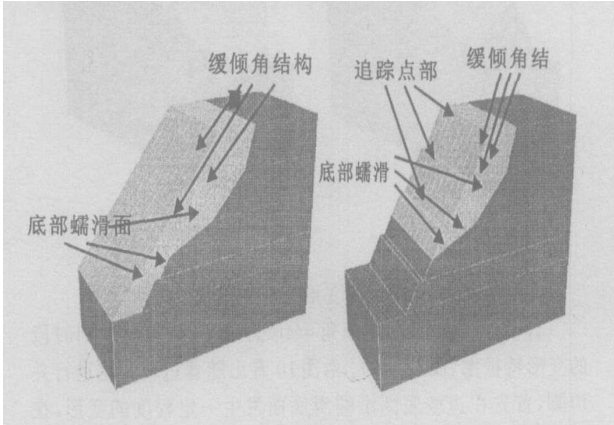


图 5 开挖前、后阶梯状滑动变形结构边坡模型

(2) 应力特征。随缓倾角结构面倾角增加, 边坡中部和上部的应力增高区系数逐步降低, 当缓倾角等于 50°时有应力增高区系数最小值, 其后系数缓慢增大, 即边坡中部和上部的应力增高区强度随缓倾角变化呈大- 小- 大规律; 边坡下部的应力增高区系数在缓倾角等于 40°时达到最大值, 其后逐步降低, 即边坡下部的应力增高区强度随缓倾角变化呈小- 大- 小规律。(图 7、8、9)

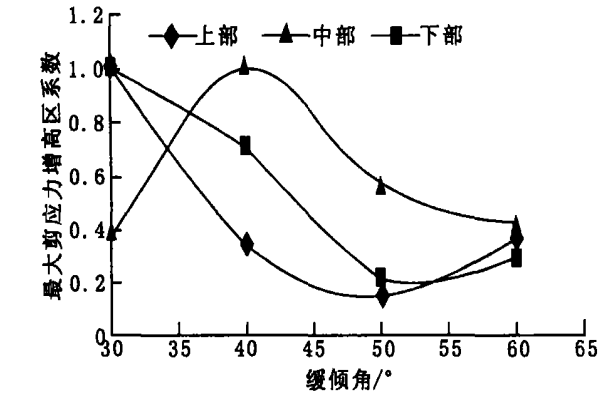


图 7 最大剪应力增高区系数- 缓倾角关系曲线

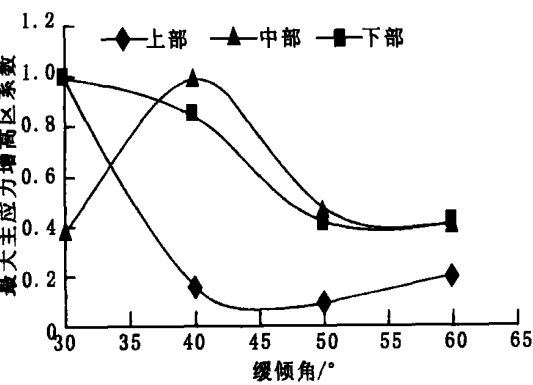


图 8 最大主应力增高区系数- 缓倾角关系曲线

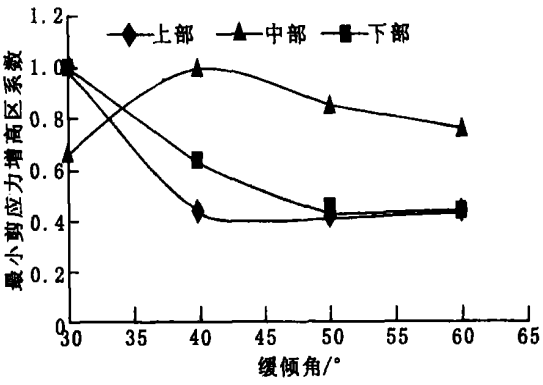


图 9 最小主应力增高区系数- 缓倾角关系曲线

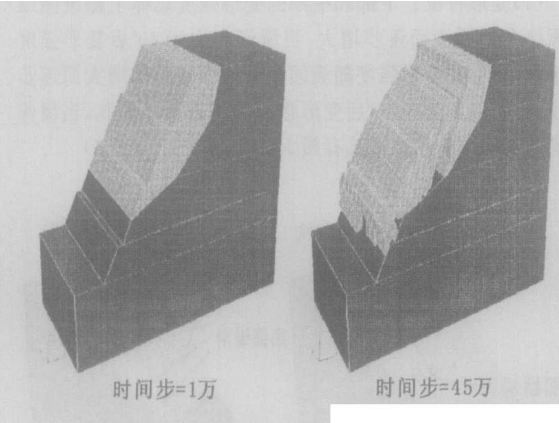


图 10 坡开挖变形破坏过程图

计算结果截图以缓倾角= 40 为代表,截取其个别时段的变形特征图(图 10、11)。由图 10 看出随着边坡开挖进行并切脚,首先在边坡底部沿蠕滑底面发生一定程度的变形,在边坡后缘顶部出现拉裂缝,由蠕滑体底面折点处向上延伸,边坡前缘也有较大位移。随着时间步继续,变形增大,以中下部变形为主。从图 11 可以看出,边坡开挖后位移场发生改变,在蠕变体内由下至上由外至内形成变形松动圈,变形以中下部表层为最大。随时间步进行在蠕变体中部沿着陡缓结构面形成一拉应力区。因此边坡蠕变体下部剪出口部位是整个边坡的变形敏感部位,由于其蠕滑变形牵引上部块体变形,最后沿蠕变体底面折点处向上追踪陡缓结构面最薄弱的地方形成拉应力区并将其拉裂。

4.2 缓倾角结构面连通率变化对阶梯状滑动的影响分析

边坡受三组结构面切割,产状分别是 SN/W 80°EW/90°SN/W 35°;假设 SN 向陡倾角结构面连通率是 65%,EW 向陡倾角结构面连通率是 100%,即完全贯通;SN 向缓倾角结构面连通率(L)分别为 40%、60%、80%和 100%。间距分别是 5、10、5,即切割的块体 5 m×10 m×5 m。深部蠕滑界限为一个明确的贯通界面。根据模拟计算,求解复合阶梯状破坏特别是浅层阶梯状破坏与缓倾角结构面连通率变化的关系。陡、缓倾角结构面间的抗剪强度根据其结构面的连通率和岩桥的抗剪强度按照 1 式综合取值。

$$f = kf_i + (1 - k)f_m$$
$$c = kc_i + (1 - k)c_m$$

(1)

式中: f_m, f_i ——岩体及其结构面抗剪(断)强度, c_m, c_i ——岩体及其结构面内聚力。

通过数值模拟,得到了与结构面倾角变化相似的规律。

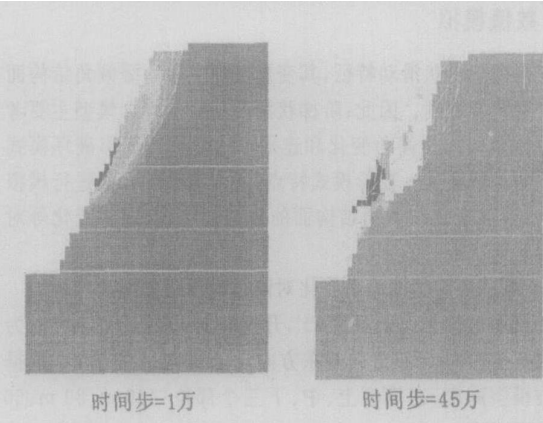


图 11 开挖边坡 x 位移变化过程纵剖面图

随缓倾角结构面连通率的增高,边坡上部的最大剪应力增高区系数当连通率为 60% 时到达最大值,最大主应力、最小主应力增高区系数当连通率为 80% 时达到最大值,其后各应力增高区系数逐步降低,即表明边坡上部的应力增高区强度在连通率为 60~80% 时达到最大强度。

表 3 连通率模型结构面参数

参数类型		C/ kPa	φ °
蠕变体底面		20	41
SN 陡倾角结构面	L= 65%	245	36
	L= 100%	54	28
	L= 80%	163.2	33
SN 缓倾角结构面	L= 60%	272.4	37
	L= 40%	381.6	40
EW 陡倾角结构面	L= 100%	300	37

5 结 论

- (1) 电站 4# 梁这种缓裂控制边坡主要存在两种失稳模式即:浅表部阶梯状滑动和深部阶梯状滑动(深部蠕滑-拉裂)。
- (2) 数值模拟进一步揭示了这种阶梯状结构边坡,特别是切脚开挖后,应力发生调整改变,而坡脚部位是应力集中部位,边坡块体在最大剪应力作用下沿底部的底滑面要发生一定程度的变形,而变形程度与缓倾角结构面的倾角、连通率有关。
- (3) 结合边坡变形的机制分析,阶梯状滑动变形主要是由于下部块体滑动牵引上部块体变形滑动,因此支护范围应主要在中下部变形敏感区。

参考文献:

[1] 黄润秋, 王士天, 胡卸文, 等. 澜沧江小湾水电站—高拱坝坝基重大工程地质问题研究[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1996.

[2] 张倬元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 1994.

[3] 张倬元, 黄润秋. 坚硬火成岩岸坡岩体结构的表生改造和时效变形[J]. 地质灾害与环境保护, 1990, 1(1): 12– 18.

[4] 朱焕春, Brummer Richard, Adieux Patrick. 节理岩体数值计算方法及其应用(一): 方法与讨论[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(20): 16– 20.

[5] 王毅, 聂德新, 任光明. 一种高边坡岩体卸荷分带方法的探讨[J]. 工程地质学报, 2004, 12(1): 84– 86.

[6] 王士天. 四川某水库大坝左坝肩边坡变形破坏机制及整治对策探讨[J]. 地质灾害与环境保护, 1999, 10(3): 1– 5.

[7] 黄润秋. 某岩石高边坡的时效变形分析及其工程地质意义[J]. 工程地质学报, 2000, 8(2): 148– 153.

(上接第 146 页)

年, 结果却造成水体溶氧耗尽, 增加了内部氮的循环, 铜在底泥中的积累, 也增强了藻类对铜的抗药性, 造成对鱼类及鱼类食物链的不良影响^[6]。

(3) 生物修复。湖泊生物修复包含微生物修复和水生生物修复两大内容, 两者不可弃一, 互相配合, 才能获取总体治理效果。与机械清淤和化学药剂相比, 生物修复成本低, 处理效果长久彻底, 但是需要运行和维护。

微生物修复成功的例子有: 李雪梅在华南动植物园重度富营养化的人工湖投加的多糖 EM 泥球, 停止投加后会有一定的反弹, 但效果很好; ClearFlo 系列菌剂修复技术, 美国 Alker Murray 公司研究的系列产品, 专门用于湖泊和池塘生物清淤、养殖水体净化、河流修复及污泥去除, 效果很好, 接种后非常成功, 可阻止藻类生长, “水花”出现, 污染因子大幅下降, 完全满足治理效果的要求。1993 年, 用 ClearFlo 7 018, 1 200 和 7 000 净化中国昆明的一条河流。这条河由于接纳农家肥、动物粪便、渔场副产品、化粪池渗漏液、工业废水和倾倒的垃圾, 悬浮有机废弃物负荷很高, 导致该河流臭气熏天, 富营养化严重。治理后, NH_4^+ 和 H_2S 降低, 污泥被分解, 并随着鱼副产品所含的 H_2S 的氧化, 游离氧开始增高^[15]。

参考文献:

[1] 张锡辉. 水环境修复工程学原理与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002. 56.

[2] 李文红, 等. 疏浚对影响上覆水体自净能力的研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(3): 318– 320.

[3] 戴雅奇, 等. 疏浚对苏州河底栖动物群落结构的影响[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2003, (3): 86.

[4] 崔文连, 王勇. 崂山水库叶绿素 a 含量与富营养化程度探讨[J]. 山东环境, 1999, (4): 50– 51.

[5] 中国环境年鉴社. 中国环境保护年鉴[Z]. 北京: 环境出版社, 2000. 474– 476.

[6] 孙傅, 等. 富营养化湖泊底泥污染控制技术评估[J]. 环境污染治理技术与设备, 2003, 4(8): 36– 38.

[7] 郭怀成, 等. 滇池水体富营养化特征分析及控制对策探讨[J]. 地理科学进展, 2002, 21(5): 501– 505.

[8] 李雪梅, 杨中艺, 简曙光, 等. 有效微生物群控制富营养化湖泊藻的效应[J]. 中山大学学报, 2000, 39(1): 81– 85.

[9] 石岩. 人工湿地系统在垃圾渗滤液处理中的应用[J]. 水土保持研究, 2005, 12(1): 138– 140.

[10] 孔繁翔, 等. 环境生物学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000. 348– 369.

[11] 卢升良. 滇池的污染及其控制对策[J]. 重庆环境科学, 1997, (6): 1– 4.

[12] 杨联京. 凤眼莲污水处理工艺研究[J]. 湖南大学学报, 1994, (8): 109– 114.

[13] Daldorph, P W G. Management and treatment of algae in lowland reservoirs in Eastern England[J]. Wat. Sci. Tech. , 1998, 37(2): 57– 63.

[14] Holdren, C, W Flock, et al. Lake and Reservoir Restoration Guidance Manual[S]. 3rd edition Prep by N. Am. lake manage. Soc. and Terrene Inst. , in coop. with U. S. EPA, 2001.

[15] 顾宗濂. 中国富营养化湖泊的生物修复[J]. 农村生态环境, 2002, 18(1): 42– 45.

[16] 彭近新, 陈慧君. 水质富营养化与防治[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1982. 100– 150.

[17] 杨清心. 富营养水体中沉水植物与浮游藻类相互竞争的研究[J]. 湖泊科学, 1996, 8(增刊): 17– 24.

[19] 陶思明. 湖泊水污染治理的流域生态保护对策分析[J]. 上海环境科学, 1998, 17(7): 1– 3.

培植水生植物群落, 利用水生植物净化水体。水生植物群落对维持湖体的水质功能具有举足轻重作用。在过去 50 年中, 滇池的水生植物大部分都遭到了严重的破坏, 目前只剩下 12 科 20 种植物零星存在^[11]。从滇池目前的情况来看, 依靠自然恢复过去原有的植物群落不太可能, 可考虑采用人工培植技术恢复部分水生植物群落。断片繁殖、根状茎繁殖、石芽繁殖以及营养膜繁殖技术是目前常用的人工繁育方式, 它们主要是通过水生植物对营养物质的吸收、植物叶冠遮光以及根区分泌物杀伤藻类等途径, 来控制藻类的快速繁殖, 进而达到治理水体富营养化的目的。

4 结 论

本文论述了湖泊富营养化形成的机理及特点和危害, 湖泊底泥中氮磷的型态及其转化, 比较了机械清淤, 化学药品, 生态修复 3 种修复措施的优缺利弊, 笔者认为水质问题是生态问题, 生态问题要用生态办法解决, 与流域削减污染治理相结合, 立法约束湖周生活污水及养殖废水向湖泊排放, 以确保湖泊生态系统的逐步恢复并步入良性循环状态, 利用生态修复技术, 从局部到大范围中修复水生生态系统是投入少、效益高、可操作, 能实现社会、生态、环境、经济效益的途径。