三峡库区重庆市忠县高切坡防护工程设计

刘瑞懿，涂　健，郭晓刚

（长江水利委员会长江勘测规划设计研究院，湖北 武汉 430010）

摘　要：三峡库区在移民迁建过程中，形成了大量的高切坡。由于高切坡地形坡度变化大，岩石松软易风化，地质条件复杂，目前已经严重威胁库区移民群众的生命财产安全。通过对高切坡类型及安全等级的划分、破坏模式的预测等，有针对性的采取一系列综合处理工程措施，保障了三峡库区移民迁建区移民及居民的安全，保证了移民迁建城镇基础设施的安全运行。

关键词：高切坡；破坏模式；稳定分析计算方法；防护措施；三峡库区

作者简介：刘瑞懿(1963－　)，女，高级工程师，从事水工及岩土工程专业设计工作。

0　概　　况

三峡库区重庆市高切坡防护工程第十二标段（忠县标二段）位于重庆市忠县，在移民迁建过程中，形成了大量的高切坡，该标段共有67个高切坡。

高切坡位于长江近岸谷坡地带，地貌形态主要为坪状丘陵，坡下为居民安置点、公路或规划的居民安置点，周围建筑物较多。区内分布有：第四系全新统人工堆积层(Q^{r})、坡积层(Q_4^{dl})、残坡积层(Q_4^{el+dl})、崩坡积层(Q_4^{col+dl})、崩积层(Q_4^{col})；基岩为侏罗系上统蓬莱镇组（J_{3P}）、遂宁组（J_{3S}）和侏罗系中统上沙溪庙组（J_{2s}）。地层主要由砂岩、泥质粉砂岩及紫红色泥岩组成。高切坡内未见断裂发育，层间剪切带不发育，岩体均为裂隙切割，裂隙一般发育在砂岩中，裂隙短小；泥岩中微裂隙发育。区内地层为单斜构造。高切坡区为一向冲沟倾斜的斜坡，该区降雨充沛，大气降水大部分多沿斜坡向冲沟排泄，仅有少部分降水渗入斜坡体的松散覆盖层及基岩裂隙内。该区内的地下水，按其赋存条件可分为孔隙水和裂隙水。孔隙水：主要分布于坡积层和人工堆积层内。埋藏不深，水量不丰，受季节影响明显。裂隙水：赋存于张开的基岩裂隙中，水量不丰，主要靠大气降雨补给。大部分降水沿斜坡快速向溪沟排泄，仅有很少部分雨水垂直下渗，补给地下水。高切坡坡顶主要为农田和山地，没有大的人类工程活动。坡脚为居民自建房或规划建房的宅基地，除规划建房处将来需进行建房施工外，不会有大的人类工程活动。

1　高切坡类型与安全等级

1.1　高切坡分类

三峡库区高切坡分为岩质高切坡、岩土质高切坡、土质高切坡三类。

Ⅰ类：岩质高切坡，是指由基岩组成，且坡高≥15 m的高切坡。

Ⅱ类：岩土质高切坡，是指由基岩和土体、土石混合体或碎裂岩体组成，以基岩为基座且坡高≥10 m的高切坡。

Ⅲ类：土质高切坡，是指由土体、土石混合体，以及滑坡堆积体组成，且坡高≥8 m的高切坡。

其中岩质高边坡根据高切坡结构特征和可能变形破坏方式又细分为$Ⅰ_1$、$Ⅰ_2$、$Ⅰ_3$三个亚类。

1.2　高切坡安全等级

高切坡防护工程安全等级按边坡失稳危害程度，边坡高度及高切坡类型划分为三级。见表1。

表1　高切坡防护工程安全等级表

边坡类型	边坡高度/m	高切坡失稳危害程度	安全等级
$Ⅰ_1$、$Ⅰ_2$	≥30	很严重	一级
$Ⅰ_3$		很严重、严重	
$Ⅰ_3$	≥15	很严重	
Ⅱ		很严重、严重	
Ⅲ			
Ⅱ	≥10	很严重	
Ⅲ	≥8		
$Ⅰ_1$、$Ⅰ_2$	≥30	严重、较严重、不严重	二级
$Ⅰ_3$		较严重、不严重	
$Ⅰ_1$、$Ⅰ_2$	≥15	很严重	
$Ⅰ_3$		严重	
Ⅱ		较严重、不严重	
Ⅲ			
Ⅱ	≥10	严重	
Ⅲ	≥8		
$Ⅰ_1$、$Ⅰ_2$	≥15	严重、较严重、不严重	三级
$Ⅰ_3$			
Ⅱ	≥10	较严重、不严重	
Ⅲ	≥8		

2　高切坡破坏模式[1]

高切坡变形破坏模式主要有崩塌解体破坏、滑动式破坏、楔形体滑移破坏、倾倒式破坏、松散剥落、土质边坡的滑移破坏等六种破坏模式。

(1) 崩塌解体破坏

高切坡组成的岩性主要为紫红色泥岩和砂岩。在软硬相间的层状岩体中，泥岩中微裂隙发育，抗风化崩解能力差，易沿坡面不断产生风化剥蚀，造成泥岩边坡不断后退。砂岩中顺坡向裂隙发育，在砂岩和泥岩组合的边坡中，下

收稿日期：2006－07－30

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

部的泥岩不断风化崩解剥蚀，造成上部砂岩的临空，砂岩在裂隙面的切割下，沿裂隙产生崩塌解体，从而造成高切坡不断风化剥蚀解体后退，其变形破坏模式过程见图 1。

(2) 滑动式破坏

在顺向坡高切坡中，岩体中顺坡向结构面发育，岩体在层面和结构面的切割下，在高切坡临空面上，形成顺层块体，块体在重力作用下，产生滑移破坏解体，其变形破坏模式过程见图 2。

(3) 楔形体滑移破坏

在高切坡中岩体外倾结构面发育，岩体在层面和外倾结构面的切割下，形成积木状块体，在高切坡临空面上，沿裂隙面产生卸荷拉开，块体在重力作用下，产生滑移破坏解体，从而使高切坡不断解体后退，其变形破坏模式过程见图 3。

(4) 倾倒式破坏

在陡倾逆向坡高切坡中，岩体中缓倾结构面发育，岩体在层面和缓倾结构面的切割下，形成积木状块体，在高切坡临空面上，沿层面产生卸荷拉开，块体在重力作用下，产生倾倒破坏解体，从而使高切坡不断解体后退，其变形破坏模式过程见图 4。

(5) 松散土石剥落

高切坡岩体中微裂隙发育，岩体呈碎裂散体结构，在高切坡临空面上，坡体表面的松散土石不断产生风化剥落，坡面由表及里不断解体后退，其变形破坏模式过程见图 5。

(6) 土质边坡的滑移破坏

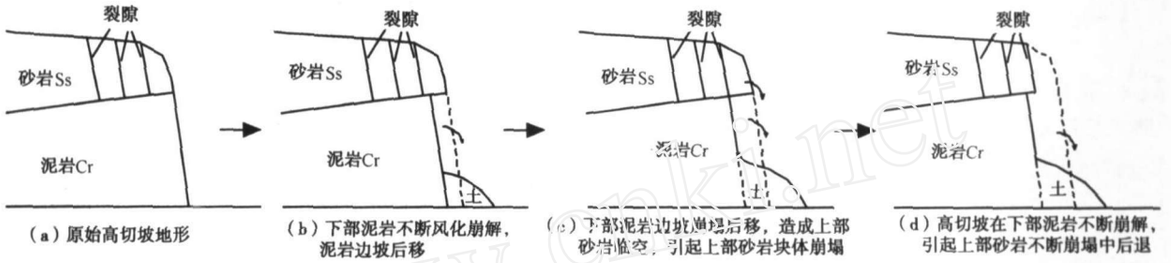

图 1 软硬相间层状岩体高切坡破坏模式图

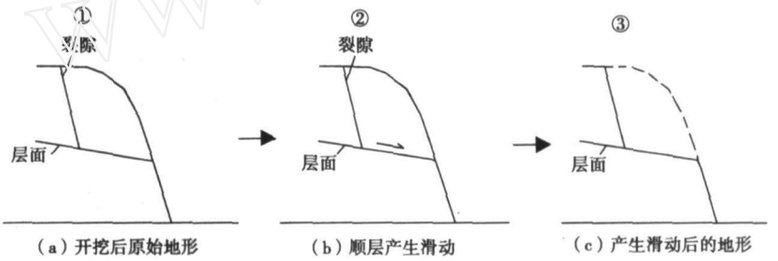

图 2 顺向坡高切坡破坏模式图

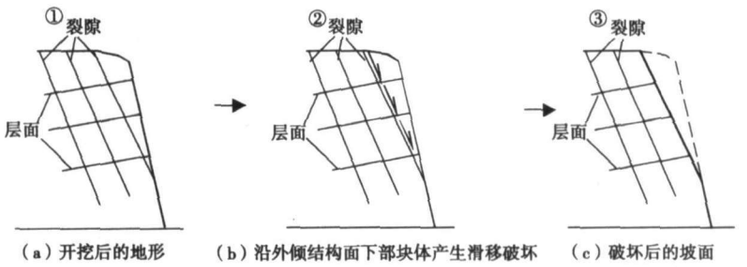

图 3 楔形体滑移破坏模式图

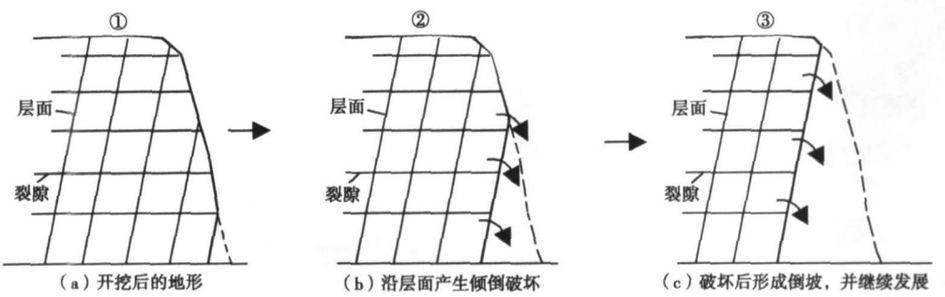

图 4 陡倾逆向坡破坏模式图

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

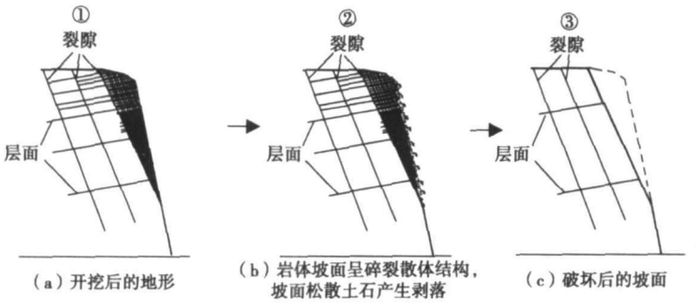

图5 松散土石剥落破坏模式图

土质边坡上部为残坡积粉质粘土夹碎石，结构较紧密，其下为强风化基岩。因切坡开挖使土体临空，存在较大的变形空间，引起土体应力状态的调整。由于边坡为侧向坡，但侧向未剪出，含碎石粘性土自稳性能差，而下部基岩具有一定自稳能力，该段破坏模式为土体内部的圆弧滑动。

3 高切坡稳定分析计算方法[2]

3.1 防护工程设计安全系数

高切坡防护工程设计安全系数见表2。

表2 防护工程设计安全系数表

计算方法	安全等级		
	一	二	三
平面滑动法 折线滑动法	1.35	1.30	1.25
瑞典园弧法	1.30	1.25	1.20

注：①对地质条件很复杂或破坏后果极严重的高切坡，其安全系数宜适当提高；②对坡高大于30 m的岩质高切坡及坡高大于15 m的土质高切，其安全系数在表中数值基础上增加0.05～0.1。

3.2 设计荷载

（1）自重；（2）地下渗水压力；（3）坡顶及坡体上各类建筑物荷载；（4）其他荷载；（5）三峡库区地震基本烈度为6度，边坡防护工程设计可不考虑地震荷载。

3.3 物理力学参数取用

根据邻近边坡区工程地质勘察资料和试验成果，类比和参照本区其它工程及《工程地质手册》（第三版）有关经验值，确定高切坡区的岩、土物理力学参数。

3.4 边坡稳定分析方法

高切坡稳定性分析评价应在充分查明工程地质与水文地质条件的基础上，根据高切坡岩土类型、岩土结构、坡高、坡比等，综合采用稳定计算、工程类比、专家经验法进行。

3.4.1 工程类比分析法

高切坡稳定性应根据其工程地质条件、岩体级别、边坡类型、坡高、坡比等具体情况，通过工程类比进行分析。

3.4.2 极限平衡计算法

(1) 园弧滑动法

土质高切坡和碎裂结构岩质高切坡宜采用圆弧滑动法进行计算。圆弧滑动法宜采用瑞典条分法，其安全系数计算公式为

$$K=\frac{R\mp\cdot\sum[c_i'\ell_i+(W_i\cos\alpha_i-Q_i\sin\alpha_i-U_i)\tan\varphi_i']}{R\cdot\sum W_i\sin\alpha_i+\sum Q_iZ_i},$$

式中 W_i 为垂直荷载，包括土条自重和其上部的建筑荷载。其中，自重可将其分为两部分，地下水位以上用湿容重计算，设为 W_{i1}；地下水位以下用饱和容重计算，设为 W_{i2}。其它垂直荷载，设为 P_i。假设自重的作用线通过条块宽度的中心线；Q_i 为水平荷载，包括水平孔隙水压力和其它水平荷载，向剪切面的出口方向为正；U_i 为剪切面上的孔隙水压力的合力，与剪切面正交；Z_i 为水平荷载 Q_i 作用线距滑弧园心 O 的垂距；c'、φ 为剪切面抗剪强度（有效应力指标）；R 为滑弧半径；ℓ_i 为土条底面长度；φ_i 为土条底面倾角。

(2) 平面滑动法

对可能产生平面滑动的高切坡宜采用平面滑动法进行计算。平面滑动法的安全系数计算公式为

$$K=\frac{(W\cos\alpha-U)\tan\varphi'+c'F}{W\sin\alpha},$$

式中 W 为垂直荷载，包括土条自重和其上部的建筑荷载；U 为作用于滑面上的孔隙水压力；c'、φ 为滑面抗剪强度（有效应力指标）；F 为滑面面积；α 为滑面倾角。

(3) 折线滑动法

对可能产生折线滑动的高切坡应采用推力传递系数折线滑动法进行计算。

1) 不平衡推力法。

亦称推力传递系数，其安全系数计算公式为

$$P_i=(W_i\sin\alpha_i+Q_i\cos\alpha_i)-\frac{c_i'\ell+(W_i\cos\alpha_i-U_i-Q_i\sin\alpha_i)\tan\varphi_i'}{K}+P_{i-1}\cdot\psi_i$$

$$\psi_i=\cos(\alpha_{i-1}-\alpha_i)-\frac{\sin(\alpha_{i-1}-\alpha_i)\tan\varphi_i'}{K},$$

求解安全系数 K 的条件是 $P_n=0$

式中 各符号定义同上。

2) 对岩质高切坡，也可采用中国水利水电科学研究院EMU法（能量法）或Sarma法。

(4) 块体理论楔形体稳定分析法

对有可能发生规模较大的局部块体失稳的岩质高切坡，应采用赤平极射投影法或块体理论法等楔形体稳定分

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

析法进行局部块体稳定分析。

(5) 计算程序选用

考虑到高切坡的破坏模式较为复杂，因此高切坡稳定性的分析应根据实际情况采取手算分析和程序验算相结合的方式。

高切坡稳定分析计算机程序采用中国水利水电科学院的土质边坡稳定分析程序 STAP2005、岩质边坡稳定分析程序 EMU2005、楔体稳定分析程序 WEDGE；也可采用北京理正岩土计算软件包。

4 高切坡防护方法与措施[3]

高切坡防护措施的选用应充分考虑施工条件及施工安全。根据高切坡具体地形地质及周边环境条件，高边坡防护一般应考虑采用排水、削坡减载、锚喷支护、结构支挡等综合防护工程措施。

4.1 排水

高切坡排水措施包括地表截、防、排水措施及坡面排水孔等地表排水措施。

(1) 地表截水沟：在高切坡潜在塌滑区后缘设置地表截水沟，拦截区外来水，使其不汇入区内。

(2) 坡面防护：为避免滞留在坡顶或坡面的雨水经坡顶（面）裂缝、裂隙渗入坡体内，应采取有效措施封闭坡顶或坡面缝隙，并平整坡面，以利地表积水的快速流散。

(3) 坡面和坡脚集（排）水沟：高切坡坡脚、坡面、分级平台（马道）应设集（排）水沟将坡面汇水及时排走。

(4) 坡面排水孔：对于软岩和土质高切坡，排水孔可在坡面上按规则间距布置；对于岩质边坡，其排水孔宜优先设置于裂隙发育、渗水严重的部位。排水孔应结合岩性特点，采取适当保护措施，确保其长效性。

4.2 削坡减载

削坡减载是指放缓坡比或降低坡高。当用地和施工条件允许时，削坡是一种经济合理、施工简便，且一劳永逸的有效措施。

4.3 喷射混凝土支护

喷射混凝土支护包括素喷混凝土和挂网喷混凝土。

对无顺坡向滑移结构面的岩质高切坡、当岩体为弱风化或强风化、且完整性较差，为防止边坡浅表层岩块崩落、减缓风化作用，可采用素喷混凝土和挂网喷混凝土进行边坡浅表层支护。

挂网喷混凝土也可以作为整体稳定性较好且坡高较小的土质边坡的护面措施。

当边坡存在整体稳定或较大的局部块体稳定问题时，锚喷支护宜配合预应力锚索支护或预应力锚杆支护等加固措施使用。

4.4 锚杆支护

对于岩体较破碎的岩质边坡，为增强其整体性，限制坡顶张裂缝的发展，防止坡面局部不稳定块体崩塌，可采用系统锚杆或局部随机锚杆进行支护。系统锚杆宜长短相间布置。系统锚杆支护一般与喷射混凝土联合使用。

4.5 格构锚固

对结构完整性较差的弱风化及强风化岩质高切坡，或结构致密的土质高边坡，可采用格构锚固措施进行支护。格构材料可根据边破岩体破碎程度、坡高和潜在滑面位置的深浅情况，分别选用浆砌块石、混凝土或钢筋混凝土。格构锚固一般宜与锚杆加固措施联合使用。

4.6 挡墙

对坡高较小的土质高切坡或强风化破碎岩质高切坡，可采用重力式挡墙支挡结构。根据墙背倾斜情况，重力式挡墙可分为俯斜式、仰斜式、直立式和衡重式挡墙等。挡墙材料可选用浆砌石、混凝土。当下滑力较大时，挡墙可与锚杆支护结构联合使用。

5 结　　语

三峡库区的大部分沿江地区为山区，地形坡度变化大，岩石松软易风化，地质条件复杂。在移民迁建过程中，虽然各地尽量坚持了依山就势，避免大挖大填的原则，并尽可能优化选址，但仍难以避免地形成大量的高切坡。近年来，在三峡库区已经有多处高切坡险情（灾情）发生，高切坡已经严重威胁库区移民群众的生命财产安全。因此，对三峡库区高切坡实施全面有效的防护是保障三峡库区移民迁建区移民及居民地质安全、保证移民迁建城镇基础设施安全运行的前提。防护措施根据不同的岩层产状、岩性特征和高切坡类型及防护对象综合确定，做到防护和利用相结合，既保证了忠县的建设安全又拓展了新的可建用地。

参考文献：

[1] 罗玉华，黄　华，徐同海，等. 三峡库区高切坡防护工程重庆市十二标忠县二标段高切坡工程地质勘察报告[R]. 武汉：长江岩土工程总公司，2005.

[2] GB50330—2002 建筑边坡工程技术规范[S].

[3] GB50086—2001 锚杆喷射混凝土支护技术规范[S].

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net