.com专业编写标书，提供资质陪标，代理投标，国标调查130220
招聘造价师兼职，精算标底，只要算得准，重奖50万
标书网 BiaoShu.com

节理岩体加固效果及其在边坡工程中的应用

陈卫忠 朱维申
（中国科学院武汉岩土力学研究所 武汉市 430071）

提要 该文采用非线性有限元方法对某边坡工程左坝肩边坡的稳定性及长锚索的加固效果进行了计算，认为提高边坡断层的抗剪强度是最有效地反映锚索的加固机理，同时比较了长锚桩和长锚索的支护效果。

关键词 节理岩体 开挖 锚固 有限元

SOLIDIFICATION EFFECT OF JOINTED ROCK MASS AND ITS APPLICATION IN THE SLOPE ENGINEERING

Chen Weizhong Zhu Weisheng
(Wuhan Institute of Rock and Soil Mechanics, China Academy of Sciences)

Abstract Adopting nonlinear finite element method, the paper makes computation of the stability and solidification effect of long anchorage rope for the left dam shoulder of a slope project. It considers that enchancing the shear strength of the slope fault is the most effective way to reflect the solidification mechanism of the anchorage. Meanwhile, it compares the retaining effect of the long anchorage pile and long anchorage rope.

Keywords jointed rock mass; excavation; anchorage solidification; finite element

标书网址导航 wz.biaoshu.com

1 前言

水利水电工程建设中的高边坡稳定性问题，主要是库区边坡稳定性和高边坡开挖造成的失稳问题，保持边坡稳定的主要措施是长锚桩和锚索加固。

标书人才网 jobs.biaoshu.com 建造师、造价师（与“标书”相关的工作免费介绍）

某水利工程左坝高边坡在坝顶部分形成三面临空的单薄山体。岩体为混合岩和片岩。边坡高度约 100m，坡角约 47°，走向平行河流近 EW 向。层状岩层走向 NW270° ~ 310°，倾角 39° ~ 55°，与坡面夹角 40° ~ 60°，断层和顺层节理发育，为了保证坝肩岩体的安全，按设计要求用长锚索对岩体进行加固，预应力长锚索以 100t 为主，有些部位作了 300t 和 50t 的锚索，锚索用量超过了 1000 根。本文采用非线性有限元法对锚索布设方案和参数的优化进行了系统的研究。

第一作者简介：陈卫忠，男，32 岁，博士、副研究员，现从事岩土工程的应用研究工作。

由于该工程 3# 地质剖面是左坝肩危险性最大的地段，因此在本文的数值计算中选择该剖面作为分析重点。该地质剖面上出露的断层有 F_{32}、F_{28}、F_{30}、F_{24}、F_{20}、F_{18}、F_{12}、F_{86}、F_{35}、F_{33}、F_{44}、等 43 条，其分布情况如图 1。

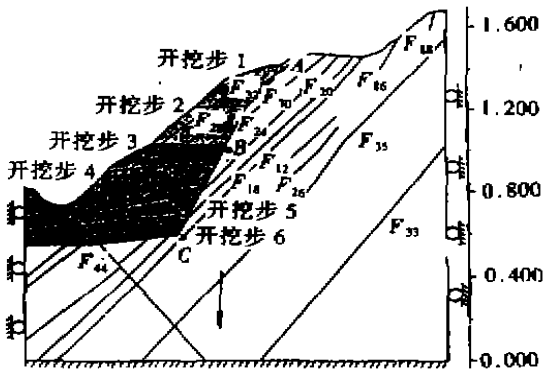

图 1 边坡开挖模型

标书网biaoshu.com提供免费的资质交换平台！电：020－31334179 QQ:279674008
帮有证（造价师，建造师等）人才和老板寻找挂靠单位，帮公司联系寻找人才和合作单位

.com专业编写标书，提供资质陪标，代理投标，国标调查130220
招聘造价师兼职，精算标底，只要算得准，重奖50万

標書網 BiaoShu.com

固效果

2.1 计算模型

计算域取高度方向 170m，水平方向 180m，以自重应力场作为地应力场，长锚索的作用分成两部分，锚根部分假设完全与围岩固结在一起，用杆单元模拟其加固作用，自由段部分则以两端的锚固力来模拟，预应力大小按设计方案取值，该边坡分步开挖，并对边坡实施边开挖边支护的方式锚固方向为俯角 15°，锚索全长 30m，其中锚根部分长 7m，在 3# 地质剖面上共施加 18 根锚索，锚索间距为 4m。

在本计算域内共生成 1208 个岩石单元，1288 个节点，307 个节理单元。计算时岩石材料采用非线性弹塑性模型并考虑了岩体的低抗拉性能。由于实施边开挖边支护，因此可假定每步开挖后先释放 50% 的开挖荷载，然后施加本步的锚索支护，再释放剩余的 50% 开挖荷载，有限元网格及锚索布置如图 2、图 3 所示。

标书网址导航 wz.biaoshu.com

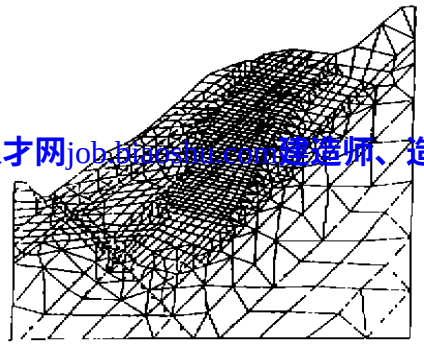

图 2　有限元网格

2.2 岩石力学参数

边坡中岩体的弹模 $E=15\text{GPa}$，泊松比 $\mu=0.2$，内摩擦角 $\varphi=44.8°$，粘结力 $c=1.0\text{MPa}$，抗拉强度 $\sigma_t=0.75\text{MPa}$。断层的力学参数如表 1 所示。

2.3 锚固岩体力学指标的改变

对于地下工程来说，锚杆和锚索支护主要发挥两种作用。1）对围岩表面提供反力，以抑制围岩向内空变位或以拉拔力抗拒危岩块体的脱落塌方；2）加固作用，使围岩整体化。文献[2,3]及朱维申等通过研究提出了锚杆对岩体抗剪强度提高的经验公式为：

$$c_1 = c_0 + \eta\frac{\tau S}{ab} \qquad (1)$$

$$\varphi_1 = \varphi_0$$

标书人才网job.biaoshu.com建造师、造价师（与“标书”相关的工作免费介绍）

式中 c_0，φ_0——加固前岩体的粘结力和摩擦角；

c_1，φ_1——加固后岩体的粘结力和摩擦角；

τ——锚杆（索）材料的抗剪强度；

S——锚杆（索）的截面积；

η——综合经验系数，一般可取 2～5。

根据设计，该工程边坡的锚索间距为 4m，其截面积为 64cm²，设锚索的剪切强度为 80MPa，由式（1）可得 $c_1=0.06\text{MPa}$，若取 1.2 的安全系数，则 $c_1=0.05\text{MPa}$。

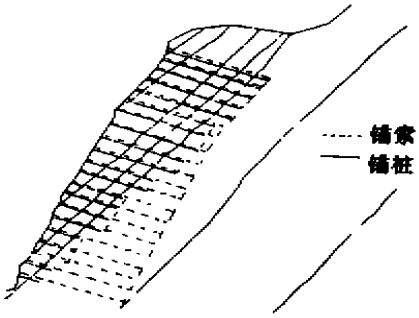

图 3　锚索布置

表 1　断层面力学参数

名称	F_{10}、F_{24}、F_{33} F_{35}、F_{32}、F_{12} F_{25}、F_{86}、F_{88}	F_{16}、F_{30} F_{28}	F_{44}
粘结力/MPa	0.01	0.01	0.01
内摩擦角/(°)	27	29	24
法向刚度/(MPa·m⁻¹)	511.51	619.2	484.6
切向刚度/(MPa·m⁻¹)	146.16	176.9	138.4

2.4 有限元计算

岩体材料的屈服采用 Drucker－prager 准

标书网biaoshu.com提供免费的资质交换平台！电：020－31334179 QQ:279674008
帮有证（造价师，建造师等）人才和老板寻找挂靠单位，帮公司联系寻找人才和合作单位

.com专业编写标书，提供资质陪标，代理投标，围标调查130220
聘造价师兼职，精算标底，只要算得准，重奖50万

$$\begin{aligned} &aI_1 + \sqrt{J_2} - K = 0 \\ &I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \\ &J_2 = \frac{1}{6}[(\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3)^2 + \\ &(\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \end{aligned} \quad (2)$$

式中$a = \frac{\sqrt{3}\sin\varphi}{3\sqrt{3} + \sin^2\varphi}$，$K = \frac{\sqrt{3}\cos\varphi}{3\sqrt{3} + \sin^2\varphi}$

计算时，选择如下两种开挖方案：

方案一：开挖至 F_{24} 断层，分四步开挖；

方案二：开挖至 F_{20} 断层，分六步开挖。

在对上述两种开挖方案进行计算分析时，参数变化有以下几种情况：1）改变锚固角；2）改变锚索的预应力；3）改变重力场的倍数；4）改变断层的切向、法向刚度；5）改变注浆锚固段的粘结力。

对锚索的计算比较了两种方案：*A* 方案，锚根采用杆单元，自由段则用一对节点力来模拟；*B* 方案，锚根及自由段都用杆单元模拟。

2.5 计算结果及分析

2.5.1 方案 *A*

20个工况的计算结果列于表2中。从总体上讲，改变其它参数，对断层的屈服状态影响甚小，只有提高断层的抗剪强度才会对计算结果有明显的影响。即在所进行的有限元数值模拟中，若不提高断层加固区岩体的抗剪强度，只改变锚索的锚固角、断层的切向、法向刚度，甚至将锚索的预应力从100t提高到300t等办法都不能显著改善边坡岩体的稳定性。从表2可以看出，断层取不同 c 值时，各种方案中断层的屈服单元产生明显的变化。因此提高断层的 c 值，如通过锚索灌浆段提高强度，则这些部位的断层大多将不再进入屈服，较为正确地反映了锚索加固岩体的效果。

表2 方案 *A* 不同工况的计算结果

支护条件	参数情况	c=0.005 方案一 屈服节理单元数	c=0.005 方案二 屈服节理单元数	c=0.05 方案一 屈服节理单元数	c=0.05 方案二 屈服节理单元数	c 值提高后，屈服单元下降 方案一	c 值提高后，屈服单元下降 方案二
	标准条件	211	119	153	163	27.5%	15.5%
	锚固角10°	213(+0.9%)					
	锚固角20°	208(−1%)					
锚索	切向、法向刚度提高50%	210(−0.5%)					
预应力	切向、法向刚度减少50%	212(+0.5%)					
100t	超载1.4倍	216(+2%)		157(+3%)	173(+6%)	27.3%	
	喷2.0倍	230(+9%)		160(+5%)	187(+6%)	30.4%	
	支护密度减半	230(+9%)		162(+6%)	171(+5%)	24.3%	
预应力300t	不变	206(−2%)					
无锚杆	不变	219(+4%)	201(+4%)				

注：标准条件指锚固角为15°，无超载，c=0.005MPa；支护密度不变，预应力100t，K_n、K_s 不变，括号中为该工况与标准条件相比时屈服单元增加或减小的百分数。

2.5.2 方案 *B*

锚索全部用抗剪强度等效的锚杆代替，不施加预应力锚桩的长度以穿过 F_{18} 断层3～4m为准，目的是为了增强坡面浅层5条断层的抗滑力。由于锚桩全部用杆单元模拟，锚桩的轴力一般是外端大而里边小，大部分受

标书网址导航 wz.biaoshu.com
标书人才网 job.biaoshu.com 建造师、造价师（与“标书”相关的工作免费介绍）
标书网biaoshu.com提供免费的资质交换平台！电：020－31334179 QQ:279674008
帮有证（造价师，建造师等）人才和老板寻找挂靠单位，帮公司联系寻找人才和合作单位

.com专业编写标书，提供资质陪标，代理投标，图标调查130220
聘造价师兼职，精算标底，只要算得准，重奖50万

结果表明使
部位比使用
长锚索时要少。

图 4～7 为锚固角 15°锚固区 $c=0.05$MPa 锚索预应力 100t 工况时的断层屈服区图、边坡节点的位移矢量图、应力矢量图及锚杆的受力分布图。

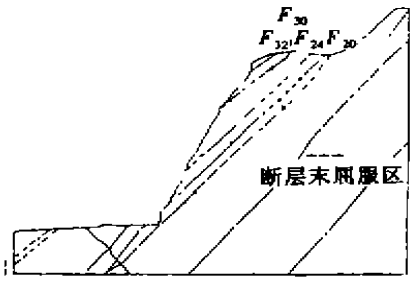

图 4 断层塑性区分布

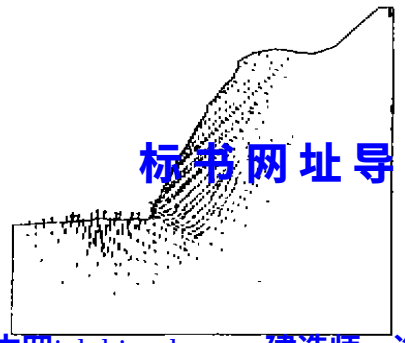

图 5 边坡面位移矢量

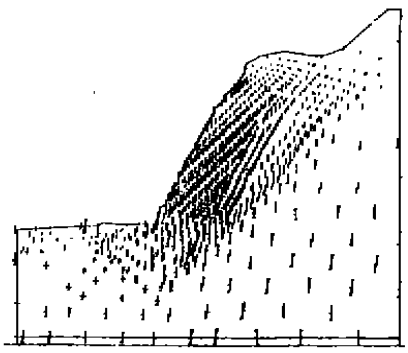

图 6 主应力矢量

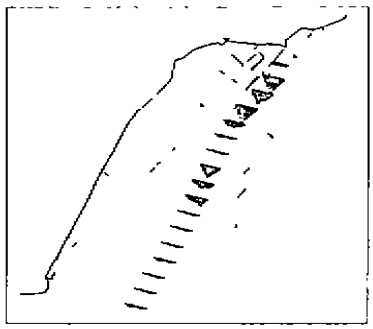

图 7 锚杆受力分布

3 结论

1)加固层状岩体时，锚索和灌浆的共同作用，使断层面的抗剪和抗滑能力大大增强，提高了岩体的刚度，增强了岩体的稳定性。

2)锚杆(索)的加固效果与锚索的长度、截面积、间距及锚固角密切相关。

3)从一边坡工程有限元的计算结果可知，提高了锚固区岩体的抗剪强度后，断层内塑性区明显减少，反映了岩体加固的效果。

标书网址导航 wz.biaoshu.com

参考文献

1 朱维申，陈卫忠等．岩土锚固工程技术的应用与发展．北京：万国学术出版社，1996

2 麦倜曾，张玉军．锚固岩体力学性质研究．工程力学，1987，(1)

3 朱敏氏等．岩石和锚杆组合材料性能的模拟试验研究．重庆建筑工程学院学报，1988，(2)

4 邹志辉，汪志林．锚杆在不同岩体的工作机理．岩土工程学报，1993，15(6)

(收稿日期：2000－03－06)

标书人才网job.biaoshu.com建造师、造价师（与“标书”相关的工作免费介绍）

标书网biaoshu.com提供免费的资质交换平台！电：020－31334179 QQ:279674008

帮有证（造价师，建造师等）人才和老板寻找挂靠单位，帮公司联系寻找人才和合作单位