

文章编号:1000-582X(2004)08-0128-04

# 锚索加固边坡碎裂结构岩体模型试验\*

曾祥勇<sup>1</sup>,唐树名<sup>1,2</sup>,邓安福<sup>1</sup>

(1.重庆大学土木工程学院,重庆 400030;2.重庆交通科研设计院,重庆 400067)

**摘要:**当前山区公路建设中,碎裂结构岩体边坡常常采用锚索加固。为深入研究锚索布置方式对碎裂结构岩体的加固效果,针对锚索加固后的碎裂结构岩体进行了室内模型试验。根据多种锚固方案试件的试验结果,分析了锚索锚固碎裂结构岩体模型的强度变形特征。通过试验中不同布锚方式的锚索对模型试件强度变形的不同影响,对比了锚索布锚方式在各种模型试件中的锚固效果。分析得出:为充分发挥锚索的锚固能力,锚索的布置角度应与碎裂结构节理走向呈正交,且锚索应布置在碎裂结构岩体边坡的较高部位中。

**关键词:**模型试验;边坡;碎裂结构岩体;锚索;布锚方式

**中图分类号:**TU457

**文献标识码:**A

我国山区高等级公路近年来获得了突飞猛进的发展,山区岩质公路路堑边坡已大量采用锚索进行加固。对锚索锚固边坡碎裂结构岩体这一课题,国内外的有关学者已做了一些理论和试验分析工作,但是由于岩土工程问题的复杂性,这些还不够,还要继续进行研究<sup>[1-2]</sup>。在试验分析中,模型试验由于其具有经济性好、针对性强、数据可靠等优点而受到国内外岩土工程研究人员的重视和青睐。笔者即采用室内模型试验的方法来对预应力锚索锚固边坡碎裂结构岩体这一课题进行研究。

## 1 模型试验

### 1.1 模型试验基本原理<sup>[3-4]</sup>

为了使模型的强度及变形发展与实际工程相似,模型材料、模型形状和荷载等必须遵循相似原理。实际上,获得完全相似模型是很困难的,问题主要在于模型材料的密度( $\rho$ )、弹性模量( $E_0$ )、泊松比( $\mu$ )、抗拉强度( $\sigma_t$ )、抗压强度( $\sigma_p$ )、内摩擦系数( $\tan\phi$ )、凝聚力( $c$ )、极限拉压应变( $\varepsilon_t$ 、 $\varepsilon_p$ )等都是独立物理量,选择了一种模型材料后,它满足某个相似判据,并不一定能满足其他相似判据,故实际的模型试验只能满足主要相似判据。本试验为岩石边坡稳定性研究的破坏模型试

验,要求模型和原形材料的容重大致相同,而其它指标则尽量保持相似,属基本相似模型试验,相关的相似公式推导及理论依据详见参考文献[3]。

### 1.2 实体工程情况

模型试验岩体参数取自汕梅高速公路西关坳边坡实体工程。该边坡中微风化岩体裂隙较小,可视为均质岩体。根据地勘报告,其物理力学指标为:岩体单轴抗压强度 $\sigma_p = 50.6$  MPa,弹性模量 $E_0 = 15 \sim 20$  GPa,泊松比 $\mu = 0.15 \sim 0.34$ ,重度 $\gamma = 24 \sim 24.4$  kN/m<sup>3</sup>,凝聚力 $c = 2.17$  MPa,内摩擦系数 $\tan\phi = 0.948$  ( $\phi = 43.5^\circ$ )。中风化岩体裂隙丰富,可视为碎裂结构岩体。其物理力学指标为:岩体单轴抗压强度 $\sigma_p = 30$  MPa,弹性模量 $E_0 = 0.45 \sim 1.2$  GPa,泊松比 $\mu = 0.2 \sim 0.35$ ,重度 $\gamma = 22 \sim 23$  kN/m<sup>3</sup>,凝聚力 $c = 0.5$  MPa,内摩擦系数 $\tan\phi = 0.6$  ( $\phi = 31^\circ$ )。主要裂隙面倾角约 $40^\circ \sim 70^\circ$  (平均值 $55^\circ$ )。边坡支护采用主动锚(锚索)<sup>[5]</sup>和被动锚(锚杆)加固岩体。锚索由8股钢索(每股又由7根 $\phi 5$ mm的钢绞线组成)组成,钢绞线弹性模量 $E_p = 1.8 \times 10^2$  GPa、抗拉强度 $\sigma_t = 1860$  MPa,锁定荷载(预拉荷载)960 kN,锁定拉应力 $\sigma = 873$  MPa。

\* 收稿日期:2004-04-21

作者简介:曾祥勇(1978-),男,湖北洪湖人,重庆大学在职博士研究生,主要从事岩土工程教学与科研工作。

### 1.3 相似比和模型尺寸

由前面所述模型试验基本原理,可确定本模型试验的相似比关系如表1所示。

表1 模型试验各物理量相似比的值

物理量	长度	应力	弹性模量	应变	容重
相似比值	27	27	27	1	1

模型试件尺寸为0.4 m×0.3 m×0.3 m(长×宽×高),按相似比知所模拟的实体边坡尺寸为10.8 m×8.1 m×8.1 m(长×宽×高),实体工程中边坡尺寸较该尺寸大,试验中采用施加均布面荷载的方式来模拟。

### 1.4 模型材料及模型试件的制作<sup>[6-8]</sup>

#### 1.4.1 碎裂结构岩体的模拟

由于节理(裂隙)不易进行准确模拟,试验中采用近似处理,即在均质岩体中按主要裂隙面倾角预埋表面光滑的薄铝皮来模拟碎裂结构岩体。

由相似比关系,均质岩体模型材料参数应为:单轴抗压强度  $\sigma_m = 1.874$  MPa,弹性模量  $E_m = 0.556 \sim 0.741$  GPa,重度  $\gamma_m = 24$  kN/m<sup>3</sup>,  $c = 80.37$  kPa,  $\tan\phi = 0.95$  ( $\phi = 43.5^\circ$ )。

根据要求,试验中均质岩体模型材料采用石膏、重晶石粉(BaSO<sub>4</sub>)、细砂、水和FDN-OR缓凝高效减水剂按配合比73:436:91:100:1配合而成。由材料试验测得模型材料的单轴抗压强度  $\sigma_m = 2.0$  MPa,粘聚力  $c = 76.5$  kPa,  $\tan\phi = 0.824$  ( $\phi = 39.5^\circ$ ),弹性模量  $E_m = 0.422$  GPa,重度  $\gamma_m = 24$  kN/m<sup>3</sup>,基本符合相似比的要求。

考虑试件制作的方便及尽可能地加大碎裂结构的密度,碎裂结构岩体试件中铝皮的埋置情况如图1所示。



图1 碎裂结构岩体模型试件图(单位:mm)

由于铝皮所占体积很小,故碎裂结构岩体模型试件重度与均质岩体模型试件重度基本一致,符合重度相似比的要求。由于埋置了铝皮,碎裂结构岩体模型试件材料的单轴抗压强度及弹性模量、凝聚力  $c$ 、摩擦系数  $\tan\phi$  均会较均质岩体模型材料有所降低,可近似模拟实体工程上中风化碎裂结构岩体的情况。

#### 1.4.2 锚索(主动锚)的模拟

根据相似比关系,要求锚索模型材料参数为:直径(单根模型锚索)  $D_m = 1.368$  mm,弹性模量  $E_m = 6.66$  GPa,抗拉强度  $\sigma_m = 68.9$  MPa,抗拉力  $F_m = \pi(D/2)^2 \times \sigma_m = 101.3$  N。

试验中模型锚索材料采用一种直径为1.5 mm、抗拉力为110 N、抗拉强度为62.2 MPa的尼龙绳索模拟,其弹性模量  $E_m = 1.6$  GPa,各材料参数基本上满足试验要求。锁定拉力控制在  $F = \pi(D/2)^2 \times \sigma = \pi(1.386/2)^2 \times (873/27)$  N = 48.8 N。

#### 1.4.3 碎裂结构岩体模型试件的制作

用木模板按尺寸做好模子,在模子相应的两侧面上做好节理缝,然后将相应宽度的铝皮条插入缝中。制作试件时,由于石膏初凝时间短,故从开始拌料到将模具倒满并振捣密实需快速完成。完成上述操作几分钟后,浆体硬化,此时将试件表面刮平、拆模,折断削平试件两侧留下的铝皮。此时试件已较硬,强度足够搬运,送入烘房干燥。

#### 1.4.4 锚索模型材料的施加

先在模具上按相应的部位钻孔,将 $\phi 12$ 的圆筋插入模具的2个端孔中并涂油润滑。试件中,凡挡住圆筋的铝皮均需在圆筋穿过的位置钻孔,以便圆筋穿过。试件浇好后,拔出圆筋,即留好了孔洞。锚索模型材料在施加预拉力后灌浆,施加预拉力采用自制的架子悬挂相应重量的重物进行,如图2所示。试验中用自制的灌浆筒灌石膏浆,灌满浆后,将绳索在孔洞的两端口部位用小螺帽和螺栓夹紧后再剪断绳索,此时绳索则被固定在试件表面而不会回缩,从而保证了预应力的作用。

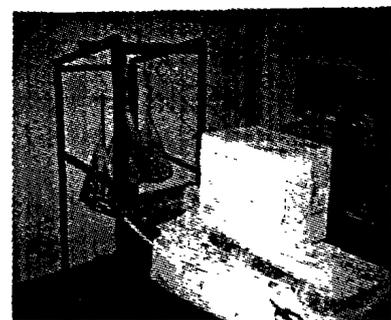


图2 锚索模型材料(绳索)预拉力的施加

### 1.5 模型试验装置及测点布置

试验中试件在平面应变条件下进行加载,试验装置及测点布置图如图3所示。

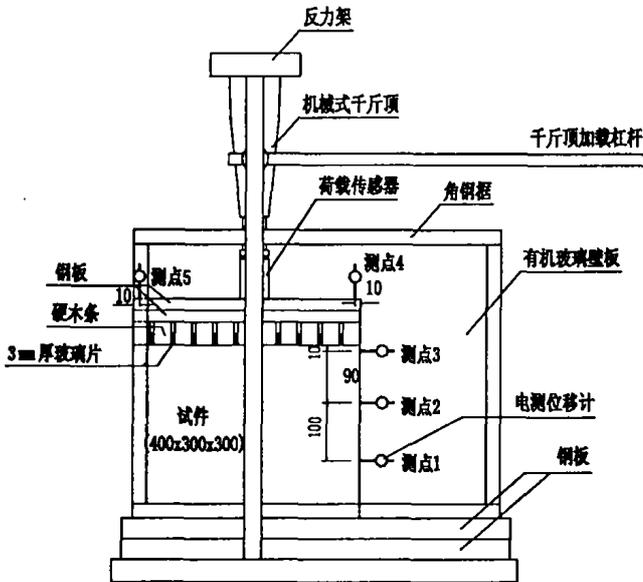


图3 试验装置及试件测点布置图(单位:mm)

### 1.6 试验方案

试验按以下3个步骤进行:

- 1) 先压无锚模型试件,得到试件破坏的形态;
- 2) 根据试件破坏的形态,分析确定锚索布置的倾角及位置;
- 3) 按照上一步的锚索布置方式制作试件并进行破坏试验,然后进行结果分析。

按照以上步骤,首先进行了碎裂结构岩体无锚模型试件破坏试验。

试件破坏时的裂纹开展情况如图4、图5所示。

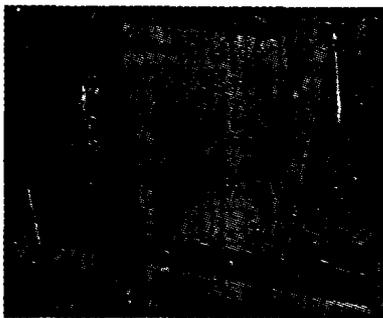


图4 无锚试件破坏时的照片

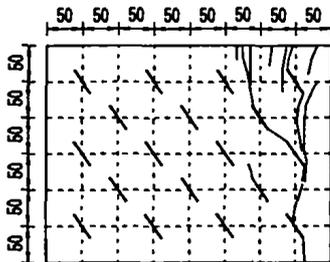


图5 试件破坏时的裂纹形态(单位:mm)

根据图5中的裂纹开展区域可作出图6中的 $\triangle ABC$ 。由于试件为脆性材料,对于试件中没有开裂的地方可认为变形较小而不考虑,而对于开裂的地方

则认为其为变形区域,故上图中的裂纹开展区域即可认为是试件的变形域。在图6中找出三角形破坏区域(变形域)的重心 $O$ 点,并以其为参照点进行锚索的布置。

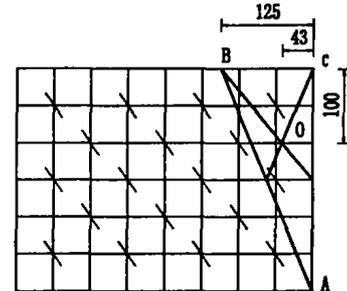


图6 破坏区域(变形域)及其重心位置图(单位:mm)

根据参照点 $O$ 点的位置所设计的6种锚索布置方式如图7所示。

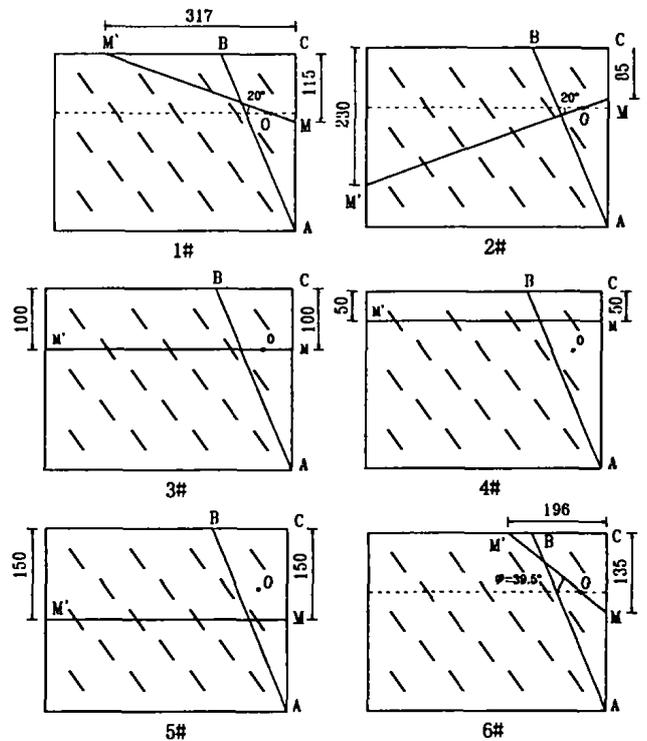


图7 碎裂结构岩体模型试件模型锚索布置图(单位:mm)

图7中,1#试件中锚索为倾角上扬布置上倾角度为 $20^\circ$ ;2#试件中锚索为倾角下扬布置下倾角度为 $20^\circ$ ;3#试件中锚索为水平布置;4#试件中锚索为高位水平布置,锚索到 $O$ 点的距离为50 mm;5#试件中锚为低位水平布置,锚索到 $O$ 点的距离为50 mm;6#试件中锚索为倾角上扬布置上倾角度为岩体模型材料的内摩擦角,为 $39.5^\circ$ ;1#、2#、3#、6#试件中锚索均穿过 $O$ 点,而4#、5#试件中锚索分别在 $O$ 点的上方和下方。取倾角为 $20^\circ$ 的原因在于实际工程中锚索的倾角多在 $20^\circ$ 左右。

每种锚索布置相同的试件制作3个,取其结果的

平均值进行分析。

加载初始阶段,即试件开裂前,加载等级为 20 kN (作用在试件表面上为 167 kPa) 一级,开裂后,加载等级为 10 kN 一级,逐级加载,直至试件压坏。

## 2 试验分析

试验中若荷载超过某量值之后,试件开裂,则称该级荷载为开裂临界荷载;若荷载超过某量值之后,试件崩溃破坏,无法继续加载,则称它为破坏临界荷载。各试件开裂荷载及破坏荷载见表 2,各试件中 5 个测点在 30 kN、60 kN 大小的荷载作用下的位移值见表 3、表 4。

表 2 碎裂结构岩体锚索模型试件开裂荷载、破坏荷载表

试件编号	1#	2#	3#	4#	5#	6#
开裂荷载/kN	30	50	30	40	30	30
破坏荷载/kN	60	80	60	70	60	60

由表 2 可以看出,2#试件的开裂荷载与破坏荷载为最大。这与试件的开裂模式是直接相关的,因为试件裂纹大部分为沿着节理发育的斜向裂纹,而 2#试件的锚杆正与这些裂纹夹角近似正交,能最大程度地发挥锚索材料的抗拉强度,即其控制裂纹开展的约束能力最强,故 2#试件的开裂荷载与破坏荷载均为最大。

各试件中有些开裂荷载与破坏荷载的大小一样,这是由试验加载等级较大造成的。但对比相同荷载下各试件 5 个测点的位移值可以看出,同为 30 kN 的开裂荷载,1#试件的测点位移小于 6#试件的测点位移,6#试件的测点位移小于 3#试件的测点位移,3#试件的测点位移小于 5#试件的测点位移。按位移越大强度越低的判据可得,在约束及保证碎裂结构岩体锚索模型试件不开裂能力方面,由强到弱,依次为 2#试件、4#试件、1#试件、6#试件、3#试件、5#试件。

同上,在保证碎裂结构岩体锚索模型试件承载能力方面,由强到弱,依次为 2#试件、4#试件、1#试件、6#试件、3#试件、5#试件。

表 3 测点在 30 kN 大小的荷载作用下的位移值 mm

测点	1	2	3	4	5
试件 1	0.15	0.99	2.04	-2.22	-0.30
试件 2	0.02	0.11	0.15	-1.24	-1.58
试件 3	0.20	1.50	2.86	-2.88	-0.91
试件 4	0.22	0.83	1.79	-2.11	-0.72
试件 5	0.51	1.43	1.64	-3.16	-2.64
试件 6	0.15	1.28	2.65	-2.83	-0.38

表 4 测点在 60 kN 大小的荷载作用下的位移值 mm

测点	1	2	3	4	5
试件 1	1.23	3.00	4.32	-5.16	-4.23
试件 2	0.15	0.16	0.43	-2.00	-3.17
试件 3	2.00	4.4	6.67	-6.03	-1.83
试件 4	0.73	2.3	3.77	-4.28	-1.13
试件 5	2.74	5.3	7.84	-6.57	-0.85
试件 6	0.95	3.0	5.61	-5.56	-1.47

## 3 结论

### 3.1 锚索的布置角度对试件的强度及变形有影响

对于碎裂结构岩体试件,锚索的布置角度与节理走向呈正交时,试件强度最大,即锚索能发挥其最大作用;锚索的布置角度对试件强度贡献越有利时,破坏时试件的变形域(如图 5)范围越大,即裂纹从临空面向后发展到试件内部的区域范围越大。为了保证锚索的锚固,实际工程中这种情况下锚索的长度要足够长以保证穿过岩质边坡坡体变形域范围从而锚在稳定岩层中。

### 3.2 锚索的布置高度对试件的强度及变形有影响

布锚位置越高,试件开裂荷载和破坏荷载越大。这与试件裂纹开展模式是相关的,加载时,裂纹从上往竖直向下或斜着向下进行发育,而高位布置的锚索则更能有效的发挥其强度,故对试件强度增长贡献要大。

### 参考文献:

- [1] 曹国金,姜弘道,张建斌. 锚固技术的支护机理和试验分析研究动态[J]. 地下空间,2002,22(1):86-89.
- [2] 唐树名,吕常新,邓安福. 混合式锚固结构在高速公路路堑边坡加固中的应用研究[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(5):702-704.
- [3] 陈兴华,胡积龄,周维垣等. 脆性材料结构模型试验[M]. 北京:水利电力出版社,1984.
- [4] 王济川. 建筑结构试验[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1991.
- [5] 唐树名,吴德海,邓安福. 主动锚和被动锚在边坡加固中联合应用的研究[J]. 地下空间,2001,21(1):14-17.
- [6] 朱维申,张玉军,任伟中. 系统锚杆对三峡船闸高边坡岩体加固作用的块体相似模型试验研究[J]. 岩土力学,1996,17(2):1-6.
- [7] 林韵梅. 实验岩石力学模拟研究[M]. 北京:煤炭工业出版社,1984.
- [8] 肖勤学. 模型材料锚喷加固实验研究[J]. 重庆建筑大学学报,1997,19(2):94-99.

## Path planning in 3-D space for robot based on ant colony algorithm

HU Xiao-bing<sup>1,2</sup>, HUANG Xi-yue<sup>1</sup>

(1. College of Mathematics and Science, Chongqing University, Chongqing 400030, China;  
2. College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** In this paper the ant colony algorithm is applied to path planning problem in 3-D space for robot. First of all, the space between the origin where the robot is located and destination was divided into a three dimensional grid, at the same time the valid path from origin to destination is defined, then all the ants will leave from the origin, selecting next vertex independently in three dimensional grid, to the destination on a valid path. The simulated experiment shows that the algorithm is efficient and has a great convergence rate.

**Key words:** ant colony algorithm; path planning for robot; heuristic algorithm

(编辑 张 革)

---

(上接第 131 页)

## Laboratory similar model test investigation of prestressed anchor rope strengthened slope fractured rock mass

ZENG Xiang-yong<sup>1</sup>, TANG Shu-ming<sup>1,2</sup>, DENG An-fu<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China;  
2. Chongqing Communications Research & Design Institute, Chongqing 400067, China)

**Abstract:** Now in the highway construction of the mountain area, fractured rock mass slope always strengthened by the anchor rope. In order to investigate the strengthen effect of the slope fractured rock mass strengthened by the prestressed anchor rope, laboratory similar model test was designed and preceded. By the self-made facilities, a new method of modeling prestressed anchor rope was used in the test. Nylon ropes and the aluminum flakes were used to model the anchor rope and discrete rock mass joints. Gypsum based mix material was used to model rock. According to the real slope engineering site circumstances, six sorts of different disposed prestressed nylon rope strengthened model specimens and the specimens without prestressed nylon rope were made by the similar theory. With the test results, the strength and deformation properties of different model specimens were investigated. Comparison to different anchor effects of the different model specimens was made. The final analysis shows that in order to make full use of the anchor rope's strengthen ability, anchor rope should be disposed perpendicularly to the fracture structure rock mass's main joint direction and should be placed in the upper or top area of the fractured rock mass slope.

**Key words:** model test; slope; fractured rock mass; prestressed anchor rope; disposal of anchor rope

(编辑 姚 飞)