

# 矸石边坡中锚固格构梁组合喷射砼的支护机理研究

罗平平<sup>1</sup>, 何慧<sup>2</sup>, 陈文姬<sup>3</sup>

(1.河南理工大学土木工程学院,河南 焦作 454003;2.郑州大学管理工程学院,河南 郑州 450000;3.中正信造价咨询有限公司,山东 济南 250014)

**摘要:**为了研究矸石边坡中锚固格构梁组合喷射砼的支护机理、力学特征及对稳定性的影响,基于 FLAC3D 内嵌的 Cable, Beam 和 Shell 结构单元建立了相关数学模型,结合工程实例进行了深入研究。结果表明:支护后,坡体拉剪塑性区缩小明显,剪应力增高带移至锚杆末端,坡面和锚杆加固区内剪应力降低;喷射砼后,格构梁所受轴力、弯矩更大,锚杆拉力与锚固体粘结应力也更大。建议在安全储备足够的前提下,薄喷混凝土,既减小格构梁和锚杆受力又提高经济性。

**关键词:**锚固格构梁;喷射砼;矸石边坡;稳定性

中图分类号:TU457 文献标识码:A 文章编号:1006-8759(2015)01-0036-04

## STUDY ON SUPPORT MECHANISM OF ANCHORED LATTICE BEAM COMBINATION SHOTCRETE TECHNOLOGY APPLIED IN GANGUE SLOPE

LUO Ping-ping<sup>1</sup>, HE Hui<sup>2</sup>, CHEN Wen-ji<sup>3</sup>

(1.School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China; 2. Institute of Management Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450000, China; 3. China zsen cost consultation co., Ltd., Jinan 250014, China)

**Abstract:**To study support mechanism, mechanical characteristics and stability of anchored lattice beam combination shotcrete applied in gangue slope, on the basis of cable, beam and shell structure units embedded in FLAC3D, a relevant mathematical model is established, and an in-depth research is conducted with an engineering example. Some conclusions are following: firstly, after supported, tension and shear plastic zone is significantly reduced, the increased stripe of shear stress moves to the anchors end, shear stress is reduced at the slope surface and within anchored zone; secondly, after shotcrete at the slope surface, the axial forces and bending moments suffered by lattice beams increase, meanwhile, anchor tension and grout stress also increase. It is recommended that thin shotcrete in slope engineering under the premise of enough security reserve, in this way, both reducing the lattice beam force, but also improving the economy.

**Key words:** Anchored lattice beam; Shotcrete; Gangue slope; Stability

## 引言

目前锚固格构梁组合喷射砼支护技术已大量运用于边坡防护工程中,它是通过钢筋混凝土格构梁将锚杆的锚固力传递给坡体,改善坡体应力状态,使坡体受压,产生抗滑力,从而达到加固边坡的目的。锚固格构梁组合喷射砼支护是一种兼顾深层加固与浅层护坡的滑坡治理措施,其加固效果可靠、施工安全快速、后期维护方便,综合造价及社会效益优于传统的重型支挡结构,有良好的应用前景。

目前计算格构梁内力时,一般将交叉的格构梁简化为对单根格构梁的计算,多采用倒梁法<sup>[1-3]</sup>、地基梁法<sup>[4-6]</sup>、弹性半无限体地基梁法<sup>[2]</sup>、室内模型与现场试验法<sup>[7,8]</sup>和数值模拟法<sup>[9,10]</sup>等。倒梁法适用于短梁、小跨及较长挑长的格构梁,弹性半无限地基梁法计算误差较大,地基梁法考虑了梁和边坡的相互作用,适用性好。

本文基于FLAC3D的离散单元法和强度折减法,分别采用其内嵌的锚索(Cable)、梁(Beam)和壳(Shell)结构单元来仿真分析锚杆、格构梁和坡面喷射砼,来研究研石边坡中锚固格构梁组合喷射砼的支护机理、力学特征及对稳定性的影响。

## 1 计算理论

### 1.1 锚杆模型

一个Cable构件假设为两节点之间具有相同横截面及材料参数的直线段,任意曲线的Cable则由许多Cable构件组合而成。Cable构件是弹、塑性材料,在拉、压中屈服,但不能抵抗弯矩,是仅提供轴向抗拉的一维结构单元。水泥浆填满的Cable与岩石(网格)发生相对移动时会产生抵抗力如图1和图2所示。

其轴向刚度 $K$ 与加固横截面积 $A$ 、弹性模量 $E$ 及构件长度 $L$ 的关系如下:

$$K=EA/L \quad (1)$$

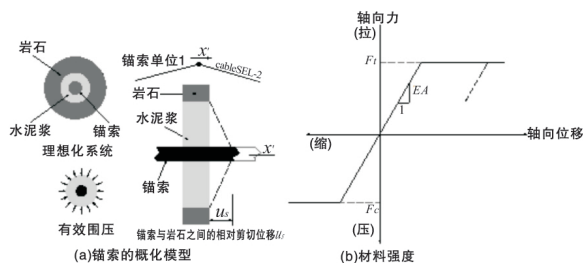


图1 锚索单元的锚索材料强度

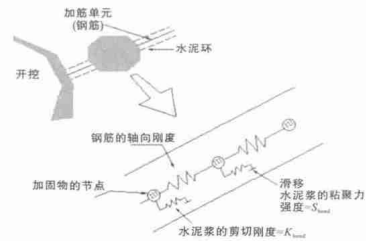


图2 全长粘结水泥浆锚索力学模型

### 1.2 格构梁模型

钢筋混凝土格构梁是由纵梁和横梁交叉于锚杆加固点连接而成,如图3所示。格构交叉点处受集中力作用,同时受地基反力作用。Beam单元的刚度矩阵为:

$$\begin{bmatrix} F^{(a)} \\ F^{(b)} \\ M^{(a)} \\ F^{(c)} \\ F^{(d)} \\ M^{(b)} \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} u^{(a)} \\ u^{(b)} \\ \theta^{(a)} \\ u^{(c)} \\ u^{(d)} \\ \theta^{(b)} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中: $u^{(a)}$ 、 $u^{(b)}$ 分别为 $a$ 、 $b$ 点切向(梁轴向)位移;  
 $u^{(c)}$ 、 $u^{(d)}$ 为 $a$ 、 $b$ 点法向(梁剪应力方向)位移;  
 $\theta^{(a)}$ 、 $\theta^{(b)}$ 为 $a$ 、 $b$ 点的转角。

$$K = \frac{E}{L} \begin{bmatrix} 4 & & & & & \\ & 12/L^2 & & & & \\ & & 4I & & & \\ & & & 0 & & \\ & & & & 0 & \\ & & & & & 12/L^2 \\ & & & & & & 4I \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中: $E$ 为梁的弹性模量; $L$ 为梁的长度; $I$ 为梁截面惯性矩; $A$ 为梁的横截面积。

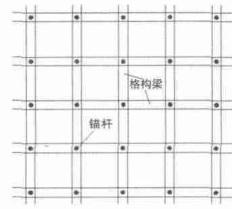


图3 格构梁布置示意图

### 1.3 喷射砼模型

Shell结构单元被认为是一个在3个节点上具有统一厚度的三角形。每个壳体单元特性视为各向同性或各向异性的线弹性材料,且没有破坏极限。每种壳体类型都有自己的局部坐标系如图4所示。

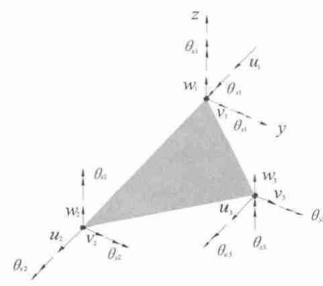


图4 壳体单元的局部坐标系

## 2 实例分析

### 2.1 工程概况

义煤集团综能公司建于已堆积 10~50 年的矸石堆积场,场地高低起伏,在其中部有一高 20 余米,长 700 余米近南北走向的矸石边坡。自然状态下,边坡处于临界稳定状态,开挖取直并经历多场暴雨后,多处滑塌。鉴于特殊的工程地质条件及边坡的重要性,拟采用锚固格构梁结合喷射砼支护技术,设计坡形如图 5 所示。

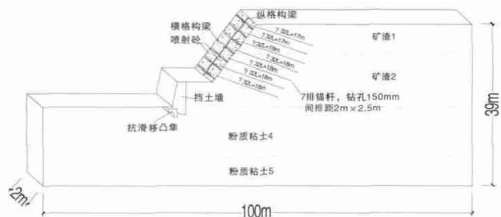


图 5 设计坡形

### 2.2 计算参数

边坡岩土材料、格构梁和喷射砼、锚杆参数分别见表 1~3。岩土材料服从 Mohr-Coulomb 准则。

表 1 边坡岩土材料参数

岩性	体积模量 /MPa	剪切模量 /MPa	粘聚力 /kPa	摩擦角/ $^{\circ}$	密度 /( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
矸渣 1	5.56	3.18	38.2	22.1	$1.99 \times 10^3$
矸渣 2	3.32	2.25	34.3	22.1	$1.99 \times 10^3$
粉质粘土 4	6.33	3.80	58.2	20.3	$2.00 \times 10^3$
粉质粘土 5	6.25	3.57	57.8	20.6	$2.03 \times 10^3$
浆砌毛石挡墙	7580	5100	20.0	32.0	$2.30 \times 10^3$
抗滑移凸榫	16.7	12.5	3780	61.7	$2.50 \times 10^3$

表 2 格构梁和喷射砼计算参数

类别	面积/ $\text{m}^2$	厚度/m	弹性模量/GPa	泊松比	惯性矩/ $\text{m}^4$
格构梁	0.09		45	0.3	$6.75 \times 10^{-4}$
喷射砼		0.1	10.5	0.25	

表 3 锚杆计算参数

杆长 /m	面积 / $\text{mm}^2$	弹性模量 /GPa	粘结刚度 /( $\text{N}/\text{m}$ )	粘结力 /GPa	摩擦角 / $^{\circ}$	抗拉强度 /MPa	外圈周长 /cm
17	804.3	90	$1.00 \times 10^9$	1.33	25	8.89	4.71
18	804.3	150	$1.50 \times 10^{10}$	1.51	25	9.13	4.71

### 2.3 结果分析

计算分三种工况,分别为:工况 1,只有下部 6 m 挡墙支护;工况 2,挡墙+锚固格构梁组合支护,为现行支护方案;工况 3,挡墙+锚固格构梁组合喷射砼支护。

(1)稳定性分析:表 4 为三种工况下的边坡安全系数。从表 4 可知,在采用锚固格构梁和喷射砼的组合支护后,安全系数明显得到提高,加固效果更加明显。

表 4 三种工况下的边坡安全系数

计算工况	工况 1	工况 2	工况 3
安全系数	1.42	1.75	1.83

图 6~图 8 分别为这三种工况下的体积应变增量等值线及滑动速度矢量图,可通过体积应变增量等值线来显示边坡潜在滑动面位置。

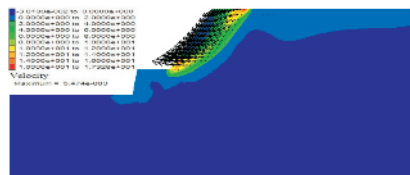


图 6 工况一边坡体积应变增量等值线及滑动速度矢量 ( $Y=1.0\text{m}$ )

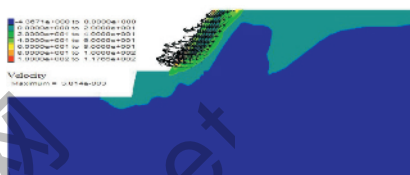


图 7 工况二边坡体积应变增量等值线及滑动速度矢量 ( $Y=1.0\text{m}$ )

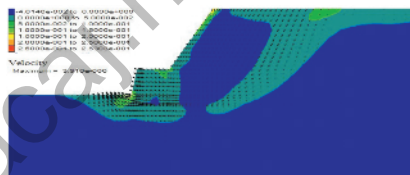


图 8 工况三边坡体积应变增量等值线及滑动速度矢量 ( $Y=1.0\text{m}$ )

结果表明,锚固格构梁支护后,滑速降低,坡内滑带收窄,但坡面出现变形。进一步在坡面喷射砼后,坡体滑动速度比之前略大,但变形只出现于坡顶局部区域。

(2)坡体塑性变形分析:图 9~图 11 为各工况的边坡塑性区分布。从图可看出,工况 1 坡顶出现拉破坏区,台阶上部坡体后缘出现明显的剪切破坏区。在进行锚固格构梁支护后,坡顶及邻近坡体塑性区缩小,而坡体更远范围及挡墙下部坡体出现剪切破坏,但距离坡面甚远。在喷射砼后,坡顶和邻近坡体塑性区消除,虽然坡体后缘仍有剪切破坏带,但离坡面甚远。

(3)结构单元力学特征分析:图 12 为工况 2 和工况 3 横向格构梁所受弯矩图。

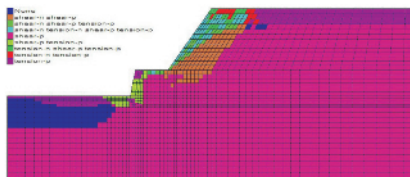


图 9 工况 1 塑性区分布

从图可看出,两工况都是横梁两端向上翘起,不同之处在于:一是工况 3 横梁所受弯矩比工况 2 的大;二是工况 2 中部横梁弯矩最大,而工况 3

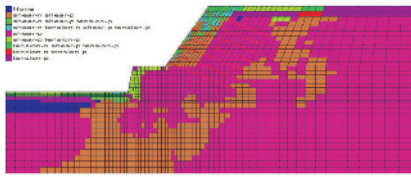


图 10 工况 2 塑性区分布

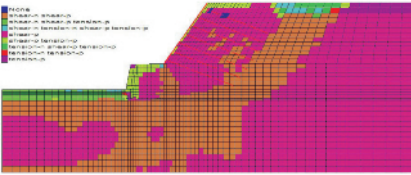


图 11 工况 3 塑性区分布

下部横梁弯矩最大。

图 13 和图 14 分别为纵向格构梁所受弯矩和轴力图。

结果表明,喷射混凝土前,纵梁中部弯起,轴力分布更为均匀;喷射混凝土后,纵梁两端和中部弯起,而其余部位有向坡内弯的趋势,同时中下部轴力更大。

图 15 和图 16 分别为工况 2、工况 3 的锚杆轴力图 and 锚固体粘结应力图。

图 15 表明,单根锚杆所受轴力并非均匀分布,最大轴力一般位于锚杆中部,同时,最下排锚杆所受轴力最大,且坡面喷射混凝土后的锚杆所受轴力要大于喷射前锚杆轴力。

图 16 表明,固结体与孔壁的粘结应力也非均匀分布,最下排锚杆内端的最大,同时坡面喷射混凝土后的锚固体粘结应力要大于喷射前锚杆体粘结应力。

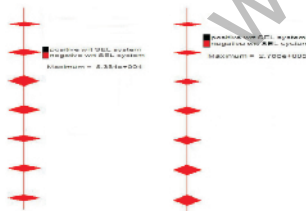


图 12 横梁所受弯矩图/(N/m)



图 13 纵梁所受弯矩图/(N/m)

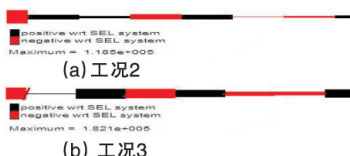


图 14 纵梁所受轴力图/N

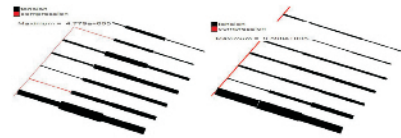


图 15 锚杆轴力/N

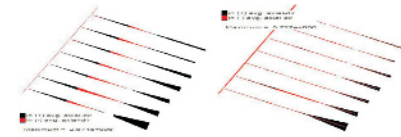


图 16 锚固体粘结应力/Pa

### 3 结论

本文通过建立的 FLAC<sup>3D</sup> 数学模型,研究了研石边坡中锚固格构梁组合喷射砼支护技术的抗滑机理及力学特征,取得了如下成果:

(1)采用锚固格构梁组合喷射砼支护技术后,边坡安全系数提高,边坡塑性区缩小,剪切破坏带后移;

(2)横向格构梁呈向上翘起之势,最大弯矩出现在与纵向格构梁交界处,且喷射砼后,横梁弯矩比之前要大;

(3)喷射混凝土前,纵梁中部弯起,轴力分布更为均匀;喷射混凝土后,纵梁两端和中部弯起,而其余部位有向坡内弯的趋势,同时中下部轴力更大;

(4)单根锚杆所受轴力并非均匀分布,最大轴力一般位于锚杆中部,同时,最下排锚杆所受轴力最大,且坡面喷射混凝土后的锚杆所受轴力要大于喷射前锚杆轴力;

(5)固结体与孔壁的粘结应力也非均匀分布,最下排锚杆内端的最大,同时坡面喷射混凝土后的锚固体粘结应力要大于喷射前锚杆体粘结应力。

以上结果表明,喷射混凝土虽有助于提高边坡稳定性和防止坡面水土冲刷,但喷射混凝土后,格构梁所受的轴力、弯矩更大,锚杆拉力与锚固体粘结应力也更大。说明在安全储备足够的前提下,薄喷混凝土,有利于减小格构梁和锚杆受力。为防止坡面雨水冲刷,水土流失造成格构梁底部掏空,可在格构内进行绿化或铺填轻型预制混凝土砖的方法盖住坡面避免坡面水土冲刷。

### 参考文献

[1]马迎娟,彭社琴,周斌.滑坡治理中预应力锚索格构梁内力计算方法对比分析[J].地质力学学报,2004,10(4): 366-371.

(下转第 46 页)

可靠性的重要因素,进而也影响到利用地下水数值模型开展模拟和预报结果的可靠性,因而开展地下水数值模拟中参数的敏感性分析十分重要。敏感性分析是在合理的范围内(模型参数值的不确定范围)改变模型输入参数,并观察水头,流速或污染物等响应变化,确定参数、边界条件和源汇项等的不确定性对模型计算结果的影响程度,从而检查模型正确性。在调参前进行敏感性分析可帮助建模者确定调参方向;在调参后进行敏感性分析可以确定模型的正确性。在调参过程中如果发现某个参数的微小变化引起计算结果的较大改变,表明该参数的不确定性会对模型计算结果产生较大影响,因此在获取该参数值和模型校正时就需要特别慎重对待。现有的敏感性分析基本上是在其他参数不变的情况下,将目标参数适当作上下浮动,从而得到敏感系数。由于不同参数的量纲不同,为便于比较不同参数的敏感系数,推荐使用无量纲形式的公式(3)进行参数的敏感性分析。

$$\beta_{i,k} = \frac{\delta H_i / H_i}{\delta a_k / a_k} \quad (3)$$

式中: $\beta_{i,k}$  为水头; $H$  对第  $k$  个参数在第  $i$  个观测点上的敏感系数; $H$  为第  $i$  点水头值; $a_k$  为第  $k$  个参数值。

### 3.2 模型不确定性分析

由于模型建立在一定的假设基础上,即使经过良好律定的模型由于数据的不充足和对模拟过程的过度简化或过度复杂化,地下水水流与溶质运移模型的运算结果仍然会存在一定的误差或者不确定性,因此,科学地定量分析地下水模拟的不确定性十分必要。如果地下水预测模拟的预报结果对规划和设计有重要意义,必须对模型的不确定性予以分析,从而评估模型预测结果的可靠性。根据地下水模拟不确定性的来源,将其分为参数

不确定性、模型不确定性和资料不确定性三类。常用的评价不确定性的方法有:敏感分析, Monte Carlo 方法、一阶误差分析等。通过对参数不确定性的分析,模拟结果可以表达为可能结果的区间,从而反映模拟参数的不确定性<sup>[7,8]</sup>。

## 4 结论与建议

(1)污染场地地下水水流和溶质运移模型的维数应结合场地的水文地质条件具体分析,科学合理概化,并尽可能建立三维或准三维流模型。

(2)污染场地通常难以利用自然边界,可沿流线或等水头线方向确定研究区边界。通用水头边界在处理含水层渗透系数不大、源汇项变化大的场地地下水数值模型问题非常有效。

(3)污染场地地下水数值模拟过程中应重视参数敏感性和模型不确定性分析及后续检查验收工作,不断丰富和发展相关分析方法,建立统一的验收操作规范。

## 参考文献

- [1] Zheng C M, Gorelick S M. Analysis of the effect of decimeter scale preferential flow paths on solute transport [J]. Ground Water, 2003,41(2):142-155.
- [2] 薛禹群. 中国地下水数值模拟的现状与展望[J]. 高校地质学报, 2010,16(1):1-6.
- [3] 钱会, 王毅颖, 宋秀玲. 地下水流数值模拟中不应忽视的几个工作程序[J]. 勘察科学与技术, 2004,22(1):40-43.
- [4] 张宗文. 某污染场地地下水流及污染物运移数值模拟[J]. 北京: 中国地质大学(北京), 2011.
- [5] 卢文喜. 地下水运动数值模拟过程中边界条件问题探讨[J]. 水利学报, 2003,32(3):33-35.
- [6] 沈媛媛, 蒋云钟, 雷晓辉, 等. 地下水数值模拟中人为边界条件的处理方法研究[J]. 水文地质工程地质, 2008,35(6):12-15.
- [7] 陈崇希. "防止模拟失真, 提高仿真性"是数值模拟的核心[J]. 水文地质工程地质, 2003,30(2):1-4.
- [8] 吴吉春, 陆乐. 地下水模拟不确定性分析[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2011,47(3):227-234.
- [9] 质边坡的应用研究[J]. 2008, 28(3): 330-334.
- [7] 刘晶晶, 赵其华, 彭社琴, 等. 预应力锚索格构梁作用下边坡土中应力分布的室内模型试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2006, (4): 9-12.
- [8] 朱大鹏, 晏鄂川, 宋琨. 格构梁与边坡岩体相互作用机制及现场试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(S1): 2947-2953.
- [9] 张雷, 叶勇, 陈时栩. 格构梁预应力锚索加固岩堆体边坡数值模拟[J]. 工程勘察, 2008, (5): 5-8.
- [10] 向安田. 高边坡预应力锚索格构梁的承载机理及设计分析研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.

(上接第 39 页)

- [2] 肖世国, 周德培. 岩石高边坡预应力锚索地梁的一种内力计算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 23(2): 250-253.
- [3] 许英姿, 璩继立, 葛修润, 等. 格构锚固结构与地基相互作用分析[J]. 上海交通大学学报, 2005, 39(5): 742-745.
- [4] 唐辉明, 许英姿, 程新生. 滑坡治理工程中钢筋混凝土格构梁设计理论研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(11): 1683-1687.
- [5] 殷跃平. 滑坡钢筋砼格构防治"倒梁法"内力计算研究[J]. 水文地质工程地质, 2005, (6): 52-56.
- [6] 江学良, 草平, 杨慧, 等. 格构梁与锚管注浆复合结构加固裂隙岩