

碎裂结构岩体路堑边坡锚间距的断裂力学探讨

罗强¹, 李亮¹, 唐树名²

(1. 中南大学 土木建筑学院, 长沙 410075; 2. 重庆交通科研设计院, 重庆 400067)

摘 要: 锚索间距是进行边坡锚固设计的关键参数, 由于碎裂岩体结构边坡潜在破裂面的形成受其内部主要裂纹的控制, 为确定碎裂结构岩体路堑边坡锚固锚索间距, 采用断裂力学理论, 通过分析裂纹尖端应力场, 结合边坡设计的安全性要求, 提出了基于断裂力学理论的该类边坡锚间距分析方法, 经过实际工程应用, 验证了该方法的可靠性。

关键词: 碎裂结构岩体; 路堑边坡; 断裂力学; 锚间距

中图分类号: TU411.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2010)06-0044-04

Discussion on the Anchor Space of Disintegrate Structure Rock Mass Cutting Slope by Using Fracture Mechanics

LUO Qiang¹, LI Liang¹, TANG Shu-Ming²

(1. College of Civil and Architectural Engineering, Central South University, Changsha 410075, China;

2. Chongqing Communication Research and Design Institute, Chongqing 400067, China)

Abstract: Anchor rope spacing is the key parameter on the design of slope anchor. Because the formation of potential failure surface in the cataclastic rock slope is under the control of the inner main crack, fracture mechanics theory is introduced in this paper in order to determine the anchor rope spacing of the fractured rock cutting slope. By analyzing the crack tip stress field and concerning with the security requirements of slope design, this paper brings forward the analysis method of this type of anchor spacing based on the fracture mechanics theory, and the reliability of the method is verified through practical engineering application.

Key words: cataclastic structure rock mass; cutting slope; fracture mechanics; anchor space

锚固技术广泛地应用于公路路堑边坡的加固中, 不过锚间距的确定一直是一个公开的世界难题, 现行通用的做法是采用工程地质类比经验法, 难免存在不经济或不安全两种状况, 为此锚间距确定的理论化课题成为国内外岩土工程界科技人员研究的热点^[1-7]。

碎裂结构岩体作为岩体结构中的一种, 具有裂隙非常发育、岩体破碎而又风化不强烈等特点, 致使这类岩体边坡比其它类别岩体边坡更为复杂^[8-10]。断裂力学作为一门新兴科学于 20 世纪 50 年代末问世, 以 1958 年 8 月美国斯坦福大学召开的“美国海军结构力学第一届学术讨论会”上 G. R. Irwin 作的题名为“断裂力学”的论文为重要标志^[11]。断裂力学认为工程结构是有缺陷的, 从而基于此观点对工程结构进行求解, 因此其在边坡工程中应具有广阔的使用空间, 因为边坡岩体内发育有各种裂隙, 这些裂隙正是缺陷之所在。基于上述情况, 本文拟采用断裂力学观点来探讨碎裂

结构岩体路堑边坡的锚固机理, 进而推导出其锚间距, 以期工程实践提供可借鉴和参考的资料和数据。

1 边坡锚固的断裂力学模型

碎裂结构岩体路堑边坡破坏面形态近似圆弧形^[12], 可用图 1 示意。边坡破坏时, 破裂面上一定存在裂纹, 处于边坡不同部位的裂纹的受力状态有差异, 已有研究结果表明^[8], 边坡开挖后坡顶附近形成拉剪应力区, 边坡中部及坡脚形成压剪应力区, 因此边坡破裂面上裂纹的受力状态主要有两种: 拉剪应力、压剪应力, 故边坡上的断裂力学问题主要为 I 型和 II 型断裂问题。边坡加锚后, 锚力的作用相当于在破裂面裂纹上施加了一个集中力, 通常锚轴线方向与边坡破裂面不垂直而有一定交角, 锚力作用在破裂面上后可分解成垂直于破裂面和平行于破裂面两个分力, 从而与断裂力学的 I 型和 II 型断裂问题相对应。

收稿日期: 2010-03-05

资助项目: 西部交通建设科技项目(2006318802111); 中南大学优秀博士学位论文扶植项目(2008yb004)

作者简介: 罗强(1970-), 男, 贵州思南县人, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事公路工程、岩土工程方面的研究。E-mail: luqiang@vip.sina.com

根据上述情况, 以边坡发生圆弧破裂面为例, 示出边坡破裂面上裂纹的受力状态如图 1。

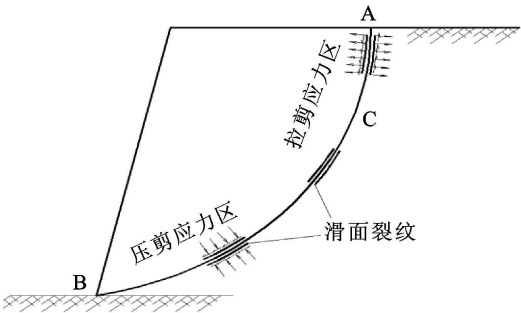
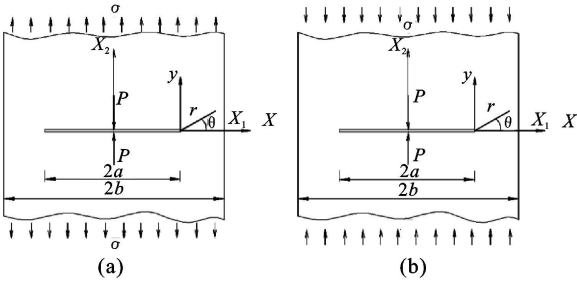


图 1 边坡破裂面裂纹受力状态

为用断裂力学分析边坡锚固机理, 对边坡破裂面上裂纹锚固受力作如下简化假设:

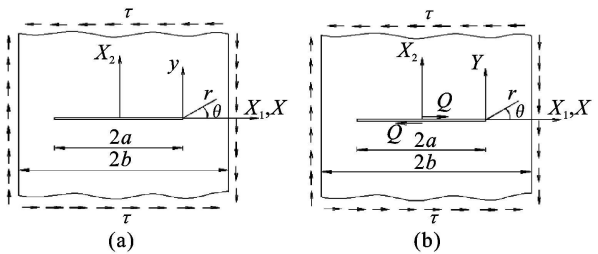
- (1) 边坡破裂面上裂纹锚固受力问题简化为平面应变裂纹问题。
- (2) 呈下滑趋势的边坡岩体自重对裂纹的作用力视为裂纹受到远场作用的问题。
- (3) 锚对边坡破裂面上裂纹的作用简化为集中力, 该集中力沿着平行裂纹面和垂直裂纹面两个方向分解, 形成 I、II 型断裂问题。
- (4) 单根锚加固的边坡断裂问题视为平面应变无限体裂纹问题, 且锚通过裂纹面中点。
- (5) 多根锚加固的边坡断裂问题视为平面应变有限体裂纹问题, 有限体宽度为锚间距, 且锚通过裂纹面中点。
- (6) 锚固后的边坡受力问题为远场作用的应力和裂纹面集中力的叠加。

根据上述假定, 可建立锚力作用下边坡破裂面上裂纹的受力模型如图 2 和图 3 示。



(a) 边坡上部破裂面裂纹 (b) 边坡中下部破裂面裂纹
图 2 锚间距为 2b 的边坡破裂面裂纹 I 型断裂模型

$$\begin{cases} \alpha_1 = \frac{b\sigma}{\sqrt{b^2 - a^2} \sqrt{r(2a+r)}} \left[(a+r) + \frac{8a^2r + 7a^3}{2(2a+r)^2} \theta^2 \right] - \frac{b\sigma}{\sqrt{b(2a+r)} - \sqrt{3}a} \\ \alpha_1 = \frac{b\sigma}{\sqrt{b^2 - a^2} \sqrt{r(2a+r)}} \left[(a+r) + \frac{4a^2r + 5a^3}{2(2a+r)^2} \theta^2 \right] \\ \tau_{xy1} = \frac{b\sigma}{\sqrt{b^2 - a^2} \sqrt{r(2a+r)}} \frac{a^2}{2a+r} \theta \end{cases} \quad (3)$$



(a) 加锚前 (b) 加锚后

图 3 加固前后锚间距为 2b 的边坡破裂面裂纹 II 型断裂模型

2 锚固边坡破裂面应力场

本文主要研究边坡破裂面裂纹在滑体自重应力作用下的扩展断裂和锚力作用下裂纹线附近的应力场变化等。求解有限宽度岩体裂纹问题是在相应无限大岩体裂纹问题基础上进行, 因此, 首先求出无限大岩体裂纹问题在裂纹线附近的应力场或裂纹线上的应力场, 然后通过裂纹面的特殊条件得出有限宽度岩体裂纹线上的应力场。求解时以拉为正、压为负。

2.1 边坡锚固的 I 型断裂

对远场作用的无限大岩体裂纹, 当远场应力为拉应力时, 采用复变函数解法, 可求得在裂纹线附近的应力场表达式式 (1)^[11]

$$\begin{cases} \alpha_x = \frac{\sigma}{\sqrt{r(2a+r)}} \left[(a+r) + \frac{8a^2r + 7a^3}{2(2a+r)^2} \theta^2 \right] - \sigma \\ \alpha_y = \frac{\sigma}{\sqrt{r(2a+r)}} \left[(a+r) + \frac{4a^2r + 5a^3}{2(2a+r)^2} \theta^2 \right] \\ \tau_{xy} = \frac{\sigma}{\sqrt{r(2a+r)}} \frac{a^2}{2a+r} \theta \end{cases} \quad (1)$$

式中: α_x , α_y , τ_{xy} ——大、小主应力和剪应力; a ——裂纹长度; r ——距坐标原点的距离; θ ——与 x 轴的夹角; σ ——远场垂直应力。

当远场应力为拉应力时, 只需在式 (1) 中 σ 改变符号。对远场作用的有限宽度岩体问题, 在式 (1) 中令 $\sigma = k\sigma$, 沿着裂纹线 X 轴方向将整体分成两部分, 根据静力平衡条件可得:

$$\int_0^{b-a} \alpha_y|_{\theta=0} dr = b\sigma \quad (2)$$

式中: b ——锚间距。据此公式求出 k , 带入式 (1) 的应力表达式即可得有限宽情况的应力表达式。

同理可求出集中力 P 作用的有限宽度岩体裂纹 的应力场表达式为:

$$\left\{ \begin{aligned} \alpha_{x2} &= \frac{-Pa}{2\arccos \frac{a}{b}(a+r) \sqrt{r(2a+r)}} \left[1 + \left[\frac{(a-r)r}{2(a+r)^2} - \frac{a^2+ar+r^2}{2(2a+r)^2} - \frac{r}{(2a+r)} \right] \theta^2 \right] - \\ &\quad r \frac{Pa^3}{2\arccos \frac{a}{b}(a+r)^2(2ar+r^2)^{3/2}} \left[\frac{2r}{a+r} + \frac{3(a+r)}{2a+r} \right] \theta^2 \\ \alpha_{y2} &= \frac{-Pa}{3\arccos \frac{a}{b}(a+r) \sqrt{r(2a+r)}} \left[1 + \left[\frac{(a-r)r}{2(a+r)^2} - \frac{a^2+ar+r^2}{2(2a+r)^2} - \frac{r}{(2a+r)} \right] \theta^2 \right] + \\ &\quad r \frac{Pa^3}{2\arccos \frac{a}{b}(a+r)^2(2ar+r^2)^{3/2}} \left[\frac{2r}{a+r} + \frac{3(a+r)}{2a+r} \right] \theta^2 \\ \tau_{xy2} &= \frac{Pa^3}{2\arccos \frac{a}{b}(a+r)^2(2ar+r^2)^{3/2}} r\theta \end{aligned} \right. \quad (4)$$

边坡锚固后在破裂面裂纹线附近的应力场为远场 (重力场) 作用下的情况与集中力 (锚固力) 作用下的情况叠加。边坡锚固通常是多根锚共同加固边坡, 因此根据上文的假设条件可知, 边坡锚固的断裂问题通常应视为平面应变有限体裂纹问题。根据上述情况可得边坡锚固后的应力场如式 (5) 示。

$$\left\{ \begin{aligned} \alpha_x &= \alpha_{x1} + \alpha_{x2} \\ \alpha_y &= \alpha_{y1} + \alpha_{y2} \\ \tau_{xy} &= \tau_{xy1} + \tau_{xy2} \end{aligned} \right. \quad (5)$$

式中: α_{x1} 、 α_{y1} 、 τ_{xy1} 表达式如式 (3) 示, α_{x2} 、 α_{y2} 、 τ_{xy2} 表达式如式 (4) 示。

$$\left\{ \begin{aligned} \alpha_{x2} &= \frac{(-1)(Q+2af)a}{(a+r) \sqrt{r(2a+r)} \arccos \frac{a}{b}} \left(\frac{r}{a+r} + \frac{a+r}{2a+r} \right) \theta + r\theta \frac{a^3(Q+2af)}{2(a+r)^2(2ar+r^2)^{3/2} \arccos \frac{a}{b}} \\ \alpha_{y2} &= (-1)r\theta \frac{a^3(Q+2af)}{2(a+r)^2(2ar+r^2)^{3/2} \arccos \frac{a}{b}} \\ \tau_{xy2} &= \frac{(Q+2af)a}{2(a+r) \sqrt{r(2a+r)} \arccos \frac{a}{b}} \left[1 + \frac{(a-r)r}{2(a+r)^2} \theta^2 - \frac{a^2+ar+r^2}{2(2a+r)^2} \theta^2 - \frac{r}{(2a+r)} \theta^2 \right] + \\ &\quad \frac{ra^3(Q+2af)\theta^2}{2(a+r)^2(2ar+r^2)^{3/2} \arccos \frac{a}{b}} \left[\frac{2r}{a+r} + \frac{3(a+r)}{2a+r} \right] \end{aligned} \right. \quad (7)$$

式中: f ——裂纹面上的剪切力。

边坡锚固后在破裂面裂纹线附近的的应力场为上述远场 (重力场) 作用下的情况与集中力 (锚固力) 作用下的情况叠加。此处不再详述。

3 锚间距确定

锚对边坡稳定性的贡献体现在两方面: 一是增大破裂面上裂纹的正应力, 一是产生一个沿破裂面上裂纹切向并与下滑方向相反的剪应力。锚对边坡稳定性的贡献率, 即锚固效果, 与锚间距关系密切。由此

2.2 边坡中的 II 型断裂

按与节 2.1 同样的解法, 可求得远场作用的有限宽度岩体情况的应力表达式如式 (6)。

$$\left\{ \begin{aligned} \alpha_{x1} &= -\frac{\tau}{\sqrt{r(2a+r)}} \frac{3a^2}{2a+r} \frac{b}{\sqrt{b^2-a^2}} \theta \\ \alpha_{y1} &= \frac{\tau}{\sqrt{r(2a+r)}} \frac{a^2}{2a+r} \frac{b}{\sqrt{b^2-a^2}} \theta \\ \tau_{xy1} &= \frac{\tau}{\sqrt{r(2a+r)}} \frac{b}{\sqrt{b^2-a^2}} \left[(a+r) - \frac{8a^2r+7a^3}{2(2a+r)^2} \theta^2 \right] \end{aligned} \right. \quad (6)$$

式中: τ ——远场剪切应力, 其它符号同前。

集中力 Q 作用的有限宽度岩体情况的应力表达式式 (7)。

可以推论, 若已知边坡安全系数, 则可以确定锚的间距。对碎裂结构岩体边坡, 边坡中部最具有代表性, 因此以下的讨论针对边坡中部展开。根据边坡安全系数的定义可将边坡安全系数 K 表示如式 (8)。

$$K = \frac{(\alpha_{y1} + \alpha_{y2}) \tan \varphi + C + \tau_{xy2}}{\tau_{xy1}} \quad (8)$$

式中: α_{y1} 、 α_{y2} ——边坡锚固前后破裂面上裂纹正应力; φ 、 C ——边坡破裂面内摩擦角、粘聚力; τ_{xy1} ——边坡锚固前破裂面上剪应力, 相当于下滑力, 表达式如式 (6) 示; τ_{xy2} ——边坡锚固后锚力作用产生的与下

滑方向相反的剪应力, 表达式为式(7)中除去 $2af$ 项。

进一步变换公式(8)后有:

$$K = \frac{\sigma_{y2} \tan \varphi + \tau_{xy2}}{\tau_{xy1}} + \frac{\sigma_{x1} \tan \varphi + C}{\tau_{xy1}} \quad (9)$$

令: $K_1 = (\sigma_{x1} \tan \varphi + C) / \tau_{xy1}$, 则上式可变换为:

$$K - K_1 = \frac{\sigma_{y2} \tan \varphi + \tau_{xy2}}{\tau_{xy1}} \quad (10)$$

将式(3)、式(4)、式(6)、式(7)代入式(10), 引入无量纲量 $\lambda = b/a$, $\xi = r/a$, 考虑裂纹线上 $\theta \rightarrow 0$ 情况, 化简、整理后有:

$$K - K_1 = \frac{(P \tan \varphi + Q) \sqrt{\lambda^2 - 1}}{2a \tau \arccos \frac{1}{\lambda} (1 + \xi)^2} \quad (11)$$

考虑裂纹尖端应力, 则 $\xi = 0$, 故上式变为

$$K - K_1 = \frac{(P \tan \varphi + Q) \sqrt{\lambda^2 - 1}}{2a \tau \arccos \frac{1}{\lambda}} \quad (12)$$

进一步变换式(12)后有:

$$\frac{\arccos \frac{1}{\lambda}}{\sqrt{\lambda^2 - 1}} = \frac{P \tan \varphi + Q}{2a \tau (K - K_1)} \quad (13)$$

式(13)中, 等号“=”右边的计算结果应转化为角度。式中各符号意义如下:

P ——锚设计荷载沿破裂面裂纹法线方向分力(kN); Q ——锚设计荷载沿破裂面裂纹切线方向分力(kN); φ ——边坡岩体内摩擦角($^\circ$); a ——边坡破裂面裂纹长度(m), 对等厚层状碎裂结构岩体路堑边坡, a 可取为岩体层厚。已有结果表明^[9-10], 对等厚层状碎裂结构岩体路堑边坡, a 通常大于1.0 m。具体应用时 a 应取岩体厚度实测值。 λ ——与锚间距有关的无量纲量, $\lambda = b/a$, b 为锚间距(m); τ ——自重作用下边坡岩体在所研究的破裂面裂纹附近产生的剪应力(kPa)。若假设边坡仅受自重应力作用, 如图4所示, 则此状态下边坡内一点的大、小主应力 σ_1 , σ_3 及相应的剪应力可通过极坐标下计算公式(14)再经式(15)的坐标转换计算^[13]。

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{1}{4} \gamma \cdot r \left[\frac{3 \cos^2 \beta - 2}{\cos^2 \beta} (\cos \theta - \cos 3\theta) + \tan \alpha (\sin \theta - 3 \sin 3\theta) \right] - \gamma \cdot r \cdot \cos \theta \\ \sigma_3 = \frac{1}{4} \gamma \cdot r \left[\frac{3 \cos^2 \beta - 2}{\cos^2 \beta} (3 \cos \theta + \cos 3\theta) + 3 \tan \alpha (\sin \theta + \sin 3\theta) \right] - \gamma \cdot r \cdot \cos \theta \\ \tau_{\theta} = \frac{1}{4} \gamma \cdot r \left[\frac{3 \cos^2 \beta - 2}{\cos^2 \beta} (\sin \theta + \sin 3\theta) - \tan \alpha (\cos \theta + 3 \cos 3\theta) \right] \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\theta - \tau_{\theta} \sin 2\theta \\ \sigma_y = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\theta + \tau_{\theta} \sin 2\theta \\ \tau_{xy} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\theta + \tau_{\theta} \cos 2\theta \end{cases} \quad (15)$$

式中: γ ——岩体容重(kN/m³); K ——锚固边坡设计安全系数, 对路堑边坡常取1.2~1.3; K_1 ——加锚前边坡的稳定系数, 由计算确定。

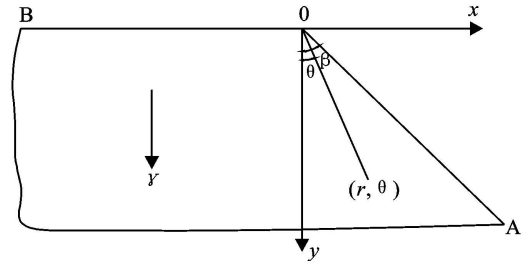


图4 边坡内部应力计算示意图

采用公式(13)可确定边坡的锚间距。由该公式可以看出, 边坡锚固时, 锚间距与加锚前边坡稳定系数、锚固边坡设计安全系数、边坡高度、边坡岩体物理力学参数、边坡岩体结构、锚力大小等因素有关。

4 算例分析

下面通过一算例对公式(15)的具体应用进行说明。渝黔高速公路上一等厚层状碎裂结构岩体路堑边坡, 坡高 $h = 40$ m, 坡顶自然坡度 25° , 岩层厚度 $a = 2.5$ m, 边坡岩体粘聚力 $C = 20$ kPa, 内摩擦角 $\varphi = 31^\circ$, 容重 $\gamma = 20$ kN/m³, 泊松比 $\mu = 0.25$, 要求边坡设计安全系数为 $K = 1.2$ 。

首先对该边坡进行稳定性计算, 采用理正边坡稳定计算程序, 接近似圆弧法计算得边坡稳定系数为 $K_1 = 0.903$, 计算得边坡中部的破裂面倾角约为 $\alpha = 35^\circ$ 。不能满足边坡设计安全系数要求, 需对边坡进行加固, 采用锚固措施对边坡进行加固。设计中采用预应力锚索, 锚设计荷载取600 kN, 锚倾角取 $\delta = 20^\circ$ 。则

$$\begin{aligned} P &= 600 \times \cos(\alpha + \delta) = 600 \times \cos(35 + 20) = 344 \text{ kN} \\ Q &= 600 \times \sin(\alpha + \delta) = 600 \times \sin(35 + 20) = 491 \text{ kN} \\ P \tan \varphi + Q &= 344 \times \tan 31 + 491 = 698 \text{ kN} \end{aligned}$$

由式(14)及式(15), 取具代表性的边坡中间部位, 即20 m高, 图4中 $\theta = 30^\circ$ 处, 计算得:

$$\begin{aligned} \sigma_y &= 385 \text{ kPa}; \sigma_x = 15 \text{ kPa}; \tau = 56 \text{ kPa}; \\ (P \tan \varphi + Q) / [2a \tau (K - K_1)] &= 8.397 \end{aligned}$$

将上述计算结果代入式(13)中, 求解方程可计算得 $\lambda = 1.334$, 故得锚间距 $b = 3.34$ m。

花菜模式的土壤有机质、全氮、速效钾含量较高,但速效磷、全钾含量较低,除速效磷外的指标均具有表聚性。结合野外小区径流场观测数据,板栗+黄花菜模式的水土保持功能在人工植被恢复模式中稍显优势。与撂荒地(对照)模式相比,它的地表径流削减率为30%左右,土壤侵蚀削减率约为67%,以其为代表的经济林+植物篱模式的水土保持功能比起天然林模式还有一定差距。

4 讨论

(1) 由于自然降雨复杂多变,难以进行全过程观测,通过野外径流场试验收集的相关数据具有很大的局限性,本试验中由于人力、时间等条件的限制,将一定观测期内各植被恢复模式各次观测的径流、泥沙进行累加作为一个观测数据,以撂荒地作对照进行地表径流、土壤侵蚀削减率分析比较,偏颇之处在所难免。

(2) 具体来讲水土流失应包含土壤侵蚀、径流流失和养分流失3部分,但由于野外试验条件的限制,本试验中并未涉及养分流失方面的特征分析,希望在以后不断改进试验条件的同时更多地涉足其中,使试验数据更具说服力与实用性。

(3) 以板栗+黄花菜模式为代表的经济林+植物篱模式的水土保持功能比起天然林模式还有一定差距,考虑到研究区域天然林面积日益减少及当地经济

社会发展等因素,此种植被恢复模式在研究区域有一定的发展前景。但是本研究主要从各植被恢复模式的水土保持功能,即水土保持基础效益入手,若要涉及经济、生态、社会各方面的效益,还要具体考察其市场行情,才能确定适宜当地的最佳模式,走优质高效之路,实现效益最大化,才能确保选定模式的区域推广性。

参考文献:

- [1] 袁爱萍. 美国人工降雨模拟设备的引进与应用[J]. 北京水利, 2004(6): 36-37.
- [2] 郑粉莉, 唐克丽, 白红英. 标准小区和大型坡面径流场径流泥沙监测方法分析[J]. 人民黄河, 1994(7): 19-22.
- [3] 路炳军, 袁爱萍, 张超. 坡地径流场监测数据质量控制[J]. 北京水务, 2009, 2(增刊): 55-57.
- [4] 张玉洪, 张克映, 马友金, 等. 西双版纳热带森林地表径流场设计的研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(6): 56-60.
- [5] 中华人民共和国水利部. 水土保持监测设施通用技术条件(SL342-2006) [S]. 2006.
- [6] 何丙辉, 赵晓莅, 齐代华. 生态恢复过程中水土保持林乔木层多样性研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2008, 28(4): 113-117.
- [7] 高贤明, 马克平, 陈灵芝. 暖温带若干落叶阔叶林群落物种多样性及其与群落动态的关系[J]. 植物生态学报, 2001, 25(3): 283-290.

(上接第47页)

5 结语

长久以来,路堑边坡锚间距的确定一直是探讨的热点和重点,本文采用断裂力学理论,通过引入一些简化假设后对此进行了探讨,并通过算例分析获得了一等厚层状碎裂结构岩体路堑边坡的锚固合理间距,为工程实际提供了有益参考。文中简化假设的合理性,以及所得结果的可靠性和普遍性,尚需更广泛的论证。

参考文献:

- [1] 汪树玉, 刘国华, 江辉, 等. 高边坡工程中预应力锚索间距与开挖顺序的优化[J]. 水利学报, 1997, 28(5): 54-59.
- [2] 亢景付, 胡玉明. 圆筒形预应力结构锚索间距的确定方法[J]. 工程力学, 2003, 20(5): 124-123, 133.
- [3] WU Shunchuan, ZHANG Youpa, GAO Yongtao. Study on range interval distance of prestressed anchor bars using update backpropagation neural network [J]. Journal of Coal Science & Engineering, 2003, 9(2): 35-39.
- [4] 吕庆, 孙红月, 尚岳全, 等. 预应力锚索框格梁体系加固

破碎岩质边坡合理间距研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(1): 136-140.

- [5] 韩雪. 露天矿边坡稳态监控锚索应力场及设置间距分析[J]. 中国矿业, 2009, 18(5): 77-80.
- [6] 袁培进, 吴铭江, 陆遐龄, 等. 长江三峡永久船闸高边坡预应力锚索监测[J]. 岩土力学, 2003, 24(增1): 198-201.
- [7] 张发明, 刘宁, 赵维炳. 岩质边坡预应力锚固的力学行为及群锚效应[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(增刊): 1077-1080.
- [8] 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.
- [9] 谷德振. 岩体工程地质力学基础[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [10] 孙广忠. 岩体结构力学[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [11] 王成, 张录坤. 有限宽板裂纹在裂纹面受两对反平面集中力时裂纹线场的弹塑性分析[J]. 应用数学和力学, 1998, 19(6): 513-520.
- [12] 唐树名. 碎裂结构岩体路堑边坡锚固机理及其应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2003.
- [13] 高家美, 顿志林. 楔形体应力理论及其在工程中的应用[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2000.