

拉力分散型锚索在边坡二次加固中的应用

丁瑜^{1,2,3}, 乔建平², 王全才²

(1. 三峡大学 三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 100049;

2. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要: 一些边坡治理后由于工程加载、雨水入渗以及地震等影响, 局部会出现新的变形破坏, 需要根据边坡和治理工程结构的变形情况进行二次加固(补强加固)。以拉力分散型锚索为例, 首先分析其结构特征及优越性。考虑松散地层的软化特性, 借助剪滞理论分析模型给出拉力分散型锚索锚固段上灌浆体与锚固岩层界面剪应力的计算公式, 在此基础上, 对一公路边坡二次加固中采用的拉力分散锚索锚固段荷载分布进行了分析和讨论。实例分析和监测结果表明, 拉力分散型锚索锚固段荷载分布更为合理, 有助于维护锚固体系的预应力水平。拉力分散型锚索用于边坡二次加固具有广泛的应用前景。

关键词: 公路边坡; 界面剪应力; 拉力分散型锚索; 二次加固

中图分类号: U417

文献标识码: A

边坡加固工程是提高边坡整体稳定的重要措施之一。但一些边坡加固后, 由于环境条件恶化, 在工程加载、雨水入渗以及地震等因素下, 边坡局部会出现新的变形破坏, 支挡结构变形甚至失效, 如挡墙开裂、滑坡; 抗滑桩变形、倒塌; 锚杆框架变形、下错等^[1-3]。

对治理后出现危险的边坡, 需要根据边坡和治理工程结构的变形情况进行二次加固(补强加固)。受前期主体工程布局的影响, 二次加固可供利用的空间有限, 而且不宜产生较大的施工扰动。因此, 受力合理、锚固性能良好、施工破坏小、适应地形条件较强的锚固技术是边坡坡体和原有治理工程结构二次加固的上佳选择^[3-4]。

本文以拉力分散型锚索为例, 从分析其结构特征及优越性出发, 基于剪滞理论和岩层软化特性, 对一公路边坡二次加固中采用的拉力分散锚索锚固段荷载分布进行了分析, 并根据监测结果对其加固效果进行了讨论。分析结果表明, 拉力分散锚索用于二次加固边坡合理可行, 其加固效果比较好, 对类似

边坡加固有一定的理论和工程借鉴意义。

1 拉力分散型锚索结构特征与优越性

预应力锚索类型较多, 从锚固段受力状态可分为拉力型、压力型及荷载分散型等类型。传统的荷载集中型(拉力型、压力型)锚索在锚固端头部位应力集中很严重, 极易导致注浆体开裂而使预应力损失^[5], 不能充分发挥整个锚固段岩土体自身的力学性能, 进而影响锚索的加固效果。为了避免锚固体系的渐进破坏, 改善锚固段荷载受力, 荷载分散型锚索作为一种新型的、受力更为合理的锚固形式在工程中得到日益广泛的应用。

拉力分散型锚索是荷载分散型锚索的一种, 其结构形式如图 1 所示。拉力分散型锚索的锚索体采用无粘接钢绞线, 通过将处于内锚固段中不同长度的无粘接钢绞线末端剥除一定长度(2~3 m)的聚乙烯(PE)套管, 使其变为有粘接段, 注浆后即形成单元锚固段。锚索安装后, 总荷载被分散施加到不

收稿日期(Received date): 2010-09-11; **改回日期**(Accepted): 2011-03-01。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金青年科学基金项目(41002100)。[Supported by National Science Fund for Distinguished Young Scholars (No. 41002100).]

作者简介(Biography): 丁瑜(1980-), 男, 博士, 研究方向: 滑坡机理及边坡加固机理研究。[Ding Yu (1980-), male, PH. D., research direction: landslide mechanism and slope reinforcement.] E-mail: thirding@163.com

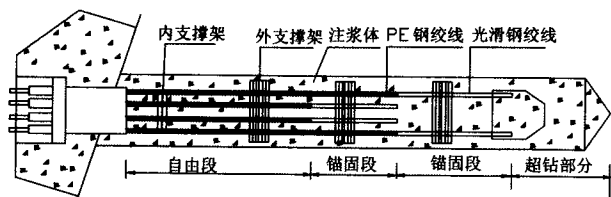


图1 拉力分散型锚索结构示意图

Fig. 1 Sketch figure of dispersion-type tensile anchor structure

同的单元锚固段上,钢绞线与浆体的粘接力传递给被加固地层,从而提供锚固力。拉力分散型锚索采用全长一次注浆,张拉时受拉注浆体没有自由面,没有注浆体开裂的空间,因此,其加固效果更优越:

1. 拉力分散型锚索可以及时主动地提供锚固力,对坡体的异常变形起到积极的抑制作用。

2. 拉力分散型锚索大大减小了传统锚索注浆体与孔壁间的应力集中,通过设置不同深度的锚固段,尽可能有效地发挥了岩层的自承能力。

3. 在松散岩层锚固中,单元锚固段受力更均匀,避免锚固体系沿注浆体与锚固岩层之间产生破坏,同时使注浆体与孔壁之间接触面积增大,减少了锚固段设计长度。

4. 由于没有承压板和挤压套,从结构和施工条件看比压力分散型锚索更简单,施工更快速便捷,特别便于在危险时期或特殊工期要求时及时施工,而其成本也大大降低。

边坡二次加固中,分散型锚索可以单点布置,也可以布置在抗滑桩、挡墙以及护坡框架上,起到加固补强和提高边坡稳定的目的。

2 拉力分散型锚索锚固段荷载传递

由于锚索、锚杆体系与剪滞模型相似,因此,本文将剪滞理论用于分析拉力分散型锚索锚固段荷载传递。剪滞理论由Cox于1952年首次提出的,是复合材料领域弹塑性系统应力应变分析的一种有效手段,Hobbs后来将剪滞模型引入到地学领域,开创了剪滞理论在岩土工程中的应用^[6-7]。文献[7]基于修正的剪滞理论给出了锚杆分析模型,文献[8]考虑到灌浆材料及岩体的损伤特性给出了修正的剪滞模型,对预应力锚索作用机理进行了研究。

应变软化特性是岩土体重要的性质之一,特别是松散的岩土体应变软化现象非常明显。因此,在松散地层锚固中,有必要考虑土层的软化效应。拉力分散型锚索锚固段荷载传递的分析模型很少,为

此,笔者考虑到锚固地层的应变软化特性给出拉力分散锚索的修正剪滞模型。

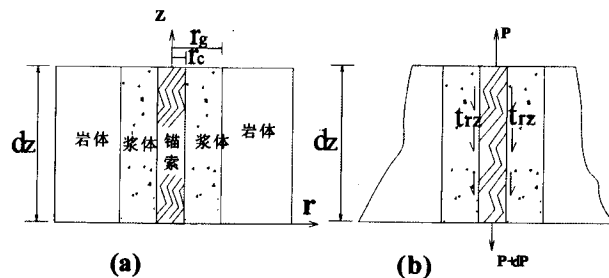


图2 预应力锚索分析模型示意图

Fig. 2 Sketch figure of pre-stressed anchor analytical model

如图2(a),锚索半径为 r_c ,锚索钻孔半径为 r_g ,微元体厚度为 dz 。根据剪滞理论,锚索中只有轴向正应力,而锚固地层中主要以剪切变形为主,图2(b)所示的微元体轴向的平衡关系

$$\frac{dp}{dz} + 2\pi r \tau_r = 0 \quad (1)$$

锚索灌浆界面粘结完好,不发生滑移,某一位置剪应力 τ_r 满足

$$\tau_r r = \tau_c r_c \quad (2)$$

式中 r 为未知点的径向坐标; τ_c 为锚索上的剪应力。根据胡克定律,锚固地层中剪应力

$$\tau_r = G_m \frac{\partial u_r}{\partial r} \quad (3)$$

式中 G_m 为锚固地层剪切模量; u_r 为 (r, z) 点处锚固地层的剪切位移。作用在锚索上的拉力 P

$$P = \pi r_c^2 \sigma_c = \pi r_c^2 E_c \frac{du_c}{dz} \quad (4)$$

式中 σ_c 为锚索上的轴向正应力; E_c 为锚索变形模量; u_c 为锚索的轴向位移。由(1)~(4)得

$$\frac{\partial^2 u_c}{\partial z^2} + \frac{2G_m r}{r_c^2 E_c} \frac{\partial u_r}{\partial r} = 0 \quad (5)$$

锚固段的破坏发生在锚索与浆体界面、浆体以及浆体与锚固岩层界面最弱的部位^[4]。浆体质量可以通过提高灌浆工艺和施工水平来保证,锚索注浆后,认为锚固段浆体与锚索粘结完好,因而在软弱岩层锚固中破坏一般发生在浆体与锚固岩层界面。因此,可以假设锚索位移与浆体位移相等,根据相应边界条件得到位移和剪应力^[9]

$$u_r = \alpha \left(\cosh \frac{\beta z}{r_c} - \tanh \frac{\beta z}{r_c} \sinh \frac{\beta z}{r_c} \right) \ln \frac{R}{r} \quad (6)$$

$$u_r = \frac{\beta P}{2\pi r_c^2 \tanh \frac{\beta L}{r_c}} \frac{r_c}{r} \left(\cosh \frac{\beta z}{r_c} - \tanh \frac{\beta z}{r_c} \sinh \frac{\beta z}{r_c} \right) \quad (7)$$

其中, P 为施加在锚索上的预应力, R 为锚索影响半径, 取 $R = 2.5(1 - \mu)L$; L 为锚固短长度; $\alpha = \frac{-\beta P}{2\pi r_c G_m \tanh(\beta L/r_c)}$; $\beta = \sqrt{\frac{2G_m}{E_c \ln(R/r_c)}}$ 。由此, 可得到灌浆体与锚固底层界面上的剪应力。

剪切作用下, 当锚索预应力引起的剪力超过其峰值剪应力 τ_0 后, 在锚固段 L 上的某一部位 L' 以上 ($0 \sim L'$) 段土体变形超过弹性变形极限 u_0 , 土体出现软化。在 $L' \sim L$ 段可认为土体处于弹性状态, 假设在 $z = L'$, $\tau_{rz} \big|_{z=L'} = \tau_0$ 。可以得到

$$\tau_{rz} = \frac{\tau_0}{A} (\cosh(\beta z/r_c) - \tanh(\beta L/r_c) \sinh(\beta z/r_c)) \quad (L' \leq z \leq L) \quad (8)$$

$A = \cosh(\beta L'/r_c) - \tanh(\beta L/r_c) \sinh(\beta L'/r_c)$ 。土体发生应变软化时, 假设其应力位移曲线如图 3, 当剪应力达到峰值剪切强度后, 按线性软化, 于是

$$\begin{aligned} \tau_{rz} \big|_{r=r_g} &= \tau_0 - G'_m (\gamma_{rz} - \gamma_0) \\ &= \tau_0 \left(1 + \frac{G'_m}{G_m}\right) - G'_m \frac{\partial u_{rz}}{\partial r} \quad (0 \leq z \leq L') \end{aligned} \quad (9)$$

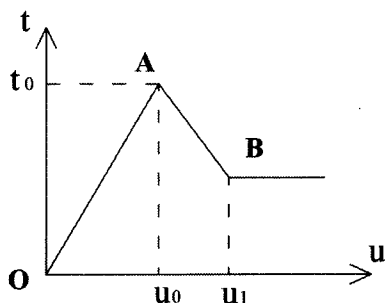


图3 应变软化剪应力-位移曲线

Fig. 3 Shear strength-displacement curve of strain softening

其中, τ_0 为锚固地层的峰值剪切强度; G'_m 为线性软化斜率。由 (1) ~ (3) 和 (9) 式得到

$$\frac{\partial^2 u_c}{\partial z^2} + \frac{2\tau_0 r}{r_c^2 E_c} \left(1 + \frac{G'_m}{G_m} - \frac{G'_m}{\tau_0} \frac{\partial u_{rz}}{\partial r}\right) = 0 \quad (11)$$

$$r_{rz} = (\zeta_1 \cosh \frac{\beta' z}{r_c} + \zeta_2 \sinh \frac{\beta' z}{r_c}) \ln \frac{R}{r} - \left(\frac{\tau_0}{G_m} + \frac{\tau_0}{G'_m}\right) r + C \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \tau_{rz} \big|_{r=r_g} &= \frac{r_c}{r_g} 2\tau_0 \left(1 + \frac{G'_m}{G_m}\right) + \frac{r_c G'_m}{r_g} \left(\zeta_1 \cosh \frac{\beta' z}{r_c} + \right. \\ &\quad \left. \zeta_2 \sinh \frac{\beta' z}{r_c}\right) \quad (0 \leq z \leq L') \end{aligned} \quad (13)$$

其中, $\beta' = \sqrt{\frac{2G'_m}{E_c \ln(R/r_c)}}$;

$$\begin{aligned} \zeta_1 &= \frac{\tau_0 r_g - 2\tau_0 r_c \left(1 + \frac{G'_m}{G_m}\right)}{G'_m r_c \cosh(\beta' L'/r_c)} - \frac{P \tanh(\beta' L/r_c)}{\beta' 2\pi r_c^2 E_c \ln(R/r_c)}; \\ \zeta_2 &= \frac{P}{\beta' 2\pi r_c^2 E_c \ln(R/r_c)}. \end{aligned}$$

3 实例分析

图 4 为某公路边坡加固示意图, 1 区为边坡二次加固区, 初期采用抗滑桩和锚杆框架梁联合支撑加固, 工程实施后, 由于连续降雨该区坡体产生变形破坏, 抗滑桩向公路偏移。在此期间, 紧邻的 2 区边坡也发生破坏, 形成较陡的临空面。为此, 边坡新的加固补强措施为: 在 1 区锚杆框架的间隙设置两排拉力分散型锚索锚墩; 在 2 区下部公路内侧设置抗滑桩, 上部采用预应力锚索框架护坡。

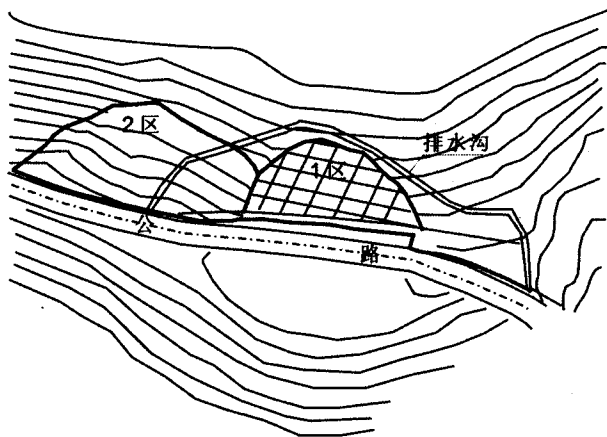


图4 边坡加固区示意图

Fig. 4 Sketch of reinforced region of slope

二次加固中采用拉力分散型锚索, 锚索采用高强、低松弛的预应力钢绞线 (其极限抗拉强度不低于 1 860 MPa) 制成, 锚索钻孔直径为 140 mm, 单孔锚索设计荷载 750 kN。该拉力分散型锚索由 3 单元锚索组成, 单元锚索锚固长度为 2.0 m。预应力钢绞线弹性模量为 1.95×10^5 MPa, 泊松比为 0.16, 被加固岩层变形模量取 1.5×10^4 MPa, 泊松比为 0.28。锚固地层的峰值剪应力 τ_0 取 1.5 MPa。

在分析拉力分散型锚索时, 假设各单元锚索锚固段粘结完好, 不考虑单元锚固段之间的相互作用, 总的锚固段长度由各单元锚固段组成。首先, 按式 (7) 计算单元锚固段上的界面剪应力, 根据计算结果确定应变软化段范围, 软化段范围的剪应力按

(13)式计算,而处于弹性状态部分的剪应力按(8)式计算;然后,对各单元叠加得到整个锚固段的界面剪应力。

图5为不考虑应变软化条件下灌浆体与锚固岩层界面的剪应力沿锚固段的分布曲线。该曲线表明界面剪应力沿锚固段分布是不均匀的,在锚固段前端出现应力集中,最大剪应力出现在各单元锚固段口部,峰值剪应力达到3.08 MPa,在单元锚固段上,剪应力沿锚固段逐渐减小,在各单元锚固段1.1 m以后剪应力已经很小(小于峰值剪应力的5%),这与试验结果所得出的分布模式是基本一致。

由于图4所示边坡锚固地层为碎石层,当锚索在界面引起的剪应力超过峰值剪切强度 τ_0 时,易出现应变软化。软化段地层按线性软化,得到的计算结果(图6)更为接近实际情况。计算结果表明软化段的界面剪应力在单元锚固段口部为0.9 MPa,之后增加,但剪应力值不会超过 τ_0 ;在0.15 m之后剪应力逐渐减小,在1.3 m以后界面剪应力已小于峰值剪应力的5%。

根据分析结果,与荷载集中性锚索相比,拉力分散型锚索极大的改善集中型锚索的应力集中现象,大大避免了锚索的应力腐蚀和锚固岩层的局部变形,

使其预应力水平得到更好地维持。因此,拉力分散型锚索无疑是一种更为合理锚固结构形式。

4 锚固效果

预应力锚固的锚固效果受众多因素的影响,其中锚固岩层自身的物理力学性质是至关重要的。1区、2区均为碎石土,其变形模量、内摩擦角、内聚力参数如表1所示。可见,两区内岩层强度变形性质存在差异。其中,由于1区前期经过治理,锚杆框架作用下坡体强度参数得以提高,同时坡体的变形模量增加。

表 1 1 区、2 区地层力学参数

Table 1 Parameters of E,C, φ in region 1 and region 2

区别	变形模量 E /MPa	内摩擦角 φ /°	内聚力 C /kPa
1 区	16 200	32	110
2 区	14 800	27	60

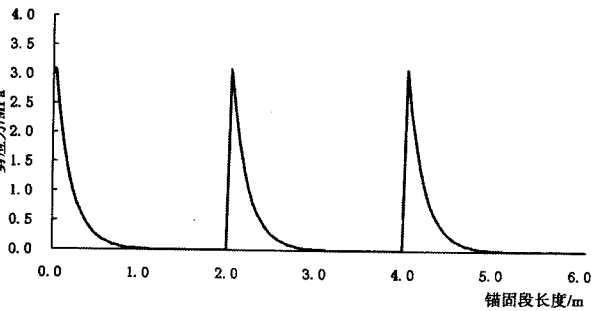


图 5 不考虑应变软化的灌浆体与锚固地层界面剪应力
Fig.5 Interfacial shear strength between grout and anchored stratum without strain softening

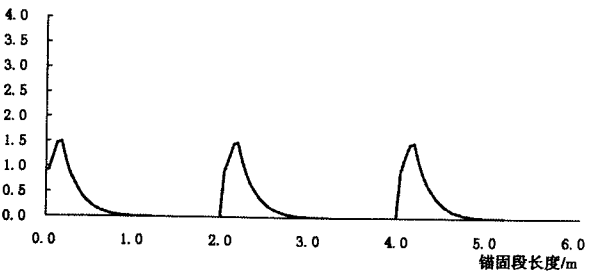


图 6 软化条件下灌浆体与锚固地层界面剪应力
Fig.6 Interfacial shear strength between grout and anchored stratum under strain softening

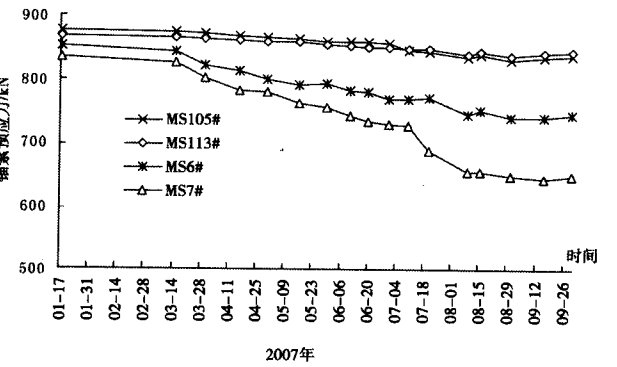


图 7 锚索预应力损失
Fig.7 Prestress loss of anchor cables

锚索的预应力水平可以直观地反映了锚索的锚固效果。图7给出了4个监测锚索的预应力损失结果,其中MS105#、MS113#监测锚索位于1区,而MS6#、MS7#监测锚索位于2区,监测锚索设计荷载750 kN,按20%超张拉锁定。由监测结果可知,张拉锁定后,1区的两个监测锚索预应力损失量分别为62.70 kN、57.21 kN,预应力损失率分别为6.97%、6.36%,其预应力值远高于设计值,维持在较好的水平。而位于2区的MS6#、MS7#监测锚索的预应力损失比较明显,损失量分别为157.05 kN、252.06 kN,其预应力损失率分别达到17.45%和28.01%。锚索预应力损失在前期十分明显,后期逐

步稳定。

上述分析表明:一方面,拉力分散型锚索因其受力更为合理,可以使加固体系的设计荷载得到较好的保证和维持,进而提高锚固效果;另一方面,锚固体系的锚索效果还与地层力学性能有关,锚固岩层的变形越大,锚固体系变形和预应力损失也越大^[10]。尽管1区、2区地层岩性相同,但新变形区2区坡体松散,锚索实施后存在局部的明显变形,MS6#、MS7#监测锚索的预应力损失要多一些。可见,经过初期治理后的二次加固区,拉力分散型锚索的锚固效果更为显著。

5 结论

拉力分散型锚索将荷载分散到不同深度的锚固单元上,避免了荷载过大可能引起的破坏,有效地利用了岩层的自承能力,是一种比较合理的工程加固形式。通过分析,得到以下结论:

1. 预应力锚索作为加固工程结构具有诸多独特优势,由于荷载集中型锚索应力集中比较严重,荷载分散型锚索将是更为合理的预应力锚固结构。

2. 从手里拉力分散型锚索灌浆体与锚固岩层界面剪应力沿锚固段呈非均匀分布,其特征为锚固段口部峰值应力出现峰值,随着深度增加界面剪应力逐渐减小。考虑到锚索引起的剪应力可能引起土体软化,界面剪应力在单元锚固段口部为0.9 MPa,之后增加,并在0.15 m达到最大,最大剪应力值不会超过 τ_0 ,之后剪应力逐渐减小,1.3 m以后小于峰值剪应力的5%。

3. 边坡经过初期治理后坡体物理力学性能相对有所提高,更有利于维持分散型锚索的锚固能力。因此,拉力分散型锚索用于松散边坡二次加固效果明显,具有广泛的应用前景。

4. 目前,有关拉力分散型锚索模拟试验和现场试验的相关成果较少,对拉力分散型锚索的研究有待加强。

参考文献 (References)

- [1] Wang Huaqing, Liao Zhenghuan. The prestressed anchor ropes for retrofitting damaged highway structures [J]. China Journal of Highway and Transport, 1991, 4(3): 24-31 [王化卿, 廖正环. 用预应力锚索整治公路人工构造物病害[J]. 中国公路学报, 1991, 4(3): 24-31]
- [2] Shen Na, Xie Fei. Analysis on the reasons caused the collapse of anti-slide piles in the west approach road of Zhegushan tunnel and treatment scheme [J]. Shanxi Architecture, 2008, 34(6): 310-312 [沈娜, 颀飞. 鹳沟山隧道西引道抗滑桩倒塌成因分析与治理[J]. 山西建筑, 2008, 34(6): 310-312]
- [3] Ji Suiwang, Tang Yongjian, Hu Degui, et al. Analysis of typical seismic damages of highways in Wenchuan Earthquake-induced hazard areas in Sichuan Province [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(6): 1250-1260 [吉随旺, 唐永建, 胡德贵, 等. 四川省汶川地震灾区干线公路典型震害特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1250-1260]
- [4] Zhang Sifeng, Song Xiuguang, Zhou Jian, et al. Study on durability and secondary reinforcement technique of prestressed anchorage structures [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(2): 30-33, 39 [张思峰, 宋修广, 周健, 等. 预应力锚固结构耐久性及其二次加固技术研究[J]. 公路交通科技, 2008, 25(2): 30-33, 39]
- [5] Jiang Zhongxin. A gauss curve model on shear stress along anchoring section of anchoring rope of extensional force type [J]. Chinese Journal of Geomechanical Engineering, 2001, 23(6): 696-699 [蒋忠信. 拉力型锚索锚固段剪应力分布的高斯曲线模式[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(6): 696-699]
- [6] Mondher Zidi, Luc Carpentier, Antoine Chateauminois, et al. Quantitative analysis of the micro-indentation behaviour of pre-reinforced composites: development and validation of an analytical model [J]. Composites Science and Technology, 2000(6): 429-437
- [7] Yue Cai, Tetsuro Esaki, Yujing Jiang. A rock bolt and rock mass interaction model [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2004(41): 1055-1067
- [8] He Siming, Zhang Xiaogang, Wang Chenghua. Study on mechanism of prestressed anchoring cable based on modified shear lag model [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15): 2562-2567 [何思明, 张小刚, 王成华. 基于修正剪切滞模型的预应力锚索作用机理研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(15): 2562-2567]
- [9] Jia Purong, Jiao Guiqiong, Liu Da. Mechanical behavior of interface on fiber-reinforced toughness matrix [J]. Acta Mechanica Sinica, 2001, 22(4): 351-355 [贾普荣, 矫桂琼, 刘达. 纤维增强韧性基体界面力学行为[J]. 固体力学学报, 2001, 22(4): 351-355]
- [10] Jiang Zhongxin. Mechanism and practice on reinforcing loose bed landslide with prestressed anchoring rope [J]. Journal of Railway Engineering Society, 1999, 61(1): 72-77 [蒋忠信. 预应力锚索加固松散体滑坡的机理与实践[J]. 铁道工程学报, 1999, 61(1): 72-77]

Application of Dispersion-type Tensile Cable on Secondary Reinforcement in Slope Engineering

DING Yu^{1,2,3}, QIAO Jianping², WANG Quancai²

(1. Key Laboratory of MOE Geological Hazards in Three Gorges Reservoir Area, Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China;

2. Institute of Mountain Hazards & Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, Sichuan, China;

3. Graduated School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Affected by loads, water infiltration, earthquake and others factors, local failures will occur in some protected slopes. Secondary reinforcement thus needs to implement for these slopes according to the slope deformation and protective measures. In this paper, the dispersion-type tensile cable cited as the secondary reinforced measure. The structure and superiority of this pre-stressed cable are firstly addressed. Considering the stratum softening, calculated formula modified from Shear – Lag Model is presented to analyze the shear strength of grout/matrix interface along the anchored section. Load transfer of the dispersion-type tensile cable of the secondary reinforcement in a highway slope is then analyzed and discussed. The case analysis and monitoring results show that load distribution of the dispersion-type tensile cable is more reasonable, which contributes to maintaining the pre-stress capability of the anchorage system. It is expected that the dispersion-type tensile cable for slope second reinforcement has wide application prospects.

Key words: slope engineering; interfacial shear strength; dispersion-type tensile cable; secondary reinforcement

封面照片说明:喀斯特地貌

喀斯特(Karst)是地表水和地下水对可溶性岩石(如碳酸盐岩、石膏、岩盐等)进行以化学溶蚀作用为主,冲蚀、潜蚀及引起的坍塌等物理作用为辅的作用过程及其结果,又称为岩溶。由喀斯特作用所形成的地貌叫喀斯特地貌或岩溶地貌。

喀斯特原是欧洲亚得里亚海北端东海岸碳酸盐岩高原的地名,那里各种奇特的碳酸盐岩地貌十分发育。中国几乎各省(市、区)境内都有不同面积的碳酸盐岩(主要为石灰岩和白云岩)分布,因此中国的喀斯特地貌分布广泛。处于西南地区的贵州、云南、广西、重庆、四川等省(市、区)境内,碳酸盐岩出露区的面积约达 $125 \times 10^4 \text{ km}^2$;以亚热带湿润气候为主的气候条件,对喀斯特地貌的发育极为有利,形成了丰富多彩的喀斯特地貌景观,并成为了当地十分重要的旅游资源。照片为广西桂林最具特色的喀斯特地貌之一——峰林。

(嘉 益)

作者: 丁瑜, 乔建平, 王全才, DING Yu, QIAO Jianping, WANG Quancai

作者单位: 丁瑜, DING Yu (三峡大学三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北宜昌100049; 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川成都610041; 中国科学院研究生院, 北京100049), 乔建平, 王全才, QIAO Jianping, WANG Quancai (中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川成都, 610041)

刊名: 山地学报 

英文刊名: Journal of Mountain Science

年, 卷(期): 2011, 29(4)

参考文献(10条)

1. 王化卿; 廖正环 用预应力锚索整治公路人工构造物病害 1991(03)
2. 沈娜; 颜飞 鹫鸪山隧道西引道抗滑桩倒塌成因分析与治理[期刊论文]-山西建筑 2008(06)
3. 吉随旺; 唐永建; 胡德贵 四川省汶川地震灾区干线公路典型震害特征分析[期刊论文]-岩石力学与工程学报 2009(06)
4. 张思峰; 宋修广; 周健 预应力锚固结构耐久性及其二次加固技术研究[期刊论文]-公路交通科技 2008(02)
5. 蒋忠信 拉力型锚索锚固段剪应力分布的高斯曲线模式[期刊论文]-岩土工程学报 2001(06)
6. Mondher Zidi; Luc Carpentier; Antoine Chateauminois Quantitative analysis of the micro-indentation behaviour of pre-reinforced composites: development and validation of an analytical model 2000(06)
7. Yue Cai; Tetsuro Esaki; Yujing Jiang A rock bolt and rock mass interaction model[外文期刊] 2004(41)
8. 何思明; 张小刚; 王成华 基于修正剪滞模型的预应力锚索作用机理研究[期刊论文]-岩石力学与工程学报 2004(15)
9. 贾普荣; 矫桂琼; 刘达 纤维增强韧性基体界面力学行为[期刊论文]-固体力学学报 2001(04)
10. 蒋忠信 预应力锚索加固松散体滑坡的机理与实践[期刊论文]-铁道工程学报 1999(01)

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_sdx201104015.aspx