

文章编号: 1000-7598 (2010) 02-0599-05

拉力分散型锚索锚固段荷载传递机制

丁 瑜^{1,2}, 王全才¹, 何思明¹

(1.中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 2.中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要: 预应力锚索是岩土锚固最常用的结构形式之一, 使用的锚索类型越来越多。锚索锚固段的荷载传递是控制锚索性能和工程设计的关键, 应用剪滞理论分析了锚固段的受力和荷载传递机制, 并对拉力分散型锚索的锚固机制进行探讨。分析结果表明, 拉力分散型锚索锚固段剪应力在软化段逐渐增加至峰值剪应力, 随后减小, 其分布模式与现场试验结果比较一致。

关 键 词: 岩土锚固; 拉力分散型锚索; 界面剪应力; 传递机制

中图分类号: TU 472

文献标识码: A

Loading transfer mechanism of dispersion-type tensile cables along anchoring section

DING Yu^{1,2}, WANG Quan-cai¹, HE Si-ming¹

(1. Institute of Mountain Hazards & Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Prestressed cable is one of the common ground anchorage forms; and its types become more and more in use. The loading transfer along anchoring section is crucial for controlling cables performances and engineering design. Shear lag theory is applied to analyze loading and load transfer mechanism along anchoring section; and the anchorage mechanism of dispersion-type tensile anchor is discussed. The analytical results indicate that interfacial shear strength of dispersion-type tensile cable gradually increases to peak shear strength (τ_0), and then decreases. The analytical model accords with field test result perfectly.

Key words: ground anchorage; dispersion-type tensile cable; interfacial shear stress; transfer mechanism

1 引 言

边坡锚固是岩土工程中的一项重要内容, 预应力锚索因其主动加固、效果明显、施工方便、圬工量小、扰动破坏微弱等特点在边坡加固得到广泛应用。近年来, 随着机械化水平和施工工艺的提高, 预应力锚固中使用的锚索类型越来越多^[1-3], 按外锚头可将锚索划分 OVM 锚、QM 锚、XM 锚、弗氏锚等类型; 按锚索体种类则可分为钢绞线束锚索、高强钢丝束锚索、精轧螺纹钢束锚索等类型; 按锚固段受力状态又可将锚索分为荷载集中型(拉力型、压力型)、荷载分散型(拉力分散型、压力分散型)以及复合型(拉压分散复合型)。

拉力型锚索通过注浆体将锚固段固结在稳定地层中, 利用注浆体将锚索拉力传递给孔壁周围岩土体。拉力型锚索在锚固端头部位应力集中很严重,

极易导致锚索与灌浆体界面和灌浆体界面与锚固地层产生脱黏、开裂, 进而导致预应力损失, 严重影响锚索锚固效果。压力型锚索虽然通过承载体将荷载以压力型式传递给锚固体, 避免了注浆体的拉裂, 但其应力集中现象仍比较严重, 不能充分发挥整个锚固段岩土体自身的力学性能, 特别是对于松散土层锚固, 荷载集中型锚索难以确保锚固的可靠性。荷载分散型锚索将施加的预应力分散在不同的单元锚固段上, 使应力应变分散减小以确保锚固段的锚固效果。

2 分散型锚索结构形式及锚固机制

工程中最为常用分散型锚索主要有拉力分散型和压力分散型两种形式。压力分散型锚索采用无黏结钢绞线, 通过在不同长度的无黏结钢绞线末端套以承压板和挤压套, 灌浆后荷载通过承载体将压应

收稿日期: 2008-08-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 40572158)。

第一作者简介: 丁瑜, 男, 1980 年生, 博士研究生, 主要从事滑坡机制及滑坡治理工程协调性研究。E-mail: thirding@163.com

力通过浆体传递给被加固体, 从而对锚固地层起到锚固作用(如图 1(a))。拉力分散型锚索的锚索体均采用无黏结钢绞线, 通过将处于内锚固段中不同长度的无黏结钢绞线末端剥除一定长度(2~3 m)的聚乙烯(PE)套管, 使其变为有黏结段, 注浆后预应力通过钢绞线与浆体的黏结力传递给被加固体, 从而提供锚固力(如图 1(b))。

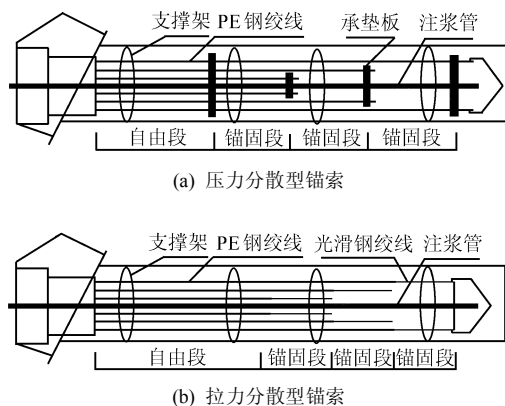


图 1 压力分散型锚索与拉力分散型锚索结构示意图
Fig.1 Sketch of dispersion-type compressive cable and dispersion-type tensile cable

预应力锚索锚固机制的是一个热点问题^[4-10]。许多学者对于荷载集中型锚索的锚固机制作了有益的理论研究, 文献[5]借助位变-剪应力关系得到锚索锚固段剪应力呈非均匀分布, 其分布曲线可用三参数的高斯曲线来描述。文献[6]将锚索作离散化处理, 基于 Mindlin 理论及应力叠加原理得到锚索段的侧阻力分布和变形特性。文献[7-8]根据室内模拟试验得到预应力锚索锚固段剪应力的分布规律。对于压力分散型锚索, 文献[9]根据锚固段受力状态, 导出了压力分散型锚索锚固段剪应力和轴力分布的理论解; 文献[10]采用 Winkler 假设对锚固段的受力和应力分布规律进行了探讨。

拉力分散型锚索的荷载主要依靠钢绞线与灌浆体的黏结力通过注浆体传递给岩土体, 锚固段的荷载传递是控制锚索性能和工程设计的关键。目前, 对拉力分散型锚索的锚固机制的研究在理论上还不够深入, 本文应用弹性理论和剪滞理论分析锚固段的受力和荷载传递机制, 对拉力分散型锚索的锚固机制进行探讨。

3 锚固段荷载传递机制分析

3.1 剪滞理论分析

锚固段荷载传递是研究锚固体系的关键, 已有不少学者对此进行大量的研究。但是, 拉力分散型

锚索锚固段荷载传递的分析模型很少, 由于岩土工程中锚固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。应变软化特性是岩土体的重要性质之一, 特别是松散的岩土体应变软化现象非常明显, 在松散地层锚固中, 有必要考虑土层的软化效应。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。

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^[11-12]。后来, Hobbs 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^[13-14]。何思明^[13]认为岩土工程中锚索、锚杆体系与剪滞模型相似, 将剪滞理论应用于预应力锚索作用机制研究, 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。文献[12]基于修正的剪滞理论给出了锚杆分析模型, 文献[14]根据剪滞理论分析了土工织物筋土界面的力学行为。

图 2 为预应力锚索分析模型示意图, 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, 在锚固力 P 的作用下, 锚固地层中任意位置的剪应力为 $\tau(r, z)$, 其平衡关系:

$$\frac{dP}{dz} + 2\pi r \tau(r, z) = 0 \quad (1)$$

式中: r 为未知点到 z 轴的距离。

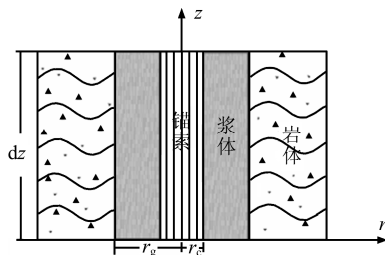


图 2 预应力锚索分析模型示意图
Fig.2 Analytical model of prestressed cable

假设界面不发生滑移, 地层中某一位置 (r, z) 处的剪应力满足:

$$\tau(r, z)r = \tau_c r_c \quad (2)$$

式中: τ_c 为锚索上的剪应力。

锚固地层中主要以剪切变形为主, 根据虎克定律:

$$\tau(r, z) = G_m \frac{\partial u(r, z)}{\partial r} \quad (3)$$

式中: $u(r, z)$ 为 (r, z) 处的位移; G_m 为剪切模量。

作用在锚索上的拉力 P 满足:

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

式中: σ_c 为锚索上的正应力; E_c 为锚索的弹性模量; u_c 为 P 作用下锚索的位移。

由式 (1) ~ (4), 得

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

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地层界面最弱的部位^[12]。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, 锚固段浆体与锚索黏结完好, 锚索与浆体界面不容易出现破坏, 在软弱地层锚固中破坏一般多发生在浆体与锚固地层界面。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^[15]:

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

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

式中: R 为锚索影响半径, 可取 $R = 2.5(1 - \mu)L$ ^[13];

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地层界面上的剪应力。

3.2 考虑软化时的剪应力分布

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 ($0 \sim L'$) 段岩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 $z = L'$, $\tau(r, z)|_{z=L'} = \tau_0$ 。可以得到:

$$\tau(r, z) = \frac{\tau_0}{A} \cosh \left(\frac{\beta z}{r_c} \right) - \tanh \left(\frac{\beta L'}{r_c} \right) \sinh \left(\frac{\beta z}{r_c} \right) \quad (8)$$

$$(L' \leq z \leq L)$$

式中: $A = \cosh \left(\frac{\beta L'}{r_c} \right) - \tanh \left(\frac{\beta L'}{r_c} \right) \sinh \left(\frac{\beta L'}{r_c} \right)$, 锚固地层发生应变软化时, 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:

$$\tau(r, z)|_{r=r_g} = \tau_0 - G'_m (\gamma - \gamma_0) = \tau_0 \left(1 + \frac{G'_m}{G_m} \right) - G'_m \frac{\partial u(r, z)}{\partial r}, \quad (0 \leq z < L') \quad (9)$$

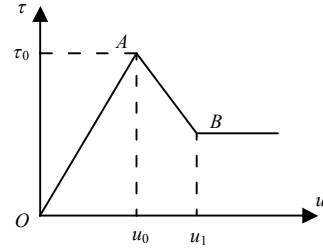


图3 应变软化模型示意图

Fig.3 Sketch of strain softening model

式中: τ_0 为锚固地层的峰值剪切强度; G'_m 为线性软化斜率; γ 锚固地层为的剪应变; γ_0 为锚固地层达到峰值剪应力时的剪应变。由式 (1) ~ (3) 和式 (9), 得

$$\frac{\partial^2 u_c}{\partial z^2} + \frac{2\tau_0 r}{r_c^2 E_c} \left(1 + \frac{G'_m}{G_m} - \frac{G_m}{\tau_0} \frac{\partial u(r, z)}{\partial r} \right) = 0 \quad (10)$$

$$u_{rz} = \left(\zeta_1 \cosh \frac{\beta' z}{r_c} + \zeta_2 \sinh \frac{\beta' z}{r_c} \right) \ln \frac{R}{r} - \left(\frac{\tau_0}{G_m} + \frac{\tau_0}{G'_m} \right) r + C \quad (11)$$

$$\tau(r, z)|_{r=r_g} = \frac{r_c}{r_g} 2\tau_0 \left(1 + \frac{G'_m}{G_m} \right) + \frac{r_c G'_m}{r_g} \left(\zeta_1 \cosh \frac{\beta' z}{r_c} + \zeta_2 \sinh \frac{\beta' z}{r_c} \right), \quad (0 \leq z < L') \quad (12)$$

$$\text{式中: } \zeta_1 = \frac{\tau_0 r_g - 2\tau_0 r_c \left(1 + \frac{G'_m}{G_m} \right)}{G'_m r_c \cosh(\beta' L'/r_c)} - \frac{P \tanh(\beta' L'/r_c)}{\beta' 2\pi r_c^2 E_c \ln(R/r_c)};$$

$$\zeta_2 = \frac{P}{\beta' \pi r_c^2 E_c \ln(R/r_c)}; \quad \beta' = \sqrt{\frac{2G'_m}{E_c \ln(R/r_c)}}.$$

3.3 拉力分散型锚索界面剪应力求解

(1) 假设各单元锚索锚固段黏结完好, 不考虑单元锚固段之间的相互作用, 各单元锚索为独立受分散荷载作用的承载体, 总的锚固段长度由各单元锚固段组成;

(2) 对单元锚固段进行分析, 利用式 (7) 计算各单元锚索锚固段上的灌浆体与锚固地层界面上的剪应力;

(3) 根据计算结果确定沿单元锚固段锚固地层发生应变软化的范围, 对于应变软化段范围的剪应力按式 (12) 计算, 处于弹性状态部分的剪应力按式 (8) 计算, 由此得到发生应变软化时单元锚索的剪应力分布;

(4) 将各单元锚索沿锚固段范围进行叠加, 从而确定拉力分散型锚索界面剪应力的分布。

4 实例分析

某公路改建后随着环境条件的变化出现滑坡,采用拉力分散型锚索进行加固。锚索为高强、低松驰的预应力钢绞线(其极限抗拉强度不小于 1 860 MPa),预应力钢绞线弹性模量为 $E_c=195$ GPa,泊松比为 0.16。每孔分散锚索锚固段 6.0 m,由 3 单元锚索组成,单元锚索锚固长度为 2.0 m。锚索设计预应力值为 750 kN,锚索钻孔直径为 141 mm,采用水泥砂浆浇注。根据现场测试和室内试验,被加固碎石土层弹性模量为 15 GPa,泊松比为 0.25。图 4 为采用本文的方法得到的不考虑应变软化和考虑应变软化时的计算结果。

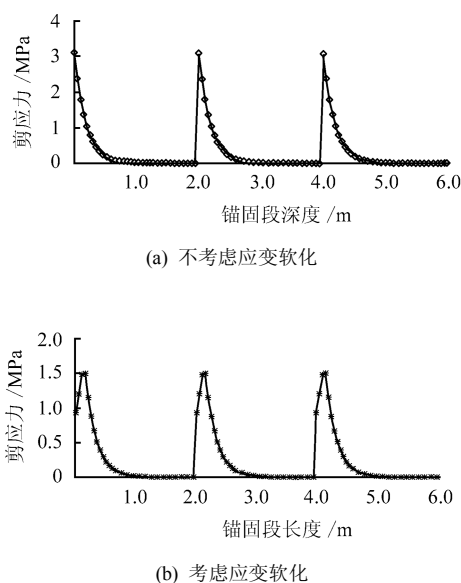


图 4 拉力分散锚索锚固段灌浆体与锚固地层界面剪应力
Fig.4 Interfacial shear strength between grout and anchored stratum considering/without considering strain softening

图 4(a)为不考虑锚固地层发生应变软化,利用剪滞理论计算得到的锚固段灌浆体与锚固地层界面的剪应力。计算结果显示,拉力分散型锚索锚固段的剪应力分布是不均匀的,但是拉力分散型锚索将荷载分散到不同的单元锚固段上,大大减小了应力集中现象。在单元锚固段口部,界面剪应力值最大,随后剪应力迅速减小,在单元锚固段上 1.1 m 以后界面剪应力已经小于峰值剪应力的 2%。

图 4(a)表明,靠近锚索口部界面剪应力值比较大,在松散地层边坡锚固中,往往引起岩土体出现剪胀和应变软化现象。

为了更合理地揭示锚索的荷载传递机制,有必

要考虑锚固段地层发生应变软化时灌浆体与锚固土层界面的剪应力分布。锚固段地层峰值剪应力 τ_0 为 1.5 MPa。根据图 4(a)可知,在单元锚固段口部 0.15 m 以上范围的土体均会出现应变软化。

图 4(b)为考虑应变软化拉力分散锚索锚固段灌浆体与锚固地层界面剪应力。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。根据现场试验结果,预应力锚索锚固段最大剪应力出现在口部附近^[8],因此,本文考虑锚固段地层软化效应得到的拉力分散型锚索剪应力分布规律与实际接近,具有一定的合理性。

5 结论

岩土锚固中应用的新型预应力锚索结构越来越多,拉力分散型锚索就是其中之一。假设锚索锚固段黏结良好,不考虑单元锚索相互影响,本文应用剪滞理论对锚固段剪应力传递模式进行了分析,结合实例给出了不考虑锚固地层软化和出现软化条件下的界面剪应力分布,得到以下结论:

(1) 拉力集中型锚索锚固段口部附近的峰值应力数倍于拉力分散型锚索,应力集中严重往往影响锚索的锚固效果和长期稳定性。拉力分散型预应力锚索具有诸多优势,是一种更为合理的预应力锚固结构。

(2) 无论是拉力集中型锚索还是拉力分散型锚索,剪应力沿锚固段都呈非均匀分布。在锚固段口部很小范围内,沿锚固长度方向剪应力迅速达到峰值,随后减小,锚固段上 1.1 m (拉力分散型锚索的单元锚索段)以后剪应力值已经很小,小于峰值剪应力的 2%。

(3) 松散地层锚固,由于灌浆体与锚固地层界面剪应力很高,往往引起土体发生剪胀和应变软化,界面剪应力超过 τ_0 的部分考虑软化更为合理。计算结果表明,锚固段上软化范围的剪应力逐渐增加,但不会超过峰值剪应力 τ_0 ,之后逐渐减小。

(4) 拉力分散型锚索单元锚固段最大剪应力出现在其口部附近,拉力分散型锚索单元锚固段上的剪应力分布与文献[8]的现场试验结果比较一致,表明本文方法比较合理。

参考文献

- [1] 刘玉堂,翟金明. 常用预应力锚索的结构和特点[J]. 预应力技术, 2005, 25(5): 32—37.

- [2] 田裕甲, 吕兵, 黄家齐, 等. 新型锚索结构系及工程应用[J]. OVM 通讯, 2000, 18(1): 23—29.
- [3] 田裕甲, 吕兵, 黄家齐, 等. 新型锚索结构系及工程应用[J]. OVM 通讯, 2000, 19(2): 27—33.
- [4] 何思明, 王成华, 吴文华. 基于损伤理论的预应力锚索荷载—变形特性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(5): 786—792.
- HE Si-ming, WANG Cheng-hua, WU Wen-hua. Analysis of loading-deformation of prestressed cable based on damage theory[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(5): 786—792.
- [5] 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.
- JIANG Zhong-xin. 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.
- [6] 何思明, 张小刚, 王成华. 预应力锚索的非线性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(9): 1535—1541.
- HE Si-ming, ZHANG Xiao-gang, WANG Cheng-hua. Nonlinear analysis of prestressed cable[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(9): 1535—1541.
- [7] 刘致彬, 孙志恒, 孙金刚. 岩锚新的锚固方式及锚固体系的研究[J]. 水力发电, 1997: 48—52.
- [8] 顾金才, 明治清, 沈俊, 等. 预应力锚索内锚固段受力特点现场试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(增刊): 788—792.
- [9] 尤春安. 压力型锚索锚固段的受力分析[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(6): 828—831.
- YOU Chun-an. Mechanical analysis of anchorage segment of pressure-type cable[J]. **Chinese Journal of Geomechanical Engineering**, 2004, 26(6): 828—831.
- [10] 曹兴松, 周德培. 压力分散型锚索锚固段的设计方法[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(9): 1033—1039.
- CAO Xing-song, ZHOU De-pei. Design method of fixed anchor unit for compression dispersion-type anchor[J]. **Chinese Journal of Geomechanical Engineering**, 2005, 27(9): 1033—1039.
- [11] ZIDI M, CARPENTIER L, CHATEAUMINOIS A, et al. Quantitative analysis of the micro-indentation behaviour of fibre-reinforced composites: development and validation of an analytical model[J]. **Composites Science and Technology**, 2000, (6): 429—437.
- [12] CAI Y, ESAKI T, JIANG Y J. A rock bolt and rock mass interaction model[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2004, (41): 1055—1067.
- [13] 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制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(15): 2562—2567.
- HE Si-ming, ZHANG Xiao-gang, WANG Cheng-hua. 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.
- [14] 张鹏, 王建华, 陈锦剑. 土工织物拉拔试验中筋土界面力学特性[J]. 上海交通大学学报, 2004, 38(6): 999—1002.
- ZHANG Peng, WANG Jian-hua, CHEN Jin-jian. Mechanical behavior of the interface between reinforcement and soil in pull-out tests on geotextiles [J]. **Journal of Shanghai Jiaotong University**, 2004, 38(6): 999—1002.
- [15] 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.
- JIA Pu-rong, JIAO Gui-qiong, LIU Da. Mechanical behavior of interface on fiber-reinforced toughness matrix[J]. **Acta Mechanica Solida Sinica**, 2001, 22(4): 351—355.