

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.1904

拉压分散型锚索锚固机制及工程应用研究

吴曙光^{1,2}, 付红梅¹, 张岩岩¹

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室(重庆大学), 重庆 400045)

摘 要: 近年来, 结合拉力型、压力型以及荷载分散型锚索特点于一体的拉压分散型锚索在工程中有一定的应用, 但内锚固段锚固机制以及设计方法研究尚不成熟。基于 Kelvin 解, 分别推导拉力分散型锚索和压力分散型锚索的内锚固段与周围岩土体之间的剪应力解析解, 再根据叠加原理得到了拉压分散型锚索内锚固段剪应力简化计算方法; 基于理论成果将拉压分散型锚索应用于工程实例中, 分别进行了拉压分散型锚索的基本性能试验及与拉力分散型锚索的预应力损失对比测试。通过算例分析结果表明, 单元锚固体的两端剪应力较大, 中间较小, 剪应力的分布特征与现有文献资料模型试验及数值模拟结果相吻合; 根据锚索的基本性能试验结果, 按照本文计算方法得到了压力段和拉力段剪应力峰值强度, 与已有的研究成果根据岩石单轴抗压强度得到的压力型和拉力型锚杆锚固段剪应力峰值强度结果基本吻合; 经对锚索预应力损失测试结果分析及工程的长期监测, 拉压分散型锚索在工程应用中荷载传递稳定可靠, 工程应用效果良好。

关 键 词: 拉压分散型锚索; 内锚固段受力机制; 设计方法; 工程应用

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2018)06-2155-10

Study on anchorage mechanism and application of tension-compression dispersive anchor cable

WU Shu-guang^{1,2}, FU Hong-mei¹, ZHANG Yan-yan¹

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area (Chongqing University), Ministry of Education, Chongqing 400045, China)

Abstract: A new tension-compression dispersive anchor cable was recently adopted in projects, which is based on the combination of tension, compression and load dispersive anchor cables. However, there is a limited study on the mechanism and design method of the anchor cable. Based on the Kelvin solution, we derived analytical solutions of the shear stress between surrounding rock (soil) and the anchoring segments of the tension-dispersive and compression-dispersive anchor cables, respectively. According to the superposition principle, a simplified calculation method was proposed to obtain the shear stress between anchoring segment and surrounding rock (soil). On the basis of theoretical results, the new anchor cable was applied in practical engineering, and the basic performance test of the anchor cable and the comparison with the prestress loss of the tension-dispersed anchor cable were performed, respectively. Theoretical results indicated that the values of shear stress at both ends of the unit anchoring segment were relatively higher, while the stress reached the lowest in the middle. The distribution characteristics of shear stress were consistent with testing results in the literature and numerical simulation results. According to testing results, i.e., the bearing capacity of the anchor cable, the peak values of shear stress in tension and compression sections were obtained using the simplified method, which agreed well with peak values of shear stress by means of the uniaxial compressive strength of rock in tension and compression anchor cables. The comparison results and the long-term monitoring data reveal that the effect of engineering application is good, and the load transfer of the anchor cable is stable and reliable.

Keywords: tension-compression dispersive anchor cable; mechanism of anchoring segment; design method; application

1 引 言

岩土锚固是岩土工程领域的重要分支^[1]。在软

岩、较软岩、土体等承载力低的复杂地层, 传统的岩土锚固方法, 即拉力集中型锚索的应力集中现象严重, 峰值高, 且无法获取较高的锚固力。随着新

收稿日期: 2016-10-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.51478065, No.51638002); 中央高校基本科研业务费项目(No.106112015CDJXY200006)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51478065, 51638002) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (106112015CDJXY200006).

第一作者简介: 吴曙光, 男, 1975 年生, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程领域的教学与科研工作。E-mail: wushuguang@cqu.edu.cn

材料、新工艺的出现, 已经由传统单一的拉力集中型发展成拉力分散型、压力集中型、压力分散型、拉压分散型等多种多样的锚固结构^[2]。工程实践表明, 岩土锚固是一种有效的加固措施, 但由于工程介质的复杂性以及锚固方式的多样性, 至今尚无统一的理论, 国内外岩土锚固理论研究主要围绕锚固荷载传递机制和锚固体加固效果^[3]。

对于荷载分散型锚索中的拉力分散型锚索和压力分散型锚索, 已有研究^[4-11]主要从锚固荷载传递机制方面进行分析。拉压分散型锚索结合拉力分散型和压力分散型锚索特点于一体, 已有学者^[12-14]将其运用于地层软弱、岩石较碎的工程中, 显示出了良好的锚固效果。田裕甲^[15]对拉压分散型锚索进行了破坏试验研究, 结果表明其锚固体受力更为合理。程贤忠^[16]开展了拉压分散型锚索与普通拉力型锚索的抗拔试验, 试验结果显示同等条件下拉压分散型锚索的极限承载力高于普通拉力型锚索。吴学震等^[17]利用拉压分散型锚索的受力特点, 在围岩加固中提出了拉压耦合大变形锚杆, 在实际应用中其锚固效果明显优于传统锚杆。刘致彬等^[18]开展了拉力型及压力型锚索锚固体界面剪应力分布曲线的模型试验研究, 运用叠加原理得到拉压分散型锚索锚固体界面剪应力分布曲线。

由上可知, 已有的研究尽管在试验以及工程应用中证明了拉压分散型锚索的优良性能, 但是对于内锚固段锚固机制的理论研究涉及较少。此外, 对于如何设计拉压分散型锚索并将其应用于工程实际中亦鲜见于相关文献。本文基于 Kelvin 解, 从锚固荷载传递机制方面分析拉压分散型锚索内锚固段与周围岩土体之间的剪应力分布规律, 为工程中的设计和计算提供一些理论依据; 基于设计理论将拉压分散型锚索应用于工程实例中, 并对拉压分散型锚索进行基本性能试验及锚索预应力损失测定, 研究拉压分散型锚索在工程应用中的锚固效果。

2 拉压分散型锚索内锚固段剪应力分析

拉压分散型锚索是近几年出现的一种新型锚索(见图1), 它是在压力分散型锚索的基础上进行改进的, 压力分散型锚索通过挤压套固定在承载板上, 当把挤压套外端钢绞线长度留长到 1.0~1.5 m, 并剥去这段钢绞线的塑料皮, 这段钢绞线就成为有黏结钢绞线^[19]。其作用原理为有黏结钢绞线与压力分散结构共同作用, 使得承载板上面的锚固体受压, 后一个承载板下有黏结钢绞线段受拉。压力型锚固部分由挤压套以及承载板构成, 拉力型锚固部分由

承载板以内的裸露钢绞线构成, 压力部分和拉力部分共同抵抗锚索张拉力。

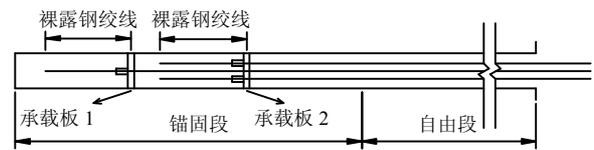


图1 拉压分散型锚索结构示意图
Fig.1 Schematic of tension-compression dispersive anchor cable

根据拉压分散型锚索的构造特点, 结合拉力型锚索和压力型锚索的破坏模式^[20-23], 本文提出拉压分散型锚索可能存在的破坏模式: ①钢绞线断裂破坏; ②注浆体压碎破坏; ③钢绞线与注浆体界面的黏结滑移破坏; ④锚固体与周围岩土体界面的破坏。对于破坏模式①, 根据需求的拉力定出钢绞线根数, 钢绞线断裂破坏较容易控制; 对于破坏模式②, 拉压分散型岩锚的注浆体在受到承载板的压力膨胀引起周围岩土体对其围压的增加, 当注浆体保证其饱满度^[22], 这种注浆体压碎破坏模式通常可以避免; 对于破坏模式③, 文献^[24]通过现场拉拔试验得出, 钢绞线与注浆体间黏结性能良好, 所能提供的锚固力较大, 锚索的锚固力通常情况下主要由注浆体外表面与锚孔表面岩土体之间的剪应力控制的, 工程中, 很少发生钢绞线从注浆体内被拔出的破坏形式; 对于破坏模式④, 文献^[24-27]得出拉力型锚索与压力型锚索破坏模式最主要的是注浆体与岩土体界面的破坏, 而拉压分散型锚索是拉力型、压力型及荷载分散型锚索的结合体, 所以本文着重分析锚固体与周围岩土体界面的应力传递机制。通过分别推导拉力分散型锚索和压力分散型锚索的内锚固段与周围岩土体之间的剪应力解析解, 根据叠加原理得出拉压分散型锚索内锚固段与周围岩土体的剪应力简化计算方法。

2.1 拉力分散型锚索内锚固段剪应力解析解

在许多工程中, 通常锚索较长, 锚固段离岩土体表面较远^[28], 在受力分析上可认为是位于无限体中, 不受表面边界的影响^[4]。假设锚固体、周围岩土体为线弹性材料, 可以近似认为, 此问题属于无限体内一点受集中力作用 P 作用下的弹性问题, 如图2所示, 这类问题称为 Kelvin 问题^[29], 其中, z 方向的位移解为

$$u_z = \frac{P}{16\pi G(1-\mu)} \left[\frac{2(1-2\mu)}{\sqrt{x^2+y^2+z^2}} + \frac{1}{\sqrt{x^2+y^2+z^2}} + \frac{z^2}{(\sqrt{x^2+y^2+z^2})^3} \right] \quad (1)$$

式中： P 为集中力 (N)； G 为岩土体剪切模量 (MPa)， $G = \frac{E}{2(1+\mu)}$ ； E 、 μ 分别为岩土体的弹性模量、泊松比。

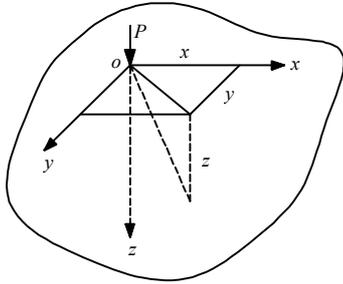


图 2 Kelvin 问题计算简图
Fig.2 Schematic of Kelvin's solution

对拉力型锚索，令锚固体与 z 轴重合，如图 3 所示，其中 O 为锚固段内端点； O' 为锚固段外端点。取 O' 为原点，根据弹性无限空间体的轴对称位移解可知 $x = y = 0$ ，在任一位置 z 处，集中力 P 产生的位移为

$$u_z = \frac{P(1+\mu)}{2\pi Ez} \quad (2)$$

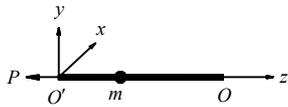


图 3 拉力型锚索计算简图
Fig.3 Schematic of the tension anchor cable

因为岩土体受到的黏结剪应力是由集中力 P 引起的。如果将 m 点处微段 dz 的剪应力作为集中力 dP ，则有

$$dP = 2\pi a\tau(z)dz \quad (3)$$

式中： a 为锚固体半径 (mm)； $\tau(z)$ 为锚固段沿 z 轴对岩土体产生的剪应力 (MPa)。

根据文献[4]，在弹性状态下，锚索锚固段所受的剪应力范围较小，因此，假设埋入岩体中的锚固段为半无限长。由变形协调条件， $\tau(z)$ 引起锚固段内端点 O 点的位移应等于锚固段的总伸长量：

$$\int_0^\infty \frac{(1+\mu)}{2\pi Ez} 2\pi a\tau(z)dz = \int_0^\infty \frac{1}{E_a A} \left[P - \int_0^z 2\pi a\tau(z)dz \right] dz \quad (4)$$

式中： E_a 为锚固体的弹性模量； A 为锚固体的横截面积。

化简式 (4) 得二阶齐次线性微分方程：

$$\tau(z)'' + kz\tau(z)' + 2k\tau(z) = 0 \quad k = \frac{4\pi G}{E_a A} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} \tau &= \eta(\xi) \exp\left(\frac{1}{4}\xi^2\right) \\ \text{令 } z &= -i\frac{1}{\sqrt{k}}\xi \end{aligned} \right\}, \text{ 代入式 (5) 得标准的}$$

韦伯方程：

$$4\eta'' - (\xi^2 + 3)\eta = 0 \quad (6)$$

式 (6) 的通解为

$$\eta = \xi e^{-\frac{1}{2}\xi^2} (C_1 + C_2 \int_{\xi^2}^{\infty} e^{-\xi^2} d\xi) \quad (7)$$

式中： C_1 、 C_2 为积分常数。

将式 (7) 进行逆变换并注意边界条件： $z \rightarrow \infty$ 时， $\tau = 0$ 、 $\int_0^\infty 2\pi a\tau(z)dz = P$ ，最后，求解化简可得

$$\left\{ \begin{aligned} \tau &= \frac{P}{\pi a} \left(\frac{1}{2}tz \right) \exp\left(-\frac{tz^2}{2}\right) \\ \sigma_z &= \frac{P}{\pi a^2} \exp\left(-\frac{tz^2}{2}\right) \end{aligned} \right. \quad t = \frac{1}{2(1+\mu)a^2} \left(\frac{E}{E_a} \right) \quad (8)$$

对于拉力分散型锚索，将上述分析结果进行叠加可以得到其内锚固段与周围岩土体之间的剪应力分布。解答如下：

$$\left\{ \begin{aligned} \tau &= \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{\pi a} \left[\frac{1}{2}t(z-z_{oi}) \right] \exp\left[-\frac{t(z-z_{oi})^2}{2}\right] \cdot \text{num}(z-z_{oi}) \\ \sigma_z &= \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{\pi a^2} \exp\left[-\frac{t(z-z_{oi})^2}{2}\right] \cdot \text{num}(z-z_{oi}) \end{aligned} \right. \quad (9)$$

式中： P_i 为第 i 段的锚固力； n 为锚固体的段数； z_{oi} 为第 i 段的锚固外端点与 O' 的距离； $\text{num}(z-z_{oi}) = \begin{cases} 1 & z-z_{oi} \geq 0 \\ 0 & z-z_{oi} < 0 \end{cases}$ 。

2.2 压力分散型锚索内锚固段剪应力解析解

同上，根据 Kelvin 问题在 z 方向的位移解^[29]，假设：①锚固体、周围岩土体为线弹性材料；②锚固体与周围岩土体界面抗剪强度遵循库仑定律；③锚固体同一截面的应力 σ_z 为均匀分布；④忽略各个承载板之间的影响。

如图 4 所示， O 为锚固段内端点， O' 为锚固段外端点，取 O 为原点，其距离为 l 。在实际工程中，设计的锚固长度足够^[28]，忽略 O' 的位移。根据变形协调条件， $\tau(z)$ 在锚固内端点 O 引起的位移应等于

锚固段的总压缩量:

$$\int_0^l \frac{1+\mu}{2\pi E z} \cdot 2\pi a \tau(z) dz = \int_0^l \varepsilon_z dz \quad (10)$$

式中: ε_z 为轴向线应变。

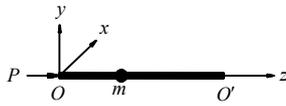


图 4 压力型锚索计算简图

Fig.4 Schematic of the compression anchor cable

根据弹性力学空间轴对称问题圆柱坐标与胡克定律^[30]得出物理方程为

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E_a} [\sigma_z - \mu_a (\sigma_\theta + \sigma_\rho)] \quad (11)$$

式中: μ_a 为锚固体的泊松比; σ_z 为轴向正应力; σ_θ 为环向正应力; σ_ρ 为径向正应力。

根据假设③有

$$\sigma_\theta = \sigma_\rho = \sigma \quad (12)$$

为了计算方便, 采用等效内摩擦角 φ 计算 (对于岩体边坡, 等效内摩擦角宜按当地经验确定, 当缺乏当地经验时, 可按文献[31]中 4.3.4 条规定取值), 则有

$$\tau = \sigma \tan \varphi \quad (13)$$

将式 (11) ~ (13) 代入式 (10) 中, 有

$$\int_0^l \frac{1+\mu}{2\pi E z} \cdot 2\pi a \tau(z) dz = \int_0^l \frac{1}{E_a} [\sigma_z + 2\mu_a \sigma] dz = \int_0^l \frac{1}{E_a} (\sigma_z - 2\mu_a \frac{\tau}{\tan \varphi}) dz \quad (14)$$

根据微段示意图图 5, 建立微段平衡方程:

$$\sigma_z \pi a^2 - (\sigma_z + d\sigma_z) \pi a^2 - 2\pi a \tau(z) dz = 0 \quad (15)$$

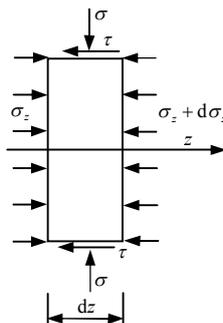


图 5 锚固段微元体的受力分析

Fig.5 Stress analysis of a micro-unit of anchoring section

联立式 (12)、(13), 化简得

$$\left. \begin{aligned} (Az + B)\sigma'_z + z\sigma_z &= 0 \\ \tau(z) &= -\frac{a}{2}\sigma'_z \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

$$\text{式中: } A = \frac{a\mu_a}{\tan \varphi}; B = \frac{(1+\mu)a^2 E_a}{2E}.$$

对式 (14) 积分得

$$\left. \begin{aligned} \sigma_z &= C e^{-\frac{1}{A} [z - \frac{B}{A} \ln(Az+B)]} \\ \tau(z) &= -\frac{a}{2}\sigma'_z \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

式中: C 为积分常数。

代入边界条件: $z=0$ 时, $\sigma_z = \frac{P}{\pi a^2}$, 得出

$$\left. \begin{aligned} \sigma_z &= \frac{P}{\pi a^2} \exp\left[\frac{B}{A^2} \ln\left(\frac{Az+B}{B}\right) - \frac{z}{A}\right] \\ \tau &= -\frac{P}{2\pi a} \exp\left[\frac{B}{A^2} \ln\left(\frac{Az+B}{B}\right) - \frac{z}{A}\right] \cdot \left(-\frac{z}{Az+B}\right) \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

当岩土体的泊松比 μ 与锚固体的泊松比 μ_a 相同时, 结果与文献[28]完全一致。

对于压力分散型锚索, 将上述分析结果进行叠加可以得到其内锚固段与周围岩土体之间的剪应力分布。解答如下:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_z &= \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{\pi a^2} \exp\left[\frac{B}{A^2} \ln\left(\frac{A(z-z_{oi})+B}{B}\right) - \frac{(z-z_{oi})}{A}\right] \cdot num(z-z_{oi}) \\ \tau &= \sum_{i=1}^n -\frac{P_i}{2\pi a} \exp\left[\frac{B}{A^2} \ln\left(\frac{A(z-z_{oi})+B}{B}\right) - \frac{(z-z_{oi})}{A}\right] \cdot \left[\frac{(z-z_{oi})}{A(z-z_{oi})+B}\right] \cdot num(z-z_{oi}) \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

式中: n 为承载板的个数; z_{oi} 为第 i 个承载板的位置。

2.3 拉压分散型锚索内锚固段剪应力简化计算方法

前面已分别对拉力分散型和压力分散型锚索内锚固段与周围岩土体的剪应力进行了推导, 拉压分散型锚索结合了二者的受力特点。从拉压分散型锚索的构造图 1 可知, 每束钢绞线的拉力段和压力段所承担的设计荷载通常情况下并不相同, 假定如下:

①忽略拉力段钢绞线弹性模量的影响；②拉力段钢绞线的黏结长度足够；③在工作中，每个承载板处不出现开裂现象，则视二者均分每个承载板处的设计荷载。如图 1 所示，根据拉力段和压力段所承担的设计荷载分别计算内锚固段剪应力：第 1 个承载板外侧锚固段只有拉力段，最后 1 个承载板内侧锚固段只有压力段。为了分析拉压分散型锚索锚固机制，结合已有文献资料^[32]研究成果，采用简化计算方法，拉压分散型锚索承载板间锚固段通过将拉力段和压力段计算出的内力进行叠加后得到内锚固段剪应力分布。

2.4 算例分析

设有一拉压分散型锚索，该锚索设置两组承载板。锚索的张拉荷载为 $P = 10^3$ kN，每组承载板施加的张拉荷载为 $P = 500$ kN。锚固段注浆半径 $a = 75$ mm，锚固体弹性模量 $E_a = 24$ GPa，泊松比 $\mu_a = 0.25$ ；岩土体弹性模量 $E = 4$ GPa，泊松比 $\mu = 0.35$ ；锚固段注浆体与周围岩土体界面的等效内摩擦角 $\varphi = 30^\circ$ 。

为了进行对比分析，同时分析了相同条件下拉力分散型锚索与压力分散型锚索的内锚固段剪应力分布情况。拉力分散型锚索、压力分散型锚索及拉压分散型锚索的结构示意图见图 6。

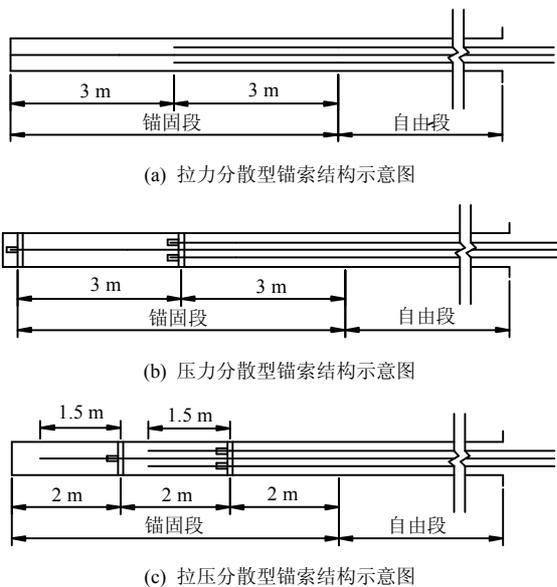


图 6 锚索结构示意图
Fig.6 Schematic of anchor cables

每个单元锚固体的拉力段 $P_t = 250$ kN，压力段 $P_c = 250$ kN，然后将其代入式 (9)、(19) 中进行叠加计算，得到结果如下：

$$\left. \begin{aligned} \tau_{\text{拉力部分}} &= \sum_{i=1}^n 5.8357 \times 10^{-3} (z - z_{oi}) \cdot \\ &\quad \exp[-5.5 \times 10^{-6} (z - z_{oi})^2] \cdot \text{num}(z - z_{oi}) \\ \tau_{\text{压力部分}} &= \sum_{i=1}^n -530.5165 \exp\{1.0204 \cdot \\ &\quad \ln\left[\frac{45.4663(z - z_{oi}) + 22781.25}{22781.25}\right] - \\ &\quad \frac{(z - z_{oi})}{45.4663}\} \cdot \left[\frac{(z - z_{oi})}{45.4663(z - z_{oi}) + 22781.25}\right] \cdot \\ &\quad \text{num}(z - z_{oi}) \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

将其计算结果作图分析，见图 7。

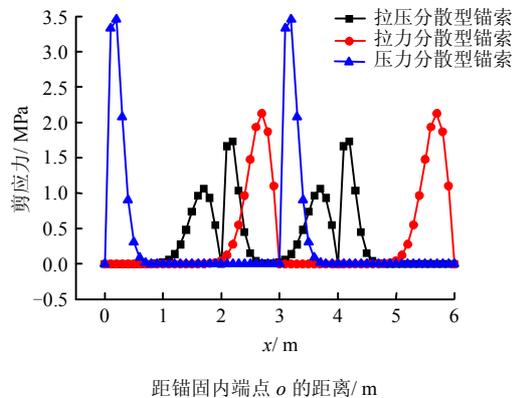


图 7 对比分析简图
Fig.7 Comparison diagram

从图 7 可以看出，拉压分散型锚索每个单元锚固体的两端剪应力较大，中间剪应力较小，相比拉力分散型锚索、压力分散型锚索的峰值剪应力分别减少 18.90%、50%，剪应力分布更均匀，分布特征与文献[18]的模型试验结果及文献[16]的数值模拟结果相吻合；另外，拉力分散型锚索在单元锚固体上 1.0 m 以后剪应力值小于峰值的 1%，即单元有效锚固长度为 1 m 左右；压力分散型锚索在单元锚固体上 0.8 m 以后剪应力值小于峰值的 1%，即单元有效锚固长度为 0.8 m 左右；而拉压分散型锚索的单元有效锚固长度为 1.5 m 左右，表明在同等条件下，拉压分散型锚索锚固体的有效锚固段更长，可以充分发挥了锚固体与岩土体之间的抗剪强度，能获得更高的锚固力。

2.5 单元锚固体长度的简化计算方法

如图 7 所示，拉力段与压力段剪应力都是先增大后减小，当剪应力值减小到小于峰值的 1% 时，剪应力已很小，可视为无效，即有效锚固发展到此，该段为有效锚固长度。拉力部分有效锚固长度为 l_{et} 、压力部分有效锚固长度为 l_{ep} 。

在设计锚固长度时, 必须考虑一定的安全储备^[5,33], 安全系数 K 的取值参考《建筑边坡工程技术规范》^[31]中岩土锚杆锚固体抗拔安全系数的相关规定, 则单元锚固段长度的简化计算方法如下:

$$l_e = \max \{Kl_{et}, Kl_{cp}\} \quad (21)$$

式中: l_e 为单元锚固段长度。

此外, 第 1 个承载板外端应留 2 m 锚固段, 作为挤压套外端钢绞线的锚固长度。

3 拉压分散型锚索工程应用实例

3.1 工程概况

某工程位于重庆市江北嘴中央商务区, 南临嘉陵江, 北侧高边坡为建筑岩质边坡, 基岩以泥岩为主, 边坡北侧为金沙路, 周边有电力管线箱涵, 边坡开挖与支护期间对边坡支护挡墙位移要求较高。结合本工程的周边环境及地质条件, 选择拉压分散型锚索。为了分析拉压分散型锚索的受力性能及预应力损失, 在工程现场分别进行拉压分散型锚索的基本性能试验及锚索预应力损失的对比测试试验。

锚索设计参数: 锚索采用 $\phi 15.24$ mm 钢绞线, 强度标准值 $f_{ptk} = 1.86 \times 10^3$ N/mm², 直径 15.24(7 \times v5), 截面积为 139 mm²。注浆采用 M30 水泥砂浆。钢绞线的弹性模量 $E_g = 195$ GPa, 泊松比 $\mu_g = 0.25$; 注浆体弹性模量 $E_a = 16$ GPa, 泊松比 $\mu_a = 0.20$; 岩体弹性模量 $E = 3.4$ GPa, 泊松比 $\mu = 0.27$, 岩石天然单轴抗压强度 $f_{tk} = 8.72$ MPa; 锚固段注浆体与周围岩体界面的等效内摩擦角 $\varphi = 40^\circ$ 。

3.2 拉压分散型锚索基本性能试验

为了测得拉压分散型锚索在不同锚固长度下的极限承载力以探索其受力性能, 首先在现场进行 3 根拉压分散型锚索基本性能试验, 锚索均设置两组承载板, 锚固段长为 6 m, 自由段长为 5 m, 孔径为 170 mm。

现场试验过程如图 8、9 所示, 张拉方案采用分级循环加载。以其中 1 根典型锚索的试验结果分析,



图 8 下放锚索体施工图
Fig.8 Placing anchor cables



图 9 锚索张拉施工图
Fig.9 Construction of pulling anchor cable

在拉拔荷载施加到 1 235 kN 时, 油压表不稳定, 锚头变形突然加大, 不能继续有效持荷, 锚固体发生剪切破坏(有较大响动)。试验 $Q-S$ 曲线图如图 10 所示。最终试验锚索的破坏极限承载力为 1 235 kN。

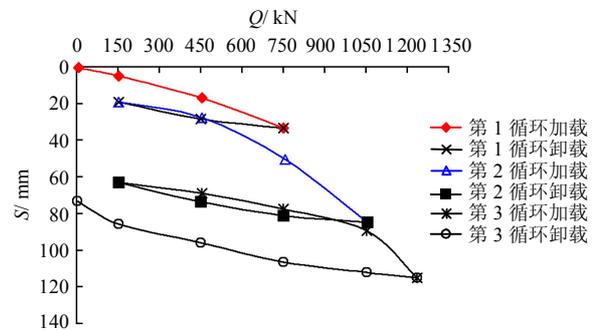


图 10 锚索 $Q-S$ 曲线
Fig.10 $Q-S$ curves of anchor cable

根据本文所提出的内锚固段剪应力简化计算方法, 得到拉力段峰值剪应力为 1.19 MPa, 压力段峰值剪应力为 2.19 MPa, 压力段和拉力段峰值剪应力之比为 1.84。根据前期研究成果^[34-35], 拉力型锚杆峰值剪应力为 $0.14 f_{tk}$, 即 1.22 MPa, 压力型锚杆锚固体与岩土体界面剪应力极值是拉力型锚杆的 1.8 倍。根据本次试验得到的锚索承载力按照本文计算方法得到的压力段和拉力段剪应力峰值强度, 与已有的研究成果根据岩石单轴抗压强度得到的压力型和拉力型锚杆锚固段剪应力峰值强度结果基本吻合。

3.3 锚索预应力损失对比测试

选取本工程中具有代表性的 5 根抗滑桩上拉压分散型锚索及在本工程周围场地埋设的 3 根参数相同的拉力分散型锚索进行锚索预应力损失测试, 锚索编号及参数见表 1, 其中, 锚固段设计长度根据第 2 节提出的单元锚固段锚固长度的简化计算方法计算。本测试旨在观测预应力拉压分散型锚索与拉力分散型锚索在张拉后的预应力变化规律。两种锚索采用分级循环张拉, 张拉至设计值的 80% 后锁定。锁定后, 通过测力计对锚索预应力进行长期监测,

为期 138 d。通过对数据进行整理，得到锚索预应力 随时间变化趋势见图 11，预应力损失见表 2^[23]。

表 1 锚索参数统计表
Table 1 Parameter statistics of anchor cables

锚索类别	编号	设计荷载/kN	锚固段分段	锚孔直径/mm	承载板直径/mm	锚固段设计长度/m	总长度/m
拉力分散型	T-1	900	3 个单元	175	150	1.5/1.5/1.5	4.5
拉力分散型	T-2	900	3 个单元	175	150	1.5/1.5/1.5	4.5
拉力分散型	T-3	900	3 个单元	175	150	1.5/1.5/1.5	4.5
拉压分散型	TC-1	600	2 个单元	130	120	2.0/2.5/2.5	7.0
拉压分散型	TC-2	900	2 个单元	175	150	2.0/3.0/3.0	8.0
拉压分散型	TC-3	900	2 个单元	175	150	2.0/3.0/3.0	8.0
拉压分散型	TC-4	1 200	3 个单元	200	180	2.0/3.0/3.0/3.0	11.0
拉压分散型	TC-5	1 200	3 个单元	200	180	2.0/3.0/3.0/3.0	11.0

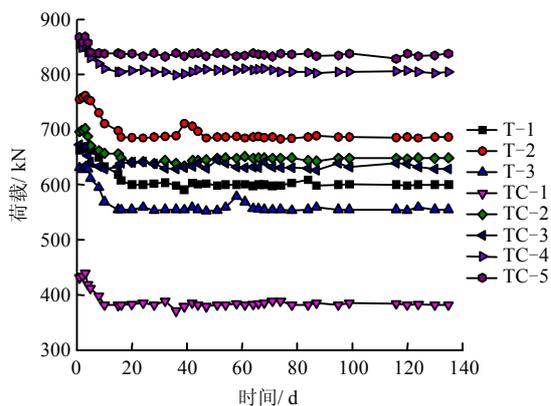


图 11 锚索预应力变化趋势图

Fig. 11 Variation tendency of anchorage force

表 2 锚索预应力损失情况
Table 2 Prestress loss of anchor cables

锚索类别	编号	锁定荷载初值/kN	预应力终值/kN	预应力损失/kN	损失率/%
拉力分散型	T-1	664	601	63	9.5
拉力分散型	T-2	756	688	68	9.0
拉力分散型	T-3	632	556	76	12.0
拉压分散型	TC-1	432	382	50	11.6
拉压分散型	TC-2	697	649	48	6.9
拉压分散型	TC-3	674	630	44	6.6
拉压分散型	TC-4	857	806	51	5.9
拉压分散型	TC-5	869	839	30	3.4

从图 11 可以看出，拉力分散型锚索 T-1、T-2 和 T-3 张拉后数值变化缓慢，张拉后 15 d 数值保持稳定；拉压分散型锚索 TC-1、TC-2、TC-3 和 TC-5 张拉后 10 d 数值保持稳定，TC-4 张拉后 12 d 数值保持稳定，普遍在张拉后大约 12 d 数值趋于稳定；而传统拉力型锚索的锚索应力普遍在张拉后 21 d 数值趋于稳定^[36]，表明拉压分散型锚索的锚索应力相比拉力（分散）型趋于稳定的天数要短。

从表 2 可以看出，除了 TC-1，拉压分散型锚索的预应力损失普遍要比拉力分散型锚索的预应力损失小。表明拉压分散型锚索在该工程中荷载传递

是稳定、可靠的，从宏观上说明内锚固段受力比较均匀，与文献[37]的试验结果相吻合。另外，经过持续 2 a 的监测，该边坡无开裂变形，加固措施无失效现象，说明拉压分散型锚索在该工程中的应用效果良好。

4 结论及展望

(1) 本文提出的拉压分散型锚索锚固段与周围岩土体之间的剪应力简化计算方法，对研究拉压分散型锚索的内锚固段机制及其影响因素有一定的意义，为拉压分散型锚索在工程中的设计和计算提供了一些理论依据。

(2) 通过对拉压分散型锚索锚固段与周围岩土体剪应力简化计算方法算例的分析，得出其剪应力分布规律，即每个单元锚固体中的两端剪应力较大，中间较小，相比拉力分散型锚索和压力分散型锚索峰值剪应力显著减少；并提出单元锚固体长度的简化计算方法。

(3) 通过拉压分散型锚索现场基本性能试验，根据本文所提出的内锚固段剪应力简化计算方法，得到拉力段峰值剪应力为 1.19 MPa，压力段峰值剪应力为 2.19 MPa，压力段和拉力段峰值剪应力之比为 1.84，与已有的研究成果根据岩石单轴抗压强度得到的压力型和拉力型锚杆锚固段剪应力峰值强度结果基本吻合。

(4) 对比工程实例中的拉压分散型锚索与同一场地的拉力分散型锚索预应力损失测试结果，得出拉压分散型锚索的预应力损失普遍比拉力（分散）型锚索小，表明拉压分散型锚索在工程应用中荷载传递稳定可靠。经过对工程的长期监测发现，工程应用效果良好。

(5) 拉压分散型锚索结合了拉力分散型锚索与压力分散型锚索的特点，优点较为突出，但是这种锚索结构较为复杂，目前拉压分散型锚索的受力机

制、现场性能试验研究也较少。在接下来的研究工作中,有必要在锚索现场基本性能试验中直接测量锚固段应力分布,进一步验证本文得到的拉压分散型锚索锚固段应力状态。

参 考 文 献

- [1] 程良奎. 岩土锚固的现状与发展[J]. 土木工程学报, 2001, 34(3): 7—12.
CHENG Liang-kui. Present status and development of ground anchorages[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2001, 34(3): 7—12.
- [2] 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 on anchorage segment of pressure-type cable[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, 26(6): 828—831.
- [3] 张乐文, 汪稔. 岩土锚固理论研究之现状[J]. 岩土力学, 2002, 23(5): 627—631.
ZHANG Le-wen, WANG Ren. Research on status quo of anchorage theory of rock and soil[J]. *Rock and Soil Mechanics* 2002, 23(5): 627—631.
- [4] 尤春安, 占玉宝. 预应力锚索锚固段的应力分布规律及分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(6): 925—928.
YOU Chun-an, ZHAN Yu-bao. Distributing characters and analysis of stresses in prestressed cables[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(6): 925—928.
- [5] 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 Geotechnical Engineering*, 2005, 27(9): 1033—1039.
- [6] 程良奎, 韩军. 单孔复合锚固发的理论和实践[J]. 工业建筑, 2001, 31(5): 35—38.
CHENG Liang-kui, HAN Jun. Theory and practice of the single bore multiple anchor method[J]. *Industrial Construction*, 2001, 31(5): 35—38.
- [7] 贾金青, 涂兵雄, 王海涛, 等. 压力分散型预应力锚杆的力学机制研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(9): 1320—1325.
JIA Jin-qing, TU Bing-xiong, WANG Hai-tao, et al. Mechanical behaviors of pressure-dispersive prestressed anchor[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(9): 1320—1325.
- [8] 张勇, 赵红玲, 张向阳. 压力分散型锚索锚固段力学性能试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊 1): 3052—3056.
ZHANG Yong, ZHAO Hong-ling, ZHANG Xiang-yang. Test study of mechanical performances of anchorage zone of pressure dispersion anchor cable style[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(Supp.1): 3052—3056.
- [9] 周德培, 刘鸿, 冯君. 压力分散型锚索单元锚体间的应力影响[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(10): 1765—1771.
ZHOU De-pei, LIU Hong, FENG Jun. Stress influence between unit anchor bodies for compression dispersion-type anchored cables[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(10): 1765—1771.
- [10] 丁瑜, 王全才, 何思明. 拉力分散型锚索锚固段荷载传递机制[J]. 岩土力学, 2010, 31(2): 599—603.
DING Yu, WANG Quan-cai, HE Si-ming. Loading transfer mechanism of dispersion-type tensile cables along anchoring section[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(2): 599—603.
- [11] 王树仁, 何满潮, 金永军. 拉力集中型与压力分散型预应力锚索锚固机制[J]. 北京科技大学学报, 2005, 27(3): 278—282.
WANG Shu-ren, HE Man-chao, JIN Yong-jun. Anchoring mechanism of prestressed anchor cables under concentrated tension and dispersive pressure[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2005, 27(3): 278—282.
- [12] 易著伟, 顾寅. OVM 拉压分散型锚索在边坡加固中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1998, 9(增刊): 329—335.
YI Zhu-wei, GU Yin. Application of OVM tension and compression dispersive anchor cable in slope reinforcement[J]. *Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 1998, 9(Supp.): 329—335.
- [13] 黄中权. 预应力锚索在高拱坝小湾水电站中的优化设计与应用[D]. 成都: 成都理工大学, 2011.
HUANG Zhong-quan. Prestressed cable in a high arch dam in Xiaowan hydropower optimization design and application[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011.
- [14] 陈瑞明. 拉压分散型锚索在祥临公路滑坡治理中的应用[J]. 工程技术, 2014, (8): 228—229.
CHEN Rui-ming. Application of tension and compression

- dispersive anchor cable in Xianglin highway landslide treatment[J]. **Engineering and Technology**, 2014, (8): 228—229.
- [15] 田裕甲. 压力分散型锚索与拉力型锚索的比较[J]. OVM 通讯, 2002, (3): 32—40.
- TIAN Yu-jia. Comparison of pressure-dispersive anchor cable and tension anchor cable[J]. **OVM Communication**, 2002, (3): 32—40.
- [16] 程贤忠. 拉压分散型锚索内锚固段受力机制研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
- CHENG Xian-zhong. Study the anchoring stress mechanism of the tension-compression dispersed anchor cable[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [17] 吴学震, 王刚, 蒋宇静, 等. 拉压耦合大变形锚杆作用机制及其试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(1): 139—147.
- WU Xue-zhen, WANG Gang, JIANG Yu-jing, et al. Mechanism of CTC-yield bolts and its experimental research[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2015, 37(1): 139—147.
- [18] 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, (3): 48—61.
- LIU Zhi-bin, SUN Zhi-heng, SUN Jin-gang. Study on anchoring type and anchorage system of rock bolt[J]. **Water Power**, 1997, (3): 48—61.
- [19] 孙学毅. 压力分散型和拉压分散型锚索若干问题讨论[J]. 预应力技术, 2006, (3): 20—21.
- SUN Xue-yi. Discussion on some problems of pressure-dispersive and tension and compression dispersive anchor cable[J]. **Prestress Technology**, 2006, (3): 20—21.
- [20] 张永兴, 卢黎, 饶泉宇, 等. 压力型锚杆力学性能模型试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(7): 2045—2050.
- ZHANG Yong-xing, LU Li, RAO Xiao-yu, et al. Model test research on mechanical behavior of compression type rock bolt[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(7): 2045—2050.
- [21] 何思明, 王全才. 预应力锚索作用机制研究中的几个问题[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(1): 160—165.
- HE Si-ming, WANG Quan-cai. Problems of the study on mechanism of anchor cable[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2006, 2(1): 160—165.
- [22] 程良奎, 范景伦, 周彦清, 等. 压力分散型(可拆芯式)锚杆的研究与应用[J]. 冶金工业部建筑研究总院院刊, 2000, 41(2): 1—8.
- CHENG Liang-kui, FAN Jing-lun, ZHOU Yan-qing, et al. Research and application of pressure-dispersive anchor(removable core)[J]. **Journal of the Ministry of Metallurgical Industry General Building Research Insititute**, 2000, 41(2): 1—8.
- [23] 张岩岩. 拉压分散型锚索在建筑岩质边坡中的应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- ZHANG Yan-yan. Study on the tension-compression dispersive anchor cable's application to building rock slope[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [24] 沈俊, 顾金才, 张向阳, 等. 拉力型和压力型自由式锚索现场拉拔试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增刊 1): 3291—3297.
- SHEN Jun, GU Jin-cai, ZHANG Xiang-yang, et al. Field pull-out test research on tension and pressure unbonded anchor cables[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(Supp.1): 3291—3297.
- [25] 王永卫, 陈从新, 刘秀敏, 等. 拉力型锚索破坏过程试验研究[J]. 施工技术, 2011, 40(15): 94—97.
- WANG Yong-wei, CHEN Cong-xin, LIU Xiu-min, et al. Research on failure progress of extensional-force-type anchor cable[J]. **Construction Technology**, 2011, 40(15): 94—97.
- [26] 张雄, 陈胜宏. 预应力锚索锚固段荷载传递解析算法[J]. 岩土力学, 2015, 36(6): 1667—1675.
- ZHANG Xiong, CHEN Sheng-hong. Analytical solution for load transfer along anchored section of prestressed anchor cable[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(6): 1667—1675.
- [27] 尤春安, 战玉宝. 预应力锚索锚固段界面滑移的细观力学分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(10): 1976—1985.
- YOU Chun-an, ZHAN Yu-bao. Analysis of interfacial slip mesomechanics in anchorage section of prestressed anchor cable[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(10): 1976—1985.
- [28] 卢黎, 张永兴, 吴曙光. 压力型锚杆锚固段的应力分布规律研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(6): 1517—1520.
- LU Li, ZHANG Yong-xing, WU Shu-guang. Distribution of stresses on bonded length of compression type rock bolt[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(6): 1517—1520.