

# 一种新型的剪力分散型锚索体系

甘国荣 刘璇 孙学毅

(柳州欧维姆机械股份有限公司 柳州 545005)

**摘要:** 本文分析了我国预应力锚索的应用现状,通过对锚索的结构改进及优化,提出了解决预应力锚索工况劣化的解决办法,揭示了新型CPS剪力分散型锚索所应用的整束挤压、剪力分散等先进技术,并对CPS剪力分散型锚索的作用机理进行了探讨。根据本文获得的结果是:CPS剪力分散型锚索体系具有的小钻孔、高承载力、高防腐的特点,将给我国的岩土锚固施工带来巨大效益。

**关键词:** 预应力 岩土锚固 锚索 剪力分散 防腐

## 1. 概述

随着我国大力兴建基础设施,特别是对交通、能源、水利和城市基础设施建设力度的加大,岩土锚固的理论研究、技术创新和工程应用得到进一步发展,我国先后开发了拉力型锚索、压力分散型锚索、拉压复合型锚索、扩孔锚索和机械内锚头锚索等多种锚固形式,在边坡、基坑、矿井、隧洞、地下工程、坝体、航道、水库、机场及抗倾、抗浮结构等工程建设中获得推广应用。

经过不断的工程实践和学术工程界的深入研究,对各型锚索的作用机理进行了深入的分析,可针对不同地质体的锚固要求选用不同的锚索类型。随着国外先进的岩土锚固工法的引进,岩土预应力锚索长效加固问题,引起了业内各界的普遍重视。锚索作为岩土预应力工程的重要加固结构,其安全性、耐久性、适应性关系到岩土工程的安全与正常使用,反思我国各型锚索的使用状况,大都存在着没有重视锚索防护或是防护不当等安全隐患,直接危及工程运营的使用安全和使用寿命。

## 2. 新型剪力分散型锚索

### 2.1 新型锚索的提出

国外许多国家已经制定了严格的岩土锚固规范,对锚索的防腐提出了很高的要求;同时也制定了较为先进的岩土锚固工法,能可靠地保证锚索(杆)的长期锚固性能。与国际岩土锚索的应用相比,我国的预应力锚索受各方面的因素制约,长期以来锚索体的制作均在施工

现场进行,制作工艺粗糙,防腐简单,而且施工质量存在问题,给工程安全运营带来极大的隐患。现存的多数锚索存在着工况劣化的缺陷,如:拉力型锚索的内锚固段上部拉应力集中,并随深度衰减,浆体容易开裂,影响索体防腐及锚固效果;压力分散型锚索的各级承载结构间距不易确定,内锚固段的剪应力难以有效均布,钢绞线数量增多时施工复杂,锚索工况变化时钢绞线应力不均匀性加剧等。

从以上分析可以看出,解决锚索工况劣化的缺陷已迫在眉睫。

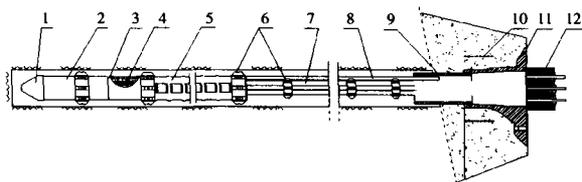
### 2.2 OVMCPS剪力分散型锚索体系

OVMCPS剪力分散型锚索体系是基于Kelvin解答、非连续介质界面元法、整束挤压、剪力分散等先进的分析方法和技术开发的一代岩土锚索系统,它较全面地解决目前岩土锚索应用中存在的问题,特别是在锚索的安全性、耐久性、适应性方面有了极大的改进。

锚压套、剪力棒、锚垫板与工作锚板是剪力分散型锚索的主要部件,如图1。其中,锚压套、剪力棒是内锚固段的主要受力件,钢绞线的拉力通过锚压套、剪力棒传递给周围的浆体,与外锚固端的锚垫板、工作锚板一起共同作用,从而达到使被加固体稳定和限制其变形的目的。

内锚固段锚压套与钢绞线采用整束挤压技术成形,结构更紧凑,锚索直径更小,内锚固段还采用了独特的剪力棒转载结构,能有效降低和分散锚固段的应力集中现象,能充分利用

内锚固段长度，大大提高了单孔锚索的承载力。



1、导向帽 2、锚压套 3、密封筒 4、环氧树脂 5、剪力棒 6、对中架 7、无粘结筋 8、注浆管 9、预埋管 10、螺旋筋 11、锚垫板 12、工作锚具

图1 OVMCPS剪力分散型锚索结构形式示意图

### 2.3 整束挤压技术

压力分散型锚索采用的是单根挤压技术，而剪力分散型锚索是采用将多根钢绞线整体挤压在锚压套内的整束挤压技术，如图2。整束挤压锚具的静载性能达到了《预应力筋用锚具、夹具和连接器》GB/T 14370-2000的要求：锚具效率系数  $\eta_A \geq 95\%$ ，极限延伸率  $\xi \geq 2\%$ ；其疲劳荷载性能通过了200万次疲劳荷载试验，荷载上限为  $0.45 \sigma_b$ ，应力幅度为180MPa。典型锚索整束挤压规格及其参数见表1。

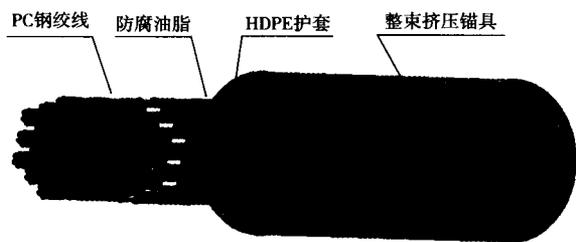


图2 整束挤压锚具结构示意图

表1 典型锚索整束挤压规格及其参数表

规格	CPS15-4	CPS15-7	CPS15-12	CPS15-19	CPS15-37
构成	4xΦ15.2	7xΦ15.2	12xΦ15.2	19xΦ15.2	37xΦ15.2
钢绞线截面积 (mm <sup>2</sup> )	560	980	1680	2660	5180
单位质量(kg/m)	4.404	7.707	13.212	20.919	40.737
极限荷载(kN)	1040	1820	3120	4940	9620
许用荷载(kN)	624	1092	1872	2964	5772
索体钢绞线束断面					

### 2.4 CPS剪力分散型锚索的主要技术参数

(1) 静载性能满足《预应力筋用锚具、夹具和连接器》GB/T 14370-2000的要求：锚具效率系数  $\eta_A \geq 95\%$ ，极限延伸率  $\xi \geq 2\%$ 。

(2) 锚索单孔承载力高，内锚固段剪应力峰值可减小2.5倍。

(3) 钻孔：小孔径，比国内同类产品的钻孔孔径可减小达10%~30%。

(4) 内锚固段：适用于多种地质体，且内锚固段长度可比常规锚索缩短30%~50%。

(5) 防护性能：全长防锈防水，索体防水压力  $\geq 0.25\text{MPa}$ 。

### 3. CPS剪力分散型锚索的作用机理研究

剪力棒作为锚压体的传载结构，是降低内锚固段剪应力峰值的重要结构。锚压体把索力P按原来大小转换成压力并作用于孔底处的锚固体（剪力棒和水泥浆组合体），锚固体轴向受压（ $\sigma$ ）、侧面受剪（ $\tau$ ）。由于锚固体与孔壁完全粘结，使 $\sigma$ 与 $\tau$ 的分布呈非线性。项目研究应用弹性力学解析方法探求了 $\sigma$ 、 $\tau$ 的分布规律。

无限大空间体内一点O承受集中力P的作用，如图3所示。

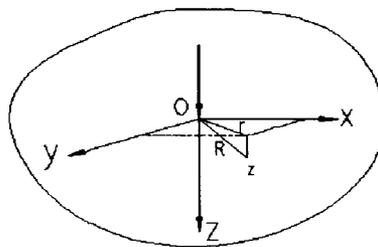


图3 无限大空间体内一点受集中力简图

设集中力P沿OZ方向作用在坐标原点O，边界条件为

(a) 在无穷远处所有应力分量均趋于零；

(b) 在O点处应力的奇异性相应于集中力的幅度P。

集中力可以看作作用在原点处一个小球洞表面上的荷载的极限情况，由Kelvin解答得出其Z方向的位移解为：

$$U_z = A \left[ \frac{2(1-2\mu)}{R} + \frac{1}{R} + \frac{Z^2}{R^3} \right] \quad (1)$$

$$\text{式中： } R = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$$

$$A = \frac{P}{16\pi G(1-\mu)}$$

G—岩土体的剪切弹性模量；

$\mu$ —岩土体的泊松比。

CPS锚索的锚压体距岩土体表面较远，锚压体的截面积很小，如图4所示：

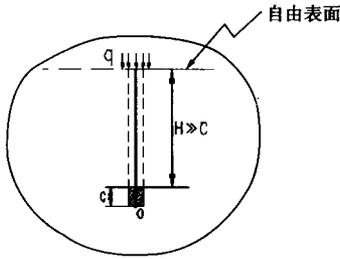


图4 计算模型示意图

由于钢绞线是无粘结的，在岩土体表面施加一个集中力P，通过钢绞线把P力按原来大小传给锚压体C。基于上述条件项目认为可以把问题归结为Kelvin问题求解。

由于H远远大于C，根据Saint-Venant原理，锚墩传给岩土体表面的压力P对C的影响很小，可以忽略不计。

取锚孔轴线与Z轴重合，这时X=Y=0，

(1)式变为

$$U_z = \frac{P(1+\mu)}{2\pi EZ} \quad (2)$$

(2)式表明锚孔内锚压体C受P力作用后锚固体任一点(O点除外)相对于作用点O产生的位移的分布规律。

在P力作用下，岩体的总位移为：

$$\int_0^{\infty} \frac{(1+\mu)}{2\pi EZ} \cdot 2\pi b \tau(Z) dZ$$

锚固体总压缩量为：

$$\int_0^{\infty} \frac{P - \int_0^{\infty} 2\pi b \tau(Z) dZ}{E_a \cdot A} \cdot dZ$$

假定锚固体的总压缩量等于岩土体的总位移，则下式成立。

$$\int_0^{\infty} \frac{1}{E_a A} \left[ P - 2\pi b \int_0^{\infty} \tau(Z) dZ \right] \cdot dZ = \int_0^{\infty} \frac{1+\mu}{2\pi EZ} \cdot 2\pi b \tau(Z) dZ \quad (3)$$

式中：

b—锚固体(钻孔)半径；

E—岩土体弹性模量；

$\mu$ —岩土体泊松比；

A—锚固体截面积；

$E_a$ —锚固体弹性模量。

将方程(3)两边分别对Z求三次导数，并进行简化得如下形式的二阶变系数齐次常微分方程：

$$\tau'' + KZ\tau' + 2K\tau = 0 \quad (4)$$

$$\text{式中； } K = \frac{2\pi G}{E_a A}$$

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}$$

$\tau$ —锚固体所受的剪应力。

(4)式通过变换，并利用边界条件Z→∞,  $\tau=0$ 和  $\int_0^{\infty} 2\pi b \tau(Z) dZ = P$ ，最后获得锚固体侧面(孔壁)剪应力分布：

$$\tau = \frac{Pt}{2\pi b} \cdot Z \cdot e^{-\frac{1}{2}tz^2} \quad (5)$$

$$\text{式中， } t = \frac{1}{2(1+\mu)b^2} \left( \frac{E}{E_a} \right)$$

对(5)式积分，得锚固体的轴力分布：

$$N = Pe^{-\frac{1}{2}tz^2} \quad (6)$$

对(5)式微分，令 $d\tau/dz=0$ ，并代入(5)

式得：

$$\tau_{\max} = \frac{P}{2\pi b} \sqrt{t/e} \quad (7)$$

(7)式为剪应力峰值表达式。

由(7)式可以看出，最大剪应力 $\tau_{\max}$ 与预应力p成正比，与 $E/E_a$ 成正比，与锚孔半径b成反比。

据(7)式，在相同荷载和相同孔径下，计算普通压力型锚索与CPS锚索的内锚固段的剪应力峰值之比：

取E水泥=28×10<sup>3</sup>MPa，E钢=200×10<sup>3</sup>MPa

$$\tau_{\max} / \tau_{\max(\text{CPS})} = (t/t_{\text{CPS}})^{1/2} = 2.67 \quad (8)$$

由(8)式结果，可知采用CPS锚索，其内锚固段剪应力峰值可降低2.67倍。

由(7)、(8)式，在充分利用内锚固段抗剪强度提供相同锚固力的条件下，计算CPS锚索所需的钻孔径：

$$\begin{aligned} \tau_{\max} &= (Pt^{1/2}) / (2 \times 3.14be^{1/2}) \\ &= (Pt_{\text{cps}}^{1/2}) / (2 \times 3.14b_{\text{cps}}e^{1/2}) \\ b_{\text{cps}}/b &= t_{\text{cps}}^{1/4} / t^{1/4} \quad (9) \\ &= 2.67^{-1/2} = 61.2\% \end{aligned}$$

由(9)式结果,可知采用CPS锚索可显著降低所需钻孔径,降低幅度达61.2%。

由于材料的限制,在实际工程应用中一般只能做到减小孔径达10%~30%。

#### 4. CPS剪力分散型锚索的技术经济性

以15-7的CPS剪力分散型锚索与普通的拉力型和压力分散型锚索作对比,如表2。

表2 技术经济对比数据表

(15-7)项目	拉力型	压力分散型	CPS型
结构成本(材料费)	2626	2708.5	2880
钻孔径(mm)	130	130	110
土层钻孔单价(元/m)	75	75	60
岩层钻孔单价(元/m)	150	150	120
锚索长度(m)	30	30	27
土层施工成本	2250	2250	1620
岩层施工成本	4500	4500	3240
土层总成本	4876	4958.5	4500
土层总成本对比	0	+82.5	-376
岩层总成本	7126	7208.5	6120
岩层总成本对比	0	+82.5	-1006

从上表可看出,100T级的CPS锚索与拉力型锚索相比,在土层可节约8%的总投资,在岩层可节约14%的总投资。

#### 5. CPS剪力分散型锚索的试验研究

采用YMSY.0测试装置研究岩体中被模拟的内锚固段的荷载传递与破坏机制,确定锚索内锚固段与被模拟岩体间的剪应力分布。环绕在内锚固段钻孔周围的水泥砂浆模拟岩体 $f_c=10\sim 15\text{MPa}$ ,安装孔径为 $\Phi 114\text{mm}$ ,锚固段长度为3m,孔内注浆体强度为50MPa。

试验是在模拟岩层内注浆后下索,测试装置及索体内均布置了传感元件,具体布置如图5所示。

设计荷载为:

$$N_i = \pi DL \xi = 3.14 \times 0.114 \times 3 \times 380 \times 10^3 = 408\text{kN}$$

实际试验荷载为:  $N=1040\text{kN}$ ,锚固体未见破坏迹象。

承载力提高值为:  $K=N/N_i=1040/408=2.55$

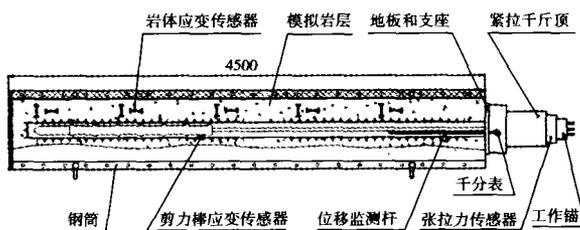


图5 锚索模型测试装置示意图

通过实验,得出内锚固段剪应力分布,与拉力型及压力分散型锚索对比,如图6示。

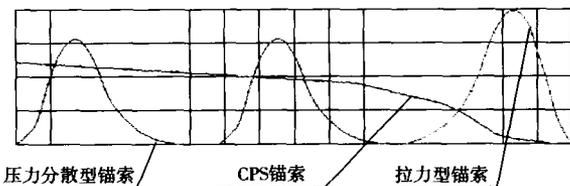


图6 剪力分散型锚索内锚固段剪应力分布图

由图6可以看出,剪力分散型锚索锚固段剪应力峰值更低,剪应力分布更为均匀,更能充分利用有限的内锚固段长度,提高单孔承载力和锚固的可靠性。图7为试验照片。



a.数据采集系统监测CPS锚索张拉过程



b.模型试验中CPS锚索张拉端

图7 CPS剪力分散型锚索模型试验

(下转第38页)

梁,右幅车道改为双向通行。

#### 4. 结论

我们在跨川杨河、浦东运河、罗山路和在龙阳路站等环境下,共运输架设轨道梁839根,轨道梁无一损坏,无任何事故,轨道梁初架设精度达到优良水平,架设速度满足工程进度要求,有效降低了工程成本,充分证明所选用的施工设备

与技术达到了目前的先进水平。

#### 参考文献

- 1、铁路战备业务手册(第一册),铁路战备局(1989年版);
- 2、六四式铁路军用梁手册(增订版),中国铁道建筑总公司(1998年版);

(上接第9页)

#### 6. 结论

(1) 剪力分散型锚索提高了内锚固段锚固体弹性模量,其内锚固段剪应力峰值更低,因而单孔承载力也更高。

(2) 剪力分散型锚索采用了整束挤压技术,其索体断面积小,所需的安装孔径可比常规锚索减小10%~30%,这将节约工程总造价约10%~15%。如果有新材料,剪力分散型锚索的安装孔径的减小值可接近60%。

(3) 剪力分散型锚索内锚固段剪应力分布更加均匀,这将提高内锚固段锚固的可靠性,可靠地减小内锚固段的长度。

(4) 剪力分散型锚索克服了我国传统锚索结构长期工作状态的固有缺陷,具有工况稳定、锚固可靠等优点。其较低的工程投资,必将给我国岩土工程带来巨大效益。

#### 参考文献

- [1] 彭宣茂,傅作新,张子明.岩基中的垂直锚杆分析.岩土工程学报, VOL.13.No.5.
- [2] 尤春安.全长粘结式锚杆的受力分析[J].岩石力学与工程学报, 2000.19(3).
- [3] 徐芝伦.弹性力学·北京:中国人民教育出版社, 1980年
- [4] 程良奎,范景伦等.岩土锚固·北京:中国建筑工业出版社, 2003
- [5] 刘宁,高大水等.岩土预应力锚固技术应用及研究·湖北科学技术出版社, 2002

(上接第33页)

每节钢箱对拉到位后,拆除电源及控制线缆进行后一节钢箱的对接,然后重新连接电源及控制线缆,继续对拉,直至管沟贯通实现东、西两端钢箱的对接。

#### 3.3 钢绞线卸载,撤除设备,完成。

#### 4、结束语

(1) 双向对拉钢箱暗挖施工工艺在昆明呈贡综合管沟工程首次成功应用,为今后的类似工程提供了工程实例和实践经验。

(2) 采用双向对拉钢箱暗穿施工工艺应当注意以下几个问题:

1) 保证索孔的清洁,张拉端首节钢箱结构上应设置钢绞线清洁的空间。同时在施工过程中采取有效措施防止钢绞线泥污,减小清洁工作。

2) 钢绞线锚夹具的工况要求清洁,绝对避

免砂粒进入锚夹具的工作面,一旦砂粒进入会极大可能的造成夹片断裂,导致该锚固单元丧失工作机能。

3) 双向对拉钢箱暗穿施工,钢箱顶进时两侧的钢箱均处于悬浮状况,以6根柔性钢索作为导向,其导向弹性大,钢箱极易走偏,故应严格保证首节钢箱初期方向的精确性。

4) 适当加大索孔直径以适应钢箱的偏移,减小钢绞线与锚固单元中心线的偏角。

5) 安装空间狭小,应减小对拉设备质量、外形尺寸,便于设备在施工过程中检修、维护,采用全自动实时监测、调整系统,提高施工进度。

#### 参考文献

- 1.《昆明呈贡干道综合管沟工程施工图》上海市隧道工程轨道交通设计院·2004