

# 土体中扩大头压力型预应力锚索 研究及工程应用

孙 凯 孙 玥

(海南海凯岩土工程公司 海口 571100)

**摘 要:**本文介绍了国内外现有土层中扩大头锚杆、锚索的研究现状,分析了压力型预应力锚索弹性受力状态,认为土体中扩大头压力型预应力锚索能有效提高锚固力,是值得推荐应用的结构,并对该类型锚索进行了理论分析及应用介绍。

**关键词:**扩大头压力型预应力锚索 受力分析 设计 应用

## 1 问题提出

我国改革开放以来,在沿海地区高层建筑深基坑护壁问题显得非常突出。基坑稳定支护中应用了大量土层非预应力锚杆和预应力锚索。随着建设的发展,城市建筑土边坡和公路土边坡加固应用锚杆和预应力锚索也越来越多。工程实践表明,土层中的锚杆、锚索锚固力很低也很难提高。这是因为土层中钻孔壁与锚杆或锚索锚固体(水泥芯柱)侧面之间的粘结力很低,一般锚固力按下式计算:

$$p_{cr} = \pi DL \tau_{cr} \quad (1)$$

式中:  $p_{cr}$ —极限锚固力;

$D$ —钻孔直径;

$L$ —钻孔长度;

$\tau_{cr}$ —极限粘结力。

现以海口某基坑土层中使用过的土层锚杆拔出试验为例:

海口明珠广场基坑开挖深度11m,坑壁穿过的土层基本是淤泥质粘土。进行锚索锚固力测定时施工3根长10m锚索,钻孔直径110mm。拉拔试验时测得平均总拉拔力为38kN,由此求得:

$$\tau_{cr} = \frac{38kN}{3.14 \times 0.11m \times 10m} = 11kN/m^2$$

该场地岩土工程勘察报告给出土体的抗剪强度为20kN/m<sup>2</sup>,分析认为采用非压力注浆时,由于水泥收缩使锚固体的锚固力小于土体抗剪强度是必然的。

上述工程实例提出了明确的课题,即如何提

高土层锚杆、锚索的锚固力。

## 2 国内外现有土层中扩大头锚杆、锚索研究现状

(1)早在20世纪70年代L.HOBST、J.ZAJIC等人就对扩大头锚杆的应用进行了论述。法国Soletanch公司、原西德Klamm公司、英国Fndedile公司和瑞典Atlas公司先后生产了扩孔钻头并用于工程。

近年来国内也开始研究软土中的锚索、锚杆扩大头方法和施工工艺。概括地可归为:二次高压注浆法、高压旋喷扩孔法和爆炸扩孔法。

(2)上述方法扩孔后安装的锚杆、锚索都是拉力型的。有关论述扩大头锚杆研究的文献有:地基处理手册<sup>[1]</sup>、地基处理工程实例应用手册<sup>[2]</sup>、岩土锚固新技术<sup>[3]</sup>、现代岩土论丛书<sup>[4]</sup>、岩土锚固<sup>[5]</sup>、岩土锚固理论研究之现状<sup>[6]</sup>、预应力锚索锚固长度的确定方法<sup>[7]</sup>、大型船闸闸墙锚杆的分析与设计<sup>[8]</sup>、全长粘结式锚杆的受力分析<sup>[9]</sup>。

上述文献主要研究内容是拉力型扩大头锚杆,关于压力型扩大头锚索的研究未见有系统论文。

## 3 压力型预应力锚索弹性状态受力分析

3.1 2003年孙学毅在河海大学傅作新教授、山东大学尤春安教授成果的基础上得出了压力型预应力锚索锚固体轴向应力 $\sigma$ 和侧壁剪应力 $\tau$ 的近似分布规律。

$$\tau = \frac{PE}{4\pi(1+\mu)b^3 E_b} \cdot Z \cdot e^{-\frac{1}{2}kZ^2} \quad (2)$$

式中:

$$K = \frac{1}{2(1+\mu)b^2} \left( \frac{E}{E_b} \right)$$

$\tau$ —锚固体(水泥芯柱)侧壁剪应力;

$P$ —锚索预应力;

$E$ —岩土体弹性模量;

$E_b$ —锚固体(水泥芯柱)弹性模量;

$b$ —锚固体(水泥芯柱)半径;

$\mu$ —岩土体泊松比。

对(2)式积分,得锚固体(水泥芯柱)的轴力分布:

$$N = pe^{-\frac{1}{2}KZ^2} \quad (3)$$

对(2)式微分,令 $d\tau/dz=0$ ,解得

$$Z = \sqrt{\frac{1}{K}} \quad (4)$$

(3)式为极值位置,将(4)式代入(2)式得

$$\tau_{\max} = \frac{p}{2\pi b} \sqrt{\frac{K}{e}} \quad (5)$$

(5)式为剪应力峰值(最大剪应力)表达式。

由(5)式可以看出,最大剪应力 $\tau_{\max}$ 与预应力 $p$ 成正比,与锚孔半径 $b$ 成反比,与 $E/E_b$ 成正变。

### 3.2 结果分析

(1)剪应力 $\tau$ 分布与岩土体介质弹性模量关系

给定 $E_{\text{岩体}}=60 \times 10^3 \text{MPa}$ ,  $E_{\text{土体}}=10 \text{MPa}$ ,  $\mu_{\text{岩体}}=0.25$ ,  $\mu_{\text{土体}}=0$

在其它条件相同条件下,由(5)式得:

$$\frac{\tau_{\max}^{\text{岩体}}}{\tau_{\max}^{\text{土体}}} = 82$$

上述结果表明岩体中孔壁剪应力峰值比土体中孔壁剪应力峰值大得多。

(2)剪应力 $\tau$ 分布与锚固体弹性模量关系

给定水泥芯柱弹性模量 $E_{\text{水泥}}=2.8 \times 10^4 \text{MPa}$ ,把水泥芯柱换成钢管,钢管与外围水泥组合体的弹性模量 $E_{\text{组合体}}=2 \times 10^5 \text{MPa}$ 。在其它条件同条

件下,由(5)式得:

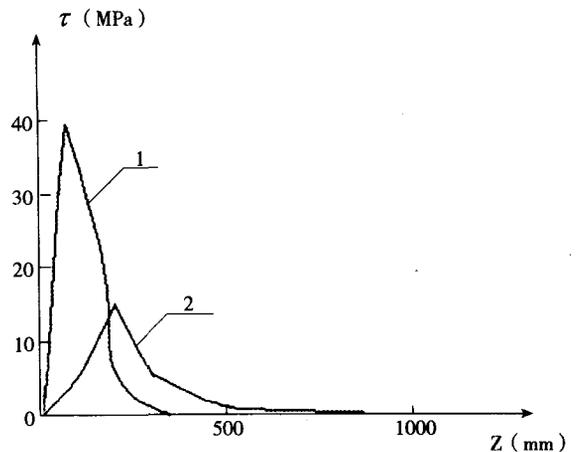
$$\frac{\tau_{\max}^{\text{水泥}}}{\tau_{\max}^{\text{组合体}}} = 2.7$$

上述结果表明,采用钢管与水泥组合体代替水泥芯柱可使孔壁剪应力峰值降低2.7倍,从而起到局部分散 $\tau$ 的效果。

(3)给定锚孔半径 $b=65 \text{mm}$ ,预应力 $P=936 \text{kN}$ ,锚固体为水泥 $E_{\text{水泥}}=2.8 \times 10^4 \text{MPa}$ ;锚固体为钢管与水泥组合体 $E_{\text{组合体}}=2 \times 10^5 \text{MPa}$ 。土体 $E=10 \text{MPa}$ ,  $\mu=0.4$ ,岩体 $E=60 \times 10^3 \text{MPa}$ ,  $\mu=0.25$ 。

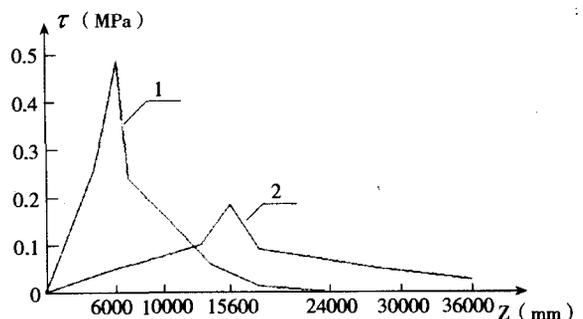
①岩体中锚固体为水泥芯柱和锚固体为钢管与水泥组合体时,孔壁剪应力 $\tau$ 分布绘于图1。

②土体中锚固体为水泥芯柱和锚固体为钢管与水泥组合体时,孔壁剪应力 $\tau$ 分布绘于图2。



1—锚固体为水泥芯柱;  
2—锚固体为钢管与水泥芯柱组合体。

图1 岩体中孔壁 $\tau$ 分布曲线



1—锚固体为水泥芯柱;  
2—锚固体为钢管与水泥芯柱组合体。

图2 土体中孔壁 $\tau$ 分布曲线

③分析图1可以看出,岩体中孔壁剪应力 $\tau$ 非常集中,基本上集中在受力点附近。锚固体为水泥芯柱时,传递长度仅0.4m。锚固体为钢管与水泥组合体时,剪应力峰值减少2.7倍,传递长度1.0m。

分析图2可以看出,土体中孔壁剪应力集中程度远远小于岩体中集中程度。锚固体为水泥芯柱时,传递长度26m。锚固体为钢管与水泥组合体时,传递长度大于36m。

### 3.3 研究结果对压力型预应力锚索结构设计启示

(1) 根据图1的结果,岩体中压力型预应力锚索底端可采用一段钢管替代水泥芯柱。这种结构可使剪应力 $\tau$ 局部分散,并使剪应力 $\tau$ 的峰值降低2.7倍。这相当于3个锚固体的压力分散型锚索结构。

(2) 图2的结果表明,土体中采用压力分散型预应力锚索意义不大。若采用钢管与水泥组合体替代水泥芯柱,会得到更好的效果。由于钢管的强度高不易压坏,使原来担心的两个控制应力 $\sigma$ 与 $\tau$ 减少一个,只剩下 $\tau$ 。同时由于钢管的采用,使剪应力峰值大大降低,使剪应力传递长度大大增加。

(3) 研究结果表明:土体中压力型预应力锚索采用底部扩孔结构比多个锚固体分散结构更有效。

将锚孔底部1m长一段孔径由130mm扩大为300mm,由(2)式求得剪应力 $\tau$ 分布列于表5。

从表5可以看出,锚孔直径由130mm扩成300mm,在1m长度内孔壁剪应力减少7倍。由此可见在土体中底部扩孔结构是一种值得采用的结构。

表5

Z (mm)	2b=130mm	2b=300mm	$\tau_1/\tau_2$
	$\tau_1$ (MPa)	$\tau_2$ (MPa)	
200	0.01399	0.002	6.995
400	0.02793	0.004	6.983
600	0.04177	0.006	6.962
800	0.05546	0.008	6.933
1000	0.06896	0.01	6.896

## 4 土体中扩大头压力型预应力锚索

### 4.1 按锚固体被拔出分析

锚固体指扩大头。假定被拔出时按下述边界破坏。

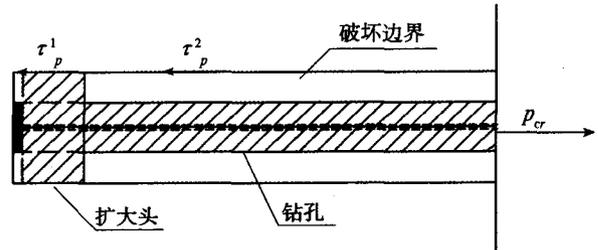


图3 扩大头或压力型预应力锚索破坏模式

#### 4.1.1 极限拉拔力确定

极限状态下 $\tau_p^1$ 、 $\tau_p^2$ 均匀分布,当不考虑锚墩反力作用时,临界拉拔力 $P_{cr}$ 由下式确定

$$P_{cr} = \pi D (l_1 \tau_p^1 + l_2 \tau_p^2) \quad (6)$$

式中:  $P_{cr}$ — 临界拉拔力;

$D$ — 扩大头直径;

$l_1$ — 扩大头长度;

$l_2$ — 钻孔长度;

$\tau_p^1$ — 扩大头侧壁与孔壁间极限粘结力;

$\tau_p^2$ — 土体抗剪强度

(5) 式称强度条件

#### 4.1.2 允许拉拔力确定

允许拉拔力 $P_M$ 按下式确定:

$$P_M = \frac{P_{cr}}{K} \quad (7)$$

工程中一般 $K$ 取1.2

#### 4.1.3 求极限状态下压缩量

压缩量包括扩大头压缩量与土柱压缩量。

##### ① 扩大头压缩量

$$\Delta l_1 = \int_0^{l_1} \frac{N_1(z)}{E_1 A} dz = \frac{(P_{cr} - \frac{\pi D \tau_p^1 l_1}{2}) \cdot l_1}{E_1 A} \quad (8)$$

##### ② 土柱压缩量

$$\Delta l_2 = \int_{l_1}^{l_1+l_2} \frac{N_2(z)}{E_2 A} dz = \frac{(P_{cr} - \pi D \tau_p^1 l_1) \cdot l_2}{2E_2 A} \quad (9)$$

## ③总压缩量

$$\Delta l_p = \frac{(p_{cr} - \frac{\pi D \tau_p^1 l_1}{2}) \cdot l_1}{E_1 A} + \frac{(p_{cr} - \pi D \tau_p^1 l_1) \cdot l_2}{2E_2 A} \quad (10)$$

式中:  $E_1$  — 扩大头弹性模量, 取  $E_1 = 2.8 \times 10^4 \text{MPa}$

$E_2$  — 土柱与水泥芯柱组合模量;

$$E_2 = (E_{\pm} \cdot A_{\pm} + E_{\text{水泥}} \cdot A_{\text{水泥}}) / A$$

$A$  — 扩大头截面积,  $A = \pi D^2 / 4$ 。

$A_{\pm}$  — 土柱截面积,  $A_{\pm} = \pi (D^2 - d^2) / 4$ ,

$A_{\text{水泥}}$  — 水泥芯柱截面积,  $A_{\text{水泥}} = \pi d^2 / 4$ ;

$d$  — 钻孔直径;

$D$  — 扩大头直径。

(10)式称刚度条件。工程中拉出量小于极限状态压缩量时说明未拔出。若拉出量大于极限状态压缩量说明已被拔出。

## 4.1.4 允许压缩量确定

允许压缩量  $\Delta l_{\text{允}}$  按下式确定:

$$\Delta l_{\text{允}} = \frac{\Delta l_p}{K} \quad (11)$$

工程中一般  $K$  取 1.2。

## 4.2 工程应用

某基坑开挖在软粘土中, 钻孔水泥芯柱与孔壁之间允许剪应力  $\tau_p^1 = 10 \text{kN/m}^2$ , 土体抗剪强度  $\tau_p^2 = 20 \text{kN/m}^2$ 。设计给出钻孔直径 0.1m, 钻孔长 8m, 扩孔直径 0.3m, 扩孔长 1.0m, 安全系数  $K$  取 1.2,  $E_1 = 2.8 \times 10^4 \text{MPa}$ ,  $E_{\pm} = 8 \text{MPa}$ ,  $E_2 = 3.8 \times 10^3 \text{MPa}$

(1) 求  $p_{cr}$ 、 $p_M$

$$\begin{aligned} p_{cr} &= \pi D (l_1 \tau_p^1 + l_2 \tau_p^2) \\ &= 3.14 \times 0.3 \text{m} \times (1.0 \text{m} \times 10 \text{kN/m}^2 + \\ &\quad 8 \text{m} \times 20 \text{kN/m}^2) \\ &= 160 \text{kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p_M &= p_{cr} / K \\ &= 160 \text{kN} / 1.2 \\ &= 133 \text{kN} \end{aligned}$$

(2) 求  $\Delta l_p$ 、 $\Delta l_M$

$$\begin{aligned} \Delta l_p &= \frac{(p_{cr} - \frac{\pi D \tau_p^1 l_1}{2}) \cdot l_1}{E_1 A} + \frac{(p_{cr} - \pi D \tau_p^1 l_1) \cdot l_2}{2E_2 A} \\ &= \frac{(160 \text{kN} - \frac{3.14 \times 0.3 \text{m} \times 10 \text{kN/m}^2 \times 1.0 \text{m}}{2}) \times 1.0 \text{m}}{2.8 \times 10^7 \text{kN/m}^2 \times 0.07 \text{m}^2} \\ &\quad + \frac{(160 \text{kN} - 3.14 \times 0.3 \text{m} \times 10 \text{kN/m}^2 \times 1.0 \text{m}) \times 8.0 \text{m}}{2 \times 3.8 \times 10^6 \text{kN/m}^2 \times 0.07 \text{m}^2} \\ &= 0.079 \text{mm} + 2.26 \text{mm} \\ &= 2.34 \text{mm} \\ \Delta l_M &= 2.34 \text{mm} / 1.2 \\ &= 2 \text{mm} \end{aligned}$$

(3) 上例计算表明扩大头的压缩量很小, 可以忽略不计。因此 (10) 式可简化成:

$$\Delta l_p = \frac{(p_{cr} - \pi D \tau_p^1 l_1) \cdot l_2}{2E_2 A} \quad (10')$$

式中:  $l_1$  — 扩大头长度;

$l_2$  — 钻孔长度;

$A = \pi D^2 / 4$ ;

$D$  — 扩大头直径;

$\tau_p^1$  — 土体与水泥芯柱侧壁极限粘结力;

$E_2$  — 土体与水泥芯柱组合压缩模量;

$E_2 = (E_{\pm} \cdot A_{\pm} + E_{\text{水泥}} \cdot A_{\text{水泥}}) / A$

$A_{\pm}$  — 土柱截面积,  $A_{\pm} = \pi (D^2 - d^2) / 4$

$d$  — 钻孔直径

$A_{\text{水泥}}$  — 水泥芯柱截面积,  $A_{\text{水泥}} = \pi d^2 / 4$ 。

## 5 土体中扩大头压力型预应力锚索设计指南

5.1 根据设计要求利用已知条件求极限预应力  $p_{cr}$ 、及允许预应力  $p_M$

$$\begin{aligned} p_{cr} &= \pi \cdot D \cdot (l_1 \tau_p^1 + l_2 \tau_p^2) \\ p_M &= p_{cr} / K \end{aligned}$$

5.2 根据  $p_{cr}$  及已知条件求极限压缩量  $\Delta l_p$  及允许压缩量  $\Delta l_M$ 。

$$\Delta l_p = \frac{(p_{cr} - \pi D \tau_p^1 l_1) \cdot l_2}{2E_2 A}$$

$$\Delta l_M = \Delta l_p / K$$

5.3 当考虑预应力张拉钢绞线伸长量时, 则预应力张拉施工时总的允许伸长量为:

$$\Delta l_M^{\text{总}} = \frac{(p_{cr} - \pi D \tau_p^1 l_1) \cdot l_2}{2KE_2 A} + \frac{[\sigma]}{K_M E} (l_1 + l_2)$$

式中:  $\Delta l_M^{\text{总}}$  — 预应力张拉时允许总伸长量 (近似于千斤顶活塞伸长量);

$p_{cr}$  — 极限预应力;

$\tau_p^1$  — 水泥芯柱侧面与钻孔壁之间极限粘结力;

$l_1$  — 扩孔段钻孔长度;

$l_2$  — 非扩孔段钻孔长度;

$K$  — 安全系数, 基坑工程  $K$  取值一般取1.2—1.5, 建筑边坡工程  $K$  取值1.5。

$A = \pi D^2 / 4$ ;

$D$  — 扩大头直径;

$E$  — 钢绞线弹性模量,  $E = 2 \times 10^5 \text{MPa}$ ;

$[\sigma]$  — 钢绞线抗拉强度,  $[\sigma] = 1860 \text{MPa}$ ;

$K_M$  — 钢绞线拉力许用系数, 取1.34。

※ 求  $K_M$  值公式推导:

采用抗拉强度  $[\sigma] = 1.86 \text{kN/mm}^2$  钢绞线, 单根钢绞线截面积  $S = 140 \text{mm}^2$ /根, 已知  $p_{cr} = 702 \text{kN}$ ,  $K = 1.2$ , 求  $K_M$ 。

① 求钢绞线根数:

$$n = \frac{p_{cr}}{[\sigma] \cdot S} \quad (\text{取整数}) \quad (12)$$

② 按等比例张拉求  $K_M$ :

$$\frac{p_{cr}}{K} = \frac{[\sigma] \cdot S \cdot n}{K_M}$$

$$K_M = \frac{[\sigma] \cdot S \cdot n \cdot K}{p_{cr}} \quad (13)$$

代入已知数据:

$$n = \frac{702 \text{kN}}{1.86 \text{kN/mm}^2 \times 140 \text{mm}^2} = 2.7 \approx 3.0$$

$$K_M = \frac{1.86 \times 140 \times 3 \times 1.2}{702} = 1.34$$

#### 5.4 现场测定孔壁粘结力 $\tau_p^1$

工程施工前必须在现场进行拉拔试验, 测定  $\tau_p^1$  值。

在现场施工3个钻孔,  $D = 110 \text{mm}$ ,  $l = 3.0 \text{m}$ , 灌注一根拉力型预应力锚索, 水泥芯柱强度 C30, 养护15天进行拔出试验。

$$\tau_{p\text{拉拔}}^1 = \frac{p_{cr}}{\pi D l} \quad (14)$$

根据3个钻孔测得  $\tau_p^1$  取平均值作为设计依据。

#### 5.5 计算钻孔土体平均抗剪强度 $\tau_p^2$

假定钻孔与水平地面夹角为  $\theta$ , 则钻孔轴线上任一点处孔壁应力可用两对对称的4个点的应力平均值代替。微分体图及莫尔图如下:

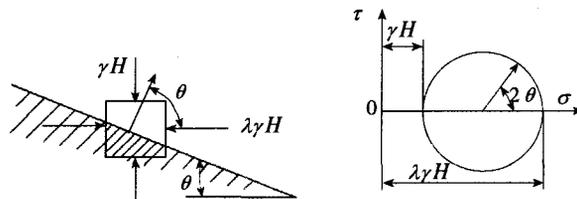


图4 微分体图及莫尔图

由莫尔图知:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_\theta &= \frac{\lambda \gamma H + \gamma H}{2} + \frac{\lambda \gamma H - \gamma H}{2} \cdot \cos 2\theta \\ \sigma_z &= \lambda \gamma H \\ \bar{\sigma} &= \frac{\sigma_z + \sigma_\theta}{2} \\ \tau_p^2 &= c + \bar{\sigma} \cdot \tan \varphi \end{aligned} \right\} (15)$$

式中:  $c$  — 土体粘结力, 由岩土勘察报告提供;

$\varphi$  — 土体内摩擦角, 由岩土勘察报告提供;

$\lambda$  — 土体测压系数, 根据郎肯公式计算;

$\gamma$  — 土体容重, 由岩土勘察报告提供;

$H$  — 钻孔中点距地面高度;

$\theta$  — 钻孔与水平面夹角。

#### 参考文献

- [1] “地基处理编写委员会”. 地基处理手册第11章. 中国建筑工业出版社. 1998年8月第一版.
- [2] 叶书麟主编. 地基处理工程实例应用手册. 中国建筑工业出版社. 1998年3月第一版.
- [3] 岩土锚固新技术. 人民交通出版社. 1998年11月第一版.
- [4] 陈祥福等编. 现代岩土论丛. 同济大学出版社. 2003年12月第一次印刷.
- [5] 程良奎等著. 岩土锚固. 中国建筑工业出版社. 2003年1月第一版.
- [6] 张乐文, 汪稔. 岩土锚固理论研究之现状. 岩土力学第23卷5期. 2002年10月.
- [7] 刘玉堂等. 预应力锚索锚固段长度的确定方法. 岩土锚固工程. 2006年4期.
- [8] 傅作新等. 大型船闸闸墙锚杆的分析与设计. 土木工程学报第32卷第一期. 1999年2月.
- [9] 尤春安. 全长粘结式锚杆的受力分析. 岩土力学与工程学报第19卷第3期. 2005年5月.