

拉力型和压力型预应力锚索 受力分析及工程应用

孙凯¹ 孙玥²

(1 海南海凯岩土工程有限公司 海口 570216 2 海南省第三建筑工程公司 海口 571100)

摘要:根据拉力型、压力型预应力锚索结构特征, 本文将拉力型预应力锚索抽象为在假想滑动面处受一个集中力 P , 将压力型预应力锚索抽象为在锚索孔底处受一个集中力 P 。工程中一般假想滑动面或锚索孔底距岩土体表面较远。基于以上假定和工程条件把预应力锚索归结到空间体内一点受集中力Kelvin问题。文中引用Kelvin应力解求得了拉力型预应力锚索钢绞线侧壁、锚索孔壁剪应力 τ 沿轴向分布, 求得了压力型预应力锚索孔壁剪应力 τ 及正应力 σ 沿轴向分布。

根据本文结果: 建议岩体中拉力型预应力锚索设计时应以钢绞线与注浆体之间粘结强度作为设计依据。建议岩体中压力型预应力锚索在受力端增加一段钢管改进成压力局部分散型预应力锚索。建议土体中压力型预应力锚索采取孔底扩孔改进成扩大头式压力型预应力锚索。

关键词: Kelvin应力解 压力局部分散型预应力锚索 扩大头式压力型预应力锚索

1. 引言

预应力锚索是岩土体锚固中一种主要结构物, 锚索剪应力 τ 和正应力 σ 在轴向的分布规律一直是人们所关注的问题。

Phillips^[1]将拉力型预应力锚索锚固段剪应力分布规律表为下式:

$$\tau_z = \tau_0 e^{-\frac{Az}{d}} \quad (1)$$

式中, d 为锚固体直径, τ_0 、 A 为常数。

尤春安^[2]引用Mindlin位移解得出全长粘结拉力型预应力锚索钢绞线侧壁剪应力及轴力沿锚索长度方向分布规律。

$$\tau = \frac{P}{\pi a} \left(\frac{1}{2} tz \right) \exp\left(-\frac{1}{2} tz^2\right) \quad (2)$$

$$N = p \exp\left(\frac{1}{2} tz^2\right) \quad (3)$$

式中, p 为预应力, a 为钢绞线半径, t 为常数。公式(2)、(3)在推导时略去了孔口处锚墩给岩土体表面的反力, 因此解答是近似的。

孙学毅, 刘璇等人在傅作新教授指导下在前人成果基础上引用kelvin位移解得出压力型预应力锚索孔壁处剪应力分布近似规律和锚固体(水泥芯柱)轴向力沿锚索长度分布近似规律^[3]

$$\tau = \frac{pt}{2\pi b} \cdot z \cdot e^{-\frac{1}{2} tz^2} \quad (4)$$

$$N = pe^{-\frac{1}{2} tz^2} \quad (5)$$

式中, p 为预应力, b 为锚索孔半径, t 为常数。当我们从工程角度和弹性力学严密性角度仔细研究式(1)~式(5)时就会发现这些结果都是不完备的。这是因为位移解很烦, 在一些假设基础上求解必然不完备。另一方面我们要研究的问题是两种材料界面处耦合问题, 难于用解析法求解。本文应用Kelvin问题的应力解直接分析预应力锚索受力。

2. 预应力锚索结构特征描述

2.1 拉力型预应力锚索

拉力型预应力锚索钢绞线与注浆体全长粘结, 假想滑动面以内称自由段, 假想滑动面以外称锚固段。典型的作法是锚固段先注浆, 钢绞线与注浆体、孔壁与注浆体完全粘结。当注浆体强度达到设计要求时进行预应力张拉, 张拉后进行自由段注浆。

基于拉力型预应力锚索的上述结构特征, 规定钢绞线与注浆体间粘结力, 孔壁与注浆体间粘结力同时满足设计要求。国内外大量试验研究表明钢绞线与注浆体间粘结力极限值为3MPa, 岩体和土体与注浆体间粘结力极限值列于表1。

从表1可以看出: 岩体中的锚索钢绞线与注

浆体之间粘结力是主要矛盾,因此岩体中锚索首先要研究钢绞线侧面剪应力沿轴线分布规律。土体中的锚索注浆体与孔壁间粘结力是主要矛盾,因此土体中锚索首先要研究注浆体与孔壁间剪应力沿轴线分布规律。

由于规范规定锚索的预应力 $p \leq 0.65F$ (F 为锚索体抗拉强度),因此拉力型预应力锚索没有必要研究拉力沿轴向分布规律。

表1 岩体和土体与注浆体间粘结力极限值

岩土种类	与注浆体间粘结力极限值 (MPa)	资料来源
玄武岩	6.37	英国-Parker
砂岩	1.73	中国
页岩	0.63	中国
严重风化页岩	0.39	中国
各种沉积变质岩	1.57	德国-Abraham 和 porzig
板岩	1.80	英国-littejonn等
极破碎岩石	0.24	美国-saliman等
淤泥土	0.02	美国-saliman等
硬塑粘土	0.02-0.032	GB50330-2002规范
中密砂土	0.07-0.105	GB50330-2002规范
稍密碎石土	0.06-0.090	GB50330-2002规范
中密碎石土	0.08-0.110	GB50330-2002规范

2.2 压力型预应力锚索

压力型预应力锚索采用无粘结钢绞线,钢绞线与注浆体无粘结,注浆体与孔壁全长粘结。无粘结钢绞线内端(孔底)固定一个金属圆盘,作用在钢绞线上的拉力通过金属圆盘转换为压力,此时注浆体受压,注浆体侧面与孔壁间产生剪应力。

基于压力型预应力锚索结构特征,无论是岩体中压力型预应力锚索还是土体中压力型预应力锚索研究孔壁与注浆体之间剪应力沿轴向分布和注浆体压力沿轴向分布都是必要的。因此公式(4)、(5)对岩体和土体中压力型预应力锚索都有实用价值。但公式(4)、(5)是近似的,不完备。

3. 问题归纳

基于拉力型、压力型预应力锚索的结构特征,认为预应力锚索的受力点一般距离孔口较远,因此把问题归结为无限体内一点受集中力 P 的作用。拉力型预应力锚索坐标原点选取在假想

滑动面上,压力型预应力锚索坐标原点选在孔底金属圆盘处, z 向坐标与锚索孔轴线重合。由于锚索孔是圆形的属轴对称问题,这类问题Kelvin得出了完备的应力解答,现引用如下[4]:

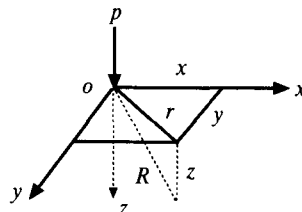


图1 无限大空间体内一点受集中力简图

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{E}{2(1-\nu^2)} B \left\{ \frac{(1-2\nu)z}{R^3} - \frac{3r^2z}{R^5} \right\} \\ \sigma_\theta &= \frac{E}{2(1-\nu^2)} B \frac{(1-2\nu)z}{R^3} \\ \sigma_z &= -\frac{E}{2(1-\nu^2)} B \left\{ \frac{(1-2\nu)z}{R^3} + \frac{3z^3}{R^5} \right\} \\ \tau_{rz} &= -\frac{E}{2(1-\nu^2)} B \left\{ \frac{(1-2\nu)r}{R^3} + \frac{3rZ^2}{R^5} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中, E 为弹性模量; ν 为泊松比; $r = \sqrt{x^2+y^2}$;

$R = \sqrt{x^2+y^2+z^2}$; $B = \frac{(1+\nu)P}{4\pi E}$; P 为集中力。

由式(6)可见,应力分量在坐标原点是奇异的,而在无穷远处为零。

令式(6)中的 $z=0$,可见在坐标平面 $z=0$ 上无正应力作用。这个面上的剪应力为

$$\tau_{rz} = \frac{p(1-2\nu)}{8\pi(1-\nu)r^2} \quad (7)$$

根据剪应力互等定理,在 $z=0$ 面处孔壁侧壁剪应力也不应等于0,其值与式(7)结果相同,它与离力的作用点的距离平方成反比。

4. 应用Kelvin应力解分析拉力型、压力型预应力锚索受力状态

前面对问题抽象时已经把锚索受力归结到Kelvin问题。拉力型预应力锚索抽象为在无限体内部(假想滑动面处)受一个集中拉力 p ,压力型预应力锚索抽象为在无限体内部(锚索孔底处)受一个集中压力 p 。基于这一设定,可以直接引用Kelvin应力解分析拉力型和压力型预应力锚索剪应力 τ 、正应力 σ 沿锚索轴向分布规律。

4.1 拉力型预应力锚索

4.1.1 岩体中拉力型预应力锚索

① 基本参数:

钢绞线半径, $r=8\text{mm}$, 弹性模量 $E_{\text{钢}}=2 \times 10^5\text{MPa}$;

泊松系数 $\nu_{\text{钢}}=0.2$, 拉力 $p=170\text{kN}$;

锚孔半径 $R=60\text{mm}$, 注浆体弹性模量 $E_{\text{水泥}}=2.9 \times 10^4\text{MPa}$;

$\nu_{\text{水泥}}=0.15$, 岩体弹性模量 $E_{\text{石}}=2 \times 10^4\text{MPa}$, $\nu_{\text{石}}=0.15$ 。

② 应用kelvin解计算钢绞线侧壁剪应力沿 z 方向分布。

假定无限体 E 、 ν 与钢绞线 E 、 ν 相同, 则半径 $r=8\text{mm}$ 的柱体侧壁剪应力即为钢绞线侧壁剪应力。应用式 (6) 式 (7) 求得 $r=8\text{mm}$ 处剪应力 τ 沿 z 方向分布列于表2。

表2 钢绞线侧壁剪应力分布

z值/mm	τ /MPa	z值/mm	τ /MPa
0	79.30	140	0.09
20	21.57	160	0.06
40	3.47	180	0.04
60	1.08	200	0.03
80	0.46	400	0.004
100	0.20	800	0.0005
120	0.14	1600	0.00006

③ 应用Kelvin应力解计算注浆体与钢绞线侧面处注浆体侧壁剪应力沿 z 方向分布。

钢绞线与注浆体粘结面属藕合问题, 在弹性状态下这个面上位移是连续的而应力不一定连续, 因此有必要计算这个面上注浆体的剪应力。

假定无限体 E 、 ν 与注浆体 E 、 ν 相同, 则半径 $r=8\text{mm}$ 的柱体侧壁剪应力即为注浆体侧壁剪应力。应用式 (6)、式 (7) 求得 $r=8\text{mm}$ 处注浆体侧壁剪应力 τ 沿 z 方向分布列于表3。

④ 应用Kelvin应力解计算孔壁处注浆体侧壁剪应力沿 z 方向分布。

假定无限体 E 、 ν 与注浆体 E 、 ν 相同, 则半径 $r=60\text{mm}$ 的柱体侧壁剪应力即为注浆体侧壁剪应力。

应用式 (6)、式 (7) 求得 $r=8\text{mm}$ 处注浆

体侧壁剪应力 τ 沿 z 方向分布列于表4。

⑤ 应用Kelvin应力解计算孔壁剪应力沿 z 方向分布。

假定无限体 E 、 ν 与岩体 E 、 ν 相同, 则半径 $r=60\text{mm}$ 的柱体侧壁剪应力即为孔壁的剪应力。

应用式 (6)、式 (7) 求得 $r=60\text{mm}$ 处孔壁剪应力 τ 沿 z 方向分布列于表5。

表3 钢绞线侧壁处注浆体剪应力分布

z值/mm	τ /MPa	z值/mm	τ /MPa
0	87.08	140	0.085
20	20.94	160	0.057
40	3.36	180	0.040
60	1.05	200	0.029
80	0.45	400	0.0037
100	0.23	800	0.0005
120	0.13	1600	0.00006

表4 岩体锚索孔壁处注浆体剪应力分布

z值/mm	τ /MPa	z值/mm	τ /MPa
0	1.5480	140	0.4010
20	1.8880	160	0.3190
40	2.0680	180	0.2380
60	1.7200	200	0.1810
80	1.2520	400	0.0263
100	0.8750	800	0.0034
120	0.6130	1600	0.00004

表5 岩体锚索孔壁剪应力分布

z值/mm	τ /MPa	z值/mm	τ /MPa
0	1.5481	140	0.43725
20	1.8883	160	0.31882
40	2.0677	180	0.23779
60	1.7202	200	0.18115
80	1.2516	400	0.02623
100	0.87525	800	0.00341
120	0.61322	1600	0.00043

4.1.2 土体中拉力型预应力锚索

① 基本参数:

钢绞线半径 $r=8\text{mm}$, $E_{\text{钢}}=2 \times 10^5\text{MPa}$, $\nu_{\text{钢}}=0.2$, 拉力 $p=170\text{kN}$; 锚孔半径 $R=60\text{mm}$, $E_{\text{水泥}}=2.9 \times 10^4\text{MPa}$, $\nu_{\text{水泥}}=0.15$, 土体弹性模量 $E_{\text{土}}=20\text{MPa}$, $\nu_{\text{土}}=0.4$ 。

② 在拉力 $P=170\text{kN}$ 作用下钢绞线侧壁剪应力沿 Z 方向分布同表2, 注浆体在钢绞线侧面处剪应力沿 Z 方向分布同表3。

③应用Kelvin应力解求得注浆浆体在锚孔壁处侧面剪应力沿 z 方向分布同表5, 锚索孔壁剪应力 τ 沿 z 方向分布于列表6。

表6 土体锚索孔壁剪应力分布

z值/mm	τ /MPa	z值/mm	τ /MPa
0	0.62662	140	0.52369
20	1.33755	160	0.38385
40	2.02691	180	0.28733
60	1.88313	200	0.21946
80	1.43471	400	0.032052
100	1.02659	800	0.004172
120	0.72861	1600	0.000527

4.2 压力型预应力锚索

由于钢绞线与注浆体无粘结, 钢绞线沿 z 方向任意截面处拉力都等于 P , 此时注浆体为锚固体。我们要研究的应力分布有两方面, 其一锚索孔壁处注浆体侧面剪应力 τ 沿 z 方向分布和锚索孔壁剪应力 τ 沿 z 方向分布; 其二注浆体压应力 σ 沿 z 方向分布。

4.2.1 岩体中压力型预应力锚索

①基本参数:

压力 $P=170\text{kN}$, 锚索孔半径 $R=60\text{mm}$, 注浆体弹性模量 $E_{\text{水泥}}=2.9 \times 10^4\text{MPa}$, 泊松系数 $\nu_{\text{水泥}}=0.15$, 岩体弹性模量 $E_{\text{岩}}=2 \times 10^4\text{MPa}$, $\nu_{\text{石}}=0.15$ 。

②应用Kelvin应力解求得锚索孔壁处注浆体侧壁剪应力 τ 沿 z 方向分布同表4, 锚索孔壁剪应力 τ 沿 z 方向分布同表5。

③应用Kelvin应力解求锚固体压应力 σ 沿轴向分布。

分析式(6)可知 σ_z 与 r 有关, 除坐标原点而外, 随着 r 的增大 σ_z 变小。代入给定的参数, 求得: $r=0$ 处注浆体中 σ_z 沿 z 方向分布列于表7, $r=60\text{mm}$ 处注浆体中 σ_z 沿 z 方向分布列于表8。

表7 锚索孔轴线上压应力分布($r=0$)

z值/mm	τ /MPa	z值/mm	τ /MPa
0	0	140	1.502990
20	73.646496	160	1.150727
40	18.411624	180	0.909216
60	8.182944	200	0.736465
80	4.545093	400	0.184116
100	2.945860	800	0.046029
120	2.045736	1600	0.011573

表8 锚孔壁处压应力分布($r=R$, 锚孔半径)

z值/mm	τ /MPa	z值/mm	τ /MPa
0	0	140	1.020261
20	0.629435	160	0.850196
40	1.378495	180	0.713359
60	1.720227	200	0.603837
80	1.668790	400	0.174895
100	1.458749	800	0.045436
120	1.226438	1600	0.011470

4.2.2 土体中压力型预应力锚索

①基本参数:

压力 $P=170\text{kN}$, 锚索孔半径 $R=60\text{mm}$, $E_{\text{水泥}}=2.9 \times 10^4\text{MPa}$, $\sigma_{\text{水泥}}=0.15$, 土体弹性模量 $E_{\text{土}}=20\text{MPa}$, $\nu_{\text{土}}=0.4$ 。

②应用Kelvin应力解求得锚索孔壁处注浆体侧壁剪应力 τ 沿 z 方向分布同表4, 锚索孔壁剪应力 τ 沿 z 方向分布同表6。

③应用Kelvin应力解求得锚索注浆体压应力 σ 沿 z 方向分布同表7、表8。

5. 计算结果分析

工程中采用的 $\phi 15.24$ 单根钢绞线预应力设计值为 170kN 。国内外大量试验得出钢绞线与注浆体的粘结强度为 3MPa 。以上两点作为计算分析的前提条件。

5.1 拉力型锚索

5.1.1 岩体中拉力型锚索

①从表2、表3可以看出钢绞线与注浆体之间剪应力主要集中在拉力端附近 $0 \sim 50\text{mm}$ 一段, 其值大于 3MPa 。这个数值已经大于钢绞线与注浆体之间的粘结强度。在这段长度上钢绞线与注浆体之间可能产生剪移, 剪应力分布将向深处转移。

②从表4、表5可以看出注浆体与锚索孔壁之间剪应力也集中在拉力端附近($0 \sim 200\text{mm}$), 最大值为 1.548MPa 。这个数值小于玄武岩、砂岩、板岩等岩体与注浆体之间粘结强度。

③基于以上两点分析, 认为岩体中拉力型锚索钢绞线与注浆体之间粘结强度是设计的基础。本文认为岩体中拉力型锚索应以钢绞线与注浆体之间粘结强度作为计算锚固段长度的依据较为合理。

5.1.2 土体中拉力型锚索

①钢绞线与注浆体之间剪应力分布与岩体中锚索相同(见表2、表3)。注浆体与锚索孔壁间剪应力分布见表5、表6。从表5、表6可以看出,土体中拉力型锚索注浆体与锚索孔壁间剪应力也集中在拉力端附近,在0~500mm长度内剪应力值大于0.02 MPa,即大于或等于土体与注浆体之间粘结强度。

②上述计算结果表明土体中拉力型锚索设计计算时比岩体中复杂,即要考虑钢绞线与注浆体之间的粘结强度,也要考虑注浆体与锚索孔壁间粘结强度。

③基于以上两点分析,认为土体中拉力型预应力锚索有必要建立最小锚索孔径概念。

5.2 压力型锚索

5.2.1 岩体中压力型锚索

①从表5中可以看出岩体中压力型锚索孔壁剪应力主要集中在压力点附近(0~400mm)。

②从表7、表8可以看出岩体中压力型锚索注浆体轴向压力 σ 分布也集中在压力点附近(0~400mm)。

③岩体中压力型锚索孔壁剪应力 τ 沿 z 方向分布绘于图2。注浆体(锚固体)正应力 σ 沿 z 方向分布绘于图3。

5.2.2 土体中压力型锚索

①从表6中可以看出,土体中压力型锚索孔壁剪应力 τ 集中在压力点附近(0~600mm)。

②锚索注浆体轴向压力 σ 分布同样集中在压力点附近。

③从图2可以看出,锚索孔径相同条件下,在 $z=0$ 处土体中压力型锚索 τ 值远小于岩体中 τ 值,但土体中 τ 的峰值基本与岩体中峰值相等。

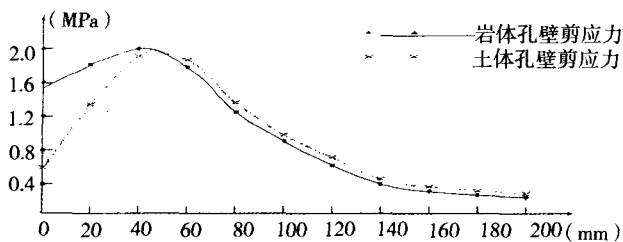


图2 压力型预应力锚索孔壁剪应力沿轴向分布

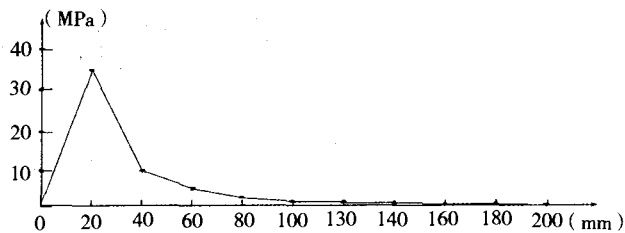


图3 压力型预应力锚索注浆体(锚固体)正应力 σ 沿轴向分布

6. 几点结论

(1) 不论是拉力型锚索还是压力型锚索孔壁剪应力都集中在受力点附近。

(2) 孔壁剪应力集中度与介质的泊松系数有关,泊松系数大剪应力集中度小,泊松系数小剪应力集中度大。

(3) 岩体中拉力型锚索剪移首先在钢绞线与注浆体之间发生,因此建议岩体中拉力型锚索锚固段长度设计以钢绞线与注浆体间粘线强度作为计算依据。

(4) 压力型锚索设计时受力点附近孔壁剪应力 τ 和轴向应力 σ 必须同时满足强度条件。根据本文和参考文献[3]的结果建议岩体中压力型锚索在孔底钢质圆盘前面焊结长60~120cm一段厚壁钢管。它起压力局部分散作用,同时也大大提高了注浆体的抗压强度。

(5) 拉力型锚索与压力型锚索进行比较可以看出,压力型锚索具有明显的优越性。

①文中岩体中锚索算例在 $z=0$ 处拉力型锚索钢绞线与注浆体间剪应力 $\tau_{拉}=83.19\text{MPa}$,压力型锚索孔壁剪应力 $\tau_{压}=1.55\text{MPa}$ 。由于压力型锚索使剪应力直接分散在孔壁上,大大改善了锚固体的受力状态。

②压力型锚索除了在岩体中改进成压力局部分散型结构外,在土体中压力型锚索建议改进成孔底扩大头式压力型锚索。本文的算例中锚索底部长1000mm一段孔径由 $r=60\text{mm}$,扩大到 $r=100\text{mm}$ 时则 $\tau=0$ 处剪应力 τ 由0.627 MPa减小到0.226 MPa。

参考文献

- [1] Stillbirg B Experiments on the distribution of steel cables for rock reinforcement in hard rock [Doctoral thesis D]
- [2] 尤春安. 全长粘结式锚杆的受力分析. 岩石力学与工程学报, V01.19 NO.3
- [3] 孙学毅, 刘璇等. 压力型预应力锚索受力分析. 岩石力学与工程学报
- [4] 吴家龙. 弹性力学(新一版). 上海: 同济大学出版社