

预应力锚索结构分析及受力思考

孙学毅 钟瑞辉 刘璇 陈标

(柳州欧维姆机械股份有限公司 545005)

摘要:文中首先介绍了拉力型、压力型锚索结构。在归纳拉力型、压力型锚索受力分析基础上提出压力型锚索有2个控制应力,其一水泥芯柱被压坏的应力;其二孔壁产生剪移破坏应力。在此基础上提出:采用钢梁代替水泥芯柱,产生一种新压力型锚索,称预应力锚梁。预应力锚梁使担心的2个控制应力只剩下孔壁剪应力 τ 了。在其它条件相同情况下采用钢梁代替水泥芯柱,则孔壁处最大剪应力 τ_{\max} 可减小2.67倍。最后分析了锚索中因变温产生的应力,指出:温度应力对锚索(杆)的影响是不可忽视的。

关键词:Mindlin 位移解、Kelvin 位移解、控制应力、 τ_{\max} 、预应力锚梁、温度应力

前言

预应力锚索在岩土锚固工程中应用越来越广泛,其结构也发展成多种。大体上可分为拉力型、拉压型、压力型、分散压力型、压力局部分散型和预应力锚梁。一般而言,锚索分类主要依据水泥芯柱受力状态而命名。

近年来一些学者对预应力锚索受力进行较多研究和分析,并得出一些可喜的成果。本文在读书笔记基础上进行了归纳以求讨论。本文重点讨论拉力型、压力型锚索和预应力锚梁。

1. 拉力型锚索

拉力型锚索结构如图1示。

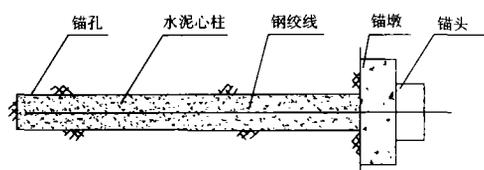


图1 拉力型锚索结构

拉力型锚索采用粘结钢绞线,即钢绞线与水泥芯柱间全长粘结、水泥芯柱与孔壁也全长粘结。施加预应力后通过锚墩反力实现对岩土体的锚固。

由于水泥芯柱与钢绞线间粘结力较大(一般为2.5~3.5MPa),水泥芯柱与岩土体之间粘结力较小(岩石一般为0.6~1.5MPa,土体一般为0.05~0.2MPa)。因此对钢绞线而言学者们从工程角度出发只注意轴力 σ 的分布,对岩土体与水

泥芯柱而言只注意剪应力 τ 的分布。

由于全长粘结,锚索在轴向上各点 σ 、 τ 的分布是变化的,现取一横截面来研究它的平衡,可用微元体来表示(见图2)。

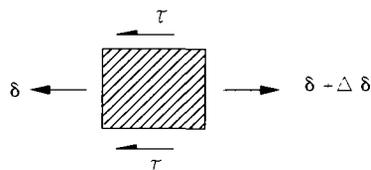


图2 拉力型锚索微元体平衡力系

1.1 全长粘结锚杆(索)的作用与软土地基中桩的作用相似,两者都是通过杆件将荷载传给岩土体,因此在研究弹性条件下锚杆(索)的受力特点时,可以借用桩基研究的一些成果。迄今,弹性介质中受纵向力作用下的直桩的分析,大都以MindLin解为基础。1936年MindLin发表了半无限固体中受集中力作用时的位移解^[1],利用该解答可以求得桩顶受集中力作用下的桩周剪力和桩尖压力^[2]。分析结果指出,当杆件长度 L 与杆件直径 d 之比 L/d (长径比)为一定时,杆件的受力特点与材料的刚度系数 K 有很大关系^[3],

$$K = \frac{\text{杆件的弹性模量}}{\text{地基的弹性模量}} \quad (1)$$

现在利用这个研究结果来分析拉力型全长粘结锚索受力。

已知锚杆(索)体的 $E=2 \times 10^5 \text{MPa}$,则求得:

$K_{\text{硬岩}}=3\sim 10$, $K_{\text{软岩}}=100\sim 200$,

$K_{\text{软土}}=3000\sim 20000$

上述分析结果表明:当 $K=5000$, $L/d=25$ 时,当杆体受到纵向荷载作用时,除了沿杆长受到较均匀的杆周剪力外,杆的内端还受到一定压力。当 $K=500$, $L/d=50$ 时,杆周剪力向杆的上部集中,杆的内端压力显著减小。当 $K=5$, $L/d=100$,杆体受到纵向力作用时,几乎只在杆顶附近的小范围内集中作用着杆周剪力,离开杆顶稍远,杆周剪力便急剧减小并迅速趋向于零。

上述研究结果还表明拉力型锚杆(索)的主要受力段(指杆周剪应力集中作用的杆段)硬岩中一般在 $30d\sim 50d$ 之间,软岩在 $100d\sim 150d$ 之间,软土在 $200d\sim 250d$ 之间^[4]。

1.2 拉力型锚索解析分析

全长粘结拉力型锚索的解析分析尤春安^[5]、曹国金^[6]在Mindlin位移解的基础上得出:

锚杆(索)所受的剪应力沿杆体分布为

$$\tau = \frac{PKZ}{2\pi r} e^{-\frac{1}{2}KZ} \quad (2)$$

$$\text{式中: } K = \frac{1}{(1+\mu)(3-2\mu)r^2} \left(\frac{E}{Ea} \right)$$

P —锚杆(索)受的拉力

锚杆(索)轴力沿杆体分布为

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

本文作者推导了上述表达式,证实无误,认为是有进展性的研究。上式推导过程中作了以下假设:

①假设安装在岩土体中的锚杆为半无限长,锚杆(索)与粘结材料之间的变形处于弹性状态。

②在孔口处,岩土体的位移与锚杆(索)的总伸长量相等。

本文认为假设①可以通过,但假设②与事实不符。论证如下:

A、实际上是给锚索一个预应力(拉力),通过锚墩给孔口岩土体一个反力(压力)来实现

对岩土体的锚固作用。其力学模型如图3。

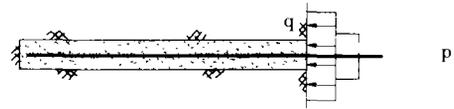


图3 拉力型锚索受力状态

由于在孔口(岩土体表面)作用有均布压力 q ,它的积分等于 $-P$,可把问题归结为弹性半空间表面受集中力作用的Boussinesq,J.Y.解答(1885)。下面我们写出特殊情况,Boussinesq与Mindlin位移解的讨论:

Boussinesq位移解:

在 $Z=0$ 平面上(岩土体表面):

$$W_{(z=0)} = \frac{(1-u^2)P}{\pi Er} \quad (4)$$

式中: $r = \sqrt{x^2 + y^2}$

显然在原点($x=y=0$)处(4)式不成立。

Mindlin位移解:

在 $z=0$ 平面上(岩土体表面):

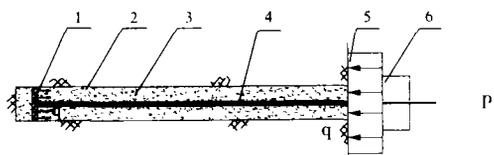
$$W_{(z=0)} = \frac{(1-u^2)P}{\pi Er} \quad (5)$$

上述结果表明(4)式与(5)式相同,因此在原点($x=y=0$)处(5)式也不成立。反之,除在原点外,各点的位移都是正确的。此时可以采用弹性力学叠加原理分析问题。

B、如众所知,弹性力学求解时必须同时满足平衡方程、几何方程和物理方程。文献(5)、(6)在求解时未考虑反力 q 的作用同时也未考虑岩土体表面变形,即求解时平衡方程、几何方程(位移条件)都不满足,认为有待完善。

2. 压力集中型锚索

自从无粘结钢绞线在预应力锚索中应用以来,锚索的结构有很大发展。典型结构如图4所示。



1-钢质承载圆盘 2-锚索孔 3-水泥芯柱
4-无粘结钢绞线 5-锚墩 6-锚头

图4 压力型锚索结构

2.1 观察图4, 可认为施加预应力P以后, 压力型锚索可作为两端固定的压杆问题来考虑。由于钢绞线为无粘结, 拉力P按着原来大小通过承载圆盘转换成压力P作用在水泥芯柱端面上。现在来分析压杆产生几种破坏的可能。

① 两端固定压杆弹性失稳

$$P_{cr} = \frac{4\pi^2 EI}{L^2} \quad (6)$$

式中: P_{cr} —弹性失稳临界压力;

E —杆体弹性模量;

I —杆体截面模量;

L —杆体长度。

分析式(6)可以看出, 水泥芯柱的弹性模量 E 越大, 水泥芯柱的截面模量越大, 水泥芯柱能承受的压力越大。反之水泥芯柱越长(长锚索)能承受的压力越小。

由于水泥芯柱在钻孔中(弹性介质中的压杆), 作者认为这种失稳不大可能, 这是指直杆而言。若锚索孔轴线是一根空间曲线, 当水泥芯柱与孔壁粘结力很小时, 不排除折断破坏的可能。

② 承载圆盘附近水泥芯柱压坏。

工程中常用的钻孔直径130mm, 拉力为930kN, 水泥芯柱抗压强度20MPa。根据这些参数求得: 承载圆盘界面处压应力 $\sigma_{压}=71\text{MPa}$ 。由于71MPa远大于20MPa, 即使在孔壁与水泥芯柱之间有一定的粘结力, 承载圆盘附近的水泥芯柱也可能被压坏, 至少发生屈服。

③ 孔壁与水泥芯柱间粘结力对锚索应力传递规律的影响。

文献[3][4][5][6][7][8][9][10][11]都定性的分析了锚杆轴力、剪力分布规律。下面分析一种特殊情况, 即假定孔壁与水泥芯柱无粘结力。由于是空间轴对称, 可把问题简化成平面应力状态。考虑锚墩弹性模

量较高, 尺寸比钻孔直径大得多, 假定孔壁不发生变形, 则水泥芯柱可看作高为 h 的弹性板A(弹性模量 E , 泊松比 μ)放入—刚性基座B内。

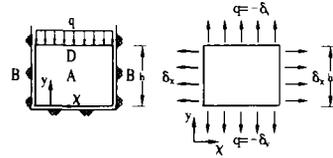


图5 孔壁无剪应力条件下压力型锚索水泥芯柱受力分析

如图5所示, D边界上作用均匀压力 q , 板内为均匀平面应力状态, 其中 σ_y 已知: $\sigma_y = -q$, 因此

$$E \varepsilon_x = \sigma_x - \mu \sigma_y = \sigma_x + \mu q$$

$$E \varepsilon_y = \sigma_y - \mu \sigma_x = -q - \mu \sigma_x$$

由于板在 x 方向无变形, 故

$$\varepsilon_x = 0$$

将 ε_x 代入可得应力 σ_x 和 y 方向的应变 ε_y :

$$\sigma_x = -\mu q, \quad \varepsilon_y = -q \frac{1-\mu^2}{E}$$

由求得的应变 ε_y 通过积分得到位移 u :

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \varepsilon_y \rightarrow u(y) = \int \varepsilon_y dy = -q \frac{1-\mu^2}{E} y + c$$

由于下边界没有位移, 即 $u(0) = 0$, 因此 $c = 0$, 由此得到上边界位移

$$u_d = |u(h)| = \frac{1-\mu^2}{E} qh \quad (7)$$

分析式(7)可以看出, 当不考虑孔壁水泥芯柱粘结力条件下, 承载圆盘的位移与 q 、 h 成正比, 与 E 成反比, 同时与 μ 有关。

现以苏北淮安船闸淤泥质粘土中压力型锚索为例:

已知: 水泥芯柱 $E = 2.8 \times 10^4 \text{MPa}$, $\mu = 0.3$, 抗压强度

$$\sigma_{压} = 20 \text{MPa}, \quad h = 20 \text{m}, \quad q = 15 \text{MPa}$$

代入(7)式得: $u_d = 9.8 \text{mm}$ 。淮安船闸工程实践表明当 $q = 15 \text{MPa}$ 时, 承载圆盘(d 边界)的位移已超过35mm。

分析原因认为：一种可能是假设侧向无变形（ $\varepsilon_x=0$ ）与事实不符。如果是这样，软土中的压力型锚索真的会发生水泥芯柱折断现象。另一种可能是锚索施工工艺引起的。目前国内压力型锚索（包括压力分散型）安装工艺是先放索后注浆，放索时常因孔内泥土或岩粉发生“卡索”现象。这时不得不把索体拔出一段然后再下放，有时这种动作会重复几次，其结果造成在承载圆盘面上形成一个“软垫层”，由于“软垫层”的存在，会夸大承载圆盘处的压缩变形。

3. 拉力型、压力型锚索小结

归纳拉力型、压力型锚索以上的分析可以看出，通过现场试验研究、室内模型试验研究、解析分析、有限元数值分析，得出以下几点结论。

3.1 锚索（杆）轴向力 σ 分布、前应力 τ 分布与K值有关（ K =杆体弹性模量/岩土体弹性模量），当K越小时， σ 、 τ 就越集中在受力点附近。

3.2 室内实验和工程实践都表明K越小时孔壁与水泥芯柱间粘结力越大。这就导致 σ 、 τ 在受力点附近越集中。

3.3 以上分析表明受力点附近的应力 σ 、 τ 是决定锚索承载力的控制应力。 σ 、 τ 的分布规律及量值决定着锚索的工作状态。

3.4 无粘结钢绞线在锚索中的应用产生了压力型锚索。压力型锚索结构受力更明确，预应力张拉后我们要研究的不是钢绞线中的 σ 分布而是水泥芯柱中的 σ 分布。

3.5 在压力型锚索中 K =水泥芯柱弹性模量/岩土体的弹性模量。一般 $E_{\text{水泥}}=2.8 \times 104\text{MPa}$ ， $E_{\text{钢材}}=2 \times 105\text{MPa}$ ，即 $E_{\text{钢材}}/E_{\text{水泥}}=7$ 。

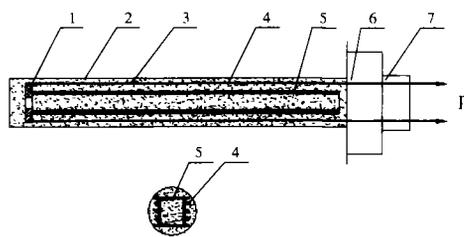
由此推理在同样岩土体条件下，压力型锚索比拉力型锚索中K值低得多，这必然导致压力型锚索中的 σ 、 τ 更集中。

3.6 前面例举工程中的936kN级压力型锚索已经导致承载圆盘附近水泥芯柱超载。基于以上分析，提出用钢梁代替水泥芯柱称预应力锚梁。

4. 预应力锚梁

预应力锚梁是一种新型压力型锚索，典型的

预应力锚梁结构如下图6示。



1-承载圆盘 2-钻孔 3-水泥浆体 4-无粘结钢绞线
5-钢梁 6-锚墩 7-锚头

图6 预应力锚梁结构

预应力锚梁量化分析正在采用不连续介质界面元法进行研究。这里仅应用已有的研究成果提出几点定性认识。

4.1 采用钢梁代替水泥芯柱使原来担心的2个控制应力 σ 和 τ 减少一个，只剩下 τ 。

4.2 采用钢梁代替水泥芯柱使K值提高7倍，这就使 τ 值的集中程度大为减小。其效果相当于压力局部分散。

4.3 将压力型锚索抽象为两端固定的压杆，则允许预应力 P 为

$$P = \frac{4\pi^2 EI}{L^2} \quad (8)$$

分析（8）式可以看出，由于 $E_{\text{钢材}}$ 比 $E_{\text{水泥}}$ 大得多，在锚索钻孔直径相同条件下，预应力锚梁允许的预应力比常规压力型锚索允许的预应力大得多。

从（8）式还可以看出，预应力锚梁不依靠增加锚固段长度来提高锚固力。它靠提高材料弹性模量 E 和截面模量 I 来提高锚固力。

预应力锚梁这种优势在边坡底部加固中更能发挥。如936kN级锚索采用预应力锚梁长度只需7m，采用压力型常规锚索长度不小于21m。

4.4 公式（8）是在空气中两端固定的压杆稳定方程，而预应力锚梁是在弹性介质中的压杆稳定问题。这就是说，预应力锚梁的实际锚固比力（8）式的结果还要大。

4.5 工程实践表明，预应力锚梁施工工艺比常规的压力型锚索可靠得多。预应力锚梁一般比

较短,刚度大,易于安装。预应力锚梁不需要专门注浆管,依靠钢梁中空部分注浆,浆液由承载圆盘中心处出浆孔流出完成孔壁注浆。

5. 温度应力对锚索(杆)的影响

5.1 无粘结钢绞线温度应力分析

设定预应力锚索张拉时的温度为 T_0 ,锚索(杆)在工作状态下温度为 T ,则变温 ΔT 必然在钢绞线中产生应力。现研究温度应力 $\sigma(x)$ 沿索(杆)长的分布。先不考虑预应力,把问题抽象为一个原始无应力两端夹持的杆,截面积为 A ,受到沿 x 方向线性变化的温升。见图7。

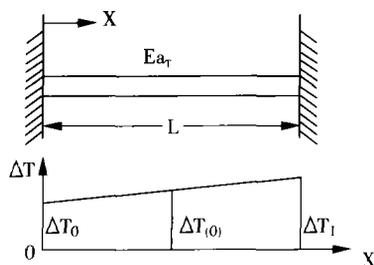


图7 变温引起锚索(杆)应力变化力学模型

已知钢绞线的膨胀系数为 α_T ,弹性模量为 E ,求应力和位移分布。由于杆受静不定支承,求解时必须满足平衡条件、运动关系和弹性定律。利用 $n=0$ 和 $\sigma=N/A$,得

$$\sigma' = 0, \quad \varepsilon = u', \quad \varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \alpha_T \Delta T(x)$$

$$\text{其中 } \Delta T(x) = \Delta T_0 + (\Delta T_1 - \Delta T_0) \frac{x}{L}$$

代入后得到位移微分方程

$$u'' = \alpha_T \Delta T' = \frac{\alpha_T}{L} (\Delta T_1 - \Delta T_0)$$

积分两次得到

$$u' = \frac{\alpha_T}{L} (\Delta T_1 - \Delta T_0) x + C_1$$

$$u = \frac{\alpha_T}{L} (\Delta T_1 - \Delta T_0) \frac{x^2}{2} + C_1 x + C_2$$

由 $u(0) = 0$,得 $C_2 = 0$

$$\text{由 } u(L) = 0, \text{ 得 } C_1 = -\frac{\alpha_T}{2} (\Delta T_1 - \Delta T_0)$$

于是位移分布为:

$$u(x) = \frac{\alpha_T L}{2} (\Delta T_1 - \Delta T_0) \left(\frac{x^2}{L^2} - \frac{x}{L} \right) \quad (9)$$

“恒定”应力为:

$$\sigma = E(u' - \alpha_T \Delta T) = \frac{\alpha_T L}{2} (\Delta T_1 - \Delta T_0) E \quad (10)$$

当变温在索(杆)体均匀分布时, $\Delta T_1 = \Delta T_0$,则 $u(x)$ 为零,变温应力 $\sigma = \alpha_T \Delta T_0 E$ 。

以上定性分析表明变温 ΔT 确实会使锚索中钢绞线产生应力和位移,这个应力和位移必然影响锚索(杆)的工作状态。特别是对压力分散型锚索影响更为有害。

5.2 全长粘结锚索(杆)温度应力分析

全长粘结锚索(杆)的温度应力分析傅作新教授在三峡船闸边坡锚杆设计中进行了深入分析[4]。全长粘结锚索(杆)变温除了产生轴向应力 σ 外,还在孔口附近产生巨大的剪应力 τ 。采用有限元分析结果孔口处变温在锚杆中产生的剪应力可达300kN,但距孔口25cm处变温在锚杆中产生的剪应力只有5kN。在此分析的基础上文献[4]给出结论:建议全长粘结锚索(杆)在孔口处设置一个自由段,自由段长度为锚索(杆)直径的14倍。

6. 结束语

6.1 本文在归纳已有研究成果基础上确定不论是拉力型锚索还是压力型锚索,在受力点附近剪应力 τ 都是呈指数曲线分布。其集中程度决定于杆体弹性模量与岩土体弹性模量之比。

6.2 本文认为文献[5]、[6]是有进展性的成果,也是本文进一步分析问题时所依据的成果之一。但是本文认为文献[5]、[6]在求解过程中平衡方程未考虑孔口处锚墩反力作用,位移条件未考虑反力作用产生的沉陷 W ,这是不足之处。

6.3 本文强调指出:文献[5]、[6]分析的结果(拉力型锚杆)是杆体侧面剪应力 $\tau_{杆}$,而人们所关心的是孔壁剪应力 $\tau_{孔}$ 分布规律。工程中应用时

应把 $\tau_{杆}$ 映射成 $\tau_{孔}$ 。

6.4 对于压力型锚索,无论是引用文献[5]、[6] (Mindlin位移解)的结果,还是引用Kelvin位移解的结果,此时杆体是水泥芯柱, r 是孔径,得出的是孔壁剪应力 $\tau_{孔}$ 分布规律。

6.5 基于1~4的分析,压力型锚索担心的控制应力有2个,其一是承载圆盘附近水泥芯柱压坏;其二是孔壁发生剪移破坏。本文提出把水泥芯柱换成钢梁,使担心的控制应力减少一个,只剩下孔壁剪应力。

6.6 采用钢梁代替水泥芯柱,根据文献[1]~[8]得出:

孔壁处 τ_{max} 可降低2.67倍。

6.7 根据文献[1]~[8]得出:

在同样条件下,孔壁为岩石 ($E=60 \times 103\text{Mpa}$, $\mu=0.25$)时,孔壁处 $\tau_{max}^{岩}$ 是孔壁为土体 ($E=10\text{Mpa}$, $\mu=0.4$)时孔壁处 $\tau_{max}^{土}$ 的30~80倍,即 $\tau_{max}^{岩} = (30\sim 80) \tau_{max}^{土}$ 。这使我们认识到:在土体中设计压缩型锚索时,孔壁剪应力 τ 可按均匀分布取值。这点与软土中磨擦桩设计是一样的。

例如:孔径为165mm、孔深6m的预应力锚梁,当孔壁许用剪应力为0.5N/mm时,允许的预

应力为1500kN。

6.8 文中最后分析了变温在锚索中引起的应力,认为温度应力是不可忽视的。

参考文献

- 1、R.D.Mindlin, Force at a Point in the Interior of a semi-Infinite Solid, Physics, 1936, 7:196.
- 2、H.G.Poulos, Settlement of Pile Foundations. In Numerical Methods in Geotechnical Engineering 1977:326.
- 3、彭宣茂、傅作新等, 岩基中的垂直锚杆分析, 岩土工程学报13(5): 54。
- 4、傅作新、梅明荣等, 大型船闸闸墙锚杆的分析与设计《岩土工程学报》1999年1期。
- 5、尤春安, 全长粘结式锚杆的受力分析[1], 岩石力学与工程学报2000.19(3)。
- 6、曹国金等, 一种确定拉力型锚杆支护长度的方法, 岩石力学与工程学报2003.22(7)。
- 7、TH.汉纳著、胡定等译, 锚固技术在岩土工程中的应用[M], 北京: 中国建筑出版社, 1986。
- 8、高永涛、吴顺川等, 预应力锚杆锚固段应力分布规律及应用[J], 北京科技大学学报, 2002, 24(4)。
- 9、邹爱清等, 单孔复合型锚杆锚固体应力分布特征研究, 岩石力学与工程学报23(2) 247~251
- 10、张禾文, 汪稔, 岩土锚固理论研究现状[J], 岩土力学2002.23(5)。
- 11、程良奎、胡建林, 土层锚杆的几个力学问题, 岩土工程中的锚固技术[C], 北京, 人民交通出版社, 1996。

(上接第26页)

一些,等钢绞线外露长度满足张拉时,再把钢绞线拉到100% f_t 。处理方法:为了满足整束钢绞线施加力达到设计要求,考虑到每根钢绞线的控制应力只有 $0.6R_y^b$,后备足,所以采取超张拉的办法来满足要求。也就是原来6根钢绞线所受的力现在由5根钢绞线来承受。这样每根钢绞线受力为 $f = \frac{1008}{5} = 201.6\text{kN}$ 这时的控制应力为 $\frac{201.6 \times 10^3}{140 \times 2000} = 0.72R_y^b$ 未超出规范要求。锚固段设计时为5m,而实际量测一个则为6.1m,另一为5.9m,经过验算完全满足要求。实践证明此方法可行。

张拉完成后,可进行二次压浆。锚板上有

两个孔,将其中一个做为压浆孔,另一个作为排气孔。压浆前将二次压浆管插入孔道,直达一次压浆面。在压浆过程中边压浆边往上提压浆管,以减少压浆泵负荷,但要保证压浆管在浆体内。压浆进行到排气孔冒出浓浆为止。

4. 结语

厦门环岛路(海军码头~演武路段)A标段预应力施工虽然为普通预应力施工,但具体施工中采取了一系列措施来深入加强了各个施工环节的控制,对各个工序严格把关,保证了工程质量,减少工程隐患。工程于2003年6月30日竣工,工程质量优良,其中预应力分项工程被评为优秀。