

按共同变形原理计算 地锚工程中粘结型锚头内力

王建宇 牟瑞芳

【提要】粘结型内锚头抗拔力的计算是地锚工程设计中的一个关键问题。本文提出了一种考虑锚杆、浆体和岩土间共同作用的计算模型,给出了锚头内力分布和力的传递规律的理论解,为进一步分析地锚在岩土中的锚固特性,发展锚固工程设计方法提供了工具。

关键词 共同变形 粘结型锚头 内力 计算

一、引言

1、剪力均匀分布假定

在地锚工程中,通过水泥砂浆等胶结材料将杆体(钢筋或钢绞线等)同周围岩土体结合在一起的“粘结型”内锚头是经常采用的。内锚头抗拔力的计算是地锚设计中的一个关键问题。地锚所承受的力是通过作用在灌浆体和岩土界面上的剪力传递到地层的。现行有关设计规范和 standards 均采用剪力均匀分布假定来计算抗拔力见文献[1][2]:

$$P_u = 2 \pi r_g l \tau_u$$

式中 P_u ——极限抗拔力;

r_g ——锚固体半径;

l ——内锚固段长度;

τ_u ——极限抗剪强度。

相应地,锚固长度计算公式为:

$$l = \frac{cP}{2\pi r_g \tau_u}$$

式中 P ——荷载;

c ——安全系数。

对于岩石地锚,在计算抗拔力时,还要核算杆体(钢绞线)和灌浆体之间的粘结力,计算时仍采用剪力均匀分布假定:

$$P_{ub} = 2 \pi r_b l \tau_b$$

式中 r_b ——杆体半径; τ_b ——杆体与灌浆体之间的极限抗剪强度。

王建宇 铁道部科学研究院西南分院研究员、博士生导师

牟瑞芳 铁道部科学研究院西南分院

事实上,内锚头在岩土界面上的剪力和杆体中各截面的轴力分别由锚杆口部向根部衰减。因此,建立在剪力均匀分布假定基础上的简单化的计算方法虽然目前被工程师们接受,却并不符合锚杆受力的实际情况,难以给出正确合理的设计参数见文献[4]。特别是在采用多次张拉增加预应力,提高地锚的支护能力等情况下,内锚段内力分布的不均匀性就不能不考虑了。

2、按局部变形假定计算内锚头内力分布

为了研究锚头内力分布的不均匀性,目前普遍采用基于“局部变形假定”的计算方法。即用一系列独立作用的“切向弹簧”来描述“锚固体”(指锚杆杆体或锚杆和灌浆体的“复合体”)同围岩之间的相互关系见文献[5](图1)。

$$q = -k_s \omega \quad (1)$$

式中: q ——单位长度锚固体上的剪力集度(N/m), $q = 2 \pi r_b \tau$

其中 r_b 为锚固体直径(m)

τ 为剪应力(Pa)

k_s ——综合切向刚度系数(N/m/m)

ω ——锚固体上某点位移

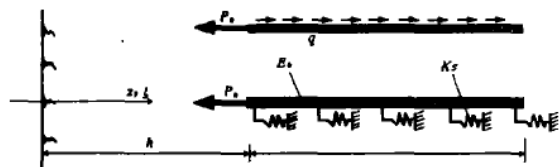


图1 按局部变形假定计算内锚头内力分布

杆体中轴力P, 剪力集度q分别为

$$\begin{aligned}
 P &= P_0 \frac{sh[\beta(h+l-z)]}{sh(\beta l)} \\
 q &= \beta P_0 \frac{ch[\beta(h+l-z)]}{sh(\beta l)} \\
 q_{max} &= q_z = h = \beta P_0 ct h(\beta l) \\
 \omega_{max} &= \frac{1}{k_s} \beta P_0 ct h(\beta l) \quad (2)
 \end{aligned}$$

当 $l \gg 1/\beta$ 时, 可采用简化式

$$P = P_0 e^{-\beta(z-h)}$$

式中:

$$\beta^2 = \frac{k_s}{A_b E_b} = \frac{k_s}{\pi r_b^2 E_b}$$

其中 $A_b E_b$ 分别为锚固体横截面积和材料弹性模量 $A_b = \pi r_b^2$

采用局部变形假定时, 锚固体和围岩石之间关系全部反映在综合切向刚度系数中, 因此, k_s 的确定就成为计算中的一个关键问题。

综合切向刚度系数 k_s 其实应该包括两部分, 即由浆体变形引起的组分 k_{bond} 和由岩土体变形引起的组分 k_r

$$\frac{1}{k_s} = \frac{1}{k_{bond}} + \frac{1}{k_r}$$

式中 k_{bond} 可以根据弹性力学中的厚壁筒解求得

$$k_{bond} = \frac{2\pi G_g}{\ln r_g - \ln r_b}$$

对于岩石地锚, 岩石的弹性模量有可能比浆体大得多。常常忽略岩体的变形, 将岩体视为绝对刚体, 即

$$k_s = k_{bond} = \frac{2\pi G_g}{\ln r_g - \ln r_b}$$

这样做, 显然会夸大内力沿杆体的衰减。

对于土层地锚, 砂浆的弹性模量远大于土体的弹性模量, 在设计中常常忽略杆体和土体之间的相对变形, 将杆体和浆体组成的复合杆体作为锚固体。日本尾高英雄等[5]采用

$$E = \frac{E_g A_g + E_b A_b}{A_g + A_b} \quad \text{以及} \quad A = A_g + A_b$$

分别计算锚固体的等效弹模和等效截面积。式中 E_g , E_b 及 A_g , A_b 分别为浆体和杆体的弹模和横截面积。

而切向刚度系数则主要由土体的变形特性确定, 即

$$k_s = k_r$$

文献[5]从复合锚固体假定出发提出了各类不同岩土情况的综合切向刚度系数的经验数据, 见表1。

表1 文献[5]建议的切向刚度系数 K

| 岩土的种类 | $kr/2 \pi r_b$ (kPa/cm) | 岩土的种类 | $kr/2 \pi r_b$ (kPa/cm) |
|-------|----------------------------|-------|----------------------------|
| 硬岩 | 5000~10000 | 洪积层砂 | 400~700 |
| 软岩 | 1500~3000 | 砂砾 | 400~700 |
| 风化岩 | 1000~2000 | 洪积层粘土 | 400~1000 |
| 泥岩 | 1500~2500 | 冲积层砂 | 50~200 |

3、采用FEM和FLAC计算锚头内力分布

局部变形假定显然不符合杆体、浆体和岩土体之间相互作用的实际情况。试验和数值分析均表明, 剪力集度和位移间的比值沿锚杆长度在不同位置上有不同值, 即

$$\frac{q}{\omega} = f(z) \neq const$$

可以用有限元(FEM)和近年来流行的所谓“快速拉格郎日分析”(FLAC)按轴对称二维问题分析锚杆的岩体的共同作用见文献[4]、[6]。但是, 这类二维数值分析方法用于实际工程的设计计算, 颇有不便之处。

于是, 本文提出了考虑杆体、浆体和岩体共同变形的锚杆内力分布的解析表达, 并给出了在杆体长度方向上单维离散的数值解。

二、按共同变形假定分析锚头内力分布

1、符号规定(图2)

锚杆材料弹性模量 E_b

浆体剪切模量 G_g , 泊松比 μ_g

弹性模量 E_g

岩土体剪切模量 G_r , 泊松比 μ_r

弹性模量 E_r

内锚段长度 l

杆体半径 r_b 横截面积 A_b

浆体半径 r_g

埋深h
杆体内轴力P
剪力集度q
反映浆体变形特性的切向刚度系数k_{bond}

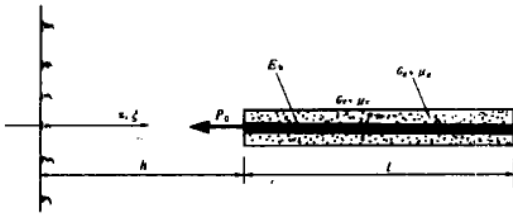


图2 按共同变形假定分析锚头内力

2、岩土体的位移表达式

根据弹性理论，在半无限空间中，当A(0, 0, ξ)点作用一集中力N时，点B(x, y, z)的位移表为(图3)

$$\omega(\gamma, z, \xi) = \frac{N}{16G_r(1-\mu)} \left[\frac{3-4\mu}{R_1} + \frac{8(1-\mu)^2-(3-4\mu)}{R_2} + \frac{(z-\xi)^2}{R_1^3} + \frac{(3-4\mu)(z+\xi)^2-2\xi z}{R_2^3} + \frac{6\xi z(z+\xi)^2}{R_2^5} \right]$$

$$= \frac{N}{16\pi G_r(1-\mu)} K(r, z, \xi)$$

z轴方向的应力则为

$$\sigma_z(r, z, \xi) = \frac{N}{8\pi(1-\mu)} \left[-\frac{(1-2\mu)(z-\xi)}{R_1^3} + \frac{(1-2\mu)(z+\xi)}{R_2^3} - \frac{3(3-4\mu)z(z+\xi)^2-3\xi(z+\xi)(5z-\xi)}{R_2^5} - \frac{3(z-\xi)^3}{R_1^5} - \frac{30z\xi(z+\xi)^3}{R_2^7} \right] = NK_\sigma(r, z, \xi)$$

式中

$$K(r, z, \xi) = \left[\frac{3-4\mu}{R_1} + \frac{8(1-\mu)^2-(3-4\mu)}{R_2} + \frac{(z-\xi)^2}{R_1^3} + \frac{(3-4\mu)(z+\xi)^2-2\xi z}{R_2^3} + \frac{6\xi z(z+\xi)^2}{R_2^5} \right]$$

$$K_\sigma(r, z, \xi) = \frac{1}{8\pi(1-\mu)} \left[-\frac{(1-2\mu)(z-\xi)}{R_1^3} + \frac{(1-2\mu)(z+\xi)}{R_2^3} - \frac{3(3-4\mu)z(z+\xi)^2-3\xi(z+\xi)(5z-\xi)}{R_2^5} - \frac{3(z-\xi)^3}{R_1^5} - \frac{30z\xi(z+\xi)^3}{R_2^7} \right]$$

其中

$$R_1 = [r^2 + (z-\xi)^2]^{1/2}$$

$$R_2 = [r^2 + (z+\xi)^2]^{1/2}$$

$$r^2 = x^2 + y^2$$

上式即为弹性力学中的Mindlin解。

值得注意的是上述表达式在r=0, z=ξ点是奇异的，即在集中力的作用点上，位移为无穷大。

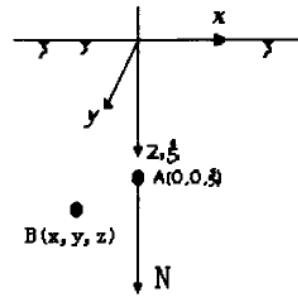


图3 集中荷载引起的位移

从物理意义上说，物体间的接触不会是几何意义上的“点”，因此真正的“集中力”实际上是不存在的。

我们假定力N均匀分布在圆心在r=0, z=ξ点，半径为a的圆面积上，该圆所在的平面与杆体垂直。均布荷载的集度为

$$\frac{N}{\pi a^2}$$

则在(0, 0, z)点的位移为

$$\omega(z) = \frac{N}{16\pi G_r(1-\mu)\pi a^2} \int_0^a \int_0^{2\pi} r K(r, z, \xi) d\theta dr$$

$$= \frac{N}{8\pi G_r(1-\mu) a^2} [A S_1 + B S_2 + (1-A)\sqrt{(2-\xi)^2} + (A-B)(z+\xi) - \frac{(z-\xi)^2}{S_1} - \frac{A(z+\xi)^2}{S_2} - \frac{2a^2 z \xi}{S_2^3}]$$

$$= \frac{N}{8\pi G_r(1-\mu) a^2} F(a, z, \xi)$$

同样，

$$\sigma_z(z) = \frac{N}{\pi a^2} \int_0^a \int_0^{2\pi} r K_\sigma(r, z, \xi) d\theta dr$$

$$= NK_\sigma(a, z, \xi)$$

式中

$$S_1 = \sqrt{a^2 + (z-\xi)^2} \quad S_2 = \sqrt{a^2 + (z+\xi)^2}$$

3、不考虑浆体存在的情况

先假定杆体和岩体间无浆体存在, 即杆体和岩体在接触面上有相同的位移值。这种“无浆体”模型对压力型锚杆是合适的。在这种情况下, 由于钢绞线与浆体相互不接触, 可视带中孔的浆体圆柱为“杆体”。此外, 当浆体材料的弹性模量同岩体相近时也可忽略浆体的存在。

如图4所示, 将“锚杆—岩体”系统(图4a)分解为变形模量为 E_r, μ_r 的连续介质(岩体)半空间(图4b)和一根“虚拟锚杆”(图4c), 其弹性模量为

$$E^* = E_b - E_r$$

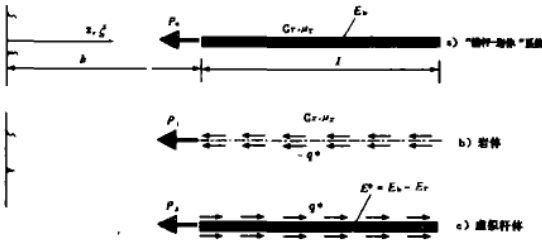


图4 “锚杆—岩体”系统的分解

岩体位移有两个组分。由杆端力引起的部分:

$$\omega_1 = \frac{-P_1}{8G_r(1-\mu_r)A_b} F(r_b, z, h)$$

对受压型锚头,

$$\omega_1 = \frac{-P_1}{8G_r(1-\mu_r)A_b} F(r_b, z, h+l)$$

由杆侧剪力引起的部分:

$$\omega_2 = \frac{-1}{16\pi G_r(1-\mu_r)} \int_h^{h+l} K(r_b, z, \xi) q^*(\xi) d\xi \quad (3)$$

岩体在轴线位置上的应变

$$\begin{aligned} \epsilon_r = \frac{\partial}{\partial z}(\omega_1 + \omega_2) &= \frac{-P_1}{8G_r(1-\mu_r)A_b} \frac{\partial}{\partial z} F(r_b, z, h) \\ &- \frac{-1}{16\pi G_r(1-\mu_r)} \frac{\partial}{\partial z} \int_h^{h+l} K(r_b, z, \xi) q^*(\xi) d\xi \end{aligned} \quad (4)$$

考虑到

$$q^*(\xi) = -\frac{dP^*}{d\xi}$$

$$\begin{aligned} &\frac{\partial}{\partial z} \int_h^{h+l} K(r_b, z, \xi) q^*(\xi) d\xi \\ &= -\int_h^{h+l} \frac{\partial}{\partial z} K(r_b, z, h) dP^* \\ &= -\left[\frac{\partial}{\partial z} K(r_b, z, \xi) \cdot P^*(\xi) \right]_h^{h+l} \\ &\quad + \int_h^{h+l} \frac{\partial^2}{\partial z \partial \xi} K(r_b, z, \xi) P^*(\xi) d\xi \end{aligned}$$

边值条件:

受拉型锚头

$$\xi = h, P^*(\xi) = P_2; \quad \xi = h+l, P^*(\xi) = 0$$

代入上式得

$$\begin{aligned} &\frac{\partial}{\partial z} \int_h^{h+l} K(r_b, z, \xi) q(\xi) d\xi \\ &= P_2 \frac{\partial}{\partial z} K(r_b, z, h) \\ &+ \int_h^{h+l} \frac{\partial^2}{\partial z \partial \xi} K(r_b, z, \xi) P^*(\xi) d\xi \end{aligned} \quad (5a)$$

受压型锚头

$$\xi = h, P^*(\xi) = 0; \quad \xi = h+l, P^*(\xi) = -P_2$$

则

$$\begin{aligned} &\frac{\partial}{\partial z} \int_h^{h+l} K(r_b, z, \xi) q(\xi) d\xi = \\ &P_2 \frac{\partial}{\partial z} K(r_b, z, h+l) + \\ &\int_h^{h+l} \frac{\partial^2}{\partial z \partial \xi} K(r_b, z, \xi) P^*(\xi) d\xi \end{aligned} \quad (5b)$$

$$\text{而 } \frac{P^*(z)}{E^* A_b} = \epsilon_r$$

据变形协调条件, 岩体变形应该等于虚拟锚杆的变形, 以式(4)及(5)代入上式得

受拉型锚头

$$\begin{aligned} &\frac{P^*(z)}{E^* A_b} + \frac{1}{16\pi G_r(1-\mu_r)} \left[P_2 \frac{\partial}{\partial z} K(r_b, z, h) \right. \\ &\quad \left. + \int_h^{h+l} \frac{\partial^2}{\partial z \partial \xi} K(r_b, z, \xi) P^*(\xi) d\xi \right] \\ &+ \frac{P_1}{8G_r(1-\mu_r)A_b} \frac{\partial}{\partial z} F(r_b, z, h) = 0 \end{aligned}$$

考虑到 $P_0 = P_1 + P_2$ 并令

$$\lambda = \frac{16\pi G_r(1-\mu_r)}{E^* A_b}, \quad a = \frac{2\pi}{A_b} = \frac{2}{r_b^2}$$

得

$$\lambda P^*(z) + \left[\frac{\partial}{\partial z} K(r_b, z, h) - a \frac{\partial}{\partial z} F(r_b, z, h) \right] P_2 + \int_h^{h+l} \frac{\partial^2}{\partial z \partial \xi} K(r_b, z, \xi) P^*(\xi) d\xi = -a P_0 \frac{\partial}{\partial z} F(r_b, z, h) \quad (6a)$$

对于受压型锚头则有

$$\lambda P^*(z) + \left[\frac{\partial}{\partial z} K(r_b, z, h+l) - a \frac{\partial}{\partial z} F(r_b, z, h+l) \right] P_2 + \int_h^{h+l} \frac{\partial^2}{\partial z \partial \xi} K(r_b, z, \xi) P^*(\xi) d\xi = -a P_0 \frac{\partial}{\partial z} F(r_b, z, h+l) \quad (6b)$$

4、浆体的考虑

同无浆体情况一样，将系统进行分解。所不同的是：

(1) “虚拟锚杆”是由弹模分别为 $E_g^* = E_g - E_r$ 和 $E_b^* = E_b - E_r$ 的“虚拟浆体”和“虚拟杆体”组成的。

(2) 在考虑变形协调条件时，必须计及浆体内外侧的位移差值，即

$$\omega_r = \omega^* + \frac{q^*}{k_{bond}} = \omega^* - \frac{1}{k_{bond}} \frac{dP^*}{dz}$$

$$\frac{d\omega_r}{dz} = \frac{d\omega^*}{dz} - \frac{1}{k_{bond}} \frac{d^2 P^*}{dz^2}$$

类似无浆体情况，有

$$\lambda P^*(z) + \left[\frac{\partial}{\partial z} K(r_b, z, h) - a \frac{\partial}{\partial z} F(r_b, z, h) \right] P_2 + \int_h^{h+l} \frac{\partial^2}{\partial z \partial \xi} K(r_b, z, \xi) P^*(\xi) d\xi - \delta \frac{d^2 P^*}{dz^2} = -a P_0 \frac{\partial}{\partial z} F(r_b, z, h) \quad (7)$$

式中 $\delta = \frac{\lambda E_b^* A_b}{k_{bond}}$

其中 $k_{bond} = \frac{\pi E_g^*}{(1 + \mu_g) \ln \left(\frac{r_g}{r_b} \right)}$

5、积分方程的离散

以式(6)为例，将锚杆沿杆体长分为n个单元，节点号为 $i = l - n + 1$ ，积分方程可离散为

$$[B]\{P^*\} = \{F\} \quad (8)$$

式中 $[B] = [A] + [L] + [K] + [S]$

其中

$$[A] = \begin{bmatrix} A(1) & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ A(i) & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ A(n) & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[L] = \lambda \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[S] = -\frac{\delta}{\Delta^2} \begin{bmatrix} -2 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -2 & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -2 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & -2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & -2 \end{bmatrix}$$

$$[K^n] = \Delta \begin{bmatrix} K_{11}^n & \dots & K_{1j}^n & \dots & K_{1n}^n \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_{i1}^n & \dots & K_{ij}^n & \dots & K_{in}^n \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_{n1}^n & \dots & K_{nj}^n & \dots & K_{nn}^n \end{bmatrix}$$

$$\{F\} = -\alpha P_0 \begin{Bmatrix} F(1) \\ \dots \\ F(i) \\ \dots \\ F(n) \end{Bmatrix} \quad \{P^*\} = \begin{Bmatrix} P^*(1) \\ \dots \\ P^*(i) \\ \dots \\ P^*(n) \end{Bmatrix}$$

$$K_{ij}^n = \frac{\partial^2}{\partial z \partial \xi} K(r_g, h + \Delta i, h + \Delta j)$$

$$A(i) = \frac{\partial}{\partial z} K(r_g, h + \Delta i, h) - a \frac{\partial}{\partial z} F(r_b, h + \Delta i, h)$$

$$F(i) = \frac{\partial}{\partial z} F(r_b, h+\Delta i, h)$$

6、锚杆内力的推求

锚杆的内力是由图4c) 虚拟锚杆的内力和图4b) 所示的岩体在锚杆轴线位置上的应力叠加而成

$$P(z) = P^*(z) + \sigma^*(z) A_b \quad (9)$$

式中 σ^* 是由集中力 P_1 及剪力 q^* 两部分引起的。

$$\sigma^*(z) = -P_1 \overline{K}_o(r_b, z, h) - \int_h^{h+i} q^* K_o(r_g, z, \xi) d\xi$$

而 $P_1 = P_0 - P_2 = P_0 - P^* \quad (1)$

则有

$$\sigma^*(z) = [P^*(1) - P_0] \overline{K}_o(r_b, z, h) - \int_h^{h+i} q^* K_o(r_g, z, \xi) d\xi$$

求得轴力 $P(z)$ 后, 利用

$$q(\xi) = -\frac{dP}{d\xi}$$

即可求得剪力。求得剪力后, 将式(3)中 q^* 以杆体的真实剪力 q 代入即可得位移。

三、算例

1、本文计算结果的验证

粘结型锚杆, $l=3.0m$ $r_b=0.011m$ $E_b=210000$ MPa $r_g=0.022m$ $E_g=56.979MPa$ $\mu_g=0.2$

$E_s=10000MPa$ $\mu_r=0.3$ $P_0=50$ kN $h=0$ 。

用本文提出的共同变形假定计算锚杆的内力, 并同轴对称有限元 (FEM) 及快速拉格朗日分析 (FALC) 的计算结果相比较, 列于表2。计算结果表明, 三种方法所得结果吻合得较好。

3.2 不同形式锚头的内力分析

用本文所提出的计算方法对下列三种锚头荷载传递特性进行比较:

受拉型锚头, 锚固段长为6.0m, 钢绞线有4根;

受压型锚头, 锚固段长为6.0m, 钢绞线有4

根;
拉压混合型锚头, 受拉段长为2.0m, 钢绞线2根, 受压段长4.0m, 钢绞线有4根 (如图5所示)。

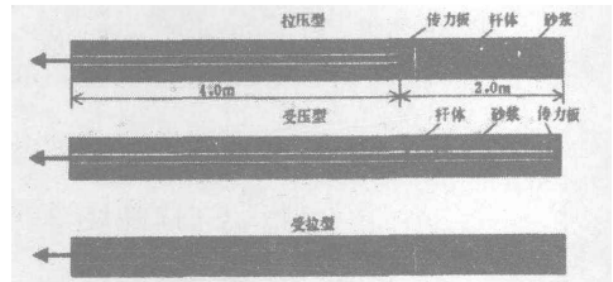


图5 三种形式的锚头

其余计算参数为:

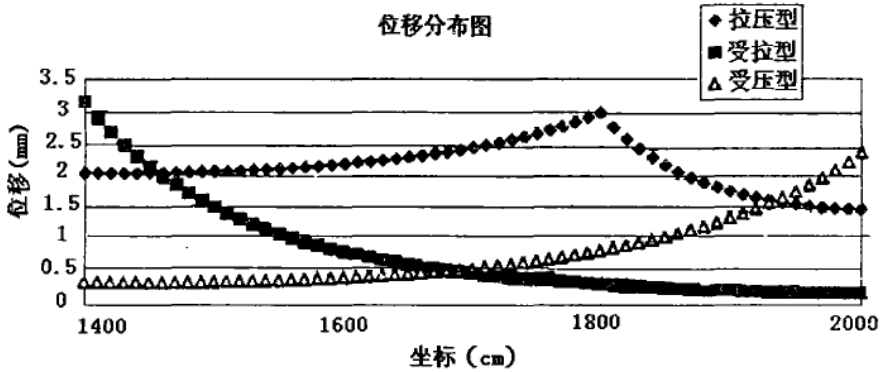
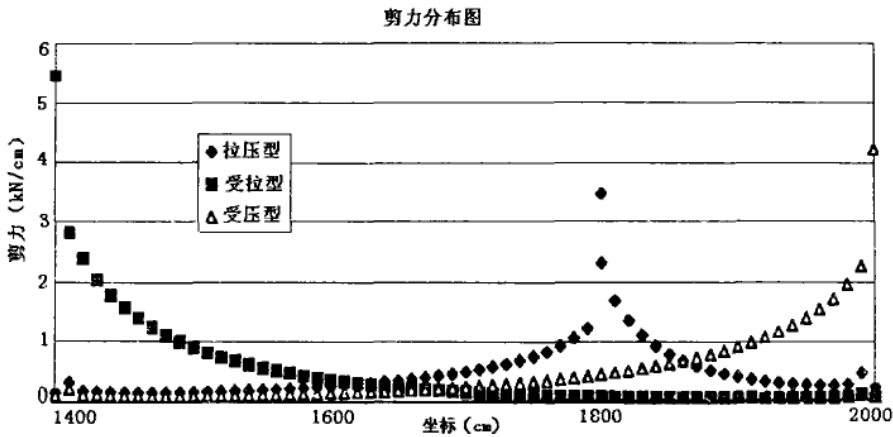
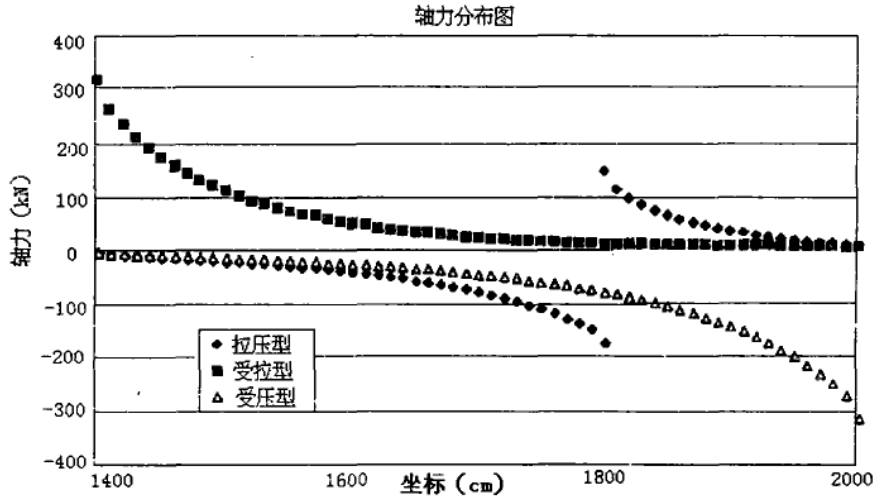
钢绞线截面积 $142.99m^2$, $E_b = 19700MPa$, $r_g=6.5cm$, $E_g=15000MPa$, $\mu_g=0.3$, $E_r=120MPa$, $\mu_r=0.33$

锚头埋深 $h=1000cm$ 张拉荷载 $P_0=320kN$

计算表明, 在相同的张拔力的作用下, 沿杆体最大剪力对受拉、受压和拉压混合型锚头分别为 $544.99kN/m$, $421.79kN/m$, 及 $347.05kN/m$ 见图6。因此, 就塑性滑移前的抗拔能力而论采用受压锚头比受拉锚头提高21.5%, 拉压型锚头则可提高57%。

表2 计算结果的比较

| 坐标 (cm) | 轴力 (kN) | | | 剪力 (kN/m) | | 位移 | |
|---------|---------|--------|--------|-----------|--------|-------|-------|
| | 本文解 | FEM | FLAC | 本文解 | FEM | 本文解 | FEM |
| 0 | 50 | 49.9 | | 77.459 | 77.459 | 0.385 | 0.396 |
| 5 | 46.127 | 46.223 | 46.756 | 74.46 | 71.46 | 0.355 | 0.365 |
| 25 | 33.415 | 33.618 | 33.452 | 53.896 | 51.719 | 0.256 | 0.266 |
| 45 | 24.214 | 24.457 | 23.568 | 39.015 | 37.441 | 0.184 | 0.194 |
| 65 | 17.552 | 17.798 | 16.08 | 28.257 | 27.119 | 0.132 | 0.142 |
| 85 | 12.726 | 12.954 | 10.606 | 20.477 | 19.655 | 0.095 | 0.104 |
| 105 | 9.227 | 9.429 | 7.223 | 14.852 | 14.257 | 0.067 | 0.076 |
| 125 | 6.688 | 6.86 | 5.284 | 10.785 | 10.355 | 0.048 | 0.056 |
| 145 | 4.843 | 4.985 | 3.801 | 7.847 | 7.536 | 0.033 | 0.041 |
| 165 | 3.499 | 3.614 | 2.084 | 5.728 | 5.505 | 0.023 | 0.03 |
| 185 | 2.515 | 2.606 | 1.344 | 4.207 | 4.048 | 0.015 | 0.023 |
| 205 | 1.788 | 1.859 | 1.046 | 3.125 | 3.011 | 0.01 | 0.017 |
| 225 | 1.245 | 1.297 | 0.489 | 2.366 | 2.288 | 0.006 | 0.013 |
| 245 | 0.827 | 0.864 | 0.337 | 1.853 | 1.802 | 0.004 | 0.01 |
| 265 | 0.491 | 0.514 | 0.242 | 1.533 | 1.504 | 0.002 | 0.008 |
| 285 | 0.203 | 0.213 | 0.115 | 1.374 | 1.364 | 0.001 | 0.008 |
| 300 | 0 | 0 | | 1.353 | 0.677 | 0.001 | 0.008 |



参考文献

1. 预应力锚索设计与施工技术规范, 中华人民共和国国家军用使用标准, 1996.
2. Stuart Little John, Rock Anchors. ISRM News Journal, 1995 Spring.
3. Josef Mecsi, Analysis of Grouted Soil anchors, proceedings of International symposium on Anchors in Theory and Practice. 1995.
4. C.Fairhurst, 岩体工程中锚固的数值研究. 国际岩土锚固与灌浆新进展. 中国建筑工业出版社, 1996.
5. 尾高英雄等, 关于荷载分散型锚杆及周边岩土层剪切应力的研究. 国际岩土锚固工程技术研讨会论文集, 1996, 柳州.
6. 伍晓军, 全长锚固式锚杆与围岩的相互作用. 铁道部科学研究院硕士学位论文, 1992.
7. I.W.Farmer n Stress Distribution along a Resin Grouted Rock Anchor. Int.J.Rock.Min.Sci.and Geomech Abstr. vol 12 pp347-357.