

土层锚杆剪切位移—传递函数分析方法

姜连馥

(深圳大学, 广东 深圳 518060)

摘要: 依据土层锚杆的模拟试验, 建立了土锚工作的弹塑性力学模型, 提出了一种剪切位移—传递函数的分析方法. 用此方法对实际工程中土层锚杆进行了计算, 并与现场实测数据进行了比较, 两者吻合的较好.

关键词: 土层锚杆; 剪切力; 锚固长度

中图分类号: TD355.9; U455.71

文献标识码: A

1 土层锚杆的传力机理

土层锚杆一般为灌浆锚杆, 它是用水泥砂浆将一组钢拉杆(粗钢筋或钢丝束等)锚固在伸向地层内部的钻孔中, 承受拉力的柱状锚体. 它的中心受拉部分是钢拉杆, 钢拉杆所受的拉力首先通过拉杆周边的砂浆握裹力而传递到砂浆中, 然后再通过锚固段周边地层的摩阻力传递到锚固区的稳定土层中. 在实际工程中, 以摩擦型水泥砂浆灌浆锚杆占绝大多数.

灌浆锚杆的钻孔方向一般是沿水平向下倾斜 $10^\circ \sim 45^\circ$, 施工钻孔的深度须超过建筑物背后的主动土压力区或已有的滑动面, 并须在稳定的地层中达到足够的有效锚固长度, 锚杆末端伸入岩土体内的有效锚固段所能承受的最大拉力称为锚固段的极限抗拔力. 许多资料表明^[1~4], 锚杆孔壁周边的抗剪强度因土层地质不同、埋深不同以及灌浆方法不同而有很大的变化和差异. 对于锚杆抗拔的作用原理可从其受力状态进行分析, 如果将锚固段的砂浆作为自由体, 当锚固段受力时, 拉力(P)首先通过钢拉杆周边的砂浆握裹力(u)传递到砂浆中, 然后再通过锚固段钻孔周边的地层摩阻力(τ)传递到锚固的地层中, 因此钢拉杆如受到拉力的作用, 除了钢筋本身需要足够的截面积(A)承受拉力外, 锚杆的抗拔作用还必须同时满足以下三个条件:

1) 锚固段的砂浆对于钢拉杆的握裹力须能承受极限(设计)拉力.

2) 锚固段土层对于砂浆的摩阻力须能承受极限

(设计)拉力.

3) 锚固土体在最不利条件下仍能保持整体稳定性.

条件2)是影响灌浆锚杆抗拔力的主要因素.

2 土层锚杆弹塑性分析模式

2.1 空间轴对称问题

依据土层锚杆的模拟试验和实际的受力情况, 将其看成弹性力学的空间轴对称问题来处理.

平衡微分方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial Z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + K_r = 0 \\ \frac{\partial \sigma_z}{\partial Z} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\tau_{rz}}{r} + Z = 0 \end{cases} \quad (1)$$

几何方程为

$$\begin{cases} \epsilon_r = \frac{\partial u_r}{\partial r}, \epsilon_\theta = \frac{u_r}{r}, \epsilon_z = \frac{\partial \omega}{\partial Z} \\ r_{rz} = \frac{\partial u_r}{\partial Z} + \frac{\partial \omega}{\partial r}, r_{r\theta} = r_{z\theta} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

物理方程为

$$\begin{cases} \epsilon_r = \frac{1}{E} [\sigma_r - \nu(\sigma_\theta + \sigma_z)] \\ \epsilon_\theta = \frac{1}{E} [\sigma_\theta - \nu(\sigma_z + \sigma_r)] \\ \epsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_r + \sigma_\theta)] \\ r_{rz} = \frac{1}{G} \tau_{rz} = \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{rz} \end{cases} \quad (3)$$

将式(3)中的前三式相加, 可得到:

$$\theta = \frac{1-2\nu}{E}\Theta \quad (4)$$

体积应力为

$$\Theta = \sigma_r + \sigma_\theta + \sigma_z \quad (5)$$

体积应变为

$$\theta = \epsilon_r + \epsilon_\theta + \epsilon_z = \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r} + \frac{\partial \omega}{\partial Z} \quad (6)$$

用应变分量表示应力分量的物理方程:

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{E}{1+\nu} \left(\frac{\nu}{1-2\nu} \theta + \epsilon_r \right) \\ \sigma_\theta = \frac{E}{1+\nu} \left(\frac{\nu}{1-2\nu} \theta + \epsilon_\theta \right) \\ \sigma_z = \frac{E}{1+\nu} \left(\frac{\nu}{1-2\nu} \theta + \epsilon_z \right) \\ \tau_{zr} = \frac{E}{1+\nu} r \epsilon_{zr} \end{cases} \quad (7)$$

将几何方程(2)的前四式代入物理方程(7)得:

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{E}{1+\nu} \left(\frac{\nu}{1-2\nu} \theta + \frac{\partial u_r}{\partial r} \right) \\ \sigma_\theta = \frac{E}{1+\nu} \left(\frac{\nu}{1-2\nu} \theta + \frac{u_r}{r} \right) \\ \sigma_z = \frac{E}{1+\nu} \left(\frac{\nu}{1-2\nu} \theta + \frac{\partial \omega}{\partial Z} \right) \\ \tau_{zr} = \frac{E}{2(1+\nu)} \left(\frac{\partial u_r}{\partial Z} + \frac{\partial \omega}{\partial r} \right) \end{cases} \quad (8)$$

其中 $\theta = \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r} + \frac{\partial \omega}{\partial Z}$

再将式(8)代入平衡微分方程(1),化简后可得:

$$\begin{cases} \frac{E}{2(1+\nu)} \left(\frac{1}{1-2\nu} \frac{\partial \theta}{\partial r} + \nabla^2 u_r - \frac{u_r}{r^2} \right) + K_r = 0 \\ \frac{E}{2(1+\nu)} \left(\frac{1}{1-2\nu} \frac{\partial \theta}{\partial Z} + \nabla^2 \omega \right) + Z = 0 \end{cases} \quad (9)$$

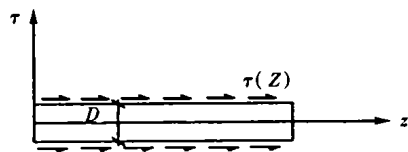


图1 锚杆锚固段受力图

2.2 圆柱坐标简化方程模式

为了简化问题和分析方便,将空间轴对称问题转换圆柱坐标系问题.先建立圆柱坐标系,也可以把它看作仅与 Z 有关而与 r 和 θ 无关的轴对称问题来处理,位移分量可设为:

$$u_r = 0, v_\theta = 0, w = w(Z) \quad (10)$$

将式(10)代入式(6)得:

$$\theta = \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r} + \frac{\partial \omega}{\partial Z} = \frac{dw}{dZ}$$

两边分别对 Z 求导得:

$$\frac{d\theta}{dZ} = \frac{d^2 w}{dZ^2} \quad (11)$$

将式(11)代入平衡微分方程(9),其第一式自然满足,而第二式成为:

$$\frac{E}{2(1+\nu)} \left(\frac{1}{1-2\nu} \frac{d^2 w}{dZ^2} + \frac{dw^2}{dZ^2} \right) + \frac{\pi D \tau(Z)}{A} = 0$$

化简后得:

$$\frac{dw}{dZ^2} = - \frac{\pi D(1+\nu)(1-2\nu)}{AE(1-\nu)} \tau(Z) \quad (10)$$

式中: w 为锚杆轴向位移函数; τ 为锚杆表面剪应力分布函数; A 为锚杆截面积, $A = A_g + A_b$, A_g 和 A_b 分别为砂浆体和杆体的截面积; E 为锚杆材料的弹性模量,可采用 $E = \frac{E_g A_g + E_b A_b}{A_g + A_b}$ 计算, E_g 和 E_b 分别为砂浆体和杆体的弹性模量; D 为锚杆的直径; ν 为锚杆材料的泊松比。

3 剪切位移—双曲函数解

关于锚土间的传递函数的建立,平山英喜^[1]等人提出用双曲线函数来描述锚与土接触面摩阻力和锚与土相对位移关系(见图2)。

$$\tau = \Delta w / (a + b \Delta w) \quad (11)$$

式中: Δw 为锚土接触面上锚土间相对位移; a, b 分别为锚与土接触面有关的参数。

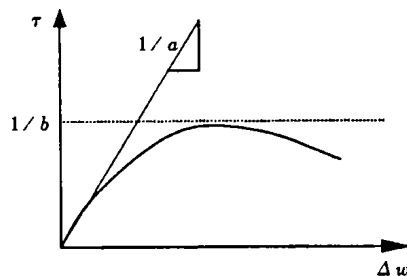


图2 位移—剪力关系

对于式(11),克拉夫^[5]等人通过坐标变换并结合库仑破坏准则,建议利用以下公式:

$$a = \frac{1}{k r_w} \left(\frac{\sigma_r}{P_a} \right)^{-n} \quad (12)$$

$$b = \frac{R_f}{\tau_f} \quad (13)$$

式中: k, n 为由试验确定的参数.对于粘性土,一般即 $k = 4\,000 \sim 5\,000$, $n = 0.5 \sim 0.8$; σ_r 为土体对锚杆侧面径向压力, P_a 为大气压力, P_a ; r_w 为水

的容重, N/m^2 ; R_f 为破坏比, 无量纲系数, 对于粘土取 $R_f = 0.8 \sim 0.9$.

$$\tau_f = \sigma_r \tan \phi + c$$

其中, σ_r, c 分别为锚与土接触面摩擦角和内聚力.

4 剪切位移—传递函数分析法

上述的理论计算采用的剪切位移是双曲线函数关系, 并且其中的很多参数是经验值. 因此, 由锚杆受力的模拟试验(当侧压力一定), 得出了剪应力与位移之间的关系曲线, 如图3所示, 并由此可拟合出它们之间的多项式函数关系.

$$\tau = aw^3 + bw^2 + cw \quad (14)$$

其中的系数 a, b, c 由试验所得曲线得出.

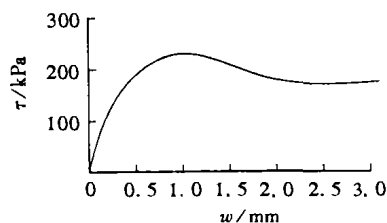


图3 $\tau \sim w$ 关系曲线

由式(14)得到的锚身截面位移所引起的锚侧摩阻力的计算式, 可用位移协调法计算锚杆的荷载位移关系, 计算方法如下:

1) 将锚杆分为 n 个单元, 一般 $n \geq 10$;

2) 假定单元 n 中点处的位移为 Δw_n , 据式(11)可得相应截面位移 Δw_n 的侧壁阻力 τ_n ;

3) 求 n 单元左截面的轴向力 P_n

$$P_n = P_{n+1} + \tau_n u L(n) \quad (15)$$

式中: u 为锚杆截面周长; L_n 为单元 n 的长度.

4) 计算第 i 段中点处的位移 Δw_i ;

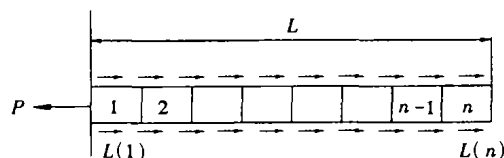


图4 计算模型

$$\Delta w_{n-1} = \Delta w_{n-2} + \Delta \quad (16)$$

$$\Delta = \frac{1}{2} P_n \frac{L(n)}{EA} \quad (17)$$

式中: EA 为锚杆截面的抗拉模量.

5) 将 Δw_{n-1} 代入式(11)即可求 $n-1$ 段处的锚侧壁摩阻力 τ_{n-1} ;

6) 依次类推, 可求得单元 1 处即锚固段顶面处

的荷载和位移 P_1, w_1 ;

7) 假定 Δw_n , 重复步骤 1) ~ 6), 即可求得锚的 $P \sim w$ 曲线、 $\tau \sim Z$ 曲线、 $P \sim Z$ 曲线和 $w \sim Z$ 曲线.

5 算例

笔者对深圳地铁一期工程水晶岛车站主体基坑支护结构(图5)进行了实地调查, 得到了一些现场实测资料. 本站所处地区为台地地貌, 地形较平坦, 地面上无建筑物, 地面高程为 $7.8 \sim 8.6$ m, 车站主体结构全部在二类围岩中. 站区范围内上覆第四系全新统人工堆积层、中更新统残积层, 下覆燕山期花岗岩(详细地质资料略).

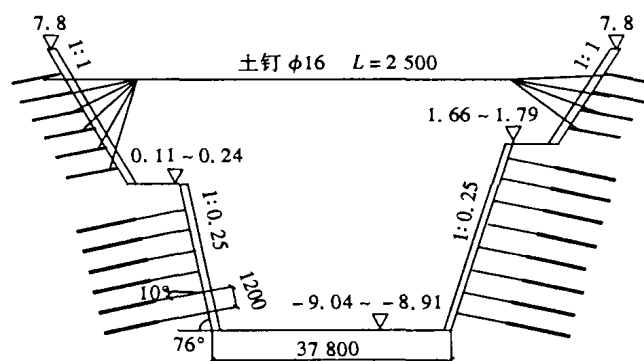


图5 深圳地铁水晶岛站基坑土锚支护布置图

图5中基坑支护结构左侧锚杆自由段(图中由细线表示)长 $7\,000$ mm, 锚固段(图中由粗线表示)长 $12\,000$ mm, 水平间距 $2\,400$ mm, 右侧锚杆自由段长 $10\,000$ mm, 锚固段长 $12\,000$ mm, 水平间距为 $2\,400$ mm.

所用的灌浆材料为 425 # 普通硅酸盐水泥砂浆, 水与水泥配合比为 0.3 , 水泥与砂浆配合比为 1 . 图6给出锚杆自由段长为 7.0 m, 锚固段长为 12 m 的锚杆在不同荷载作用下, 锚头位移的理论计算值和现场实测值.

剪切位移—传递函数法的曲线为:

$$\tau = -16.6 w^3 - 167.5 w^2 + 474.4 w.$$

6 结束语

由以上算例可知, 用本文的剪切位移—传递函数法计算单锚 $P \sim w$ 曲线与现场实测的 $P \sim w$ 曲线基本吻合, 方法简单可行, 仅需编写一小段计算机程序就可方便计算, 只要地基土的有关力学参数(在实验室测试)和施工工艺有关的系数取值适当, 就能

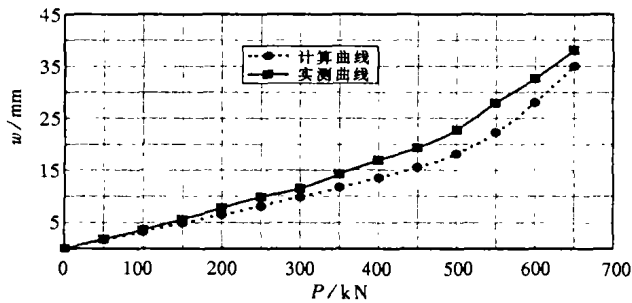


图 6 实测结果和理论计算结果的 $P \sim w$ 图
得到充分反映锚杆实际受力情况的计算结果。

参考文献:

- [1] 卢肇均, 吴肖茗, 张肇坤. 锚杆技术及其应用[J]. 中国铁道科学, 1990, (1): 10-13.
- [2] 程良槐. 岩土加固实用技术[M]. 北京: 地震出版社, 1994.
- [3] 施文华. 深基坑桩锚支护设计中的几个问题[J]. 建筑技术, 1993, (3): 15-18.
- [4] 程良奎. 锚杆的试验与长期观测[J]. 工业建筑, 1993, (2): 25-28.
- [5] Narain J, Saran S, NandaKumaran D. Model Study of Passive Pressure in Sand [J]. Proc. ASCE, J. of the Soil Mechn. Found. Division, 1996, 95(3): 20-23.

Analysis Method of the Shearing Stress-displacement Curve on the Working Anchored Bolt

Jiang Lianfu

(Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: In this paper, the model of elastoplasticity of the working anchored-bolt is established through the simulating experiment of solum anchored-bolt, and the shearing stress-displacement curve is got simultaneously. The tension of ground anchor in practical is analysed and calculated. By the contrast of theoretical calculation and practical measuring data, the feasibility of the theoretical calculation is proved powerfully.

Key words: anchored-bolt; shearing strength; anchored length