

剪切位移传递法分析抗浮锚杆应力状态

陈棠茵^{1,2}

(1. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059;
2. 西南科技大学土木与建筑工程学院, 绵阳 621010)

摘要: 假定锚侧摩阻力与剪切变形呈非线性变化, 考虑锚侧土体在影响区域内符合非线性弹性理论, 运用剪切位移传递法, 建立了抗浮锚杆计算模型, 推导了锚侧剪应力与剪切位移的关系式。通过模型描述受荷状态下抗浮锚杆的轴力、摩阻力、位移的变化形态, 分析了锚杆应力变化的工作机理, 并预估了其极限承载力。

关键词: 抗浮锚杆; 剪切位移传递函数; 剪应力; 剪切位移

中图分类号: TU473.1⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2008)01-0036-04

20世纪90年代, 锚杆因其便捷、经济等优点在我国东部、东南部沿海一带的地下抗浮工程中获得成功的应用。如首都国际机场改建停车楼基底预应力抗浮锚桩^[1], 大连市体育场东外场地下室抗浮锚杆^[2], 深圳华侨城锦绣苑会所地下室土层抗浮锚杆^[3]等。尽管竖向锚杆在抗浮工程中得到广泛应用, 但对这种特殊的抗浮技术的工作机理研究工作却极其有限, 目前还没有系统的抗浮锚杆设计、施工标准, 同时还有很多关键性的问题没能解决。

1 抗浮锚杆传力机理

抗浮锚杆在受力时, 荷载通过锚筋以摩阻力的形式传递给浆体和锚侧岩土体, 由于锚筋与围绕锚筋的浆体的弹性特征不协调, 张拉时不能将荷载均匀传递到锚固段上, 以致出现严重的应力集中现象。随着荷载增加, 摩阻力峰值逐渐移向锚固段底端, 锚筋与浆体或浆体与岩土层界面上就会发生粘结效应逐步弱化、脱开现象, 这种受力特点致使锚侧摩阻力不均匀发挥, 最终影响了位移非均匀变化。这种荷载、位移呈非线性变化的传递特征包括两方面含义: 一是锚侧摩阻力与锚杆的相对位移的非线性关系; 二是土体本身的非线性变化。鉴于剪切位移传递法在单桩承载力的确定^[4]和边坡斜锚杆分析^[5]中都取得了较好的结果, 文中假定摩阻力引起的位移可用双曲线来描述, 利用剪切位移传递法来分析抗浮锚杆的应力和变形状况。

2 剪切位移传递函数法原理

2.1 剪切位移法的基本原理

一般情况下, 由土体受剪引起的剪切刚度的减少大部分发生在锚固体周围很小的区域内, 在该区域外土的应力、应变关系基本保持在线弹性范围内。设有效锚固段上单位长度上的摩擦力为 Δq , 且以剪应力形式沿锚固体表面均匀分布, 并从锚固体侧表面向周围土体扩散。则土体中某一锚点的剪应力表示为:

$$\tau(r) = \frac{\Delta q}{2\pi r \Delta L} \quad (1)$$

式中: Δq 、 ΔL ——有效锚固段单位长;

r ——从锚杆中心向锚固体周围扩散的距离。

由(1)式可知 τ 随着 r 的增加而减少, 在锚固体侧表面 τ 比任何位置都大, 属于扰动区域, 该处的应力-应变关系为非线性。则在拉拔力作用下锚杆产生的总位移 s 包括锚土界面处扰动区域内的剪切位移 s_z 及摩阻力引起的土体位移 s_t :

$$s(z) = s_z + s_t \quad (2)$$

由现场试验资料分析, 抗浮锚杆在荷载作用下, 变形呈双曲线形式, 则考虑采用双曲线函数来描述锚侧摩阻力与剪切位移的分布关系:

$$\tau = \frac{s_z}{a + bs_z} \quad (3)$$

参数 a 利用非线性弹性 Duncarr Chang 模型^[6]得出:

$$a = \frac{1}{k_1 \gamma_w} \left[\frac{\sigma_n}{p_n} \right]^{-n} \quad (4)$$

式中: k_1 ——无量刚刚度值;

σ_n ——法向应力;

p_n ——大气压;

收稿日期: 2007-03-23; 修订日期: 2007-05-21

作者简介: 陈棠茵(1976), 女, 博士研究生, 从事地基基础工程及地质灾害防灾减灾方向研究。

E-mail: chentangyin@sina.com

γ_w ——水的重度;

n ——刚度指数。

当剪切位移 $s_z \rightarrow \infty$ 时, 剪应力渐进值的倒数 $1/\tau_{zd}$ 为参数 b , 则锚土界面处的抗剪强度为:

$$\tau_f = R_f \tau_{zd} \quad (5)$$

$$\tau_f = \sigma_n \tan \delta = k \gamma z \tan \delta + c \quad (6)$$

参数 b 为:
$$b = \frac{R_f}{k \gamma z \tan \delta + c} \quad (7)$$

式中: R_f ——曲线拟合参数(0.8~0.9);

τ_f ——锚侧土界面处的剪切强度;

k ——土压力系数;

γ ——土重度;

z ——深度;

δ ——锚土间摩擦角。

只考虑在扰动区域内 $r = r_0$ 处的锚侧摩擦力和变形, 由弹性理论几何方程^[7-8] 推导两者关系为:

$$\tau_z = \frac{a + bs(z) + \frac{r_0 \ln \left(\frac{r_m}{r_0} \right)}{G} - \left[\left(a + bs(z) + \frac{r_0 \ln \left(\frac{r_m}{r_0} \right)}{G} \right)^2 - 4bs(z) \frac{r_0 \ln \left(\frac{r_m}{r_0} \right)}{G} \right]^{\frac{1}{2}}}{2b \frac{r_0 \ln \left(\frac{r_m}{r_0} \right)}{G}} \quad (11)$$

设 $D = \frac{r_0 \ln \left(\frac{r_m}{r_0} \right)}{G}$, 代入式(11)化简为:

$$\tau_z = \frac{a + bs(z) + D - \left[(a + bs(z) + D)^2 - 4bs(z)D \right]^{\frac{1}{2}}}{2bD} \quad (12)$$

2.2 传递函数计算模型

上述剪应力公式包含剪应力 τ 及其位移 s 两个未知量, 可进一步通过位移协调法进行求解。

2.2.1 单元划分

将锚杆分为 n 个单元, 每一单元视作弹性单元, 在轴力和侧摩阻力作用下处于平衡状态, 单元与土体之间视为非线性联系^[9] (图 1)。

2.2.2 单元轴力的传递

设单元 n 中点处的位移为 S_n , 据式(15) 可得相应截面位移 S_n 时的锚侧剪应力 τ_n 。由于锚杆横截面较小, 其底端与土体的粘结作用可忽略不计, 则单元 n 顶端处的轴向力 P_n 近似等于该段的锚侧摩阻力 τ_n :

$$P_n = \tau_n \cdot U \cdot l_n \quad (13)$$

根据平衡关系, 第 $n-1$ 段的轴力为:

$$s_z = \frac{\tau_0}{G} \ln \left[\frac{r_m}{r_0} \right] \quad (8)$$

式中: r_m ——剪应力可忽略范围一般取 10 倍锚杆直径;

r_0 ——锚杆的半径;

τ ——锚侧剪应力;

G ——土的剪切模量。

锚土相互作用的传递函数方程为:

$$s_z = s(z) - \frac{\tau_z r_0}{G} \ln \left[\frac{r_m}{r_0} \right] \quad (9)$$

将式(9)代入式(3):

$$\tau_z = \frac{s(z) - \frac{\tau_z r_0}{G} \ln \left[\frac{r_m}{r_0} \right]}{a + b \left[s(z) - \frac{\tau_z r_0}{G} \ln \left[\frac{r_m}{r_0} \right] \right]} \quad (10)$$

$$P_{n-1} = P_n + \tau_{n-1} \cdot U \cdot l_{n-1} \quad (14)$$

式中: U ——锚杆截面周长;

l_n ——单元 n 段的锚杆长度。

2.2.3 单元位移的传递

第 $n-1$ 段与第 n 段位移之间的联系可根据弹性

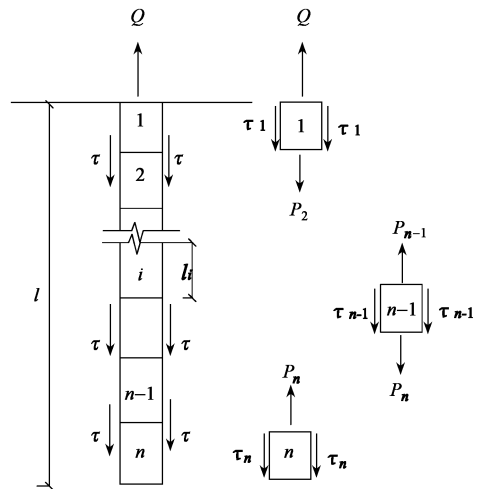


图 1 剪切位移传递分析模型

Fig. 1 The model of shear displacement transfer analysis

压缩公式确定:

$$s_{(n-1)} - s_n = \frac{p_n l_n + p_{n-1} l_{n-1}}{2E_a A} \quad (15)$$

式中: E_a 、 A ——锚杆截面的抗拉模量、面积。

设 $M = \frac{2E_a A}{L}$, 上式简化为:

$$M(s_{n-1} - s_n) = p_n l_n + p_{n-1} l_{n-1} \quad (16)$$

2.2.4 $\tau \sim s$ 传递方程

根据(13)、(14)平衡式得第 n 段 $\tau \sim s$ 关系:

$$M(s_{n-1} - s_n) = U\tau_n l_n (l_n + l_{n-1}) + U\tau_{n-1} l_{n-1}^2 \quad (17)$$

同理推导其他各段的剪力与位移的关系式:

$$\begin{aligned} &M(s_{n-2} - s_{n-1}) \\ &= U(\tau_n l_n + \tau_{n-1} l_{n-1})(l_{n-1} + l_{n-2}) + U\tau_{n-2} l_{n-2}^2 \\ &M(s_{n-i} - s_{n-(i-1)}) \\ &= U(\tau_n l_n + \tau_{n-1} l_{n-1} + \dots + \tau_{n-(i-1)} l_{n-(i-1)}) \cdot \\ &\quad (l_{n-(i-1)} + l_{n-i}) + U\tau_{n-i} l_{n-i}^2 \\ &M(s_1 - s_2) \\ &= U(\tau_n l_n + \tau_{n-1} l_{n-1} + \dots + \tau_2 l_2) \cdot (l_2 + l_1) + U\tau_1 l_1^2 \end{aligned}$$

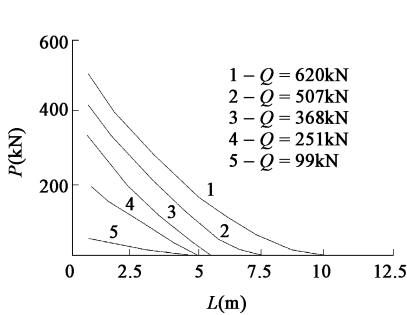


图2 轴力分布曲线
Fig. 2 Distribution curve of axial force

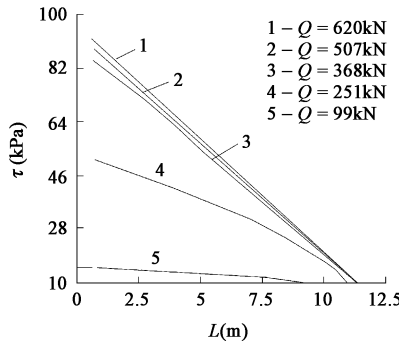


图3 剪应力分布曲线
Fig. 3 Distribution curve of shear stress

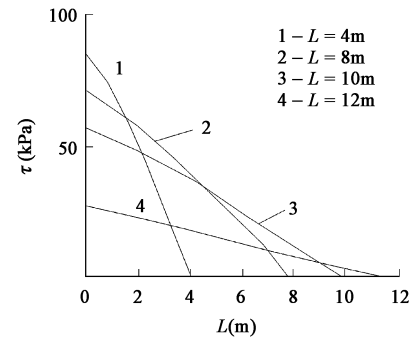


图4 剪应力分布与锚杆长度的关系
Fig. 4 Relation between shear stress distribution and length of anchor

将式(12)代入以上方程组,化成只含1个未知量的 n 元方程组,解方程组可求得每单元段的剪切位移和侧摩阻力及各段轴力。

3 抗浮锚杆实例分析

以深圳市跳水游泳馆抗浮锚杆试验为例。跳水馆基础最大埋深为8.4m,低于地下水位埋深6.4m,地下水向上浮力为64kPa。锚固地层为含砾质粉质粘土,土体剪切模量 $G_s = 10 \times 10^{-3}$ MPa。试验采用抗浮锚杆直径分别为180、150、120和100mm,锚杆设计长度为12、10、8和4m,内配4 Φ 22mm钢筋笼,锚筋弹性模量 $E_g = 2.1 \times 10^4$ MPa,钢筋笼箍筋为 Φ 6@50mm。按设计采用二次注浆技术,注浆压力为2.5MPa,水灰比0.45,锚固体弹性模量 $E_a = 3.3 \times 10^3$ MPa。

根据锚杆各项参数利用剪切位移传递法分析锚杆受力后轴力、剪应力的分布及变形形态,模拟结果如图2、3,几种不同长度锚杆的锚侧剪应力比较如图4。

图2、图3表明,锚杆受拉拔力作用时,锚土间的

摩阻力主要集中在锚杆头部,并沿锚长向底端急剧衰减近零,轴力也同样沿锚杆递减。起初拉拔力较小时,轴力在锚头很短一段范围内迅速衰减为零,不再向锚杆深部传递,随着拉拔力的增加,轴力向锚杆底端延伸,逐渐激发锚固段的抗力。所以锚杆受力后,在头部最先达到强度极限而退出工作,荷载增加的同时又调用了更长的锚固段,最终使整个锚固段长度的作用得以发挥。如果锚杆过长,锚杆头部的轴力过大使得锚杆锚固段在未被充分利用之前就被拉断,说明了锚杆的锚固能力并非随长度呈线性增长。

由图4比较可知,在相同荷载作用下,短锚杆锚侧应力较大,而且应力沿锚杆衰减很快,锚头部易发生破坏。随着锚杆的长度的增加,应力的变化趋于均匀,可

见增加锚杆长度可以提高锚杆抗拉性能。

图5是等长的4种不同直径的锚杆剪应力分布。在同等荷载作用下,大直径锚杆锚侧应力分布均匀,直径越小,锚头处应力越集中,锚头界面处越易破坏失效,锚杆能够发挥其锚固能力的部分减少的就越快,应力向锚固底端传递得也越快,所以大直径的锚杆有利于调动更大范围内的摩阻力。

由公式(15)所反映的锚侧剪应力与位移的关系曲线如图6,出现明显拐点说明当位移为某一值时应力逐渐收敛,此时锚杆的承载力也将达到极限值,此时锚杆的变形将在很短时间内迅速增长直至失效。在给定任意拉拔 P_1 ,通过传递函数式(13)~(17)的反推可得

到锚头位移 s_1 , 将模拟的锚杆实测曲线 $Q \sim s$ 曲线与 $P_1 \sim s_1$ 曲线相对比如图 7, 两者形态基本相接近。

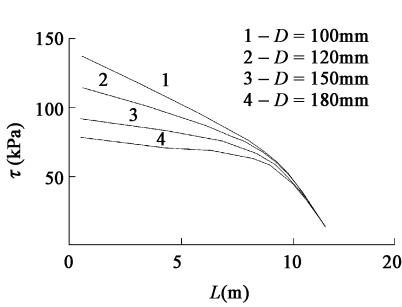


图 5 剪应力分布与锚固体直径的关系
Fig. 5 Relation between shear stress distribution and diameter of anchor

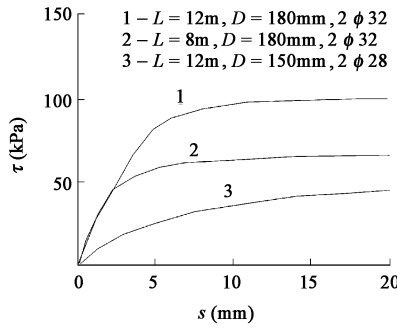


图 6 剪应力-剪切位移的关系
Fig. 6 Relation between shear stress and shear displacement

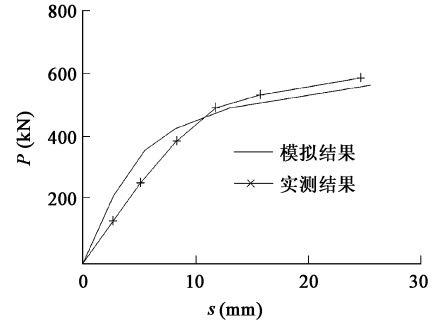


图 7 模拟结果与试验结果对比图
Fig. 7 Contrast of results by model and test

4 结论与建议

(1) 基于剪切位移传递法建立的锚侧剪应力与剪切变形的关系表达式能够描述抗浮锚杆受荷状态下的应力状态及变形趋势。

(2) 拟合的 $\tau \sim s$ 曲线能定性说明在锚杆整个长度范围内轴力、摩阻力、位移的变化形式。

(3) 剪切位移传递法可以求得任意荷载作用下 $Q \sim s$ 曲线, 预估承载力的极限值。

(4) 模型中锚杆划分的单元数量直接影响力学和变形计算的准确性, 确定合适的单元数目是准确反映锚杆轴力、侧摩阻力的大小的关键。

参考文献:

- [1] 张建青. 首都国际机场停车楼永久性抗浮锚桩施工

试验研究[J]. 岩土工程技术, 1999, 2(2): 30-33.

- [2] 阎莫明, 徐桢祥. 岩土锚固技术的新进展[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000.
- [3] 王贤能, 叶蓉, 周逢君, 等. 抗浮锚杆的应用实例[J]. 地质灾害与环境保护, 2001, 12(1): 69-71.
- [4] 朱珊, 钱俊, 牛腾飞. 剪切位移传递法确定单桩承载力[J]. 建筑技术开发, 2002, 29(11): 29-31.
- [5] 姜连馥. 土层锚杆剪切位移-传递函数分析方法[J]. 兰州铁道学院学报, 2002, 21(6): 19-22.
- [6] Duncan, JM, ChangCY. Nonlinear analysis of stress and strain in soils[J]. JSMFD: ASCE, 1970, 96(5): 1629.
- [7] 朱珊, 牛腾飞. 竖向荷载作用下单桩侧摩阻力及剪切位移研究[J]. 金属矿山, 2003(1): 16-17.
- [8] 朱百里, 沈珠江. 计算土力学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1990.

Shear displacement transfer analysis on stress of anti float anchor

CHEN Tang yin^{1,2}

(1. National Major Laboratory of Geological Hazard Control and Geological Environment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. Civil and Construction College, The Southwest University of Science Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract: Based on the assumption that the frictional resistance and shear displacement was nonlinear variation, and the soil had nonlinear elastic behavior, the equation of shear stress and shear displacement was made out by shear displacement transfer method. The model described the changes of axial force, frictional resistance and displacement under the various loadings, and analyzed on the working mechanism of anchor shear stress change. At the same time it estimated the bearing capacity limit.

Key words: anti float anchor; shear displacement transfer function; shear stress; shear displacement