

文章编号: 1000-7598-(2006) 11-2033-05

抗浮锚杆应力-应变状态的线弹性理论分析

陈棠茵¹, 王贤能²

(1.西南科技大学 土木与建筑工程学院, 四川 绵阳 621010; 2.深圳工勘岩土工程有限公司, 深圳 518026)

摘 要: 假定抗浮锚杆各部分贡献的位移与锚杆轴力均呈线弹性关系, 运用力学原理分析锚杆轴力与锚侧摩阻力、锚-土变形之间的相互关系, 推导出锚杆的摩阻力、轴力及各部分变形与锚杆各参数的相互关系。实例验证结果表明: 基于线弹性模型基础上建立的摩阻力、轴力和位移公式能够较好地描述垂向抗浮锚杆在弹性变形阶段的内力和变形形态; 获得了抗浮锚杆摩阻力和剪切位移沿锚固长度的分布规律; 证实了锚土界面处变形为土层抗浮锚杆变形的主要部分。

关 键 词: 抗浮锚杆; 线弹性; 摩阻力; 轴力; 剪切模量

中图分类号: TU 472

文献标识码: A

Linear elastic analysis of stress-strain state of anti-float anchor

CHEN Tang-yin¹, WANG Xian-neng²

(1.College of Civil and Architectural Engineering Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China

2.Shenzhen Gongkan Geotechnical Engineering Co. Ltd., Shenzhen 518026, China)

Abstract: On the assumption that any part of displacement of anti-float anchor is linear elastic relation, the relations about frictional resistance, axial force and displacement between soil and bolt can be derived by applying the mechanics theory. The example shows that based on the linear elastic analysis model, the formulas of frictional resistance, axial force and displacement can describe the elastic stress and strain better. The distribution of frictional resistance and shear displacement along the anti-float anchoring length are obtained. It confirms that the shear displacement between the bolt and surrounding soil is main displacement for the bolts buried in soil.

Key words: anti-float anchor; linear elasticity; frictional resistance; axial force; shear modulus

1 引 言

随着我国城市地下建筑的发展, 沿海、沿江大城市地下水浮力对地下结构产生的破坏现象屡屡暴露出来。与此同时, 抗浮锚杆成为抵抗地下水浮力的主要措施之一, 并被广泛应用。如大连体育场东外场地下室抗浮工程^[1]、深圳华侨城民俗文化村百艺广场升降舞台基础工程^[2]、江苏利港电厂废水处理滞留池底板破坏的处理^[3]、海口市“梦幻”花园地下室上浮的处理工程^[3]等。相对于抗浮锚杆技术的广泛应用, 其设计、施工、检测目前仍采用普通锚杆的设计和施工方法, 没有现行的规范可循^[2, 3]。由于抗浮锚杆是一种竖向锚杆, 锚侧不受上覆岩土层的侧向压应力作用, 与普通近水平向锚杆作用机制存在着差别; 抗浮锚杆的检测只关心抗拔力,

而位移是关系到抗浮稳定的一个关键性指标, 抗浮锚杆中土层与锚固体间的摩阻力和变形的形态及取值范围需要进一步研究^[2, 3]。大量试验表明, 抗浮锚杆通过杆体和注浆体形成的锚固体与土层之间的摩擦作用传递摩阻力, 且摩阻力的传递具有不均匀性^[3]。Phillips 将混凝土与钢筋结合应力的研究成果直接用于锚杆问题, 假定结合应力分布呈负指数^[4, 5]关系。陆士良利用中性点处的轴力来表示锚杆的黏结能力^[6], 推导了黏结力在锚杆周围分布的不均匀关系, 但以上结果均是岩石地基中的短锚杆为研究对象。目前基于有限元和边界元^[7]的成果计算的锚杆解析法公式过于复杂。张季如建立了锚固体与周围岩土体剪力与剪切变形的双曲线函数模型^[8], 用于基坑支护灌浆锚杆取得较好成果。这里假定锚杆体系的应力和变形呈线弹性增加关系, 推导锚侧

收稿日期: 2004-10-11

修改稿收到日期: 2005-01-25

基金项目: 建设部 2003 年科学技术项目计划, 建筑抗浮锚固技术的应用研究 (No. 03-3001)。

作者简介: 陈棠茵, 女, 1976 年生, 博士研究生, 主要从事岩土工程的教学与科研工作。E-mail: chentangyin@163.com

摩阻力、锚杆变形与锚杆各参数之间的关系式, 运用于含砾质黏性土层中的抗浮锚杆, 来获得土层抗浮锚杆荷载传递的特性。

2 线弹性理论分析法的原理

竖向抗浮锚杆在拉拔力作用下, 锚杆体系产生相应的变形。当拉拔力较小时, 锚固体与土体均处于弹性变形阶段, 且变形协调; 当拉拔力达到某一值时, 锚固体与土体发生相对滑移, 此时锚杆仍处于正常工作中, 锚土间的作用力为摩阻力 τ 。考虑到锚杆的塑性变形较大时锚杆已近失效, 而锚杆工作时段内的塑性变形一般很小, 在这里忽略不计, 将锚杆体系作为一弹性体来看待, 如图 1 所示。按线性理论将锚杆总位移 S 分为以下几部分: 自由段锚筋的弹性变形 S_{fe} 、锚固体的弹性变形 S_{ae} 、锚固体与土层界面的相对位移 S_s 、土体的弹性变形 S_{te} , 表达式如下:

$$S = S_{fe} + S_{ae} + S_{te} + S_s \quad (1)$$

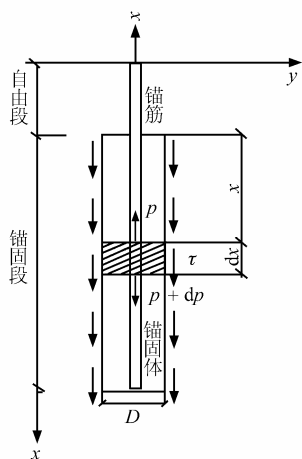


图 1 线弹性分析示意图

Fig.1 Linear elastic analysis sketch

由弹性理论得到自由段锚筋的变形:

$$S_{fe} = \frac{QL_f}{E_g A_g} \quad (2)$$

式中 Q 为外荷载; L_f 为自由段长度; A_g 为锚筋截面积; E_g 为锚筋弹性模量。当荷载 Q 为定值时, 自由段伸长量 S_{fe} 也为定值。

$$\text{设 } S' = S - \frac{QL_f}{E_g A_g} = S_{ae} + S_{te} + S_s \quad (3)$$

式中 S' 为沿锚长变化的量, 随着位置 x 的变化而变化。

$$S'(x) = S_{ae}(x) + S_{te}(x) + S_s(x) \quad (4)$$

由集中应力作用下弹性地基的剪切变形理论^[9], 得锚侧土体的变形如下:

$$S_{te}(x) = \frac{D\tau(x)}{2G_{ts}} \ln \left| \frac{r_m}{D} \right| \quad (5)$$

式中 τ 为锚固体表面摩阻力; G_{ts} 为土体剪切模量; r_m 为剪切影响半径 ($r_m = 0.5(1-\nu)L_a$), ν 为泊松比; D 为锚固体直径。将式 (5) 代入式 (4), 则

$$S'(x) = S_{ae}(x) + \frac{D\tau(x)}{2G_{ts}} \ln \left| \frac{r_m}{D} \right| + S_s(x) \quad (6)$$

大量抗浮锚杆试验表明: 锚侧摩阻力与相对位移在分布形态上非常相似, 平山英喜^[9]等人提出用双曲线函数来描述锚侧摩阻力 τ 与锚土相对位移 S_s 的关系:

$$S_s(x) = \frac{a\tau(x)}{a - b\tau(x)} \quad (7)$$

式中 a, b 为双曲线参数。

式 (7) 代入式 (6), 整理得

$$S'(x) = S_{ae}(x) + \frac{D\tau(x)}{2G_t} \ln \left| \frac{r_m}{D} \right| + \frac{a\tau(x)}{a - b\tau(x)} \quad (8)$$

令 $m = \frac{D}{2G_t} \ln \left| \frac{r_m}{D} \right|$, 公式化简为

$$S'(x) = S_{ae}(x) + m\tau(x) + \frac{a\tau(x)}{a - b\tau(x)} \quad (9)$$

为了进一步确定 τ 与锚杆变形的关系, 在锚固体中取一单元体进行受力分析, 建立内力与变形的关系式。由图 1 阴影部分所示。假定摩阻力沿锚杆体环向均匀分布, 则锚固体轴力 p 与 τ 的关系如下:

$$\tau(x) = -\frac{dp(x)}{\pi D dx} \quad (10)$$

根据虎克定律, 锚固体轴力 p 与锚固体弹性变形的关系为

$$S_{ae}(x) = \int_0^x \frac{\sigma(x)}{E_a} dx = -\int_0^x \frac{p(x)}{AE_a} dx \quad (11)$$

式中 A 为锚固体截面积; $\sigma(x)$ 为点 x 处的应力; E_a 为锚固体弹性模量。由式 (10) 和式 (11) 得摩阻力与锚固体位移 S_{ae} 关系式:

$$S_{ae}(x) = \int_0^x \left[\int_0^x \frac{4}{E_a} \tau(x) dx \right] dx \quad (12)$$

将式 (12) 代入式 (9), 求导后得到锚土间摩阻力的方程式:

$$\frac{d^2\tau}{dx^2} - \frac{4E_a}{a^2 + m(a-b)^2} \frac{d\tau}{dx} = -\frac{(a-b)^2}{a^2 + m(a-b)^2} \frac{dS'(x)}{dx} \quad (13)$$

令 $K = \sqrt{\frac{1}{a^2 + m(a-b)^2}}$, 则

$$\frac{d^2\tau}{dx^2} - \frac{4E_a}{K^2} \frac{d\tau}{dx} = -\frac{(a-b)^2}{K^2} \frac{dS'}{dx} \quad (14)$$

对于给定的位移分布 $S'(x)$ ，就可以求得方程的闭合解。

由图 1 分析可知，锚头处轴力与外施荷载相等，锚杆底端为锚固端，变形和轴力为 0。

引入边界条件： $x=0$ ， $p=Q$ ； $x=L_a$ ， $p=0$ ，导出 τ 的表达式：

$$\tau = (a+b)^2 \frac{e^{\frac{2\sqrt{E_0}}{K}x} + e^{-\frac{2\sqrt{E_0}}{K}x}}{e^{\frac{2\sqrt{E_0}}{K}L_a} - e^{-\frac{2\sqrt{E_0}}{K}L_a}} \quad (15)$$

同理，将式 (16) 反代回式 (7)、式 (10)、式 (12) 解得以下表达式：

$$S_s = \frac{a(a+b)^2 \left(e^{\frac{2\sqrt{E_0}}{K}x} + e^{-\frac{2\sqrt{E_0}}{K}x} \right)}{a \left(e^{\frac{2\sqrt{E_0}}{K}L_a} - e^{-\frac{2\sqrt{E_0}}{K}L_a} \right) - b(a+b)^2 \left(e^{\frac{2\sqrt{E_0}}{K}x} + e^{-\frac{2\sqrt{E_0}}{K}x} \right)} \quad (16)$$

$$p = (a+b)^2 \pi D \frac{K \left(e^{\frac{2\sqrt{E_0}}{K}x} - e^{-\frac{2\sqrt{E_0}}{K}x} \right)}{e^{\frac{2\sqrt{E_0}}{K}L_a} - e^{-\frac{2\sqrt{E_0}}{K}L_a}} \quad (17)$$

$$S_{ac} = 16(a+b)^2 \frac{e^{\frac{2\sqrt{E_0}}{K}x} + e^{-\frac{2\sqrt{E_0}}{K}x}}{e^{\frac{2\sqrt{E_0}}{K}L_a} - e^{-\frac{2\sqrt{E_0}}{K}L_a}} \quad (18)$$

以上推导的公式分别描述了锚杆在荷载 Q 作用下，锚土间摩阻力 τ 、位移 S_s 、锚固体位移 S_{ac} 、轴力 p 沿杆长的分布关系。 K 所包含的双曲线参数 a 、 b 可采用克拉夫通过坐标变换，并利用简布等人建议的公式^[9]，结合库仑破坏准则^[9]求得

$$a = \frac{1}{k_1 \gamma_w} \left[\frac{\sigma_r}{p_a} \right]^{-n} \quad (19)$$

式中 k_1 为无量纲刚度值，对于黏性土 $k_1=4\,000\sim 5\,000$ ； γ_w 为水的重度 (kN/m^3)； p_a 为大气压； n 为刚度指数 $n=0.5\sim 0.8$ 。

$$b = \frac{R_f}{\tau_f} \quad (20)$$

式中 R_f 为破坏比，取值为 $0.7\sim 0.9$ 。

$$\tau_f = k \gamma z \tan \delta + c \quad (21)$$

式中 k 为土压力系数； z 为深度； γ 为土的重度； δ 为锚土间摩擦角； c 为锚土间凝聚力。

3 抗浮锚杆实例分析

为了验证公式的适用性，以深圳市跳水游泳馆抗浮锚杆基本试验为例。该市跳水馆基础最大埋深

为 8.4 m，低于地下水位埋深 6.4 m，地下水给予基础的向上浮力为 64 kPa。工程所采用的抗浮锚杆直径均为 180 mm，内配 4 ϕ 22 mm（锚筋弹性模量 $E_g=2.1\times 10^4$ MPa）的钢筋笼，钢筋笼箍筋为 $\phi 6@50$ mm，锚杆设计长度分为 15, 14, 12, 8 m。锚固地层为黏性土，局部为砂层，黏性土主要是含砾质粉质黏土（土体剪切模量 $G_{ts}=10\times 10^{-3}$ MPa）。按设计要求配制纯水泥浆，采用二次注浆技术，第一次注浆压力为 0.5 MPa，水灰比 0.45，待初凝后，进行二次注浆，水灰比 0.5，注浆压力为 2.5 MPa（锚固体弹性模 $E_a=3.3\times 10^3$ MPa）。以 12 m 长抗浮锚杆为研究对象，根据锚杆各项参数和基本试验 $Q-S$ 数据代入上述推导公式得如下结果。

当锚杆在逐级加载时，因荷载的变化引起锚土界面处摩阻力的变化，使得轴力、位移的分布都发生变化。如图 2、图 3，轴力和侧摩阻力均随着 Q 增大而增大。当荷载较小时，轴力主要集中在端部，对深部影响不大。同样，在小量值的荷载作用下，摩阻力在锚杆端部的集中现象明显，量值较大。随拉拔力的增加，轴力向深处传递，锚杆深处的摩阻力也逐渐发挥作用，摩阻力曲线沿锚杆分布趋于均匀。

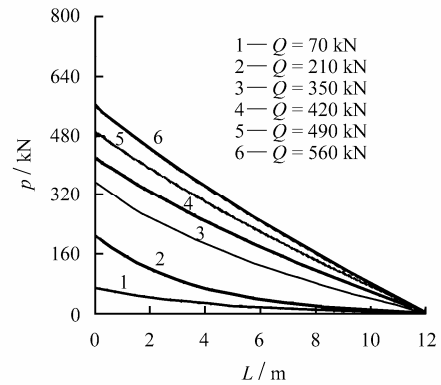


图 2 轴力分布图

Fig.2 Distribution curves of axial force

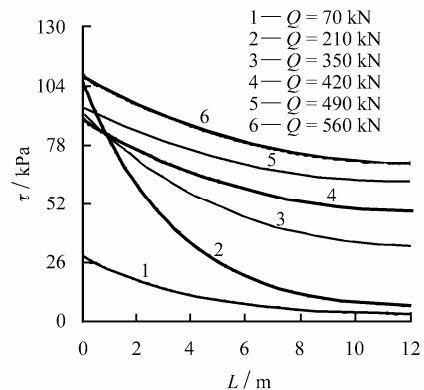


图 3 摩阻力分布图

Fig.3 Distribution curves of frictional resistance

图4~6为各部分贡献的位移与荷载 Q 的关系。锚杆的变形随着荷载的增大而增大,锚土界面的剪切变形和土体的变形要大于锚固体的变形。锚固体的变形随拉拔力的增加变化不大,主要集中在端部。锚土界面处变形呈均匀变化,而土体变形随荷载增加向底端传递较快,端部土体变形量不是很明显,变化趋势与侧摩阻力一致。在加荷初期,在摩阻力作用下锚土界面处、锚固体和土体的弹性位移相差不大,随着荷载的增加,界面剪切变形和土体变形的增长幅度开始大于锚固体变形的增长幅度。

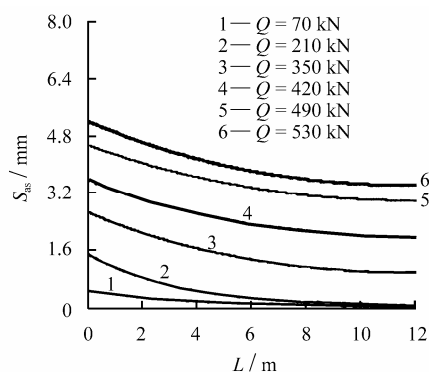


图4 锚-土界面处相对位移分布图

Fig.4 Relative displacement curves of interface

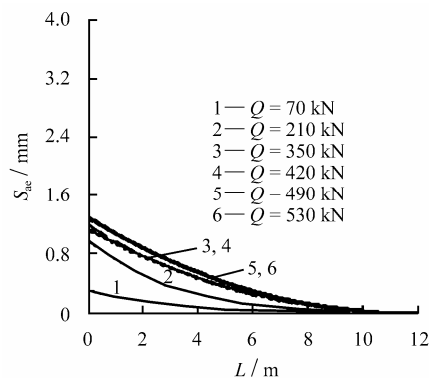


图5 锚固体弹性变形分布图

Fig.5 Elastic displacement curves of bolt

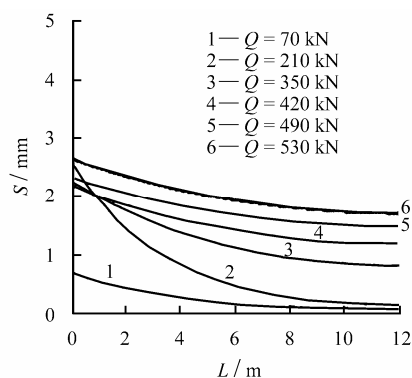


图6 土体弹性位移图

Fig.6 Elastic displacement curves of soil

理论上, $x=0$ 处的计算位移是锚杆的总位移, 对应不同的外荷载 Q_i , 可得到相应的锚头位移 S_{0i} , 作出 $Q_i - S_{0i}$ 曲线图7。

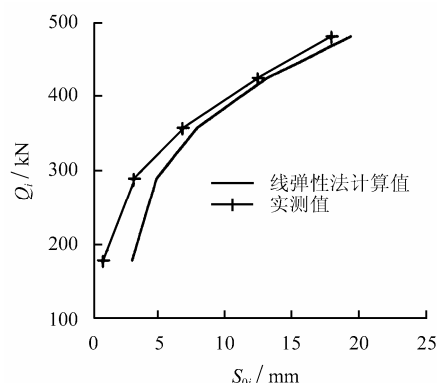


图7 总弹性位移分布对比图

Fig.7 Total elastic displacement curves

通过线弹性法所得 $Q_i - S_{0i}$ 曲线与实测 $Q-S$ 曲线的对比, 忽略计算时土体的某些参数取均值而造成的误差, 两曲线在变化形态和数值上相近。说明由线弹性理论推导的位移公式是能够很好地反映锚杆受力及弹性变形性状。

4 结 论

(1) 由线弹性理论建立竖向抗浮锚杆的力学模型, 推导锚杆各参数与轴力、摩阻力、锚侧位移的关系式。

(2) 运用抗浮实例进行分析表明: 在外力作用下, 轴力与锚侧摩阻力在锚头处呈集中状态, 量值沿锚长逐渐衰减, 在锚杆底端某处衰减至0。

(3) 锚杆的变形随着荷载的增大而增大。其中锚固体的变形增加量变化不大, 主要集中在端部; 土体变形随荷载增加变化不大, 向底端传递较快; 锚土界面处变形随荷载增加, 增加量较大, 是该土层抗浮锚杆变形的主要部分。

(4) 该方法所得结果对于描述锚杆工作状态下的弹性变形效果较好, 但还不能完全表达锚杆由加荷到屈服破坏整个过程的变形, 这一步工作有待进行深入的研究。

参 考 文 献

- [1] 程良奎, 范景伦, 韩军, 等. 岩土锚固[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [2] 王贤能, 周逢君, 徐金台. 深圳地区抗浮锚杆应用现状及分析[A]. 徐帧祥, 闫莫明, 苏自约主编. 岩土锚固技术与西部开发[C]. 北京: 人民交通出版社, 2002.

- [3] 王贤能, 叶蓉, 周逢君. 土层抗浮锚杆试验破坏标准选取的建议[J]. 地质灾害与环境保护, 2001, 12(3): 73—77.
WANG Xian-neng, YE Rong, ZHOU Feng-jun. Proposals for the selection of failure criterion for soil float-resisting anchor rod test[J]. **Journal of Geological Hazards and Environment Preservation**, 2001, 12(3): 73—77.
- [4] Hanna T H. 锚固技术在岩土工程中的应用[M]. 胡定, 邱作中, 刘浩吾, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1987.
- [5] Hobst, ZAJic J. Anchoring in Rock and Soil[M]. New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1983.
- [6] 陆士良. 锚杆锚固力与锚固技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1998.
- [7] 姜清辉, 丰定祥. 三维非连续变形分析方法中的锚杆模拟[J]. 岩土力学, 2001, 22(2): 176—178.
JIANG Qing-hui, FENG Ding-xiang. Modeling of rock bolts in three-dimensional discontinuous deformation analysis[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2001, 22(2): 176—178.
- [8] 张季如, 唐保付. 锚杆荷载传递机理分析的双曲线函数模型[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(2): 61—65.
ZHANG Ji-ru, Tang Bao fu. Hyperbolic function model to analyze load transfer mechanism on bolts[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2002, 24(2): 61—65.
- [9] 沈珠江. 理论土力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.