

土层锚杆的应力传递及变形分析

Stress Transfer and Deformation Analysis of Soil Anchor Rod

□ 周志创 谭跃虎 段建立 杜青 贾蓬 (解放军理工大学工程兵工程学院 江苏南京 210007)

【摘 要】采用 Cooke 提出的摩擦桩的荷载传递物理模型, 导出了土层锚杆荷载传递的双曲线函数模型及荷载与位移关系的理论解, 并将理论解与现场实测数据进行了比较, 两者吻合较好, 该模型可供工程设计应用参考。

【关键词】土层锚杆 应力传递 位移 变形

【中图分类号】TU472.3

/文献标识码 A

【文章编号】1004-1001(2005)03-0002-04

土层锚杆在我国深基坑支护、边坡加固、滑坡治理等工程中的应用日益广泛, 但目前对于土层锚杆锚固段应力传递及变形的认识研究还不够, 在工程实践中, 锚杆的变形关系到其作用的正常发挥及基坑的整体稳定性, 对锚杆并不是单纯以其承载力作为设计标准, 而往往是以其最大允许变形量作为设计标准, 所以, 传统的单纯以承载力作为设计标准是不全面的, 也不能满足工程实际的需要。本文采用 Cooke 提出的摩擦桩的荷载传递物理模型, 导出了土层锚杆的荷载与位移关系的理论解, 并与现场实测数据进行了比较, 两者吻合较好, 该模型可供工程设计应用参考。

1 土层锚杆的传力机理

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, 拉力首先通过钢拉杆周边的砂浆握裹力传递到砂浆中, 然后再通过锚固段钻孔周边的地层摩阻力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承受拉力外, 锚杆的抗拔作用还必须满足以下三个条件:

(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。

2 土层锚杆的变形分析

2.1 剪切位移法的基本原理

对于竖直受压桩, Cooke 在 1973 年提出剪切位移法, Cooke^[1]、Randolph^[2]作了发展。对于桩身而言, Cooke 提出的摩擦桩的荷载传递物理模式如图 1 所示。在图 1 中桩侧的环向土单元 ABCD, 在桩发生沉降后, 也随之沉降, 并发生剪切变形 A、B、C、D、, 将剪应力传递给相邻单元 BCEF, 这个传递过程连续地一直传递到很远处 x 点, 距桩轴为 $r_n = nr_0$, 在 x 点处由于剪应变已很小, 可忽略不计。这种荷载传递模式, 一些学者已经证实在桩的竖向垂直荷载作用的变形计算中是可行的^[3], 也有学者将其运用于抗拔桩上^[4]。笔者认为, 这种变形及荷载传递模式也可用于土层锚杆, 因为锚杆的抗拔力主要由锚固段周边摩阻力来承担, 完全符合 Cooke 的分析假设。

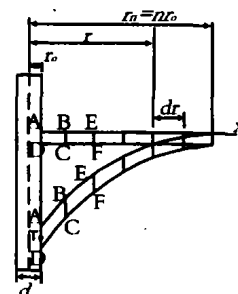


图 1 Cooke 桩身荷载传递模式

【作者简介】周志创(1979~),男,在读硕士研究生,联系地址:南京解放军理工大学工程兵工程学院研究生四队(210001),电话:13770676135, E-mail:wingboy1979@sina.com。

【收稿日期】2004-12-28

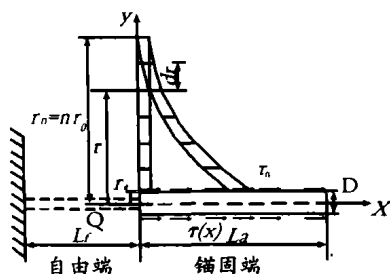


图2 土层锚杆荷载传递分析简图

2.2 土层锚杆变形计算基本公式的推导

锚杆总位移 S 由自由段钢筋(钢束)的弹性变形 S_{fe} 、锚固体的弹性变形 S_{ae} 、锚固体与锚固层界面的剪切位移 S_{as} 、自由段和锚固体的塑性变形、钢筋(钢束)的调直以及锚具和垫板间的接触间隙等组成。锚杆的塑性变形一般很小,可忽略不计,通过对锚杆的预张拉可基本消除接触间隙的影响,因此锚杆总位移为:

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

$$S = S_a + \frac{QL_f}{E_s A_s} \quad (2)$$

$$\text{其中: } S_a = S_{ae} + S_{as} \quad (3)$$

S_a 为锚固体的总位移, Q 为锚杆轴力; L_f 为自由段长度; E_s 为钢筋(钢束)的弹性模量; A_s 为钢筋(钢束)截面积。

根据图1剪应力传递概念,可求的图2中距锚固段轴线 r 处土单元的剪应变为:

$$\gamma = \frac{ds}{dr} \quad (4)$$

式中 S —锚杆侧土体的横向变形。

则相应的剪应力 τ 为:

$$\tau = G_s \gamma = G_s \frac{ds}{dr} \quad (5)$$

式中 G_s —土体的剪切模量。

根据平衡条件有:

$$\tau = \tau_0 r_0 / r \quad (6)$$

式中 $\tau(r_0) = \tau_0$, r_0 —锚杆的半径。

将式(6)代入式(5)得:

$$ds = \frac{\tau}{G_s} dr = \frac{\tau_0 r_0}{G_s} \frac{dr}{r} \quad (7)$$

对均质土而言,将式(7)积分,可得:

$$s(r) = \frac{\tau_0 r_0}{G_s} \int_{r_0}^r \frac{dr}{r} = \frac{\tau_0 r_0}{G_s} \ln\left(\frac{r}{r_0}\right) \quad r_0 \leq r \leq r_m \quad (8)$$

$$s(r) = 0 \quad (r > r_m)$$

令 $r = r_0$ 则锚杆与土间的相对位移的计算公式为:

$$S = \varepsilon \tau_0 r_0 / G_s \quad \text{其中, } \varepsilon = \ln(r_m / r_0) \quad (9)$$

根据 Randolph^[2]等人的研究结果, $r_m = 2.5(1 - \nu_s) l_a$,

式中 ν_s 是锚杆侧土体的泊松比, l_a 为锚杆锚固段长度。

抗拔锚杆的锚固段在荷载作用下会产生拉伸,所以 τ_0 随轴力 Q 不均匀分布而不为常数,其大小应与长度 x 有关,因此式(9)变为:

$$s(x) = S_{as} = \frac{\varepsilon \tau_0(x) r_0}{G_s} \quad (10)$$

假定锚固段材料是线弹性的,即符合 Hooke 定律,则在长度 x 处其拉伸应变与轴力 $Q(x)$ 的关系为:

$$\frac{\delta S_{ae}}{\delta x} = \frac{Q(x) r_0}{\pi \gamma^2 \sigma E} \quad (11)$$

式中, E 是锚固段的弹性模量,其可采用 $E \frac{E_s A_s + E_b A_b}{A_s + A_b}$ 计算, E_s 和 E_b 分别是砂浆体和杆体的弹性模量, A_s 和 A_b 分别是砂浆体和杆体的截面积。

根据剪应力平衡条件得:

$$\frac{\delta Q(x)}{\delta x} = -2 \pi r_0 \tau_0 \quad (12)$$

由式(11)和式(12)可得:

$$\frac{\delta^2 S_{ae}}{\delta x^2} = \frac{1}{\pi r_0^2 E} \cdot \frac{\delta Q(x)}{\delta x} = -\frac{2}{r_0 E} \tau_0(x) \quad (13)$$

将式(3)、(10)代入式(13)得到剪切位移法的控制微分方程为:

$$\frac{\delta^2 S_{as}}{\delta x^2} = \frac{2}{r_0^2 \varepsilon \lambda} S_{as} \quad (14)$$

式中 $\lambda = E/G_s$,

式(14)的通解表达式为: $S_{as} = Ae^{\mu x} + Be^{-\mu x}$, 其中

$$\mu = \left(\frac{2}{r_0^2 \varepsilon \lambda} \right)^{0.5} = \beta \cdot \left(\frac{2}{r_0^2 \varepsilon} \right)^{0.5} \text{。由边界条件可以解出}$$

待定参数 A 、 B 。边界条件为:

$$\frac{\delta S_{as}}{\delta x} \Big|_{x=0} = \frac{-Q(0)}{\pi r_0^2 E} \quad \text{即: } \mu(A-B) = \frac{-Q_0}{\pi r_0^2 E}$$

$$\frac{\delta S_{as}}{\delta x} \Big|_{x=l_a} = 0 \quad \text{即: } \mu(Ae^{\mu l_a} - B^{-\mu l_a}) = 0$$

$$\text{可解得: } A = \left(\frac{Q_0}{\pi r_0^2 \mu E} \right) / (e^{2\mu l_a} - 1)$$

$$B = \left(\frac{Q_0 e^{2\mu l_a}}{\pi r_0^2 \mu E} \right) / (e^{2\mu l_a} - 1)$$

$$\text{整理得到: } S_{as} = \frac{Q_0 \cosh[\mu(l_a - x)]}{\pi \mu r_0^2 E \sinh(\mu l_a)} \quad (15)$$

将式(15)代入式(11)和式(12),得锚固体的轴力和表面摩阻力分别为:

$$Q(x) = \frac{Q_0 \sinh[\mu(l_a - x)]}{\sinh(\mu l_a)} \quad (16)$$

$$\tau_0(x) = \frac{Q_0 \mu \cosh[\mu(l_a - x)]}{2 \pi r_0 \sinh(\mu l_a)} \quad (17)$$

将式(16)代入式(11)积分,得锚固体的弹性变形为:

$$s_{ae} = Q_0 \cdot \frac{ch(\mu l_a) - ch[\mu(l_a - x)]}{\pi r_0^2 \mu Esh(\mu l_a)} \quad (18)$$

在锚固段顶端, $s_{ae}=0$ 。将 $x=0$ 代入式(15)得:

$$s_a = s_{as} = \frac{Q_0 cth(\mu l_a)}{\pi \mu r_0^2 E} \quad (19)$$

2.3 讨论

在公式推导过程中, 参数 β ($\beta = \lambda - 0.5 = \sqrt{G_s/E}$) 对锚杆的应力传递及变形有重要影响, 并通过参数 μ 具体表现出来。图3、4是一组不同 β 值所对应的轴力和摩阻力沿某锚杆锚固长度的分布。图中显示, 比值 G_s/E 越大, 即 β 越大, μ 就越大, 轴力在锚固顶端衰减越快, 摩阻力在锚固顶端的分布就越集中; 反之, 比值越小, 则 μ 越小, 轴力沿锚固段衰减越缓, 摩阻力分布越均匀。

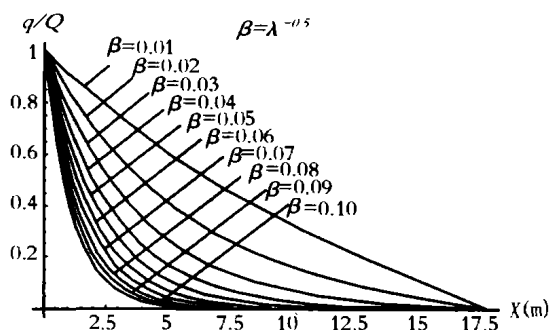


图3 轴力沿锚固长度分布

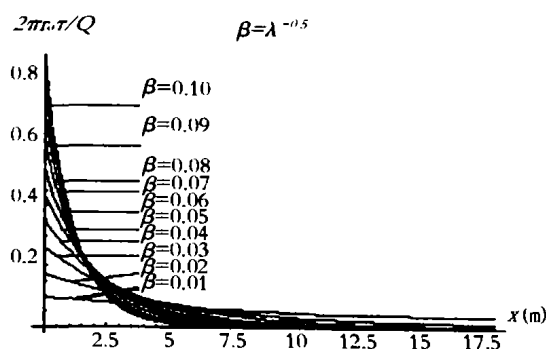


图4 摩阻力沿锚固长度分布

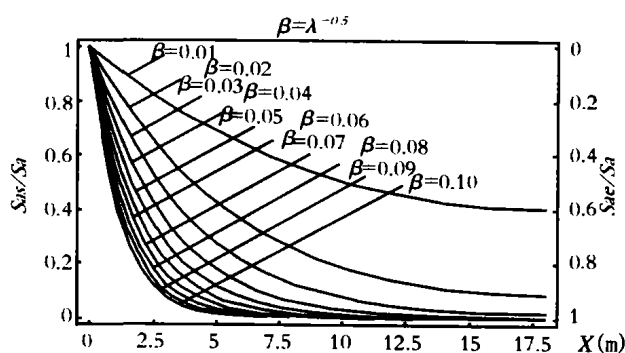


图5 S_{ae} 和 S_{as} 沿锚固长度分布

图5为一组不同 β 值所对应的 s_{ae} 和 s_{as} 沿锚固长度的分布, 图中显示, β 值越大, 剪切位移在锚固顶端的分布就越集中, 而后逐渐向下发展, 在锚固底端越来越小, 甚至渐趋于零, 仅存在锚固体的弹性变形; 反之, β 值越小, 剪切位移的分布就越均匀。显然, 剪切位移的这种分布规律与摩阻力的分布规律是一致的。同时, 图3~5显示锚杆锚固段发挥作用的长度是有限的, 这也就是说, 进一步增加长度, 并不会对提高锚杆承载力带来明显的效果。

综上所述, 锚固体表面摩阻力的分布和临界锚固长度取决于比值 G_s/E 的大小, 与锚固段的长度无关。可以推断, 对坚硬的岩石锚固层, 锚固长度愈短, 越能发挥摩阻力的作用。而对软粘土锚固层, 摩阻力沿整个锚固长度趋于均匀分布, 所需锚固长度较长。应该指出, 本文推导是在锚固体与锚固层间的剪力与剪切位移呈线性关系的基础上进行的, 上述理论分析仅限于弹性范围。

2.4 土层锚杆变形计算

由式(2)、式(19)得土层锚杆的变形 s 为:

$$s = s_0 + s_{re} = Q_0/K_0 + Q_0/K_f = Q_0 \cdot (K_0 + K_f)/K_0 K_f \quad (20)$$

式中, $K_f = \frac{E_0 A_0}{L_f}$, $K_0 = \frac{\pi \mu r_0^2 E}{cth(\mu l_a)}$ 分别为锚杆自由段刚度和锚固段刚度系数。

3 理论解与模型试验结果比较

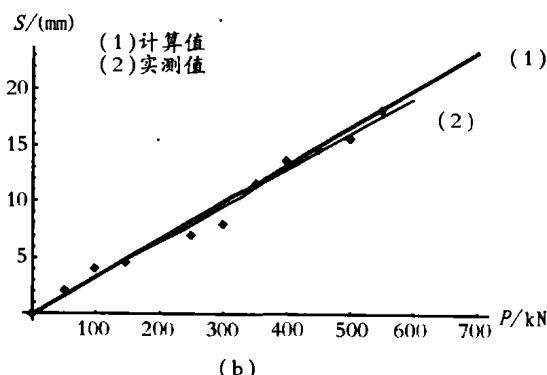
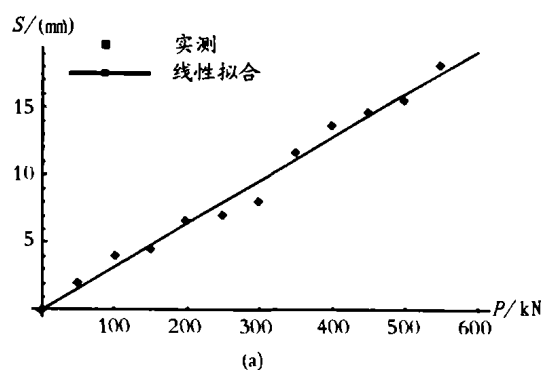


图6 锚杆位移实测值和计算值比较

土锚杆和挡土桩共同作用的经验分析法

Empirical Analyzing Method for Combined Action of Soil Anchor Rod and Earth-Retaining Pile

□ 刘岸军 龚晓南 (浙江大学土木系 杭州 310027)

□ 钱国桢 (杭州天元建筑设计院 杭州 311201)

【摘要】对土锚杆和挡土桩共同作用的评估,主要是参照有关土锚杆的抗拔力试验资料,提出计算锚杆挡土桩内力和位移的方法。工程实例说明,采用经验分析法修正,土锚杆挡土墙组合的变形规律与实测结果基本吻合。

【关键词】建筑基坑 土锚杆 挡土桩 共同作用

【中图分类号】TU472.3

/文献标识码 A

【文章编号】1004-1001(2005)03-0005-03

当前计算锚杆挡土桩内力的方法多种多样,主要的有等值梁法、M法、1/2分担法以及逐层开挖支撑力不变法等,这些方法除逐层开挖支撑力不变法以外,均没

有考虑锚杆与挡土桩的变形,而逐层开挖支撑力不变法虽然考虑了变形,但其假定支撑力不变又与实际不符合,而且必须每开挖一层计算一次,使计算工作量大大增加。M法虽然也可以将锚杆与挡土桩的共同作用考虑进去,但参数 m 取值变化较大,对计算结果影响也很大。因此本文在等值梁基础上,考虑锚杆和挡土桩共同作用,结合锚杆的抗拔力试验资料,对其内力和变形进行了分析。

【作者简介】刘岸军(1979-),男,硕士研究生,联系地址:杭州市浙大路38号32-373(310027),电话:(0571)87988415, E-mail:gangong@sina.com.cn.

【收稿日期】2005-01-25

试验利用为某高层建筑深基坑支护工程而设计的灌浆锚杆,其有关参数如下: $L_f=5.5$ m, $L_a=17.5$ m, $D=130$ mm, $A=132.7$ cm², 锚钢筋 3 ϕ 25 mm, $E_g=2.0 \times 10^5$ MPa, $A_g=14.7$ cm²; 浆体: $A_b=118$ cm², $E_b=2.0 \times 10^4$ MPa。则锚固体的等效弹性模量 $E=4.0 \times 10^4$ MPa; 周边土的有关参数指标为: $G_s=10.2$ MPa, $V_s=0.2$ 。理论值和实验结果对比见图6。图中显示两者结果相符合。

难。本文推导出的土层锚杆荷载与位移理论解,与某支护工程实测数据相比较,二者较为吻合,初步证明了该模型在线性阶段的正确性。只要有地基土的相关力学参数和施工设计的相关参数就能得到反映锚杆实际受力情况的计算结果,所以本理论解具有一定的实用意义。

4 结语

(1) 本文从桩基荷载传递规律的剪切位移模式出发,推导出土层锚杆荷载传递的双曲函数模型,获得了锚杆摩阻力和剪切位移沿锚固长度的分布规律及影响因素。分析表明,锚杆的剪切位移、摩阻力分布和临界锚固长度均取决于锚固体与锚固层之间的剪切模量与锚固体弹性模量之比值,与锚固体长度无关。

(2) 土层锚杆的变形计算是一个十分复杂的问题,要精确计算其变形,在理论上和实践中都存在一定的困

【参考文献】

- 1 Cooke R W, Prince G, Tarr K J. Jacked Pile in London Clay: A Study of Load Transfer and Settlement under Working Conditions[J]. Geotechnique, 1979. 29(2): 113-147.
- 2 Randolph M F, Wroth C P. Analysis of Deformation of Vertically Loaded Piles[J]. Journal of Geotechnical Engineering. ASCE. 1978. 104(12): 1465-1489.
- 3 刘祖德. 抗拔桩基础[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 1996. 642-674.
- 4 张尚根, 吴涛, 尹峰. 抗拔桩的变形分析[J]. 工业建筑, 2002(11).
- 5 张季如, 唐保付. 锚杆荷载传递机理分析的双曲函数模型[J]. 岩土工程学报, 2002(2). 189-192.