

文章编号: 1000-7598(2009)02-0333-06

嵌岩抗拔桩作用机制研究

何思明^{1,2}, 吴永^{1,2}, 李新坡^{1,2}

(1. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 成都 610041; 2. 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041)

摘要: 嵌岩抗拔桩广泛应用于现代化建设的各个领域, 但就其作用机制研究来说还有待进一步完善, 关于其荷载传递特性、侧阻力分布规律及其影响因素等还存在许多模糊认识。以剪滞模型为基础, 通过理论分析和验算, 讨论了抗拔桩侧阻力分布规律、荷载-变位特性。结果表明: 当抗拔荷载低于弹性极限抗拔时, 桩侧阻力呈指数规律分布, 荷载-变位曲线呈线性变化; 当抗拔荷载大于弹性极限抗拔荷载时, 桩侧阻力分为两段, 其中脱黏段上侧阻力均匀分布, 黏结段上侧阻力呈指数规律分布, 荷载-变位曲线呈非线性规律变化。

关键词: 抗拔桩; 剪滞理论; 荷载变位特性

中图分类号: TU 472

文献标识码: A

Research on mechanism of uplift rock-socketed piles

HE Si-ming^{1,2}, WU Yong^{1,2}, LI Xin-po^{1,2}

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Process, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

Abstract: The uplift rock-socketed piles have been widely used in modern civil engineering constructions. However, some mechanism of it such as the load transmission characteristic, the side resistance distribution and its influencing factors has not been studied clearly. The shear lag model is used to analyze the side resistance distribution law and the load-displacement characters of uplift rock-socketed piles. Based on theoretical analyses and checking calculation, it is shown that when the load is lower than the elastic limit, the distribution follows the exponential law; and the load-displacement curve assumes linear changes. On the contrary, when the load exceeds the elastic limit the side resistance distribution will be divided into two parts as decoupling section and coupling section respectively. The side resistance is even in the decoupling section, while it follows exponential law in coupling section. Meanwhile, the load-displacement presents a nonlinearity.

Key words: uplift pile; shear lag theory; load-displacement characters

1 引言

抗拔桩常用于地下构筑物的抗浮和受大弯矩作用高耸构筑物的基础。随着我国建设事业的发展, 其应用越来越广泛。然而, 国内外对嵌岩抗拔桩的研究尚处于初期探索阶段, 注意力主要集中在抗拔桩基础的承载力方面^[1-5], 而有关其荷载传递特性、侧阻力分布规律以及荷载-变位特性等机制性问题尚未得到足够重视。在传统设计中, 抗拔桩基础常常基于承载力控制进行设计, 而实际上抗拔桩的变形特性对其设计也同样重要。一方面, 一些对变形敏感的重要构筑物设计需要采用变形控制; 另一方

面, 桩身在拉拔荷载作用下常常出现拉伸裂缝引起抗拔桩结构破坏。因此, 开展抗拔桩荷载传递特性研究, 对于正确认识抗拔桩作用机制, 优化抗拔桩设计等具有重要的理论意义和工程实用价值。

本文以剪滞模型为基础, 根据嵌岩抗拔桩的具体特点以及桩-岩界面关系, 并考虑桩-岩界面脱黏的影响, 研究了抗拔桩侧阻力分布规律、桩顶荷载-变位特性等机制性问题。

2 桩-岩界面本构关系及极限侧阻力

2.1 桩-岩界面本构关系

采用二段线性函数来描述嵌岩段岩体与桩体接

收稿日期: 2007-05-30

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.40872181, No.40572158); 交通部西部科技项目 (No.2008-318-792-85)。

第一作者简介: 何思明, 男, 1968年生, 博士, 研究员, 主要从事山地灾害形成机制及防治技术研究。E-mail: hsm112003@yahoo.com.cn

触面上的剪应力-剪切位移关系^[6]。第 1 阶段对应于弹性阶段, 桩-岩界面完全耦合, 接触面上剪应力与剪切位移呈比例变化; 第 2 阶段对应于接触面上的残余强度, 此时桩-岩界面之间产生相对运动, 接触面上只有残余强度存在。

相应的二段线性模型的应力-位移关系 (图 1) 可写为

$$\tau = Kw + T \quad (1)$$

式中: τ 为界面剪应力; w 为剪切位移。 K 、 T 为可变系数, 对应于不同阶段的应力-应变关系, 可分别表述为

(1) 当 $0 \leq w \leq w_0$ 时

$$K = \frac{\tau_0}{w_0}, \quad T = 0 \quad (2)$$

(2) 当 $w \geq w_0$ 时

$$K = 0, \quad T = \tau_r \quad (3)$$

式中: τ_0/w_0 为桩-岩界面刚度系数; τ_0 为桩-岩界面极限黏结强度; w_0 为桩-岩界面极限黏结强度对应的剪切位移; τ_r 为桩-岩界面残余黏结强度。

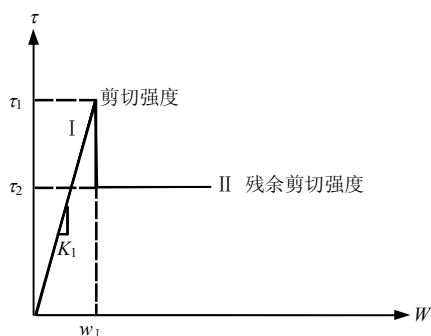


图 1 嵌岩桩与围岩界面上本构模型

Fig.1 Constitutive law at interface of pile and surrounding rock

2.2 桩-岩界面极限黏结强度

桩-岩界面极限黏结强度大小直接影响抗拔桩的荷载传递特性。一般说来, 它与岩体的种类、完整性、风化程度、成孔工艺等因素有关。根据工程经验, 桩-岩界面极限黏结强度可按表 1 选取^[7]。

表 1 水泥浆胶结灌浆材料同围岩间的侧阻力强度

Table 1 Resistance strength between grouted material and surrounding rock

围岩级别	I	II	III	IV	V
侧阻力 τ /MPa	1.5	1.5~1.2	1.2~0.8	0.8~0.3	≤ 0.3

国外大多采用指数的形式建立侧阻力与围岩无侧限抗压强度之间的经验关系, 较常用的公式有以下几种:

(1) Willams 等的计算方法

$$\tau_0 = 1.84 q_u^{0.367} \quad (4)$$

式中: q_u 为岩体无侧限抗压强度。

(2) Horvath 和 Kenney 的计算公式为

$$\tau_0 = 0.67 \sqrt{q_u} \quad (5)$$

(3) Reynolds 和 Kaderabek 的计算公式为

$$\tau_0 = 0.3 q_u \quad (6)$$

3 完全黏结条件下的抗拔桩荷载传递

考察如图 2 所示的抗拔桩简化计算模型, 根据轴对称问题的基本方程以及抗拔桩单元体力的平衡条件, 如下关系成立^[8-10]:

$$\frac{d\sigma_r(z, a)}{dz} = -\frac{2}{a} \tau(z, a) \quad (7)$$

式中: $\sigma_r(z, a)$ 为作用在抗拔桩任意深度位置处的轴向应力; a 为桩径; $\tau(z, a)$ 为桩-岩界面上的剪应力。

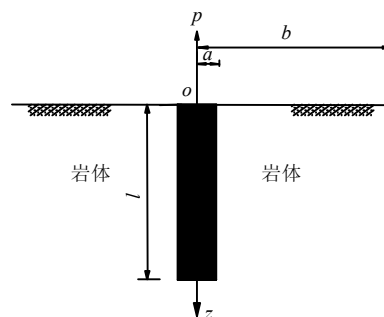


图 2 抗拔桩简化计算模型

Fig.2 Schematic illustration of uplift pile

根据文献[11-12], 桩周岩体内任意位置处的剪应力为

$$\tau(z, r) = \tau(z, a) \frac{a}{b^2 - a^2} \left(\frac{b^2 - r^2}{r} \right) \quad (8)$$

式中: $\tau(z, r)$ 为岩层内任意位置处的剪应力; b 为抗拔桩影响半径; r 为任意点相对桩体中心轴线距离。

根据岩体的剪应力-剪应变关系:

$$\tau_m(z, r) = \frac{E_m}{2(1 + \nu_m)} \frac{dw_m(z, r)}{dr}, \quad (a \leq r \leq b) \quad (9)$$

式中: E_m 为岩层弹性模量; ν_m 为岩层的泊松比; $w_m(z, r)$ 为岩层内任意位置处的轴向变形式。

对式 (9) 沿 a 到 r 积分得

$$w_m(z, r) - w_m(z, a) = \frac{2(1 + \nu_m)}{E_m} \frac{a \tau(z, a)}{b^2 - a^2} \left(b^2 \ln \frac{r}{a} - \frac{r^2 - a^2}{2} \right) \quad (10)$$

式中: $w_m(z, a)$ 为桩-岩界面位置处的轴向变形。

根据桩-岩界面完全黏结条件:

$$w_m(z, a) = w_f(z, a); \quad \varepsilon_m(z, a) = \varepsilon_f(z, a) \quad (11)$$

式中: $w_f(z, a)$ 为抗拔桩轴向变形; $\varepsilon_m(z, a)$ 、 $\varepsilon_f(z, a)$ 分别为岩层和抗拔桩在界面位置处的轴向应变。将式 (10) 对 z 求导得

$$\varepsilon_m(z, r) - \varepsilon_f(z, a) =$$

$$\frac{2(1+\nu_m)}{E_m} \frac{a}{b^2 - a^2} \left(b^2 \ln \frac{r}{a} - \frac{r^2 - a^2}{2} \right) \frac{d\tau(z, a)}{dz} \quad (12)$$

再根据桩体和岩层单向受力本构方程, 可将上式改写为

$$\frac{\sigma_m(z, r)}{E_m} - \frac{\sigma_f(z, a)}{E_f} = \frac{2(1+\nu_m)}{E_m} \frac{a}{b^2 - a^2} \left(b^2 \ln \frac{r}{a} - \frac{r^2 - a^2}{2} \right) \frac{d\tau(z, a)}{dz} \quad (13)$$

式中: $\sigma_m(z, r)$ 、 $\sigma_f(z, a)$ 分别为作用在岩层任意深度位置处的轴向应力和抗拔桩轴向应力; E_f 、 E_m 分别为桩体和岩层的弹性模量。

抗拔桩的弹性模量可以根据钢筋的弹性模量、混凝土的弹性模量以及钢筋面积置换率按下式计算:

$$E_f = E_g m + E_h (1 - m) \quad (14)$$

$$m = \frac{A_g}{A_b} \quad (15)$$

式中: E_g 为钢筋弹性模量; E_h 为桩身混凝土弹性模量; m 为抗拔桩钢筋面积置换率; A_b 为抗拔桩截面积; A_g 为抗拔桩配置钢筋的截面积。

根据式 (13), 作用在抗拔桩任意位置处的轴向力可按式计算:

$$\sigma_m(z, r) = \frac{E_m}{E_f} \sigma_f(z, a) + 2(1+\nu_m) \cdot \frac{a}{b^2 - a^2} \left(b^2 \ln \frac{r}{a} - \frac{r^2 - a^2}{2} \right) \frac{d\tau(z, a)}{dz} \quad (16)$$

根据任意截面上轴向力系平衡条件, 得

$$\pi a^2 \sigma_f(z, a) + \int_0^{2\pi} d\theta \int_a^b \sigma_m(z, r) r dr = 0 \quad (17)$$

整理式 (17) 得

$$\xi \sigma_f(z, a) + \zeta \frac{d\tau(z, a)}{dz} = 0 \quad (18)$$

$$\xi = \left[a^2 + (b^2 - a^2) \frac{E_m}{E_f} \right] \quad (19)$$

$$\zeta =$$

$$4(1+\nu_m) \frac{a}{b^2 - a^2} \left[\frac{b^4}{2} \ln \frac{b}{a} - \frac{ab^2}{4} (b^2 - a^2) - \frac{(b^2 - a^2)^2}{8} \right] \quad (20)$$

对式 (7) 两边微分得

$$\frac{d^2 \sigma_f(z, a)}{dz^2} = -\frac{2}{a} \frac{d\tau(z, a)}{dz} \quad (21)$$

$$\frac{d^2 \sigma_f(z, a)}{dz^2} - k^2 \sigma_f(z, a) = 0 \quad (22)$$

$$k^2 = \frac{2\xi}{\zeta a} \quad (23)$$

$$\sigma_f(z, a) = A \sinh(kz) + B \cosh(kz) \quad (24)$$

式中: A 、 B 为待定参数, 可根据如下边界条件确定。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_f(z, a) &= \frac{p}{\pi a^2}, \quad z=0 \\ \sigma_f(z, a) &= 0, \quad z=l \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

式中: l 为抗拔桩的长度; p 为嵌岩桩端的拉拔力。

$$\left. \begin{aligned} A &= -\frac{p}{\pi a^2} \coth(kl) \\ B &= \frac{p}{\pi a^2} \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

桩-岩界面上完全黏结条件下的剪应力分布为

$$\tau(z, a) = \frac{p}{2\pi a} k [\sinh(kz) - \coth(kl) \cosh(kz)] \quad (27)$$

根据轴向荷载下桩体本构关系:

$$\sigma_f(z, a) = E_f \frac{dw_f(z, a)}{dz} \quad (28)$$

将式 (24) 代入式 (28), 并沿桩体完全黏结段积分, 得到抗拔桩在完全黏结段的轴向抗拔位移:

$$w_1 = \frac{p}{\pi a^2 E_f k} \int_{z_1}^{z_2} [\cosh(kz) - \coth(kl) \sinh(kz)] dz \quad (29)$$

进一步整理得

$$w_1 = \frac{p}{\pi a^2 E_f k} [\sinh(kz_2) - \sinh(kz_1) - \coth kl (\cosh kz_2 - \cosh(kz_1))] \quad (30)$$

式中: w_1 为抗拔桩完全黏结段的轴向位移; z_1 、 z_2 分别为完全黏结段的起、终点位置。

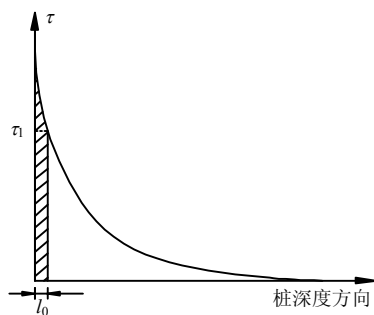
4 抗拔桩脱黏段上的侧阻力及变形量

作用在完全黏结段上的桩-岩界面剪应力按式 (27) 计算, 于是在任意抗拔荷载作用下, 桩-岩界面剪应力就可以完全确定。

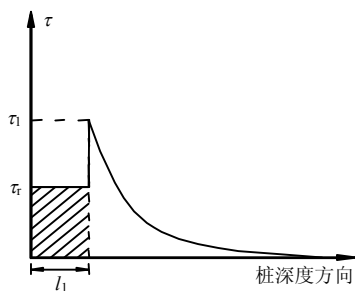
根据桩-岩界面本构关系, 当作用在桩体与岩体界面上的剪应力超过界面极限黏结强度时, 界面会发生破坏 (脱黏), 脱黏段的剪应力即为界面残余强度, 作用在脱黏段上的剪应力会重新分配和调整。于是, 可以计算出脱黏段的实际长度^[13] (图 3)。

$$l_1 = \frac{\int_0^{l_0} \frac{p}{2\pi a} k [\sinh(kz) - \coth(kl) \cosh(kz)]}{\tau_r} \quad (31)$$

式中: l_1 为抗拔桩实际脱黏段长度; l_0 为抗拔桩名义脱黏段长度。



(a) 不考虑界面脱黏情况



(b) 考虑界面脱黏情况

图 3 剪应力沿桩体分布特性

Fig.3 Shaft resistance distribution at interface of pile and rock mass

名义脱黏段长度可按式计算:

$$\tau_0 = \frac{p}{2\pi a} k [\sinh(kl_0) - \coth(kl) \cosh(kl_0)] \quad (32)$$

式中: τ_0 为桩-岩界面极限黏结强度。

相应地, 脱黏段抗拔桩的变形量可按式计算:

$$w_2 = \frac{pl_1}{\pi a^2 E_f} - \frac{2\tau_r l_1}{a E_f} \quad (33)$$

5 抗拔桩侧阻力及荷载-变位特性

根据桩-岩界面上完全黏结条件下的剪应力分布公式, 当位于桩顶界面处 ($z=0$) 的剪应力刚好达到桩-岩界面极限黏结强度时, 桩-岩界面开始出现脱黏, 于是可以计算出相应的抗拔荷载, 并将其称为弹性极限荷载 p_t :

$$p_t = \frac{2\pi a(\tau_0 + 2\coth(kl))}{k} \quad (34)$$

5.1 抗拔桩侧阻力分布

根据上述分析, 由于施加在抗拔桩上的荷载大小不同, 故有两种侧阻力分布模式:

(1) 当 $p \leq p_t$ 时, 桩-岩界面侧阻力按照式 (26) 呈指数函数分布;

(2) 当 $p \geq p_t$ 时, 桩-岩界面侧阻力分布分为两段, 其中脱黏段按照桩-岩界面残余剪应力均匀分布, 黏结段按式 (27) 呈指数规律分布 (图 3)。

5.2 抗拔桩荷载-变位关系

与侧阻力分布类似, 抗拔桩荷载-变位关系也分为两种情况:

(1) 当 $p \leq p_t$ 时, 根据公式 (30), 抗拔桩荷载-变位关系为

$$w = \frac{p}{\pi a^2 E_f k} [\sinh(kl) - \coth(kl)(\cosh(kl) - 1)] \quad (35)$$

(2) 当 $p \geq p_t$ 时, 抗拔桩轴向变形由两部分组成, 一是脱黏段上的轴向变形, 按式 (33) 计算; 二是黏结段上的轴向变形, 按式 (30) 计算, 即

$$w = \frac{pl_1}{\pi a^2 E_f} - \frac{2\tau_r l_1}{a E_f} + \frac{p}{\pi a^2 E_f k} [\sinh(kl) - \sinh(kl_1) - \coth kl (\cosh kl - \cosh(kl_1))] \quad (36)$$

6 算例

在外荷载作用下, 嵌岩桩承担的荷载由桩侧传递给周围岩体。为验证本文理论模型的合理性, 在此给出一个算例。

已知嵌岩桩桩径为 0.5 m, 嵌岩段深度为 7.0 m, 桩体为 C25 钢筋混凝土结构, 周围岩体为中风化砂岩。理论模型计算所需的相关计算参数见表 2。

表2 桩体及周围岩体参数

Table 2 Material properties and calculation parameters

名称	a /m	b /m	l /m	E_m /GPa	ν_m	E_f /GPa	ν_f	τ_0 /MPa	τ_r /MPa
桩	0.25	15	7			35	0.19		
岩体				20	0.22				
桩-岩								400	200

根据式(34),嵌岩抗拔桩的弹性极限抗拔荷载为440 kN。

根据本文理论模型,图4给出了抗拔桩在不同抗拔荷载条件下,桩侧阻力分布规律曲线。从图中可以看出,当抗拔荷载小于弹性极限抗拔荷载时,侧阻力按照指数规律迅速衰减,荷载主要由桩顶近3 m长度的桩段分担,超过这一长度的桩段几乎没有侧阻力分布;当抗拔荷载超过弹性极限抗拔荷载时,抗拔桩桩-岩界面发生部分脱黏,脱黏段上侧阻力均匀分布,弹性段上侧阻力按指数规律衰减,随着抗拔荷载的增加,脱黏段长度增加,峰值侧阻力向桩端移动。这一结论与文献[14]报道的结论相同。

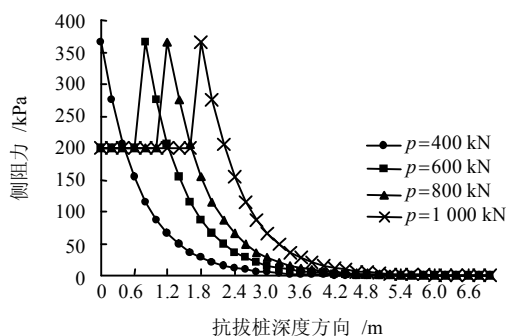


图4 不同抗拔荷载下桩侧阻力分布曲线

Fig.4 Distribution of side resistance of piles at different pull out load

图5给出了理论模型预测的抗拔桩荷载-变位曲线。从图中可以看出,在小于抗拔桩弹性极限荷载作用下,抗拔桩荷载-变位关系呈直线变化,超过弹性极限荷载后,桩顶变位增加,呈曲线规律变化。这与众多的抗拔桩试验结论相同。

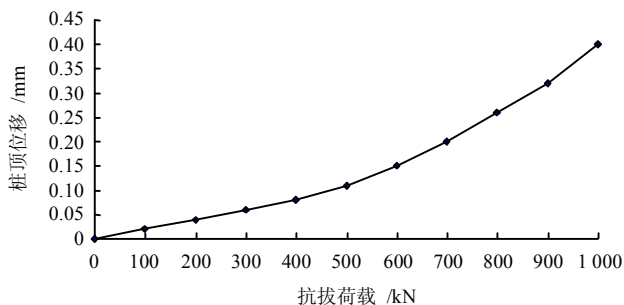


图5 抗拔桩荷载-位移关系曲线

Fig.5 Pull out load vs. displacement of the pile

7 结 论

通过上述分析,可以得出如下结论:

(1) 抗拔桩在抗拔荷载作用下,其桩-岩界面可以分为完全黏结段和脱黏段,当抗拔荷载较低时,存在侧阻力分布的桩段长度有限,因此,盲目增加抗拔桩的长度是不必要的。

(2) 当抗拔荷载低于弹性极限抗拔时,桩侧阻力呈指数规律分布;当抗拔荷载大于弹性极限抗拔荷载时,桩侧阻力分为两段,其中脱黏段上侧阻力均匀分布,黏结段上侧阻力呈指数规律分布。

(3) 在小于抗拔桩弹性极限荷载作用下,抗拔桩荷载-变位关系呈直线变化,超过弹性极限荷载后,桩顶变位迅速增加,并按曲线规律变化。

参 考 文 献

- [1] 朱碧堂,杨敏. 抗拔桩的变形与极限承载力计算[J]. 建筑结构学报, 2006, 27(3): 120—129.
ZHU Bi-tang, YANG Min. Calculation of displacement and ultimate uplift capacity of tension piles[J]. *Journal of Building Structure*, 2006, 27(3): 120—129.
- [2] 黄峰,李广信,吕禾. 砂土中抗拔桩位移变形的分析[J]. 土木工程学报, 1999, 32(1): 31—36.
HUANG Feng, LI Guong-xin, LÜ He. Analysis of deformation of tension piles in sandy soil [J]. *China Civil Engineering Journal*, 1999, 32(1): 31—36.
- [3] 陈轮,蒋力,王海燕. DX 桩抗拔位移的弹性理论解析解[J]. 计算力学学报, 2006, 23(3): 381—384.
CHEN Lun, JIANG Li, WANG Hai-yan. Analytical solution for the load-displacement relationship of pullout DX pile based on elastic theory[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2006, 23(3): 381—384.
- [4] 何思明. 抗拔桩破坏特性及承载力研究[J]. 岩土力学, 2001, 22(3): 308—310.
HE Si-ming. Study on bear-capacity and failure of uplift pile[J]. *Rock and So Mechanics*, 2001, 22(3): 308—310.
- [5] 何剑. 嵌岩灌注桩抗拔承载性状试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(2): 315—319.
HE Jian. Testing study on anti. draw bearing properties of cast-in-place rock-socketed pile[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(2): 315—319.
- [6] KILIC A, YASAR E, CELIK A G. Effect of grout properties on the pull-out load capacity of fully grouted rock bolt[J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2002, 17: 355—362.