

文章编号: 1000-7598-(2007)12-2598-05

嵌岩桩荷载传递特性研究

何思明^{1,2}, 卢国胜²

(1. 中国科学院 水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 2. 西南科技大学 环境与资源学院, 四川 绵阳 621002)

摘要: 针对嵌岩桩荷载传递研究中存在的问题, 根据桩体与围岩体接触面上的应力-应变关系以及剪滞模型, 研究了嵌岩桩的荷载传递特性。推导了考虑桩、岩界面脱黏与完全黏结两种条件下嵌岩段侧阻力分布规律的计算公式。研究了桩、岩相对刚度、外荷载等级对荷载传递特性的影响, 讨论了桩端荷载分担比例与嵌岩段所需埋设深度的关系等。研究成果对嵌岩桩设计具有指导意义。

关键词: 嵌岩桩; 荷载传递; 剪滞模型

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

Study on load transfer characteristic of rock-socketed pole

HE Si-ming^{1,2}, LU Guo-sheng²

(1. Chengdu Research Institute of Environment and Disaster in Mountainous Regions Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

2. Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621002, China)

Abstract: A model has been developed for shear distribution at the pile/ rock interface in a single rock-socketed pile subjected to vertical loading. Which accounts for the interfacial bond condition and is based on a shear-lag analysis. The new closed form solution has been established for a single rock-socketed pile under vertical loading. And to investigate the influence of relative rigid of pile/rock and loading grade on load-transfer of rock-socketed pile is discussed.

Key words: rock-socketed pile; oad transfer; shear lag model

1 前言

嵌岩桩具有单桩承载力高、沉降小、抗震性能好而备受工程界青睐, 在大型桥梁基础、高耸构筑物基础以及高层建筑中广泛使用, 并成为研究的热点问题^[1-7]。然而, 由于对嵌岩桩承载力特性和荷载传递机制缺乏足够地认识, 导致在嵌岩桩设计和承载力取值方面还存在一些误区, 一方面不管嵌岩桩的长径比大小, 嵌岩深度都作为端承桩来进行设计计算; 另一方面是盲目地增加嵌岩深度造成不必要的浪费。根据嵌岩桩的荷载传递路径, 一般认为, 在竖向外荷载作用下, 首先通过侧阻力传递到嵌岩段侧壁, 在产生剪切变形后, 一部分荷载才传递至桩端。由于嵌岩段的极限侧阻力非常高, 因而能提供非常可观的侧阻力, 进而分担较大的外荷载, 试验结果表明: 当嵌岩深度超过 5 倍桩径时, 几乎没

有荷载传递到桩端。当然对于不同的围岩体, 相应的嵌岩深度有所不同。

本文针对嵌岩桩荷载传递研究方面存在的问题, 根据桩体与围岩体接触面上的应力-应变关系以及剪滞模型基本原理, 研究了嵌岩桩的荷载传递特性。讨论了桩、岩相对刚度、外荷载等级对荷载传递特性的影响。

2 桩与围岩接触面上剪应力-剪切位移关系^[8]

采用二段线性函数来描述嵌岩段岩体与桩体混凝土接触面上的剪应力-剪切位移关系。第 1 阶段对应于弹性阶段, 桩体与围岩体之间完全耦合, 接触面上剪应力与剪切位移呈比例变化, 在此阶段, 接触面处于无损状态; 第 2 阶段对应于接触面上的残余强度, 此时桩体与围岩体之间产生了相对运动,

收稿日期: 2005-11-28

修改稿收到日期: 2006-01-12

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 40572158); 组合抗滑结构作用机制研究 (No. Y10059)。

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理及防治技术研究。

接触面之间只有残余强度存在。

相应地二段线性模型的应力-位移关系(见图 1)可写为:

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

式中: τ 为剪应力; w 为剪切位移; 其中参数 K 、 ξ 对应于不同阶段的应力-应变关系可分别表述为:

(1) 当 $0 \leq w \leq w_1$ 时:

$$K = K_1 = \frac{\tau_1}{w_1}, \quad \xi = 0 \quad (2)$$

(2) 当 $w \geq w_1$ 时:

$$K = 0, \quad \xi = \tau_2 \quad (3)$$

式中: K_1 为界面刚度系数; τ_1 为嵌岩段极限黏结强度, τ_2 为嵌岩段残余黏结强度; w_1 为嵌岩段极限黏结强度对应的剪切位移。

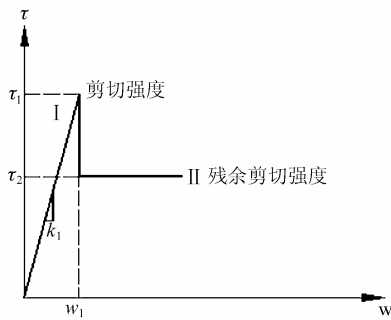


图 1 嵌岩段与围岩体界面本构模型
Fig 1 Constitutive law at interface of pile and around rock mass

3 嵌岩段桩体荷载传递特性

3.1 桩与围岩接触面完全黏结下的荷载传递

在桩体嵌岩段与围岩体接触面上的剪应力小于抗剪强度情况下, 两者的界面处于完全黏结状态时, 在这种情况下, 两者之间应满足变形和应力协调关系, 因此, 可以采用弹性力学及其剪切滞模型的相关理论来研究界面特性。

受轴向荷载作用的桩及影响范围内的围岩体是典型的弹性力学空间轴对称问题^[9,10] (见图 2)。

考虑微元体轴向力的平衡条件, 有如下方程成立:

$$\frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial (r \tau_{rz})}{\partial r} \right) = 0 \quad (4)$$

式中: σ_{zz} 为轴向应力; τ_{rz} 为剪应力。

对式 (4) 沿 a , b 积分, 有

$$\int_a^b \frac{\partial \sigma_{zz}(r, z)}{\partial z} r dr + \int_a^b \frac{\partial (r \tau_{rz})}{\partial r} dr = 0 \quad (5)$$

式中: a 为单桩半径; b 为围岩体内剪应力影响范围。

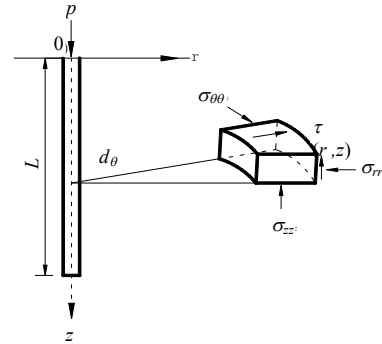


图 2 单桩轴对称力学模型
Fig.2 Axial symmetry mechanics model of pile

考虑到 $\tau_{rz}(b, z) = 0$, 以及 $\tau_{rz}(a, z) = \tau(a, z) = \tau(z)$ 的条件 (见图 3), 式 (5) 进一步整理得:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[\int_a^b \sigma_{zz}(r, z) r dr \right] - a \tau(z) = 0$$

$$\frac{d \bar{\sigma}_{zz}^m(z)}{dz} = \frac{2a}{b^2 - a^2} \tau(z) \quad (6)$$

式中: $\bar{\sigma}_{zz}^m(z)$ 为岩体内沿径向的平均轴向应力。同样对于桩本身, 存在如下关系

$$\frac{d \sigma_{zz}^f(z)}{dz} = -\frac{2}{a} \tau(z) \quad (7)$$

式中: $\sigma_{zz}^f(z)$ 为作用在桩截面上平均轴向应力^[6]。

将式 (6) 代入式 (4) 得

$$\frac{\partial \tau(r, z)}{\partial r} + \frac{1}{r} \tau(r, z) + \frac{2a}{b^2 - a^2} \tau(z) = 0$$

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

式 (8) 给出了剪应力沿径向的分布规律, 见图 3。

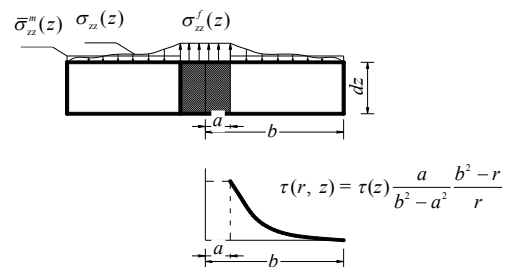


图 3 桩体及其影响岩体微段模型
Fig.3 Calculation model of pile and affect rock mass region

根据岩体本构关系

$$\tau(r, z) = G_m \gamma = G_m \frac{dw}{dr} \quad (9)$$

式中: G_m 为围岩体剪切模量; w 为围岩体轴向位移。

将式 (8) 代入式 (9), 并从 a 到 r 积分得

$$w_r - w_a = \frac{\tau_0 a}{G_m (b^2 - a^2)} \left[\int_a^r \left(\frac{b^2}{r} - r \right) dr \right] = \frac{\tau_0 a}{G_m (b^2 - a^2)} \left[b^2 \ln \frac{r}{a} - \frac{1}{2} (r^2 - a^2) \right] \quad (10)$$

在此, 引入平均位移差的概念^[7]

$$(\bar{w} - w_a) = \frac{1}{\pi(b^2 - a^2)} \int_a^b (w_r - w_a) d(\pi r^2) \quad (11)$$

将式 (10) 代入式 (11) 积分并经过整理得

$$\tau_0 = \frac{G_m}{\eta} (\bar{w} - w_a) \quad (12)$$

$$\text{式中: } \eta = \frac{ab^4}{(b^2 - a^2)^2} \ln \frac{b}{a} - \frac{a^2 b^2}{2(b^2 - a^2)} - \frac{a}{4}$$

将式 (12) 代入式 (7) 并进行微分得:

$$\frac{d^2 \sigma^f}{dz^2} = -\frac{2G_m}{a\eta} (\bar{\varepsilon}_m - \varepsilon_a) = -\frac{2G_m}{a\eta E_f} (E_f \bar{\varepsilon}_m - \sigma^f) \quad (13)$$

式中 E_f 为桩的弹性模量。

考虑到嵌岩桩微段截面力的平衡条件 (见图 3):

$$\bar{\sigma}_m = -\frac{a^2}{b^2 - a^2} \sigma^f \quad (14)$$

于是有如下关系成立:

$$\frac{d^2 \sigma^f}{dz^2} - k^2 \sigma^f = 0 \quad (15)$$

$$\text{其中: } k^2 = \frac{2G_m}{a\eta E_f} \left[1 + \frac{E_f a^2}{E_m (b^2 - a^2)} \right]$$

微分方程 (15) 的通解为:

$$\sigma^f(z) = A \sinh(kz) + B \cosh(kz) \quad (16)$$

相应的边界条件为

$$\left. \begin{aligned} z=0, \sigma^f(z) &= \frac{P}{\pi a^2} \\ z=l, \sigma^f(l) &= \alpha \frac{P}{\pi a^2} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

式中: P 为作用在嵌岩桩桩顶的外加荷载; l 为嵌

岩桩嵌岩段深度; α 为桩端分担的外荷载比例。

解得:

$$A = \frac{P}{\pi a^2} \frac{[\alpha - \cosh(kl)]}{\sinh(kl)}, \quad B = \frac{P}{\pi a^2}$$

于是, 单桩轴力式 (16) 可用下式表达

$$\sigma^f(z) = \frac{P}{\pi a^2} \left[\cosh(kz) + \frac{\alpha - \cosh(kl)}{\sinh(kl)} \sinh(kz) \right] \quad (19)$$

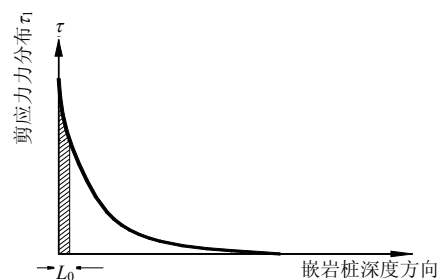
相应地, 桩与围岩体界面剪应力分布公式为

$$\tau(z) = \frac{kP}{2\pi a} \left[\frac{\alpha - \cosh(kl)}{\sinh(kl)} \cosh(kz) + \sinh(kz) \right] \quad (20)$$

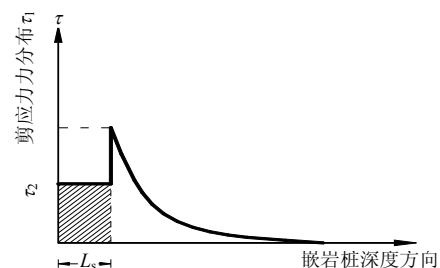
3.2 桩与围岩接触面脱黏条件下的荷载传递

一旦作用在桩体与围岩体界面上的剪应力超过界面抗剪强度, 界面就会发生破坏 (脱黏), 根据界面本构关系, 脱黏段的剪应力就为界面残余强度。作用在脱黏段上的剪应力就会重新分配和调整, 于是可以计算出脱黏段的长度。

如果不考虑界面脱黏情况发生, 按照桩与围岩体完全胶结情况获得的剪应力分布图见图 4 (a)。根据界面本构方程, 界面剪应力的分布并不可能按此规律分布。当界面剪应力超过界面抗剪强度时, 就会发生脱黏, 进而过渡到残余强度阶段, 相应的剪应力沿桩体轴向的分布会发生重分布。在考虑脱黏的情况下, 嵌岩段的剪应力实际分布应为图 4 (b) 的情况。



(a) 不考虑界面脱粘情况



(b) 考虑界面脱粘情况

图 4 剪应力沿桩体分布特性

Fig.4 Shaft resistance distribution at interface of pile and rock mass

如图 4 (a) 所示, 可以按照下式计算剪应力大于界面抗剪强度的嵌岩段长度 (L_0):

$$\tau_1 = \frac{kP}{2\pi a} \left[\frac{\alpha - \cosh(kl)}{\sinh(kl)} \cosh(kl_0) + \sinh(kl_0) \right] \quad (21)$$

剪应力重新分配后, 剪应力峰值点会向嵌岩段后部移动, 相应脱黏段上的剪应力为界面残余强度, 对应的脱黏段长度可以根据图 4 (a)、(b) 中阴影部分面积相等的条件计算:

$$L_s = \frac{1}{\tau_2} \int_0^{L_0} \frac{kP}{2\pi a} \left[\frac{\alpha - \cosh(kl)}{\sinh(kl)} \cosh(kz) + \sinh(kz) \right] dz \quad (22)$$

式中: τ_2 为嵌岩段脱黏后侧阻力的残余强度。

表 1 桩体及周围岩体计算参数

Table 1 Characteristic parameters of pile and surrounding rock

岩性	a/m	b/m	P/kN	L/m	E_s/GPa	ν_s	E_p/GPa	α	τ_1/GPa	τ_2/GPa
中风化花岗岩	0.5	15	1600	4	20	0.22	25	/	15	0.8

图 5 给出了嵌岩桩在考虑脱黏与完全黏结两种条件下嵌岩段的侧阻力分布规律, 从图中可以看出, 嵌岩桩在 1 600 kN 荷载作用下, 存在侧阻力分布的嵌岩段长度是很有限的, 低于嵌岩桩的嵌固深度 4.0 m。也就是说, 在 1 600 kN 外荷载作用下, 外荷载完全由桩侧分担, 桩端没有分担外荷载, 是纯粹的摩擦桩。因此, 合理地设计嵌岩桩的嵌固深度非常重要, 盲目地增加嵌岩桩的嵌固段深度既不合理也不必要。

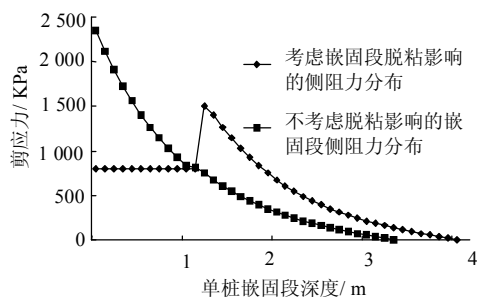


图 5 考虑脱黏与不考虑脱黏情况下的桩侧阻力分布
Fig. Shear stress distribution along axial direction under bond and unbond

图 6 给出了不同桩、岩相对刚度条件下, 桩侧阻力的分布特点, 从图中可以看出, 嵌岩段的桩侧阻力形状强烈地受桩、岩相对刚度的影响。桩、岩相对刚度越大, 侧阻力分布曲线越平缓, 存在侧阻力分布的嵌岩段越长。由此可以得出结论: 对于模量值较大的围岩体, 可以将嵌岩段设计得短一些; 而对于软质岩, 应将嵌岩段设计得长一些。

4 算 例

在外荷载作用下, 嵌岩桩承担的大部分荷载应由桩端传递给下覆基岩, 其余部分由桩侧分担, 并传递给桩周围岩体。计算表明: 当嵌岩桩的嵌岩深度较大时, 大部分荷载将由桩侧分担, 桩端分担的荷载非常小, 甚至荷载传递不到桩底, 这样就达不到嵌岩桩的设计目的。为此, 确定合理的嵌岩深度对于嵌岩桩的设计非常重要。

为了研究影响嵌岩桩嵌固段荷载传递特性的因素, 在此给出考题。

已知嵌岩桩桩径 1.0 m, 嵌岩段深度为 4.0 m, 桩体为 C25 钢筋混凝土结构, 周围岩体为中风化花岗岩, 单桩承担上部结构传递来的荷载为 1 600 kN。理论模型的相关计算参数见表 1。

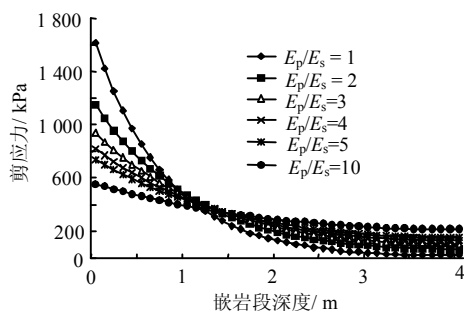


图 6 桩岩相对刚度对嵌岩桩荷载传递特性的影响
Fig.6 Relative rigid of pile/rock influence on load transfer of rock-socketed

图 7 给出了嵌岩桩在不同荷载等级作用下的侧阻力分布曲线, 其分布特点与文献[11,12]给出的结果类似。

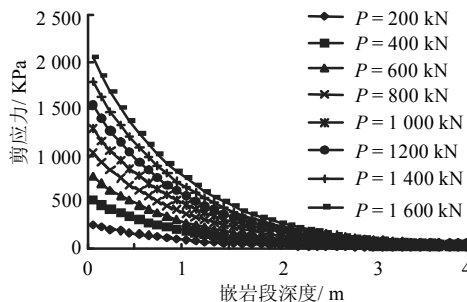


图 7 不同荷载等级作用下嵌岩桩侧阻力分布
Fig.7 Shear stress distribution along axial direction under various loading grade

图 8 给出了嵌岩桩桩端分担荷载比例与嵌岩

深度桩径比例的关系,从图中可以看出,嵌岩桩桩端分担的外荷载比例越大,所需嵌岩桩的深度越短,比如:当桩端分担外荷载的 30 % 的荷载时,所需嵌岩桩深度仅为 2.6 m。

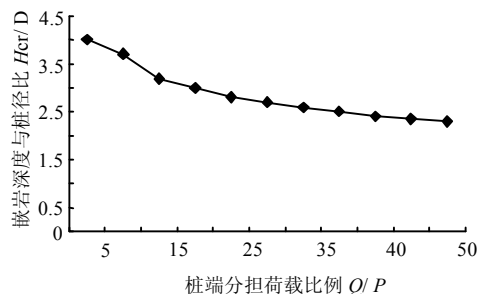


图 8 嵌岩桩桩端分担荷载比例与嵌岩深度桩径比例的关系

Fig.8 $Q/P - H_{cr}/D$

5 结 论

针对嵌岩桩设计、作用机制研究方面存在的问题,根据桩、岩界面本构关系以及剪滞模型的理论方法,研究了嵌岩桩侧阻力分布规律,讨论了桩岩相对刚度、外荷载等级对荷载传递特性的影响,并得出了以下结论。

(1) 对于大多数嵌岩桩来说,存在侧阻力分布的嵌岩段长度是很有限的,盲目地增加嵌岩段深度来达到提高承载力的目的是不合理的。

(2) 嵌岩段的桩侧阻力分布曲线形状强烈地受桩、岩相对刚度的影响。

(3) 可以通过减短嵌岩桩的嵌岩深度来达到提高桩端分担外荷载比例的目的。

参 考 文 献

- [1] 刘兴远,郑颖人,影响嵌岩桩特性的特征参数分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 383—386.
LIU Xing-yuan, ZHENG Yin-ren, Analysis on the parameters to affect behavior of rock-socketed segment of piles[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 19(3):383—386.
- [2] 明可前,嵌岩桩受力机制分析[J]. 岩土力学, 1998, 19(1):65—69.
MIN Ke-qian, Analysis on bearing mechanism of socketed pile[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1998, 19(1):65—69.
- [3] 陈 斌,卓家寿,嵌岩桩承载性状的有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(1):51—55.
CHEN Bin, ZUO Jia-shou, WU Tian-shou, Vertical bearing capacity of rock-socketed pile[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2002, 24(1):51—55.
- [4] 赵明华,曹文贵,刘齐建,按桩顶沉降控制嵌岩桩竖向承载力的方法[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 67—71.
ZAO Min-hua, CAO Wen-gui, LIU Qi-jian, Method of determination of vertical bearing capacity of rock-socketed pile by settlement of pile top[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(1):67—71.
- [5] 叶琼瑶,黄绍铿,软岩嵌岩桩的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(3):461—464.
Ye Qiong-yao, HUANG Shao-keng, Method testing study on rock-socketed pile in soft rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(3):461—464.
- [6] 陈志坚,冯兆祥,陈 松,等. 江阴大桥摩擦失效嵌岩群桩传力机制的实测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(6):883—887.
CHEN Zhi-jian, FENG Zhao-xiang, CHEN Song, et al. Testing study on loading-transfer mechanism of Friction lost embed in JIANGYIN bridge[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(3):461—464.
- [7] 邱 钰,胡雪辉,刘松玉,用荷载传递法计算深长大直径嵌岩桩单桩沉降[J]. 土木工程学报, 2001, 34(5): 72—75.
QIU Yu, HU Xue-hui, LIU Song-yu, A formula for calculating the settlement of long rock-socketed single pile[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2001, 34(5):72—75.
- [8] Kilic, E, Yasar, A.G.Celik, 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.
- [9] I.W.Farmer & Holmberg, Stress distribution along a resin grouted rock anchor[J]. **Int.. Rock Mech. And Geomech**, 1975(12):347—351.
- [10] Yue Cai, Tetsuro Esaki, Yujing Jiang, An analytical model to predict axial load in grouted rock bolt for soft rock tunneling[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2004, (19): 607—618.
- [11] 刘树亚,刘祖德,嵌岩桩理论研究和设计中的几个问题[J]. 岩土力学, 1999, 20(4):86—92.
LIU Shu-ya, LIU Zu-de, Some problems on the research and design of rock-socketed piles[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1999, 20(4):86—92.
- [12] 史佩栋,梁晋渝,嵌岩桩竖向承载力研究[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(4):32—39.
SHI Pei-dong, LIANG Jin-yu, Vertical bearing capacity of rock-socketed pile[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1994, 16(4):32—39.