

Characterization of End-Bearing Capacity for Piles Socketed into Rocks

Xianlong Lu, Wenzhi Yang

China Electric Power Research Institute, Beijing
Email: luxianlong@163.com, angelywz@163.com

Received: Feb. 6th, 2019; accepted: Feb. 21st, 2019; published: Feb. 28th, 2019

Abstract

It is an important issue to investigate the characteristics of end-bearing capacity for the application of rock-socketed piles. In this study, based on the theoretical calculation formula of end-bearing load sharing ratio of rock-socketed pile, the characteristics of end-bearing capacity of rock-socketed pile were analyzed. The results indicated that the end-bearing capacity characteristics of rock-socketed piles were mainly end-bearing friction piles and the load ratio of ultimate end-bearing capacity decreased with the increase of rock-socketed depth-diameter ratio but increased with the elastic modulus ratio of pile concrete to surrounding rock mass, which is similar to the field test results. At the same time, it is related to the elastic modulus ratio of rock-socketed pile tip and surrounding rock mass. The relevant variation law in this study can be used for the design of ultimate end-bearing capacity of rock-socketed piles in practice.

Keywords

Rock-Socket Pile, End-Bearing Capacity, Ratio of Pile Rocketed Depth to Diameter, Pile Foundation

嵌岩桩极限端阻力发挥性状研究

鲁先龙, 杨文智

中国电力科学研究院有限公司, 北京
Email: luxianlong@163.com, angelywz@163.com

收稿日期: 2019年2月6日; 录用日期: 2019年2月21日; 发布日期: 2019年2月28日

摘要

端阻力承载性状是岩土工程中嵌岩桩应用的重要研究课题之一。本文分别根据嵌岩桩下压承载力计算模

型以及嵌岩桩端阻力分担桩顶荷载的理论计算公式, 分析了下压荷载作用下嵌岩桩端阻力发挥特征, 并与已有试验实测结果进行对比。结果表明, 下压荷载作用下嵌岩桩承载特性主要呈现为端承摩擦桩, 端阻分担桩顶荷载随嵌岩深径比增大而减小, 随桩体混凝土与桩周岩体的模量比增大而增大, 并与嵌岩段桩端与桩身周围岩体的弹性模量比相关, 研究成果可为嵌岩桩极限端阻力设计提供借鉴。

关键词

嵌岩桩, 桩端阻力, 嵌岩深径比, 桩基础

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

嵌岩桩作为各类大型建(构)筑物的主要基础型式而得到广泛应用。然而, 由于嵌岩桩基础设计使用的承载能力大, 现场试验费用高, 一般难以进行破坏性试验而获得完整的荷载 - 位移试验成果等因素, 从而导致系统完整的嵌岩桩静载试验的实测数据不多, 在一定程度上制约了人们对嵌岩桩承载性状的全面认识[1] [2]。

目前, 各行业规范对嵌岩桩承载力计算主要是经验和半经验公式, 经验参数居多[3], 不同行业的嵌岩桩基础设计方法与参数取值存在一定差异, 其根本原因应该源于人们对嵌岩桩荷载传递机理与承载性状认识不同[4]。如我国建筑地基基础设计规范[5]认为嵌岩桩是端承桩, 按端承桩进行设计, 完全不考虑桩侧阻力。但大量实测资料表明, 嵌岩桩即使在无覆盖层或长径比较小的条件下, 也并非一律呈现出端承桩性状。在工程设计中不加区分地一律把嵌岩桩视为端承桩, 既不符合实际, 也可能徒然造成浪费并增加施工难度。嵌岩桩的端阻力承载性状仍然是目前国内外工程界和学术界的一个研究热点和难点。本文基于已有嵌岩桩下压承载力组成分析和极限端阻力分担桩顶荷载比的理论计算方法, 分析了嵌岩桩极限端阻力的发挥特征, 可为嵌岩桩极限端阻力计算提供借鉴。

2. 嵌岩桩下压承载力组成分析

嵌岩桩端阻力的发挥与基岩与桩周土的刚度比、桩身与桩周土的刚度比, 以及成桩工艺、施工质量等因素有关[6]。嵌岩桩下压荷载传递是桩 - 土 - 岩相互作用的复杂过程。有覆盖层条件下的下压承载嵌岩桩各部分结构及其参数如图 1(a)所示。在土层与岩层界面处, 将下压承载嵌岩桩受力等效为图 1(b)所示的 2 部分。

如图 1(a)所示, 当桩的长径比较大 L/d 或覆盖土层 h_s 较厚时, 下压荷载作用下桩身弹性压缩变形量较大, 桩土间相对位移较大, 足以使桩身侧阻得以较好地发挥。如果桩底沉渣彻底清除不干净, 桩受压变形后桩底沉渣也被压实, 进一步促进桩身整体位移和侧阻力发挥。由此可见, 桩周土侧阻力被充分发挥后, 嵌岩段桩侧阻力将在桩端阻力被发挥之前而先发挥出来。目前, 国内外学术和工程界普遍认为, 嵌岩桩抗压承载力主要由基岩上覆土层的桩侧阻力、嵌岩段桩侧阻力和桩端阻力 3 部分组成[5]: 基岩上覆土层桩侧阻力(Q_s)、嵌岩段桩侧阻力(Q_r)和桩端阻力(Q_b), 即 $Q = Q_s + Q_r + Q_b$ 。

3. 嵌岩桩极限端阻力性状理论分析

如图 1(b)所示, 假设土层与岩层界面处桩身轴力为 Q_0 , 当无覆盖土层时, 即有 $Q_0 = Q$ 。下面假设

Q_0 为嵌岩桩嵌岩段的桩顶荷载, 分析嵌岩桩极限端阻力的发挥性状及其影响因素。

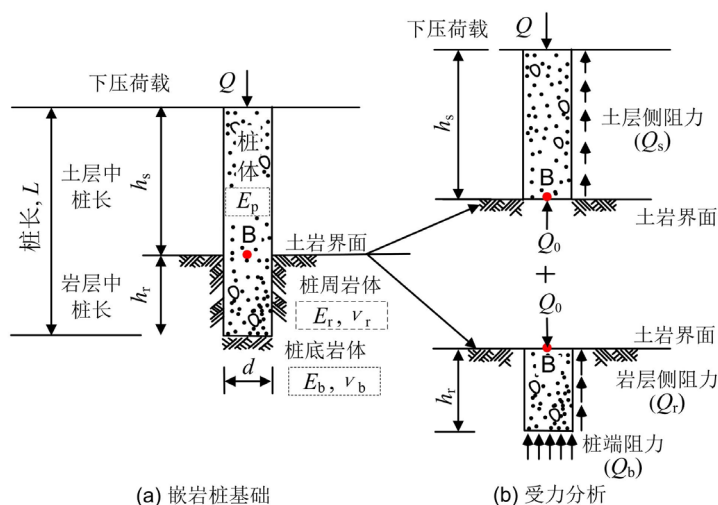


Figure 1. Rock socketed pile in compression with overlying soil layer
图 1. 嵌岩桩及其极限承载力组成分析

国外学者 Carter 和 Kulhawy [7] 基于弹性半空间理论, 给出图 1(b) 中嵌岩桩端阻力分担桩顶荷载比 Q_b/Q_0 计算方法如式(1)所示, 相关计算参数则分别由式(2)~(7)确定:

$$\frac{Q_b}{Q_0} = \frac{\left(\frac{4}{1-\nu_b}\right)\left(\frac{1}{\xi}\right)\left(\frac{1}{\cosh(\mu h_r)}\right)}{\left(\frac{4}{1-\nu_b}\right)\left(\frac{1}{\xi}\right) + \left(\frac{2\pi}{\zeta}\right)\left(\frac{2h_r}{d}\right)\left(\frac{\tanh(\mu h_r)}{\mu h_r}\right)} \quad (1)$$

$$(\mu h_r)^2 = \left(\frac{2}{\zeta \lambda}\right)\left(\frac{2h_r}{d}\right)^2 \quad (2)$$

$$\zeta = \ln[5(1-\nu_r)h_r/d] \quad (3)$$

$$\lambda = E_p/G_r \quad (4)$$

$$\xi = G_b/G_r \quad (5)$$

$$G_b = \frac{E_b}{2(1+\nu_b)} \quad (6)$$

$$G_r = \frac{E_r}{2(1+\nu_r)} \quad (7)$$

在图 1(b) 及式(1)~(7)中, h_r 和 d 分别为桩身在嵌岩段的埋深和直径; E_p 、 E_r 和 E_b 分别为桩体以及嵌岩段桩侧、桩端岩体弹性模量; G_r 和 G_b 分别为嵌岩段桩侧、桩端岩体剪切模量; ν_r 和 ν_b 分别为嵌岩段桩侧、桩端岩体泊松比。

以图 1(b) 嵌岩段桩体为对象, 按照嵌岩桩端阻力分担荷载比 Q_b/Q_0 计算方法, 研究桩体混凝土强度等级分别为 C20 和 C40 时, 其在不同岩体基本质量等级与嵌岩深径比下, 嵌岩桩极限端阻力发挥性状。

根据混凝土结构设计规范[8], 取 C20 和 C40 强度等级混凝土弹性模量 E_p 分别为 25.5 GPa 和 32.5 GPa, 假设嵌岩段桩侧和桩端岩体弹性模量、泊松比相等 ($E_r = E_b$, $\nu_r = \nu_b$)。根据工程岩体分级标准[9], 确定不

同基本质量等级岩体弹性模量和泊松比取值, 并计算得到相应桩、岩模量比 E_p/E_r 取值, 相关计算参数如表 1 所示。

Table 1. Theoretical analysis parameters in this study
表 1. 嵌岩桩极限端阻力性状理论计算参数

计算参数	岩体基本质量等级					
	I	II	III	IV	V	
岩体弹模($E_r = E_b$)/GPa	42.7	26.3	10.83	4.12	0.56	
岩体泊松比($\nu_r = \nu_b$)	0.20	0.23	0.28	0.33	0.35	
E_p/E_r	C20 混凝土桩体	0.60	0.97	2.35	6.19	45.54
	C40 混凝土桩体	0.76	1.24	3.00	7.89	58.04

图 2 为不同岩体基本质量等级下, 桩身混凝土强度等级为 C20 和 C40 时, 嵌岩桩端阻力分担桩顶荷载比 Q_b/Q_0 随桩、岩模量比和嵌岩深径比的变化规律。

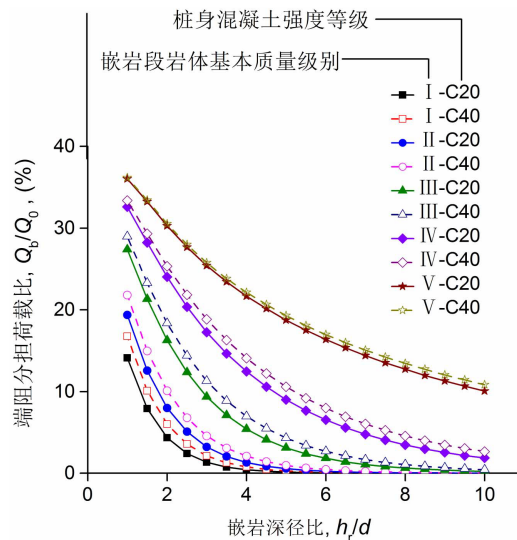


Figure 2. Variation of end-bearing capacity of rock socketed pile with concrete grade of C20 and C40 against the ratio of rock socketed depth to diameter in different rock mass quality

图 2. 不同岩体基本质量等级下, C20 和 C40 强度等级混凝土嵌岩桩端阻力随桩岩模量比和嵌岩深径比变化规律

图 2 结果表明, 嵌岩桩混凝土强度等级一定时, 不同基本质量等级岩体中的嵌岩桩极限端阻力分担荷载比均随嵌岩深径比 h_r/d 的增大而减小。相同嵌岩深径比下, 极限端阻力分担荷载比随岩体基本质量等级的提高而降低。此外, 不同岩体基本质量等级下, 嵌岩桩极限端阻力分担荷载比随桩岩模量比 E_p/E_r 增大而增大, 这与 Pells 和 Turner [10] 的理论结果一致。总体上看, 提高桩身混凝土强度等级可一定程度地提高嵌岩桩端阻力分担荷载比。

根据表 1 数据, 图 3 给出了桩身混凝土强度等级为 C40 的嵌岩桩位于不同岩体基本质量等级中, 且桩端岩体与桩侧岩体的弹性模量比 E_b/E_r 分别为 0.5 和 2.0 时, 嵌岩桩极限端阻力分担荷载比 Q_b/Q_0 随嵌岩深径比 h_r/d 的变化规律。从图 3 可看出, 嵌岩桩极限端阻力分担荷载比随嵌岩段桩端岩体和桩周岩体模量比的增加而减小。

综合上述嵌岩桩极限端阻力性状的理论分析结果表明, 下压荷载作用下嵌岩桩承载特性主要表现为端承摩擦桩, 桩端极限阻力发挥不仅是嵌岩深径比的函数, 也是桩体与岩体弹性模量比的函数, 同时还

与嵌岩段桩端、桩周岩体弹性模量比相关。总体上看, 嵌岩桩极限端阻分担的荷载比随嵌岩深径比的增大而减小, 桩体混凝土与桩周岩体弹性模量比的增大而增大。从嵌岩桩极限端阻力实测结果看, 嵌岩桩下压承载特性也主要表现为端承摩擦桩。史佩栋[6]分析了国内外 150 根嵌岩桩下压承载力试验实测数据。结果表明, 当 $1.0 < L/d < 20$ 时, 嵌岩桩端阻分担荷载比随 L/d 增大迅速从 100% 递减至约 20%; 当 $20 < L/d < 63.7$ 时, 嵌岩桩端阻分担的荷载比一般不超过 30%, 且大部分桩为 20% 以下, 不少桩为 5% 以下。邢皓枫[4]对 43 根试桩进行统计分析, 嵌岩桩极限端阻力所分担的荷载比小于 20% 的桩数 30 根, 分担荷载比 20.1%~30% 的桩数 5 根, 而处于 30.1%~50% 的桩数仅 5 根。嵌岩桩端阻力所占桩顶荷载比的理论分析结果与已有试验实测结果也是比较吻合的[6] [11] [12], 理论分析结果可供嵌岩桩极限端阻力计算提供借鉴。

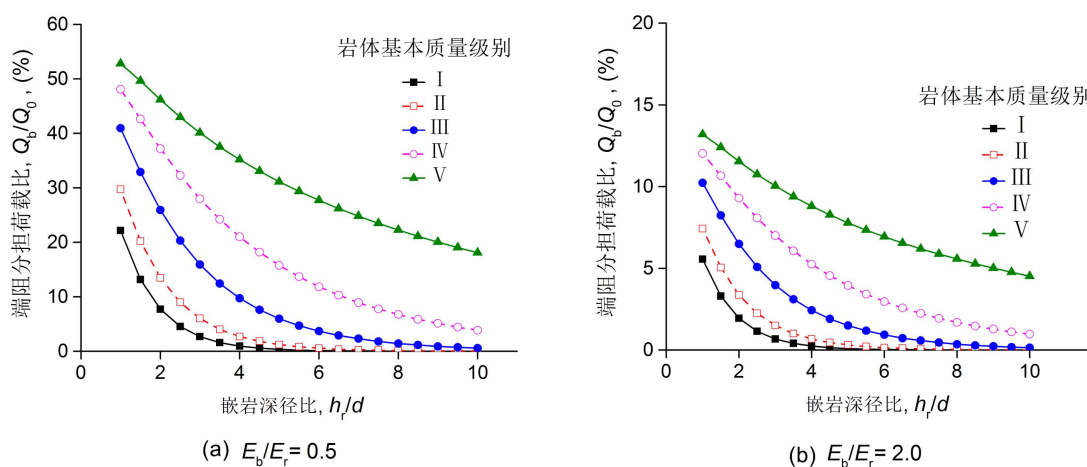


Figure 3. Variation of end-bearing capacity of rock socketed pile with $E_b/E_r = 0.5$ and $E_b/E_r = 2$ against the ratio of rock rocketed depth to diameter in different rock mass quality

图 3. 桩端岩体与桩侧岩体的弹性模量比 $E_b/E_r = 0.5$ 、 $E_b/E_r = 2$ 时, 端阻分担荷载比随嵌岩深径比变化规律

4. 结语

1) 嵌岩桩端阻力分担桩顶荷载比理论计算结果表明, 下压荷载作用下嵌岩桩承载特性主要表现为端承摩擦桩, 理论分析结论与已有试验实测结果也是比较吻合。因此, 工程设计中如不加区分一律把嵌岩桩视为端承桩, 既不符合理论计算和试验实测实际, 也造成了不必要的浪费并增加施工难度。

2) 下压荷载作用下, 嵌岩桩端阻发挥性状与嵌岩深径比、桩岩弹性模量比以及嵌岩段桩端桩身周围岩体弹性模量比相关。嵌岩桩端阻分担荷载比随嵌岩深径比增大而减小、随桩岩模量比增大而增大, 提高桩身混凝土强度等级可一定程度地提高嵌岩桩端阻力分担荷载比。

基金项目

国家电网公司科技项目(GCB17201600230)。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 张建新, 叶洪东, 杜海金, 等. 嵌岩桩设计中几个问题的探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7): 1222-1225.
- [3] 王卫东, 吴江斌, 王向军. 嵌岩桩嵌岩段侧阻和端阻综合系数研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(S2): 289-295.
- [4] 邢皓枫, 孟明辉, 罗勇, 叶观宝, 何文勇. 软岩嵌岩桩荷载传递机理及其破坏特征[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(S2): 355-361.
- [5] GB50007-2011 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.

- [6] 史佩栋, 梁晋渝. 嵌岩桩竖向承载力的研究[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(4): 32-39.
- [7] Carter, J.P. and Kulhawy, F.H. (1988) Analysis and Design of Drilled Shaft Foundations Socketed into Rock. Report EL-5918, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California.
- [8] GB 50010-2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [9] GB/T 50218-2014 工程岩体分级标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [10] Pells, P.J.N. and Turner, R.M. (1979) Elastic Solutions for the Design and Analysis of Rock-Socketed Piles. *Canadian Geotechnical Journal*, **16**, 481-487. <https://doi.org/10.1139/t79-054>
- [11] 刘金砺. 桩基础设计与计算[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990: 85-95.
- [12] 黄求顺. 嵌岩桩承载力的试验研究[C]//中国建筑学会地基基础学术委员会论文集. 太原: 山西高校联合出版社, 1992: 47-52.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3458, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: hjce@hanspub.org