

文章编号: 1000-7598 (2012) 08-2403-05

基于自平衡试桩法大直径嵌岩桩尺寸效应分析

龚成中^{1,2}, 何春林¹, 龚维明², 戴国亮²

(1. 淮阴工学院, 江苏 淮安 223001; 2. 东南大学 土木工程学院, 南京 210096)

摘要: 基于自平衡测试技术, 通过现场的原位测试方法, 对大直径嵌岩桩的尺寸效应进行了研究, 内容包括桩径尺寸和嵌岩深度变化以及桩端阻力尺寸效应的影响分析等。从测试结果来看, 嵌岩桩也存在一定程度的尺寸效应现象。当其他条件一定时, 随着桩径的增大, 桩侧阻力存在着减小现象; 在同一种岩层的情况下, 随着嵌岩深度的增大, 桩侧阻力发挥也并不相同, 嵌岩深度越大, 桩侧阻力发挥也越小。实测结果表明, 桩周岩石的特性变化对桩侧阻力影响最大, 岩石抗压强度越高, 桩侧阻力也越大。此外, 桩径的变化对桩端阻力的影响更为明显。因此, 在大直径嵌岩桩的设计中应注意尺寸效应对桩基承载力的影响。

关键词: 嵌岩桩; 尺寸效应; 桩侧阻力; 桩端阻力

中图分类号: TU 47

文献标识码: A

Analysis of size effect on large diameter rock-socketed pile based on self-balance method

GONG Cheng-zhong^{1,2}, HE Chun-lin¹, GONG Wei-ming², DAI Guo-liang²

(1. Huaiyin Institute of Technology, Huaian, Jiangsu 223001, China; 2. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Based on the self-balanced test technology, the size effect on the large diameter rock-socketed pile has been analyzed by using in-situ testing methods, including the change of diameter, the depth socketed in rock and size effect on tip resistance of pile and so on. From the result of test, it can be seen that it exit a certain phenomenon of the size effect on the large diameter rock-socketed pile. With the increasing of pile diameter, the side resistance is decreased while other conditions are invariable. From the socketed depth point of view, the side resistance of pile is not the same in the case of the same rock areas because of the difference of its socketed depth. The greater the depth embedded in rock, the smaller the side resistance of pile. The experimental results show that the character of the rock around the pile has the greatest impact on the pile side resistance. The higher the compressive strength of rock, the side resistance of pile is also greater. In addition, the effect of diameter change on the pile tip resistance is even more apparent. Therefore, the design of large diameter pile should pay attention to the size effect on the bearing capacity in rock areas.

Key words: rock-socketed pile; size effect; shaft resistance; tip resistance

1 引言

嵌岩桩具有承载力高、沉降小, 抗震性能好等特点, 近年来在土木工程中得到了广泛应用。嵌岩桩的承载特性研究也成为国内外工程和学术界关注的热点问题^[1-5]。国外学者对嵌岩桩的研究比国内起步要早。早在 1969 年 Reese 等^[6]在第 7 届国际土力学及基础工程会议上就发表了世界上较早的一根埋设量测元件的嵌岩桩桩顶荷载随深度传递的量测资料。国内学者对其研究虽较西方学者晚, 但也取得了一些长足的进步。

目前, 随着高层建筑和超高层建筑的大量兴建, 上部结构的荷载也越来越大, 大直径嵌岩桩甚至是超大直径嵌岩桩在工程中得到了广泛的使用。尽管我国现行的各种规范中计算嵌岩桩的承载力的方法不尽相同, 但从计算模式中不难看出, 增大桩径对提高嵌岩桩的承载力是有利的。需要注意的是对大直径嵌岩桩而言, 随着桩径的增大, 在桩身轴力作用下, 桩的侧向变形会减小, 作用在桩周岩石上的法向应力随之下降, 必将导致桩侧摩阻力的下降。Pells 等^[7]较早注意到这个问题并进行了模型试验研究, 模型试验结果表明: 当桩径小于 500 mm 时,

收稿日期: 2011-03-09

基金项目: 江苏省自然科学基金项目(No. BK2011406); 山东省交通厅科技项目(No. 2010Y-3)。

第一作者简介: 龚成中, 男, 1970 年生, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程方面的教学与科研工作。E-mail: gcz2008@sina.com

桩侧阻力计算系数随桩径增加略有减小，由于桩径增加引起面积的增加而增加的侧阻力甚至会不足以弥补侧阻力计算系数的减小而减小的侧阻力，导致桩侧阻力降低。对于考虑尺寸效应的桩侧阻力求解问题，O'Neil 等^[8]提出了双曲线型式的桩侧荷载传递模型，该模型建立在桩岩石界面粗糙度均匀，且桩身材料与周围岩体胶结良好，此模型公式为

$$\tau(z) = \frac{\omega(z)}{\frac{2.5D}{E_m} + \frac{\omega(z)}{\tau_{\max}(z)}} \quad (1)$$

式中： D 为桩径； E_m 为岩石的弹性模量； $\omega(z)$ 为桩-岩相对位移； $\tau(z)$ 为嵌岩段桩侧摩阻力； $\tau_{\max}(z)$ 为嵌岩段桩侧极限摩阻力，目前该式已逐渐被国外大多数学者所接受。

我国学者对嵌岩桩的尺寸效应研究较少，张建新等^[9]利用有限元分析软件，分析了桩的尺寸效应对嵌岩桩承载形状的影响。研究表明：在其他条件一定时，随着桩径的增加，嵌岩深径比减小，桩的承载力有增大的趋势，得出增大桩径比增大嵌岩深度对提高承载力更为有效的结论，但该文主要研究了桩侧阻力的分布规律，对大直径尺寸效应的影响则介绍较少。我国 2008 年出版的《建筑桩基规范》^[10]虽考虑了大直径桩的尺寸效应，如对桩基直径 $D > 0.8 \text{ m}$ 的桩，对桩侧阻力、桩端阻力采用了 $(0.8/D)^n$ 的折减系数，但上述折减系数主要适用于土层，规范并没有涉及到岩石的情况。

由于大直径嵌岩桩承受荷载较大，现场原位试验费用比较高，且难以准确测试，因此，基于尺寸效应现场的原位测试对比试验目前还比较匮乏，本文基于某电网调度中心大楼现场的测试报告，对嵌岩桩的尺寸效应进行详细分析。

2 试验原理及方法

该电网调度中心大楼高 200 多米，考虑到工程的重要性，为了减少测试过程中上覆土层的影响并准确测得嵌岩段部分的桩侧阻力和桩端阻力，待试桩挖孔至岩土交界面时，根据要求在孔底岩层中分别挖取直径 D 不同、深度 h 不同的孔洞并浇筑混凝土成桩（见图 1）。通过测试嵌岩段部分的桩侧阻力和桩端阻力来确定试桩承载力并分析尺寸效应对承载力的影响。

由于传统加载方法难以在孔底进行加压测试，本次试验采用自平衡测试方法对其进行了测试^[11]。其主要加载设备为荷载箱，其由活塞、顶盖、底板

及箱壁等组成。荷载箱中的压力可用压力表测得，上下盖板的位移可用位移传感器测得。竖向加载时，可通过高压油泵向荷载箱内腔加压，随着压力的增加，荷载箱将同时向上、向下发生变位，促使桩侧、桩端阻力的发挥，其测试原理如图 2 所示。

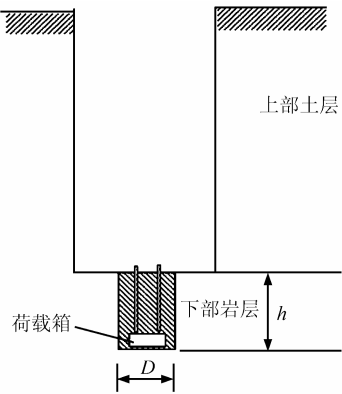


图 1 测试示意图
Fig.1 Test diagram

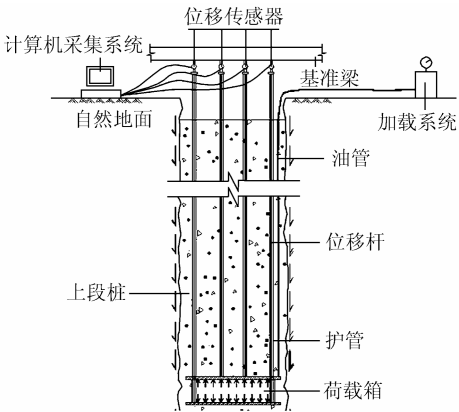


图 2 自平衡测试原理图
Fig.2 Schematic of the self-balanced test

为了保证测试的准确性，在桩底的荷载箱下方还设置了 50 mm 厚的砂垫层。

本文选取 7 根实测的试桩数据对桩基的尺寸效应进行研究，试桩基本参数如表 1 所示。

表 1 试桩参数
Table 1 Parameters of test pile

桩号	岩层名称	嵌岩深度 h/mm	直径 D $/\text{mm}$	岩层单轴强度 $/\text{kPa}$
S1		2 500	800	1.4
S2	中风化砂岩	1 500	1 000	1.4
S3		2 500	1 100	1.4
S4		2 000	1 000	9.5
S5	中风化砾岩	1 000	1 000	9.5
S6		1 500	1 000	1.0
S7	强风化砂岩	1 000	1 000	1.0

3 试验结果及分析

3.1 桩侧阻力试桩尺寸效应测试与分析

本文以试桩 S1、S3 为研究对象，2 根试桩除了直径不同外，其他条件完全相同。实测的嵌岩段平均桩侧阻力与位移关系曲线如图 3 所示。

从图中可以看出，在岩质条件和嵌岩深度相同的条件下，嵌岩段的平均桩侧阻力与位移关系呈曲线分布，并且两者的桩侧摩阻力大小也并不相同。在相同的位移情况下，S3 与 S1 相比，随着桩径的增大，其对应的桩侧阻力发挥略有减小，造成这一现象的主要原因：一是大直径桩应力松弛现象与小直径桩相比较为明显；二是随着桩径的增大，桩身的截面刚度也比较大，在竖向轴力的作用下，桩的侧向变形减小，作用在桩周岩石上的法向应力也随之减小，势必导致桩侧的切向应力，即桩侧阻力的减小。这也说明了嵌岩桩在嵌岩段部分由于尺寸效应存在着一定的桩侧阻力减小现象。

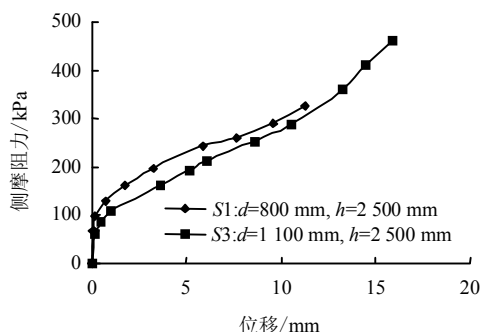


图 3 S1、S3 桩侧阻力-位移曲线

Fig.3 Curves of shaft resistance-displacement of S1, S3

3.2 桩侧阻力嵌岩深度影响分析

本次试验还对同一岩层采用了不同孔深、不同孔径的形式做了对比试验，对嵌岩桩的深度效应进行测试与研究。测试结果如表 2 所示。

表 2 侧阻力与位移的关系

Table 2 Relations of shaft resistance and displacement

桩号	孔径 D/mm	嵌岩深度 h/mm	加载值 $/\text{kN}$	侧阻力 $/\text{kPa}$	向上位移 $/\text{mm}$
S1	800	2 500	2 000	325	11.22
S2	1 000	1 500	2 174	478	3.17
S3	1 100	2 500	3 900	461	15.93
S4	1 000	2 000	9 998	1 633	11.53
S5	1 000	1 000	5 795	1 943	7.12
S6	1 000	1 500	1 425	313	4.78
S7	1 000	1 000	1 100	350	1.73

从表可以看出，在相同岩层的情况下，嵌岩深度不同时桩侧阻力也并不相同。如试桩 S4 和 S5 嵌

岩部分的岩层都是中风化砾岩，两者孔径也相同 ($D=1.0\text{ m}$)；不同之处在于试桩 S4 的嵌岩深度为 2 倍桩径，而试桩 S5 的嵌岩深度为 1 倍桩径。从测试结果看，嵌岩深度大的桩，其极限桩侧阻力也相对小一些。主要原因是嵌岩桩嵌岩段部分的桩侧阻力的发挥也是一个渐次的过程。在荷载箱提供的压力作用下，嵌岩深度小的嵌岩桩其极限侧阻力的发挥就比较完全，桩侧阻力分布也比较接近；嵌岩深度较大的嵌岩桩，不同位置处的桩侧阻力发挥则并不相同，在极限荷载作用下，靠近荷载位置处的桩侧阻力已达到其极限侧阻力，而距离荷载较远处桩侧阻力并未充分发挥，导致其平均极限侧阻力小于嵌岩深度较小的状况。

试桩 S6 和试桩 S7 也是如此，该试桩嵌岩部分的岩层为强风化砂岩。S6 嵌岩深度为 1.5 倍桩径，而 S7 嵌岩深度为 1 倍桩径，在其他条件相同的情况下，嵌岩深度小的桩，其侧阻力也相对大一些。

本次试验也从另一个方面证实，桩周岩层的特性对桩侧阻力的影响更为明显。岩体抗压强度高的中风化砾岩其实测的极限侧阻力也远大于抗压强度比较低的中风化砂岩、强风化砂岩。

在每级荷载作用下，桩侧阻力与位移关系如图 4 所示。

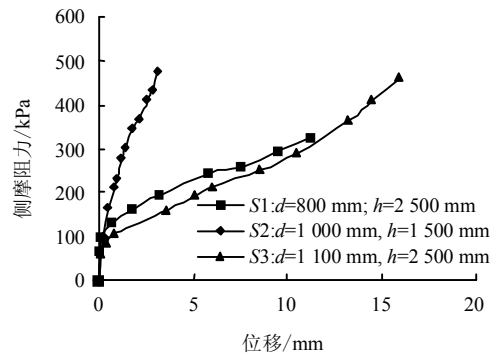
从测试结果来看，试桩 S1、S2、S3 岩层条件相同，皆为中风化砂岩。试桩 S1、S3 在嵌岩深度相同的条件下，尽管两者桩径不同，但桩侧摩阻力大小相差不大；而试桩 S2 同试桩 S1、S3 相比，随着桩端荷载的增大，嵌岩深度越大的桩其岩层的桩侧阻力折减越明显。同样，桩周岩层为微风化砾岩的试桩 S4、S5 以及桩周岩层为强风化砂岩的试桩 S6、S7 都存在相同现象，即在桩侧位移超过一定数值后，相同岩层不同嵌岩深度的桩侧摩阻力随荷载增大两者差值也越来越突出。

可以看出，在岩石条件相同的情况下，嵌岩深度增大导致桩侧摩阻力的折减要比孔径增大而导致桩侧摩阻力的折减更为明显。这也说明一味的增大桩端的嵌岩深度来提高桩基整体的承载能力还不如采用增大桩的直径的方法更为有效。

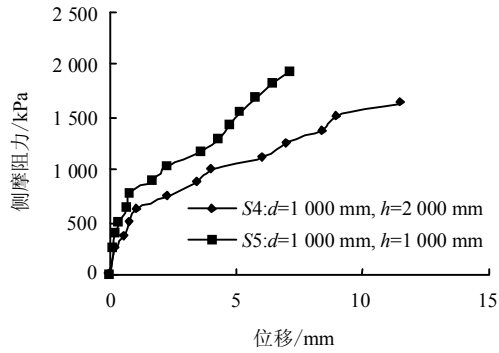
3.3 桩端阻力尺寸效应分析

为测试桩端阻力的尺寸效应，在荷载箱下方设置了不同尺寸的载荷板。考虑到工程的实际需要，最小载荷圆板的直径都超过了 300 mm。表 3 列出了不同岩层条件下，不同底板尺寸的试验结果。为研究同一岩层在同等加载条件下尺寸大小对端阻力的影响，试桩 S2、S3 及试桩 S5、S7 的加载值、端

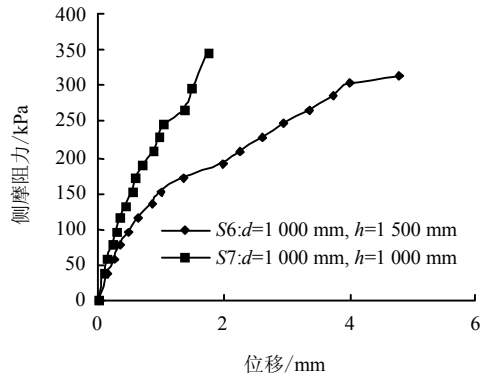
阻力、向下位移均为利用实测数值而拟合的结果。由于试桩 S2 的拟合数值较大,故应予以舍去。



(a) 试桩 S1、S2、S3



(b) 试桩 S4、S5



(c) 试桩 S6、S7

图 4 侧摩阻力与位移曲线
Fig.4 Curves of shaft resistance-displacement

表 3 端阻力与位移关系
Table 3 Relations of tip resistance and displacement

桩号	加载值 /kN	底板直径 /mm	端阻力 /kPa	向下位移 /mm
S1	1 800	685	4 885	9.57
S2	1 078	530		35.07
S3	2 517	810		12.57
S4	4 870	430		13.36
S5	7 315	530	11 461	21.63
S6	1 040	340		22.57
S7	1 550	415		29.67

从表 3 中可以看出,在本工程的 3 种岩层中,在相同压应力的条件下,底板尺寸大的桩对应的位移也大。即试桩 S3、S5、S7 的底板尺寸分别大于相应的试桩 S1、S4、S6,它们向下位移也较大。即在相同的岩层中,桩端阻力的数值也并不完全相同。在相同桩端应力作用下,桩端面积越大,桩端沉降也越大。当以桩基的沉降量为控制条件来确定桩基承载力时,桩端承载力与桩径大小有关。在满足位移相等的条件下,桩径越大,其单位端阻力就越低。因此,计算大直径嵌岩桩的端承载力时,应根据桩端尺寸大小适当予以折减。

3.4 桩端阻力折减系数分析

取中风化岩层讨论,在相同位移的情况下,试桩 S1、S3、S4、S5 端阻力的大小如表 4 所示。假设大直径嵌岩桩的桩端阻力随桩径增大呈双曲线形式减小,即如下式所示:

$$q_{p2} = (D_1 / D_2)^n q_{p1} \tag{2}$$

则

$$n = \frac{\lg(q_{p1} / q_{p2})}{\lg(D_2 / D_1)}, (D_1 < D_2) \tag{3}$$

式中: D_1 为变化前的桩径; D_2 为桩径改变后的桩径; q_{p1} 是桩径为 D_1 时对应的桩端阻力; q_{p2} 是桩径为 D_2 时对应的桩端阻力; n 为岩层桩端阻力随桩径变化的折减指数值。

采用上述计算方法可求得该测试岩层的 n 值,如表 4 所示。计算结果表明,对中风化的砂岩数值为 2.30; 中风化的砾岩为 4.32。可以看出,桩端的尺寸效应随桩径的增大,数值变化比较明显。而且岩石的强度越高,数值减小就越明显。

表 4 系数值 n
Table 4 Values of n

桩号	加载值 /kN	直径 /mm	端阻力 /kPa	位移 /mm	系数 n
S1	2 000	685	5 430	9.57	2.30
S3	1 900	810	3 689	9.57	
S4	4 220	430	29 074	9.90	
S5	2 600	530	11 791	9.90	4.32

4 结 论

(1) 试验在同种岩层条件下,对不同嵌岩桩的桩侧阻力进行测试与分析,结果表明,随着桩径的增大,大直径嵌岩桩的桩侧阻力存在一定的减小现象。

(2) 在不同嵌岩深度的条件下, 对比试验表明, 随着孔深的增大桩侧阻力存在着明显减小现象, 且嵌岩深度的影响较孔径变化的影响更为明显。

(3) 从不同岩层测试结果来看, 桩周岩层的强度对桩侧阻力的影响最为明显, 桩周岩层强度高, 桩侧阻力的发挥也大。

(4) 嵌岩桩的桩端阻力也存在着明显的尺寸效应。随着桩径的增大, 桩端阻力减小也较为明显, 岩石强度越高, 相应地桩端阻力减小也越大。

参考文献

- [1] 董平, 秦然, 陈乾, 等. 大直径人工挖孔嵌岩桩的承载形状[J]. 岩土力学与工程学报, 2003, 22(12): 2099—2013.
DONG Ping, QIN Ran, CHEN Qian, et al. Bearing behavior of large-diameter rock-socket piles[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(12): 2099—2013.
- [2] 龚成中, 何春林, 龚维明, 等. 泥质岩地区大直径深嵌岩桩承载特性分析[J]. 土木建筑与环境, 2011, 33(6): 105—109.
GONG Cheng-zhong, HE Chun-lin, GONG Wei-ming, et al. The bearing characteristics of large diameter rock-socketed pile in argillaceous area of Guizhou province[J]. **Journal of Civil Architectural & Environmental Engineering**, 2011, 33(6): 105—109.
- [3] 文松霖. 扩底桩桩端承载机制初探[J]. 岩石力学, 2011, 32(7): 1970—1974.
WEN Song-lin. A discussion on pile-tip bearing mechanism of pedestal pile[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(7): 1970—1974.
- [4] 龚成中, 龚维明, 何春林, 等. 孔壁粗糙度对深嵌岩桩承载特性的影响[J]. 中国公路学报, 2011, 24(2): 56—61.
GONG Cheng-zhong, GONG Wei-ming, HE Chun-lin, et al. Influence of hole side roughness on bearing characteristic of deep rock-socketed pile[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2011, 24(2): 56—61.
- [5] 程晔, 龚维明, 戴国亮, 等. 软岩桩基承载性能试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 165—172.
CHENG Ye, GONG Wei-ming, DAI Guo-liang, et al. Research on bearing performance of socketed pile in soft rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(1): 165—172.
- [6] REESE L C, HUDSON W R, VIJAYVERGIYA V N. An Investigation of the interaction between bored piles and soil[C]//Proceedings of 7th International Conference on Soil Mechanics Found Engineering. Mexico: [s. n.], 1969, 2: 211—215.
- [7] PELLIS P J N, ROWE R K, TURNER R M. An experimental investigation into side shear for socketed piles in sandstone[C]//Proceedings of the International Conference on Structural Foundations on Rock. Sydney: [s. n.], 1980, 1: 291—302.
- [8] O'NEILL M W, HASSAN K H. Drilled Shafts: Effects of construction on performance and design criteria[C]//Proceedings of the International Conference on Design and Construction of Deep Foundations. Washington: Federal Highway Administration, 1994, 1: 137—187.
- [9] 张建新, 吴东云, 张淑朝. 嵌岩桩尺寸效应的有限元分析[J]. 岩石力学, 2007, 28(6): 1221—1224.
ZHANG Jian-xin, WU Dong-yun, ZHANG Shu-chao. Finite element analysis of size effect of rock-socketed piles[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(6): 1221—1224.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ94—2008 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [11] 江苏省建设厅. DGJ32/TJ77—2009 基桩自平衡法静载试验技术规程[S]. 南京: 江苏科学技术出版社, 2009.