

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.04.013

深嵌岩桩承载特性及其荷载传递法应用

龚成中^{1,2}, 何春林¹, 龚维明²

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

摘要:为了弥补大直径深嵌岩桩(嵌岩比 $h_r/b \geq 5$)承载特性研究领域的不足,利用青岛海湾大桥试桩 zh12 的自平衡测试结果,对大直径深嵌岩桩的承载特性进行了分析。研究了深嵌岩桩嵌岩段实测的桩侧摩阻力与位移关系以及桩端阻力与位移关系,并与采用双曲线分布模式的荷载传递法进行了比较。研究表明:在软岩地区,大直径深嵌岩桩基桩顶处的荷载-位移曲线为缓变型,近似为直线分布形态。从实测曲线的拟合结果来看,岩层处的侧摩阻力与位移关系采用双曲线拟合是可行的,参数 $1/b$ 也能反映出桩侧极限摩阻力的数值;桩端岩层实测的荷载-位移曲线也与双曲线形态比较相似;利用拟合曲线所得到的参数 a 、 b 反演计算所得到的桩顶荷载-位移曲线也与自平衡测试方法的实测结果接近。最后,根据实测结果分析了在不同单轴抗压强度状态下,桩侧极限摩阻力经验公式中参数 α 的取值范围。

关键词:桥梁工程;深嵌岩桩;荷载传递法;承载特性;桩侧摩阻力

中图分类号:U443.15 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2013)04-0084-05

Bearing Characteristics of Deep Rock-Socketed Piles and Application of Load Transfer Method

Gong Chengzhong^{1,2}, He Chunlin¹, Gong Weimin²

(1. Huaiyin Institute of Technology, Jiangsu Huai An 223001; 2. Southeast University, Jiangsu Nanjing 210096)

Abstract: In order to study bearing characteristics of deep rock-socketed piles ($h_r/b \geq 5$), based on the test results of self-balancing test of zh12 pile in Qingdao Gulf Bridge, the bearing characteristics of deep rock-socketed piles were analyzed. The relation between sides shear resistance of the piles and its displacement in soft rock was researched, and the relation between end bearing resistance and displacement was studied. The hyperbolic distributions on the load transfer method were compared to them. The results indicate that Q-S curve of large diameter deep socketed pile in soft rock area declines slowly, approximately in linear distribution. According to the fitting curve based on measured results, it is feasible to fit the relationship between sides shear resistance and its displacement by using hyperbola. The parameter of $1/b$ also reflects the ultimate side resistance values of piles. The load-displacement curve at the top of pile is similar to the hyperbolic form. By using the parameters of a 、 b obtained from fitting curve, the calculated load-displacement curve on top of pile is close to the measured curve of self-balance method. At last, according to the measured results, the value range of parameter α in empirical formula was analyzed under different states of axial compressive strength.

收稿日期:2012-05-05

基金项目:江苏省自然科学基金项目(BK2011406);山东省科技厅科技项目(2010Y-3)。

作者简介:龚成中(1970-)男,副教授,博士,主要从事岩土工程研究,(E-mail)gcz2008@sina.com。

Key words: bridge engineering; deep rock-socketed pile; load transfer method; bearing characteristics; sides shear resistance

由于大直径嵌岩桩能够将上部结构的荷载传递到深层稳定的基岩中去,从而大大提高桩基础的承载力并能减少基础的沉降,所以大直径嵌岩桩基础在桥梁工程有着广泛的应用^[1-3]。研究表明,当嵌岩深度为2~3倍桩径时,岩层的地基承载力发挥比较充分,嵌岩深度比较合理。但是随着大跨度桥梁工程的建设 and 上部结构荷载的增大,在一些地区已出现嵌岩深度超过5倍桩径的深长嵌岩桩基(嵌岩比 $h_r/b \geq 5$)。如浙江西堠门大桥^[4]、青岛海湾大桥^[5]、贵州北盘江大桥^[6]等,本文所说的深嵌岩桩,主要是指此类桩型。由于该类桩基嵌岩深度较大,传统的静载荷试验难以加载至破坏状态且费用较高,采用自平衡试桩法可较好地解决此类问题,有关自平衡测试方法的优点可参见文献^[7-8]。目前,对深嵌岩桩的相关理论研究和现场测试数据还比较缺乏^[9-10]。在工程实践中如何利用已有的一些测试数据来预测该地区其他类似桩基的承载力就显得尤为必要。荷载传递法是一种概念明确、计算简单、实用性强的方法^[11]。本文依托青岛海湾大桥zh12号桩的自平衡静载荷试验结果,对软岩地区深嵌岩桩的承载特性进行了分析,并利用实测桩端、桩侧摩阻力荷载位移曲线与双曲线位移模式的荷载传递法进行了对比分析,验证了该法在深嵌岩桩承载特性分析中应用可靠性。

1 荷载传递函数形式及参数的确定

研究表明,对于一般粘土和砂土,桩侧摩阻力与桩身位移之间的双曲线关系是存在的,而对于软岩地区的深嵌岩桩,嵌岩段岩层的桩侧摩阻力与位移关系是否满足双曲线关系,文献却鲜有介绍。本文采用 Reese 采用的双曲线传递函数来拟合大直径深嵌岩桩的桩侧摩阻力、桩端阻力及其位移的关系。双曲线模型公式如下所示:

$$\tau(z) = \frac{s_z}{a + bs_z}, \sigma = \frac{s_b}{a_b + b_b s_b} \quad (1)$$

式中: $\tau(z)$ 为 z 处的桩侧摩阻力; s_z 表示 z 位置处的桩身沉降; a 和 b 表示桩侧土(岩)的传递系数; σ 为桩端应力; a_b 和 b_b 为桩端土(岩)的传递系数; s_b 为桩底沉降。

双曲线法荷载传递模型如图1所示,图中的 $1/a$ 即为桩侧摩阻力与位移关系曲线($\tau-s$ 曲线)的

起始斜率;数值 $1/b$ 实际上就是该桩侧岩(土)的摩阻力极限值。 a 、 b 即为荷载传递参数。

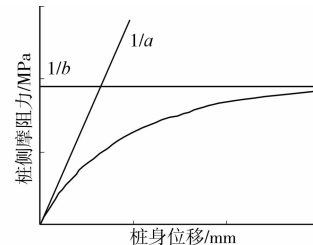


图1 荷载传递双曲线法模型图

对于桩-岩界面的荷载传递参数,目前各国学者的共同方法是將桩岩界面的极限平均侧阻力与岩石的饱和单轴抗压强度建立相关关系,主要的经验公式采用如下形式^[12]:

$$\frac{1}{b} = \alpha \sigma_c^\beta \quad (2)$$

式中: α 、 β 为经验系数, σ_c 为完整岩体单轴抗压强度。

Horvath考虑岩石粗糙度的影响,并根据 Pells 和 Tuner 建议,提出的计算公式如下^[13]:

$$\frac{1}{b} = 0.8 \sigma_c (RF)^{0.45} \quad (3)$$

式中: RF 定义为孔壁粗糙度,为一个无量纲单位。

对于桩端极限承载力与岩石的无侧向抗压强度之间关系,诸多学者也多用统计的关系来表示,即

$$\frac{1}{b} = \beta \sigma_c$$

2 工程概况及自平衡测试法

青岛海湾大桥东起青岛主城区308国道,跨越胶州湾海域,西至黄岛红石崖,路线全长新建里程约35.4 km。一期试桩采用自平衡法进行了4根桩基的测试。由于试桩zh12嵌岩深度比较大,桩身嵌入中等风化以上的角砾岩层深度约为19 m,嵌岩比远大于5,为深长嵌岩桩。故选取该桩为研究对象。该桩为钻孔灌注桩,里程号是K33+450。桩身直径为1.8 m,桩顶标高为6.91 m,桩底标高-39.61 m,桩长为46.5 m,桩周土(岩)层分布如图2所示。

试桩采用自平衡测试法,荷载箱顶的标高为-27 m。加载采用慢速维持荷载法分级加载。钢筋计及荷载箱位置如图2所示。主要岩(土)层分布情况如表1所示。桩端嵌入岩层的强度见表2所示。

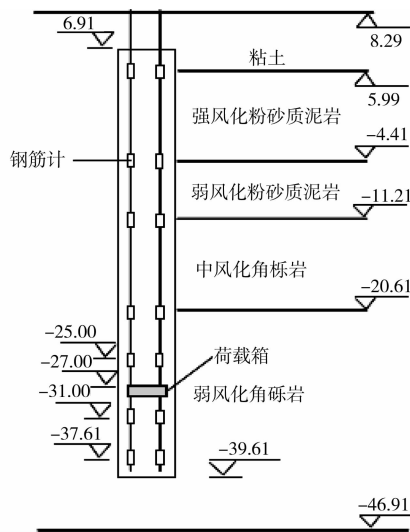


图 2 钢筋计及荷载箱布置图

表 1 桩位处岩(土)层分布情况

层号	层底标高/m	层厚/m	岩(土)层类别	预估极限侧摩阻力/kPa
1	5.99	2.3	粘土	70
2	-4.41	10.4	强风化粉砂质泥岩	80
3	-11.21	6.8	弱风化粉砂质泥岩	110
4	-20.61	9.4	中风化角砾岩	120
5	-46.91	26.3	弱风化角砾岩	150

表 2 不同条件下的岩石强度

岩性	天然单轴抗压强度 R_t /MPa	饱和单轴抗压强度 R_b /MPa	干燥单轴抗压强度 R_d /MPa
强风化粉砂质泥岩	0.89	0.30	3.40
弱风化粉砂质泥岩	1.70	0.56	9.99
中风化角砾岩	0.36	0.15	3.53
弱风化角砾岩	3.47	0.56	24.2

按自平衡测试方法^[14],经转换以后的桩顶荷载-位移曲线如图 3 所示。从图 3 中可以看出大直径深嵌岩桩荷载-位移曲线近似呈直线分布,曲线属于明显的缓变型。

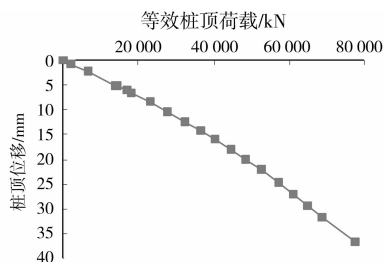


图 3 桩顶荷载-位移曲线

3 实测阻力及荷载传递法拟合分析

3.1 桩侧摩阻力及拟合分析

通过预先埋在桩身的应变计可以比较方便的测出不同桩身截面处的轴力,进而计算出桩身的侧摩阻力。本文主要讨论深嵌岩桩嵌岩段桩侧摩阻力与位移关系双曲线函数形式的 a 、 b 值。

实测的各嵌岩段桩侧摩阻力与位移关系曲线如图 4 所示。从图 4(a)中可以看出强风化粉砂质泥岩桩侧摩阻力与位移关系的双曲线特性并不明显。可能的原因是由于该土(岩)层的位置距离荷载箱的位置较远,桩侧摩阻力的发挥较小,且实测的数据存在一定程度的离散性所导致。对于弱风化粉砂质泥岩而言(标高分布范围为 $-4.41 \sim -11.21$ m,如图 4(b)所示),采用双曲线来拟合实测曲线,两者非常接近,说明该桩侧范围桩侧摩阻力与位移关系用双曲线模拟是可行的。对于中风化角砾岩同样如此。

对于弱风化角砾岩,从曲线的拟合来看,尽管 a 、 b 取值略有不同,但拟合曲线与实测曲线的相关性还是比较理想的。

经对比分析可以看出,采用双曲线来拟合深嵌岩桩的桩侧摩阻力与位移关系与实测结果较为吻合,说明采用该法是可行的。

桩侧极限摩阻力与位移关系经过双曲线拟合后,各岩层处对应的 a 、 b 平均值结果如表 3 所示。

表 3 拟合的特征参数值

岩层名称	实测最大侧阻力/kPa	a	b
强风化粉砂质泥岩	62.57	0.188 0	0.000 2
弱风化粉砂质泥岩	111.49	0.023 5	0.007 05
中风化角砾岩	194.92	0.007 1	0.005 3
弱风化角砾岩	695.08	0.001 8	0.001 4

桩端处实测的荷载-位移曲线及其拟合曲线如图 5 所示,从图形上看,两者也比较接近。对应的 $a = 0.004 1$, $b = 0.003$ 。

3.2 桩顶荷载-位移曲线的拟合

利用双曲线回归再统计分析得到的荷载传递参数 a 和 b ,通过位移协调法由桩端向上反算桩身轴力和变形,最后得出对应的桩顶荷载和位移,从而模拟出桩的 $Q-s$ 曲线如图 6 所示,从图 6 可以看出,双曲线拟合的结果与经过精确转换以后的自平衡测试结果也是比较一致的。

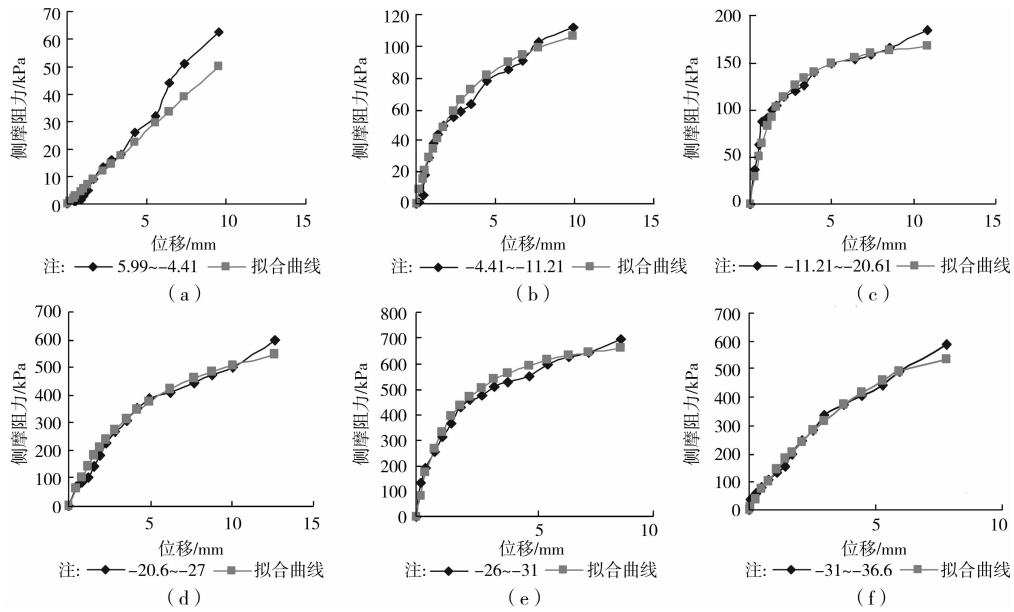


图 4 桩侧摩阻力与位移 ($\tau-s$) 曲线

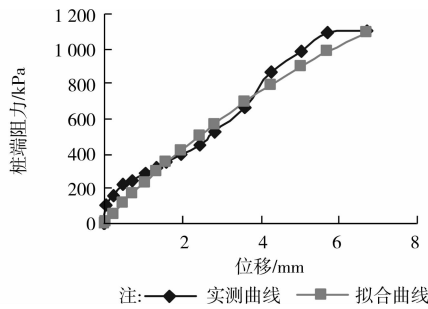


图 5 桩端处荷载-位移 (Q_b-s) 曲线

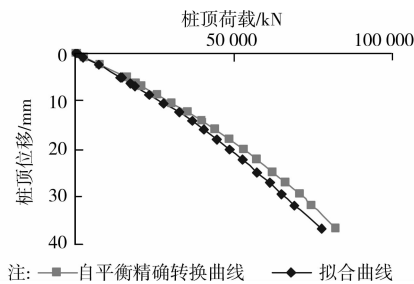


图 6 拟合的桩顶荷载-位移 ($Q-s$) 曲线

3.3 桩侧极限摩阻力与荷载传递参数 $1/b$ 的关系

从实测结果来看,对于弱风化粉砂质泥岩以及中等风化角砾岩的桩侧极限摩阻力与勘探报告给出的预估值相差不大,而弱风化角砾岩相差较大,在桩身位移达到 3 mm 左右时,实测的极限摩阻力就达到 500 kPa,设计中应引起注意。

根据拟合曲线所得到的参数值 b 就可求得其相应的倒数 $1/b$ 的数值。深嵌岩桩不同岩层处实测的极限侧摩阻力数值(kPa)与荷载传递参数($1/b$)的关系如图 7 所示。

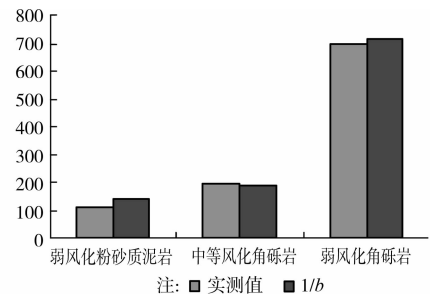


图 7 实测的极限侧摩阻力与荷载传递参数关系

可以看出荷载传递参数 $1/b$ 与实测的极限侧摩阻力的数值比较接近。用荷载传递参数($1/b$)来反映岩层的极限侧摩阻力可靠性较高。

为了研究嵌岩段桩基极限侧阻力与岩石单轴抗压强度的关系,由于本次试桩并没有测定嵌岩桩孔壁的粗糙度,故用算式 $\frac{1}{b} = \alpha \sigma_c^\beta$ 加以分析,采用 $\beta = 0.5$, 对应的无量纲系数 α 数值见下表 4 所示。

表 4 系数 α 数值

岩性	天然单轴抗压强度状况	饱和单轴抗压强度状况	干燥单轴抗压强度状况
强风化粉砂质泥岩	0.209 735	0.361 248	0.107 307
弱风化粉砂质泥岩	0.151 755	0.264 407	0.062 601
中风化角砾岩	0.329 773	0.510 882	0.105 312
弱风化角砾岩	0.106 219	0.264 407	0.040 222

从表中可以看出,当单轴抗压强度采用天然单轴抗压强度时, α 的数值一般介于 0.2~0.3 左右;采用饱和单轴抗压强度时, α 的数值一般介于 0.3~

0.5左右;采用干燥单轴抗压强度时, α 的数值一般介于0.05~0.1左右。本工程采用天然单轴抗压强度状态下所得到的 α 数值范围与Carter和Kulhawy等的研究结果比较接近。

4 结论

利用自平衡试桩法对软岩地区大直径深嵌岩桩承载特性进行了测试与分析,并把测试结果与荷载传递法进行了拟合分析。

从实测的结果来看,深嵌岩桩基在大吨位荷载作用下采用自平衡测试方法是可行的。实测结果表明,在软岩地区深嵌岩桩桩顶荷载-位移曲线没有明显的陡降段,呈现为近似直线的分布形态,这与普通桩基受力形态明显不同。从勘察报告提供的极限侧摩阻力数据来看,实测的弱风化粉砂质泥岩、中等风化角砾岩数值与之相比,两者相差不大。而弱风化角砾岩极限摩阻力与勘探报告的预估值相差悬殊,在设计中应引起注意。

从拟合的结果来看,在软岩地区,深嵌岩桩桩侧摩阻力与桩身位移关系以及桩端阻力与位移关系是比较符合双曲线分布形态的。按照双曲线模型这种荷载传递函数进行模拟所得到的荷载-位移关系同自平衡测试方法的实测结果比较吻合。证实了利用双曲线荷载传递函数对大直径深嵌岩桩进行模拟分析是完全可行的。在工程实践中如能利用测试数据得到相关岩层的 a 、 b 值,就可以利用荷载传递法预估其承载力,这对深嵌岩桩的设计是非常有利的。

研究表明:当桩侧极限摩阻力经验公式中,岩石强度如采用饱和单轴抗压强度时, α 的数值一般介于0.3~0.5左右。

参考文献:

- [1] Hoonil S, Sangseom J. Load-settlement behavior of rock-socketed drilled shafts using Osterberg-Cell tests [J]. Computers and Geotechnics, 2008, 35: 1134-1141.
- [2] 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 Y, Gong W M, Dai G L, Wu J K. Research on bearing performance of socketed pile in soft rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(1): 165-172.
- [3] 龚成中, 何春林, 龚维明. 马鞍山大桥大直径嵌岩桩承载力的测试与分析[J]. 中外公路, 2011, 31(3): 131-134. Gong C Z, He C L, Gong W M. Test of bearing characteristics on large diameter and rock-socketed piles in Ma'anshan Bridge [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2011, 31(3): 131-134.
- [4] 王红伟, 戴国亮, 龚维明. 西猴门大桥深长嵌岩桩承载特性的试验研究[J]. 公路, 2009(12): 11-15. Wang H W, Dai G L, Gong W M. Test and study on bearing behavior of deep-length socketed pile of Xihoumen Bridge [J]. Highway, 2009(12): 11-15.
- [5] 龚成中, 何春林, 洪静. 基于自平衡技术双荷载箱测试方法应用分析[J]. 建筑科学, 2010, 26(9): 75-79. Gong C Z, He C L, Hong J. Application analysis of dual-load cell testing method based on self-balancing technology [J]. Building Science, 2010, 26(9): 75-79.
- [6] Gong C Z, He C L, She Y X, et al. Study on bearing characteristics of large diameter and long rock-socket pile of Beipan River Bridge [C]// Advanced Materials Research, 2011 International Conference on Civil Engineering and Building Materials. 2011: 1669-1673.
- [7] 龚维明, 戴国亮, 蒋永生, 等. 桩承载力自平衡测试理论与实践[J]. 建筑结构学报, 2002, 23(1): 82-88. Gong W M, Dai G L, Jiang Y S. Theory and practice of self-balanced loading test for pile bearing capacity [J]. Journal of Building Structures, 2002, 23(1): 82-88.
- [8] 戴国亮, 龚维明, 刘欣良. 自平衡试桩法桩土荷载传递机理原位测试[J]. 岩土力学, 2003, 24(6): 1065-1069. Dai G L, Gong W M, Liu X L. Experimental study of pile-soil load transfer behavior of self-balanced pile [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(6): 1065-1069.
- [9] 龚成中, 何春林, 戴国亮. 大直径深嵌岩桩的承载特性与桩长设计[J]. 路基工程, 2011, 155(2): 14-16. Gong C Z, He C L, Dai G L. Study on bearing characteristic of large-diameter deep-socketed pile and pile length design [J]. Subgrade Engineering, 2011, 155(2): 14-16.
- [10] 龚成中, 龚维明, 何春林, 等. 基于双荷载箱技术的深长嵌岩桩基承载特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(Sup2): 501-504. Gong C Z, Gong W M, He C L, et al. Experimental study on bearing characteristics of deep rock-socketed pile based on double load cell technology [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(Sup2): 501-504.
- [11] 王传文, 梅国雄, 宋林辉. 广义荷载传递函数及其应用[J]. 岩土力学, 2007, 28(6): 1217-1220. Wang C W, Mei G X, Song L H. Generalized load transfer function and its application [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(6): 1217-1220.
- [12] Zhang L Y. Drilled shafts in rock analysis and design [M]. London: A. A. Balkema Publishers, 2004: 189-221.
- [13] Horvath R G, Kenney T C, Kozichi P. Method of improving the performance of drilled piers in weak rock [J]. Canada Geotechnical Journal, 1983, 20(4): 758-772.
- [14] 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.