

# 嵌岩桩竖向承载力规范计算的商榷

魏作安<sup>1,2</sup>, 尹光志<sup>2,3</sup>, 万玲<sup>2,3</sup>, 代高飞<sup>2,4</sup>

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100080; 2. 重庆大学 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400030; 3. 重庆大学 资源及环境科学学院, 重庆 400044; 4. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

**摘要:**从桩基规范中有关嵌岩桩竖向极限承载力的计算入手,分析其存在的问题和不合理之处。同时,根据桩与岩石接触方式和作用力呈顺序传递的性质,进一步证明了其不合理性,以及需要改进的地方。

**关键词:**嵌岩桩; 竖向承载力; 规范; 设计

**中图分类号:** TU473.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006 - 7329(2004)04 - 0025 - 04

## Discussion on Vertical Bearing Capacity of Rock - socketed Pile

WEI Zuo - an<sup>1,2</sup>, YIN Guang - zhi<sup>2,3</sup>, WAN Ling<sup>2,3</sup>, DAI Gao - fei<sup>2,4</sup>

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, P. R. China; 2. The Key Laboratory of Exploitation of Southwest Resources & Environmental Hazards Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 3. College of Resource and Environmental Sciences, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 4. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China)

**Abstract:** Through analyzing the calculation of vertical bearing capacity of rock - socketed pile given in technical code for building pile foundations, some unreasonable issues in the code were found. At the same time, based on the contacting ways between the pile and the rock and the behaviors of force transfer acted step by step, the unreasonable issues have been proved and the issues to be improved were pointed out in this paper.

**Keywords:** rock - socketed pile; vertical bearing capacity; technical code; design

由于嵌岩桩具有其承载力高,可充分发挥桩身强度和岩体强度,以达到安全可靠节约投资的优点而被广泛采用。1994 年我国正式颁布了第一部桩基规范,即《建筑桩基技术规范》(JGJ 94 - 94),这样使得工业与民用建筑桩基的设计与施工有法可依,同时,也为桩基设计与施工在技术先进、经济合理、安全适用、确保质量等方面提供了保证。然而,综观《建筑桩基技术规范》(JGJ 94 - 94),可以看出其在土类地基方面的规定应该还是比较成熟,但在岩石地基方面的规定,像嵌岩桩承载力设计计算就值得商榷。

### 1 规范中嵌岩桩承载力计算与分析

《建筑桩基技术规范》(JGJ 94 - 94)中的第 5.2.11 条,嵌岩桩单桩竖向极限承载力标准值,由桩周土总侧阻、嵌岩段总侧阻和总端阻三部分组成。当根据室内试验结果确定单桩竖向极限承载力标准值时,按下式计算<sup>[1]</sup>:

$$Q_{uk} = Q_{sk} + Q_{rk} + Q_{pk} \quad (1)$$

$$Q_{sk} = u \sum_{i=1}^n s_i q_{sik} l_i \quad (2)$$

收稿日期:2004 - 02 - 15

基金项目:国家 973 项目(2002C13412703)和中国科学院知识创新项目(KJ CX2 - SW - L1)资助项目

作者简介:魏作安(1965 - ),男,高级工程师,中国科学院力学所博士后,主要从事岩土工程研究。

$$Q_{rk} = u s f_{rc} h_r \quad (3)$$

$$Q_{pk} = p f_{rc} A_p \quad (4)$$

式中： $Q_{uk}$ 为单桩竖向极限承载力标准值； $Q_{sk}$ 为土的总极限侧阻力标准值； $Q_{rk}$ 为嵌岩段总极限侧阻力标准值； $Q_{pk}$ 为嵌岩段总极限端阻力标准值； $u$ 为桩的截面周长； $s_i$ 为覆盖层第*i*层土的侧阻力发挥系数； $q_{sik}$ 为桩周第*i*层土的极限侧阻力标准值； $l_i$ 为桩身长度； $s$ 为嵌岩段侧阻力修正系数，与嵌岩深度和桩径比  $h_r/d$  有关； $f_{rc}$ 为岩石饱和单轴抗压强度标准值； $h_r$ 为桩身嵌岩深度； $p$ 为嵌岩段端阻力修正系数，与嵌岩深度和桩径比  $h_r/d$  有关； $A_p$ 为桩的截面积。

现设定  $Q_{rkp}$ 为嵌岩桩的嵌岩段总的极限承载力标准值，则  $Q_{rkp}$ ：

$$Q_{rkp} = Q_{rk} + Q_{rp} \quad (5)$$

将(3)式和(4)式代入(5)式得：

$$Q_{rkp} = u s f_{rc} h_r + p f_{rc} A_p \quad (6)$$

在不考虑桩底存在扩大的情况下，桩的周长与桩的截面积存在一个关系，即

$$u = \frac{4A_p}{d} \quad (7)$$

式中： $d$ 为桩的直径。

将(7)式代入(6)式中得到：

$$Q_{rkp} = 4A_p s f_{rc} \frac{h_r}{d} + p f_{rc} A_p = A_p f_{rc} (4 s \frac{h_r}{d} + p) \quad (8)$$

定

$$C = A_p f_{rc}$$

则(8)式变为：

$$Q_{rkp} = C(4 s \frac{h_r}{d} + p) \quad (9)$$

因为按规范， $s$ 和 $p$ 值与 $\frac{h_r}{d}$ 的比值有关，见表1<sup>[1]</sup>。

表 1 嵌岩桩嵌岩段侧阻力修正系数  $s$  和端阻力修正系数  $p$

嵌岩深径比 $h_r/d$	0.0	0.5	1	2	3	4	5
侧阻修正系数 $s$	0.000	0.025	0.055	0.070	0.065	0.062	0.050
端阻修正系数 $p$	0.500	0.500	0.400	0.300	0.200	0.100	0.000

把表 1 中  $\frac{h_r}{d}$ 、 $s$ 和 $p$ 值代入(9)式中，则可得到嵌岩桩的嵌岩段总的极限承载力标准值  $Q_{rkp}$ ，如把表 1 中的第 1 列数据代入(9)式，可得：

$$Q_{skp} = C(4 s \frac{h_r}{d} + p) = C(4 \times 0.000 \times 0.0 + 0.500) = 0.50 C$$

其它计算结果见表 2。

表 2 嵌岩桩嵌岩段总的极限承载力标准值

嵌岩深径比 $h_r/d$	0.0	0.5	1	2	3	4	5
嵌岩段总极限侧阻力标准值 $Q_{rk}$	0.000	0.05 C	0.22 C	0.56 C	0.78 C	0.992 C	1.00 C
嵌岩段总极限端阻力标准值 $Q_{pk}$	0.50 C	0.50 C	0.40 C	0.30 C	0.20 C	0.10 C	0.000
嵌岩段总的极限承载力标准值 $Q_{rkp}$	0.50 C	0.55 C	0.62 C	0.86 C	0.98 C	1.092 C	1.00 C

从规范中的计算公式、表 1 和表 2 可以归纳出如下几点结论：嵌岩段的极限承载力由桩侧阻力和桩端阻力两部分组成；桩侧阻力的大小与岩石的单轴抗压强度呈正比；随着  $\frac{h_r}{d}$  的比值增大，侧阻修正系数  $s$  先递增后减小，而端阻修正系数  $p$  一直呈递减，直至零值；在桩的直径固定不变时，嵌岩段的侧阻力  $Q_{rk}$  先是随着嵌岩深度  $h_r$  的增大而增加，但到了一定深度时达到最大值，之后会随着深度增大反而减小；而端阻力  $Q_{pk}$  是随着嵌岩深度的  $h_r$  增大而减小。

### 2 嵌岩桩规范计算中存在的问题

桩的嵌岩段与岩体的接触方式有三种,第一种是两者紧密结合,即混凝土与岩石胶结在一起,形成一体;第二种是因施工桩孔时,岩石上的泥皮隔离作用,使得两者呈“活塞式”接触;第三种是介于前面两种之间的情况,部分隔离、部分紧密结合。按照接触方式来分析,规范中的计算公式和修正系数值等,及上面归纳的 4 点结论,笔者认为存在矛盾的地方和不合理之处。

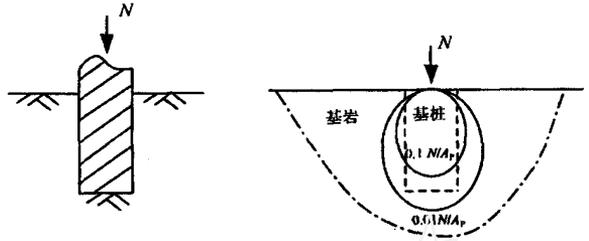


图 1 桩与岩石紧密接触受力分析

1) 嵌岩段承载力由两部分组成,这个不全面。从桩与岩石的接触方式来分析两者之间力的作用,它只适合第二种和第三种接触方式,对第一种接触方式就不适应;因为第一种接触方式的受力相当于竖向力  $N$  作用在半无限体上,没有侧阻力的概念,这种情况用弹性力学来求解,可得出基桩的极限承载力,而且产生的次生应力呈气泡状分布<sup>[2,3]</sup>,如图 1。

2) 桩侧阻力  $Q_{rk}$  的计算公式即(3)式中,采用岩石的单轴抗压强度  $f_{rc}$  不妥,如表 1,不仅与试验测试结果相差甚远,而且从物理意义上也无法解释。

表 1 嵌岩段侧阻力的试验结果与规范计算值对比\*

桩号	嵌岩段尺寸 (直径 × 长度) / mm	岩石单轴抗压 强度 / MPa	极限侧阻力 试验值 / MPa	规范计算值 / MPa	试验值与规范 计算值的比值 / %
M1	1 220 × 2 000	2.46	0.59	1.217	48.5
M2	1 300 × 2 000	2.30	0.64	1.185	54.0
M3	1 230 × 2 000	2.30	0.71	1.148	61.8
M4	1 350 × 2 000	2.34	0.61	1.250	48.8

\* 试验数据来自资料[4]。

按照桩与岩土接触方式分析,桩的侧阻力只有在第二种和第三种情况下存在,它是基桩四周与周围岩土体的接触,并有相对运动时所产生的一种摩阻力,如图 2。这种摩阻力会因为基桩混凝土与岩石或土的摩阻系数不同而存在差异。

因此,基桩嵌岩段总极限侧阻力应该为:

$$Q_{rk} = u h_r c \tag{10}$$

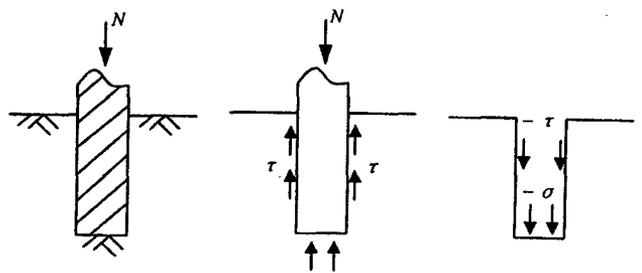
式中:  $c$  为基桩混凝土与基岩的摩阻力系数,单位为 kPa;其它符号同前。

如果基岩与基桩胶结同一整体,则可用基桩混凝土与基岩胶结后的剪断强度来代替摩阻系数。

将(3)式与(10)式相比较,可以得出,要使两者相等,则有:

$$c = f_{rc} \tag{11}$$

对(11)式从数量上能满足,但物理意义上就很难解释,因为岩石饱和单轴抗压强度与基桩混凝土与基岩的摩阻力系数及基桩混凝土与基岩胶结后的剪断强度之间没有内在联系。所以,用(10)式取代(3)式,就科学合理。



(a) 嵌岩桩的嵌岩段 (b) 桩的嵌岩段受力 (c) 岩体受力分析

图 2 嵌岩桩嵌岩段的受力分析

$N$  为基桩的竖向设计荷载;  $\tau$  为基桩与岩体之间的摩阻力;  $\sigma$  为基桩与岩体之间的正应力

3) 现在普遍认为嵌岩桩是侧阻力为主要,端阻力为次要,而且还有现场测试结果的证明<sup>[5,6]</sup>,也与前面第一点结论相同,即端阻力随着嵌岩深度的增加反而减小。对此笔者不敢苟同。因为无论桩与岩石呈哪种方式接触,力的传递总是呈顺序前进、逐渐衰减。从第一种方式的弹性力学解可以知道,离力

的作用点越远,附加的次生应力越小,即嵌岩越深,测定的桩端阻力越小。从图 2 可以知道第二种和第三种方式,当桩受到竖向力  $N$  时,桩体向下移动,则先是受到侧阻力的作用,然后再传递到桩的端部,产生端阻力;如果侧阻力很大,则端阻力就必然小,端阻力就很难发挥其作用。这也就是许多桩测试验得到的结果。但这并不是嵌岩桩真正的极限承载力。桩的极限承载力在理想状态下,应该是侧阻力和端阻力两者都达到最大时的和。

4) 从上面的分析可以知道,规范中的侧阻力修正系数和端阻力修正系数没有很科学的依据,两者数值随着的比值增大呈反向变化的趋势,更不合理。因为,现在试验证明南京地区嵌岩桩的最大嵌岩深度为 7 倍桩径,嵌岩段阻力占总阻力 50% 以上<sup>[7]</sup>。

5) 端阻力计算式(4)中采用岩石单轴抗压强度,也不合理。因为桩端处岩体在桩的竖向力作用下,是处于三向应力状态。而岩石强度与所处的应力状态有关,单轴强度 < 双轴强度 < 三轴强度。单轴强度与三轴强度存在下述关系<sup>[8]</sup>:

$$f'''_{rk} = f_{rk} + \frac{1 + \sin \alpha}{1 - \sin \alpha} \sigma_a \quad (12)$$

式中: $f'''_{rk}$ 为岩石三轴抗压强度; $\alpha$ 为岩石内摩擦角; $\sigma_a$ 为试验时施加的围压。

所以严格讲,端阻力计算式(4)中应该采用岩石三轴抗压强度比较科学合理。

### 3 结语

由于基岩与基桩的材质不相同,同时,由于施工的影响,像水下灌注等,使得基桩的四周和底部不可能与基岩会胶结成一个整体,总是会存在分界面,这些分界面,也就成为基桩与基岩之间的弱面(与岩体中节理等相似),破坏了两者的整体性。所以,笔者认为嵌岩桩的极限承载力按第二种和第三种情况考虑比较合理。同时,目前规范中有关嵌岩桩极限承载力的计算,应该是偏于保守,没有充分发挥桩端阻力,对工程而言属于浪费。嵌岩桩理论研究还有许多问题有待进一步探讨,一些模糊认识需要纠正<sup>[9]</sup>。由于基桩与基岩的相互作用比较复杂,嵌岩桩的极限承载力的计算还有需更深入的研究。

### 参考文献:

- [1] JG94-94,建筑桩基技术规范[S].
- [2] 徐芝纶.弹性力学简明教程[M].北京:高等教育出版社,1980.
- [3] 冯国栋.土力学[M].北京:水利电力出版社,1986.
- [4] 陈竹昌,盛俊.施工因素对嵌岩桩承载力的影响[J].建筑技术,2003,34(3):171-174.
- [5] 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.
- [6] 董金荣.嵌岩桩承载力性状分析[J].工程勘察,1995,3:13-18.
- [7] 刘玉松,季鹏,韦杰.大直径泥质软岩嵌岩灌注桩的荷载传递性状[J].岩土工程学报,1998,20(4):58-61.
- [8] 高磊.矿山岩石力学[M].北京:机械工业出版社,1987.
- [9] 刘兴远,郑颖人,林文修.关于嵌岩桩理论研究的几点认识[J].岩土工程学报,1998,(5):118-119.