

桥梁桩基设计中若干问题的探讨

刘宇晨

(广州市市政工程设计研究院, 广东广州 510060)

摘要:该文结合设计实践,参考相关规范及文献,针对现行公路桥梁地基与基础设计规范中关于桩基承载力设计计算的几个问题进行了初步探讨。

关键词:桥梁桩基;设计;桩基承载力计算;端承桩和摩擦桩

中图分类号:U443.15 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-7716(2006)03-0024-03

0 前言

我国交通事业的日益发展,为桥梁工程建设带来了良好的机遇。桥梁上部结构荷载通常较大,后期质量稳定、承载能力高的钻孔灌注桩往往成为绝大多数桥梁工程首选的基础形式。因此,其设计是否得当,对工程造价、质量、工期及使用影响很大。本文将针对设计过程中遇到的几个主要问题做初步探讨。

1 端承桩和摩擦桩的区分问题

通常认为,凡嵌岩桩必为端承桩,凡端承桩均不考虑土层侧阻力。实际上,大量现场结果表明:桩侧阻力、端阻力的发挥性状与上覆土层的性质和厚度、桩长径比、嵌入基岩性质和嵌岩深径比、桩底沉渣厚度等因素有关。

文献[1]认为,一般情况下,上覆土层的侧阻力是可以发挥的,而且随着长径比 l/d 的增大,侧阻力也相应增大;只有短粗的人工挖孔嵌岩桩,端阻力先于土层侧阻力发挥,端阻力对桩的承载力起主要作用,属端承桩。对 $l/d > 15 \sim 20$ 的泥浆护壁钻(冲)孔嵌岩桩,无论是嵌入风化岩还是完整基岩中,桩侧阻力均先于端阻力发挥,表现出明显的摩擦型。对于 $l/d \geq 40$,且覆盖土层不属于软弱土,嵌岩桩端的承载作用较小,此时桩基受力状态为摩擦桩,桩端嵌入强风化或中风化岩层中即可。在某些地区,泥质软岩嵌岩灌注桩 $l/d > 45$ 时,嵌岩段总阻力占总荷载比例小于20%; $l/d > 60$ 时,嵌岩段端阻力占总荷载比例小于5%。究其原因,一方面由于嵌岩桩桩身的弹性压缩,导致桩顶沉降,这个弹性压缩量引发了桩周土体的剪应力,也即是土对桩的侧阻力。另一方面,钻孔桩的孔底残留的沉渣,形成一个可压缩的软垫,致使桩底也会产生沉降,这一沉降和上述桩本身的压缩导致桩身与土体、嵌岩段桩身与岩体产生相对位移,从而产生侧阻力。而这种桩身弹性压缩和桩底沉降是随着长径比 l/d 的增大而增大的,因而导致摩擦力和侧阻力的增大。

同时,文献[1]中提及试验结果表明:传递到桩端的应力也随嵌岩深径比 h_r/d 增大而减小。一般地,当 $h_r/d > 5$ 时传递到桩端的应力接近于零;但对泥质软岩嵌岩桩, $h_r/d = 5 \sim 7$ 时,

桩端阻力仍可占总荷载的5%~16%。

因此,端承桩和摩擦桩的区分,不能单纯从是否嵌岩来区分,还要考虑上覆土层的性质和厚度、桩长径比、嵌入基岩性质、嵌岩深径比和桩底沉渣厚度等因素。如何正确区分桩基类型,对桩基设计计算和施工是十分重要的。

2 桩基承载力计算公式的理解问题

2.1 规范对嵌岩桩计算的规定

《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTJ 024-85)^[2]第4.3.4条规定:支承在基岩上或嵌入基岩内的钻(挖)桩,其单桩轴向受压容许承载力 $[P]$,可按下式计算:

$$[P] = (c_1 A + c_2 U h) R_s \quad (1)$$

式中: R_s ——天然湿度的岩石单轴极限抗压强度(kPa),试件直径为7~10cm,试件高度与试件直径相等

h ——桩嵌入基岩深度(m),不包括风化层

U ——桩嵌入基岩部分的横截面周长(m),按设计直径计算

A ——桩底截面积(m^2)

c_1, c_2 ——根据清孔情况、岩石破碎程度等因素确定的系数

公式(1)表明:嵌岩桩的单桩轴向受压容许承载力 $[P]$,仅取决于桩底处岩石的强度和嵌入基岩的深度,以及清孔情况、岩石破碎程度等因素。

2.2 对计算公式提出的问题

(1)公式(1)的使用范围

根据规范描述,通常认为只要是嵌岩桩,就是端承桩,就适用于公式(1)。实际上,只有在嵌岩桩在清孔绝对干净,桩底处于理想支撑,桩底岩石完整且强度很高时,桩的竖向位移很微小,桩基才表现为典型的端承桩,公式(1)的使用是无可争议的。实际工程中,只有当桩基长径比较小,土层侧阻力占比例不大时,桩基主要表现为端承桩的特征,公式(1)才可使用。

如前所述,实际工程中,当嵌岩桩的长径比越大,其荷载传递越具有摩擦型桩的特征。当长径比足够大时,桩基表现出摩擦型桩特征,此时桩基承载力不能用公式(1)来计算,这也是区分端承桩和摩擦桩的意义所在。根据《建筑桩基技术规范》(JGJ 94-94)^[3]给出嵌岩桩单桩极限承载力标准值计算模式为:由桩周土总侧阻 Q_{sk} 、嵌岩段总侧阻 Q_{rk} 和端阻 Q_{pk} 三部

收稿日期:2005-12-02

作者简介:刘宇晨(1977-),男,江西吉安,工学硕士,工程师,从事市政工程设计工作。

[4] 范立础.预应力混凝土连续梁[M].北京:人民交通出版社,1997.

[5] 项海帆.高等桥梁结构理论[M].北京:人民交通出版社,2001.

[6] 王文涛.刚构-连续组合连续梁桥[M].北京:人民交通出版社,1997.

[7] 谢亚宁,杨耀铨,雷丽萍.丹本高速公路T梁连续刚构通用图设计以及该桥型的理论分析[J].华东公路,2003(2).

[8] 宋随弟.预制-现浇连续梁桥的设计[J].中南公路工程,2002(3).

[9] 于学军,詹建辉,彭永利.简支转预应力结构连续T形梁桥设计计算[J].世界桥梁,2003(3).

[10] 方志,李艳,吴鹏扬.先简支后连续混凝土桥梁徐变影响的参数分析[J].桥梁建设,2003(4).

分组成。当室内试验结果确定单桩竖向极限承载力标准值时,可按下式计算:

$$Q_{uk}=Q_{sk}+Q_{pk}=U\sum \zeta_{si}q_{sk}l_i+U\sum \zeta_{pi}f_{ci}h_i+\zeta_{rp}f_{cp}A_p \quad (2)$$

也可简化为:

$$Q_{uk}=Q_{sk}+Q_{pk}=U\sum \zeta_{si}q_{sk}l_i+\zeta_{rp}f_{cp}A_p \quad (3)$$

式中: ζ_{si} ——覆盖层第 i 层土的侧阻力发挥系数;当桩的长径比不大 ($l/d < 30$), 桩端置于新鲜或微风化硬质岩中且桩端无沉渣时, 对于粘性土、粉土取 $\zeta_{si}=0.8$, 对于砂土及碎石类土取 $\zeta_{si}=0.7$; 对于其它情况取 $\zeta_{si}=1$

f_{ci} ——岩石饱和单轴抗压强度标准值, 对于粘土质岩取天然湿度单轴抗压强度标准值

h_i ——桩身嵌岩 (中等风化、微风化、新鲜基岩) 深度, 超过 5d 时取 $h_i=5d$; 当岩层表面倾斜时, 以坡下方的嵌岩深度为准

ζ_{si} 、 ζ_{pi} 、 ζ_{rp} ——嵌岩段侧阻力、端阻力和综合侧阻端阻力修正系数, 与嵌岩深径比 h_i/d 有关, 具体取值见规范相关条文

q_{sk} ——为桩侧第 i 层土的极限侧阻力标准值, 如无当地经验, 取值参考规范相关条文。

(2) 公式 (1) 中“ h ”的理解

公式 (1) 中对“ h ”的要求是“桩嵌入基岩的深度, 不包括风化层”, 通常的理解是桩必须嵌入新鲜基岩, 而不论其上面风化岩层的强度如何, 这个问题值得广大桥梁设计人员探讨。有的强风化硬质岩 (如花岗岩), 其极限强度往往大于极软岩新鲜岩的强度。说明一般硬质岩的微风化层、甚至强风化层的强度都相当高, 不考虑这些层次的嵌岩深度, 一律要求嵌入新鲜基岩是不妥的。按照这个原则, 在风化层很厚的情况下, 桩基嵌岩很深。在设计上, 必然导致计算承载力 $[P]$ 远小于实际极限承载能力 P_j ; 在施工上, 则会导致工程量的增大, 工期的延长。

工程试验证明^[9], 当岩面较平整, 桩的嵌岩深度 $h > 2d$ 时, 桩侧嵌固力约占总荷载 50% 以上。随着嵌固深度增加, 承载力也随之增大。但嵌固深度 $h > 3d$ 时, 承载力增长不大。公式 (1) 中没有对 h 规定限值, 也没有随 h 值增大而设定相关的折减系数。因此, 在桩基设计实践中, 当桩基承载力需要通过较大的嵌岩深度来提高时, 不妨考虑加大桩径。

3 桩基基底地质构造有夹层或溶洞区基岩的确定问题

桥梁工程桩基设计中, 经常会遇到两软弱岩层之间穿越强度很高的一定厚度的岩层 (夹层), 或者有些地区溶洞比较发育。如果这种夹层厚度不够承载厚度要求, 钻孔桩就需要穿越夹层, 以达到持力层; 这对施工机械和施工进度都是极大的考验。对于溶洞这种影响就更为明显。因此, 准确计算这种地质构造下的桩基承载力就显得至关重要了。

《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTJ 024-85)^[10]中未对桩底基岩厚度作出具体规定。参照《建筑地基基础设计规范》(GB 50007-2002)^[11]第 8.5.2 条及第 8.5.5 条规定: (1) 不考虑桩身周围覆盖土层侧阻力, 嵌岩灌注桩周边嵌入完整和较完整的未风化、微风化、中风化硬质岩体的最小深度, 按构造要求 0.5m; (2) 要求桩底以下 3 倍桩径范围内无软弱夹层、断裂带、洞隙分布; (3) 在桩端应力扩散范围内无岩体临空面。

对于一般夹层, 只要满足条件 (1) 和 (2) 即可作为持力层。对岩溶地区桩基, 由于岩体形状奇特多变, 岩溶洞隙的分布毫

无规律, 现有勘探手段难以事先查明它的准确位置及大小, 因而给施工带来意想不到的问题: 工期延长、工程费用增加, 而且, 由于岩溶规模无法掌握, 只能被动地加大工程以求稳妥处理。为使桩基设计经济合理, 要根据经验值和试算数值相结合的方法来确定嵌岩深度及桩端持力层厚度。基于计算所需的边界条件十分复杂, 而岩溶地比一般岩石地基影响因素更多, 过去有些文章要求桩端下有 4m、5m 或 5 倍桩径持力层厚度, 其内涵是不够明确的, 对于不同桩径, 不同的单桩承载力, 如果同样要求基桩端面以下有 5m 完整基岩, 显然两者的可靠度是不尽相同的。

下面介绍岩溶地两种试算方法:

(1) 根据前苏联建筑法规——桩基础 (CHN203-85) 提供方法:

$$[P]=\frac{U}{K_s}\left(\tau_p h_i+\psi_p R_c H\right)+\frac{1}{K_b} \psi_b R_c A \quad (4)$$

式中: K_s 、 K_b ——分别为桩侧阻力和桩端阻力的安全系数, 其中;

ψ_p 、 ψ_b ——分别为嵌岩段侧阻、端阻按单轴抗压强度计算的折减系数, 其中 $\psi_p=0.02 \sim 0.04$;

A ——桩端面积;

R_c ——岩石饱和单轴极限抗压强度;

U ——嵌岩段桩身周长;

H ——桩孔穿过多层溶洞的顶板厚度, 厚度小于 0.1m 则不计, $H=H_1+H_2+\dots$ 。

设基桩全由各嵌岩段侧阻支承, 略去复盖层侧阻, 则 (4) 式变换为:

$$[P]=\frac{U}{K_s} \psi_p R_c H=\frac{\pi}{K_s} d \psi_p R_c H \quad (5)$$

$$H=\frac{K_s[P]}{\pi \psi_p R_c d} \quad (6)$$

取 $R_c=4.37 \text{ MPa}$, $\psi_p=0.035$, $K_s=1.8$, 依 (5) 式并乘以安全系数 $K=1.5$, 计算广州某高速公路工程部份基桩, 并比较广州地区常用资料得表 1。

表 1 桩基承载力和嵌岩深度对照表一

桩径 (m)	设计单桩容许承载力 (t)	嵌岩深度 (m)	
	广州某高速公路工程 (1)	广州地区常见值 (2)	(1) (2)
1.0	186	350 ~ 500	1.05 1.97 ~ 2.81
1.2	370	600 ~ 750	2.25 2.81 ~ 3.52
1.5	600 ~ 1000	800 ~ 1000	2.25 ~ 3.75 3.00 ~ 3.75

表 1 可以看出: 嵌岩深度接近 3 倍桩径值时, 桩端下伏岩溶洞隙的影响很小。该高速公路岩溶地基有 6 个桩基础 36 根桩依此确定桩端嵌岩深度, 已经近 5a 通车检验无异常。此法适用于桩端下伏岩洞未知的情况。

(2) 如近似已知下伏溶洞大小, 则根据桩的冲切破坏近似求算。因基桩嵌岩侧阻的发挥和破坏特性表征: 其相对位移较小, 多呈脆性破坏。依此, 设冲切力

$$F=Q-\frac{\pi}{4}(d+2Htg\alpha)q \quad (7)$$

其中, q 为桩轴向力 Q 作用下, 深度 H 处溶洞顶的地基反力。当 $q=0$ 时, 该深度的岩石不再承担桩基反力。也就是说, 如果基岩厚度大于 $q=0$ 时对应的深度 H , 就表明该厚度的基岩足够作为持力层厚度。

当 $q=0$, 根据公式 (7), 得 $F=Q$ 。应用抗冲切力公式得:

$$KF \leq 0.75 R_c UH \tag{8}$$

式中： K ——抗冲切安全系数，取 $k=3$
 R_c ——石灰岩抗拉极限强度
设 $\alpha=45^\circ$ ，则 $U=\pi(d+H)$ ，代入公式(8)，即得

$$AH^2+BdH-3Q \geq 0 \tag{7}$$

其中， $A、B$ 为常数，若 d (桩径)及 Q 确定则 H 可解。依(9)式并取安全系数 $k_0=1.5, R_c=1.0\text{MPa}$ ，得 H 值如表 2。

表 2 桩基承载力和嵌岩深度对照

桩径(m)	设计单桩容许承载力(t)		抗冲切 系数 K	持力层最小厚度(m)	
	广州某高速 公路工程(1)	广州地区 常用值(2)		(1)	(2)
1.0	186	350~500	3	1.77	2.51~3.11
1.2	370	600~750	3	2.48	3.35~3.83
1.5	600~1000	800~1000	3	3.17~4.35	3.80~4.35

表 2 可以看出：桩端以下石灰岩层厚度视单桩承载力和岩石强度而不同，3 倍桩径厚度基本上可以满足持力层厚度要求。

4. 桩基的配筋问题

《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTJ 024-85)^[3]第 4.3.6 条规定：桩基应验算桩身强度、稳定性及裂缝宽度。验算方法可按照《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》有关章节进行。

桩基各截面的配筋，理论上讲，应根据桩基内力进行计算布置。桩基内力可采用“m”法或其他有可靠依据的方法计算。按“m”法计算桩基时，桩身弯矩的特点为：(1)弯矩分布规律近于一条自顶向下衰减的波形曲线，且衰减很快；(2)桩身最大弯矩发生在第一个非完整波形内，一般在地面(或最大冲刷线)以下约 3m 位置；(3)桩身弯矩在第一个弯矩零点以下很小，可以忽略不计，其下桩身主要起传递竖向力作用；(4)第一个弯矩零点位置在桩入土深度 $h=4/\alpha h$ 处。

目前，设计中通常有两种钢筋布置方式。第一种，通常是 根据最大弯矩处进行配筋，从桩顶一直伸到最大弯矩一半处 下一定锚固长位置，减少一半配筋再一直伸至弯矩为零下 一定锚固长位置，再下为素混凝土段，对于软基，桩主筋最好穿 过软土层。第二种，将基桩主筋一半部分一直伸到桩底。具体 采用哪种布置方式，各设计院都有自己的习惯。这两种钢筋布 置方式都有自己的优缺点。从桩体受力和节省工程费用以及 发生事故处理的难度来看，前一种更合理：(1)由于桩基较长 一段不设钢筋，比后者节省了部分钢筋；(2)底部断桩时，钢筋 笼拔出后，可原孔再钻，减少扁担桩发生机率。从施工难度讲， 采用第二种配筋方式合理：桩基灌注混凝土时，钢筋笼的定位 是十分重要的，钢筋布置到桩底，易于固定钢筋笼；对大多数 桩基础来说，因此而增加的钢筋量是有限的。

5 总结

总之，设计者在设计过程中，要善于结合工程实际分析问题、解 决问题。根据场区的地质状况以及桩基本身的各项指标，正确判断 嵌岩灌注桩的荷载传递和破坏机理、承载力特性。从而运用合理的 计算分析手段，准确地确定桩基承载力，以达到既经济又安全的设计 效果，并减少施工难度和施工工期。

参考文献

[1] 黄良正，史名录. 关于桥梁嵌岩桩设计的探讨[J]. 公路科技杂 志，2003，(1).
[2] JTJ 024-85，公路桥涵地基与基础设计规范[S]. 北京：人民交通 出版社，1998.
[3] JGJ 94-94，建筑桩基技术规范[S]. 北京：中国建筑工业出版社， 1996.
[4] GB 50007—2002，建筑地基基础设计规范[S]. 北京：中国建筑工 业出版社，2002.
[5] 黄求顺. 嵌岩桩承载力的试验研究[A]. 全国建筑桩基技术规范 专题报告[R]. 1990.
[6] 陈国兴，樊良本. 土质学与土力学[M]. 北京：中国水利水电出版 社，2001.

