

关于桥梁嵌岩桩设计的探讨

黄良振 史名录

(江西上饶宏优公路勘察设计院 上饶 334000)

摘要：本文针对现有桥梁规范中计算嵌岩桩的单桩轴向受压容许承载力的公式提出几个问题，同时参照文中提到的文献，结合本地地区的实际情况，建议了在不同条件下嵌岩桩单桩轴向受压容许承载力更合理的计算方法，并以实际工程实例论述了建议方法的经济效益。

关键词：桥梁工程；嵌岩桩；设计；单轴极限抗压强度；长径比

0 前言

随着我国工业技术和公路建设的日益发展，现代成桩工艺、桩体结构的检测技术与桩的承载力等方面也均有迅速的进步和提高，使桩与桩基础得到越来越广泛的应用；当桥梁上部结构荷载较大，而适合作为持力层的岩层又埋藏较深或虽然可作为持力层的土层埋藏不深但其下又存在软弱下卧层，用天然浅基础不能满足结构物对地基承载力、稳定性和沉降方面的要求时，嵌岩桩作为桩基础的一种形式往往是常用的一种基础。

但目前按现行桥梁规范对嵌岩桩垂直承载力的计算，却有很多值得探讨的地方，从文献(1)中的一些嵌岩桩的试桩实验中知道，嵌岩桩的实际垂直极限承载力 P_j 远远大于规范中的计算值。

1 规范对嵌岩桩计算的规定⁽²⁾

支承在基岩上或岩层中的单桩，其轴向受压容许承载力取决于桩底处岩石的强度和嵌入基岩的深度，可按下式计算：

$$[p] = (C_1A + C_2Uh) R_a \quad (1)$$

式中：

R_a ——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 ——桩底截面面积(m^2)；

C_1 、 C_2 ——根据清孔情况、岩石破碎程度等因素而定的系数，按表1采用；

表1 系数 C_1 、 C_2 值

条 件	C_1	C_2
良 好 的	0.6	0.05
一 般 的	0.5	0.04
较 差 的	0.4	0.03

注：①当 $h \leq 0.5m$ 时， C_1 采用表列数值的 0.75 倍， $C_2 = 0$ ；

②对于钻孔桩， C_1 、 C_2 值取表值的 0.8 倍。

2 对计算公式提出的问题

2.1 公式中未考虑覆盖土层的侧阻力

这对于埋置较深的桩基是不经济的。

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，公式(1)固然适用，但从最新的研究成果发现⁽¹⁾⁽³⁾，当桩的长径比 $L/d > 15 \sim 20$ 的泥浆护壁钻(挖)孔嵌岩桩时，无论是嵌入风化岩还是完整的基岩中，其荷载传递都具有摩擦型桩的特征，即桩侧阻力先于端阻力发挥出来，桩端分担的荷载并不大，属于摩擦型桩，在一般情况下，其桩侧阻力的荷载都超过60%；当长径比 $L/d > 35$ 时，在覆盖层不太软弱的情况下，其侧阻力分担的荷载将超过95%，端阻力分担的荷载不足5%，可以忽略不计。这是由于对于嵌岩桩，一方面，即使桩身不会下滑，但桩顶的弹性压缩变形是必然有的，即桩尖沉降 $\Delta_b = 0$ ，桩身有弹性压缩 Δ ，桩顶沉降 $\Delta_0 = \Delta$ (见图1a)，这个弹性压缩量 Δ 引发了桩周土体的剪应力 τ ，也即是土对桩的摩阻力。剪应力与剪切变形成正比，表层剪应力 τ ，底层剪应力 $\tau = 0$ ，呈三角形分布(见图1b)。当荷载 P 增大时， Δ 逐渐增大，表层剪应力为 τ 达到极限值 (τ)。此时荷载仍由桩侧摩阻力承担(见图1c)。如果荷载继续增大，则荷载增大

部分全部由桩尖岩体的支承力来承担，直至达到桩

尖土层的极限承载力 (P_h)，此时，桩侧摩擦阻力和桩尖承载力都到极限状态，(如图 1d)。

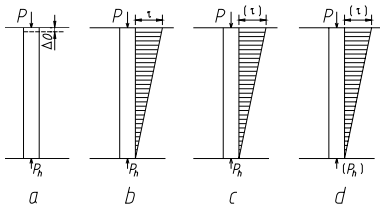


图 1

另一方面，有时钻孔桩的孔底总会残留一部分沉渣，这些沉渣将形成一个可压缩的软垫，至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，而端阻力由于“软垫”效应，不能完全发挥出来；此外，从桩土体系的荷载传递机理⁽⁴⁾，可以发现，桩身轴力 N_z 由于桩顶荷载在沿桩身向下传递的过程中，必须不断地克服桩侧阻力，从而使桩身轴力 N_z 随深度逐渐减小，传至桩底的轴力即桩底反力 N_b ，等于桩顶荷载减去全部桩侧摩擦力。以上几点表明，不考虑桩的长径比，忽视桩侧阻力的作用是不经济的。

2.2 公式 (1) 中“h”要求的理解

公式 (1) 中对“h”的要求是“桩嵌入基岩的深度，不包括风化层”，设计人员的一般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，这也是值得广大桥梁设计人员探讨的问题。

由文献 (2) 中对岩石按强度分类的规定 (表 2) 可知，岩石极限抗压强度可相差 6 倍以上，有的强风化硬质岩 (如花岗岩)，其极限强度仍可超过 10Mpa 而大于极软岩新鲜岩的强度。说明一般硬质岩的微弱风化层、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。在风化层很厚的情况下，嵌岩很深，必然导致工程量的增大、计算承载力 (p) 远小于实际极限承载能力 P_j 。

表 2 岩石的分类

类	别	单轴极限抗压强度 (Mpa)
硬	质 岩	>30
软	质 岩	5~30
极	软 岩	<5

2.3 对公式 (1) 中对“ R_a ”的理解

公式 (1) 中对岩石单轴极限抗压强度 R_a 的定义欠缺，设计人员一般采用钻孔试件的平均强度值，在岩石强度随深度而增加的情况下，会导致桩的

算承载能力偏低。

3 建议的计算方法

3.1 原则

3.1.1 以桩的长径比和桩尖岩石单轴极限强度来区别是否考虑上覆盖土层的侧阻力 (Q_{sk}) 及嵌岩段侧阻力 (Q_{rk}) 问题

凡桩尖岩石单轴极限抗压强度 $R_a^j \geq 10\text{Mpa}$ 时，当 $L/d \leq 20$ 时，不考虑上覆盖土层的侧阻力及嵌岩段阻力，按嵌岩桩计算；当 $L/d > 20$ 时，按嵌岩桩计算，不考虑上覆盖土层的侧阻力，但需考虑嵌岩段阻力；凡桩尖岩石单轴极限抗压强度 $R_a^j < 10\text{Mpa}$ 时，当 $L/d \leq 20$ 时，按嵌岩桩计算，不考虑上覆盖土层的侧阻力，但需考虑嵌岩段阻力；当 $L/d > 20$ 时，原则上桩按摩擦桩计算，即要考虑上覆盖土层的侧阻力，又要考虑嵌岩段阻力，同时还需考虑端阻力 (Q_{pk})。

3.1.2 嵌岩深度 h 可包含岩石单轴极限抗压强度 $\geq 10\text{Mpa}$ 的所有风化层，对于中小桥型，甚至包括强风化层。

3.1.3 实际应用时需注意的问题

对于特大跨径桥和重要大跨径桥的嵌岩桩，应避免将桩底设在强风化层上；对于存在冲刷作用的桥梁桩基，L (桩长) 指最大冲刷线以下的桩长；当桩的嵌岩深度达到 5d 时， Q_{rk} 可不考虑。

各种情况下的计算公式 (与一标书相关的工作免费介绍)

3.2.1 当 $R_a^j \geq 10\text{Mpa}$ ； $L/d \leq 20$ 时，按下式计算

$$(p) = C_1 A R_{a1} + C_2 U h R_{a2} \quad (2)$$

式中：

R_{a1} ——桩尖以下 3~4 倍直径深度内天然湿度基岩的单轴极限抗压强度平均值；

R_{a2} ——桩嵌岩部分天然湿度基岩单轴极限强度的按厚度加权平均值；

h——桩嵌岩部分天然湿度基岩单轴极限强度 $\geq 10\text{Mpa}$ 的深度。

其他符号同前。

3.2.2 当 $R_a^j \geq 10\text{Mpa}$ ； $L/d > 20$ 时，按下式计算

$$(p) = C_1 A R_{a1} + C_2 U h R_{a2} + Q_{rk} \quad (3)$$

$$Q_{rk} = 1/2 U L \tau_p$$

式中：

Q_{rk} ——嵌岩段总极限侧阻力。

τ_p ——风化岩极限摩阻力，按文献 (2) 表 4.3.2-1 中取值，风化岩层一般采用 160Kpa~400Kpa，偏安全的取小值。

L——桩嵌入风化层 (包括强风化、中等风化) 中的深度。



其他符号同前。

3.2.3 当 $R_a^j < 10\text{Mpa}$; $L/d \leq 20$ 时，按下式计算

$$(p) = (C_1 A + C_2 U h) R_a + Q_{rk} \quad (4)$$

符号同前。

3.2.4 当 $R_a^j < 10\text{Mpa}$; $L/d > 20$ 时，按下式计算

$$(p) = Q_{sk} + Q_{rk} + Q_{pk} \quad (5)$$

$$Q_{sk} = U \sum \zeta_{si} \tau_{ski} l_i$$

$$Q_{rk} = U \zeta_s h_r R_a$$

$$Q_{pk} = \zeta_p R_a A$$

式中：

Q_{sk} 、 Q_{rk} 、 Q_{pk} ——分别为土的总极限侧阻力、嵌岩段总极限侧阻力、总极限端阻力标准值；

ζ_{si} ——覆盖层第 i 层土的侧阻力发挥系数；当桩端置于新鲜或微风化硬质岩中且桩底无沉渣时，对于粘性土、粉土，取 $\zeta_{si} = 0.8$ ；对于砂类土及碎石类土，取 $\zeta_{si} = 0.7$ ；对于其他情况，取 $\zeta_{si} = 1.0$ ；

τ_{ski} ——桩周第 i 层土的极限侧阻力标准值 (Kpa)，按文献 (3) 表 5.2.8-1 中取值。

l_i ——桩穿越第 i 层土的厚度。

ζ_s ——嵌岩段侧阻力修正系数，与嵌岩深径比 h/d 有关，按表 3 取值

ζ_p ——端阻力修正系数，与嵌岩深径比 h/d 有关，按表 3 取值

h_r ——等于 h ，桩身嵌岩 (包括风化层) 的深度，超过 $5d$ 时，取 $h_r = 5d$ 。

表 3 嵌岩段侧阻和端阻修正系数

嵌岩深径比 h_r/d	0.0	0.5	1	2	3	4	≥ 5
侧阻力修正系数 ζ	0.000	0.025	0.055	0.070	0.065	0.062	0.050
端阻力修正系数 ζ	0.500	0.500	0.400	0.300	0.200	0.100	0.000

注：①当嵌岩段为中等风化岩时，表中数值按 0.9 倍折减。其他符号同前。

4 建议计算方法的经济效益

现以实际工作中的两个例子，分别用规范公式 (1) 和建议的公式的计算，通过比较，论证采用建议公式在实际生产中带来的经济效益。

4.1 工程实例一

南 (南昌) 峡 (峡岭) 线齐埠大桥，上部构造为 7-20 米预应力空心板桥，双柱双基式桥墩，桩径 $D=1.4$ 米，桩长 20m，桩底岩石极限抗压强度 $R_a=4.0\text{Mpa}$ 。单桩轴向受压承载力 $P=4271\text{KN}$ ，按嵌岩桩设计 (如图 2)，要求计算该桥桩的嵌岩深度及实

际所需桩长。

4.1.1 $R_a=4.0\text{Mpa} < 10\text{Mpa}$; $L/d=14.29 < 20$ ；采用公式 (4) 计算：

$$(P) = (C_1 A + C_2 U h) R_a + Q_{rk} \\ = (0.32 * 1.539 + 0.024 * 4.398h) \\ * 4000 + 0.5 * 4.398 * 3 * 300 \\ = 3949 + 422h$$

桩底最大垂直力为：

$$N_{max} = 4271 + 1/2 (17+h) \pi 0.7^2 * 25 = 4598 + 19h$$

$$\text{即： } 3949 + 422h = 4598 + 19h$$

$$h = 1.61 \text{ (米)}$$

取 $h=2.0\text{m}$ ，实际桩长为 19m。

4.1.2 按桥规公式 (1) 计算：

$$(P) = (C_1 A + C_2 U h) R_a \\ = (0.32 * 1.539 + 0.024 * 4.398 * h) * 4000 \\ = 1970 + 422h$$

$$\text{即： } 1970 + 422h = 4598 + 19h$$

$$h = 6.5 \text{ (米)}$$

取 $h=7\text{m}$ ，实际桩长为 24m。

4.2 工程实例二

二 (二度关) 上 (上饶) 线丁家洲大桥，上部构造为 6-40 米连续箱梁，双柱双基式桥墩，桩径 $D=2.0$ 米，其 3 号桥墩的地质资料如图 3 所示，桩最大的竖向力为 $P=14580\text{KN}$ 。

4.2.1 按桥规公式 (1) 计算：

按规范要求桩底应嵌入新鲜岩层，嵌岩深不小于 50cm，本桥采用 1.0 米。则桩的入土深度为：

$$L = 5 + 4 + 6 + 11 + 4 + 1 = 31.0\text{m}.$$

土内桩的自重为 2435KN。

$$(P) = (C_1 A + C_2 U h) R_a \\ = (0.5 * 3.142 + 0.04 * 2 * 3.142 * 1) * 62500 \\ = 113900\text{KN} >> (14580 + 1/2 * 2435) =$$

$$15797.5\text{KN}$$

4.2.2 按建议公式计算：因 $R_a^j \geq 10\text{Mpa}$; $L/d=17/2=8.5 < 20$ ，所以采用公式 (2) 计算。

由于是大桥，桩尖应设在弱风化层上，嵌深不得小于一倍桩径，本桥采用 2.0 米，桩的入土深度为：

$$L = 5 + 4 + 6 + 2 = 17\text{m}.$$

土内桩的自重 1335KN。

$$(P) = C_1 A R_{a1} + C_2 U h R_{a2} \\ = 0.5 * 3.142 * 25000 + 0.04 * 2 * 3.142 \\ (2 * 25000 + 6 * 12500)$$

$$= 70695\text{KN} >> (14580 + 1/2 * 1335)$$

$$= 15247.5\text{KN}$$

实标本桥 3 号墩的桩长采用了 17.0 米。