

软岩嵌岩桩荷载传递机理及其破坏特征

邢皓枫^{1,2}, 孟明辉^{1,2}, 罗 勇³, 叶观宝^{1,2}, 何文勇³

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;
3. 贵州省交通规划勘察设计研究院股份有限公司, 贵州 贵阳 550001)

摘 要: 通过对大量嵌岩桩现场试桩资料的统计分析得出, 试桩荷载下软岩嵌岩桩承载特性主要表现为端承摩擦桩, 亦具有摩擦端承桩或端承桩的特性; 嵌岩桩侧阻与端阻的发挥是异步的, 即侧阻先于端阻发挥, 建议将侧阻和端阻分别取不同的安全系数来设计单桩竖向承载力; 嵌岩桩的破坏特征表现为突然破坏, 破坏的原因有 2 种: ①桩体发生破坏; ②桩的嵌岩部分发生破坏, 发生破坏的位置有桩岩界面、桩周围岩; 现场试桩资料表明, 即使是软岩嵌岩桩其破坏形式亦有可能是桩体材料破坏, 因此, 嵌岩桩设计时, 尚应考虑桩身强度对其承载力的控制作用; 最后对现行各行业规范进行了分析, 指出一些仍需完善和探索的地方。

关键词: 嵌岩桩; 荷载传递机理; 破坏特征; 设计规范; 安全系数

中图分类号: TU473 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2011)S2-0355-07

作者简介: 邢皓枫(1969-), 男, 河南人, 博士, 副教授, 从事地基加固技术及基础工程教学与研究工作。E-mail: hfxing@tongji.edu.cn。

Load transfer mechanism and failure characteristics of piles embedded in soft rock

XING Hao-feng^{1,2}, MENG Ming-hui^{1,2}, LUO Yong³, YE Guan-bao^{1,2}, HE Wen-yong³

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Guizhou Transportation Planning Survey and Design Academe Co, Ltd, Guiyang 550001, China)

Abstract: Based on a large number of field pile loading tests, the bearing characteristics of rock-socketed piles are analyzed. The statistics show that the rock-socketed piles mainly present as end-bearing friction ones and also have the properties of frictional end-bearing piles or end bearing piles under test load. The exertion of shaft resistance and end resistance is asynchronous, that is, the shaft resistance exerts prior to the end resistance, so, it is necessary to take different safety factors respectively to design the vertical bearing capacity. The rock-socketed piles have characteristics of sudden failure for two reasons: pile damage and socket section damage, including the interface of rock and piles and the surrounding rock. Field pile test data show that, even embedded in soft rock, the failure mode is usually presented as pile damage, so the control action of pile strength should be considered while conducting the design of rock-socketed piles. Finally, the calculation formulas in the existing norms are analyzed, and some unreasonable points are pointed out.

Key words: rock-socketed pile; load transfer mechanism; failure characteristic; design code; safety factor

0 引 言

嵌岩桩具有单桩承载力高、群桩效应小、建(构)筑物沉降收敛快等特点, 已成为大型桥梁、高层建筑、重型厂房等建(构)筑物的主要基础型式。然而, 由于嵌岩桩具有承载力大、试验耗费高且很难进行破坏性试验等特点, 因而系统完整的静载荷试桩资料和实测数据并不多, 这制约了人们对其承载性状的全面认

识^[1-2]。尽管目前已出台了有关嵌岩桩的国家及相关行业标准, 但各行业规范的设计方法、参数取值、检测标准不一, 设计计算结果通常具有较大的差异, 从而使得设计人员往往有规不能依, 设计无所适从, 造成嵌岩桩设计不尽合理, 甚至出现一些重大失误, 因此, 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^[3]。

通过对现行各行业规范的对比分析可知, 各行规的异同归根结底在很大程度上仍然是对嵌岩桩荷载传递机理的认识具有偏差, 本文在对大量现场试桩资料进行统计分析的基础上, 对软岩嵌岩桩的荷载传递机理及破坏特征进行探究, 为其理论研究及承载力计算提供依据。

1 嵌岩桩荷载传递机理

1.1 嵌岩桩承载特性

20 世纪 90 年代以前, 中国普遍认为嵌岩桩是端承桩, 国家《建筑地基基础设计规范》^[4]规定嵌岩桩按端承桩设计。进入 90 年代, 中国在修订《建筑桩基技术规范》^[5] (下文简称《桩基规范》(94)) 时有所突破, 认识到桩侧阻力不可忽视, 提出了嵌岩桩承载力由桩侧土总阻力、嵌岩段总阻力和总桩端阻力 3 部分组成, 并给出了半经验公式。同期各研究机构及学者也针对嵌岩桩的荷载传递机理展开了广泛地现场试桩试验研究, 史佩栋等^[6]、董金荣等^[7]、刘松玉等^[8]、何开胜等^[9]、俞炯奇等^[10]通过对大量试桩资料的分析证实了嵌岩桩在试桩荷载作用下具有摩擦桩或端承摩擦桩的特征。

随着嵌岩桩工程经验的逐渐积累及理论研究的不断深入, 嵌岩桩的荷载传递机理也逐渐明了开来, 研究表明^[11], 嵌岩桩除了表现出摩擦桩或端承摩擦桩的特征外, 在特定情况下也具有端承桩的特性。本文通过对相关文献^[7-8,12-15]的 43 根试桩进行统计分析得出 (限于篇幅统计表未列出, 详见相关参考文献), 端阻分担比小于 20% 的桩数为 30 根, 占统计桩数的 69.8%; 端阻分担比处于 20.1%~30% 的桩数为 5 根, 占统计桩数的 11.6%; 端阻分担比处于 30.1%~50% 的桩数为 5 根, 占统计桩数的 11.6%; 端阻分担比处于大于 70% 的桩数为 3 根, 占统计桩数的 6.98%。因此, 试桩荷载下软岩嵌岩桩承载特性主要表现为端承摩擦桩, 也有少部分表现为摩擦端承桩或端承桩的特性, 且嵌岩桩的承载特性受长径比、嵌岩比、桩/岩模量比及施工工艺等因素影响。

进一步的实测资料表明, 嵌岩桩侧阻与端阻的发挥不是同步的, 而是异步的, 即侧阻先于端阻发挥, 土层侧摩阻先于岩层侧摩阻发挥, 在桩基竖向承载力达到极限值时, 各岩土层的极限侧摩阻力并未同时达到极限值。图 1, 2 为某电厂工程嵌岩灌注桩在竖向荷载作用下桩侧摩阻力及桩端阻力的分布规律^[16]。当桩

顶荷载较小时, 桩端阻力极小甚至几乎为零, 而此时嵌岩段岩层侧摩阻力也很小, 荷载主要由上部土层桩侧摩阻力承担, 当再加载时桩端阻力和嵌岩段侧摩阻力缓慢增加, 继续加载时, 二者几乎呈线性增加。从整个加载过程来看, 上覆土层的侧摩阻力的作用较明显, 桩侧土层的侧阻最先得发挥, 也最先达到极限值。从图 1 可以看出, 随着桩顶荷载的逐渐增加, 桩侧土摩阻力在达到峰值后出现减小或趋于稳定, 呈现加工软化型的特征, 说明其已达到极限值, 而嵌岩段侧摩阻力及端阻力随桩顶荷载的增大均有继续上升的趋势, 表明其侧摩阻力及端阻力均未达到最大值, 如果桩顶荷载继续增大, 嵌岩段的侧摩阻力及端阻力将继续增加。

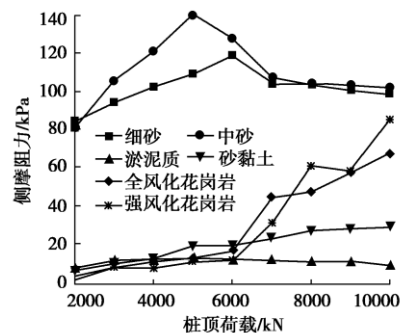


图 1 桩顶荷载与侧摩阻力关系曲线

Fig. 1 Shaft resistance versus pile head load

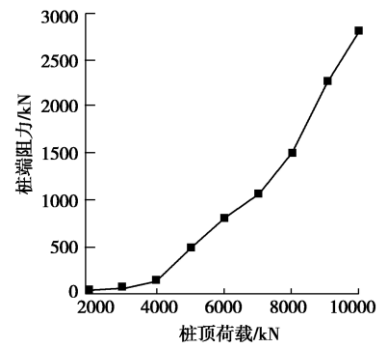


图 2 桩顶荷载与桩端阻力关系曲线

Fig. 2 Tip resistance versus pile head load

由上述分析可知, 嵌岩桩侧阻与端阻并非同时达到极值, 因此, 在进行嵌岩桩承载力计算时, 宜将桩侧和桩端阻力分别取不同的安全系数来设计单桩竖向承载力, 以《建筑桩基技术规范》^[17]为例, 这样可以反映工作状态下或设计荷载下桩侧摩阻和桩端阻的实际发挥效率的差别^[18],

$$R = \frac{Q_{sk}}{\gamma_s} + \frac{Q_{rk}}{\gamma_r} = \frac{u \sum q_{sik} l_i}{\gamma_s} + \frac{\zeta_r f_{rk} A_p}{\gamma_r} \quad (1)$$

式中 Q_{sk} , Q_{rk} 分别为土的总极限侧阻力、嵌岩段总极限阻力; q_{sik} 为桩周第 i 层土的极限侧阻力; f_{rk} 为

岩石饱和单轴抗压强度标准值, 黏土岩取天然湿度单轴抗压强度标准值; ζ_r 为嵌岩段侧阻和端阻综合系数, 与嵌岩深径比 h_r/d 、岩石软硬程度和成桩工艺有关; γ_s , γ_r 为安全系数。

从形式上看, 式 (1) 是通过极限侧阻值和极限端阻值各自除以一个安全系数而得到设计值 R , 但在理论上 Q_{rk} 不能理解为极限端阻值。嵌岩桩的端、侧阻极限值很难同时得到充分发挥, 在端、侧阻的共同作用下, Q_{uk} 与 Q_{sk} , Q_{rk} 之间的关系是复杂的, 它们并不同步出现。因此, 式 (1) 中的 Q_{rk} 应理解为 Q_{sk} 达到极限值时桩端阻的实际发挥值。研究表明^[19], 分项计算的安全系数不但更符合嵌岩桩承载力传递特性, 而且综合考察安全系数时比规范安全系数还要小。

1.2 基于荷载传递机理的嵌岩深度探讨

黄求顺^[20]在实验的基础上提出, $3D$ (D 为桩径) 为最佳嵌岩深度, $5D$ 为最大嵌岩深度, 并且该观点已在《桩基规范》(94) 中体现出来, 如规范表规定 $h_r/d \geq 5$ 时, ζ_r 取为 0。显然, 这条规定直接限定了嵌岩深度, 有违嵌岩桩荷载传递机理, 也曾引起了中国学者在研究嵌岩深度方面的分歧: 明可前^[21]通过实验认为, $4D$ 为最佳嵌岩深度; 而刘松玉等^[8]认为泥质软岩中的嵌岩桩的最大嵌入深度为 $7D$; 刘树亚等^[1]对“两个深度”进行分析提出, 国家规范应明确嵌岩桩的定义, 继而打破 $5D$ 的框框; 刘金砺等^[22]也认为《桩基规范》(94) 这种直接限定嵌岩深度的做法是不合理的。2008 年修订的《桩基规范》(08) 将软、硬岩区分考虑, 从而使得嵌岩桩设计更加细化, 但对于嵌岩深度的确定并没有实质性进展, 且现行各行业规范都规定只有嵌入中风化或微风化岩石才是嵌岩桩, 这显然增加了发育有较厚风化层基岩的嵌岩深度。

从嵌岩桩的荷载传递机理上看, 嵌岩深度不管是 $4D$, $5D$ 或是 $7D$, 其端阻力都已只占桩顶荷载的极少部分, 甚至接近或等于零, 其承载特性表现为典型的摩擦桩, 显然其端阻力被白白浪费掉了, 这对于嵌岩桩设计来说是不合理的, 且实测资料显示^[23], 在软岩地区即使嵌岩深度为 $10D$, 端阻仍然有发挥, 因此, 软岩地基不存在最大嵌岩深度, 但存在一个最佳嵌岩深度, 即, 使桩侧摩阻力及桩端阻力发挥最为协调的深度, 且该值不是一定值, 尚需具体工程具体分析, 实际工程应用中宜从承载力发挥、经济和施工角度综合分析确定。

2 嵌岩桩破坏特征

2.1 软岩嵌岩桩破坏类型及特征

由于嵌岩桩具有承载力大、试验耗费高等原因,

工程应用中通常不进行工程桩的破坏性试验, 因此, 对于嵌岩桩破坏特性的研究多采用模型试验。试验表明^[24-26], 模型嵌岩桩的破坏表现为突然破坏, 破坏的原因有两种: ①桩体发生破坏; ②桩的嵌岩部分发生破坏, 嵌岩桩的破坏模式与桩-岩石相对强度有关, 发生破坏的位置有桩岩界面、桩周围岩等。

通过对现场实测试桩资料统计分析表明^[27], 嵌岩桩的破坏类型主要有: ①低荷载大变形破坏型; ②中荷载大变形渐进式破坏型, 即刺入破坏; ③高荷载 ($> 8000 \text{ kN}$) 小变形 ($< 40 \text{ mm}$) 突然破坏型。前两种破坏均为施工原因引起, 在施工质量有保证的前提下, 嵌岩桩破坏主要表现为第三种类型。图 3 是某电厂二期主厂房人工挖孔灌注桩现场试桩 $Q-s$ 曲线^[28], 桩底进入中风化粉砂岩 2.0 m , 桩径 1.0 m , 桩身强度 C20, 其破坏特征: ①桩在破坏之前, 在各级荷载作用下, 桩的沉降较为正常, 变形较小, SZ_2 破坏时桩顶沉降小于 20 mm , SZ_3 破坏时桩顶沉降为 30 mm , 均达到了设计要求的加载值, 标志桩周摩擦力和嵌固力得到了发挥; ②桩在破坏前一级荷载作用下, 桩的沉降都能达到稳定标准, $Q-s$ 曲线也没有表现出明显的破坏前兆, 但在向下一级荷载过渡或在下一级荷载稳压过程中发生突然破坏, 表现为桩呈现出脆性破坏的特点; ③桩在破坏之后, 承载能力迅速降低, 下沉量继续增大, 卸载后, 桩基本没有回弹。

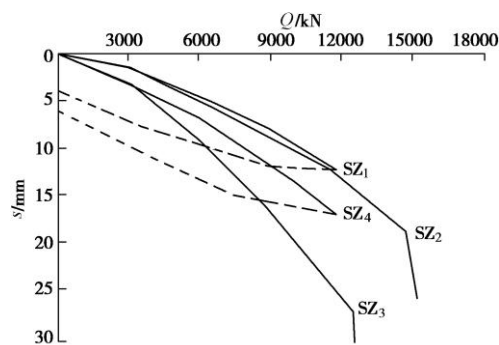


图 3 实测嵌岩桩 $Q-s$ 破坏曲线

Fig. 3 Measured $Q-s$ failure curves

由现场试桩资料可知^[29], 即使是软岩嵌岩桩其破坏形式亦有可能是桩体材料破坏, 且破坏带有突发性的特征。因此, 在进行嵌岩桩承载力设计时尚应考虑桩体材料强度对承载力的控制作用。

2.2 典型的软岩嵌岩桩 $Q-s$ 曲线

通过对软岩嵌岩桩荷载传递机理及破坏特征的分析, 可得出其典型的 $Q-s$ 曲线如图 4 所示, 一般可表述为 4 个阶段^[30]: ① OA 段, 曲线的初始直线段, 此时桩侧土 (岩) 及桩端岩层均处于弹性阶段, 荷载与沉降成正比; ② AB 段, 桩侧土 (岩) 自桩顶往下逐渐

出现塑性变形, $Q-s$ 为曲线, 但桩端岩层仍处于弹性阶段; ③ BC 段, 此时桩侧土(岩)完全屈服, 桩侧阻几乎维持不变, 但桩端岩层仍处于弹性阶段, 故 $Q-s$ 恢复线性关系; ④ CD 段, 桩侧土(岩)及桩端岩层均已屈服破坏, 此时即使不增加荷载, 沉降也将大幅增加, 故 $Q-s$ 几乎为一铅垂线, C 点所对应的荷载为极限荷载。通常情况 CD 段对应于桩身材料破坏, 因此, 嵌岩桩设计时, 应全面考虑桩体强度与岩土层对桩体的支撑强度, 使承载力设计最优化。

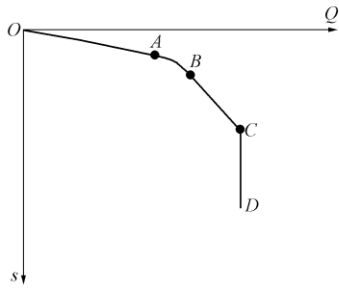


图4 典型嵌岩桩 $Q-s$ 曲线

Fig. 4 Typical $Q-s$ curve of rock-socketed piles

3 从嵌岩桩荷载传递机理看规范计算

3.1 现行有关嵌岩桩的行业规范

现行有关嵌岩桩的行业规范主要有:《港口工程嵌岩桩的设计与施工规程》^[31](下文简称《港口规程》)、《建筑地基基础设计规范》^[32](下文简称《地基规范》)、《铁路桥涵地基和基础设计规范》^[33](下文简称《铁路规范》)、《公路桥涵地基与基础设计规范》^[34](下文简称《公路规范》)、《建筑桩基技术规范》^[17](下文简称《桩基规范》)。

(1)《港口规程》

对于无静荷载抗压试验资料的工程, 其单桩轴向抗压承载力设计值为

$$Q_{cd} = \frac{\mu_1 \sum \xi_{fi} q_{fi} l_i}{\gamma_{cs}} + \frac{\mu_2 \xi_s f_{rk} h_r + \xi_p f_{rc} A}{\gamma_{cr}} \quad (2)$$

式中, μ_1 为覆盖层桩身周长 (m), μ_2 为嵌岩段桩身周长 (m), ξ_{fi} 为桩周第 i 层土的侧阻力计算系数, q_{fi} 为桩周第 i 层土的极限侧阻力标准值 (kPa), l_i 为桩穿过第 i 层土的厚度 (m), f_{rk} 为岩石饱和单轴抗压强度标准值 (kPa), A 为嵌岩段桩端面积 (m²), h_r 为桩身嵌入基岩的深度 (m), γ_{cs} 为覆盖层单桩轴向受压承载力分项系数, γ_{cr} 为嵌岩段单桩轴向受压承载力系数, ξ_s , ξ_p 分别为嵌岩段侧阻力和端阻力计算系数。

(2)《地基规范》

桩端嵌入完整及较完整的硬质岩中, 当桩长较短

且入岩较浅时, 单桩竖向承载力特征值为

$$R_a = q_{pa} A_p \quad (3)$$

式中, q_{pa} 为桩端岩石承载力特征值, A_p 为桩底端横截面面积。

(3)《铁路规范》

支承于岩石层上与嵌入岩石层内的钻(挖)孔灌注桩及管桩的容许承载力:

$$[P] = R(C_1 A + C_2 U h) \quad (4)$$

式中, $[P]$ 为桩及管桩的容许承载力 (kN), U 为嵌入岩石层内的桩及管桩的钻孔周长 (m), h 为自新鲜岩石面(平均高程)算起的嵌入深度 (m), C_1 , C_2 为系数, 根据岩石层破碎程度和清底情况决定。

(4)《公路规范》

支承在基岩上或嵌入基岩内的钻(挖)孔桩、沉桩的单桩轴向受压承载力容许值为

$$[R_a] = c_1 A_p f_{rk} + u \sum_{i=1}^m c_{2i} h_i f_{rki} + \frac{1}{2} \zeta_s u \sum_{i=1}^n l_i q_{ik} \quad (5)$$

式中, c_1 为根据清孔情况、岩石破碎程度等因素而定的端阻发挥系数, A_p 为桩端截面面积 (m²), f_{rk} 为桩端岩石饱和单轴抗压强度标准值 (kPa), c_{2i} 为根据清孔情况、岩石破碎程度等因素而定的第 i 层岩层的侧阻发挥系数, u 为各土层或岩层部分的桩身周长 (m), h_i 为桩嵌入各岩层部分的厚度 (m), 不包括强风化层和全风化层, m 为岩层的层数, 不包括强风化层和全风化层, ζ_s 为覆盖层土的侧阻力发挥系数, l_i 为各土层的厚度 (m), q_{ik} 为桩侧第 i 层土的侧阻力标准值 (kPa), n 为土层的层数, 强风化和全风化岩层按土层考虑。

(5)《桩基规范》

桩端置于完整、较完整基岩的嵌岩桩单桩竖向极限承载力, 由桩周土总极限侧阻力和嵌岩段总极限侧阻力组成。当根据岩石单轴抗压强度确定单桩竖向极限承载力标准值时, 可按下列公式计算:

$$Q_{uk} = Q_{sk} + Q_{rk} = u \sum q_{sik} l_i + \zeta_r f_{rk} A_p \quad (6)$$

式中, 符号含义见式(1)。

3.2 各规范嵌岩桩计算依据荷载传递机理分析

分析上述各规范计算公式所依据的荷载传递机理可知:

(1)《港口规程》规定嵌岩桩极限承载力由桩侧土摩阻力、嵌岩段摩阻力及桩端阻力三部分组成, 同时引入了分项系数, 体现出嵌岩桩承载力设计时按端承摩擦桩或摩擦端承桩考虑, 但是其规定嵌岩深度 h_r 超过 $5D$ 时, 取 $5D$, 意味着嵌岩段的承载力不再随嵌岩的深度加深而加大, 而是保持不变, 但是目前关于有效嵌岩深度研究还未有明确的定论, 若取 $5D$ 显然不符合嵌岩桩荷载传递机理。

(2)《地基规范》规定嵌岩桩按端承桩进行设计, 不考虑桩侧土摩阻力的作用, 这是唯一一个现行的不考虑桩侧阻力的设计规范, 显然, 该式只有纯端承桩工况下才适用, 按该式不考虑侧阻的作用进行单桩承载力设计显然过于保守。

(3)《铁路规范》规定嵌岩桩极限承载力由嵌岩段摩阻力及桩端阻力二部分组成, 没有考虑桩侧土摩阻力的作用, 也没有考虑桩侧阻及端阻力与嵌岩深度或岩石参数间的关系, 意味着桩端阻力的发挥同深度无关, 而嵌岩段侧阻力却可随着深度增加而无限增加, 显然与嵌岩桩荷载传递机理不符。

(4)《公路规范》规定嵌岩桩极限承载力由桩侧土摩阻力、嵌岩段摩阻力及桩端阻力 3 部分组成, 类似于铁路规范也没有考虑桩侧阻及端阻力与嵌岩深度或岩石参数间的关系, 意味着桩端阻力的发挥同深度无关, 而嵌岩段侧阻力却可随着深度增加而无限增加, 显然也与嵌岩桩荷载传递机理不符。

(5)《桩基规范》规定嵌岩桩极限承载力由桩侧土摩阻力、嵌岩段摩阻力及桩端阻力三部分组成, 该式中引入了嵌岩段侧阻和端阻综合系数 ζ_r , 考虑了嵌岩径长比 h_r/d 、岩石软硬程度和成桩工艺等有关影响因素, 其承载力设计所依据的荷载传递机理为端承摩擦桩或摩擦端承桩, 但 ζ_r 随嵌岩深度比增大而增大, 且认为三部分阻力相互独立, 互不影响, 是以简单的线性叠加来确定单桩承载力, 这显然也与荷载传递机理不符。

因此, 现行各行业规范建议的嵌岩桩承载力计算公式尚存在一些不合理的地方, 且均未有关于大直径嵌岩桩的理论计算公式, 故嵌岩桩荷载传递机理的探索仍需进一步深入与完善, 以建立更加符合实际的计算公式, 指导工程应用。

4 结 论

(1) 通过对大量嵌岩桩现场试桩资料的分析得出, 试桩荷载下软岩嵌岩桩承载特性主要表现为端承摩擦桩, 亦具有摩擦端承桩或端承桩的特性。

(2) 嵌岩桩侧阻与端阻的发挥是异步的, 即侧阻先于端阻发挥, 建议将侧阻和桩端阻分别取不同的安全系数来设计单桩竖向承载力。

(3) 软岩地基不存在最大嵌岩深度, 但存在一个最佳嵌岩深度, 且该值不是一定值, 尚需具体工程具体分析, 实际工程应用中应从承载力发挥、经济和施工角度综合分析确定。

(4) 嵌岩桩的破坏特征表现为突然破坏, 破坏的原因有两种: ①桩体发生破坏; ②桩的嵌岩部分发生

破坏, 发生破坏的位置有桩岩界面、桩周围岩。

(5) 现场试桩资料表明, 即使是软岩嵌岩桩其破坏形式亦有可能是桩体材料破坏, 因此, 嵌岩桩设计时, 尚应考虑桩身强度对其承载力的控制作用。

(6) 在嵌岩桩荷载传递机理及破坏特征的基础上, 得出了典型的软岩嵌岩桩 $Q-s$ 曲线, 可为嵌岩桩承载特性研究提供参考。

(7) 依据嵌岩桩的荷载传递机理对现行有关嵌岩桩的行业规范进行了分析, 指出了其中一些不合理的地方。

(8) 本文主要对软岩嵌岩桩的承载特性进行分析, 对于硬质岩嵌岩桩承载特性由于相关研究文献相对较少, 有待进一步研究确定。

参考文献:

- [1] 刘树亚, 刘祖德. 嵌岩桩理论研究和设计中的几个问题[J]. 岩土力学, 1999, 20(4): 86 - 92. (LIU Shu-ya, LIU Zu-de. Some problems on the research and design of rock-socketed piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 1999, 20(4): 86 - 92. (in Chinese))
- [2] 张建新, 叶洪东, 杜海金, 等. 嵌岩桩设计中几个问题的探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7): 1222 - 1225. (ZHANG Jian-xin, YE Hong-dong, DU Hai-jin, et al. Some problems in design of rock-socketed pile[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(7): 1222 - 1225. (in Chinese))
- [3] 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. (LIU Xing-yuan, ZHENG Ying-ren, LIN Wen-xiu. Some cognition on the theoretical research of rock-socketed piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998(5): 118 - 119. (in Chinese))
- [4] GBJT—89 建筑地基基础设计规范[S]. 1989. (GBJT—89 Code for design of building foundation[S]. 1989. (in Chinese))
- [5] JGJ94—94 建筑桩基设计规范[S]. 1994. (JGJ94—94 Technical code for building pile foundations[S]. 1994. (in Chinese))
- [6] 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. (SHI Pei-dong, LIANG Jin-yu. Vertical Bearing Capacity of Rock-Socketed Piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16(4): 32 - 39. (in Chinese))
- [7] 董金荣. 嵌岩桩承载性状分析[J]. 工程勘察, 1995(3): 13 - 18. (DONG Jin-ron. The bearing behavior of rock-socket

- piles[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 1995(3): 13 - 18. (in Chinese))
- [8] 刘松玉, 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. (LIU Song-yu, JI Peng, WEI Jie. Load transfer behavior of large diameter cast-in-place pile embedded in soft rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, **20**(4): 58 - 61. (in Chinese))
- [9] 何开胜, 袁文明, 彭新宣. 大直径嵌岩桩与非嵌岩桩承载性状的比较研究[J]. 建筑结构, 1998(11): 9 - 11. (HE Kai-sheng, YUAN Wen-ming, PENG Xin-xuan. Comparative study on bearing capacities of socket and non-socket bored piles[J]. Building Structure, 1998(11): 9 - 11. (in Chinese))
- [10] 俞炯奇, 张土乔, 龚晓南. 钻孔嵌岩灌注桩承载特性浅析[J]. 工业建筑, 1999, **29**(8): 38 - 43. (YU Jiong-qi, ZHANG Tu-qiao, GONG Xiao-nan. The analysis on the characteristic of bearing capacity of rock-socketed cast-in-place piles[J]. Industrial Construction, 1999, **29**(8): 38 - 43. (in Chinese))
- [11] 蔡来炳. 高应变动力试桩法分析嵌岩桩的承载特性[J]. 工业建筑, 2002, **32**(10): 48 - 51. (CAI Lai-bing. Analysis of bearing capacity of rock-socketed piles by high strain dynamic testing[J]. Industrial Construction, 2002, **32**(10): 48 - 51. (in Chinese))
- [12] 张建新, 吴东云, 杜海金. 嵌岩桩承载性状和破坏模式的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(2): 320 - 323. (ZHANG Jian-xin, WU Dong-yun, DU Hai-jin. Testing study on bearing behaviours and failure mode of rock-socketed pile[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(2): 320 - 323. (in Chinese))
- [13] 王守忠. 大直径钻(冲)孔嵌岩灌注桩垂直承载性能的试验研究[J]. 建筑结构, 1999(4): 58 - 61. (WANG Shou-zhong. Experimental investigation on vertical bearing capacity behavior of large diameter rock socketed bored cast-in-situ piles[J]. Building Structure, 1999(4): 58 - 61. (in Chinese))
- [14] 张忠苗. 软土地基超长嵌岩桩的受力性状[J]. 岩土工程学报, 2001, **23**(5): 552 - 556. (ZHANG Zhong-miao. The endurance of super-long piles in soft soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, **23**(5): 552 - 556. (in Chinese))
- [15] 丁翠红, 陈云敏, 钱世楷, 等. 大直径嵌岩桩理论在南京新华大厦工程中的应用[J]. 建筑技术, 2002, **33**(3): 179 - 180. (DING Cui-hong, CHEN Yun-min, QIAN Shi-kai, et al. The application of the theory of rock-socketed pile in Xinhua tower in Nanjing[J]. Architecture Technology, 2002, **33**(3): 179 - 180. (in Chinese))
- [16] 黄志全, 马 莎, 王安明, 等. 嵌岩灌注桩桩基静载试验[J]. 铁道建筑, 2005(9): 88 - 90. (HUANG Zhi-quan, MA Sha, WANG An-ming, et al. Static loading test of rock-socketed cast-in-place piles[J]. Railway Engineering, 2005(9): 88 - 90. (in Chinese))
- [17] JGJ94—2008 建筑桩基技术规范[S]. 2008. (JGJ94—2008 Technical code for building pile foundations[S]. 2008. (in Chinese))
- [18] 董 平, 秦 然, 陈 乾, 等. 大直径人工挖孔嵌岩桩的承载性状[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, **22**(12): 2099 - 2103. (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 - 2103. (in Chinese))
- [19] 谢耀峰. 对钻孔嵌岩灌注桩承载力进行分项综合计算的研究[J]. 大坝观测与土工测试, 1996, **20**(4): 27 - 29. (XIE Yao-feng. Calculation method of comprehensiveness for bearing capacity of bored piles[J]. Dam Observation and Geotechnical Tests, 1996, **20**(4): 27 - 29. (in Chinese))
- [20] 黄求顺. 嵌岩桩承载力的研究[C]// 中国建筑学会地基基础学术委员会论文集. 太原, 1992: 47 - 52. (HUANG Qiu-shu. Bearing capacity of rock-socketed piles[C]// Subgrade & Foundation academic committee symposium of Architectural Society of China. Taiyuan, 1992: 47 - 52. (in Chinese))
- [21] 明可前. 嵌岩桩的受力机理分析[J]. 岩土力学, 1998, **19**(1): 65 - 69. (MING Ke-qian. Analysis of bearing mechanism of socketed pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 1998, **19**(1): 65 - 69. (in Chinese))
- [22] 刘金砺. 桩基研究与应用若干进展浅析[J]. 施工技术, 2000, **29**(9): 2 - 4. (LIU Jin-li. Simple explanation on the advances of research and application of pile foundation[J]. Construction Technology, 2000, **29**(9): 2 - 4. (in Chinese))
- [23] 宋仁乾, 张忠苗. 软土地基中嵌岩桩嵌岩深度的研究[J]. 岩土力学, 2003, **24**(6): 1053 - 1056. (SONG Ren-qian, ZHANG Zhong-miao. Study on socket length of rock-socketed piles in soft soil ground[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, **24**(6): 1053 - 1056. (in Chinese))
- [24] 雍景荣. 无覆盖层嵌岩小桩的试验研究[J]. 岩土工程学报, 1989, **11**(5): 40 - 50. (YONG Jing-rong. Test and research on socketed small pile without overburden[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1989, **11**(5): 40 - 50. (in Chinese))

- [25] 王耀辉, 谭国焕, 李启光. 模型嵌岩桩试验及数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(8): 1691 - 1697. (WANG Yao-hui, THAM L G, LEE P K K. Test and numerical analysis of model rock-socketed pile[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(8): 1691 - 1697. (in Chinese))
- [26] 熊智彪, 王启云, 谷淡平. 红砂岩嵌岩桩模型试验研究[J]. 建筑结构, 2010, **40**(4): 92 - 95. (XIONG Zhi-biao, WANG Qi-yun, GU Dan-ping. Model test study on resistance of rock-socketed piles in red-sandstone rock[J]. Building Structure, 2010, **40**(4): 92 - 95. (in Chinese))
- [27] 吕福庆, 吴文, 姬晓辉. 嵌岩桩静载试验结果的研究与讨论[J]. 岩土力学, 1996, **17**(1): 84 - 96. (LU Fu-qing, WU Wen, JI Xiao-hui. Research and discussion on the axial static load testing results of rock-socketed bored pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 1996, **17**(1): 84 - 96. (in Chinese))
- [28] 彭界隆, 谢嵘. 嵌岩桩竖向抗压静载试验荷载的确定[J]. 电力建设, 2001, **22**(8): 30 - 32. (PENG Jie-long, XIE Rong. Determining test load of vertical dead load compression test for mosaic pile[J]. Electric Power Construction, 2001, **22**(8): 30 - 32. (in Chinese))
- [29] 吴兴序, 庄卫林, 吉随旺, 等. 昔格达软岩中灌注桩单桩竖向承载力试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2006, **41**(6): 669 - 674. (WU Xing-xu, ZHUANG Wei-lin, JI Sui-wang, et al. Field experimental research on bearing capacity of cast-in-situ piles in xigeda-rock[J]. Journal of Southwest Jiao Tong University, 2006, **41**(6): 669 - 674. (in Chinese))
- [30] 刘建刚, 王建平. 嵌岩桩的嵌固效应及载荷试验 P~s 曲线特征分析[J]. 工业建筑, 1995, **25**(5): 41 - 44. (LIU Jian-gang, WANG Jian-ping. Analysis for embedding effect of rock-socketed pile and P~s curve features of loading test[J]. Industrial Construction, 1995, **25**(5): 41 - 44. (in Chinese))
- [31] JTJ285—2000 港口工程嵌岩桩的设计与施工规程[S]. 2000. (JTJ285 — 2000 Design and construction code of rock-socketed piles for harbour engineering[S]. 2000. (in Chinese))
- [32] GB50007—2002 建筑地基基础设计规范[S]. 2002. (GB50007—2002 Code for design of building foundation[S]. 2002. (in Chinese))
- [33] TB10002.5—2005 铁路桥涵地基和基础设计规范[S]. 2005. (TB10002.5 — 2005 Code for design on subsoil and foundation of railway bridge and culvert[S]. 2005. (in Chinese))
- [34] JTJ D63—2007 公路桥涵地基与基础设计规范[S]. 2007. (JTJ D63—2007 Design code for roadbed and bridge of highway[S]. 2007. (in Chinese))

(本文责编 胡海霞)