

嵌岩桩承载性状的探讨

廖辉煌

奥意建筑工程设计有限公司 广东 深圳 518003

摘要：嵌岩桩作为一种具有高承载力、低沉降、抗震性好、群桩效应弱等优势的特殊桩型，被广泛应用于各种大型工程。嵌岩桩的设计合理性直接影响着工程项目的造价与结构安全，而设计的合理性又取决于对嵌岩桩承载性状的准确理解。本文结合国内外相关资料及学者的研究成果对影响嵌岩桩承载性状的各种因素如嵌岩深度，桩底沉渣，桩周泥皮，桩端岩石抗压强度的取值等因素进行了归纳总结并进行分析，可供结构设计师在嵌岩桩设计时参考。

关键词：嵌岩桩；承载性状；桩侧阻力；桩端阻力

引言

嵌岩桩作为桩的一种，其桩端被嵌入到中风化或者微风化岩石中，其独特的优势在于：桩的承载力强，沉降极低，而且可以迅速达到稳定的状态，同时还拥有良好的抗震性，使其成为桥梁、超高层建筑、重型厂房等大规模工程的理想选择。本文主要讨论嵌岩桩承载性状以及影响其承载力的主要因素。

1 研究现状

嵌岩桩的承载能力强，但是由于试验成本高昂，很难进行破坏性试验，所以，目前完整的试桩数据和实测数据非常少，这限制了人们对它的承载能力的全面了解。此外，由于土壤特性、岩石层的受力特征、承载机制等诸多问题，目前还没有合理的解释和定论。因此对于嵌岩桩的受力机制仍然缺乏重大突破。

就国内而言，20世纪90年代以前，人们普遍认为嵌岩桩是端承桩，国家《建筑地基基础设计规范》(GBJ7-89)规定嵌岩桩按端承桩设计，进入90年代，我国在修订《建筑桩基设计规范》(JGJ94-94)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，但该公式只笼统考虑了桩周、桩端岩石的强度和嵌入深度，而对影响其承载力的岩石结构特征、桩端条件、桩的尺寸及桩岩界面的粗糙度等都没有进行考虑。实际上，正是由于这些因素的影响，使得嵌岩桩的承载性状变得差异很大，因此，只有弄清了嵌岩桩承载机理和工作特性后，才能使其设计尽可能的合理。

2 主要因素

2.1 嵌岩深度

嵌岩桩的承载能力受到多种因素的影响；首先桩入岩的深度它会改变桩侧阻力的分布情况，并导致桩的损坏。尽管不同的规范对嵌岩桩的入岩深度要求有所不

同，但总的来说，嵌岩深度对桩的承载能力有着重要的影响。根据大量数据，随着嵌入岩石的深度增加，桩体侧面的阻力也会相应增加，而桩端的承载力会逐渐降低。当达到一定的嵌入深度时，桩体侧面的阻力将会被用来承受上部的荷载，而桩端的承载力则会降至零。相关的实测资料表明，嵌岩段桩侧阻力的特性如下：

嵌岩段的桩侧摩阻力在入岩段是呈非均匀分布的；当桩端刚好置于岩石顶面时其承载能力只发挥50%；当入岩深度达3倍桩径时，桩嵌岩段发挥其90%的承载力，一般认为这是桩的最佳嵌岩深度；当桩的入岩深度达到5倍桩径后，其承载力增长幅度非常微小。

1) 嵌岩段侧摩阻力的最大值与桩端岩石在天然状态下的单轴抗压强度呈现很好的线性关系。

2) 桩在嵌岩段的侧摩阻力的发挥需要的相对位移较土中来说非常小，且在完整岩石中的破坏一般呈现脆性破坏的特征。

3) 当中风化或微风化软岩的强度较弱时，使得它们无法与桩形成一个完整的结构，因此，嵌入其中的桩侧摩阻力的螺旋线分布特征不太明显，甚至有时会出现桩土摩擦力的特征。

对于嵌岩桩的最佳嵌入深度，学术界的观点存在分歧，尤其是在国内，关于嵌岩桩的嵌入深度的研究存在着多种不同的观点和看法。黄求顺等人根据其在重庆地区的经验及实践，建议将嵌岩桩的入岩深度设置在3倍，最大不超过5倍。明可前则通过试验认为最佳嵌岩深度为4倍桩径。东南大学的刘松玉根据其所做嵌岩桩试验所得结果，认为在南京地区的泥岩等软岩地层中，桩的最佳嵌入深度为7倍桩径，而且嵌岩段的侧向摩阻力可达到50%桩承载力或更高。

在进行实际设计时，对于桩的嵌岩深度可以参考《公路桥涵地基与基础设计规范》，如下表1所示：

表1 嵌岩桩嵌岩深度推荐值

岩石坚硬程度类别	嵌岩深度范围推荐值
极软岩	钻孔桩6~9d 挖孔桩3~5d
软岩	4~5d
较软岩	3~4d
较硬岩	2~3d

2.2 桩底沉渣

桩端沉渣对嵌岩桩承载力的影响十分显著，而这也是嵌岩桩施工过程的一个重要质量控制点。在采用泥浆护壁施工时，不可避免的在桩底会产生一部分沉渣。沉渣很少时在桩顶的竖向荷载下桩岩界面产生相对位移，对桩侧摩阻力的发挥起到有利作用。沉渣过厚则使桩端阻力难以发挥作用，因此桩底沉渣应控制在一定范围之内。现行建筑桩基规范对桩端沉渣的影响未引入计算公式中，而公路桥涵规范则通过清底系数把沉渣对桩承载力的影响定量的考虑进来，比较符合实际的工程情况。

2.3 孔壁粗糙度

桩孔壁的粗糙程度对桩侧阻力影响的研究，Pells最早给岩石孔壁粗糙度划分给出一套完整的分类标准。在此基础上，Armitage和Rowe建立了不同种类的岩石中桩孔壁粗糙程度对应的桩侧阻力的数据库。加拿大学者Horvath提出了用凹凸度因子RF来定量描述孔壁的粗糙度：

$$RF = \frac{\overline{\Delta r}}{r_s} \cdot \frac{L_t}{L_s}$$

式中：

$\overline{\Delta r}$ 一为凸出部分径向扩大尺寸的平均值(mm)；

r_s 一为孔壁半径的平均值(mm)；

L_s 一为钻孔的深度(mm)；

L_t 一为沿着钻孔深度方向剖面曲线的总长度(mm)；

其中是孔壁凹凸的相对深度，表示孔壁沿径向的变化情况；是孔壁沿深度方向的变化，表示了孔壁总的形状。

随后Horvath通过模型试验的对比，又进一步提出桩侧阻力与凹凸度因子的关系：

$$f_s = 0.8\sigma_{cw}[RF]^{0.45}$$

式中：

f_s 一为桩侧摩阻力 (kPa) ；

σ_{cw} 一为岩石强度 (kPa) 。

刘树亚在嵌岩桩的研究过程中借鉴了Armitage和Rowe的粗糙度分级表(如表2)，同时提出了桩岩界面侧阻力平均值的计算公式：

$$\tau = \lambda f_c^{0.5}$$

式中：

τ 一为界面极限侧阻力平均值(MPa)；

f_c 一为岩石的饱和单轴抗压强度(MPa)；

λ 一粗糙度影响系数，为0.2~0.6。对于R1~R2级的粗糙度界面， $\lambda = 0.45$ ，对于R4级界面可取 $\lambda = 0.6$ ，对于R3级可根据实际情况取值。

表2 粗糙度分级表

粗糙度级别	界面形状描述
R1	较垂直的光滑面，起伏度小于1mm
R2	沟槽深1~4mm，宽2mm，间距50~200mm
R3	沟槽深4~10mm，宽2mm，间距5~200mm
R4	沟槽深、宽10mm以上间距5~200mm

从我们现行规范的嵌岩桩承载力计算公式来看，并没有考虑孔壁粗糙度的情况，桩侧摩阻力只按照勘察单位提供的经验值进行计算，嵌岩桩的实际承载力值会与设计计算的值存在一定的误差，在没有进行试桩的工程中，可能会造成桩承载力的实际利用率偏低，增加工程的造价。研究表明，嵌岩桩侧摩阻力还与以下因素有关：

1) 孔壁愈粗糙，侧阻力发挥程度愈高；

2) 人工挖孔桩的侧摩阻力相比如钻孔桩或旋挖桩更大；

3) 桩孔壁的粗糙度以横纹为主时相比竖纹的侧摩阻力大；

3 影响嵌岩桩性状的其它因素

嵌岩桩的承载力是各种因素综合作用的结果，除了上述主要的因素，还包括以下因素：

3.1 泥皮影响

嵌岩桩成孔通过施加泥浆来保持孔洞的完整性，然而，由于混凝土的自身重量，孔洞的尺寸可能会变宽，从而导致孔洞的水平压力有所减弱。当这种压力持续作用下去，混凝土就会发生凝结和收缩，从而将粘结在孔洞上的泥浆和孔洞结合起来，形成泥皮。由于泥土的出现，嵌岩桩和桩周岩石之间的黏着力急剧下降，这极大地削弱了桩侧摩擦力的作用。尤其是，当泥土的厚度增加到一定程度后，桩土剪切破坏面就会出现在泥土和土壤的交界处，而由于泥土的剪切力很弱，侧面阻力的损耗也会变得非常严重，某具体工程实测桩周泥皮厚度与单个桩的承载能力之间关系如下表3所示，可见泥皮厚度对单桩承载力的影响也是相当明显，超过一定数值后，桩承载力急剧下降。目前为了降低泥皮的影响，可采用缩短钻孔的周期，选择合适的冲洗介质，采用小水泵冲洗，桩侧后注浆等。

表3 孔周泥皮厚度与单桩承载力

桩号	1	2	3	4
泥皮厚度/mm	4~6	12~15	5~7	1~2
单桩承载力/kN	4240	1000	4500	6800

3.2 成孔时间

灌注桩为非挤土桩，桩成孔会引起桩周地基中岩土应力释放，引起孔壁向孔内变形。成孔时间越长，则应力释放越充分，孔壁和孔底岩石风化越严重。这些均会引起侧摩阻力和桩端岩石承载力的下降。

3.3 上覆土的性质

随着长径比 L/d 的增加，嵌岩桩上覆土层的侧摩阻力占总极限承载力的比例通常会超过70%，有时甚至会超过80%或更多。当上覆土为强风化或全风化岩等桩周极限侧摩阻力大的土层时，其提供的桩承载力不可忽略。在实际工程中，部分工程师常常只计算嵌岩段的承载力，而直接忽略掉上覆土层的侧摩阻力，造成一定的浪费。

3.4 桩端，桩侧岩石的抗压强度

从建筑桩基规范关于嵌岩桩承载力的计算公式中可以看出，嵌岩段岩石的抗压强度对承载力起着决定性的作用。通常设计时采用详勘报告提供的岩石饱和单轴抗压强度，此为无侧压的试验结果，当采用现场深层平板载荷试验时其岩石抗压强度常常是实验室结果的几倍。在作者设计的重庆某项目上，嵌岩桩的承载力设计值即根据重庆当地专家的意见采用实际深层平板载荷试验得出的岩石抗压强度值，大大优化了桩基的工程量，产生了较大的经济价值。在实际操作时，需要勘察单位提供深层平板试验得出的岩石抗压强度与实验室得出的岩石抗压强度的对应关系，在进行钻孔桩施工时，单柱单桩均需要做超前钻，将超前钻的桩端岩芯进行实验室抗压试验，达到勘察单位提出的抗压强度值时方可进行下

一步的灌注工作，在桩基验收时均需要提供每个孔位的岩芯抗压报告，以此来控制实际的桩端岩石抗压强度值与设计取用的值一致。

3.5 施工工艺

冲(钻)孔桩通常采用泥浆护壁、机械成孔，泥浆的存在降低了桩与桩周土岩之间的粘结力，另一方面在桩端留下沉渣而形成“软垫层”，对桩端阻力的发挥造成了显著的影响。人工挖桩嵌岩桩，因其由人工操作、清孔干净，故桩与围岩无论在桩侧还是在桩底都胶结很好，相对其它施工方法其能提供更大的桩承载力。

结语

本文针对影响嵌岩桩承载性状的各种因素进行了梳理，可为设计人员进行桩基承载力计算，施工单位桩基施工质量控制等方面提供重要指导，以使桩实际受力状态与设计相符。

参考文献

- [1]HorvathRG, KennyTC, KozichiP. Methodofimproving the performanceofdrilledpiersinweakrock. Can. Geotech. J, 1983, Vol, 20
- [2]GB50007-2002建筑地基基础设计规范[S].
- [3]公路桥涵地基与基础设计规范[s]JTJG3363-2019.
- [4]明可前.嵌岩桩的受力机理分析[J].岩土力学, 199819(1)
- [5]刘松玉等.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)
- [6]刘树亚.嵌岩桩桩土一岩共同作用分析方法.土工基础,2000, (6)
- [7]黄求顺.嵌岩桩承载力的研究[A].中国建筑学会地基基础学术委员会论文集[C].西安: 陕西高校联合出版社.