岩溶地基嵌岩灌注桩设计与检测

管剑华　王伟　于孝民
（徐州市水利建筑设计研究院，徐州，221002）

提　要　本文结合工程实例介绍岩溶地基嵌岩灌注桩的岩土工程问题，并对岩溶地基嵌岩灌注桩的设计与施工进行了讨论。

一　岩土工程特征

徐州市“汉桥”设计桥长 275.0m，宽 36.0m，为 11 孔箱连续梁结构，孔跨 25.0m，荷载标准：汽 20-挂 100 级。桥梁基础采用嵌岩灌注桩，桥台桩径 1.2m，其余为 1.5m，总计 100 根，设计单桩承载力 3000kN，要求基岩单轴抗压强度不小于 10MPa。

桥址位于废黄河断裂带内，距桥址约 1.0km 处近年来发生严重的岩溶塌陷。场地基本地震烈度Ⅶ度。桥址内冲积层厚度 16.1～22.4m，全新统粉砂厚度 14.0m 以上，下为上更新统为棕黄—棕红色粘土，基岩为寒武系厚层石灰岩，局部泥灰岩。

根据场地内灰岩风化及溶洞发育情况，以将其划分为以下五个结构类型：

(1)中等—微风化，完整基岩，无溶洞。

(2)中等—微风化，洞顶灰岩厚度大于 1.5m，其下无较大溶洞。

(3)中等—微风化，洞顶灰岩厚度小于 1.0m，其下有溶洞。

(4)中等—微风化，洞顶灰岩厚度 1.0～1.5m，其下无较大溶洞。

(5)强风化泥灰岩，断层破碎带及断层角砾岩。

二　持力岩层厚度及嵌岩深度确定

对于岩溶地基嵌岩桩溶洞顶板的允许厚度亦即洞顶桩端持力岩石的稳定厚度问题，国家规范尚没有规定，由于影响该参数确定的因素较多（岩溶发育程度、溶洞规模、充填物性质、桩径及荷载大小等）故难以确定。一般工程经验多要求洞顶稳定岩石的厚度不小于 4.5～5.0m，但工程实践证明该值安全储备过大，较为保守。广东省《建筑地基基础设计规范》（DBJ15-3-91）规定：当端承桩支承在桩下存有溶洞时，桩端以下支承岩层的厚度不宜小于 3 倍桩径，并不小于 2.0m。若以不小于 3 倍桩径计则为 4.5m，场地内绝大多数

桩位的岩石无法满足要求，以不小于 2.0m 计则仅有一部分能满足要求。考虑桩的工作荷载不大，岩溶虽发育但溶洞规模较小且被红粘土充填，岩石质量也比较好，强度远大于设计要求。结合本场地基岩结构类型，对 a、b 类嵌岩深度采用 0.2d（即 0.3m），c 类穿过溶洞嵌入稳定岩石 0.3m，d 类经抗冲剪计算确定，e 类穿过强风化带嵌入中等或微风化岩 0.5～1.0m。目前对溶洞顶板的稳定性验算方法有按梁板受力情况计算和顶板岩石能抵抗受荷载剪切的厚度计算以及按塌落拱理论计算。选用哪种方法取决于对溶洞及围岩情况的了解和上部荷载大小与作用方式。根据该场地岩石质量好且强度大，溶洞规模小，洞内充填粘土工程性质也比较好的情况，采用溶洞顶板岩石能抵抗受荷载剪切的厚度计算。依极限平衡条件有：

$$T \geqslant P,\ T=HSL \tag{1}$$

$$H=T/SL \tag{2}$$

式中：P—溶洞顶板所受总荷载（3000kN）；

T—溶洞顶板的总抗剪力，取 1.2P（3600kN）；

S—顶板岩体的计算抗剪强度，取设计岩石抗压强度的 1/12（10/12MPa）；

L—溶洞平面周长，考虑桩端处顶板抗冲剪强度，取桩的周长（4.71m）；

H—桩端下溶洞顶板岩石有效厚度（m）。

计算溶洞顶板岩石能抵抗上部荷载剪切的厚度为 0.92m，考虑最小嵌岩深度 0.2m，认为当溶洞顶板完整岩石厚度不小于 1.2m 的条件下，嵌岩深度为 0.2m，否则按 C 类处理。

三　单桩承载力计算

岩溶地基嵌岩单桩承载力的计算首先是选用公式其次是取值问题，目前我国尚没有通用的地基基础标准，各行业规范设计思路不同公式的形式也就不同，主要是考虑桩侧岩土摩阻力与不考虑桩侧岩土摩阻力，按桩体材料强度与按桩端岩体强度计算的区别。一般对于桩的长径比（L/d）<10 的嵌岩桩，承载力的计算不考虑桩侧岩土摩阻力而按桩体混凝土的强度或按桩端岩体强度来计算，工程实践中多分别按以上两种方法计算取其小者。对于桩的长径比（L/d）>10 的嵌岩桩，承载力的计算，则考虑桩侧岩土的摩阻力，《建筑桩基技术规范》（JGJ94-94）（5.2.11-1）式较为合理：

$$Q_{UK}=Q_{SK}+Q_{rk}+Q_{PK} \tag{3}$$

上式表明桩的轴向极限承载力由桩侧岩土的摩阻力和桩端岩体的支承力构成，此状态下的基础桩由桩侧土、桩端岩体和桩体钢筋混凝土三种性质不同的材料组成，它们的物理力学形态各异，破坏模式和破坏强度理论也不同，做为一个协调工作的应力体系桩的应力分配比例和应力发挥的顺序及传递方式较为复杂。此外，无论按纯端承桩计算还是按端承摩擦桩计算，桩端岩体强度的取值因规范不同而异但都存在怎样取用的问题。因为每个钻孔内的岩石单轴抗压强度为该点的强度值，只表征岩体在该点或该点所代表构造上完整的部分岩体，不能超越岩体的构造破裂面以及在附加应力作用下岩体的损伤破裂面。所以桩端岩体强度值不一定有连续性，故不宜用统计的方法将实测的最小值舍弃。因桩侧土质不

同和桩端岩石强度不同造成单桩承载力的离散性是必然的。本场地内桩长 17.4～32.4m，桩的长径比（L/d）11.6～21.6，其中（L/d）<15 的 22 根，（L/d）>15 的 62 根，单桩承载力计算分别采用《公路桥涵地基与基础设计规范》（JTJ 024-85）4.3.4 式：

$$(R)=(C_1A+C_2Uh)R_a \tag{4}$$

和《建筑桩基技术规范》（JGJ 94-94）（5.2.11-1）式：

$$R=Q_{uk}/r_{sp} \tag{5}$$

岩石单轴抗压强度取值均为取最小值：断层角砾岩取 9.8MPa，中等～微风化取 31.8MPa，有关参数按规范取值，计算结果分别为：

$R_{9.8MPa}$=5192.1kN，$R_{31.8MPa}$=16847.6kN

和 $R_{9.8MPa}$=6909.8kN，$R_{31.8MPa}$=18413.8～18910.2kN

从计算结果来看单桩承载力不但满足设计要求而且安全储备很大。若桩端岩石强度不取定值而按各实测岩石单轴抗压强度取值，计算单桩单桩承载力的离散性会很大。计算对单桩单桩承载力的离散性的影响主要是：桩侧岩土摩阻力取值，桩端岩石强度取值以及有关系数的选取，而有关系数又与成桩的施工质量有关。

四　桩端基岩面完整性检查

嵌岩钻孔灌注桩成桩过程的质量控制包括桩端基岩面完整性检查和成孔成桩过程的质量检查与控制两个方面。桩端基岩面完整性检查采用钎探的方法，用 ϕ30mm 的手持钻杆配接而成，在桩孔底面等距离捣探，从声音和手感判别岩土甚至可粗估岩石的风化情况；用探杆在岩面拖曳的办法判别裂隙的大致宽度，绘制桩底每个检测高程的水平切面图转绘到剖面图上可以看出石芽、溶蚀沟槽、裂隙或溶洞的发育形态，直到满足设计要求为止。

五　桩基质量监测

1. 低应变

主桥所有桩均采用反射波法进行完整性检测，仪器为 PRT-2 型桩基动态检测仪。共检测 82 根，混凝土龄期 28 天以上，其中 77 根桩波形呈规则衰减且无缺陷反射波存在，桩底清晰，波速正常，为 A 类桩，占总桩数的 94%；另有 5 根桩在 4.3～5.9m 左右有轻度缩径现象，波形呈规则衰减，有轻度缺陷反射波存在，桩底可分辨波速正常，为 B 类桩，占总桩数的 6%,但也可以作为工程桩使用。

2. 高应变

高应变检测选择 16#和 26#桩，试验锤重 6t，自由落体击打桩顶，测试仪器为美国 PDA/PAL 系统，分析程序为中国建筑科学研究院地基基础所高应变波形拟合分析程序 FEIPWAPC™。高应变承载力测算结果见表 1。程序分析报告均提示：土阻力没充分发挥。

表 1　21#、26#桩高应变承载力测试成果表

桩号	桩长（m）	桩侧阻力（kN）	桩端阻力（kN）	单桩极限承载力（kN）	桩侧阻力/极限承载力	桩端阻力/极限承载力
16	20.0	6792	1765	8557	79.37%	20.63%
26		6960	2453	9413	73.94%	26.06%

测试结果显示桩的受力类型为端承摩擦桩，荷载传递的分配比例与桩的长径比以及桩端岩体强度有关。单桩承载力的差别很大的原因主要是桩端岩石强度，土层总厚度以及土质的差别导致桩总阻力不同所致。

3. 静荷载

静荷载试验选 21#桩，最大荷载为 4500kN（取单桩设计承载力的 1.5 倍），每级荷载增量 450kN，压重最大反力 5000kN。根据 Q-S 曲线综合判定 21#桩单桩承载力 3000kN，相应沉降量 3.0mm，最大荷载为 4500kN，相应沉降量 5.0mm，完全符合设计要求。

六　结　语

对于岩溶地基，必须查明岩溶发育程度、溶洞规模、洞内充填物、顶板厚度及岩体质量，以便选择合理的确定嵌岩深度和洞顶岩石安全厚度计算方法。L/d >10 的嵌岩桩承载力计算应考虑桩侧岩土的摩阻力，岩土的摩阻力和岩石强度对单桩承载力计算影响很大，桩径越大，岩石强度越高，影响越大。实测资料表明 L/d >15 的嵌岩桩受力类型为端承摩擦桩。

参考文献

[1]《建筑桩基技术规范》（JGJ 94-94），北京，中国建筑工业出版社，1995。

[2]《公路桥梁地基与基础设计规范》（JTJ 024-85），北京，人民交通出版社，1990。

[3]《桩基工程手册》，北京，中国建筑工业出版社，1995。