

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2019.04.16

岩溶区建筑场地桩基平均入岩高程预测

曹贤发, 刘之葵, 李海玲

(桂林理工大学土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 嵌岩桩入岩位置在岩溶场地具有很大的不确定性, 成桩难度和桩基方案技术经济性论证缺乏可靠依据, 这是目前岩溶场地桩基础、筏板基础和复合地基优选时的常见问题。本文将桩基入岩起始位置处的高程定义为桩基入岩高程, 岩溶场地所有桩基入岩高程的平均值称为场地桩基平均入岩高程。场地桩基平均入岩高程决定了场地基桩入岩深度的变化范围, 反映了场地桩基成桩难度及其技术经济性。以柳州市金盛广场4#楼桩基工程为背景, 基于岩溶区已有的桩基入岩概率模型建立了场地桩基平均入岩高程预测模型, 所需数据来源于岩溶场地丰富、廉价的勘察钻探资料, 无需补充其他额外测试或勘测数据, 合理考虑了岩溶地基溶蚀特征和桩径大小等两个影响因素。研究表明, 岩溶场地桩基平均入岩高程预测值与实测值误差一般不大于0.5 m, 满足岩溶地区嵌岩桩技术经济性论证的精度要求, 可作为岩溶场地基础方案优选和成桩工艺选择的基本依据。

关键词: 岩溶桩基; 地基溶蚀特征; 桩基平均入岩高程

中图分类号: P642.254; TU473.1⁺2

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2019)04-0119-07

An analysis of the average entering-rock height of grouped piles at building sites in a karst terrain

CAO Xianfa, LIU Zhikui, LI Hailing

(College of Civil Engineering and Architecture, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract: The depth of socket piles is often uncertain in karst areas, and there is lack of reliable basis to evaluate the difficulty of pile formation and economical efficiency for pile foundation, which is a frequent issue encountered when an optimal scheme can only be produce among pile foundation, raft foundation and composite foundation. In this paper, the elevation at which a single pile starts to enter rock is defined as the elevation of the single pile entering rock. The average elevation of all single piles entering rock in a karst site is called the average elevation of pile entering rock in site (abbreviated as AER hereafter). The AER can be used to predict the variation range of the rock-entry depth and rock-socket thickness of all piles, which reflects the difficulty and technical economy of pile-forming in site. Taking the pile of the No. 4 Building of the Jinsheng Plaza in Liuzhou as the engineering background and based on an existing analytical method of the entering-rock probability of piles, this paper establishes an analytical model for predicting the AER at karst building sites. All obligatory data for the model is abundant and inexpensive, which come from investigation and without additional work of test or survey. Two factors affecting the parameter AER, the dissolution feature and pile diameter, are reasonably considered in this model. The results show that the predicted ARE derivates from the measured value within 0.5 m and this precision satisfies the requirement of technical and economic

收稿日期: 2018-11-11; 修订日期: 2018-12-06

基金项目: 国家自然科学基金地区基金项目资助(41867039); 广西自然科学基金面上项目资助(2018GXNSFAA138139; 2017GXNSFAA198238); 桂林理工大学博士科研启动基金项目资助(GUTQDJJ2014031)

第一作者: 曹贤发(1980-), 男, 博士, 讲师, 主要从事岩溶工程地质与地基基础研究。E-mail: caoxianfa@126.com

通讯作者: 刘之葵(1968-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩溶工程地质灾害研究。E-mail: liuzhikui@126.com

demonstration of rock-socket piles, and can be used as the basis for optimizing foundation schemes and selecting pile-forming methods in karst areas.

Keywords: karst pile; dissolution feature in ground; average elevation of pile entering rock

嵌岩桩是岩溶场地常见的基础型式^[1-3]。岩溶区中高层建筑地基基础设计常常需要对桩基础、筏板基础、复合地基方案进行优选。岩溶区工程实践表明,地基设计阶段能较合理地确定筏板基础和复合地基方案的工程造价、工期和施工难度,但桩基方案的技术经济性论证则常常是岩溶区地基基础方案设计时的一个难题,导致岩溶地基基础选型失误的案例屡见不鲜。关于岩溶嵌岩桩与筏板基础的技术经济性的比选论证,在工程实践中也一直存在较为尖锐的争论和分歧,岩溶区的地基方案选择依赖行业权威及其经验多于理论。

基桩入岩深度,也称为嵌岩厚度、嵌岩深度,不同行业和项目中的具体要求是不同的,但其入岩起算位置是统一的,均指桩端截面与岩石完全接触的位置,本文将该位置对应的高程定义为基桩入岩高程。显然,若能合理预测岩溶场地所有基桩入岩高程的平均值(本文称之为场地桩基平均入岩高程),结合场地勘察资料,即可预测场地所有基桩的平均入岩深度或嵌岩厚度,评估其成桩难度,为桩基础施工难度评价和桩基方案的技术经济性论证提供定量参数依据。

溶蚀沟槽、漏斗、洞隙等岩溶形态发育具有很大的随机性,具宏观规律而无微观规律可循^[4-8]。目前关于场地岩溶地基溶蚀特征仍以定性评价为主,最常见的就是对场地岩溶发育程度进行分级^[9]。工程实践表明,桩基难度与岩溶发育程度评价结果的相关性不明显,评价为岩溶强发育的场地,其桩基实际施工难度可能并不大。反之,评价为岩溶弱发育的岩溶场地,却常常潜在较大的成桩难度,由此引起的基桩质量问题也较多,其关键在于现有岩溶地基溶蚀特征的定性评价未能提供合理的定量参数作为地基设计依据。岩溶地基勘察手段已呈多样化发展,地质雷达、高密度电法等多种常见物探手段已在岩溶勘察中得到了一定应用和研究^[10-11]。岩溶勘察钻孔密度也较大,特别是一桩一孔或一桩多孔已成为岩溶桩基施工勘察的主要布孔要求^[12-13],在岩溶地基设计和施工阶段已积累了丰富的地质资料。但是,目前对于桩基入岩高程及入岩深度的预测依据主要是这些勘察数据的简单统计值,如勘察钻孔入岩高程平均值。岩溶地区工程实践表明,工程物探的探测深度有限,探测精度及适用性受场地条件限制较大,在岩溶地基勘察实践中的应用仍不够广泛,而勘察

孔与桩孔直径相差较大,一桩一孔的施工勘察确定的基桩入岩深度与实际入岩深度常常存在较大偏差,尤其在溶蚀程度较高的岩溶地基条件下,这种偏差十分显著。一桩多孔勘察能较好地确定基桩入岩情况,但勘察成本较高。另外,施工勘察后于地基设计,地基方案变更成本高。尽管如此,可以肯定的是目前岩溶地基勘察方法多样,场地勘察数据已然十分丰富,但如何在有效地利用这些勘察资料、充分考虑场地溶蚀特征的基础上,合理预测岩溶场地桩基平均入岩高程,为岩溶地基设计提供合理的岩溶定量参数,仍有待研究。

本文在文献[14]所建立的岩溶场地桩基平均入岩概率分析模型的基础上,以柳州市金盛广场4#楼桩基为工程背景,建立了岩溶建筑场地桩基平均入岩高程预测模型,分析了模型的预测误差,阐明了预测方法的合理性,其预测结果可作为岩溶地基基础方案优选和桩基技术经济性论证的基本依据。

1 工程概况

柳州市金盛广场位于东环大道西侧、箭盘路北侧的原东环菜市场内。4#楼高25层,地下室1层,框架结构。设计采用56根桩基础,其中22根桩径0.8 m,8根桩径1.2 m,11根桩径1.4 m,15根桩径1.5 m,要求:以较完整灰岩为桩端持力层,桩端嵌岩深度不少于0.5 m,局部要求嵌入2.0 m;在桩孔开挖前进行一桩一孔的施工勘察,以确保桩端下3倍桩径且不少于5 m的深度范围内无溶洞发育。桩基设计概况见图1。从图1可知,有十桩一承台、三桩一承台、两桩一承台,多数为一桩一承台,承台分布无规律,这种桩基设计在岩溶地区虽然也不多见,但基桩入岩情况主要取决于桩位地质条件,受承台设计因素的影响甚微,也不影响本文研究结果在相关岩溶建筑场地的适用性。

施工勘察期间,场地已平整,地面高程约88.65 m,上覆土层以红黏土为主,上部浅层范围分布较薄的杂填土和淤泥质土。上覆土层厚度为8.43~21.15 m,平均厚度15.82 m。根据施工勘察结果推荐的桩基入岩深度为8.43~34.94 m,平均入岩深度18.77 m。桩基施工工艺根据桩长确定,超过20 m的采用冲孔桩,不大于20 m的采用人工挖孔桩,施工勘察初步确定除37#和48#采用冲孔桩施工外,其余全部

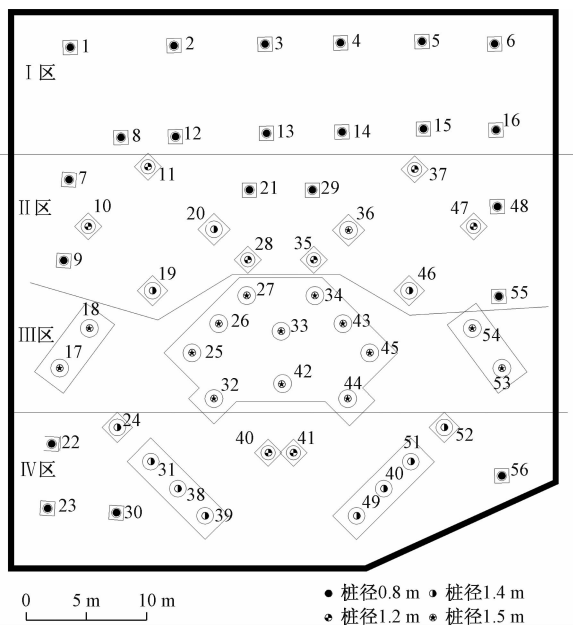


图 1 柳州金盛广场 4#楼的桩基平面设计图

Fig.1 Floor plan of pile of the No.4 building in the Jinsheng Plaza of Liuzhou

用人工挖孔桩,并全面铺开施工,人工挖孔桩预计 45 d 内完成,冲孔桩则在挖孔桩完成后与该场地的 5#楼桩基施工同时进行。

人工挖孔桩施工发现,场地溶蚀沟槽十分发育,很多桩孔在开挖至预定高程(由该桩位处施工勘察孔确

定)后并未完全入岩,大部分桩孔实际入岩高程都要低于预定高程一定深度,最大高差为 39#孔,达到 13.87 m,平均为 3.29 m,导致原来桩位处的施工勘察钻孔深度不能确保桩端下完整岩厚度满足设计要求,甚至桩孔开挖深度大于勘察孔深度,不得不暂停施工以进一步进行补充勘察。部分桩孔不得不变更采用冲孔桩施工方案,导致前期人工开挖的桩孔废弃,桩基施工成本大幅度增加,工期也最终延长了近 3 个月,给工程建设带来了很大损失。施工结果最终表明,1#~3#楼采用筏板基础,已按预定计划顺利完成施工,而 4#楼的桩基方案无论从造价方面还是工期方面都明显不如筏板基础方案,其桩基施工工艺选择人工挖孔桩也证明是不恰当的。

场地分为 I、II、III、IV 共 4 个亚区,主要考虑因素为:分区面积适宜,不应太大或太小,按照桩数 12~24 个控制,以满足统计样本数要求;分区范围内的桩型尽量相对统一,如 I 区和 III 区均只有一种桩型,其桩径分别为 0.8 m 和 1.5 m。

各分区的桩型及数量分布情况为: I 区 12 根桩的直径为 0.8 m; III 区 14 根桩的直径为 1.5 m; 场地 II 区共 16 根桩,有 4 种桩型: 6Φ0.8 m、6Φ1.2 m、3Φ1.4 m 和 1Φ1.5 m; 场地 IV 区共 14 根桩,有 3 种桩型: 4Φ0.8 m、2Φ1.2 m、8Φ1.4 m。各分区的基本概况见表 1。

表 1 场地工程概况表

Table 1 Site engineering overview

分区	勘察孔数/个	见洞孔数/个	溶洞进尺/m	岩层进尺/m	遇洞率/%	线岩溶率/%	溶蚀率拟合公式 $r = ae^{b(H-H_0)}$		
							系数 a	系数 b	相关系数 R
I	12	3	12.35	91.89	25.00	13.44	80.2098	-0.1735	0.913
II	16	8	37.20	170.42	50.00	21.83	79.3220	-0.1296	0.984
III	14	6	17.50	142.81	42.86	12.25	80.1813	-0.1715	0.975
IV	14	7	18.52	131.24	50.00	14.11	66.3852	-0.1159	0.938
合计	56	24	85.57	536.36	42.86	15.95	/	/	/

2 数据处理

2.1 各桩型的群桩入岩概率曲线

场地分区中存在多种桩型,要分析场地的平均入岩高程,应先确定场地每个分区每种桩型的群桩入岩概率曲线,可按文献[15]方法求解。

设高程 H_a 等于或略小于施工勘察孔的孔底高程最小值, H_b 等于或略大于施工勘察钻孔最大入岩高程,将区间 $[H_a, H_b]$ 划分为长度为 ΔH 的统计区间,区间底部高程 $H_i \in [H_a, H_b]$,由大到小排列为: $H_1 > H_2 > \dots > H_{i-1} > H_i > H_{i+1} > \dots$ 。桩型 j 在高程 H_i 以上

的入岩概率为:

$$P_{i,j}^D = \eta_{i,j}^D (P_i^D - P_{i-1,j}^D) + P_{i-1,j}^D \tag{1}$$

式中: $P_{i,j}^D, P_{i-1,j}^D$ ——高程 H_i, H_{i-1} 以上 j 桩型的累计桩基入岩概率;

P_j^D ——高程 H_i 以上勘察钻孔的入岩概率;
 η_i^D —— j 桩型在 $[H_{i-1}, H_i]$ 的基桩平均入岩概率,按式(2)求解。

$$\eta_{i,j}^D = (1 - r_i) \exp \left[\frac{4}{3} (10D_j - 1) r_i \right] \tag{2}$$

式中: D_j —— j 桩型桩孔直径;
 r_i ——高程 H_i 处的溶蚀率。

需要注意的是, P_i^d 是指 H_i 以上入岩勘察钻孔与总勘察孔数之百分比。当勘察孔未揭露溶洞时, 勘察孔入岩高程为孔位处的岩面高程。当勘察孔揭露有一个或多个溶洞时, 勘察孔入岩高程则为该孔的溶洞底部高程最小值。

式(2)中 r_i 是高程 H 的函数^[15], 其具体表达式为:

$$r(H_i) = ae^{b(H_i-H_0)} \quad (3)$$

式中: a, b ——曲线拟合常数;

H_0 ——起算高程。

用高程 H_i 处的基桩入岩概率表示区间 $(H_{i-1}, H_i]$ 的基桩平均入岩概率 η_i^p , 具体求解方法为, 将 $H = H_i$ 将代入式(3)后可求得高程 H_i 处的溶蚀率 r_i 为:

$$r_i = ae^{b(H_i-H_0)} \quad (4)$$

令 $r = r_i, D = D_i$ 代入式(2)可求得 H_i 处的基桩入岩概率为:

$$\eta_{i,j}^D = (1 - r)^{\frac{4}{3}(10D_j-1)r_i} \quad (5)$$

同一场地或分区各种桩型的群桩入岩概率求解时, 均共用该场地或分区的勘察孔入岩概率 P_i^d 和溶蚀率 $r(H)$ 曲线。根据式(1)、(4)、(5)即可求得场地或各分区内每种桩型的群桩入岩曲线 $P_j(H)$, 如图2所示。在图2中, II区域的桩型Z4(桩径为1.5 m)和桩型Z3的理论入岩概率曲线基本重合, 且桩型Z4只有一根桩, 为使图面清晰, 桩型Z4的群桩入岩曲线未绘制。勘察钻孔确定的入岩深度和桩孔实际入岩深度之差即为勘察钻孔入岩深度误差, 各分区该误差的分布情况如图3所示。

2.2 桩基平均入岩高程

求出某区域内桩型 j 的桩基入岩概率 $P_j(H)$ 后, 按下式可求出其理论入岩高程平均值 $\bar{H}_j'$ 为:

$$\bar{H}_j' = \sum [P_j(H_i) - P_j(H_{i-1})] H_i \quad (6)$$

若分区中有多重桩型, 则该分区所有桩孔的理论入岩高程平均值 $\bar{H}'$ 可按下式计算:

$$\bar{H}' = \sum_{j=1}^m \Psi_j \bar{H}_j' \quad (7)$$

式中: Ψ_j —— j 桩型在该分区中所占比重。

Ψ_j 按下式计算:

$$\Psi_j = \frac{n_j}{n} \quad (8)$$

式中: n_j ——统计范围内 j 桩型的桩孔数;

n ——统计范围内桩的总数。

根据式(6)可求得各分区各桩型平均入岩高程理

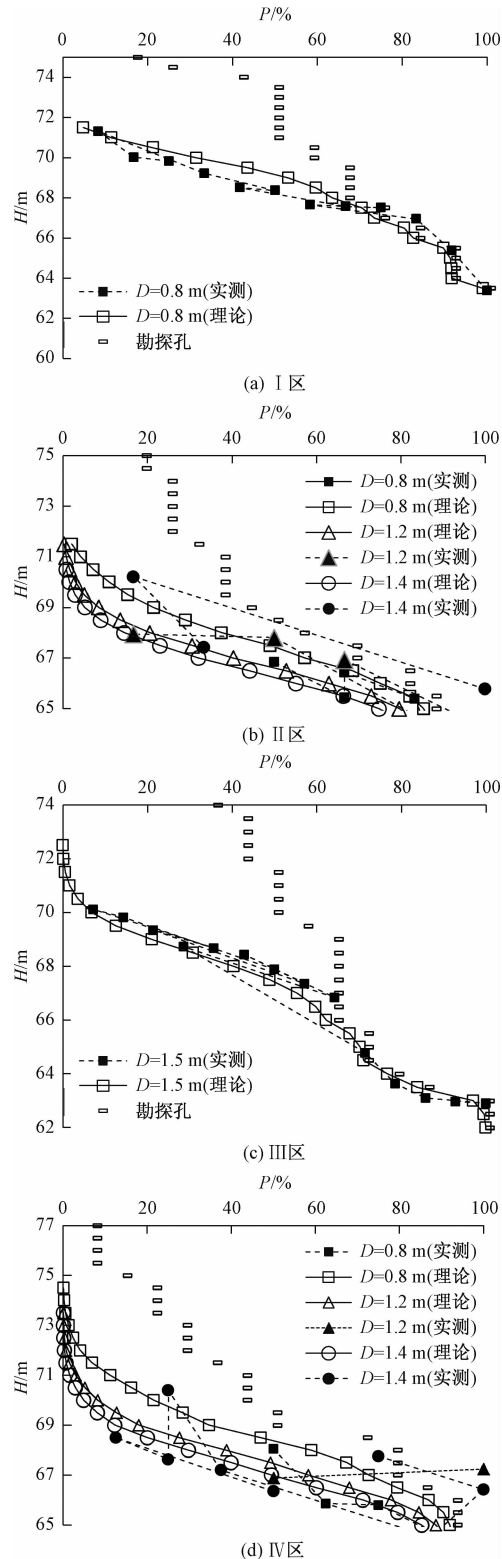


图2 场地各分区的群桩入岩概率高程分布曲线

Fig. 2 Height distribution curve of the entering-rock probability of grouped piles in each subarea of the site

论值 $\bar{H}_j'$ 。根据式(7)可求得各分区桩孔的平均入岩高程理论值 $\bar{H}'$ 。根据桩孔施工资料可统计得到各分区

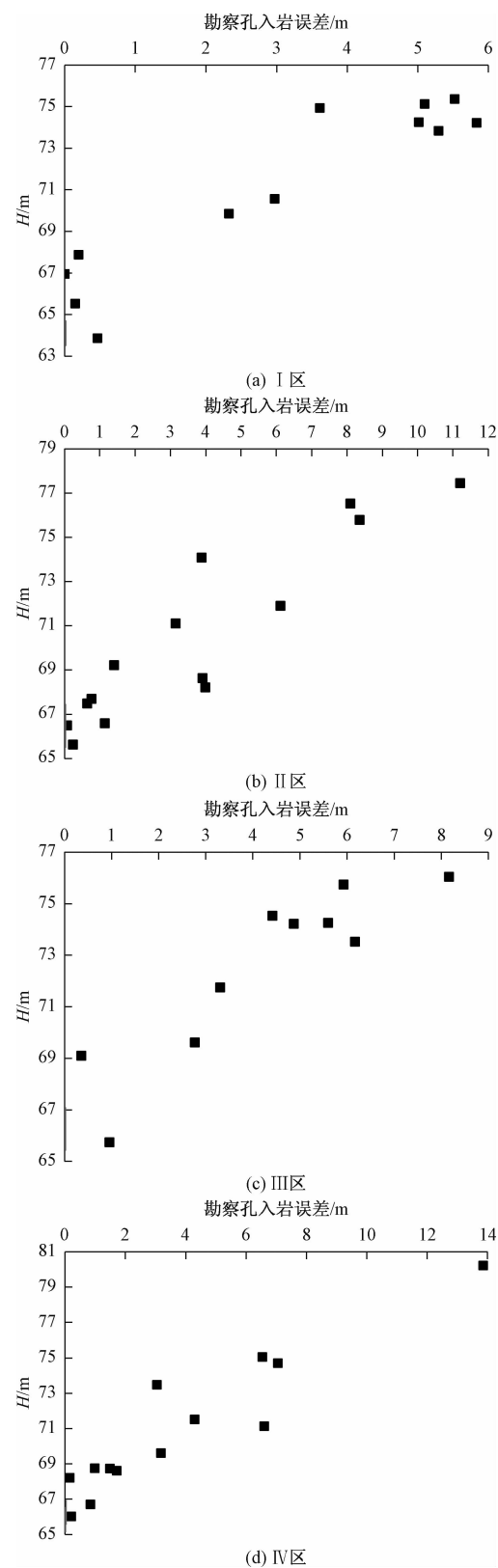


图 3 勘察孔入岩误差分布散点图

Fig. 3 Scatter diagram of the distribution of entering-rock errors of the survey hole

各桩型平均入岩高程实测值 $\bar{H}_j^a$ 、分区所有桩孔的平均入岩高程实测值 $\bar{H}^a$ 和勘察孔平均入岩高程 $\bar{H}^d$ 。计算结果见表 2。

表 2 桩基平均入岩高程理论值计算

Table 2 Computation of the theoretical value of the average entering-rock height of grouped piles

分区	桩径	$\bar{H}_j^t$	$\bar{H}_j^a$	权重	$\bar{H}^t$	$\bar{H}^a$	$\bar{H}^d$
I	0.8	67.71	67.98	1	67.71	67.98	71.02
	0.8	65.87	65.4	3/8			
II	1.2	65.03	64.77	3/8	65.24	65.17	68.49
	1.4	64.66	65.3	3/16			
	1.5	64.49	65.78	1/16			
III	1.5	66.55	66.76	1	66.55	66.76	70.46
IV	0.8	67.73	68.36	2/7	66.38	66.88	69.93
	1.2	66.42	66.65	1/7			
	1.4	65.69	65.86	4/7			

3 结果讨论

根据图 2,场地各分区的桩基入岩概率具有随高程减小(或深度增大)而增大的规律。桩基理论入岩率曲线变化规律与实测曲线基本一致,出现误差较大的情况为:第 II 区中桩径为 1.4 m 和 1.5 m 等两类桩型;第 IV 区中桩径为 0.8 m 和 1.2 m 等两种桩型。其中 II 区中桩径为 1.4 m 和 1.5 m 分别仅有 3 根和 1 根,IV 区中桩径为 0.8 m 和 1.2 m 分别仅有 4 根和 2 根,显然这几条曲线误差来源于因样本数量较少引起的统计误差。除去以上统计误差较大的情况外,场地其各分区的其他桩型的桩基入岩概率理论曲线和实测曲线误差一般均在 15% 以内,平均误差均不超过 10%,这表明场地桩基入岩概率的理论曲线和实测曲线误差较小。

根据表 2,IV 区 3 种桩型的桩径分别为 0.8,1.2,1.4 m,桩基平均入岩高程理论值 $\bar{H}_j^t$ 依次为 67.73,66.42,65.69 m,实测值 $\bar{H}_j^a$ 依次为 68.36,66.65,65.86 m,表明在同一个场地条件下,桩径越大,桩基平均入岩深度越大,即平均入岩高程越小。同时也要注意,II 区 4 种桩型的桩径分别为 0.8,1.2,1.4 和 1.5 m,桩基平均入岩高程实测值 $\bar{H}_j^a$ 依次为 65.40,64.77,65.30 和 65.78 m,这里并未反映桩径大小与桩基平均入岩深度的明显相关性,究其原因 是 Φ 1.4 m 和 Φ 1.5 m 桩的数量较少,分别只有 3 根和 1 根,故其统计误差较大。除去这两类桩型,仅比较桩径为 0.8 m 和 1.2 m 的情形仍可以得出,岩溶场地的桩基入岩平均高程随桩径增大而变小的规律。

根据表2,各场地桩基平均入岩高程理论值 $\bar{H}'$ 与实测值 $\bar{H}^a$ 误差 $\Delta \bar{H}' (= |\bar{H}' - \bar{H}^a|)$ 分布情况为:Ⅰ区0.27 m,Ⅱ区为0.07 m,Ⅲ区为0.21 m,Ⅳ区为0.50 m。场地各分区各桩型的桩基平均入岩高程误差一般在0.50 m以内,这种误差在岩溶地基基础方案优选实践中是可以接受的,表明本文建立的桩基平均入岩高程预测方法是合理的。

本场地是按照一桩一孔布孔进行施工勘察的。从表2可知,若将勘察钻孔入岩高程视为桩孔入岩高程,则场地各分区的桩基平均入岩高程的误差 $\Delta \bar{H}^d (= \bar{H}^d - \bar{H}^a)$ 分布情况为:Ⅰ区为3.04 m,Ⅱ区为3.32 m,Ⅲ区为3.7 m,Ⅳ区为3.05 m。根据图3,Ⅰ区在高程69.84 m以上, $\bar{H}^d$ 为2.33~5.84 m,该高程以下则不超过0.47 m;Ⅱ区在高程68.22 m以上,除9#桩孔的 $\bar{H}^d$ 为1.41 m外,其余8根桩的 $\bar{H}^d$ 均为3.16~11.21 m,该高程以下最大不超过1.14 m;Ⅲ区在高程69.61 m以上, $\bar{H}^d$ 为2.77~8.17 m,该高程以下最大不超过0.96 m;Ⅳ区在高程69.6 m以上, $\bar{H}^d$ 为3.05~13.87 m,该高程以下一般为0.98 m,仅41#桩和23#桩的 $\bar{H}^d$ 分别为1.72和1.49 m。上述分析表明, $\bar{H}^d$ 远大于 $\bar{H}'$,直接将勘察孔入岩高程视为桩孔入岩高程,在一定高程以上可能存在较大偏差。从图3可知,场地各分区的 $\bar{H}^d$ 总体上具有随高程增大而增大的现象,场地溶蚀程度随高程增大而增大才是其根本原因,由此可知, $\bar{H}^d$ 将随场地溶蚀程度增大而增大,简单以勘察孔入岩高程平均值作为桩基平均入岩高程,难以充分考虑场地的溶蚀特征,也无法考虑桩径对桩基入岩概率的影响,故其误差较大。

根据表2,按照各分区比重可得到整个场地的桩基平均入岩高程的理论值、实际值和勘察钻孔入岩高程平均值分别为66.38、66.60和69.88 m。由此可得到理论值和实际值的误差为0.21 m,以勘察钻孔入岩平均高程作为桩基平均入岩高程的误差为3.29 m。表明将场地作为整体进行评价分析和划分为不同区域进行分析,理论误差与各分区存在一定差异,但均在0.07~0.50 m之间,但以场地整体为对象进行分析,其精度较低,不能体现分区间的溶蚀程度差异对桩基入岩规律的影响。因此,建议在钻孔密度足够的情况下划多个亚区进行分区评价,使其能够体现场地不同局部范围内的基桩入岩规律差异,并更好地指导不同分区的桩基施工工艺选择,这十分适用于在岩溶场地桩基施工勘察阶段的基桩入岩特征预测。分区评价精度也受统计样本数量的影响,因此也应该确保分区范

围内参与统计分析的勘察钻孔数量要满足最少统计样本数的要求,一般考虑岩土工程参数变异性较大的特征,建议场地分布钻孔数量应不少于12个。

本文以金盛广场4#楼场地施工勘察为工程背景,但从已有研究可知,只要详细勘察阶段的钻孔密度和钻孔数量满足现行一定要求,详细勘察阶段和施工勘察阶段所得到的溶蚀率深度分布曲线在大部分情况下是一致的,因此可以推断,本文所建模型也适用于详细阶段对岩溶场地平均入岩高程的预测。需要注意的是,详细勘察阶段所预测的场地范围要适当增大,如以较大的独栋建筑、或紧邻的数栋较小建筑、或大型建筑的某个功能区块作为桩基平均入岩高程预测范围,以满足评价场地溶蚀率深度分布曲线所需的钻孔数量要求。显然,这种预测范围划分与地基方案设计时的设计单元划分是一致的,因此在详细勘察阶段,本预测模型预测可为地基设计提供岩溶参数依据。

如果场地按照一桩多孔进行施工勘察,实践表明可以在施工勘察阶段较好地确定每一根基桩的入岩深度和桩长,但勘察工作量较大,且由于施工勘察是在地基设计完成后进行的,因此无法及时地为地基设计提供相关参数,如果施工勘察结果表明所选桩基方案不是最优方案,那么进行地基方案变更成本高,也耽误了基础施工期,这必然给工程建设带来不良影响。

岩溶桩基施工勘察为场地获得了更为丰富的地质资料,钻孔密度更大,据此可将场地划分为更小的预测范围进行分区预测,如本文将金盛广场4#楼划分为4个分区,并预测每个分区的桩基入岩高程,以此作为各分区地基设计变更、成桩工艺选择依据,并据此可实现在地基基础施工前对地基方案技术经济合理性的最后验证。

4 结论

(1)本文建立的岩溶场地桩基平均入岩高程预测方法充分利用了目前岩溶地基的勘察资料,无需额外的勘察测试工作,合理考虑了岩溶地基溶蚀程度特征和桩径等两个因素,其预测值误差一般在0.5 m以内,满足岩溶地区嵌岩桩技术经济性论证的精度要求,可作为岩溶地基优选基础方案和选择成桩工艺的基本依据。

(2)对于一桩一孔的施工勘察,将其勘察孔平均入岩高程视为桩基平均入岩高程,由于地基溶蚀规律和桩径大小对桩基入岩概率的影响没有得到合理考虑,该统计值与实测值相比可能存在较大误差。

(3) 对于一桩多孔的施工勘察,虽然能较好地在地基施工前确定各基桩入岩深度和桩长,但勘察成本较高、勘察周期较长,无法及时地为地基设计提供相关参数依据。

(4) 桩基平均入岩高程预测范围划分应确保划分区域内的有足够的钻孔数量以满足其统计精度要求。

参考文献:

- [1] 黄明,付俊杰,陈福全,等. 桩端岩溶顶板的破坏特征试验与理论计算模型研究[J]. 工程力学, 2018, 35(10): 172 - 182. [HUANG M, FU J J, CHEN F Q, *et al.* Damage characteristics of karst cave roof and its safety thickness calculation under the coupling effect of pile-tip load and seismic wave [J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(10): 172 - 182. (in Chinese)]
- [2] 赵明华,徐卓君,肖尧,等. 基于平面应变模型的岩溶区嵌岩桩桩端极限承载力计算[J]. 土木工程学报, 2018, 51(2): 88 - 94. [ZHAO M H, XU Z J, XIAO Y, *et al.* Research on ultimate bearing capacity at the tip of a rock-socketed pile in on plane strain model[J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(2): 88 - 94. (in Chinese)]
- [3] 梁冠亭,肖开乾,郑宏伟,等. 基于尖点突变理论的岩溶区嵌岩桩溶洞顶板安全厚度研究[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(5): 67 - 72. [LIANG G T, XIAO K Q, ZHENG H W, *et al.* A study of the safety thickness of cave roof under rock-socketed pile in karst area based on the cusp catastrophe theory[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(5): 67 - 72. (in Chinese)]
- [4] PUEYO A O, CASAS S A M, POCOVÍ J A, *et al.* Assessing karst hazards in urbanized areas. Case study and methodological considerations in the mantle karst from Zaragoza city (NE Spain) [J]. Engineering Geology, 2015, 184(7): 29 - 42.
- [5] CUI Q L, SHEN S L, XU Y S, *et al.* Mitigation of geo-hazards during deep excavations in karst regions with caverns: A case study[J]. Engineering Geology, 2015, 195: 16 - 27.
- [6] ZHOU G Q, HUANG J J, TAO X D, *et al.* Overview of 30 years of research on solubility trapping in Chinese karst [J], Earth-Science Reviews, 2015, 146: 183 - 194.
- [7] HUANG F, ZHAO L H, LING T H, *et al.* Rock mass collapse mechanism of concealed karst cave beneath deep tunnel[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2017, 91: 133 - 138.
- [8] PERRIN J, CARTANNAZ C, Noury G, *et al.* A multicriteria approach to karst subsidence hazard mapping supported by weights-of-evidence analysis [J]. Engineering Geology, 2015, 197: 296 - 305.
- [9] 中华人民共和国建设部. GB50007-2011 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. [Ministry of Construction of the People's Republic of China, GB50007-2011 Code for Design of Building Foundation[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)]
- [10] FERNANDES A L JR, MEDEIROS W E, Bezerra F H R, *et al.* GPR investigation of karst guided by comparison with outcrop and unmanned aerial vehicle imagery[J]. Journal of Applied Geophysics, 2015, 112: 268 - 278.
- [11] ZIELINSKI A, MAZURKIEWICZ E, LYSKOWSKI M. GPR mapping of karst formations under a historic building in Szydłów, Poland[J]. Geofizika, 2016, 33(1): 101 - 111.
- [12] 中华人民共和国建设部. GB50021-2001 岩土工程勘察规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009. [Ministry of Construction of the People's Republic of China. GB50021-2001 Code for Investigation of Geotechnical Engineering [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009. (in Chinese)]
- [13] 中华人民共和国建设部. JGJ94-2008 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008. [Ministry of Construction of the People's Republic of China. JGJ94-2008 Technical Code for Building Pile Foundations [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2008. (in Chinese)]
- [14] CAO X F, LIU Z K, LI H L. Probability model on pile tip embedding into rock mass for building pile group in karst terrain [J]. Modelling, Measurement and Control B, 2017, 86(2): 452 - 466.
- [15] 曹贤发, 张家生, 刘之葵, 等. 溶蚀程度随高程分布特征的定量分析方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(7): 2339 - 2345. [CAO X F, ZHANG J S, LIU Z K, *et al.* Quantitative analysis method for dissolution degree distribution feature with elevation[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(7): 2339 - 2345. (in Chinese)]