

曹贤发,刘玉康,刘之葵,等.基于强溶蚀带特征的地基岩溶发育程度评价方法[J].中国岩溶,2020,39(4):577-583.
DOI:10.11932/karst20200413

基于强溶蚀带特征的地基岩溶发育程度评价方法

曹贤发^{1,2},刘玉康^{1,2},刘之葵^{1,2},张炳晖^{1,2}

(1. 广西岩土力学与工程重点实验室, 广西 桂林 541004; 2. 桂林理工大学土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004)

摘要:岩溶发育程度评价结论不能合理反映地基实际的岩溶问题处理难度,是导致目前岩溶区建筑基础选型失误屡见不鲜的根本原因。本文以南宁市吴圩国际机场新航站楼为工程背景,分析了现有的岩溶发育程度评价指标的局限性,论证了以强溶蚀带厚度作为岩溶发育程度评价指标的先进合理性,提出了岩溶发育程度评价的建议标准,结果表明:基于地基溶蚀率深度分布曲线划分的地基强溶蚀带,综合考虑了地基的岩面溶蚀和洞隙发育的主要深度范围,其分布特征能反映岩溶地基最为复杂的深度范围,其作为场地岩溶发育程度评价指标是合理的,其岩溶发育程度评价标准建议如下:当强溶蚀带厚度(M)分别为: $<3.0\text{ m}$, $3.0\text{ m}\leq M\leq 6.0\text{ m}$, $\geq 6.0\text{ m}$ 时,场地岩溶发育程度可分别判定为岩溶弱发育、中等发育和强发育。

关键词:岩溶地基;岩溶发育程度;强溶蚀带

中图分类号:P642.25 **文献标识码:**A

文章编号:1001-4810(2020)04-0577-07 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



0 引言

岩面起伏和洞隙发育是岩溶地基复杂化的主要原因^[1-3]。合理预测岩溶地基复杂程度,是地基基础选型设计的基本课题^[4-6]。

目前,岩溶发育程度^[7-9]是评价与预测岩溶地基复杂程度的主要指标。岩溶工程实践表明,岩溶发育程度对岩溶地基的复杂程度存在显著影响,但现有方法得到的岩溶发育程度结论并不能很好地反映岩溶地基实际的复杂程度^[10-11],因此导致岩溶建筑基础选型不当的工程事故屡见不鲜。岩溶发育程度评价理论仍然有待进一步完善。

本文以南宁市吴圩国际机场航站楼为工程背景,讨论了现有的岩溶发育程度评价指标的局限性,

提出以强溶蚀带特征为指标的岩溶发育程度评价方法,并论证了其先进性和合理性。

1 工程概况

南宁吴圩国际机场占地300亩,是全国民用机场布局规划确定的区域干线机场。新航站楼总建筑面积为18.38万 m^2 ,设计场地整平标高约123.5 m,分为中央大厅I区、南水平指廊II区、北水平指廊III区、南垂直指廊IV区和北垂直指廊V区等5个建筑功能区(图1)。

场地位于苏圩褶断区坛河背斜东南翼,除西北侧约5 km处发育一条走向为NE40°的断层外,未见活动性断裂构造带通过,区域地质构造较为稳定;覆

基金项目:国家自然科学基金(41867039);广西自然科学基金面上项目(2018GXNSFAA138139,2017GXNSFAA198238);广西建筑新能源与节能重点实验室项目(17-J-21-6);桂林理工大学博士科研启动基金(GUTQDJJ2014031)

第一作者简介:曹贤发(1980—),讲师,从事岩溶工程地质研究。E-mail:caoxianfa@126.com。

通信作者:刘之葵(1968—),教授,从事岩土工程研究。E-mail:Liuzhikui@126.com。

收稿日期:2020-05-20

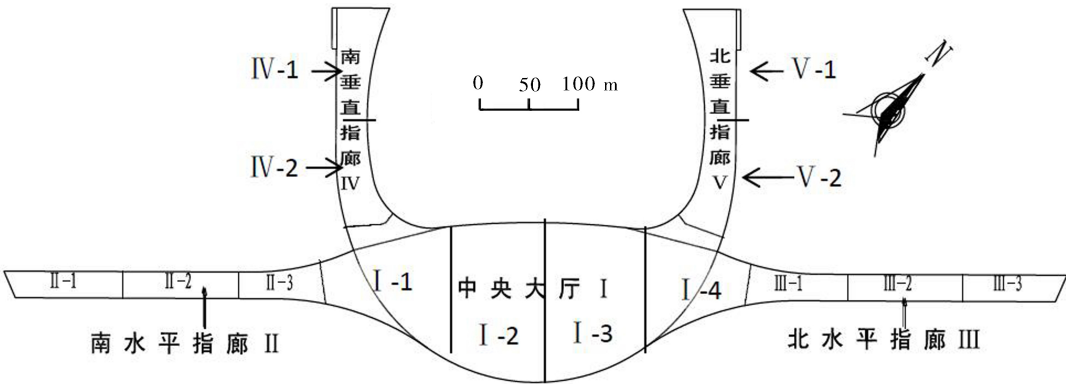


图1 航站楼平面分区图

Fig. 1 Plane zoning map of the terminal

盖层由第四系残积层(Q^d)粉质黏土、黏土混角砾、红黏土和石炭系下统(C₁)石灰岩构成,石灰岩岩层产状为150°∠15°,岩性变化不大。

场地处于溶蚀准平原地貌单元,勘察期间的地面高程118.73~123.66 m,相对高差约4.93 m;隐伏岩溶漏斗、落水洞、溶洞、岩溶裂隙等岩溶形态十分发育,岩面不连续起伏剧烈,岩溶地基条件复杂。

2 数据处理

本次研究收集了场地详细勘察和施工勘察的所有资料。航站楼每个功能分区建筑面积较大,将每

个分区细分为2-4个亚区,共划分出14个亚区(图1)。亚区划分主要考虑两个条件:一是确保每个亚区在详勘和施勘钻孔数量不少于12个,以满足地基溶蚀率深度分布曲线求解精度要求,各分区的勘察钻探情况见表1;二是尽量使划分后的亚区长宽比最小,使评价分区的空间跨度较小,以达到小区域岩溶地基评价的目的。

强溶蚀带界限高程及厚度按照文献[13]所介绍的方法求解,具体求解过程如下:

首先根据场地各分区的勘察资料提取场地的钻孔入岩高程、终孔高程、所有洞隙的洞顶和洞底高

表1 分区勘察概况表

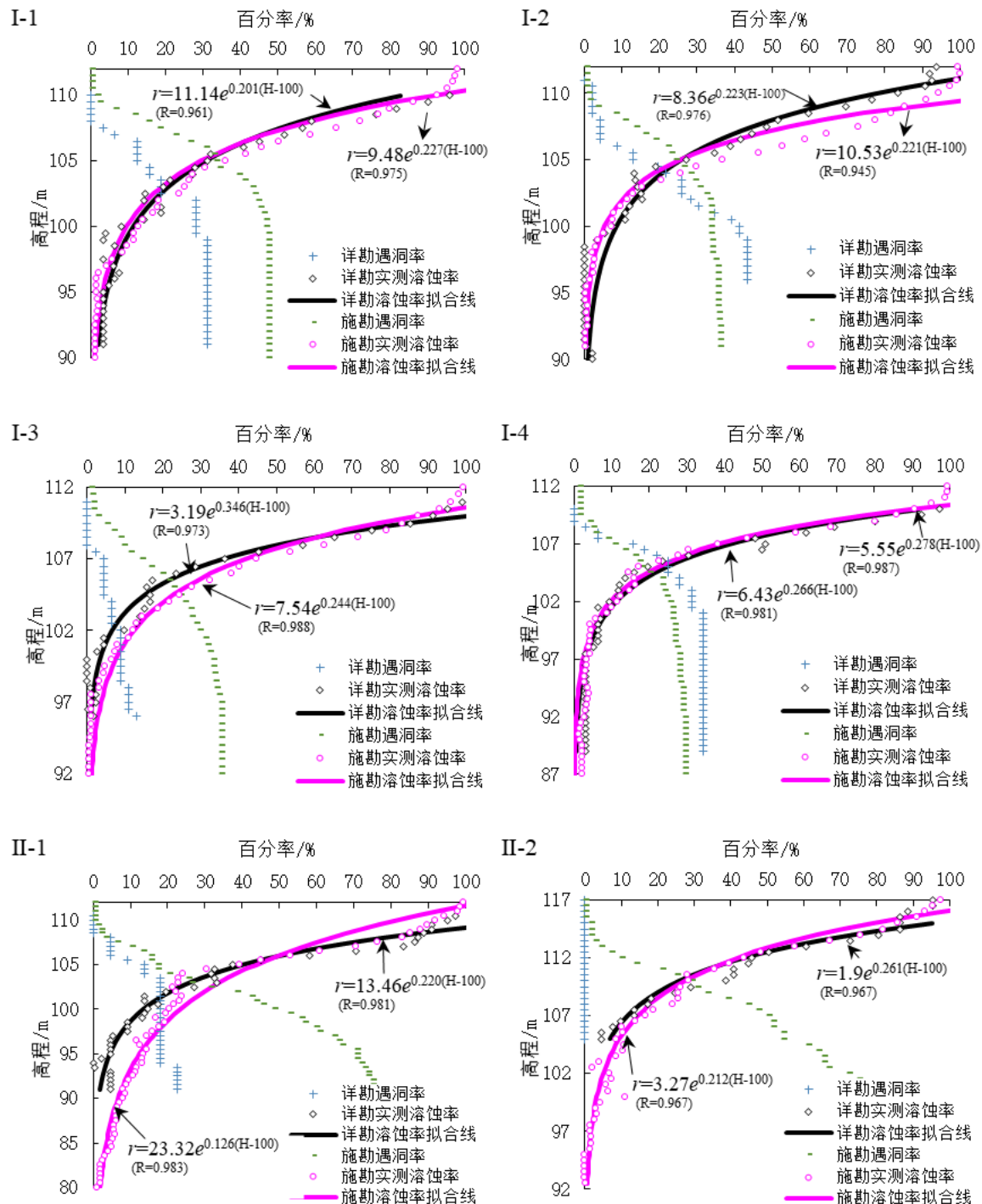
Table 1 Brief descriptions of surveys in every sub-area

分区	详细勘察						施工勘察					
	钻孔总数/个	遇洞孔数/个	洞隙进尺/m	岩层进尺/m	遇洞率/%	线岩溶率/%	钻孔总数/个	遇洞孔数/个	洞隙进尺/m	岩层进尺/m	遇洞率/%	线岩溶率/%
I-1	32	10	35.39	436.73	31.25	8.10	193	91	324.15	2 153.61	47.15	15.05
I-2	46	21	59.10	562.40	45.65	10.51	236	85	198.70	2 348.83	36.02	8.46
I-3	46	6	10.30	604.61	13.04	1.70	267	94	231.25	3 483.66	35.21	6.64
I-4	32	11	31.30	408.50	34.38	7.66	181	53	193.30	2 672.30	29.28	7.23
II-1	22	5	8.40	257.00	22.73	3.27	99	75	230.19	1 628.91	75.76	14.13
II-2	22	0	0.00	356.50	0.00	0.00	72	58	53.70	1 093.86	80.56	4.91
II-3	16	4	6.76	221.04	25.00	3.06	61	38	56.55	831.18	62.30	6.80
III-1	16	6	3.50	191.00	37.50	1.83	61	35	30.30	961.12	57.38	3.15
III-2	17	4	10.60	222.80	23.53	4.76	76	34	33.10	1 121.18	44.74	2.95
III-3	24	14	29.50	292.97	58.33	10.07	99	59	138.40	1 476.46	59.60	9.37
IV-1	19	6	17.60	234.12	31.58	7.52	131	62	241.40	1 542.74	47.33	15.65
IV-2	16	7	16.30	221.10	43.75	7.37	121	70	209.00	1 395.81	57.85	14.97
V-1	35	31	121.47	644.45	88.57	18.85	138	107	414.07	2 506.33	77.54	16.52
V-2	19	33	21.20	222.20	57.58	9.54	116	79	312.76	1 490.34	68.10	20.99

程,在深度方向按照0.5 m的厚度进行离散;然后统计不同高程范围内的洞隙溶蚀厚度和岩面溶蚀厚度,其和即是总溶蚀厚度,总溶蚀厚度与该高程范围内的岩层总和之比为溶蚀率实测值;将溶蚀率实测曲线按式(1)拟合可得其拟合关系式。本文所提的洞隙溶蚀厚度、岩面溶蚀厚度和溶蚀率等概念详见文献[13]。

$$r = ae^{b(100-H)} \quad (1)$$

根据文献[14],将强溶蚀带顶部界限溶蚀率(取75%)和底部界限溶蚀率(取25%)代入拟合关系式可求得强溶蚀带的顶部界限高程和底部界限高程,这两个高程之差即为强溶蚀带厚度。每个分区均对详细数据和施工勘察数据分别进行处理(图2和表2)。图2中的遇洞率曲线属于某高程以上的累计曲线。



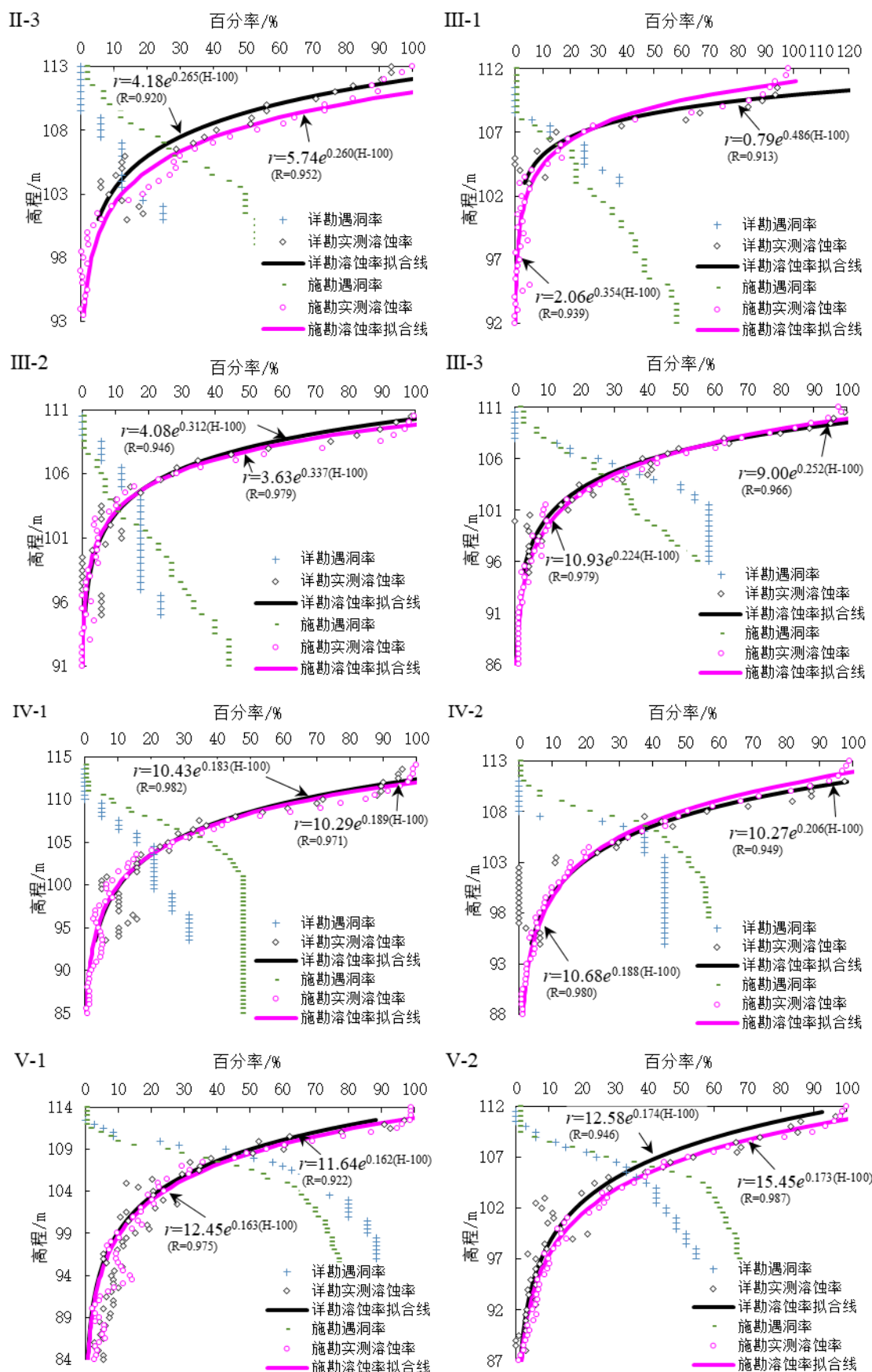


图2 各分区遇洞率及溶蚀率深度分布曲线

Fig. 2 Cave-encountering ratios and depth distribution curve of dissolution ratios in every sub-area

表 2 各分区的强溶蚀带界限参数表
Table 2 Boundary parameters of intense dissolution layers in every sub-area

分区	详细勘察			施工勘察		
	H _{cr} /m	H _{cr} /m	△h _r /m	H _{cr} /m	H _{cr} /m	△h _r /m
I-1	109.5	104	5.5	109.1	104.3	4.8
I-2	109.3	105	4.4	108.5	105	3.6
I-3	109.5	105.6	3.9	109.4	104.9	4.5
I-4	109.2	105.1	4.1	109.4	105.4	4
II-1	107.8	102.8	5	109.3	100.6	8.7
II-2	114.1	109.9	4.2	114.8	109.6	5.2
II-3	110.9	106.8	4.2	109.9	105.7	4.2
III-1	109.4	107.1	2.3	110.2	107.1	3.1
III-2	109.4	105.8	3.5	109	105.7	3.3
III-3	108.4	104.1	4.4	108.6	103.7	4.9
IV-1	110.8	104.8	6	110.5	104.7	5.8
IV-2	109.7	104.3	5.4	110.4	104.5	5.8
V-1	114.7	103.8	10.9	112	103.4	8.6
V-2	109.1	105	4.1	109.2	102.3	6.9

3 结果讨论

3.1 现有岩溶发育程度主要评价指标的局限性

岩溶发育程度评价目前主要有遇洞率、线岩溶率,基岩起伏高差,地表及地下岩溶现象,溶洞个体大小等评价指标。对于建筑场地的微观岩溶现象,岩层出露地表的情况较少,地下岩溶的调查主要依赖于钻探,实际上已转换为线岩溶率和遇洞率进行考虑;而地表宏观岩溶现象则主要针对岩溶地貌进行区分,其工程针对性差,因此岩溶现象在工程实践中基本不作为主要评价指标。对于个体溶洞形态规模方面的评价,通常是作为场地溶洞发育位置的地基处理难度评价因素,一般不会直接作场地总体上的岩溶发育程度评价指标。场地总体的岩溶发育程度目前主要采用线岩溶率、遇洞率和岩面起伏高差。

岩面起伏高差一般由场地相邻钻孔岩面的最大高差确定。该指标的局限性非常明显,主要表现在:即使在岩溶不发育场地,局部的岩面埋深仍有可能存在较大高差,如局部发育的较深的溶沟、溶槽、溶蚀漏斗,更为典型的是钻孔恰好落在溶蚀裂隙中,该孔与邻孔或场地其他孔的高差在 10 m 以上,据此将场地认定为岩溶强发育显然是不合理的。

遇洞率和线岩溶率的定义存在明显缺陷,主要体现在这两个指标的计算深度不确定。根据图 2,不同高程处的遇洞率累计曲线在一定深度范围内随深度增大而增大,这表明勘察深度对遇洞率统计的影响较为显著。一般情况下,钻探深度越深,发现溶洞的概率越大,遇洞率也越大;同时钻探深度越大,单位进尺揭露的洞隙进尺越小。现有规范针对强岩溶的划分界限指标,是相互矛盾的,如表 1 所示,遇洞率均大于 30%,但是线岩溶率均小于 20%。不同场地不同工程的钻探深度并不一致,故这两个指标在不同场地之间不具备可比性。即使在同一场地不同勘察阶段两个指标的计算结果也可能出现非常明显的差异。如表 1,两个勘察阶段的遇洞率绝对误差除 I-3 和 III-3 较小外(误差分别为 5.1% 和 1.27%),其余 12 个分区均大于 10%,平均值高达 26.45%,最大为 II-2 区,达 80.56%。场地在不同勘察阶段的线岩溶率绝对误差虽然较小,但其最大误差也超过 10%(II-1 区和 V-2 区),其相对误差很大,除 I-2 为 24.2%、I-3 为 5.94%、III-3 为 7.47% 及 V-1 为 14.1% 外,其余 10 个分区的相对误差均超过 60%,最大相对误差在 II-1 区,高达 332.1%。

上述关于场地遇洞率和线岩溶率出现显著差异的情况绝非个例,而是工程实践中普遍存在的现象,这种差异已不应视为正常的误差,其数值特征更像是一种随机试验结果,即不同勘察深度和钻孔间距所得到的遇洞率和线岩溶率是不确定的。目前岩溶发育程度评价结果与岩溶地基实际的工程处理难度的不匹配正是上述不确定性评价指标所带来的。

3.2 强溶蚀带作为地基复杂程度评价依据的合理性

强溶蚀带参数求解过程中引入了界限溶蚀,事实上就给出了强溶蚀带划分的一个深度控制标准,从而消除了钻探深度对强溶蚀带参数的影响,使得不同场地所求的强溶蚀带具备了可比性,十分有利于工程经验总结。

岩面起伏和洞隙发育是致使岩溶地基复杂化的两个主要现象,传统的岩溶地基评价主要侧重于洞隙评价,显然有失偏颇。本文划分强溶蚀带的关键依据是地基溶蚀率曲线,该曲线不仅考虑了洞隙发育情况,也考虑了岩面溶蚀情况,因此,将强溶蚀带作为岩溶地基复杂程度评价指标更加符合工程实际情况。

根据表 2,两个勘察阶段的强溶蚀带上界高程误

差为 0.1~2.8 m, 平均 0.71 m; 下界高程误差为 0~2.7 m, 平均 0.64 m; 强溶蚀带厚度误差 0~3.7 m, 平均 1.0 m。强溶蚀带界限高程误差小于 1.0 m 的场地数量占 78.6% 以上; 强溶蚀带厚度误差小于 1.0 m 的场地数量占 71.4%。表明强溶蚀带界限及其厚度总体上具有较好的数值稳定性, 这是因为, 强溶蚀带划分依赖于地基溶蚀率曲线, 而图 2 所反映的各分区溶蚀率曲线的偏差总体不大, 这种曲线偏差幅度较小的现象已经过西南岩溶地区超过 200 个工程实践场地的验证。当然, 强溶蚀带参数的数值稳定性也并非绝对。如在 II-1 区, 两勘察阶段的上界高程相差 1.4 m, 下界高程相差 2.3 m, 强溶蚀带厚度相差 3.5 m, 类似的分区还有 V-1、V-2, 因此, 通过施工勘察校验场地强溶蚀带划分结果仍然十分必要。岩溶地基的复杂性可以从强溶蚀带厚度得到体现, 强溶蚀带越厚, 地基越复杂, 桩基穿越难度越大。从施工过程来看, III-1 及 III-2 等两个分区的桩端入岩深度与施工勘察钻孔推荐深度平均误差较小, 这两个分区的成桩过程总体上相对比较顺利。II-1、V-1 及 V-2 等三个分区的成桩难度较大, 斜孔、塌孔、漏浆、卡钻等成桩事故较为严重, 属于整个项目桩基工程中成桩难度最大的区域。其他分区的成桩难度在上述两类分区的成桩难度之间。从各分区施工勘察阶段的强溶蚀带分布特征来看, III-1 及 III-2 的强溶蚀带厚度分别为 3.1 m 及 3.3 m, 属于场地各分区中强溶蚀带厚度最薄区域, 而 II-1、V-1 及 V-2 等三个分区的强溶蚀带厚度分别为 8.7 m、8.6 m、6.9 m, 为场地强溶蚀带分布厚度最厚区域。可见, 强溶蚀带分布厚度与岩溶地基复杂程度存在明显相关性, 将其作为岩溶发育程度评价指标是合理的。

根据本文已收集的 200 多个场地地质资料分析, 依据强溶蚀带厚度 (Δhr) 划分岩溶发育程度的建议如表 3:

表 3 岩溶发育程度建议表

Table 3 Recommended indexes of evaluation of karst development degree

$\Delta hr/m$	<2.0	2.0~6.0	≥6.0
岩溶发育程度	弱	中	强

根据上述划分建议, 结合表 2 可知, 南宁吴圩机场机场航站楼场地的岩溶发育程度评价结果为: II-1、V-1 及 V-2 等三个分区的强溶蚀带厚度分别为

8.7 m、8.6 m、6.9 m, 可评为岩溶强发育场地; 其他场地的强溶蚀带厚度均大于 3.0 m, 为岩溶中等发育场地, 这与场地桩基施工过程所反映的结果是吻合的。

4 结 论

(1) 现有岩溶发育程度评价指标存在明显局限性, 是导致岩溶发育程度评价结果无法合理反映地基实际复杂程度的根本原因;

(2) 强溶蚀带的存在是岩溶地基复杂化的根本原因。基于地基溶蚀率深度分布曲线划分的地基强溶蚀带, 综合考虑了地基的岩面溶蚀和洞隙发育的主要深度范围, 其分布特征能反映岩溶地基最为复杂的深度范围;

(3) 工程实践表明, 强溶蚀带划分具有统一标准, 不同场地强溶蚀带的划分结果具有统一可比性, 其分布特征与岩溶地基的复杂程度具有明显相关性, 将其作为岩溶发育程度评价指标是合理的;

(4) 建筑地基岩溶发育程度评价标准建议如下: 强溶蚀带厚度小于 3.0 m 时, 判为岩溶弱发育; 不小于 6.0 m 时, 判为岩溶强发育; 其余情况则判为岩溶中等发育。

参考文献

- [1] 郑伟国, 谢毓才, 薛绪标. 岩溶地区桩基选型浅谈[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(sup.2): 404-407
- [2] 韩建强, 李伟科, 黄俊光, 等. 岩溶地区复合地基承载力的计算[J]. 工业建筑, 2019, 49(3): 132-140.
- [3] 秦云, 张军, 解志勇, 等. 昆明岩溶地区桩基设计和施工问题探讨[J]. 建筑技术, 2019, 50(10): 1166-1169.
- [4] 李想, 尹骥, 卫佳琦, 等. 深覆盖岩溶地区高层建筑桩基优化实践[J]. 中国岩溶, 2019, 38(4): 591-599.
- [5] 李永贵. 岩溶地区修建客运专线勘察及设计对策研究[J]. 铁道工程学报, 2017, 34(6): 1-7.
- [6] 杜海龙, 贺茉莉, 罗小斌, 等. 岩溶地区某广场钻孔灌注桩基础补强加固设计与新技术[J]. 中国岩溶, 2019, 38(4): 600-606.
- [7] 缪世贤, 黄敬军, 武鑫, 等. 徐州岩溶地质调查及其发育特征分析[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(2): 172-177.
- [8] 贾龙, 蒙彦, 潘宗源, 等. 钻孔雷达反射成像在岩溶发育场地探测中的应用[J]. 中国岩溶, 2019, 38(1): 124-129.
- [9] 张可能, 张岳, 廖阳, 等. 贵阳某地铁车站岩溶发育特征及突水模式分析[J]. 中国岩溶, 2018, 37(2): 300-306.
- [10] 郭长宝, 郭书泰, 彭涛, 等. 辽宁省大窑湾某建筑场地岩溶发育特征及工程地质条件评价[J]. 中国岩溶, 2010, 29(2): 176-182.

- [11] 罗小杰, 张三定, 沈建. 武汉地区表层岩溶带发育特征[J]. 中国岩溶, 2018, 37(5): 650-658.
- [12] 曹贤发, 张家生, 刘之葵, 等. 岩溶建筑地基溶蚀程度及深度分布规律[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(8): 2787-2792.
- [13] 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.
- [14] 曹贤发, 刘之葵, 李海玲, 等. 岩溶建筑地基强溶蚀带划分[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(6): 91-95.

Evaluation method of development degree based on features of intense dissolution layer

CAO Xianfa^{1,2}, LIU Yukang^{1,2}, LIU Zhikui^{1,2}, ZHANG Binghui^{1,2}

(1. Guangxi Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. College of Civil and Architecture Engineering, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract It is common to make errors in the selection of building foundation in karst terrains. The root reason is that the practical difficulty of karst treatment in foundation cannot be reasonably reflected by the existing evaluation of karst development degree. Taking New Terminal of Nanning Wuxu International Airport as an engineering case, this article analyzes the limitation of the existing evaluation indices of karst degree, demonstrates the advanced rationality of using intense dissolution layer's thickness as the evaluation index of karst degree, and proposes the recommended standard of this evaluation. Results show that the intense dissolution layer, divided by the curve of dissolution ratio depth distribution in a foundation, comprehensively considers the main depth range of dissolution degree of rock surface and the development of cave dissolution, and its distribution characteristics can reflect the depth range of most complex karst foundation. As the evaluation index of karst degree, it is reasonable. Its recommended values are suggested as follows, when the thickness of an intense dissolution layer is less than 3.0 m, more than or equal to 3.0 m and less than 6.0 m, and more than or equal to 6.0 m, the karst degree can be determined as weak development, medium development and strong development, respectively.

Key words karst foundation, karst development degree, intense dissolution layer

(编辑 张玲)