

# 建筑场地岩溶发育程度评价理论的合理性探讨

李海玲\*, 陈相锦#, 张靖豪

桂林理工大学土木与建筑工程学院, 广西 桂林  
Email: \*lhl0102@126.com, #496658941@qq.com

收稿日期: 2021年2月19日; 录用日期: 2021年3月17日; 发布日期: 2021年3月24日

## 摘要

岩溶发育程度反映了建筑地基岩溶发育特征, 是判断建筑地基岩溶问题的主要依据。规范法(现行GB50007-2011建筑地基基础设计规范推荐的岩溶发育程度)的评价结论不能很好地反映岩溶发育对地基及基础处理难度特征, 常常误导岩溶区地基基础设计实践。本文比较分析了规范法和强溶蚀带厚度法等两种岩溶发育程度评价方法的优缺点, 结果表明: 强溶蚀带厚度法能更好地反映场地岩溶发育的实际情况, 能够为岩溶地基设计提供合理的岩溶参数, 克服了规范法的评价指标定义缺陷、评价结论不具可比性等问题。

## 关键词

岩溶发育程度, 线岩溶率, 遇洞率, 强溶蚀带

# Discussion on the Rationality of Evaluation Theory of Karst Development Degree in Construction Site

Hailing Li\*, Xiangjin Chen#, Jinghao Zhang

College of Civil Engineering and architecture, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi  
Email: \*lhl0102@126.com, #496658941@qq.com

Received: Feb. 19<sup>th</sup>, 2021; accepted: Mar. 17<sup>th</sup>, 2021; published: Mar. 24<sup>th</sup>, 2021

\*第一作者。  
#通讯作者。

## Abstract

The degree of karst development reflects the characteristics of karst development of building foundation, which is the main basis for judging the karst problem of building foundation. However, the evaluation conclusion of the code method (the recommended karst development degree in the current GB50007-2011 code for design of building foundation, China) cannot well reflect the difficulty characteristics of karst development on foundation and foundation treatment, and often misleads the design practice of foundation in karst area. The two kinds of karst development degree evaluation method, the code method and the method with strong corrosion thickness as evaluation indicator, are comparative analyzed, the results show that the strong corrosion thickness method can better reflect the actual situation of karst development arena, able to provide karst foundation design with reasonable karst parameters, overcome the defects in the definition of evaluation indexes and the incomparability of evaluation conclusions.

## Keywords

Karst Development Degree, Line Karst Rate, Encountering-Cave Rate among Bores

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

岩溶发育给建筑地基基础带来的不利影响已得到了岩土工程科技界的普遍重视[1] [2] [3]。合理评价场地的岩溶发育程度，有助于工程设计人员认识场地岩溶地质问题的严重程度，是岩溶建筑地基设计、基础选型及优化的基本依据[4] [5] [6]。

岩溶发育程度评价方法和思路起源于铁道部第二勘察设计院[7]，后经过康彦仁[8]、林宗元[9]、Waltham A. C. [10]、李苍松[11]等人探索和发展，逐渐演变成了现行的《建筑地基基础设计规范》推荐的岩溶发育程度方法和标准[12]。经过岩溶地区多年的工程实践检验发现，现有的岩溶发育程度评价方法常常并不能较好地描述场地岩溶发育总体特征，甚至常常得出与实际情况不相符的结论，由此造成岩溶建筑地基基础选型设计失败的案例屡见不鲜。为此，曹贤发等在深入研究了建筑岩溶地基溶蚀程度深度变化规律[13] [14]的基础上，结合已有的研究及岩溶地区岩土工程经验[15]，建立了与传统方法不同的岩溶发育程度评价理论和标准[16] [17]。为使岩溶发育程度评价更好地服务于岩溶建筑地基基础设计，深入分析目前岩溶发育程度评价理论的合理性就显得十分必要。

本文首先从评价指标定义、指标独立性、评价结果的合理性等角度深入分析了规范[12]推荐的岩溶发育程度评价方法性的合理性。然后以具体工程实例为背景，探讨了基于强溶蚀带厚度为评价指标的岩溶发育程度评价方法的特征和优点，并推荐了岩溶发育程度评价的最有方法。本文研究对于岩溶地区建筑地基基础工程实践具有积极意义。

## 2. 规范法岩溶发育程度评价缺陷

线岩溶率  $R$  和遇洞率  $\alpha$  定义式[12]为

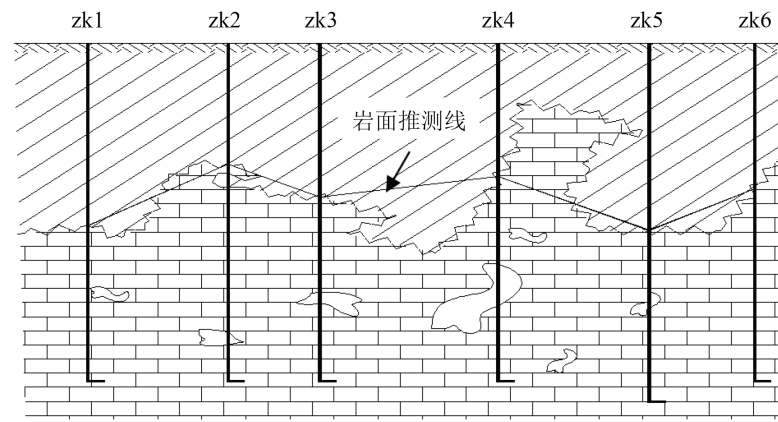
$$R = \frac{D}{L} \times 100\% \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{n'}{n} \times 100\% \quad (2)$$

式中： $D$ 为洞隙累计进尺，m； $L$ 为岩层钻探总进尺； $n'$ 为遇洞钻孔数； $n$ 为钻孔总数。

上述定义中，钻探深度是影响线岩溶率  $R$  和遇洞率  $\alpha$  计算值的关键因素。由于岩溶发育具有随深度增大而减弱的趋势，浅层岩层溶蚀程度一般大于深层岩层，因此钻探深度越大，尽管揭露的洞隙进尺  $D$  增大，当其增加速度小于总进尺  $L$  增加速度，按式(1)求得的线岩溶率反而是减小的。对于遇洞率  $\alpha$  来说，勘察深度越大，钻孔揭露洞隙的概率越高，遇洞率  $\alpha$  越大。在式(1)(2)的定义中，并没有规定勘察深度的确定标准，不同场地的钻探深度要求可能存在较大差异，这就导致不同场地之间的线岩溶率和遇洞率不具可比性。可见，勘察深度标准不统一是线岩溶率和遇洞率的主要缺陷。

岩溶发育导致地基岩面起伏不连续，从岩面起伏程度评价岩溶发育程度的思路是合理性的。规范[12]将相邻钻孔高程差作为评价指标却值得商榷。在溶蚀程度较高的复杂岩溶地基中，岩面不连续起伏剧烈，岩面形态特征十分复杂。如图1，zk4和zk3之间及zk4和zk5之间的岩层实际起伏情况与推测情况差异显著，相邻钻孔岩面连线已不能合理反映岩面起伏情况。这种情况在复杂岩溶地基中并非特例。另一种常见的情况是，场地总体上岩面起伏并不大，但局部存在较大的岩面高程差，由此局部较大高程差来判断场地岩溶为强发育显然也是不合适的。可见相邻钻孔岩面高程差并不一定能真实反映两孔之间岩面起伏的真实情况，同时场地局部地段高程差也不能合理刻画整体的岩面溶蚀情况，因此其指标缺陷是显而易见的。



**Figure 1.** Discontinuous undulation characteristics of complex karst foundation rock face

**图 1.** 复杂岩溶地基岩面不连续起伏特征图

遇洞率、线岩溶率和相邻钻孔高程差并不是相互独立的指标。岩溶区工程实践已表明，在勘察深度一定的情况下，其中一个指标增大，其他两个指标也会增大。遇洞率和线岩溶率反映的是场地洞隙发育程度，相邻钻孔高程差反映的是岩面溶蚀程度。洞隙发育和岩面溶蚀在浅层岩溶中，洞隙顶部溶塌可将洞壁转化为岩面并加剧岩面起伏程度。这说明这三个主要评价指标存在较为密切的联系，每个指标仅刻画了岩溶地基溶蚀程度的某一方面特征，如线岩溶率仅反映钻探进尺中揭露的洞隙溶蚀情况，遇洞率反映的是平面上随机抽样点的溶蚀特征，相邻钻孔高程差反映的是岩面溶蚀特征，因此这三个指标并非独立指标，将其视为岩溶发育评价模型的独立指标必然会导致评价结论以偏概全的情况，显然是不合理的。

## 不能划分出场地岩溶主要地质问题的深度范围

工程实践和研究表明,岩溶发育具有随深度衰减的特征,地基溶蚀程度在一定深度以下较弱,岩溶地基可划分如下图2的地层结构[16]。强溶蚀带即为岩溶地质问题的主要深度范围。将该深度范围划分出来可提高地基处理及基础设计的工程针对性,如基坑开挖深度超过强溶蚀带深度时,即使是强发育场地,但工程处理上仍可视为弱发育场地。然而,规范评价方法是无法将该强溶蚀带深度参数划分出来的,这就导致了即使为岩溶发育程度评价进行了大量工作,但依然无法为地基及基础工程设计提供有用岩溶地质参数。

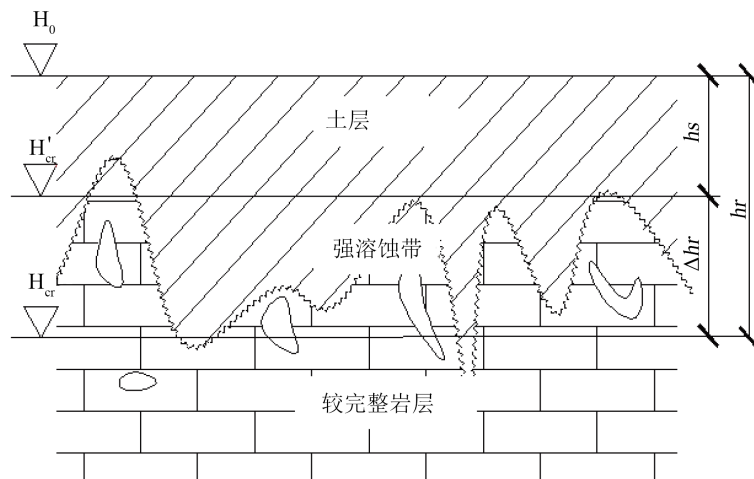


Figure 2. Diagram of Karst ground structure  
图 2. 岩溶地基结构示意图

## 3. 岩溶发育程度评价的优化模型

### 3.1. 工程概况

凌云城市花园小区 1#楼~3#楼位于百色市凌云县茶乡大道,楼高 7 层,钻孔揭露场地地层自上而下为第四系河流冲积成因形成的填土、粉土、卵石、粉质粘土,下伏泥盆系微风化灰岩。场地开阔,地形有一定起伏,地面高程 437.84~442.77 m,相对高差约 4.90 m。场地北侧为旦村河,东侧为澄碧河,西、南两侧为茶香大道。东、北两侧河岸已建有片石护坡,属河漫滩地貌。场地地下水赋存于卵石③层中,属孔隙潜水,主要由降雨及地表河流侧向补给,与邻近河水呈互补联系,含水层厚度大,渗透系数大,补给来源充足,水量丰富,稍具承压性,稳定水位高程为 435.89~436.67 m,水位年变化幅度为 1~3 m。工程概况见下。

Table 1. The summary of projects  
表 1. 工程数据概况表

楼号	钻孔数	遇洞率/%	线岩溶率/%	$H_0$ /m	a	b	R	$H'_{cr}$ /m	$H_{cr}$ /m	$\Delta h_s$ /m	岩溶发育程度
1#	11	9.09	2.63	416	136.11	-0.084	0.984	408.90	395.83	13.07	强
2#	14	0	0	416	397.33	-0.099	0.959	399.15	388.06	11.09	强
3#	20	5.00	0.92	416	122.59	-0.102	0.922	411.18	400.41	10.76	强

### 3.2. 场地岩溶发育程度评价

文献[17]的岩溶发育程度评价步骤如下:

首先, 根据勘察钻孔资料按文献[14]的方法求得本 1#~3#楼场地的溶蚀率深度分布函数曲线, 见图 3, 函数形如式(3), 各分区拟合参数见表 1。

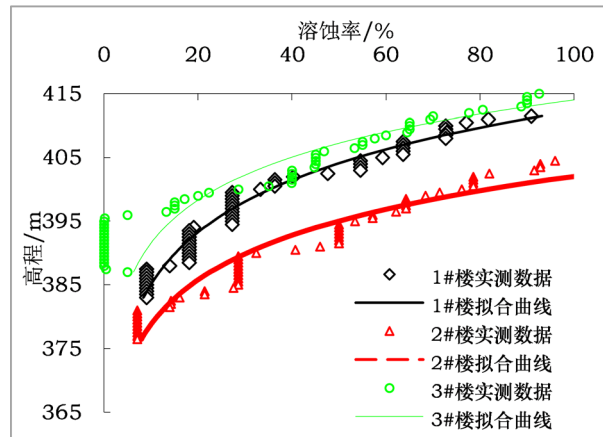


Figure 3. The curves of relationship between dissolution ratio and elevation

图 3. 溶蚀率深度分布曲线

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

式中:  $H$  为高程;  $H_0$  为起算高程;  $a$ 、 $b$  为拟合系数,  $r$  为溶蚀率。

然后, 按式(4)计算各分区场地强溶蚀带上限高程、下限高程和强溶蚀带厚度[16]。

$$\begin{cases} H'_{cr} = H_0 - \frac{4.317 - \ln a}{b} \\ H_{cr} = H_0 - \frac{3.219 - \ln a}{b} \\ \Delta h_s = H'_{cr} - H_{cr} \end{cases} \quad (4)$$

式中  $H'_{cr}$  为强溶蚀带上界高程,  $H_{cr}$  为强溶蚀带下界高程,  $\Delta h_s$  为强溶蚀带厚度。

最后, 根据文献[17]建议标准可判定各分区的岩溶发育程度等级, 其建议评价标准为: 强溶蚀带厚度  $\Delta h_s$  分别为  $<3.0$  m、 $3.0 \leq \Delta h_s < 6.0$  m、 $\geq 6.0$  m 时分别为岩溶弱发育, 中等发育和强发育。由此可判定本工程各分区均为岩溶强发育场地。

从上述评价过程可知, 在文献[17]的评价模型中只有一个评价指标——强溶蚀带厚度, 避免了多个评价指标之间的相互依赖性。该评价指标综合反映了岩面溶蚀特征和洞隙发育程度, 其上限高程和下限高程反映了场地岩溶问题分布的主要深度范围, 因此其评价结果具有很强的工程针对性。地基溶蚀率深度分布函数曲线是这些参数求解的基本依据, 在勘察深度超过强溶蚀带下限高程的前提下, 该曲线受勘察深度的影响不大, 因而这些岩溶参数的取值是确定的, 由此判定的岩溶发育程度评价结果在不同场地中具有可比性, 这十分有利于岩溶地区工程经验的总结和交流。

若按规范推荐的标准[12]进行评价的话, 上述场地 1#~3#楼场地线岩溶率为 0%~2.63%, 小于 5%; 钻孔遇洞率为 0%~9.09%, 小于 10%; 综合两个指标则均判定为岩溶弱发育。然而后续桩基础施工表明,

场地岩面起伏很大,也存在大型溶洞发育,桩基施工困难,场地应属于复杂岩溶地基,其发育程度应为强烈等级。可见,规范法的评价并未合理反映场地岩溶发育特征,而文献[17]建议方法则得到了合理结论。

#### 4. 结论

1) 勘察深度直接影响了钻孔见洞率和线岩溶率的计算结果,相邻钻孔高程差常常不能合理反映复杂岩溶地基两孔之间的岩面起伏情况,这三个参数的定义缺陷十分明显。

2) 现行地基基础设计规范以钻孔见洞率、线岩溶率和相邻钻孔高程差作为岩溶发育程度评价指标,评价指标之间的独立性差,其评价结果在不同场地之间不具可比性,不能合理反映岩溶问题实际分布的主要深度范围,甚至常常不能合理反映地基实际溶蚀情况。

3) 以强溶蚀带厚度作为单一评价指标的岩溶发育程度评价方法,其评价指标受勘察深度影响较小,能够合理反映场地岩面和洞隙溶蚀特征及其岩溶地质问题的主要深度范围,能为岩溶地基设计提供合理的岩溶参数,因此这是目前最为先进合理的岩溶发育程度评价方法。

#### 基金项目

广西自然科学基金面上项目(No.2018GXNSFAA138139)。

#### 参考文献

- [1] 黑晓丹, 苟斌斌, 孙海峰, 殷磊, 吕树方, 朱权秀. 贵州某岩溶地区结构地基基础设计研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(3): 126-131.
- [2] 彭卫平, 温忠义, 彭禧, 刘伟, 张庆华. 红层岩溶场地高层建筑复合地基设计[J]. 建筑科学, 2020, 36(S1): 45-51.
- [3] 王家全, 柏蕾, 林志南, 唐毅, 王晴. 岩溶区下伏溶洞加筋土地基承载破坏特性分析[J]. 自然灾害学报, 2020, 29(5): 173-181.
- [4] 李东存, 廖耘, 古兰芳, 沙祥林. 刚性桩复合地基基础在岩溶地区某大型游乐项目中的应用[J]. 建筑结构, 2020, 50(4): 136-139.
- [5] 韩建强, 李伟科, 黄俊光, 王维俊, 张晓伦. 岩溶地区复合地基承载力的计算[J]. 工业建筑, 2019, 49(3): 132-140.
- [6] 陶景晖, 金如元, 陆飞, 穆保岗, 卢中强, 戴国亮. 岩溶地区高层建筑刚性桩复合地基现场试验研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(6): 163-174.
- [7] 铁道部第二勘测设计院. 岩溶工程地质[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1984.
- [8] 康彦仁, 项式均, 陈健. 中国南方岩溶塌陷[M]. 南宁: 广西科学技术出版社, 1992.
- [9] 林宗元. 岩土工程勘察设计手册[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1996.
- [10] Waltham, A.C. and Fookes, P.G. (2003) Engineering Classification of Karst Ground Conditions. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 36, 101-118. <https://doi.org/10.1144/1470-9236/2002-33>
- [11] 李苍松, 高波, 王石春. 岩溶围岩分级初步探讨[J]. 工程地质学报, 2006, 14(6): 808-814.
- [12] 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.
- [13] 曹贤发, 张家生, 刘之葵, 孟飞, 邓国栋. 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.
- [14] 曹贤发, 张家生, 刘之葵, 王华杰, 孟飞. 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.
- [15] 曹贤发, 刘之葵, 李海玲. 西南岩溶区建筑地基溶蚀程度深度分布规律[J]. 桂林理工大学学报, 2016, 36(2): 253-259.
- [16] 曹贤发, 刘之葵, 李海玲. 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.
- [17] 曹贤发, 刘玉康, 刘之葵, 张炳晖. 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.