

文章编号: 1674—8247(2020)06—0001—05

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2020.06.001

基于 BQ 值修正的岩溶隧道围岩分级方法研究与应用

吴 敏¹ 黄 智¹ 刘大刚²

(1. 云桂铁路云南有限责任公司, 昆明 650500; 2. 西南交通大学, 成都 610031)

摘 要:岩溶隧道围岩质量评价是困扰岩溶隧道支护结构设计的重难点问题之一,本文以 BQ 值围岩分级方法为基础,分析研究了岩溶对岩石坚硬程度、岩体完整程度两项围岩质量指标的影响规律及特征,并以此构建了基于 BQ 值修正的岩溶围岩分级方法,通过工程实例验证,检验了分级方法的合理性。研究成果对岩溶隧道围岩质量评价及分级具有一定的参考和借鉴价值。

关键词:岩溶隧道; 围岩; 分级方法; 质量评价; BQ 值修正

中图分类号:U451⁺.2 **文献标志码:**A

Research and Application of Surrounding Rock Classification Method of Karst Tunnel Based on BQ Value Correction

WU Min¹ HUANG Zhi¹ LIU Dagang²

(1. YunnanGuangxi Railway Yunnan Co., Ltd., Kunming 650500, China;

2. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The quality evaluation of surrounding rock of karst tunnel is one of the most difficult problems in the design of supporting structure of karst tunnel. Based on BQ value-based surrounding rock classification method, this paper analyzes and studies the influence law and characteristics of karst on rock hardness and rock integrity, and constructs a karst surrounding rock classification method based on BQ value correction. The rationality of the classification method is verified by engineering examples. The research results have certain reference value for the quality evaluation and classification of surrounding rock of karst tunnel.

Key words: karst tunnel; surrounding rock; classification method; quality evaluation; BQ value correction

岩溶是可溶岩地区隧道修建中常见的一种不良地质类型,给隧道建设造成了诸多困扰,因此,隧道岩溶问题一直以来都深受工程界人士的关注。在隧道岩溶众多问题中,与岩溶隧道支护结构设计紧密相关的岩溶围岩质量评价与分级已成为岩溶隧道研究的焦点^[1-2]。

岩溶隧道围岩分级实质为岩溶围岩的质量评价问

题。我国现有的围岩分级方法未充分考虑岩溶等因素对围岩分级的影响,存在一定的缺陷。近年来,相关学者针对岩溶围岩分级方法开展了研究,研究思路与途径大体分为两类:一是以现有围岩分级方法为基础,考虑岩溶对围岩质量的影响,融合建立适用于岩溶围岩的围岩分级方法^[3-6];二是结合岩溶特征,采用针对性的指标建立岩溶围岩分级方法^[7-9]。总体而言,岩溶

收稿日期:2020-08-25

作者简介:吴敏(1964-),男,教授级高级工程师。

基金项目:国家自然科学基金项目(51408008)

引文格式:吴 敏,黄 智,刘大刚. 基于 BQ 值修正的岩溶隧道围岩分级方法研究与应用[J]. 高速铁路技术,2020,11(6):1-5.

WU Min, HUANG Zhi, LIU Dagang. Research and Application of Surrounding Rock Classification Method of Karst Tunnel Based on BQ Value Correction [J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(6):1-5.

围岩分级方法的研究仍处于探索和发展阶段,积极开展岩溶围岩分级方法研究显得十分必要。

本文以岩溶围岩作为研究对象,通过开展岩溶对围岩力学特性的影响分析,明确了岩溶对围岩分级指标的影响规律及特征,建立了基于BQ值修正的岩溶围岩定量分级方法,可指导岩溶隧道围岩质量评价与分级。

1 岩溶对围岩力学特性的影响分析

为确定岩溶对围岩分级指标的影响规律及特征,本文采用数值仿真试验方法开展岩溶对围岩力学特性的影响分析。数值仿真试验模型尺寸的长、宽、高分别取50 m,模型单元采用solid95,D-P准则,模型内溶洞空间位置及其大小均采用随机分布函数进行设置生产,溶洞的模拟采用溶洞范围内单元杀死的方式实现^[10]。试验工况主要考虑围岩条件和岩溶发育程度两种因素,围岩条件考虑Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ3种围岩级别;岩溶发育程度采用体岩溶率指标进行表征,考虑0%、1%、3%、5%4种体岩溶率工况。

研究中,模型开启大变形效应,采用位移加载方式,单次加载位移为0.5 m。通过计算,获取不同围岩级别、不同体岩溶率工况下的围岩应力应变曲线。结果表明,不同围岩级别的应力应变曲线具有相似性,典型围岩级别数值仿真试验曲线如图1所示。

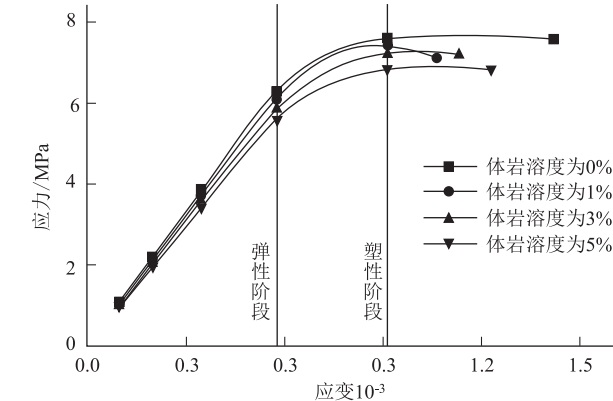


图1 岩溶围岩应力应变数值仿真试验曲线图

由图1可以看出,岩溶围岩应力应变曲线可大致分为3个阶段,即弹性阶段、塑性阶段和屈服破坏阶段。与完整围岩相比,岩溶围岩的变形模量值、极限应力值(可视为抗压强度值)均有所下降,影响规律具体表现为岩溶越发育,下降程度越大。

因围岩变形模量与岩体完整程度相关,而围岩抗压强度则与岩石坚硬程度相关,故对岩溶围岩分级而言,可将岩溶作为围岩分级修正指标加以考虑,重点考

虑岩溶对岩石坚硬程度和岩体完整程度指标的修正影响。

2 岩溶对围岩分级指标的定量影响分析

2.1 岩溶对岩石坚硬程度的定量影响分析

为定量分析岩溶对岩石坚硬程度指标的影响,引入抗压强度折减系数,将其定义为岩溶围岩抗压强度与完整围岩抗压强度之比,即 R_c'/R_c 。依据各种围岩条件下岩溶围岩应力应变曲线数值仿真试验结果,绘制不同围岩级别条件下,体岩溶率与抗压强度折减系数间相关性曲线,如图2所示。

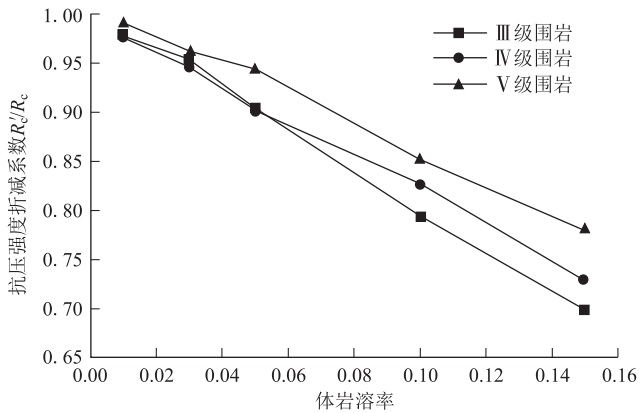


图2 不同围岩级别条件下体岩溶率对抗压强度的影响曲线图

通过回归分析,建立抗压强度折减系数与体岩溶率间的定量关系表达式:

$$R_c' = \frac{1}{1 + b_i P} R_c \quad (i = 1, 2, 3)$$

式中: R_c' ——岩溶围岩的抗压强度;
 P ——岩溶围岩的体岩溶率;
 R_c ——完整围岩的抗压强度;
 b_i ——公式拟合参数。

不同围岩条件下 b_i 的取值如表1所示。

表1 不同围岩条件下参数 b_i 取值表

围岩条件	取值	标准差	95%置信区间		相关性系数 R^2
			下限	上限	
Ⅲ	2.6	0.18	2.12	3.10	0.97
Ⅳ	2.3	0.10	2.01	2.56	0.99
Ⅴ	1.7	0.12	1.40	2.07	0.97

由图2和表1可知:(1)围岩抗压强度随围岩体岩溶率的增加整体呈降低趋势;(2)体岩溶率相同,围岩级别越高,则其抗压强度折减系数越小;(3)各级围岩回归公式拟合度较高,可采用回归公式对各级围岩

抗压强度折减系数进行计算。

基于上述分析,获得不同围岩级别条件下,岩溶发育程度对岩石坚硬程度的影响特征如表2~表4所示。

表2 岩溶对Ⅲ级围岩坚硬程度的影响表

定性描述	R_c/MPa	体岩溶率取值折减系数			
		微发育 (1%)	弱发育 (3%)	中等发育 (10%)	强烈发育 (15%)
		0.98	0.93	0.80	0.72
极硬岩	>60	>59	>56	>48	>43
硬岩	30~60	29~59	28~56	24~48	22~43
较软岩	15~30	15~29	14~28	12~24	11~22

表3 岩溶对Ⅳ级围岩坚硬程度的影响表

定性描述	R_c/MPa	体岩溶率取值折减系数			
		微发育 (1%)	弱发育 (3%)	中等发育 (10%)	强烈发育 (15%)
		0.98	0.94	0.81	0.75
极硬岩	>60	>59	>56	>49	>45
硬岩	30~60	29~59	28~56	24~49	22~45
较软岩	15~30	15~29	14~28	12~24	11~22
软岩	5~15	5~15	5~14	4~12	4~11

表4 岩溶对Ⅴ级围岩坚硬程度的影响表

定性描述	R_c/MPa	体岩溶率取值折减系数			
		微发育 (1%)	弱发育 (3%)	中等发育 (10%)	强烈发育 (15%)
		0.98	0.95	0.85	0.80
较软岩	15~30	15~29	14~29	13~26	12~24
软岩	5~15	5~15	5~14	4~13	4~12

由表2~表4可知,岩溶越发育,对围岩坚硬程度的影响越大,围岩级别越高,影响程度也越为显著。

2.2 岩溶对岩体完整程度的定量影响分析

为定量分析岩溶对围岩变形模量指标的影响,引入变形模量折减系数参数,将其定义为岩溶围岩变形模量与完整围岩变形模量之比,即 E_m/E_r 。根据各种围岩条件下岩溶围岩应力应变曲线数值仿真试验结果,绘制不同围岩级别条件下,岩溶围岩变形模量折减系数随体岩溶率间相关性曲线如图3所示。

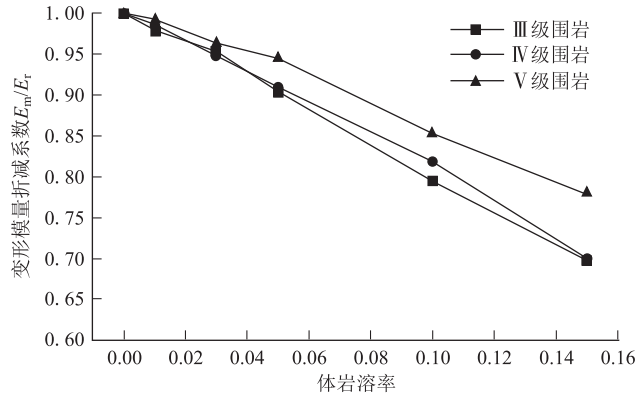


图3 不同围岩级别条件下体岩溶率对变形模量的影响图

通过回归分析,建立变形模量折减系数与体岩溶率之间的关系公式:

$$E_m = \frac{1}{1 + c_i P} E_r \tag{2}$$

式中: E_m —岩溶围岩变形模量;

P —岩溶围岩的体岩溶率;

E_r —完整围岩变形模量;

c_i —公式拟合参数。

不同围岩条件下 c_i 的取值如表5所示。

表5 不同围岩条件下参数 c_i 取值表

围岩条件	取值	标准误差	95%置信区间		相关性系数 R^2
			下限	上限	
Ⅲ	2.61	0.16	2.21	3.01	0.98
Ⅳ	2.12	0.08	1.90	2.34	0.99
Ⅴ	1.73	0.11	1.45	2.01	0.97

由图3和表5可知:(1)围岩变形模量随围岩体岩溶率的增加整体呈降低趋势;(2)体岩溶率相同,围岩级别越高,则其变形模量折减系数越小;(3)各级围岩回归公式拟合度较高,可采用回归公式对各级围岩变形模量折减系数进行计算。

基于上述分析可知,体岩溶率与岩体完整程度之间的关系可转化为围岩变形模量与岩体完整程度之间的关系问题。需要说明的是,用以表征岩体完整程度的定量指标有多种,如围岩弹性纵波速度 K_v 、岩石质量指标 RQD 等,各定量指标间具有良好的相关性和对应性。根据相关学者的研究成果^[11-12],围岩变形模量与岩石质量指标 RQD 间具有良好的相关性,两指标间的经验公式为:

$$E_m/E_r = 0.023\ 1RQD - 1.32 \tag{3}$$

根据式(3),分析不同围岩级别条件下岩溶发育程度对岩体完整程度的影响特征,如表6~表8所示。

表6 岩溶对Ⅲ级围岩完整程度的影响表

定性描述	K_v	体岩溶率取值折减系数			
		微发育 (1%)	弱发育 (3%)	中等发育 (10%)	强烈发育 (15%)
完整	$K_v > 0.75$	无	降低0.06	降低0.16	降低0.2
较完整	$0.55 \leq K_v \leq 0.75$	无	降低0.05	降低0.07	降低0.14
较破碎	$0.35 \leq K_v \leq 0.55$	无	降低0.05	降低0.12	降低0.18

表7 岩溶对Ⅳ级围岩完整程度的影响表

定性描述	K_v	体岩溶率取值折减系数			
		微发育 (1%)	弱发育 (3%)	中等发育 (10%)	强烈发育 (15%)
完整	$K_v > 0.75$	无	降低0.06	降低0.14	降低0.2
较完整	$0.55 \leq K_v \leq 0.75$	无	降低0.05	降低0.08	降低0.12
较破碎	$0.35 \leq K_v \leq 0.55$	无	降低0.05	降低0.09	降低0.16
破碎	$0.15 \leq K_v \leq 0.35$	无	降低0.05	降低0.09	降低0.18

表8 岩溶对V级围岩完整程度的影响表

定性描述	K_v	体岩溶率取值折减系数			
		微发育 (1%)	弱发育 (3%)	中等发育 (10%)	强烈发育 (15%)
较破碎	$0.35 \leq K_v \leq 0.55$	无	降低0.03	降低0.09	降低0.16
破碎	$0.15 \leq K_v \leq 0.35$	无	降低0.03	降低0.06	降低0.14

由表6~表8可知,岩溶微发育对围岩完整程度基本无影响,其它情况下,发育程度越高,围岩完整程度降低越大,且同等发育情况对各级围岩完整程度的影响不尽相同。

3 岩溶围岩分级方法建立

借鉴围岩BQ定量分级法思路,岩溶围岩分级方法可分为两步实施。

(1) 基本分级

依据现行规范,根据围岩基本分级指标(岩石坚硬程度和岩体完整程度)计算围岩基本质量指标 BQ 值,再进行围岩基本级别划分。

(2) 级别修正

依据围岩修正分级指标(地下水状态、结构面产状状态、初始地应力状态和岩溶发育程度状态)修正围岩基本质量指标 BQ 值,获取岩溶围岩质量指标值 $[BQ]_{\text{溶}}$,再进行围岩级别划分。

常规修正指标可按现行规范的修正方法进行修正,岩溶发育程度及其影响可引入参数 $\Delta BQ_{\text{溶}}$ 进行修正,并按式(4)进行计算。

$$[BQ]_{\text{溶}} < [BQ] \Delta BQ_{\text{溶}} \tag{4}$$

式中: $[BQ]_{\text{溶}}$ ——考虑岩溶发育程度及其影响修正指标后的岩溶围岩质量指标值;

$[BQ]$ ——现行规范法考虑地下水出水状态、结

构面产状状态、初始地应力状态三项修正指标后的岩溶围岩质量指标值;
 $\Delta BQ_{\text{溶}}$ ——岩溶发育程度及其影响修正指标的修正值,如表9所示。

表9 $\Delta BQ_{\text{溶}}$ 取值表

围岩条件	岩溶发育程度		
	弱发育	中等发育	强烈发育
Ⅲ	18~27	35~77	62~116
Ⅳ	4~26	15~64	23~107
Ⅴ	9~10	18~23	39~47

4 岩溶围岩分级方法工程应用

某铁路隧道岩溶发育段为YDK 35+580~YDK 35+730,区段内灰岩节理裂隙发育,岩体破碎,岩溶发育,主要分布在拱顶、洞身及隧底。溶洞为填充或半填充,填充物为粘土,软塑,地下水不发育。溶洞空间位置示意如图4所示。

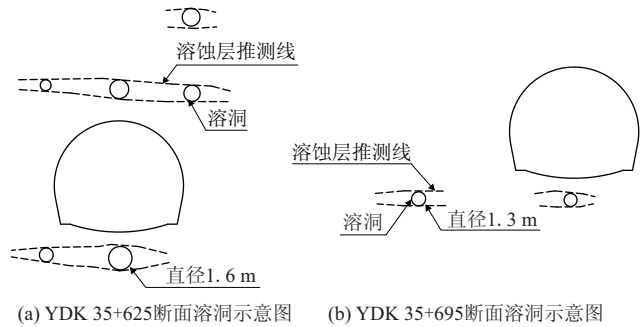


图4 隧道溶洞空间位置示意图

针对上述岩溶发育段围岩,分别对原设计围岩分级、岩溶围岩分级和实际施工围岩分级结果进行综合对比,结果如表10所示。

表10 某铁路隧道岩溶围岩分级结果对比分析表

隧道里程	围岩情况			岩溶情况				岩溶发育程度	设计围岩级别	岩溶围岩分级		施工采用围岩级别
	岩石抗压强度/MPa	岩体完整程度	地下水	岩溶位置	岩溶形态	岩溶大小	充填物			$\Delta BQ_{\text{溶}}$	分级结果	
YDK 580~YDK 620	较软岩 15~30	破碎	滴水	隧顶	筒状	直径1 m	无	弱	V	10	V	V
YDK 620~YDK 660	较软岩 15~30	破碎	滴水	隧底	球形	直径30 cm	碎屑	弱	V	10	V	V
YDK 660~YDK 680	较软岩 15~30	破碎	滴水	隧底	球形	直径30 cm	碎屑	弱	V	10	V	V
YDK 680~YDK 700	较软岩 15~30	破碎	滴水	隧底	球形	直径30 cm	碎屑	弱	V	10	V	V
YDK 700~YDK 730	硬岩 30~60	破碎	涌水	左拱肩	沟状	纵向13 m	水	中等	Ⅳ	64	V	V

由表10可以看出,采用岩溶围岩分级方法的分级结果,与施工现场采用的围岩分级结果吻合良好,对施工现场围岩级别判定起到了积极的指导作用,同时也验证了岩溶围岩分级方法的合理性。

5 结论

本文通过对基于BQ值修正的岩溶隧道围岩分级

方法的研究,得到如下主要结论:

(1)通过岩溶对围岩力学特性的影响分析,发现岩溶对围岩质量的影响主要表现为对围岩变形模量(弹性模量)和围岩抗压强度的影响。因此,在岩溶围岩分级中,可将岩溶发育程度及其影响作为修正指标进行考虑,主要对岩石坚硬程度和岩体完整程度指标进行修正。

(2)通过岩溶对岩石坚硬程度、岩体完整程度的定量影响分析,建立了岩溶影响的定量关系表达式,为岩溶围岩坚硬程度、完整程度定量评价提供了支撑。

(3)考虑岩溶对围岩坚硬程度、完整程度指标的影响,给出了基于BQ值修正的岩溶围岩分级方法,可为岩溶围岩分级提供参考和借鉴。

参考文献:

[1] TB 10003-2016 铁路隧道设计规范[S].
TB 10003-2016 Code for Design of Railway Tunnel [S].

[2] TB 10027-2012 铁路工程不良地质勘察规程[S].
TB 10027-2012 Code for Unfavorable Geological Condition Investigation of Railway Engineering[S].

[3] 李哲. 低山丘陵区铁路隧道设计与施工关键技术研究[D]. 成都:西南交通大学,2018.
LI Zhe. Study on Design Methodology and Key Technologies of Railway Tunnels in Low Mountains and Hills[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University, 2018.

[4] 张凯. 岩溶隧道围岩动态分级方法及应用研究——以叙大铁路岩溶隧道为例[D]. 成都:成都理工大学,2012.
ZHANG Kai. Study on Dynamic Classification Method of Surrounding Rock of Karst Tunnel and Its Application-Taking the Karst Tunnels in Xuda Railway as Example [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology,2012.

[5] 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.
LI Cangsong, GAO Bo, WANG Shichun. Preliminary Classification Method for Rock Mass Surrounding Karsts[J]. Journal of Engineering Geology, 2006, 14(6): 808-814.

[6] 管洪良. 岩溶隧道围岩分级系统研究[D]. 重庆:重庆大学,2011.
GUAN Hongliang. Study on Surrounding Rock Classification System of

Karst Tunnel[D]. Chongqing :Chongqing University,2011.

[7] 宣佳良. 岩溶区公路隧道围岩分级专家系统研发与应用[D]. 南宁:广西大学,2014.
YI Jialiang. Development and Application of Expert System for Surrounding Rock Classification of Highway Tunnel in Karst Area [D]. Nanning:Guangxi University,2014.

[8] 李结全,侯福昌,潘鑫,等. 岩溶区公路隧道施工围岩分级指标体系研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2013, 38(1): 151-156.
LI Jiequan, HOU Fuchang, PAN Xin, et al. Research on Classification Index System of Surrounding Rocks for Highway Tunnel Construction in Karst Areas [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2013, 38(1): 151-156.

[9] 史雅栋. 基于跨孔CT技术的岩溶发育区岩体质量评价方法研究[D]. 南京:南京大学,2014.
SHI Yadong. A Rock Mass Quality Evaluation Method Research in Karst Areas Based on the Technique of Cross-hole Seismic CT[D]. Nanjing :Nanjing University,2014.

[10] 于丽,李哲,王明年,等. 岩溶弱发育对围岩力学参数的影响规律研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(2): 435-443.
YU Li, LI Zhe, WANG Mingnian, et al. Study on the Influence of Weak Karst Development on Mechanical Parameters of Surrounding Rock [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(2): 435-443.

[11] 宋彦辉,巨广宏,孙苗. 岩体波速与坝基岩体变形模量关系[J]. 岩土力学, 2011, 32(5): 1507-1512, 1567.
SONG Yanhui, JU Guanghong, SUN Miao. Relationship between Wave Velocity and Deformation Modulus of Rock Masses[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(5): 1507-1512, 1567.

[12] HOEK E, BROWN E T. Practical Estimates of Rock Mass Strength [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34(8): 1165-1186.