

坝陵河大桥西锚洞岩溶围岩分级

李苍松, 王石春

(中铁西南科学研究院有限公司, 四川 成都 610031)

摘要: 坝陵河大桥隧道锚洞工程周边围岩的岩溶较发育, 勘察设计阶段确定其围岩级别为 II~IV 级。根据实际开挖所揭露的岩溶状况, 需要调整超前支护和初期支护参数, 以保证锚洞施工安全。在岩溶地质预报和一般地下工程岩体质量分级基础上, 专门针对围岩为不同岩溶发育状态的岩体进行质量分级修正, 建立锚洞岩溶围岩分级的物理模型和数学模型。根据岩体波速测试、岩体抗压强度以及岩溶发育程度修正系数等参数的确定, 计算锚洞岩溶围岩级别主要为 V 级。事实上, 在整个锚洞施工过程中, 均采用超前小导管、超前锚杆、型钢拱架、挂网及喷射混凝土等强支护措施, 锚洞开挖采用台阶法分步开挖。锚洞开挖完毕后对周边的破碎岩体及溶洞进行了注浆加固处理, 也就是说, 锚洞施工的超前支护和初期支护参数实际均按照 V 级围岩实施。实践表明, 本工程岩溶围岩分级是合理的, 对其他同类工程可提供借鉴。

关键词: 岩石力学; 岩溶; 地质预报; 围岩分级

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2009)06 - 1208 - 05

KARST ROCK CLASSIFICATION FOR WEST ANCHOR TUNNEL OF BALINGHE BRIDGE

LI Cangsong, WANG Shichun

(China Railway Southwest Research Institute Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: Karst is fully developed in the surrounding rock of west anchor tunnel of Balinghe Bridge. The rock classification is considered as grades II to IV during the survey. In accordance with the actual karst excavation, advanced and initial supporting parameters should be adjusted for construction safety of the anchor tunnel. On the basis of karst geological forecast and general underground engineering rock mass classification, the physical and mathematical models of karst rock classification for the anchor tunnel are established, aiming at amending rock mass classification for different kinds of karst rocks. According to the tests of rock velocity, rock strength, as well as the extent of karst correction factor and other parameters, the karst rock classification for this anchor tunnel is determined as grade V. In fact, throughout the construction process, these measures are adopted as strong support of the anchor tunnel, such as advanced small pipe, advanced anchoring, steel frame, steel wire, shotcrete, etc.. And the bench cut method is also taken for the anchor tunnel excavation. In addition, the fractured rock and the surrounding cave are reinforced by grouting after the excavation of anchor tunnel. In other words, the parameters for initial support of the anchor-tunnel are taken by considering the rock mass as grade V. In practice, it indicates that the karst rock classification for this tunnel is reasonable, which can be taken as a reference for other similar projects.

Key words: rock mechanics; karst; geological forecast; surrounding rock classification

收稿日期: 2009 - 02 - 09; **修回日期:** 2009 - 03 - 10

作者简介: 李苍松(1971 -), 男, 博士, 1994年毕业于长春地质学院水文地质与工程地质专业, 现任教授级高级工程师, 主要从事隧道施工地质、检测等方面的研究工作。E-mail: li_cangsong@126.com

1 引言

坝陵河大桥西锚碇设计为隧道锚, 其设计参数指标有几项达到世界第一^[1~5]。其中, 锚洞总轴长 74.34 m, 从垂直地面算起最大深度 95 m, 后端部总宽 49 m, 锚洞斜度, 其前锚室主缆中心线的水平角为 45°, 左右隧洞最小净距 7.0 m。锚洞上方为 2 座连拱(或中隔墙型隧道), 在锚洞上方与公路隧道之间的岩体, 其群洞效应非常明显。

锚洞所处位置为岩溶垂直入渗带, 包气带岩溶极发育, 岩溶形态多为溶槽、溶缝、充填型或空溶洞等, 对锚洞施工及锚体受力产生较大影响^[6~12], 所以对锚洞周边围岩的岩溶进行精细探测非常重要。锚洞施工地质预报及开挖情况表明, 锚洞工程周边围岩的岩溶非常发育。在实际施工时(开挖、支护或衬砌)时必须根据实际情况作调整, 以确保锚洞施工安全, 并排除以后运营可能发生的安全隐患。究竟应采取何种施工措施, 以正确对待开挖揭露的不同形态岩溶等问题, 这就要求对锚洞施工所揭露的岩溶围岩特性有一个正确、客观的认识^[13], 据此提出锚洞岩溶围岩级别的划分问题。

2 锚洞勘察设计阶段的围岩级别划分

根据前期地面调查、钻探、室内岩石试验、电磁波 CT 及数字钻孔摄像等多种综合勘察的成果。锚碇隧道区围岩定性分级见表 1, 2, 定量计算结果见表 3^[3, 4]。

表 1 钻探划分的围岩级别

Table 1 Surrounding rock classification by drilling

岩性及风化程度	深度/m	RQD/%	围岩级别
弱风化泥晶灰岩	0~40	40~70	IV~V
微风化泥晶灰岩	>40	70~85	II~III
弱风化白云岩	0~45	50~75	IV~V
微风化白云岩	>45	65~85	II~III

3 岩溶围岩分级模型的建立

3.1 岩溶围岩分级的物理和数学模型

岩溶围岩分级应在一般地下工程岩体质量分级基础上进行, 专门针对围岩为不同岩溶发育状态的

表 2 斜洞勘察现场划分的围岩级别

Table 2 Rock classification by site inspection of ramp tunnels

斜洞编号	洞长/m	垂直深度/m	岩性及风化程度	岩体完整程度	围岩级别
PD1	0.0~48.7	24.5	弱风化泥晶灰岩	张性层面间充填黏土夹碎石	V
	48.7~59.0	24.5~32.7	弱风化泥晶灰岩	节理裂隙发育, 但贯通性差	III
	59.0~66.5	32.7~38.0	弱风化泥晶灰岩	受构造影响, 岩体破碎, 节理发育	IV
	>66.5	>38.0	微风化泥晶灰岩	小节理发育, 但未切割岩层	II
PD2	0.0~30.1	21.1	弱风化泥晶灰岩	张性层面强发育, 其间充填黏土夹碎石	V
	30.1~38.0	21.1~26.9	弱风化泥晶灰岩	节理裂隙发育, 岩体被切割成块状	III
	38.0~45.4	26.9~32.0	弱风化泥晶灰岩	受隐伏断层影响, 岩体极破碎	IV
	>45.4	>32.0	微风化泥晶灰岩	节理较发育, 贯通性差, 未切割岩层	II

表 3 定量判定斜洞围岩等级表^[3, 4]

Table 3 Quantitative determination of the ramp tunnels^[3, 4]

斜洞编号	洞深/m	岩体完整系数 K_v	岩体质量指标 BQ 值	围岩级别
PD1	0.00~45.00	0.02~0.09	236	V
	45.00~48.95	0.12	255	IV
	48.95~59.11	0.75~0.91	433	III
	59.11~60.84	0.98	470	II
PD2	60.84~83.98	0.65~0.87	422	III
	0.00~30.70	0.02~0.07	235	V
	31.70~32.25	0.31	301	IV
	32.25~40.30	0.54~0.83	387	III
	43.30~44.50	0.39~0.51	333	IV
	44.50~68.86	0.67~0.87	431	III

注: 定量判定与定性相近, 但偏低。

岩体进行质量分级修正^[13]。建立岩溶围岩分级模型如下:

(1) 岩溶围岩级别分值的数学表达式可写为

$$K_{BQ} = BQ(1 - C_{kD}) \quad (1)$$

式中: K_{BQ} 为岩溶围岩级别的岩体质量分值, BQ 为按一般岩体质量分级系统计算得到的岩体质量分值, C_{kD} 为岩溶发育程度修正系数。

(2) 利用 K_{BQ} 计算值, 参考现行隧道工程岩体质量分级系统进行岩溶围岩级别划分(见表 4)^[14]。

表 4 岩体基本质量分级表^[14]

Table 4 Basic quality rock mass classification^[14]

基本质量级别	岩体基本质量的定性特征	岩体基本质量指数 BQ
I	坚硬岩, 岩体完整	>550
II	坚硬岩, 岩体较完整 较坚硬岩, 岩体完整	550~451
III	坚硬岩, 岩体较破碎 较坚硬岩或软硬岩互层, 岩体较硬 较软岩, 岩体完整	450~351
IV	坚硬岩, 岩体破碎 较坚硬岩, 岩体较破碎~破碎 较软岩或软硬岩互层, 且以软岩为主, 岩体较完整~较破碎 软岩, 岩体完整~较完整	350~251
V	较软岩, 岩体破碎 软岩, 岩体较破碎~破碎 全部极软岩及全部极破碎岩	<250

(3) 岩溶岩体分级的关键在于岩溶发育程度修正系数的确定。

(4) 对岩溶发育程度进行界定, 将岩溶发育程度分 5 级: 不发育, 轻微发育, 较发育, 发育和很发育。相应地, 岩溶发育程度修正系数的大小与不同的岩溶发育程度直接关联。建立岩溶发育程度修正系数的计算公式:

$$C_{kD} = 0.3C_{kDq} + 0.7C_{kDI} \quad (2)$$

式中: C_{kDq} 为岩溶发育程度定性评价系数, C_{kDI} 为岩溶发育程度定量评价系数。

3.2 岩溶发育程度评价的定性指标

岩溶发育主要受岩性、构造、地下水动力条件及气候等因素所控制。其中, 前 3 个条件是必要条件, 岩溶发育程度评价的定性划分即在此基础上进行^[15], 其研究思路为:

(1) 在定性分析基础上通过定量数据对定性指标给予确切评价。

(2) 确定岩溶发育程度评价的定性指标为三大类: 可溶岩性、构造切割情况、地下水径流循环条件, 采取因子分析法确定权重, 即对应系数分别为 0.4, 0.3 和 0.3(具体确定方法参考李苍松等^[13]研究中的表 2)。对可溶岩性, 可溶岩质的纯度、厚度、与非可溶岩的接触情况分别赋值为 0.2, 0.1 和 0.1。

(3) 对构造切割情况赋值: 一般节理、裂隙为 0.05、层面为 0.05、可溶岩与非可溶岩的接触为 0.05、断层为 0.10、褶曲为 0.05。

(4) 对地下水循环条件赋值: 极好为 0.30、好为 0.20、较好为 0.15, 较差为 0.10、差为 0.05。

分别对各子项进行定性评价并给出分值, 最后根据累积得分进行岩溶发育程度评价(见表 5)。

表 5 岩溶发育程度定性评价

Table 5 Qualitative assessment of the karst development

岩溶发育程度	主要的岩溶形态	C_{kDq}
很发育	大型溶洞或暗河	0.80~1.00
发育	一般溶洞	0.40~0.80
较发育	溶槽	0.10~0.40
轻微发育	溶缝、溶隙	0.05~0.10
不发育	溶孔	0.00~0.05

3.3 岩溶发育程度评价的定量指标

岩溶发育程度评价定量指标的确定主要根据岩溶发育的不同形态、各种形态岩溶岩(土)体的物理力学性质、以及不同岩溶形态对工程施工安全的影响等因素^[13]。建议采用以下指标: 岩溶发育形态、规模对隧道施工安全的影响系数、岩溶充填物影响系数及地下水影响系数等。

岩溶发育程度定量评价系数的计算公式如下:

$$C_{kDI} = \sqrt[3]{S_v K_c K_w} \quad (3)$$

式中: S_v 为岩溶发育形态及规模对隧道施工安全的影响系数(%), K_c 为岩溶充填物影响系数(%), K_w 为地下水影响系数(%)。

式(3)中的各影响系数的确定可参考李苍松等^[13]的研究成果。

4 锚洞施工岩溶围岩分级的实践

(1) 根据锚洞勘设阶段地质资料和施工地质超前预报资料进行区段划分(见表 6)。

(2) 根据地质超前预报及掌子面素描、洞内外补充地质调查情况, 获取各区段的岩溶发育评价定性指标, 计算各区段岩溶发育程度定性评价系数 C_{kDq} 。

(3) 参考李苍松等^[13]研究中的表 4~6, 获取 S_v , K_c 和 K_w 等参数, 并计算岩溶发育程度定量评价系数 C_{kDI} 。

(4) 计算各区段岩溶发育程度修正系数 C_{kD} 。

(5) 利用前计算结果(也可参考原设计阶段的数

表 6 斜洞岩溶围岩分级区段划分

Table 6 Section division of karst rock classification for the ramp tunnels

斜洞编号	洞深/m	设计岩体质量指标 BQ	设计围岩级别
PD1	0.00~45.00	236	V
	45.00~48.95	255	IV
	48.95~59.11	433	III
	59.11~60.84	470	II
	60.84~83.98	422	III
PD2	0.00~30.70	235	V
	31.70~32.25	301	IV
	32.25~40.30	387	III
	43.20~44.50	333	IV
	44.50~68.86	431	III

据), 计算岩溶围岩级别的分值。

根据各次测试的岩体平均纵波速度, 参考原大桥的地质勘察报告, 并根据岩石的风化、溶蚀特征, 取岩石平均饱和抗压强度为 52.2 MPa, 岩石波速为 4 000 m/s, 计算各测试掌子面岩体完整性系数及 BQ 值见表 7。

表 7 锚洞掌子面测试岩体波速、岩体完整性系数及 BQ 值
Table 7 Rock velocities, rock integrity factors and calculated BQ values of working face of anchor tunnels

锚洞名称	距洞口距离/m	测试岩体波速/($m \cdot s^{-1}$)	岩石平均饱和抗压强度/MPa	岩体完整性系数	BQ 值
左锚洞	15.0	1 174	52.2	0.09	268
	25.0	2 334	52.2	0.34	332
	32.9	1 346	52.2	0.11	275
	44.1	2 522	52.2	0.40	346
	63.2	2 560	52.2	0.41	349
右锚洞	10.0	812	52.2	0.04	257
	23.0	1 819	52.2	0.21	298
	37.8	1 371	52.2	0.12	276

(6) 根据表 4 进行岩溶围岩级别划分, 可以得到计算结果与原设计围岩级别对比情况, 见表 8。

5 岩溶围岩分级结果验证

在锚洞(距洞口 58~65 m)中隔墙内与关岭 1#地

表 8 坝陵河大桥锚洞岩溶围岩分级对比表

Table 8 Comparison table of karst rock classification for anchor tunnels, Baling River Bridge

锚洞名称	洞深/m	设计围岩级别	岩溶围岩分级
左锚洞	0.00~45.00	V	V
	45.00~48.95	IV	V
	48.95~59.11	III	V
	59.11~60.84	II	V
	60.84~83.98	III	V
右锚洞	0.00~30.70	V	V
	31.70~32.25	IV	V
	32.25~40.30	III	V
	43.20~44.50	IV	V
	44.50~68.86	III	V

表落水洞之间顺层发育形成一较大的岩溶管道系统, 岩溶形态以竖向发育的空溶洞和黏土夹块石充填溶洞为主。

2006 年 7 月 21 日, 左锚洞右侧中隔墙开挖揭露岩溶空洞, 位于第 40~41 榀型钢拱拱角处揭示溶洞口, 洞口直径约 0.8 m(人能钻到洞内), 对应锚洞里程约为 61.4 m。

该溶洞为顺层发育的空溶洞, 岩层产状为 $75^\circ \angle 88^\circ$, 呈三角锥体状发育, 岩体表面湿润, 冲蚀现象明显。溶洞宽度约 2.5 m, 在中隔墙内向右锚洞一侧的深度约 4.5 m, 向锚洞上方延伸约 5.5 m, 向下延伸大于 12.5 m, 洞底黄褐色黏土和碎石堆积。洞口揭示处侧壁厚 0.8~2.0 m。

在整个锚洞施工过程中, 均采用了超前小导管、超前锚杆、型钢拱架、挂网及喷射混凝土等强支护措施, 锚洞开挖采用台阶法分步开挖, 锚洞开挖完毕后对周边的破碎岩体及溶洞进行了注浆加固处理。也就是说, 锚洞施工的超前支护和初期支护参数实际均按照 V 级围岩进行施做的。

根据锚洞施工地质预报及开挖结果验证, 实际施工状况是本岩溶围岩分级结果很好的验证。

6 结 论

坝陵河大桥隧道锚洞周边围岩的岩溶较发育, 勘察设计阶段确定其围岩级别为 II~IV 级。在岩溶地质预报和一般地下工程岩体质量分级基础上, 专门针对围岩为不同岩溶发育状态的岩体进行质量分

级修正, 建立锚洞岩溶围岩分级的物理模型和数学模型。根据本文所提出的岩溶围岩分级方法, 计算岩溶发育程度修正系数等参数, 确定锚洞周边岩溶围岩等级为 V 级。锚洞施工地质预报、开挖验证以及实际施工状况均表明, 锚洞施工岩溶围岩分级结果与实际相符, 为锚洞施工安全提供了重要的数据参考依据, 在本工程中的应用是成功的, 值得在同类岩溶隧道工程中进一步应用、验证和提高。

参考文献(References):

- [1] 彭运动, 孟凡超, 庞颂贤. 贵州坝陵河大桥方案设计[C]// 2005 年全国桥梁学术会议论文集. [S. l.]: [s. n.], 2005: 153 - 158.(PENG Yundong, MENG Fanchao, PANG Songxian. Guizhou Balinghe Bridge design[C]// Proceedings of the National Conference on Bridge Engineering 2005. [S. l.]: [s. n.], 2005: 153 - 158.(in Chinese))
- [2] 胡波, 王思敬, 曾钱帮, 等. 贵州坝陵河大桥西锚碇区围岩稳定性分析[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2007, 34(4): 10 - 15.(HU Bo, WANG Sijing, ZENG Qianbang, et al. Rock mass stability analysis in west tunnel-type anchorage zones of Baling suspension bridge in Guizhou[J]. Journal of Chengdu University of Technology(Science and Technology), 2007, 34(4): 10 - 15.(in Chinese))
- [3] 孙会元, 彭运动, 陈才琳, 等. 坝陵河大桥综合勘察技术与成果评价方法的研究综述[J]. 公路, 2007, (8): 53 - 57.(SUN Huiyuan, PENG Yundong, CHEN Cailin, et al. Research on integrated investigatory techniques and the evaluation methods of survey results of Balinghe Bridge[J]. Highway, 2007, (8): 53 - 57.(in Chinese))
- [4] 刘秀伟, 何心明. 坝陵河大桥综合勘察技术运用[J]. 岩土工程界, 2006, (8): 74 - 76.(LIU Xiuwei, HE Xinming. Integrated investigation techniques used to Balinghe Bridge[J]. Geotechnical Engineering World, 2006, (8): 74 - 76.(in Chinese))
- [5] 欧阳珠子, 陈正立. 坝陵河大桥西引桥人工挖孔桩施工技术[J]. 山西建筑, 2007, (10): 300 - 301.(OUYANG Zhuzi, CHEN Zhengli. Construction technology of manual digging hole pile in west approach works of Balinghe Bridge[J]. Shanxi Architecture, 2007, (10): 300 - 301.(in Chinese))
- [6] 周平, 罗亨文, 蒋永生, 等. 坝陵河大桥基础工程施工岩溶地质探测及预报[J]. 桥梁建设, 2008, (4): 97 - 100.(ZHOU Ping, LUO Hengwen, JIANG Yongsheng, et al. Karst geology detection and prediction for construction of foundation works of Baling River Bridge[J]. Bridge Construction, 2008, (4): 97 - 100.(in Chinese))
- [7] 罗亨文, 周平. 坝陵河大桥东索塔桩基工程岩溶综合探测技术[J]. 路基工程, 2006, (4): 122 - 124.(LUO Hengwen, ZHOU Ping. Karst integrated detection technology of the east bridge tower foundation of Balinghe Bridge[J]. Subgrade Engineering, 2006, (4): 122 - 124.(in Chinese))
- [8] 黄坤全. 坝陵河大桥隧道锚施工地质综合预报技术[C]// 2006 年中国交通土建工程学术论文集. 北京: [s. n.], 2006: 959 - 964.(HUANG Kunquan. The integrated geological forecasting techniques of Balinghe Bridge's anchor-tunnel construction[C]// Proceedings of Traffic and Civil Conference in China 2006. Beijing: [s. n.], 2006: 959 - 964.(in Chinese))
- [9] 李苍松, 尚海松, 于维刚. 坝陵河大桥西锚洞周边围岩地质条件分析及预报[C]// 第二届全国岩土与工程学术大会论文集. 北京: [s. n.], 2006: 406 - 412.(LI Cangsong, SHANG Haisong, YU Weigang. Analysis of surrounding geological conditions and forecasting techniques of the west anchor-tunnel of Balinghe Bridge[C]// Proceedings of the Second National Academic Conference on Geotechnical and Engineering. Beijing: [s. n.], 2006: 406 - 412.(in Chinese))
- [10] 吴俊, 应松, 李苍松, 等. 坝陵河大桥隧道锚与关岭 1 号隧道地质关系浅议[J]. 工程地质学报, 2006, 14(增): 438 - 444.(WU Jun, YING Song, LI Cangsong, et al. The geological relations on the 1st Guanlin tunnel and the anchor-tunnel of Balinghe Bridge[J]. Journal of Engineering Geology, 2006, 14(Supp.): 438 - 444.(in Chinese))
- [11] 于春. 坝陵河大桥隧道锚碇围岩稳定性及与上方公路隧道相互影响分析[J]. 四川建筑, 2008, 28(1): 107 - 109.(YU Chun. The surrounding rock stability of Balinghe Bridge's anchor-tunnel and impact analysis between the anchor-tunnel with top highway tunnels[J]. Sichuan Architecture, 2008, 28(1): 107 - 109.(in Chinese))
- [12] 高珍忠, 朱光仪, 殷瑞华, 等. 关岭一号隧道对坝陵河大桥西锚碇隧洞施工的影响[J]. 公路隧道, 2006, (3): 48 - 53.(GAO Zhenzhong, ZHU Guangyi, YIN Ruihua, et al. The impact analysis of Balinghe Bridge's west anchor-tunnel by Guanling tunnel No.1[J]. Highway Tunnel, 2006, (3): 48 - 53.(in Chinese))
- [13] 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 in karst[J]. Journal of Engineering Geology, 2006, 14(6): 808 - 814.(in Chinese))
- [14] 中华人民共和国国家标准编写组. GB50218 - 94 工程岩体分级标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1994.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB50218 - 94 Standard of engineering classification of rock masses[S]. Beijing: China Planning Press, 1994.(in Chinese))
- [15] 王石春, 何发亮, 李苍松. 隧道工程岩体分级[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2007.(WANG Shichun, HE Faliang, LI Cangsong. Tunnel engineering rock classification[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2007.(in Chinese))