

文章编号: 1000-7598 (2009) 12-3846-05

岩质围岩施工阶段亚级分级的数量化理论研究

于 丽¹, 王明年¹, 房敦敏², 陈炜韬¹

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031; 2. 中国水电顾问集团华东勘察设计研究院, 杭州 310014)

摘 要: 为了对隧道施工阶段的围岩分级进行客观评价, 提高判定数据的可靠性, 必需建立一套实用的施工阶段围岩亚级分级方法, 为隧道施工阶段的围岩分级服务。考虑到目前采用的属性指标的实际情况, 特采用数量化理论对施工阶段岩质围岩亚级分级进行定量评定。通过对国内外情况的调查统计, 得到了公路隧道围岩亚级分级的指标体系; 并依托工程实际情况, 在 72 条隧道中采集了 800 余条样本, 从中选出了 500 条数据进行分析, 完成了以数量化理论为基础的施工阶段围岩亚级的定量判定方法研究, 并通过工程实例对判定方法进行了检验。研究结果表明: 岩质围岩施工阶段亚级分级指标为岩石坚硬程度、岩体完整性状态、地下水状态; 建立的数量化分级判别方程和判别值的自检平均符合率超过 85%; 数量化理论在岩质围岩施工阶段亚级分级应用中具有较高的可靠性。

关 键 词: 隧道施工; 岩质围岩亚级分级; 数量化理论; 定量评定

中图分类号: U 451.42

文献标识码: A

Study of quantification theory of rocky surrounding rock sub-classification during construction

YU Li¹, WANG Ming-nian¹, FANG Dun-min², CHEN Wei-tao¹

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. East China Investigation, Design & Research Institute, CHECC, Hangzhou 310014, China)

Abstract: To evaluate the rock classification, a useful rock sub-classification method is needed to eliminate the subjectivism and empiricism and to improve the precision of rock classification. Therefore taking into account of the attributes of the current indices, quantification theory is adopted to give the rocky surrounding rock quantitative evaluation. At first the index system was built on the basis of survey; then 500 data was gained from the more than 800 examples of 72 tunnels; thus the quantitative evaluation was achieved. Finally, through case studies, the judge method based on quantification theory was tested and a high precision and reliability is achieved. The research results show: The indices of rocky surrounding rock sub-classification during construction are rock hardness degree, rock mass integrity condition and ground water condition. Self-check coincidence rate of the discriminatory equation and values based on quantification theory exceed 85%. Quantification theory is a reliable method in rocky surrounding rock sub-classification during construction.

Key words: tunnel construction; rocky surrounding rock sub-classification; quantification theory; quantitative evaluation

1 前 言

目前国内外对于围岩级别的判定方法已有上百种, 并且呈单一岩性指标→单一综合岩性指标→综合岩性指标→考虑围岩稳定性的发展^[1-4]。现行《公路隧道设计规范》^[5]中将围岩分为 6 级, 其中岩质围岩为 I、II、III、IV、V 级, 土质围岩为 IV、V、VI 级, 在隧道工程实践中, III、IV、V 级分级跨

度较大, 不便于实际应用, 为此, 很多设计单位根据实际条件, 对 III、IV、V 级进行了亚级划分, 由于目的不同, 则围岩亚级的划分方法和采用的指标体系不同, 缺乏可比性。另外由于《公路隧道设计规范》^[5]没有施工阶段围岩分级方法, 施工阶段围岩分级具有很大的主观性。隧道施工阶段围岩分类方法有定性方法和定量方法, 而围岩分级的定量化是科学发展的趋势, 也是隧道围岩分级成熟的标志^[6-8]。

收稿日期: 2007-12-26

基金项目: 西部交通科技项目 (No. 2004-318-00030)。

第一作者简介: 于丽, 女, 1978 年生, 博士, 主要从事地下工程围岩分级及防灾减灾研究。E-mail: yuli_1026@163.com

数量化理论是日本数理统计研究所所长林知已夫教授首先提出的, 在日本各界得到了广泛实际应用^[9]。由于数量化理论能将定性指标定量化, 是使隧道围岩分级从人工手动向自动化发展的有效途径, 使用该理论, 可以消除各种人为主观等因素的影响, 实现围岩亚级分级自动化, 提高围岩亚级分级的准确性^[7]。

本文以大量国内外围岩分级资料为基础, 通过统计方法确定了施工阶段岩质围岩亚级分级指标; 并对 500 组岩质围岩样本运用数量化理论建立了施工阶段岩质围岩亚级分级的判别方程和各亚级的判别值; 以大量工程实例对所得到的判定方法进行检验, 证明数量化理论应用的可靠性和正确性。

2 分级指标体系的选取

围岩分级包括两个阶段, 即设计阶段围岩分级和施工阶段围岩分级。公路隧道施工阶段围岩分级体系应该是设计阶段围岩分级的发展, 它的方法要受设计阶段围岩分级方法的约束, 因为对于同一个公路隧道, 施工阶段围岩分级是对设计阶段围岩分级的一种校核, 因此, 对同一种围岩的分类, 两种分级方法所采用的分级方法、指标体系及所得的结论都应该是一致的。但两种分级方法在地质参数获取的手段上将会有显著不同。

隧道围岩亚级分级指标体系就是数据化的隧道围岩^[10]。亚级分级主要是根据隧道围岩稳定性来确定的, 隧道围岩稳定性可以通过一系列围岩参数组合来反映, 即隧道围岩可以被抽象为一系列围岩参数的组合。要全面精细地反映隧道围岩稳定性, 往往需要很多围岩参数, 这些围岩参数中, 一些是主要的, 另一些是次要的, 能反映隧道围岩稳定性的主要参数就定义为隧道围岩亚级分级指标体系。

通过对国外 18 个围岩分级方法、国内 20 个围岩分级规范和 32 个具体工程分级实例进行统计分析^[11], 可以将岩质围岩分级指标分为 6 组, 即岩石的坚硬程度、岩体完整性状态、地下水的影、结构面状态、地应力的影响及岩体的弹性波速度等。统计分析得到国内外围岩分级指标采用率见表 1。

表 1 国内外围岩分级中各组指标采用率(%)
Table 1 Each index adoption rate (%)

项目	岩石 坚硬程度	岩体完整 程度	地下水	结构面 状态	地应力	弹性 波速度
国外	83.3	88.9	44.4	16.7	16.7	11.1
国内	100	95	65	70	45	40
国内实 际工程	100	100	100	66.7	54.5	90.3

由表可以看出, 岩石坚硬程度、岩体完整性状态和地下水是采用率最高的 3 个指标, 3 者指标最高的采用率达 100%。关宝树研究认为^[11]: 一般岩质围岩施工阶段, 围岩分级指标除了包括岩石坚硬程度、岩体完整程度的基本指标外, 修正指标中影响较大的为地下水状态, 这也与表 1 的统计结果相同。因此, 岩质围岩施工阶段应主要考虑 2 个基本指标和 1 个修正指标。故施工阶段的岩质围岩亚级分级指标体系中, 基本指标采用岩石坚硬程度、岩体完整程度; 修正指标采用地下水状态。

3 围岩亚级分级中的数量化理论

数量化理论实质上是多元分析的一个分支, 它根据研究问题的目的不同, 常分为数量化预测方法 (I 类问题) 和数量化判别方法 (II 类问题)。由于岩质围岩亚级分级实际是对样本进行分类, 属于 II 类问题, 因此, 宜采用数量化判别方法进行研究。

3.1 亚级分级判别式

在数量化理论中, 依据来自 g 个母体的 n 个样本对于 m 个项目的观测结果, 寻求线性判别函数, 用以对未知母体的样本进行判别分级。数量化理论考虑的线性判别函数如下, 具体推导求解见文献 [8, 12]:

$$y_i^t = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^{r_j} \delta_i^t(j, k) b_{jk}, \quad i = 1, 2, \dots, N_t, \quad t = 1, 2, \dots, g \quad (1)$$

写成矩阵的形式为

$$Y = Xb \quad (2)$$

其中:

$$Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)' \quad (3)$$

$$b = (b_{11}, \dots, b_{1r_1}, b_{21}, \dots, b_{2r_2}, \dots, b_{mr_m})' \quad (4)$$

3.2 亚级分级判定流程

要判定围岩亚级, 主要有两个步骤:

(1) 判定岩体完整性状态。

由于岩体完整性状态受裂隙组数、平均间距、缝宽、充填物等因素影响, 岩体完整性状态可分为完整、较完整、较破碎、破碎及极破碎等 5 个等级。可见, 岩体完整性状态等级可采用与围岩亚级判定方法相同的方法事先确定, 其项目包括裂隙组数、平均间距、缝宽、充填物。

(2) 判定围岩亚级。

岩体完整性状态确定之后, 将其转换成 0~1 指标, 连同岩石坚硬程度和地下水状态, 最终判定出围岩

亚级。根据数量化理论, 围岩亚级级别的判定流程为图 1 所示。

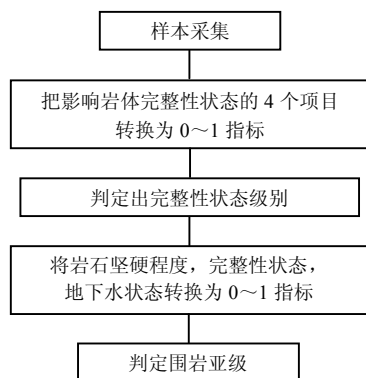


图 1 围岩亚级判定流程图

Fig.1 Flow chart of surrounding rock sub-classification

3.3 亚级分级的判据

本次研究中, I、II、VI级围岩不分亚级, III级围岩分为 2 个亚级, IV级围岩分为 3 个亚级, V级围岩分为 2 个亚级, 由此的围岩分级标准为 10 级^[11]。

将围岩样本分为 10 组, 对于每组的每个样本, 根据围岩亚级判别方程, 都能算出一个判别得分。把这些得分标在一条称之为评价尺度的曲线上, 就可以得到每组的直方图。由每组直方图可以得到该组的近似概率密度函数。由这些函数, 可以在评价尺度上得到一些确定的分点, 叫做判据。对于一个待判别的样本, 根据其得分是在这些分点的左面还是右面来判定它属于哪一组。

为了计算上的方便, 假定各母体的方差均相等, 且样本属于各母体的先验概率也相等。就可以把相邻两母体均值的平均数作为判据。

即, 在 y'_i 已知情况下, 令

$$F^t = \frac{1}{N_t} \sum_{i=1}^{N_t} y'_i \quad (t=1, 2, \dots, g-1) \quad (5)$$

$$F_0 = \frac{(F^t + F^{t+1})}{2}$$

即为隧道围岩亚级分级的判据。

4 岩质围岩亚级分级的数量化判别

4.1 样本采集

依托工程实际情况, 在 72 条公路隧道中采集了 800 余条样本, 从中选出了 500 条数据进行分析, 根据数量化理论判定流程, 将其分为 10 组, 分别为 I、II、III₁、III₂、IV₁、IV₂、IV₃、V₁、V₂、VI。各级围岩样本量分布见表 2 所示。

表 2 样本分布情况

Table 2 Surrounding rock sample distribution

组别	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
围岩亚级	I	II	III ₁	III ₂	IV ₁	IV ₂	IV ₃	V ₁	V ₂	VI
样本数量	54	48	42	45	37	33	58	46	58	79

4.2 判别方程系数和判据的确定

根据前面施工阶段的岩质围岩亚级分级指标体系的研究结果, 在运用数量化理论分析时, 选取岩石的坚硬程度、岩体的完整状态和地下水状态 3 个研究项目, 各类目见表 3。

表 3 施工阶段岩质围岩亚级分级项目及类目表

Table 3 Item and category list of rocky surrounding rock sub-classification during construction

类目	岩石的坚硬程度	岩体的完整状态	地下水状态
1	坚硬岩	完整	无水
2	较坚硬岩	较完整	滴水
3	较软岩	较破碎	线状
4	软岩	破碎	股状
5	极软岩	极破碎	

在求解判别方程的系数 b_{jk} 的过程中, 为了保证系数方程组有唯一解, 需去除“多重共线性”的影响, 其方法是去掉每个项目中的某一个类目, 这样做并不影响判别方程的结果。本次研究采取的方法是: 先判定岩体完整性状态, 去除第 1 个项目的第 4 个类目, 第 2 个项目的最后一个类目, 第 3 个项目的最后一个类目, 第 4 个项目的第 1 个类目, 最后得到的判别方程只有 16 项。接着判定围岩亚级, 把各项目的最后一个类目删去, 即令 $b(j, r_j) = 0$, ($j=1, 2, 3$), 最后得到的围岩亚级判别方程只有 11 项。

运用数量化理论判别法, 对样本进行判定, 求得的岩体完整性状态分级的判定系数 b_{jk} 和判定标准分别见表 4、5。确定围岩完整性级别之后, 将完整性状态级别转换成相应的 0~1 指标, 连同岩石坚硬程度和地下水状态的 0~1 指标再运用数量化理论, 即可求出围岩亚级判定方程的系数 b_{jk} (见表 6) 和围岩级别的判据 (见表 7)。

表 4 完整性程度分级的判定系数

Table 4 Determination coefficient of integrity degree

因子	基准					
	1	2	3	4	5	6
裂隙组数(X_{1K})	-0.011 41	-0.010 62	-0.010 92	0	0.046 024	
平均间距(X_{2K})	-0.032 81	-0.042 45	-0.045 11	-0.056 67	0	
缝宽(X_{3K})	0.079 148	-0.031 94	-0.031 5	0		
充填物(X_{4K})	0	0.110 893	0.112 384	0.124 094	0.122 59	0.126 628

表 5 完整性程度分级判定标准
Table 5 Determination standard of integrity degree classification

围岩级别	判定值
完整	< 0.018 159
较完整	0.018 159~0.030 227
较破碎	0.030 227~0.044 726
破碎	0.044 726~0.110 522
极破碎	> 0.110 522

表 6 施工阶段岩质围岩亚级分级判别方程系数
Table 6 Discriminatory equation coefficient of rocky surrounding rock sub-classification during construction

因子	基准				
	1	2	3	4	5
岩石属性(X_{1k})	0.076 716	0.060 739	0.043 361	0.020 816	0
完整性系数(X_{2k})	0.100 462	0.073 914	0.051 295	0.021 377	0
地下水状态(X_{3k})	0.026 875	0.026 681	0.016 516	0	

表 7 施工阶段岩质围岩亚级分级数量化判据
Table 7 Quantification criterion of rocky surrounding rock sub-classification during construction

围岩级别	判定值
I	> 0.19074
II	0.172 385~0.190 740
III ₁	0.158 032~0.172 385
III ₂	0.148 616~0.158 032
IV ₁	0.137 818~0.148 616
IV ₂	0.123 195~0.137 818
IV ₃	0.107 330~0.123 195
V ₁	0.089 333~0.107 330
V ₂	0.064 201~0.089 333
VI	< 0.064 201

写成方程形式为

$$y_i = 0.076\ 716X_{11} + 0.060\ 739X_{12} + 0.043\ 361X_{13} + 0.020\ 816X_{14} + 0.0X_{15} + 0.100\ 462X_{21} + 0.073\ 914X_{22} + 0.051\ 295X_{23} + 0.021\ 377X_{24} + 0.0X_{25} + 0.026\ 875X_{31} + 0.026\ 681X_{32} + 0.016\ 516X_{33} + 0.0X_{34} \quad (6)$$

通过上述围岩亚级判别方程和判据对每个样本进行判别，并与现场实际围岩亚级对照，得各亚级围岩样本的自检符合率如表 8。此处，值得说明的是现场围岩亚级的划分方法依据本课题研究成果《公路隧道围岩分级指南》进行，该划分以定性定量指标相结合的判别方法，以围岩开挖揭露为前提，而数量化理论是在隧道施工开挖前预测围岩的亚级。

由表 8 可见，经数量化理论判定后，符合率在

77%~100%之间，平均符合率超过 85%。由于本次采集样本有限，因此，对于足够多的样本时，判别方程(6)将更加准确，更能运用于所有公路隧道施工阶段围岩分级。

表 8 自检符合率
Table 8 Self-check coincidence rate

围岩条件		样本量	自检符合率 / %
级别	亚级		
I		54	100
II		48	100
III	1	42	100
	2	45	100
IV	1	37	100
	2	33	77
	3	58	97
V	1	46	100
	2	58	90
VI		79	80

4.3 实际工程应用

为了验证施工阶段围岩亚级分级数量化理论分级法的准确性，随机抽取了 98 个样本进行工程检验，以检验分级方法的准确性。

其检验方法为：选取某一隧道断面，应用上述理论进行围岩级别的判定，将这一判定结果与该断面实际围岩分级进行比较，看是否符合。将所有样本进行分析，可以统计出一个符合率，如果符合率在 80%以上，说明成果可行，否则需要找出原因，对分级方法进行修正和完善，直到符合率在 80%以上为止。检验隧道工程见表 9。

表 9 检验隧道工程样本表
Table 9 Survey of tested tunnel samples distribution

隧道名称	样本量	隧道名称	样本量
拉纳山隧道	25	营盘山隧道	12
列衣隧道	14	小石厂隧道	4
波戈溪隧道	5	蔡家山隧道	2
黄草坪 1 号隧道	3	枣子林隧道	11
黄草坪 2 号隧道	9	酸水湾隧道	4
徐家梁子隧道	9		

经数量化理论判定后，所有 98 个检验样本中，只有 12 个样本与实际围岩级别不一致，准确率为 87.76%。而且在误判的样本中，其结果（围岩级别）也没有出现“越级”现象，也就是说，即使误判，其级别要么高于原级别一级，要么低于原级别一级，并没有跳跃现象出现。说明了该方法和判别方程的应用具有足够的可靠性。

5 结 论

针对公路隧道围岩分级, 本文通过统计理论、数量化理论对施工阶段岩质围岩亚级分级进行了研究, 得到以下几点结论:

(1) 建立了岩质围岩施工阶段亚级分级指标体系, 即基本指标采用岩石坚硬程度、岩体完整性状态; 修正指标采用地下水。

(2) 以大量现场数据为基础, 建立了施工阶段岩质围岩亚级分级的数量化判别方程和判别值; 通过与实际情况对比, 该方程判别的自检平均符合率超过 85%。

(3) 数量化理论判定方法在 11 座隧道 98 个样本应用中的准确率为 88.76%; 在所有误判的样本中, 其结果(围岩级别)并没有出现“越级”现象。故该方法和判别方程的应用具有足够的可靠性。

参 考 文 献

- [1] 胡卸文, 黄润秋. 西南某电站坝区岩体质量分级与评价[J]. 水力发电学报, 1996, (2): 71—85.
HU YU-wen, HUANG Run-qi. Classification and evaluation of rock-mass quality in dam site of a south-western hydroelectric station[J]. **Journal of Hydroelectric Engineering**, 1996, (2): 71—85.
- [2] 关宝树. 铁路隧道围岩分类[M]. 北京: 人民铁道出版社, 1978.
- [3] 沈中其, 关宝树. 铁路隧道围岩分类[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2000: 2—78
- [4] 关宝树. 国外隧道围岩分类的现状和发展[J]. 隧道译丛, 1972, (4): 1—3.
GUAN Bao-shu. The actuality and development of surrounding rock classification in other countries[J]. **Tunnel Corpus**, 1972, (4): 1—3.
- [5] 重庆交通科研设计院. JTG D70—2004 公路隧道设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [6] 王明年, 何林生. 建立公路隧道施工阶段围岩分级的思考[J]. 广东公路交通, 1998, (54): 125—127.
WANG Ming-nian, HE Lin-sheng. Some consideration on road tunnel surrounding rock classification under construction[J]. **Guangdong Gonglu Jiaotong**, 1998, (54): 125—127.
- [7] 沈中其, 关宝树. 施工阶段围岩类别的定量评定方法[J]. 上海铁道大学学报, 1998, 26(12): 12—17.
SHEN Zhong-qi, GUAN Bao-shu. The evaluation method for surrounding rocks[J]. **Journal of Shanghai Tie Dao University**, 1998, 119(12): 12—17.
- [8] 沈中其. 围岩分类的数量化研究[D]. 成都: 西南交通大学, 1988.
- [9] 关宝树. 围岩分类的数量化研究[J]. 铁道学报, 1988, (4): 2—28.
GUAN Bao-shu. Quantification study on surrounding rock classification[J]. **Journal of the China Railway Society**, 1988: (4): 2—28.
- [10] 房敦敏. 基于数量化理论的岩质围岩施工阶段亚级分级方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
- [11] 西南交通大学. 公路隧道围岩分级指标体系与动态分类方法研究总报告[R]. 成都: 西南交通大学, 2007.
- [12] 董文泉, 周光亚, 夏立显. 数量化理论及其应用[M]. 长春: 吉林人民出版社, 1979.
- [23] 吕一平. 基于 Mindlin 应力解的桩筏基础设计分析方法研究[硕士论文 D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
- [24] GEDDES J D. Stress in foundation soils due to vertical subsurface load[J]. **Geotechnique**, 1966, (16): 231—255.
- [25] 何思明, 郭强, 卢国胜. 单桩沉降计算理论研究[J]. 岩石力学与工程学报, 23(4): 688—694.
HE Si-ming, GUO Qiang, LU Guo-sheng. Study on settlement calculation of single pile[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 23(4): 688—694.
- [26] 何思明, 乔建平, 王成华. 单桩计算的一种理论方法[J]. 土木工程学报, 2005, 38(6): 73—76.
HE Si-ming, QIAO Jian-ping, WANG Cheng-hua. Analysis approach of single pile[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2005, 38(6): 73—76.
- [27] 杨敏, 王树娟, 王伯钧, 等. 使用 Geddes 应力系数公式求解单桩沉降[J]. 1997, 25(4): 379—385.
YANG Min, WANG Shu-juan, WANG Bo-jun, et al. On analysis of single pile by using Geddes' stress formula[J]. **Journal of Tongji University**, 1997, 25(4): 379—385.
- [28] 中国建筑科学研究院. GB50007—2002 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.

上接第 3845 页