

# 基于超前预报信息的隧道围岩分级及工程应用研究

张新柳<sup>1,2</sup>

(1.中国铁建大桥工程局集团有限公司 天津 300300; 2.西安建筑科技大学土木工程学院 陕西 西安 710055)

**摘要:** 针对目前我国隧道和地下工程围岩分级方法存在的工作量大、耗时长,且围岩分级无法反映掌子面前方岩土体信息等问题,基于隧道和地下工程施工中进行的超前地质预报获得的掌子面前方一定范围内围岩的地质特征信息,以岩石的回弹强度和隧道掌子面岩土体的状态定量评价指标代替岩石的饱和单轴抗压强度及隧道地应力状态评价指标,综合考虑掌子面岩土体节理延展性的定性评价指标,提出了基于超前地质预报信息的隧道和地下工程围岩分级新方法.结合东北某隧道施工期围岩分级的实践,验证了提出的基于超前地质预报信息的隧道和地下工程围岩分级新方法的合理、可行性,指导了该隧道的施工,确保了工程的安全施工.

**关键词:** 隧道工程; 围岩分级; 地质预报; 岩石的回弹强度

中图分类号: U452.12

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2016)05-0648-06

## Study on the classification and application of the tunnels' surrounding rock based on geological information forecast

ZHANG Xinliu<sup>1,2</sup>

(1.China Railway Construction Bridge Engineering Bureau Group Co. Ltd, Tianjin 300300, China;

2. School of civil engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

**Abstract:** The conventional surrounding rock classification needs a lot of laboratory tests and field survey, and there is conflict between its time consumption and tunnel construction progress demanded. Furthermore, the conventional classification can not reflect the front information of tunnel face because of the limitation of observation. Aiming at the above problems, the paper proposed a new classification method based on the advanced geological information. The method adopted rock rebound strength and tunnel face state instead of uniaxial compression strength of saturated rock and ground stress state of traditional classification method, and the trace length of joint plane is added as an index. The indices of tunnel face state were obtained by advance geological information. Finally, the classification method had been applied in a tunnel of northeast region of China with ideal effect, whose results guided the tunnel construction successfully.

**Key words:** tunnel engineering; surrounding rock classification; geological forecast; rebound rock strength

围岩级别作为量化隧道工程地质条件评价的一个综合性指标,它是隧道建设的基础<sup>[1-5]</sup>.然而,隧道在勘察阶段获得的围岩的信息较少,因此会造成围岩级别在此阶段和实际岩土体的真实状态有较大的出入.隧道和地下工程岩土体分级的思想起源于 200 多年前的欧洲学者罗曼,经过各国学者和专家的拓展、发展和完善,提出了众多的不同类别和用途的岩土体分级、分类方法及标准<sup>[6-10]</sup>.

受隧道和地下工程处于地下隐蔽性的工程特点以及工程逐步开挖施工的施工特点,跟踪施工进行掌子面前方一定距离内的围岩动态分析对保证隧道和地下工程的施工安全和施工质量意义重大.但目前普遍采用的隧道和地下工程围岩的分级方法需要通过大量的室内外勘测工作获得分级所

需要的岩土体物理、力学特征参数,其测试和实验工作量大、耗时较长,与隧道和地下工程的动态施工形成矛盾,造成隧道和地下工程围岩动态分级迟后于隧道施工,无法及时反映隧道和地下工程掌子面前方岩土体地质特性信息的状态<sup>[11-14]</sup>.宋战平等<sup>[15-16]</sup>结合我国西南地区的隧洞(道)建设中不良地质的探测实践,提出了采用超前地质预报进行隧道围岩判断的思路;刘小军等<sup>[17]</sup>探讨了地形因素对偏压隧道围岩分级的影响.

当前,隧道施工掌子面前方地层信息探测和预报主要采用地震波反射技术(TSP)、地质雷达等获取地层岩土体的弹性波波速、岩土体的含水状况等岩土体的特征信息,综合评判围岩的稳定性特性.因此,提出了在充分利用随施工进行的超前地质预报

获得的综合信息基础上,将隧道施工中揭示的围岩及掌子面岩土体的定性、定量观测和现场揭示围岩的回弹强度相结合,综合进行隧道和地下工程围岩动态分级的新的隧道围岩分级方法.并将其应用于东北某公路隧道的施工,验证了该动态分级方法的合理和可行性.

## 1 基于地质预报技术的围岩动态分级

### 1.1 隧道围岩的[BQ]分级方法及分级参数

针对隧道和地下工程中围岩的分级,不同的学者和专家从不同角度提出围岩级别划分标准时,对影响围岩稳定性的因素及各因素在分级中所占的权重的分配中存在着较大的差异,各种分级方法在分级因素的取舍和因素权值赋值时不够全面或存在对其中的某项重要因素权重赋值过小而对其它因素的赋值过大等问题.但就目前围岩的分级原则和考虑因素而言,隧道工程领域专家们均认为合理的围岩分级中以下原则和影响因素需要考虑:

(1) 围岩的质量指标是最重要的基本因素之一,因此需要在分级因素中体现并赋以合适的权值,如岩石和岩体的强度、岩体结构面的特性以及岩体的结构构造等.

(2) 围岩分级的目的是方便工程的应用,因此分级中需要将多种因素进行分类组合,从而得到一个方便应用的综合性指标.

(3) 分级中各种表征参数需要避免出现重复或搭接的现象,因此各个分级因素间需要相互独立.

(4) 分级因素要选取容易描述岩石体特征的因素,且要采用易于测试的定量评价指标.

因此,遵守上述原则,论文结合在建的东北某公路隧道工程的施工,在我国岩体分级方法基础上,将隧道施工中纳入施工步骤的地质超前预报信息引入隧道与地下工程的围岩分析方法中,在 BQ 分级指标中添加表征掌子面揭示岩体节理延展性的指标,并采用掌子面岩石体的回弹强度取代常用岩体分级中的岩石的单轴饱和抗压强度,提出了基于隧道和地下工程超前地质预报信息的围岩分析新方法.

我国在 2014 年发布并作为工程岩体分级的强制性国家标准《工程岩体分级标准》(GB/T50218-2014)以及《公路隧道设计规范》(JTGD70-2-2014)中,基于工程的稳定性,推荐了一套岩体稳定性的综合评判分级方法,这使得我国的岩石工程的建设工作在勘察阶段、设计阶段、施工阶段以及定额编制阶

段均有了统一的参考基础.这一标准是一个岩体质量通用的分级方法,能够运用在不同情况的岩石工程中对岩体质量进行评估和分级.

《工程岩体分级标准》(GB/T50218-2014)将岩石体的定性、定量分析相联系,按两步序进行岩体的分级:首先根据组成岩体的岩石性状,确定岩石的基本质量  $BQ$ ,然后考虑实际工程的相关特性,将岩体性状特性同工程的稳定性相关联确定不同的影响权重,最终确定岩体的级别.其中,规范岩石的基本质量指标  $BQ$  的表述见式(1)所示;基于  $BQ$  的修正岩体质量指标  $[BQ]$  表述式见式(2)所示;根据修正岩体质量指标  $[BQ]$ ,给出了隧道围岩的基本分级及不同级别岩体的稳定性特性.

$$BQ = 90 + 3R_c + 250K_v \quad (1)$$

$$[BQ] = BQ - 100(K_1 + K_2 + K_3) \quad (2)$$

式中:  $R_c$  为岩石的单轴抗压强度;  $K_v$  为岩体完整性系数;  $K_1$  为在考虑地下水影响情况下的修正系数;  $K_2$  为考虑主要软弱结构面产状影响的修正系数;  $K_3$  为考虑初始应力状态影响的修正系数.

在开展围岩的具体分类工作中,应该基于岩体基本质量  $BQ$  分类标准,考虑修正因素的影响,从而使得岩体的  $BQ$  值得以修正.修正主要考虑以下几方面影响:主要的软弱结构面产状、地下水和原始应力状态.按修正后的岩体基本质量指标  $[BQ]$ ,结合隧道施工中现场巡查、地质勘探和现场或室内的实验等,基于隧道和地下工程围岩稳定性的定性特征,确定隧道和地下工程的围岩级别,并给出相应的施工应对措施.

在隧道的施工中采用地质雷达以及地震波等超前地质预报系统对隧道前方地质条件展开预测.以工程中采用的地震波方法为例,目前国内通常使用的仪器为瑞士的 TSP203 系统,该系统通过在隧道施工掌子面前方边墙中的钻孔内的弱爆破,激发一弹性地震波,弹性地震波在传播中遇到如岩体破碎带、断层、溶洞、岩石体性质变异面以及地下水等岩石波阻抗的差异界面时将发生反射;根据安装在掌子面前方钻孔内接收器收集的一系列弹性波的频谱特性,通过 TSPwin 软件处理,可探知隧道掌子面前方 200 m 范围内岩石体的综合地质信息,进而对隧道围岩的稳定性给出一定性的评判.

TSP203 系统采集到的地震波信息通过 TSPwin 软件的处理,可以获得反映岩石强度的力学特性参数以及掌子面岩体的 P 波、SH 波和 SV 波的波速等信息,因此根据 TSP 获取的隧道前方岩体的地质参

数和隧道掌子面揭示围岩情况的观测,经简单的试验和测试既可进行隧道围岩的动态量化分级.

1.2 [BQ]分级各参数的确定方法

1.2.1 隧道围岩回弹强度确定

在隧道施工现场,岩石的单轴饱和抗压强度实验和岩石的点荷载实验操作复杂,难以测定,所以用回弹强度来代替岩石的饱和单轴抗压强度.在隧道开挖过程中通过大量的探测围岩回弹强度以及对相同掌子面的岩石取样进行室内饱和单轴抗压强度实验,经过回归分析而建立了如下经验方程:

$$\sigma_c = 144.785 \times (1 - e^{-0.01086 \sigma_{hi}})$$
 (3)

1.2.2 岩体完整性指标确定

国内外各种方法中都有自己对围岩完整性的衡量指标,本文遵循分级因素选取的第②个原则,采用国标 BQ 法中岩体完整性指标  $K_v$ ,岩体的完整程度就是通过这一系数来反映的,其计算公式为:

$$K_v = \left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2$$
 (4)

式中:  $V_p$  为岩体的纵波波速;  $V_s$  为岩石的纵波波速.从式中可以看出,当利用地震波得到岩体的纵

波波速( $V_p$ )与岩石的纵波波速( $V_s$ )比值的平方,就可以得到我们想要预测段的  $K_v$  值.

1.2.3 节理延展性指标确定

当隧道掌子面岩体中存在半贯通或贯通性的节理时(隧道掌子面节理的典型素描如图 1 所示),根据对节理的统计,结合表 1 进行定量化后作为节理延展性的指标.

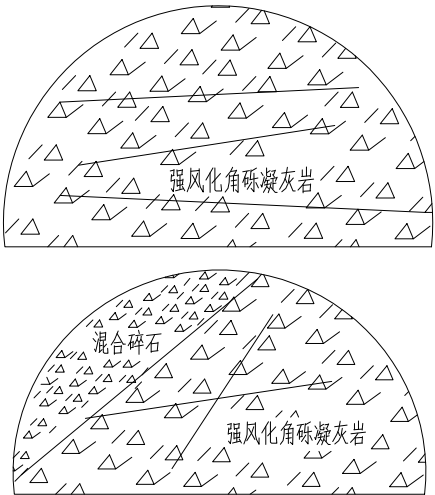


图 1 掌子面素描  
Fig.1 Working face sketch

表 1 节理延展性和地下水状态取值表  
Tab.1 Values of joints and groundwater statue

	状态		取值			类型		取值
	干燥	0.9~1.0	线状	0.4~0.6		贯通	0	
地下水 取值表	潮湿	0.8~0.9	股状	0.2~0.4	节理延展 性取值	半贯通	0.5	
	滴漏	0.6~0.8	突水	<0.2		非贯通	1	

岩体的控制性结构面的光滑状况以及其的充填状况等可以通过不连续结构面的充填状况反馈得到;如果结构面张开的水平大,其风化的情况就越为严重,其对围岩的定性的影响就越大.如果有软弱结构面,地震波的反射将呈现负反射特性,且随着结构面的特性的弱化,负反射特性就会更加的强烈,因此,可利用地震 P 波负反射的剧烈程度获得软弱结构面的量化表征特性.

1.2.4 地下水影响指标确定

为了方便起见,根据肉眼现场能够观察到的地下水大小和流量,结合表 1 进行定量化处理.

通过 TSP 判断地下水发育情况,根据以下方法来对取值进行量化: (1) 隧道(洞)干燥,地下水不发育,解译结果当中没有出现含水的特性,此时特征值取 0~0.2; (2) 隧道(洞)湿润,地下水不发育;解译结果之中, P 波相对于 S 波反射较弱,则特征值取 0.2~0.4; (3) 隧道(洞)施工中有裂隙水渗出,地下水情况为较发育的状态;解译结果中, P 波相比于 S 波反射能量明显地减弱,此时特征值取 0.4~0.6;

(4) 地下水状况为发育,隧洞内出现中等水压,解译结果之中, P 波相对于 S 波的反射能量很明显减弱,并且  $V_p/V_s$  比值增大或者有泊松比陡增现象,这时特征值取 0.6~0.8; (5) 地下水发育情况很好,有重大的水问题出现,解译成果当中, P 波相对于 S 波反射明显减弱, S 波有较宽的反射条带以及良好延展性能,此时  $V_p/V_s$  比值或者泊松比有大范围的增大,则特征值取值为 0.8~1.0.

1.2.5 主要结构面产状和隧道关系确定

洞轴线跟不利的结构面之间相互组合关系对隧道的稳定性有很大影响,当二者间的夹角越小时,围岩稳定性就越差.

TSP203 可以利用反射传播所用时间、地震波的传播速度等来获得反射面的所在位置以及其和隧道的中轴线之间的夹角.根据结构面产状与隧道中轴线之间关系的不同,参考 RMR 分级体系中结构面与隧道走向关系的定量指标,将隧道围岩中主要结构面对隧道稳定性影响值区分为三大类四小类,其特征值取值如表 2 所示.

1.2.6 地应力状态确定

地应力状态同样也在很大程度上影响着围岩的稳定性，这种影响在高地应力区和极高地应力区中表现的尤为明显。公路隧道场区的地应力状态经常在勘察阶段进行测试或评定，并给出极高应力区、高应力区和低应力区 3 种评定结果，并据此作为后期隧道设计以及确定施工方法的重要依据。

参照《工程岩体分级标准》(GB/T 50218-2014)，对不同的断面进行的分类估值见表 3 所示。

表 2 主要结构面产状影响取值表 Tab.2 Affect values of the main structural plane			
结构面走向	结构面倾	工程效	分数
走向垂直于隧 道轴线	顺倾角开挖	45°~90°	非常有利 1
		20°~45°	有利 0.8~0.9
	反倾角开挖	45°~90°	一般 0.5~0.7
		20°~45°	不利 0.2~0.4
走向平行于 隧道轴线	—	45°~90°	非常不利 0~0.1
		20°~45°	一般 0.5~0.7
任意走向	—	0°~20°	一般 0.5~0.7

表 3 地应力状态评分表  
Tab.3 Crustal stress state ratings

地应状态	主要现象	分数
极高地应力区	a. 硬质岩：施工时伴随着岩爆的现象，有岩块弹出，隧洞四周岩体出现脱离，有很多新的裂隙产生，很难形成洞室	0~0.3
	b. 软质岩：岩芯饼化，施工时隧洞四周的岩体脱离，十分明显的位移变化，乃至还出现了大的位移，连续时间很长，很难形成洞室	
高地应力区	a. 硬质岩：施工时或许会发生岩爆，有脱离或掉块出现在隧洞四周，产生较多的新的裂隙，不易形成洞室	0.3~0.7
	b. 软质岩：岩芯偶尔会有饼化的现象，洞壁四周岩体开挖时位移显著，有较长的持续时间，较差的成洞性	
低地应力区	没有岩爆、岩芯饼化等现象的发生	0.7~1

2 隧道围岩分级实例

2.1 隧道工程概况

东北某隧道为分离式独立双洞隧道，隧道最大的开挖宽度 12 m，隧道两洞轴线间距 13~35 m，左线隧道长 1 625 m(里程 ZK275+170~ZK276+795)；右线全长 1 600 m(里程为 RK275+180~RK276+780)。隧道位于长白中低山的区域内，隧址两侧的山体及分水岭主要呈现宽广的玄武岩岩熔台地地貌，是长白山区的第二级夷平面，其海拔高程在 600~830 m，相对高度为 100~200 m；隧道隧址出露地层安山岩类、侏罗系河湖相碎屑岩和第三~第四系玄武岩，零散有太古界、上元古界地层。

隧道隧址区断裂一般不发育，规模较小，破坏程度不严重；隧道影响带内的断裂线的方向大致有 NEE~E(W)，NW、NE、NNE 等四组，分别形成于华力西—印支期和燕山期。新第三系以来的构造痕迹不明显，玄武岩中主要为原生节理，少部分为定向分布的裂隙。

2.2 隧道围岩分级

在隧道的开挖施工的整个施工期内，根据随隧道的施工进行的开挖掌子面的观察、隧道地质超前预报和围岩级别的判定工作，任意选取了 30 个掌子面，并依据提出的新的围岩动态分级方法需要进行

的测试项和测试方法，对现场情况开展勘察及原位试验工作，收集围岩分级的指标，最后用 BQ 分类法来对隧道围岩的级别进行判定。下面结合隧道掌子面选取的 30 个典型断面的情况说明分级方法：

(1) 跟随隧道的施工，进行岩石体的强度确定。为了确保回弹试验能把整个掌子面都有所覆盖，需要至少进行 16 次回弹试验，在掌子面的不同位置；然后将最大值和最小值分别去除掉三个，把余下的十个数值进行平均得到此断面的回弹强度。根据获取的隧道掌子面的回弹强度，按式(3)推算隧道掌子面岩石体的单轴饱和抗压强度，隧道 YK 276+633 和 ZK 276+792.2 断面的回弹强度如表 4 所示。

表 4 典型断面的回弹强度  
Tab.4 rebound strength about typical cross-sections

桩号	回弹强度		单轴饱和抗 压强度/MPa
	测量值	平均值	
YK276+633	36,39,15,41,34,49,37,42,38,34,17,35,33,45,35,21	36.3	47.16
ZK276+792.2	24,11,9,35,15,16,23,31,19,15,20,12,18,18,27,14	18.2	25.96

(2) 跟踪隧道的施工进行掌子面的雷达探测，根据地质雷达图及掌子面状况可计算出岩体完整性指标并做出判断掌子面前的地下水状况。根据隧道掌子面桩号 YK 276+633 的雷达探测图推断掌子面中部前方局部存在波阻抗界面，因此前方围岩的节

理裂隙较发育;YK 276+792.2 在所测面前方 2-16 m 区域内围岩较为破碎,节理裂隙带较密集;在测试面前方 14-25 m 区域内岩石较潮湿,围岩较破碎。

(3) 掌子面揭示的地质信息对于围岩质量判别和分级具有十分重要的意义,常规的做法是进行掌子面地质素描。对隧道桩号 ZK275+298.0 进行的地质素描图和现场照片见图 2。

(4) 在隧道施工过程中进行 TSP 地震波探测,隧道 TSP 的地质超前预报每间隔 100-150 m 进行一次。当隧道掌子面开挖刚结束,就进行该面前方的超前地质探测。典型断面 TSP 的测试波形图和数据见图 3 所示。按以上(1)-(4)的步骤对东北某隧道的围岩进行的岩体动态分级结果见表 5 所示。将本文提出的动态分级新方法得到的围岩级别与原设计围岩等级对比列于表 5。

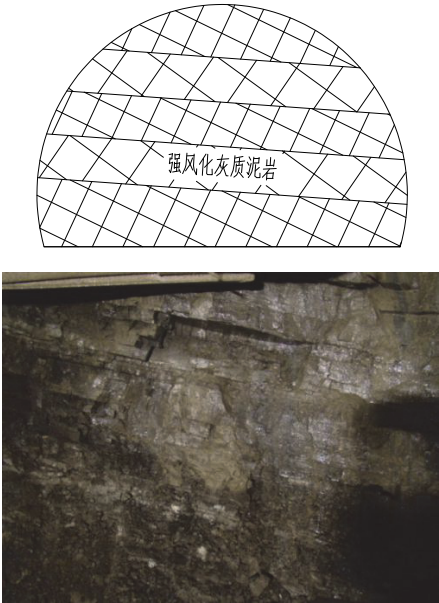


图2 ZK275+298.0 掌子面素描图  
Fig.2 Working face sketch at ZK275+298.0

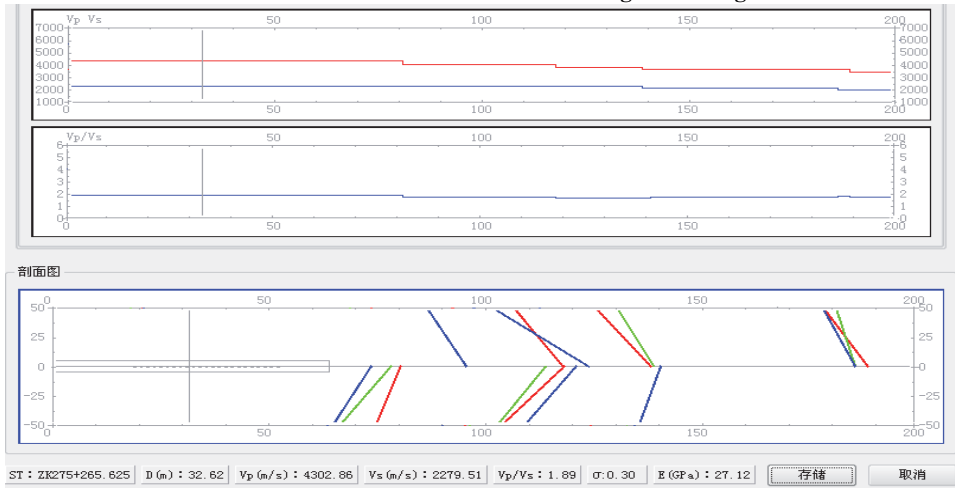


图3 ZK275+265.63 测试波形图  
Fig.3 Testing Waveforms at ZK275+265.63

表5 本文分级结果与原设计围岩等级的对比  
Tab.5 The classification contrast between the paper and the original design

桩号	本文方法结果	设计等级	$\sigma_{si}$ /MPa	$w$	$\lambda$	$J_{yz}$	$k_v$
YK276+582	IV	IV	24.71	0.7	0.5	0.0	0.62
ZK276+520	IV	III	25.14	0.6	0.5	0.0	0.67
YK275+459	IV	IV	21.84	0.8	0.6	0.5	0.63
ZK275+477	IV	IV	25.59	0.6	0.4	0.5	0.68
ZK275+254	V	V	11.09	0.6	0.6	0.0	0.38

由表 5 给出的隧道动态分级及原设计围岩分级的对比可以看出,东北某隧道某些里程段随着大量信息的揭示,采用本方法得到的围岩等级与原实际等级相比有所变动,因而随着隧道施工对围岩进行动态分级对施工安全或设计变更都是有重要意义的。同时,隧道动态分级指标的现场测试实践也表明,按动态分析方法推荐的对围岩等级起决定性作用的岩体强度、结构面特性与岩体结构三大类因素表征指标的获取简单、方便,因此,基于隧道超前

地质预报信息的隧道动态分级方法可行、有效。

### 3 结论

针对隧道围岩分级中存在的问题,提出了基于隧道施工中进行的超前地质预报信息并结合隧道施工中跟随施工进行的巡查、岩体的回弹强度等进行隧道围岩动态分级的新方法;对在建的东北某隧道施工期围岩进行的动态分级验证表明,该分级方法

得到的结果和现场勘察[BQ]法分级结果基本吻合,证明了该方法的有效性. 论文研究结论如下:

(1) 在施工开挖期间, 基于现场试验及室内试验, 用岩石回弹强度和掌子面的状态来取代饱和单轴抗压强度以及地应力状态指标是经济、合理可行的方法.

(2) 隧道掌子面的节理的延展性是影响隧道稳定性的重要因素, 通过地质素描, 采用定性定量相结合的方法获得其对隧道稳定性的影响指标, 是基于地质超前预报信息围岩分级的重要方面.

(3) 基于掌子面岩石(体)的回弹强度和隧道围岩的 TSP 超前地质预报参数, 并计入裂隙、地下水等的影响, 可获得的隧道基于[BQ]标准的岩体的动态分级, 操作性强.

## 参考文献 References

- [1] 林韵梅. 岩石分级的理论与实践[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1996.  
LIN Yunmei. Theory and practice of rock classification [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1996.
- [2] BARTON N, GRIMSTA E. Rockmass conditions dictate choice between NMT and NATM[J]. Tunnels and Tunneling, 1994, 26(3):135A.
- [3] BARTON N, LIEN R, LUNDE J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support[J]. Rock Mechanics Felsmechanik Mécanique des Roches, 1974, 6(4):189-236.
- [4] LIU B, YUE Z Q, THAM L G. Analytical design method for a truss-bolt system for reinforcement of fractured coal mine roofs—illustrated with a case study[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 42(2):195-218.
- [5] 陈志平, 叶兴军, 孟陆波, 等. 隧道开挖跨度对围岩级别的影响研究[J]. 中外公路, 2011(1): 158-161.  
CHEN Zhiping, YE Xingjun, MENG Lubo, et al. Research on the influence of the level of surrounding rock in the span of tunnel excavation[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2011(1):158-161.
- [6] 王迎超, 徐兴华, 刘永莉, 等. 公路隧道围岩分级的集对分析模型[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(4):114-119.  
WANG Yingchao, XU Xinghua, LIU Yongli, et al. Set pair analysis model for surrounding rock classification of highway tunnel [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011, 43(4):114-119.
- [7] 徐燕, 俱磊. 两步分级法在公路隧道动态施工围岩分级中的应用[J]. 现代隧道技术, 2007 44(2): 16-19.  
XU Yan, NAI Lei. Application of two-step classification method in the surrounding rock classification of highway tunnel dynamic construction[J]. Modern Tunnelling Technology, 2007, 44(2):16-19.
- [8] 曾杰, 靳晓光, 高永, 等. 公路隧道围岩动态分级方法研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2007, 29(6):76-79.  
ZENG Jie, QI Xiaoguang, GAO Yong, et al. Study on dynamic classification method of surrounding rock of highway tunnel[J]. Journal of Chongqing Architecture University, 2007, 29(6):76-79.
- [9] 师伟, 史彦文, 韩常领, 等. RMR围岩分级法与中国公路隧道围岩分级方法对比[J]. 中外公路, 2009(4): 383-386.  
SHI Wei, SHI Yanwen, HAN Changling, et al. Comparison of RMR surrounding rock classification method and surrounding rock classification method of highway tunnel in China[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2009 (4): 383-386.
- [10] 张前进. 基于TSP多波关系的围岩稳定性等级判定方法研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2013.  
ZHANG Qianjin. Study on the method for determinate the level of surrounding rock stability based on the relationship between TSP multiwave[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2013.
- [11] 胡修文, 胡盛明, 卢阳, 等. 岩体体积节理数的统计方法及其在围岩分级中的应用[J]. 长江科学院院报, 2010, 27(6):30-34.  
HU Xiuwen, HU Shengming, LU Yang, et al. The statistical method of the volume joint number of rock masses and its application in the classification of surrounding rock[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2010, 27(6):30-34.
- [12] 孙辉, 郑颖人, 王在泉, 等. 埋深在围岩分级修正中的应用探讨[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(1): 94-98.  
SUN Hui, ZHENG Yingren, WANG Zaiquan, et al. Discussion on the application of the buried depth in the surrounding rock classification correction[J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(1):94-98.
- [13] 李彦恒, 冯利, 罗立平. 基于Hoek-Brown准则的岩体分级法在地下工程中的应用[J]. 岩土力学, 2012(S2):201-204.  
LI Yanheng, FENG Li, LUO Liping. Application of rock masses classification method based on Hoek-Brown criterion in underground engineering[J]. Chinese Journal of Rock and Soil Mechanics, 2012(S2):201-204.
- [14] 马超锋, 介玉新, 梁昌玉. 山岭隧道施工阶段围岩动态分级研究[J]. 铁道学报, 2013, 35(10):106-113.  
MA Chaofeng, JIE Yuxin, LIANG Changyu. Research on surrounding rock dynamic classification in the construction stage of mountain tunnel[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(10):106-113.
- [15] 宋战平, 杨腾添, 张丹锋, 等. 溶洞对隧道(洞)稳定性影响的数值试验及现场监测分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2014, 46(4): 484-491.  
SONG Zhanping, YANG Tengtian, ZHANG Danfeng, et al. Numerical test and field monitoring analysis of the influence of karst cave on stability of tunnel and hole[J]. J Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2014, 46(4):484-491.
- [16] 宋战平, 蔡彦波, 赵国柱, 等. 岩溶隧道施工关键技术及工程应用研究[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2013.  
SONG Zhanping, QI Yanbo, ZHAO Guozhu. Study on key technologies and engineering application of karst tunnel construction [M]. Xi'an: Shaanxi Science & Technology Press, 2013.
- [17] 刘小军, 张永兴. 地形因素及围岩类别对偏压隧道的影响效应分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2010, 42(2): 205-210.  
LIU Xiaojun, ZHANG Yongxing. Analysis of effects of topography factors and surrounding rock types on bias tunnel[J]. J Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2010, 42(2):205-210.

(编辑 沈波)