

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2015.05.020

基于改进 RMR 方法的深部隧道稳定性分析

王凯旋¹, 苏永华¹, 张盼凤¹, 罗正东²

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 湘潭大学 土木工程与力学学院, 湖南 湘潭 411105)

摘要:为了解决在岩石工程领域中的基于地质力学的岩体评级方法只适用于浅部岩层,而在大埋深、高应力环境中出现不适应性这一问题而展开研究,首先,从RMR分类方法入手,通过引入能较好反映岩体质量的岩体块度指数,并考虑地应力的影响,对传统的RMR分类方法进行改进,以确定出改进后的评估值 RMR_{new} ;其次,基于 RMR_{new} 确定出隧道支护体系的作用荷载,并对支护体系进行分析,确定其极限承载能力;最后,基于荷载-结构法构建起隧道稳定性分析框架,并对隧道安全状态进行评估。对工程实例进行分析发现,基于改进后的RMR分类方法所得到的分析结果与实际情况相符,说明地应力、岩块尺寸以及埋深等对隧道稳定性有明显影响。

关键词:隧道工程;隧道安全;改进RMR方法;荷载-结构法;岩体块度指数;地应力修正;稳定系数

中图分类号:U451+.4

文献标识码:A

文章编号:1002-0268(2015)05-0123-06

Analysis on Stability of Deep Tunnel Based on Modified RMR Method

WANG Kai-xuan¹, SU Yong-hua¹, ZHANG Pan-feng¹, LUO Zheng-dong²

(1. School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha Hunan 410082, China;

2. School of Civil Engineering and Mechanics, Xiangtan University, Xiangtan Hunan 411105, China)

Abstract: The method of rock mass rating (RMR) based on geological mechanics in the field of rock engineering applies only to shallow strata but does not adapted to large buried depth and high stress environment. In order to solve this problem, First of all, based on the RMR classification method, by introducing rock block index which can better reflect rock quality into the method, and considering the influence of in-situ stress, the traditional RMR rock mass classification system is improved to determine RMR_{new} , the modified value. Then, the load on tunnel support system is determined based on the RMR_{new} , and the support system is analysed to determine its ultimate bearing capacity. At last, the analysis framework of tunnel stability is constructed based on load-structure method, and the tunnel safety status is analysed. The analysis of a project example shows that the analysis result based on the modified RMR method is consistent with the actual situation, which illustrates that in-situ stress, rock block size and buried depth have obvious influence on the stability of tunnel.

Key words: tunnel engineering; tunnel safety; modified RMR method; load-structure method; rock block index (RBI); in-situ stress correction; stability coefficient

0 引言

荷载-结构法因其概念清晰,方法简单,易于接受掌握等特点而成为地下结构工程中广泛应用的计算模型^[1]。该方法的关键在于准确确定支护结构

上的作用荷载,以保障后续支护结构设计的安全可靠,科学合理。目前该计算模型中荷载的确定方法有多种,如卡柯公式法、普氏理论法及规范法等,且随着研究的发展又有一些新的方法被提出来。之前有学者^[2-4]基于工程界广泛采用的RMR分类方法

收稿日期:2014-06-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51078136, 51378195)

作者简介:王凯旋(1990-),男,河南鲁山人,硕士研究生。(wqx1990@126.com)

提出围岩顶板压力确定方法,将其系统评分 RMR 值作为顶板压力确定公式中的重要参数。该法利用地质勘察资料,基于 RMR 分类方法获得 RMR 值进而直接确定作用荷载,简单且易于操作,但分析结果往往不太理想^[5]。鉴于此,本文从 RMR 分类方法本身着手对其原因进行探究。

RMR 地质分类方法是由 Bieniawski 于 1973 年提出,后经多次修改,目前的版本共考虑 6 个方面因素的影响。其中由 Deer 提出的 RQD 表示大于等于 10 cm 的岩芯累积长度占整个钻孔进尺长度的百分率,是 RMR 分类方法依赖的重要评价参数之一,主要体现的是岩芯的完整程度,是表征岩体结构的指标之一。但是,之后的研究^[6]发现 RQD 本身存在不足之处:以 10 cm 作为分界没有给出充分论证,所有尺寸大于 10 cm 的岩块在评价岩芯质量的过程中被认为作用相同,而所有尺寸小于 10 cm 的岩块在评价岩芯质量时又不考虑在内。这些不足导致在某些情况下 RQD 值显得意义不大,并不能很好地反应岩芯质量。因此,有必要改进岩芯质量评价方法,使其能够满足 RMR 系统分析结果准确性的要求。

另外,大量的研究^[7-8]表明,在地下工程施工期间进行的岩体开挖,由于地应力的原因常常会促使开挖影响范围内的岩体产生一系列的变形和破坏现象,使该区域岩体质量发生改变,甚至导致工程岩体失稳,并且地应力越大,影响越大。所以,在对深部隧道工程的岩体质量进行评估时,其地应力的影响应当考虑在内,且不可忽略。但是在 RMR 分类方法中,地应力作为与岩体稳定性和工程运营可靠性密切相关的影响因素并没有被充分考虑到。

鉴于上述原因,本文将引入更准确表征岩体质量的岩体块度指数,并考虑地应力影响,对 RMR 分类方法进行优化改进。基于改进的 RMR 值确定支护结构顶板压力,进而与隧道支护体系承载能力联合分析,综合判断隧道的稳定性,形成一个完整的隧道稳定性分析方法。

1 RMR 分类方法的改进

1.1 RMR 分类方法

RMR 分类方法最新的为 1989 年版本,考虑了 6 个参数。其中前 5 项,分别为岩体材料单轴压缩强度,岩芯质量指标 (RQD),不连续面间距,不连续面条件以及地下水条件。根据实测资料,按照评分方法,分别给予评分: RMR_1 , RMR_2 , RMR_3 , RMR_4 , RMR_5 。将以上各类参数的评分值相加得到岩

体质量总分 RMR_{basic} , 可表示如下:

$$RMR_{basic} = RMR_1 + RMR_2 + RMR_3 + RMR_4 + RMR_5 \quad (1)$$

另外,通过地质资料分析,根据节理走向和倾角对岩体是否有利,给予不同的修正值 RMR_6 。所以,最终得到的 RMR 值可表示如下:

$$RMR = RMR_{basic} + RMR_6 = \sum_{i=1}^6 RMR_i \quad (2)$$

该分类方法自提出之后,引起了学者们的关注,有些研究甚至是在该方法基础上开展的。但是该方法主要是以浅部岩体为研究对象,随着深部工程,复杂环境工程的不断出现,地应力对岩体的影响程度与浅部有所区别。所以分类研究也应该不断的拓展加深,使之适应工程需要。

1.2 岩体块度指数

岩体块度指数 RBI 是以岩体各基本块度的概率分布为基础,表征岩体完整程度的综合指标。传统分类方法中 RQD 将大于等于 10 cm 作为一个尺寸区间对岩块进行统计,不注重块体尺寸的影响。例如:2 个岩芯质量指标 RQD 值均为 90,一个岩芯的统计尺寸主要以 20 ~ 30 cm 为主分布,另外一个则以 50 ~ 60 cm 为主,统计分析得到的 RQD 虽然是一样的,但二者之间的岩体质量显然是有差异的。 RMR 值对 RQD 具有相当强的依赖性,可这种差异在 RMR 分类方法评价过程中却又无法得到体现,使得 RQD 本身的不足也直接影响着 RMR 分类方法的评价结果的合理性。针对不足,许多学者提出了改进方法。

长江水利委员会陈德基^[9]认为影响岩体工程地质性质的基本因素为岩块的大小,组合比例和裂隙的性状,并于 1979 年率先提出块度模数的概念,考虑岩体中不同尺寸的岩块并进行统计,加权处理得到块度模数,藉此对岩体的完整性进行评价。刘克远等在“高坝坝基岩体稳定性评价及可利用岩体质量标准的研究”中建立了反映岩体完整程度的岩体块度指数新指标。张世殊^[10]对金沙江下游溪洛渡水电站坝基的勘探资料进行分析,以 3, 10, 20, 30, 50, 100 cm 作为块度尺寸分级界限,统计获得各区间内岩芯分布概率,同样进行加权处理得到块度指数 RBI 。胡卸文等^[11]在前人研究的基础上再次进行改进,与《水利水电工程地质勘察规范》中评价岩体完整程度时所划分的尺寸保持一致,将实测岩芯长度按 3 ~ 10 cm, 10 ~ 30 cm, 30 ~ 50 cm, 50 ~ 100 cm 和 > 100 cm 划分,以各块度尺寸区间的岩芯获得率与各自相应系数的乘积之和定义为岩体块度指数

RBI 值。

$$RBI = 3K_3 + 10K_{10} + 30K_{30} + 50K_{50} + 100K_{100} = \sum a_i K_i, \quad (3)$$

式中, K_i 分别为相应的岩芯长度区间的岩芯获得率; a_i 为相对应尺寸区间的系数。同时发现, 在 $RQD < 90\%$ 时, 岩体块度指数 RBI 和岩芯质量指标 RQD 值有较好的对应关系, 其关系式如下:

$$RBI = 0.873e^{0.041RQD}. \quad (4)$$

根据现场资料对照 RBI 值, 对岩体质量进行分级, 分级情况见表 1。

苏永华^[12]在定量确定公路隧道 Hoek - Brown 指标的分析过程中, 引入文献 [10] 的 RBI 分级模式, 取得了比较好的效果。

表 1 岩体质量级别与 RBI 关系

Tab. 1 Relationship between rock mass quality level and RBI

岩体结构	整体块状 (I 级)	块状 (II 级)	次块状 (III 级)	镶嵌碎裂 (IV 级)	碎裂 (V 级)
RBI 值	100 ~ 50	50 ~ 30	30 ~ 10	10 ~ 3	3 ~ 1

1.3 地应力修正

传统的 RMR 分类方法主要针对的是浅部岩层, 地应力影响程度较小, 忽略地应力的影响对工程设计分析影响亦不大。但是对处于大埋深、高应力区域的工程, 地应力作为诱导产生破坏的主要原因之一, 必须予以考虑。事实上, Q 分类、国标《工程岩体分级标准》、隧道围岩分类等方法均考虑了地应力的影响。因此, 有必要将地应力的影响考虑在内, 对分类方法的 RMR 值进行修正。

刘业科等^[13]针对地下深部工程的三高状况, 提出了针对 RMR 分类方法的地应力修正方法。根据室内岩石强度 σ_c 与最大主应力 σ_1 的比值 a , 将地应力等级分为低应力, 中等应力, 高应力, 极高应力 4 个等级, 并提出地应力修正值 w 与比值 a 之间存在以下关系:

$$w = 1.9331 \ln(a) - 10.618. \quad (5)$$

而刘焕新等^[14]则参考我国地下洞室岩体分类《工程岩体分级标准》中对地应力的修正方法, 考虑岩石抗压强度与最大水平主应力, 定义岩体抗压强度 σ_{ci} 与最大水平主应力的比值 σ_{hmax} 为损伤系数 Z 。

$$Z = \frac{\sigma_{ci}}{\sigma_{hmax}}. \quad (6)$$

然后将损伤系数 Z 与评分值联系起来, 提出损伤系数 Z 与其评分值的关系式, 即 Z 与地应力修正值 W 之间的关系式:

$$W = 3Z - 18. \quad (7)$$

由以上分析可知: 2 种地应力修正关系式虽然都呈现连续性, 但是第 2 种方法地应力修正值与埋深却呈线性关系。根据现场实测数据分析发现, 浅埋深的地应力大体呈线性增加, 但是当埋深较大时, 地应力与埋深的关系并非如此。相较而言, 第 1 种修正方法考虑了深部工程的三高状况, 修正方法更为合理, 故本文将采用该法对 RMR 值进行地应力修正。参考 RMR 分类方法中节理走向和倾角的修正方法, 将地应力修正值与前 6 项相加进行修正, 修正值记为 RMR_7 。

1.4 改进后的 RMR 方法

由前面介绍可以看出岩体块度指数 RBI 比 RQD 更能准确反映岩体的完整程度, 体现岩体的质量。故在分类方法评分时, 将 RQD 值替换为 RBI 值对岩体进行质量分级。改进后的 RMR 分类方法操作过程: 对岩芯的块体尺寸进行统计, 统计获得岩体块度指数 RBI , 对照表 1 中的分级标准, 对岩体质量分级; 替换原参数 RQD 的评价项, 依照 RMR 分类方法获得评分值, 即确定 RMR_2 ; 同样根据 1.3 章节所述的方法, 利用公式 (5) 确定地应力修正值 RMR_7 。故根据改进后的 RMR 分类方法, 可得到改进后的 RMR_{new} , 表示如下:

$$RMR_{new} = \sum_{i=1}^6 RMR_i + RMR_7 = \sum_{i=1}^7 RMR_i. \quad (8)$$

2 支护结构稳定性系数计算

2.1 隧道顶板压力确定

自 RMR 分类方法提出之后, 在许多工程方面得到应用。但随着研究的拓展, 有学者提出计算公式, 将 RMR 值作为参数, 用于确定隧道工程的支护体系顶板压力。

1983 年, Unal^[2]以煤层压力的研究成果为基础, 引入 RMR 分类方法, 考虑隧道跨度 B 和隧道岩体重量 γ , 提出了基于评价结果 RMR 值的地下工程支护结构顶板压力的确定公式:

$$P_{roof} = \frac{100 - RMR}{100} \gamma B. \quad (9)$$

1991 年, 印度学者 Goel, Jethwa^[3] 同样基于 RMR 分类方法, 考虑隧道埋深 H 和隧道跨度 B , 进而提出顶板压力的计算方法:

$$P_{roof} = \frac{7.5B^{0.1}H^{0.5} - RMR}{20 RMR}. \quad (10)$$

1994 年, Goel^[4]在他的博士论文里, 对 25 条跨

度为2~14 m的隧道进行分析,基于RMR分类方法,考虑隧道埋深 H 和隧道跨度 B ,按土层是否挤压,分别提出相对应的隧道支护结构顶板压力确定方法。

(1) 对非挤压状态

$$P_{\text{roof,ns}} = 2.32 - 0.035RMR + 0.01H + 0.03(B/2)。(11)$$

(2) 对挤压状态

$$P_{\text{roof,s}} = \frac{f_n}{12} 10^{\left(\frac{1.8H^{0.4}(B/2)^{0.1}}{RMR^{1.2}}\right)},(12)$$

式中, f_n 是根据地层挤压程度,通过文献[5]中所述方法确定的隧道挤压校正参数。

本文在对RMR值获取方法进行改进及修正的基础上(修正后的值表述为 RMR_{new}),再借鉴前述方法确定隧道支护结构的顶板压力。

2.2 支护体系承载力

现代支护结构一般采用钢筋混凝土,锚杆,钢拱架等支护方式中的1种或者几种。按照P. P. Oreste^[15]的观点,如果复合支护结构的应变为线弹性,那么复合支护体系的整体刚度就等于支护体系中各单元支护结构刚度之和,即:

$$k_{\text{com}} = \sum_{i=1}^n k_i。(13)$$

假设各支护单元支护时间相同,弹性变位移移相同,那么支护结构上承担的极限荷载 P_{max} 就等于围岩产生的最大允许位移 u_{max} 与复合支护体系刚度 k_{com} 的乘积,即:

$$P_{\text{max}} = k_{\text{com}} \cdot u_{\text{max}}。(14)$$

2.3 隧道结构稳定性计算

2.3.1 稳定性分析

根据稳定性定义,结构稳定性可以通过支护抗力与作用荷载比值判定。该方法简单明了,被广泛用于在边坡,地上结构等领域的稳定性分析。

参考其他工程领域的稳定性分析方法,根据地下结构力学地层围岩与支护结构变形协调原理,采用荷载-结构模型对隧道支护结构稳定性进行分析。对本文而言,稳定性系数即为隧道支护结构极限荷载力 P_{max} 与隧道支护结构上作用的顶板压力 P_{roof} 之比:

$$F_s = P_{\text{max}}/P_{\text{roof}}。(15)$$

2.3.2 隧道稳定性计算步骤

(1) 基于改进的RMR分类方法,分析获得 RMR_{new} 。

(2) 利用 RMR_{new} ,通过已有顶板压力公式,确定支护结构顶板压力 P_{roof} 。

(3) 分析确定隧道支护结构极限承载能力 P_{max} 。根

据一般稳定性原理,计算得到隧道结构稳定性系数 F_s 。

从以上整个分析过程可以看出,该方法思路清晰,简单易用。特别是对处于一线的地质工作者、工程人员来说易掌握。

3 工程实例分析

3.1 工程概况

湖南湘西某山岭隧道全长3245 m,开挖断面为马蹄形,开挖高度为8.6 m,最大跨度为11.6 m。按照岩性和地形地貌将隧道分为若干个支护研究段,本文以其中1个分段为例,说明上述方法的应用。

该隧道在勘察阶段设了3个钻井,其中的二号钻孔位置处于该研究段内,钻孔深度为115.20 m,具体钻孔信息见图1。

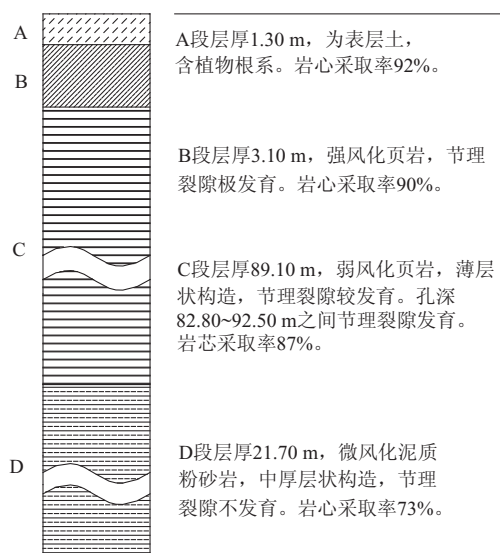


图1 二号钻孔柱状图

Fig. 1 Histogram of drill hole No. 2

根据地质勘察结果,对该段的岩芯中属于不同尺寸区间的岩块进行统计,钻孔中各尺寸区间岩芯长度分布统计结果见表2。

表2 各区间占进尺百分比

Tab. 2 Percentage of each range in tunnelling dimension

区间/cm	3~10	10~30	30~50	50~100	>100
百分比/%	17.3	30.6	29.8	18.8	6.7

根据表2中的统计数据可得该隧道单元段的岩芯质量指标 $RQD = 85.9$ 。

根据表2数据,按照公式(3)计算得到岩体块度指数 $RBI = 28.619$ 。

依照文献[11]研究结果,利用式(4)计算 RBI 得:

$$RBI = 0.873e^{0.041 \times 85.9} = 29.55。$$

按照式(3)、(4)计算得到的RBI值相对误差为3.25%,说明当 $RQD < 90\%$ 时RQD值与RBI值之间确实存在较好的对应关系。

根据改进前的RMR分类方法对该单元段内的岩体进行评价得到RMR值为50。其中依据RQD确定岩体质量为Ⅱ级,相对应RMR分类方法中评分值 $RMR_{2(1)}$ 为17;而依据RBI值确定的岩体质量则为Ⅲ级,相对应RMR分类方法中评分值 $RMR_{2(2)}$ 为13,二者之间评分值差值 $t = -4$ 。

根据现场勘察及室内试验可以得到:该隧道单元段的岩体重度 $\gamma = 26.8 \text{ kN/m}^3$,岩体抗压强度 $\sigma_c = 27.20 \text{ MPa}$,最大主应力 $\sigma_1 = 5.04 \text{ MPa}$ 。所以室内岩石强度 σ_c 与最大主应力 σ_1 的比值 a 等于5.3968,将其代入公式(5)可得相对应的地应力修正值 $w = -7.34$,即 $RMR_7 = -7.34$ 。

综合以上分析结果,整理列于表3。

表3 隧道段顶板压力计算参数

Tab. 3 Calculation parameters of roof pressure of tunnel segment

RQD	RBI	RMR	t	w	RMR_{new}
85.9	28.619	50	-4	-7.34	38.66

对于该单元段,隧道单元段采用的是喷射混凝土和锚杆共同作用的复合支护结构。系统锚杆的平均间距为2.0 m,沿隧道轴向间距为1 m,平均长度为3.0 m,挂金属网,喷射混凝土厚度5 cm。

锚杆的刚度 $k_{\text{bolt}} = 9.284 \text{ 10 MPa/m}$,喷射混凝土的刚度 $k_{\text{shot}} = 48.422 \text{ 62 MPa/m}$,所以复合支护结构的联合刚度 $k_{\text{com}} = 57.706 \text{ 72 MPa/m}$ 。另外,支护结构允许极限位移 $u_{\text{lim}} = 4.003 \text{ mm}$,所以联合刚度与极限位移相乘得到极限承载力 $P_{\text{max}} = 0.231 \text{ MPa}$ 。

3.2 计算及比较

利用上述参数,根据改进前、后的RMR分类方法分别确定 RMR , RMR_{new} ,结合其他隧道参数,按照式(9)~(12),确定隧道单元段支护结构顶板压力。同一单元段隧道的支护方式相同,支护体系的极限承载能力相同。因此,此处隧道单元段的稳定性由顶板压力确定方法决定。按照2.3.2节所示分析步骤确定单元段隧道稳定性系数,见表4。

表4 改进前后的分析结果

Tab. 4 Analysis result of before and after modification

稳定性系数(F_s)	式(9)	式(10)	式(12)
改进前	1.516	1.322	1.178
改进后	1.236	0.960	0.964

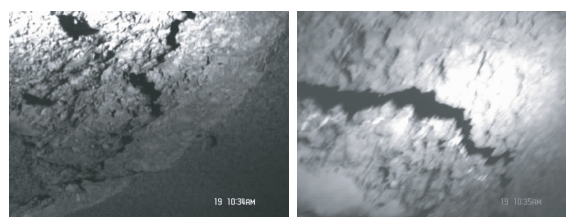
注:依文献[5]法分析,岩层处于挤压状态,故采用式(12)。

3.3 结果分析

由表4可以看出,基于改进前后的RMR分类方法,计算得到的稳定性系数有明显差距。

基于改进前分类方法评分值 RMR ,利用公式(10)、(12)获得隧道单元段支护结构顶板压力,求得该隧道单元段的稳定性系数分别为 $1.322 > 1$, $1.178 > 1$;而基于改进后分类方法评分值 RMR_{new} ,采用与上述同样分析方法得到的该隧道单元段稳定性系数分别为 $0.960 < 1$, $0.964 < 1$ 。

实际情况是该段隧道在建成不久后即出现环向裂纹,混凝土衬砌上的裂纹在不断出现和发展,最后显现宏观裂缝。运营3个月左右,混凝土衬砌结构多处裂纹扩展成断裂(如图2所示),出现多条沿隧道轴向长达200 m的连续裂缝,支护结构基本被破坏。



(a) 墙角处衬砌破坏

(b) 顶部衬砌破坏

图2 隧道支护体系断裂破坏

Fig. 2 Fracture failure of tunnel support system

基于改进前方法的分析结果显示该隧道单元段的支护体系设计性能可以满足上部荷载要求;基于改进后RMR分类方法,由于考虑岩体块体尺寸和地应力的影响,分析结果显示该段隧道支护结构无法满足上部荷载要求,这与工程实际情况相符,也证明了改进方法的实用性。

另外,由该隧道后期观测数据发现,上覆岩层超过250 m的隧道段,其支护结构基本都发生破坏,衬砌裂缝明显,说明隧道支护结构承担的荷载大小与埋深有相当大的关系。而公式(9)在计算荷载时却并没有将这一因素考虑在内,使得依据该荷载计算获得的稳定性系数显示,支护结构承载能力仍能满足顶板压力的作用。

综合分析可以得出,岩体块度的尺寸和地应力对工程岩体的质量具有较大的影响。另外,隧道所经区域的岩体质量,隧道的埋深、跨度等是决定支护结构顶板压力的主要因素。

4 结论

本文主要取得了如下几方面的成果:

(1) 岩体块度指数RBI是表征岩体块度的综合

指标, 将其引入到 RMR 分类方法当中, 能更好地反映岩块尺寸对岩体质量的影响。

(2) 考虑地应力影响, 对 RMR 评分值进行了修正, 分析结果表明地应力对岩体的稳定性有较大影响。

(3) 构建了基于荷载-结构模型的隧道支护结构整体稳定性系数计算框架。并结合工程实例, 通过对比分析发现基于改进 RMR 分类法的分析结果更符合实际工程状况。

(4) 岩体风化、软化等诸多不确定性因素对 RMR 分类法评价结果的影响有待进一步研究。

参考文献:

References:

- [1] 宋克志, 李福献, 朱雷敏, 等. 隧道二衬结构受力影响因素的敏感性分析 [J]. 公路交通科技, 2014, 31 (2): 86-91.
SONG Ke-zhi, LI Fu-xian, ZHU Lei-min, et al. Analysis on Sensitivity of Influencing Factors of Tunnel Secondary Lining Structure Stress [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31 (2): 86-91.
- [2] UNAL E. Design Guidelines and Roof Control Standards for Coal Mine Roofs [R]. State College, PA: Pennsylvania State University, 1983.
- [3] GOEL R K, JETHWA J L. Prediction of Support Pressure using RMR Classification [C] // Proceedings of Indian Geotechnical Conference. India: [s. n.], 1991: 48-52.
- [4] GOEL R K. Correlations for Predicting Support Pressures and Closures in Tunnels [D]. Nagpur, India: Nagpur University, 1994.
- [5] GOEL R K, JETHWA J L, PAITHANKAR A G. Indian Experiences with Q and RMR Systems [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1995, 10 (1): 97-109.
- [6] MARINOS V, MARINOS P, HOEK E. The Geological Strength Index: Applications and Limitations [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2005, 64 (1): 55-65.
- [7] 靳晓光, 李晓红. 高地应力区深埋隧道软弱围岩支护结构力学特性研究 [J]. 公路交通科技, 2008, 25 (2): 101-105.
JIN Xiao-guang, LI Xiao-hong. Study on Mechanical Properties of Support Structure of Deep Buried Tunnel Soft and Weak Surrounding Rock in High Situ Stress Area [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25 (2): 101-105.
- [8] 陈亮, 陈寿根, 张恒. 基于应力路径和塑性评估的应力调整分析方法 [J]. 公路交通科技, 2013, 30 (10): 80-85, 116.
CHEN Liang, CHEN Shou-gen, ZHANG Heng. Analysis Methods of Stress Adjustment Based on Stress Path and Plastic Assessment [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013, 30 (10): 80-85, 116.
- [9] 陈德基, 刘特洪. 岩体质量评价的新指标——块度模数 [C] // 全国首届工程地质学术会议论文选集. 北京: 科学出版社, 1983: 138-145.
CHEN De-ji, LIU Te-hong. A New Evaluation Index for Rock Mass Quality: Block Module [C] // Proceedings of the First National Engineering Geological Academic Conference. Beijing: Science Press, 1983: 138-145.
- [10] 张世殊. 坝基岩体块度特征研究 [J]. 工程地质学报, 2001, 9 (4): 353-356.
ZHANG Shi-shu. The Characteristics of Rockmass Block at Dam Foundation [J]. Journal of Engineering Geology, 2001, 9 (4): 353-356.
- [11] 胡卸文, 钟沛林, 任志刚. 岩体块度指数及其工程意义 [J]. 水利学报, 2002, (3): 80-83.
HU Xie-wen, ZHONG Pei-lin, REN Zhi-gang. Rock Mass Block Index and Its Engineering Practice Significance [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, (3): 80-83.
- [12] 苏永华, 封立志, 李志勇, 等. Hoek-Brown 准则中确定地质强度指标因素的量化 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28 (4): 679-686.
SU Yong-hua, FENG Li-zhi, LI Zhi-yong, et al. Quantification of Elements for Geological Strength Index in Hoek-Brown Criterion [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28 (4): 679-686.
- [13] 刘业科, 曹平, 衣永亮, 等. 基于地下深部工程岩体特性的 RMR 系统修正 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2010, 41 (4): 1497-1505.
LIU Ye-ke, CAO Ping, YI Yong-liang, et al. Revised RMR System on Underground Deep Engineering Rock Mass Property [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2010, 41 (4): 1497-1505.
- [14] 刘焕新, 郭奇峰, 郭乔盛. 考虑地应力损伤的岩体质量分级和岩体力学参数的确定 [J]. 中国矿业, 2013, 22 (6): 114-117.
LIU Huan-xin, GUO Qi-feng, GUO Qiao-sheng. Rock Mass Quality Classification Based on In-situ Stress Damage and Determination of Mechanical Parameters [J]. China Mining Magazine, 2013, 22 (6): 114-117.
- [15] ORESTE P P. Analysis of Structural Interaction in Tunnels Using the Convergence-confinement Approach [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2003, 18 (4): 347-363.