

一种新的边坡稳定性评分体系

饶杨安, 贺怀建

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

摘要: 由于岩土工程的复杂性及其数据的不确定性、不完备性, 需要发展经验评价边坡稳定性的体系, 以适应中国山区交通工程建设的需要。基于 Bieniawski 的 RMR 体系、Barton 的 Q 体系、Romana 的 SMR 体系和 Palmström 的 R_{Mi} 体系发展出来一种边坡稳定性评分体系。新体系建立了新的不连续面状态描述和评分标准; 考虑了天然降水的影响; 对应控制性不连续面, 考虑了其不连续面状态, 并给出了评分方法。通过实例展示了新体系的易用性和一定的客观性。

关键词: 边坡稳定性评分体系; 经验评价体系; RMR; SMR; R_{Mi}; 不连续面状态

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

A new slope stability rating system

RAO Yang-an, HE Huai-jian

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: It is necessary to develop empirical evaluation methods for highway construction in mountainous areas in China due to the complexity of geotechnical engineering and the lack of completeness and certainty of geotechnical engineering data. A new slope stability rating system based on Bieniawski's RMR, Barton's Q, Romana's SMR and Palmström's R_{Mi} is put forward. The system employs a new method for describing and rating discontinuity condition considering the influence of raining. The condition of controlling discontinuity is considered in the system; and the rating standard for it is established. An example shows that the system is easy to use and objective to some extent.

Key words: slope stability rating system; empirical evaluation system; RMR; SMR; R_{Mi}; discontinuity condition

1 引言

由于岩土工程的复杂性及其数据不确定性和不完备性, 从岩石试验数据得到岩体属性数据、对岩体整体特征的刻画和把握、岩体稳定性的初步评价都需要研究者发挥主观经验判断。经验体系广泛地应用于隧道工程的稳定性评估和支护设计^[1-3], 而在边坡工程中, 经验体系应用得比较多的是对滚石风险的评估^[4-6], 成功的边坡稳定性评价体系较少, 应用也不广泛。

随着中国的建设向中西部推进, 高等级、大曲率半径、平直的高速公路、铁路越来越多地在山区展开, 每段线路都有数百个规模不一的边坡, 需要发展能快速初步评价边坡稳定性的体系, 以确定哪

些边坡是调查、分析、设计和支护工作的重点。

为适应这一需求, 笔者结合鄂西北某高速公路的边坡工程经验, 发展出了一种新的边坡稳定性评分方法 (slope stability rating system, SSR)。

2 新体系的结构

2.1 基础

好的、成功的经验评价体系在结构上具备以下特点: 能合理、全面地刻画岩体稳定性特征; 符合工程实践的实际和技术条件的限制——很多工程中只有邻近工程的资料和大区域的地质资料, 具体工程位置只能进行踏勘, 没有试验资料或者只能进行有限的试验和测量; 描述标准清晰, 岩体特征的不同状态容易区分; 记录、计算简洁, 容易操作^[1]。

经验评价体系的基础就是工程实践经验，一些成功的体系在不断调整完善的过程中综合了创立者和使用者的经验，并且成功的体系的结构有其合理性，故新的经验评价体系应该借鉴它们的优点。本文的新体系正是如此，分别借鉴通用的 RMR 体系与 Q 体系、评估岩体强度的 R_{Mi} 体系和评估边坡稳定性的 SMR 体系的结构和描述标准。

2.1.1 RMR

Rock Mass Rating (RMR) 由南非科学与工业研究委员会的 Bieniawski 根据他自己在沉积岩浅埋隧道的工程实践经验于 1973 年提出，随后在参数数量、级别边界、参数权重、描述方法等方面进行了调整、完善，最终版本为文献[7-13]。1989 年版的 RMR 包括原岩的单轴抗压强度、岩石质量指标（即 RQD）、节理或者不连续面间距、节理状态、地下水状态、节理产状 6 个参数。前 5 个参数的评分为正值，它们的和是基本 RMR 值，即 RMR_{basic}，范围为 0~100；第 6 个参数为关于节理产状、施工影响的调节参数，它的评分是负值，跟具体工程类型和施工方法相关。Rock Mass Rating 在地下工程中应用比较广，是最成功的岩体经验评价体系之一。

新体系往往继承 SMR、R_{Mi} 的基础上、借鉴了 1989 版 RMR 的结构和描述标准。

2.1.2 SMR

Slope Mass Rating (SMR) 由 Romana 1985 年为适应于边坡工程，在 1976 年版的 RMR 基础上提出^[14]：

$$SMR = RMR_{basic} + (F_1 \times F_2 \times F_3) + F_4 \quad (1)$$

式中： F_1 ， F_2 ， F_3 为与控制性不连续面产状、坡面产状相关的参数， F_4 为与施工影响相关的参数。

新体系继承了 SMR 的结构，借鉴了 SMR 对控制性不连续面、施工影响的评分方法。

2.1.3 R_{Mi}

Rock Mass index (R_{Mi}) 由挪威奥斯陆大学的 Palmström 在其 1995 年的博士论文中提出^[15]，以建立从岩石抗压强度计算岩体抗压强度的方法。R_{Mi} 对不连续面状态的描述借鉴了最新的 RMR 和 Q 体系^[16-17]。

新体系继承了 R_{Mi} 对不连续面状态的描述，参考了其评分标准。

2.2 新体系

新体系包括岩石材料强度、RQD、不连续面间距、不连续面状态、水流状态、控制性不连续面与

施工影响 6 个参数。前 5 者构成新的基础评分——SSR_{basic}，石材料强度、RQD、不连续面间距采用 1989 年版 RMR 的评分标准，不连续面状态采用基于 R_{Mi} 相关部分的新标准，水流状态在 1989 年版 RMR 基础上考虑了天然降水。见表 1~3。控制性不连续面影响采用 SMR 的方法，增加对不连续面状态的考虑，最大调整幅度为 50，1989 年版的 RMR 节理状态的调整幅度相同，1976 年的为 60 见表 4^[9, 13]。施工影响使用 SMR 的标准见表 4。其中不连续面状态的评分见下文。

表 1 岩石材料强度的评分标准（据文献[13]）

点荷载试验强度 /MPa	单轴抗压强度 /MPa	评分分值
>10	>250	15
4~10	100~250	12
2~4	50~100	7
1~2	25~50	4
	5~25	2
此范围内推荐单轴抗压试验	1~5	1
	<1	0

表 2 RQD 与不连续面间距、状态的评分标准（据文献[13]）

RQD /%	评分 分值	不连续面间距 /cm	评分 分值	不连续面状态 $d_c = d_L + d_R + d_A$	评分 分值
90~100	20	>200	20	30	30
75~90	17	60~200	15	25	25
50~75	13	20~60	10	20	20
25~50	8	6~20	8	10	10
<25	3	<6	5	0	0

注： d_L ， d_R ， d_A 的标准见下面相关表格。

表 3 水流条件的评分标准（基于文献[13]）

入渗条件	地下水影响	评分分值
干旱、半干旱地区（年均降雨量 400 mm 以下），坡面排水条件好	完全干燥	15
半湿润地区（年均降雨量 400~800 mm），坡面排水条件好	潮	10
类似华中地区（年均降雨量 800~1 600 mm），排水条件一般	湿	7
类似华中地区（年均降雨量 800~1 600 mm），排水条件差	滴水	4
类似华南地区（年均降雨量 1 600 mm 以上）	流水	0

2.2.1 不连续面状态的描述

R_{Mi} 是积商、指数式体系，它的不连续面状态参数描述是积商式的^[15]：

$$j_c = j_L \cdot j_R / j_A \quad (2)$$

式中： j_c ， j_L ， j_R ， j_A 分别为不连续面的状态因子、尺度和连贯性因子、粗糙度因子、蚀变度因子。

表 4 控制不连续面与坡面相对方位和施工影响的评分标准 (基于文献[14])

Table 4 Rating of relative orientation of controlling discontinuity and slope face, and construction influence

平面破坏的 $ \alpha_j - \alpha_s $, 倾覆破坏的 $ \alpha_j - \alpha_s - 180^\circ $	F_1 值	$ \beta_j $	平面破坏 的 F_2 值	倾覆破坏 的 F_2 值	平面破坏的 $\beta_j - \beta_s$	倾覆破坏的 $\beta_j + \beta_s$	F_3 值	平面破坏 的 $d_R + d_A$	倾覆破坏 的 d_A	F_5 值	开挖方法	F_4 值
$>30^\circ$	0.15	$<20^\circ$	0.15		$>10^\circ$	$<110^\circ$	0	>19	14	0.15	自然边坡	15
$30^\circ \sim 20^\circ$	0.40	$20^\circ \sim 30^\circ$	0.40		$10^\circ \sim 0^\circ$	$110^\circ \sim 120^\circ$	-5	17	13	0.30	预裂爆破	10
$20^\circ \sim 10^\circ$	0.70	$30^\circ \sim 35^\circ$	0.70	1	0°	$>120^\circ$	-20	10	11	0.70	光面爆破	8
$10^\circ \sim 5^\circ$	0.85	$35^\circ \sim 45^\circ$	0.85		$0^\circ \sim -10^\circ$		-42	7	9~8	0.8	一般爆破或 机械开挖	0
$<5^\circ$	1	$>45^\circ$	1		$<-10^\circ$		-50	<3	<7	1	过度爆破	-8

注: 参数意义或直接计算方法, $SSR = SSR_{\text{basic}} + (F_1 \times F_2 \times F_3 \times F_5) + F_4$, $F_1 = (1 - \sin |\alpha_j - \alpha_s|)^2$, $F_2 = \tan^2 \beta_j$, F_3 对应 RMR 1989 年版节理产状调整部分, F_5 值对应控制不连续面状态, F_4 值对应开挖方法的影响, α_j = 控制节理倾向, β_j = 控制节理倾角, α_s = 坡面倾向, β_s = 坡面倾角, d_R , d_A 的标准见相关表格。

新体系继承 RMR 的和差式体系, 因为体系的结构不一样, 不能直接使用 Rmi 体系中不连续面状态的评分标准。另外, 和差式体系在定义各个参数权重之后, 各个参数的具体评分标准之间就没有影响, 积商、指数体系的每个参数的评分标准与其他参数相关, 这也是 Rmi 体系中不连续面状态评分标准不能应用于新体系的原因之一。为此, 定义新的参数为

$$d_C = d_L + d_R + d_A \quad (3)$$

式中: d_C , d_L , d_R , d_A 分别为新体系下的不连续面的状态因子、尺度和连贯性因子、粗糙度因子、蚀变度因子。

在 RMR 体系中, 不连续面状态的最大总分为 30 分, 详细评分中考虑不连续面的长度、张开度、粗糙度、充填情况、风化情况, 它们的分值范围都是 0~6。对比参数的意义可以发现, d_L , j_L 对应 RMR 的长度, d_A , j_A 对应 RMR 的张开度、充填情况和风化情况的总体, d_R , j_R 对应 RMR 的粗糙度。RMR 的粗糙度只考虑大范围的起伏度, 没有考虑局部的手感, 新体系和 Rmi 都考虑了这个特征。根据上面的对比, 确定新的参数 d_L , d_A , d_R 的分值范围分别为 0~6, 0~15, 0~9。 j_R 的一般范围为 0~9, 分析具体评分标准发现, d_R 可以定义为 $d_R = j_R$, 即两个参数的评分方法一致。Rmi 体系中, j_R 可以表示为局部的光滑度 j_s (见表 5) 和大范围的起伏度 j_w (见表 6) 的积, 所以 d_R 和 j_R 可以直接由表 7 的描述确定, 也可以结合表 5, 6 确定。同样的, d_L 可以定义为 $d_L = j_L$ (见表 8)。 j_A 的分值是 0~20, 而且它是越有利分值越小, 这和 d_A 的意义不同, 而且这里体现了积商式体系和和差式体系的不同, 笔者试图在不连续面状态因子中直接使用 j_A , 却发现无法

建立可行的分值区段来区分不同质量的不连续面, 所以 d_A 的评分标准要重新定义, 具体见表 9, 10, 其中“高 1 级”、“高 2 级”蚀变的级别即通常的 6 级风化级别划分, 见表 11。表 5~11 引自文献[15]。

表 5 不连续面起伏度 j_w (据文献[15])Table 5 Rating of discontinuity waviness j_w

起伏程度名称	起伏因子 u	j_w
互锁 (大尺度)		3
台阶状	$u > 3\%$	2.5
大起伏	$u = 0.3\% \sim 3\%$	2
小~微起伏	$u < 0.3\%$	1.5

表 6 不连续面光滑度 j_s (据文献[15])Table 6 Rating of discontinuity smoothness j_s

光滑度名称	描述	j_s
非常粗糙	近乎垂直的台阶、垄起, 对节理面产生互锁作用	3
粗糙	一些明显的垄起、倾斜的台阶; 目测可以看到粗糙物; 表面用手触摸很粗糙 (比 30 号砂纸粗糙)	2
偏粗糙	粗糙物可以区分出来, 可以用手触摸感觉出来 (类似于 30~300 号砂纸)	1.5
光滑	表面看起来光滑, 手触摸也感觉光滑 (比 300 号砂纸光滑)	1
磨光面	可以看到打磨的痕迹。常常有绿泥石或者滑石覆层	0.75
滑擦面	打磨并有细槽的表面, 有断层等相对运动导致	0.6~1.5

注: 滑擦面的实际评分取决于细槽的剪切力。

表 7 不连续面粗糙度因子 j_R 和 d_R ($j_R = d_R$) (据文献[15])Table 7 Rating of discontinuity roughness (j_R and d_R)

光滑度 j_s	起伏度 j_w				
	平面状	稍微起伏	强烈起伏	台阶状	互锁 (大范围)
非常粗糙	3	4	6	7.5	9
粗糙	2	3	4	5	6
偏粗糙	1.5	2	3	4	4.5
光滑	1	1.5	2	2.5	3
磨光面	0.75	1	1.5	2	2.5
滑擦面	0.6~1.5	1~2	1.5~3	2~4	2.5~5

注: ①不规则节理 j_R 和 d_R 建议取值为 5; ②充填节理 j_R 和 d_R 取值为 1。

表 8 不连续面尺度和连贯性因子 j_L 和 d_L ($j_L=d_L$)(据文献[15])

Table 8 Rating of discontinuity size and continuity factor (j_L and d_L)				
不连续面长度 /m	名称和类型	贯通节理 j_L, d_L		非贯通节理 j_L, d_L
		范围	平均值	
<1	非常短层理、叶理	3	2~4	6
0.1~1.0	短/小节理	2	1.5~3	4
1.0~10	中等节理	1	0.75~1.5	2
10~30	长/大节理	0.7	0.55~0.75	1.5
>30	非常长/大充填节理或裂隙	0.5	0.3~0.55	1

注：非贯通不连续面按照贯通的两倍计算；充填节理或裂隙常常是奇异面，此时需要单独考虑。

表 9 不连续面蚀变度因子 j_A 和 d_A （基于据文献[15]）

Table 9 Rating of discontinuity alternation factor (j_A and d_A)				
A. 节理两盘接触				
充填物	描述	j_A	d_A	
-愈合或者焊合节理	软化、不渗透性充填物（石英、绿帘石等）	0.75	15	
-两盘盘面新鲜	除了侵染外，无面层或者充填物	1	14	
-盘面蚀变、风化				
高 1 级蚀变	盘面比岩石蚀变程度高 1 级	2	13	
高 2 级蚀变	盘面比岩石蚀变程度高 2 级	4	11	
面层覆盖或者薄充填				
-砂、泥沙、方解石等	盘面覆盖摩擦性物质，无黏土	3	8	
-黏土、绿泥石、滑石等	盘面覆盖软化、黏性矿物	4	7	

表 10 不连续面蚀变度因子 j_A 和 d_A （基于据文献[15]）

Table 10 Rating of discontinuity alternation factor (j_A and d_A)					
B. 节理部分充填或者节理两盘盘面无接触					
充填物	描述	两盘部分接触，薄充填物<5 mm		两盘无接触，厚充填物	
		j_A	d_A	j_A	d_A
-砂、泥沙、方解石等	充填摩擦性物质，无黏土	4	7	8	3
-固结黏土矿物	硬化的软化、黏性矿物充填	6	5	10	2
-软黏土矿物	中等或者低等超固结的充填物	8	4	12	1
-膨胀性黏土矿物	有明显膨胀特性的充填物	8~12	3	12~20	0~1

新体系和 RMR 体系的不连续面状态的评分有一定的差别，因为两者考虑的因素有差别，同时，新体系在制定不连续面状态评分标准时保证了它和 RMR 体系有可比性。比如：RMR 体系不连续面状态的满分 30 分对应的不连续面状态是不连续面长度<1 m，节理未张开，无充填，未风化；对应的新体系可以是节理粗糙切互锁（ d_R 为 9），节理面愈合或者新鲜（ d_A 为 15 或 14），贯通层理节理或者不贯通（ d_L 为 6 或者 3）， d_C 为 26~30。RMR 中较差

表 11 风化程度等级（据文献[15]）

Table 11 Classification of weathering		
等级	蚀变或风化名称	描述
1	新鲜	无风化迹象，岩石新鲜，晶体明亮，可能有少量节理出现轻微侵染。
2	轻微	沿不连续面发生深入风化，但是岩石只有轻微风化。不连续面可能出现褪色，而且褪色可能沿不连续面表面深入岩石几毫米。
3	中等	轻微褪色深入岩石更大的距离。岩石材料不易碎（除胶结差的沉积岩外）。不连续面侵染和/或有蚀变的物质充填。
4	强烈	风化遍布岩体，岩石材料部分易碎。岩石无光泽，出来石英外的矿物都褪色，岩石可以用地质镐挖开。
5	完全	岩石完全褪色、分解、易碎。只有岩石碎块还含有原来的质地和结构，外观看起来象土。
6	残积土	原岩的质地、物质结构、矿物完全分解的土质材料。

状态 10 分对应的是擦痕面，或者充填 5 mm 以下充填物，节理连续；与此相当的新体系不连续面可以是起伏或者轻微起伏擦痕面（ d_R 为 1~1.5），节理薄充填（ d_A 为 7 或者 8），大节理（ d_L 为 1）， d_C 为 9~10.5。

2.2.2 控制性不连续面和施工的影响

如式（1）所示，SMR 使用参数 F_1 , F_2 , F_3 来表示控制性不连续面和坡面的产状决定的破坏形式的影响，新体系了增加参数 F_5 来表示控制性不连续面的状态（见表 4）。边坡可能的破坏模式有很多种，不可能在评价体系中一一列出，所以这里只考虑平面破坏和倾覆破坏，其它破坏模式可以简化为其中的一种，比如楔形体破坏可以简化成坡面破坏。对于平面破坏，不连续面的黏结力和摩擦力都会发生作用，所以用 d_A 和 d_R 的分值之和来表示其状态；对于倾覆破坏，黏聚力不发生作用，所以用 d_R 的分值来表示其状态。这里没有考虑 d_L ，因为控制性不连续面长度需要和坡体规模对比才有意义，如果要考虑控制性不连续面长度，将会使评价体系变的非常复杂而不方便使用。

新体系关于施工的影响的评分直接使用 SMR 的标准。

2.2.3 水流的影响

一般情况下，隧道很少直接受降雨的影响，而边坡暴露于地面，降雨的影响不可忽略，所以新体系考虑了降雨。一些学者总结说，降雨一般是边坡失稳的触发因素，不是主导因素^[1]。降雨有时间性，是变化的、不确定的，只有在考虑在雨季到来前加急进行支护时考察具体某次降雨的降雨量才有实际意义，而这种情形比较罕见。所以，新体系考虑了反映区域恒定特征的年均降雨量，并考虑坡面排水条件。年均降雨量采用我国降雨量分区的标准，区

分为干旱与半干旱地区、半湿润地区、类似华中地区的湿润地区、类似华南地区的湿润地区。在能区分地下水、天然降雨的晴朗天气下考察边坡时,采用地下水、天然降雨两者中较差的那个为水流条件评分。

2.3 数据采集

在现场调查中,岩石强度、不连续面分布特征常常因为条件不具备,无法直接取得,需要有替代的方法。

新体系和 RMR 体系一样,原岩强度可以通过单轴无侧限抗压试验和点荷载试验确定。一些学者研究了通过施密特锤击法、岩块冲压试验(得到 Block Punch Strength Index, BPI)简易确定原岩强度,ISRM 推荐了使用人手、小刀、地质锤确定岩石强度范围的方法,另外一些学者发展了根据岩石类型和风化折减、各向异性折减确定岩石强度的方法^[15, 18-19]。

不连续面的分布特征和块体特征是同一个问题的两个侧面。RQD 和不连续面间距反映都是不连续面的分布特征,间接反映了块体特征。其中 RQD 受不连续面分布的各向异性的影响,存在不确定性,另外它对小于 10 cm 和完整大岩块没有不敏感。所以一些学者定义了一些更客观的参数,比如单位体积节理数(volumetric joint count, Jv)、加权节理密度(weighted joint density, wJd),并建立了它们和 RQD 和不连续面间距之间的换算关系^[15]。

3 应用实例

这里通过一个实例说明如何应用新体系。实例是鄂西北某高速公路的一个路堑切坡。

该边坡走向 265° 转 270°。切坡分级开挖,每级 8 m 高,边坡最高处 48 m,即 6 级坡,坡面未防护,1, 2 级尚未开挖完成。残坡积(Q_4^{dl+el})层较厚,4, 5, 6 级大部分为 Q_4^{dl+el} 层,2, 3, 4 部分为强风化薄~中~厚层(以中层为主)片麻岩、千枚岩,片理产状 241°∠78°, 250°∠82°。节理发育,主要节理组有 170°∠71°, 320°∠63°, 337°∠56°, 164°∠54°, 355°∠36°, 337°∠56°, 为顺倾节理。发育多条层间泥化夹层, Q_4^{dl+el} 及强风化层较厚。现场直观判断:由于泥化夹层和片理的相互作用,易发生反向楔形体小滑塌;由泥化夹层顺倾节理的存在,加上岩石破碎,可能发生较大滑塌。

由于岩石主体是 Q_4^{dl+el} 、强风化层较厚,岩石强

度低,较完整的岩块强度为 5~25 MPa,其他的小于 5 MPa。没有采集岩芯,而块体破碎,估算 RQD 小于 20%,不连续面间距小于 20 cm。因为岩石强烈风化,而且出现泥化夹层,所以不连续面状态差。没有地下水出露,所在区域年平均降雨量 696.1~900.0 mm,没有植被,降雨有冲刷作用,即排水条件一般。控制性的泥化夹层为顺坡向,破坏模式倾向于平面破坏。坡面倾角 37°,坡面和泥化夹层倾向之间差 10°~20°,泥化夹层倾角小于坡面 10°以下。由于岩石软弱,一般是机械开挖。所以,稳定性评价基础得分为 32~36,控制不连续面和施工影响的调整为-15~-18,总的得分为 14~21,参考 Romana 的解释^[14],边坡稳定性很差,可能出现非常大的破坏。

该边坡在笔者调查公路沿线边坡的过程中发生大规模破坏:从 4 级坡坡面开始滑出,开裂下错 1.5 m;后缘在 6 级坡坡顶后 25 m,后缘壁圈椅状,最大下错 7 m 左右。这说明,该经验评价体系、直观判断、岩体稳定性客观表现三者具有一定的一致性。

4 结 语

本文在 RMR、SMR、RMi、Q 体系的基础上建立了能较全面地反映不连续面状态、天然降雨影响和边坡破坏模式的边坡稳定性评分体系,并给出了一些替代参数确定方法。通过实例展示了其具有易用性和一定的客观性。

该体系需要在实践中调整、完善描述方法和评分标准。另外,新体系和 RMR 体系同时使用 RQD 和不连续面间距,而它们物理意义有重复,而且 RQD 有一定的局限性,需要发展直接使用单位体积节理数或者加权节理密度的评分标准。

参 考 文 献

- [1] PANTELIDIS L. Rock slope stability assessment through rock mass classification systems[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2009, 46(2): 315-325.
- [2] PALMSTRÖM A. On classification systems[C]// *Proceedings of Workshop on Reliability of Classification Systems a Part of the International Conference "GeoEng-2000"*, Melbourne: [s. n.], 2000.
- [3] STILLE H, PALMSTRÖM A. Classification as a tool in

- rock engineering[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2003, 18(4): 331—345.
- [4] PIERSON L A, DAVIS S A, VAN VICKLE R. Rockfall hazard rating system implementation manual[R]. Washington D. C.: Federal Highway Administration, Department of Transportation, 1990.
- [5] FRANKLIN J A, SENIOR S A. Rockfall hazards strategies for detection, assessment, and remediation[C]//Proceedings of the Conference on Engineering Geology and the Environment, Athens: [s. n.], 1997: 645—657.
- [6] FRANKLIN J A, SENIOR S A. Outline of RHRON, the Ontario rockfall hazard ratingsystem[C]//Proceedings of International Symposium on Engineering Geology and Environment, Greece: [s. n.], 1987: 647—656.
- [7] BIENIAWSKI Z T. Engineering classification of jointed rock masses[J]. **Transactions of the South African Institute of Civil Engineering**, 1973, 15: 335—344.
- [8] BIENIAWSKI Z T. Geomechanics classification of rock masses and its application in tunneling[C]//Proceedings of the 3rd Conference of International Society of Rock Mechanics, Denver: [s. n.], 1974: 27—32.
- [9] BIENIAWSKI Z T. Rock mass classification in rock engineering[C]//Proceedings of the Symposium on Exploration for Rock Engineering, Cape Town: Balkema, 1976: 97—106.
- [10] BIENIAWSKI Z T. Determining rock mass deformability: Experience from case histories[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1978, 15: 237—247.
- [11] BIENIAWSKI Z T. The geomechanics classifications in rock engineering applications[C]//Proceedings of the 4th Congress on Rock Mechanics, ISRM, Montreux: [s. n.], 1979: 41—48.
- [12] BIENIAWSKI Z T. Rock mass classification as a design aid in tunneling[J]. **Tunnels and Tunneling**, 1988, 20(7): 19—22.
- [13] BIENIAWSKI Z T. Engineering Rock Mass Classifications[M]. New York: John Wiley and Sons, 1989: 251.
- [14] ROMANA M. New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes[C]//Proceedings of International Symposium on the Role of Rock Mechanics, Zacatecas: [s. n.], 1985: 49—53.
- [15] PALMSTRÖM A. RMI—a rock mass characterization system for rock engineering purposes[D]. Norway: University of Oslo, 1995.
- [16] BARTON N R, LIEN R, LUNDE I. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel supports[J]. **Rock Mechanics**, 1974, 6(4): 189—239.
- [17] BARTON N. Some new Q value correlations to assist in site characterisation and tunnel design[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2002, 39: 185—216.
- [18] SCHRIER VAN DER J S. The block punch index test[J]. **Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.**, 1988, 38: 121—126.
- [19] ULUSAY R, GOKCEOGLU C, SULUKCU S. Draft ISRM suggested method for determining block punch strength index (BPI)[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2001, 38: 1113—1119.