

岩体分级RMR与国标BQ经验关系的应用研究

赵信洋

无锡地铁建设有限责任公司, 江苏 无锡

收稿日期: 2022年11月27日; 录用日期: 2022年12月17日; 发布日期: 2022年12月28日

摘要

岩体质量综合评价是指导岩石工程设计与施工的重要前提。本文首先对国内外岩体工程界最为常用的两类评价体系——岩体分级RMR和国标BQ进行了简单的介绍,并对两者的经验关系进行了简单的分析,最后利用两者之间的经验关系,采用岩体工程现场测试获得的BQ值对RMR值进行了预测。研究表明: 1) RMR体系的评分指标更为细化,但存在对部分指标重复评分的缺点; 2) BQ体系虽然评分指标很少,但岩体完整性指数这一评分项以间接的方式考虑了RMR体系中的诸多评分指标; 3) 基于两者之间的经验关系,在已知其中一个指标的情况下可快速、准确地估算到另一指标,且两者对岩体质量的评级结果十分接近。

关键词

岩体质量评级, RMR, BQ, 经验关系, 工程案例

Study on Application of Empirical Relationship between Rock Mass Rating RMR and National Standard BQ

Xinyang Zhao

Wuxi Metro Construction Co., Ltd., Wuxi Jiangsu

Received: Nov. 27th, 2022; accepted: Dec. 17th, 2022; published: Dec. 28th, 2022

Abstract

Comprehensive evaluation of rock mass quality is an important prerequisite work for guiding rock engineering design and construction. This paper firstly briefly introduces the two most commonly used evaluation systems in rock engineering at home and abroad, namely, rock mass

rating RMR and basic quality BQ, and then briefly analyzes the empirical relationship between the two systems, finally, based on the empirical relationship of the two systems, the RMR value is predicted by using the BQ value obtained from field tests of rock engineering. The results show that: 1) The RMR system is more refined on the rating index, but there is a shortcoming of repeated scoring for some indicators; 2) Although fewer rating indexes are involved in the BQ system, many rating indexes in the RMR system are indirectly considered in the rock mass integrity index scoring items; 3) Based on the empirical relationship between the two systems, another indicator can be quickly and accurately estimated when one of the indicators is known, and the rating results of the two systems on rock mass quality are very close.

Keywords

Rock Mass Quality Rating, RMR, BQ, Empirical Correlation, Engineering Cases

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial International License (CC BY-NC 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



Open Access

1. 引言

近三十年以来,随着矿藏资源的深部开采、西南水电资源的进一步开发和川藏铁路的兴建,以及2016年提出的向“地球深部进军”的“十三五”科技创新方针等重大能源与基础设施工程的建设与发展,目前国内岩石隧道工程的建设规模正日益扩大,与此同时面临的工程地质条件和工程地质环境也更趋复杂化[1][2][3]。例如,国内在建规模最大也即将全面投产发电的白鹤滩水电站的隧道总长度约217 km [4];川藏铁路四川雅安至西藏林芝段全长1011 km 正线就有82.69%的隧道[5]。自1946年土力学创始人Terzaghi首次提出隧道中“岩体荷载”的概念以来[6],工程界普遍认为基于隧道围岩地质特征的工程岩体综合质量评级,是指导岩石隧道工程合理设计与安全施工的重要前提工作[7][8][9]。

目前,国内外的工程岩体综合质量评级系统较多,如:国标BQ [10]、RMR [11]、CSMR [12]、Q [13]和GSI [14]等,这些分类方法大都采用室内岩石力学性质试验,并结合工程地质现场调查来获得完整岩石和工程岩体的基本指标,再根据具体岩体工程应用对象提出一个或数个修正指标,综合得到特定工程岩体的修正评分值,以此来评定工程岩体的综合质量等级,并给出对应的隧道初期支护措施、围岩自稳时间以及概略工程参数等。由于岩体工程在不断地向前发展与进步,随着众多岩体工程行业的实践经验和现场资料的不断积累,这些分类方法在应用的过程中也不断地得到改进,并在不同国家(或地区)的各类岩石工程领域发挥着各自的积极作用。

作为一种考虑多种影响因素的综合分类方法,RMR体系凭借其在岩体质量评价中的实用性与可靠性,在国外岩体工程尤其是在岩石隧道工程界的应用最为广泛,同时RMR体系在国内的水电行业目前也处于应用和发展阶段。国标BQ是在总结国内各类型土建行业在岩石工程建设、岩体质量分级(类),以及岩石物理与力学性质试验研究等方面的大量现场实践经验的基础之上,并同时借鉴了国际先进的工程岩体分级(类)体系或方法而综合提出的,主要应用对象为国内各行业的岩体工程[15][16][17]。

国标BQ在国内岩体工程界发挥着举足轻重的作用,作为评价工程岩体稳定性和质量的全国性统一分级标准,适用于隧道、边坡、大坝等各类型岩石工程的岩体质量评级,可为国内岩石工程建设的勘察、设计和施工等提供基本依据。鉴于岩石工程的体量往往较大,开展现场足尺试验的困难性很大,有时甚

至不可能实施，与此同时，理论分析和数值计算也是指导岩石隧道等岩体工程设计和施工的重要手段，但目前国标 BQ 体系在理论分析和数值计算方面的应用仍鲜见报道，而基于 RMR、GSI 等体系的理论与数值研究工作已经获得了长足的发展[18] [19] [20]。因此，在已知岩石隧道围岩 BQ 值的情况下，如何快速且准确地获得其它工程岩体综合质量评价体系的评分值，是目前国内岩体工程技术人员和研究者重点关注的问题。

2. 岩体质量分级 RMR 与国标 BQ

2.1. RMR 简介

岩体质量分级 RMR 是由国际岩石力学与工程方面的知名专家 Bieniawski 于 1973 年首次提出[21]，之后经过数次修改，目前以 1989 年版本的应用最为广泛，同时影响也最为深远[11]。RMR 体系的最初目的是应用于隧道工程中的围岩质量评估和初期支护方案选定，随着岩石工程各个领域的使用与改进，现已推广应用至边坡工程、岩石地基、水工大坝等与岩石开挖有关的各类岩体工程，如：适用于岩石边坡的 SMR 和 CSMR 系统等。RMR 体系包含 5 个基本评分项，即：1) 岩石饱和单轴抗压强度；2) 岩体的节理状态；3) 钻孔质量指标 RQD；4) 结构面间距和 5) 地下水状态，以及针对具体岩体工程应用对象而提出的一个修正评分项。通过室内岩石力学性质试验和现场测试(或调查)获得 5 个基本参数指标，即可按照文献[11]的评分标准进行评分，修正评分项则按具体工程应用对象(隧洞、地基和边坡等)，按主要结构面的产状与工程走向的相对关系按文献[11]进行确定，对上述基本参数指标与修正评分项通过简单的累加即可得到最终的 RMR 值。根据修正后 RMR 值的大小，可将工程岩体划分为五个基本等级，如表 1 所示：

Table 1. Rock mass quality classification and approximate engineering parameters of RMR system [11]

表 1. RMR 系统岩体质量分级和概略工程参数[11]

RMR 值	分级	质量描述	粘聚力/kPa	内摩擦角/°
100~81	I	非常好	>400	>45
80~61	II	好	300~400	35~45
60~41	III	一般	200~300	25~35
40~21	IV	差	100~200	15~25
<21	V	很差	<100	<15

值得一提的是，相较于其它岩体质量综合评价体系，RMR 体系在对岩体自身所固有的、且影响工程岩体稳定性的基本因素考虑方面是最为全面的，这也是 RMR 体系具有较高可靠性的根本原因，但 RMR 系统的部分评分指标，如：钻孔质量指标 RQD、岩体的节理状态和结构面间距，在岩体开挖之前预先准确判断往往困难性较大，虽然这些指标均可通过地勘钻孔获得的岩石芯样经适当地转换而间接得到，但间接转换法对钻孔设备和现场操作人员均提出了十分严格的要求，对于低质量的钻孔取芯甚至会得到零值的钻孔质量指标 RQD，且钻孔过程对原位岩体的节理状态的影响很大，同时人为因素导致的岩体结构面也十分普遍[22] [23]。

2.2. 国标 BQ 简介

根据现行《工程岩体分级标准》(GB/T 50218)，岩体基本质量 BQ 表征岩体自身所固有的、影响工程岩体稳定性的最基本属性，由完整岩块自身的坚硬程度和节理岩体的完整程度两者共同确定，计算公式

如下[10]:

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

式中, R_c 为完整岩石的饱和单轴抗压强度, MPa;

K_v 为岩体的完整性指数, 按式(2)进行计算。

$$K_v = (V_{pm}/V_{pr})^2 \quad (2)$$

式中, V_{pm} 为原位岩体的弹性纵波速度, km/s;

V_{pr} 为完整岩块的弹性纵波速度, km/s。

对工程岩体进行初步定级时, 可根据 BQ 值按表 2 判定的岩体基本质量作为岩体的级别。与前述 RMR 体系类似, 国标 BQ 体系同样包含 5 个岩体质量级别, 对工程岩体进行详细定级时, 在岩体基本质量分级的基础上, 结合不同类型工程的特点, 也引入多个修正因素, 进而得到特定工程岩体的质量指标。

Table 2. BQ classification of basic rock mass quality [10]

表 2. 岩体基本质量 BQ 分级[10]

级别	坚硬程度/完整性	BQ 值
I	坚硬/完整	>550
II	坚硬/较完整 较坚硬/完整	550~451
III	坚硬/较破碎 较坚硬/较完整 较软/完整	450~351
IV	坚硬/破碎 较坚/较破碎~破碎 较软/较完整~较破碎 软岩/完整~较完整	350~251
I	较软/破碎 软/较破碎~破碎 全部极软及全部较破碎	≤251

3. RMR 与 BQ 经验关系及探讨

《工程岩体分级标准》(GB/T 50218)的编制组在对国内水电、公路等多个岩体工程领域的十余个工程共计 200 余组 BQ 和 RMR 两个评价体系实测值的回归分析发现, 国标定义的 BQ 值与国际岩体工程界的 RMR 值两者之间存在着良好的线性正相关性, 回归方程可表示为[10]:

$$BQ = 80.786 + 6.0943RMR (r = 0.81) \quad (3)$$

大量的工程实践经验表明, 在对岩体质量 RMR 分级及国标 BQ 的定量分级作进一步的对比和分析后发现, 这两个评价体系五级划分各级别的划分值之间整体上也具有较好的一致性, 但在对 IV 级和 V 级岩体的评级过程中, 依据上述公式(3), 国标 BQ 的评级结果可能会保守半级至 1/4 级。

需要特别说明的是, 国标 BQ 体系中岩体完整性指数 K_v (在不考虑完整岩块的弹性纵波速度 V_{pr} 的变化时, 岩体的纵波速度 V_{pm} 将直接决定岩体完整性指数 K_v 的大小)受诸多因素的共同影响, 如: 岩体内节理的间距、填充物、含水状态、风化程度和走向等, 因在其定义中的分子项包含岩块的纵波速度, 故有

效消除了岩性的影响,具有一定的合理性。这说明 BQ 体系还是考虑到了 RMR 体系中诸如岩体内节理的间距、填充物、含水状态和风化程度等因素的影响,但考虑的只是比较粗略和间接而已,但对于 RMR 体系中的部分指标(RQD 和结构面间距),存在重复评分的缺点。总体而言,RMR 体系考虑的岩体质量分级因素更为直观、细致和全面,而国标 BQ 体系考虑的分级因素相较于 RMR 体系看似较少(仅有两项分级因素),在其它指标的考虑方面虽显得比较粗略,但借助于简便、无损的现场弹性纵波速度测试工作和室内单轴压缩试验,就能对工程岩体的质量进行快速的评级,这种优势在岩体工程的前期地勘阶段就表现得更为显著。

4. 工程案例

4.1. 案例一

某国家级高速公路拟采用单跨 916 m 钢箱梁悬索桥跨越长江,设计荷载为 2 根主缆拉力 4.3×10^5 kN,结合桥址两岸地形,南岸采用隧道锚,北岸采用重力式锚。地勘阶段岩体分段和对应参数指标如表 3 所示:

Table 3. Rock mass qualities and rating results

表 3. 岩体质量与评分结果

位置/m	岩性	R_c /MPa	K_v	定量划分			
				BQ	BQ 级别	RMR	RMR 级别
0~118	泥灰岩	13.4	0.39	227.7	V	24.3	IV
118~153	泥质灰岩	19.1	0.55	284.8	IV	33.8	IV

地勘资料给出 0~118 m 和 118~153 m 围岩段的岩石饱和单轴抗压强度 R_c 值和岩体完整性指数 K_v 值,因此可按式(1)直接计算得到各分段岩体的 BQ 值,再利用公式(3)提供的 RMR 与 BQ 两者之间的经验关系,可以间接得到分段岩体的 RMR 计算值。由计算得到的 RMR 值和 BQ 值,按表 1 和表 2 可快速确定对应分段岩体的评级结果。

由表 3 的评级结果可知,依据公式(3)计算得到的 RMR 值分别为 24.3 和 33.8,进而得到的岩体评级结果在 0~118 m 岩段为 IV 级(40~21),在 118~153 m 岩段也为 IV 级,而直接依据国标 BQ 得到的对应岩段的评级结果分别为 227.7 和 284.8,进而得到的岩体评级结果为 V 级(≤ 251)和 IV 级(350~251)。这再次证明公式(3)得到的国标 BQ 可能会较 RMR 评级保守半级至 1/4 级。

4.2. 案例二

某东部沿海一拟建大桥的主墩地基持力层可选为⑦₂ 强风化或⑦₃ 弱风化花岗岩,前期地勘钻孔岩芯和现场岩体的弹性纵波波速测试,得到两种持力层的部分参数如表 4 所示:

Table 4. Testing results of rock mass qualities of granite

表 4. 花岗岩岩体质量测试结果

层号	岩层名称	R_c /MPa	$V_{pr}/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	$V_{pm}/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	K_v	岩体完整性
⑦ ₂	强风化花岗岩	34.5	5.561	3.795	0.465	较破碎
⑦ ₃	弱风化花岗岩	79.7	5.561	4.901	0.776	完整

根据编号为⑦₂强风化花岗岩和⑦₃弱风化花岗岩岩块的饱和单轴抗压强度 R_c 、岩体完整性指数 K_v ，利用公式(1)可以直接计算得到两种岩体的基本质量指标 BQ 值的大小。由于本工程缺乏较为详细的 RMR 系统评分指标的具体参数值，因此，在已知两种岩体的基本质量指标 BQ 值的前提下，利用公式(3)提供的 RMR 与 BQ 两者之间的经验关系，可以间接得到持力层岩体的 RMR 计算值，并根据表 1 和表 2 提供的岩体分级标准，可得到如表 5 所示的岩体质量综合评级结果：

Table 5. Comprehensive rating results of rock mass qualities based on BQ and RMR

表 5. 基于 BQ 和 RMR 的岩体质量综合评级结果

层号	岩石名称	BQ	RMR	BQ 级别	RMR 级别
⑦ ₂	强风化花岗岩	310.0	37.9	IV	IV
⑦ ₃	弱风化花岗岩	523.3	73.2	II	II

根据《工程岩体分级标准》(GB/T 50218)关于岩体质量分级的描述，编号为⑦₂的强风化花岗岩基本质量的定性特征与“较坚硬岩(30~60 MPa)，岩体较破碎~破碎($0.35 < K_v = 0.465 \leq 0.75$)”这一类别较为相符，同时岩体基本质量指标 BQ 也落在区间 251~350 范围，因此，依据国标 BQ 分级系统，应将编号为⑦₂强风化花岗岩的岩体基本质量级别判定为 IV 级。类似地，编号为⑦₃弱风化花岗岩的定性特征符合岩体基本质量级别 I 级，即坚硬岩(>60 MPa)，岩体完整($K_v = 0.776 > 0.75$)的定性条件，但 I 级的岩体基本质量指标 BQ 值还需同时满足>550 的限定条件，而⑦₃的弱风化花岗岩岩体基本质量指标 BQ 为 523.3，符合 II 级岩体的区间(451~550)的范围，对于上述岩体基本质量级别判定不一致的情形，《工程岩体分级标准》(GB/T 50218)第 4.1.2 条给出了指导意见，原文表述为[10]：“当根据基本质量定性特征和岩体基本质量指标 BQ 确定的级别不一致时，应通过对定性划分和定量指标的综合分析，确定岩体基本质量级别”。当两者的级别划分相差达 I 级及以上时，应进一步补充测试。鉴于水面环境下地质补勘的困难性，对于此种不一致的情况，出于工程安全储备的考虑，可将⑦₃的弱风化花岗岩岩体基本质量判定为 II 级岩体。

按照表 1 关于 RMR 系统岩体质量分级及概略工程参数，编号为⑦₂的强风化花岗岩的 RMR 值为 37.9，而编号为⑦₃的弱风化花岗岩的 RMR 值为 73.2，则其分别落在区间 21~40 和 61~80 两个区间，故应将这两种岩性的岩体分别判定为 IV 级和 II 级岩体，这与基于《工程岩体分级标准》(GB/T 50218)的判定结果完全一致，同时也说明了该两种工程岩体分级体系良好的一致性。考虑到岩体质量评价体系 RMR 输入参数的多样性，在工程实际(尤其是富水地质的岩体工程)中的应用将更为困难，因此在实际的岩体工程中，如缺乏对 RMR 体系参数的准确获取，可基于国标《工程岩体分级标准》(GB/T 50218)中关于 RMR 和 BQ 两者之间的经验关系，可以方便地获得岩体的基本质量评分 RMR 值。

5. 结论与建议

岩体质量综合评价的多个体系共存但数个体系占据主导地位的局面，是国内和国外岩体工程领域目前乃至未来的发展趋势，而国内目前以国标 BQ 体系为主，同时 RMR 体系在国内的部分行业(如水利水电)也处于应用和发展阶段。研究不同岩体质量综合评价体系之间的内在联系，建立相互之间的经验关系具有重要的工程价值和现实意义。基于上述研究工作，可获得以下基本结论：

1) 国标 BQ 的基本分类指标仅有两项分级因素，而岩体质量评分 RMR 的基本分类指标包含五项分级因素，两个体系均包含岩石饱和单轴抗压强度这一分级因素，但 BQ 以岩体完整性指数近似代替了 RMR

中其余四项分级因素, 虽然比较粗略但更容易现场实施。

2) 岩体质量评分 RMR 和国标 BQ 两者之间可通过《工程岩体分级标准》(GB/T 50218)中的经验公式进行转换, 两个工程案例的实际应用表明, 经转换后得到的岩体评级结果整体上一致性较好, 但在IV级和V级岩体评级过程中, 相较于 RMR 体系, 国标 BQ 可能会保守半级至 1/4 级。

3) 工程岩体质量综合评价与分级还是以经验为主的, 条件允许时可对同一待评价岩体采用多指标并用的评价手段, 以此来丰富现场实测资料, 为不同评价体系之间的可靠经验关系建立提供现场实测资料。

参考文献

- [1] 龙腾. 某矿山深部开采岩石力学特性研究[J]. 中国矿山工程, 2021, 50(5): 23-26.
- [2] 简崇林, 漆祖芳, 王英. 大型导流隧洞群下闸封堵风险分析及对策——以乌东德水电站为例[J]. 人民长江, 2021, 52(8): 158-165.
- [3] 王运生, 程万强, 刘江伟. 川藏铁路廊道泸定段地质灾害孕育过程及成灾机制分析[J]. 地球科学, 2022, 47(3): 950-958.
- [4] 凡一. 白鹤滩水电站有多“牛”[J]. 金桥, 2021(8): 72-75.
- [5] 黄金光, 李志军. 川藏铁路高地应力软岩大变形隧道施工方法研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2021, 19(6): 165-171, 178.
- [6] Terzaghi, K. (1946) Rock Defects and Rock Loads on Tunnel Supports. In: Proctor, R.V. and White, T.L., Eds., *Scientific Research*, Academic Publisher, Amsterdam, 17-99.
- [7] 陈昌彦, 王贵荣. 各类岩体质量评价方法的相关性探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2002(12): 1894-1900.
- [8] 于世波, 王辉, 曹辉, 等. 多种工程岩体质量评价方法的关联及其应用探讨[J]. 有色金属(矿山部分), 2015, 67(1): 83-86.
- [9] 余诗刚, 林鹏. 中国岩石工程若干进展与挑战[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(3): 433-457.
- [10] GB/T50218 工程岩体分级标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
- [11] Bieniawski, Z.T. (1989) *Engineering Rock Mass Classification*. Science Press, New York, 180-250.
- [12] 曹平, 刘帝旭. 改进 CSMR 法在露采矿山边坡中的应用[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(8): 1544-1548.
- [13] Barton, N.R. (2002) Some New Q-Value Correlations to Assist in Site Characterization and Tunnel Design. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **39**, 185-216. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(02\)00011-4](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(02)00011-4)
- [14] Hoek, E. and Brown, E.T. (2019) The Hoek-Brown Failure Criterion and GSI—2018 Edition. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, **11**, 445-463. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.08.001>
- [15] 尹红梅, 张宜虎, 周火明, 等. 工程岩体分级研究综述[J]. 长江科学院院报, 2011, 28(8): 59-66.
- [16] 邬爱清, 柳赋铮. 国标《工程岩体分级标准》的应用与进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(8): 1513-1523.
- [17] 许宏发, 陈锋, 王斌, 等. 岩体分级 BQ 与 RMR 的关系及其力学参数估计[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(1): 195-198.
- [18] Kanik, M., Gurocak, Z. and Alemdag, S. (2015) A Comparison of Support Systems Obtained from RMR89 and RMR14 by Numerical Analyses: Macka Tunnel Project, NE Turkey. *Journal of African Earth Sciences*, **109**, 224-238. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2015.05.025>
- [19] Hoek, E., Carranza-Torres, C. and Corkum, B. (2002) Hoek-Brown Failure Criterion—2002 Edition. In: *Proceedings of the North American Rock Mechanics Society NARMS-TAC 2002*, University of Toronto Press, Toronto, 267-273.
- [20] Zhang, L.Y. and Zhu, H.H. (2007) Three-Dimensional Hoek-Brown Strength Criterion for Rocks. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **133**, 1128-1135. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2007\)133:9\(1128\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:9(1128))
- [21] Bieniawski, Z.T. (1973) Engineering Classification of Jointed Rock Masses. *Transaction of the South African Institution of Civil Engineering*, **15**, 335-344.
- [22] 王川婴, 胡培良, 孙卫春. 基于钻孔摄像技术的岩体完整性评价方法[J]. 岩土力学, 2010, 31(4): 1326-1330.
- [23] Vavro, M., Soucek, K., Stas, L., et al. (2015) Application of New Methods for Determination of Rock Quality Designation (RQD) Index: A Case Study from the Rozna I Uranium Mine, Strazek Moldanubicum, Bohemian Massif, Czech Republic. *Canadian Geotechnical Journal*, **52**, 1466-1476. <https://doi.org/10.1139/cgj-2014-0377>