

文章编号:1673-9469(2022)01-0046-06

DOI: 10.3969/j.issn.1673-9469.2022.01.007

GSI 值量化与岩体力学参数的确定

王可意,余同日*,张晓雄,高颖

(河北工程大学 土木工程学院,河北 邯郸 056038)

摘要: 为了降低地质强度指标 GSI 取值主观性,提高岩体力学参数取值精度,采用正交试验得出岩体地质特征参数关于 GSI 敏感性排序,选出对 GSI 影响较大的 4 个参数;引入岩体结构等级 SR、结构面表面等级 SCR 的区间数概化出 GSI 区间范围;引入岩体完整性系数 K_v ,波速比 K'_v 对 GSI 区间范围进行线性插值,从而获得精确的 GSI 值。以清家沟隧道为例,用该方法估算出的岩体力学参数值在 III₂ 级围岩规范范围内,利用 FLAC^{3D} 进行数值模拟,所得拱顶竖向沉降值与实际监测值之间相对误差为 1.5%,验证了该方法的可靠性。

关键词: Hoek-Brown 强度准则;地质强度指标 GSI;正交试验;岩体力学参数

中图分类号: TU45

文献标识码: A

Quantification of GSI Value and Determination of Rock Mechanics Parameters

WANG Keyi, YU Tongri*, ZHANG Xiaoxiong, GAO Ying

(School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China)

Abstract: Reducing the subjectivity of geological strength index GSI value and improving the accuracy of rock mechanics parameter value are crucial for surrounding rock stability. The sensitivity ranking of rock mass geological characteristic parameter's to GSI was obtained by orthogonal test, and four parameters that had great influence on GSI were selected. The interval range of GSI was generalized by introducing the interval number of rock mass structural grade SR and structural plane surface SCR. The rock integrity coefficient K_v and wave velocity ratio K'_v were introduced to perform linear interpolation for GSI interval range, so as to obtain accurate GSI value. Taking Qingjiagou tunnel as an example, the rock mass mechanical parameters estimated by this method were within the III₂ standard for surrounding rock. FLAC^{3D} was used to establish the tunnel excavation model. The relative error between the calculated vertical settlement value and the actual monitoring value was 1.5%, which verifies the reliability of this method.

Key words: Hoek-Brown strength criterion; geological intensity index GSI; orthogonal test; mechanical parameters of rock mass

2002 年 Hoek 全面审视了 H-B 强度准则参数取值关系,引入扰动参数 D 和地质强度指标 GSI,提出岩体参数 m_i, s, α 新取值方法^[1],打破了广义 H-B 强度准则使用范围的局限性。但该方法只给出了 GSI 区间范围,导致 GSI 取值有很大的主观性,因此如何将 GSI 值量化成了很多学者探讨的

问题^[2-3]。张东旭等^[4]采用灰关联分析理论对 H-B 强度准则取值参数进行敏感性分析,各参数对边坡工程稳定性影响强弱为: $GSI > D > \sigma_c > m_i$, GSI 值对边坡稳定性影响最大。Hashemi^[5]将 GSI 的估值方法大致归纳为两类:一类为通过建立其他变量与 GSI 值函数关系的间接法,另一类为构建 GSI 分

收稿日期:2021-09-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51708317);河北省高等学校科学技术研究项目(QN2019108)

作者简介:王可意(1988-),女,河北邯郸人,博士,讲师,主要从事桥梁与隧道方向研究。

* 通讯作者:余同日(1995-),男,湖北荆州人,硕士研究生,主要从事桥梁与隧道方向研究。

级图表的插值法。Hoek 等人^[6]在第 47 届美国岩石力学讨论会上正式提出了 GSI 与 RMR 系统和 Q 系统之间的函数关系式。廖卓等^[7]通过量化岩体块度 V_b 和结构面状态 J_c 来建立与 GSI 的函数关系。上述采用间接法获取的 GSI 值,多数采用数值拟合公式,这些公式通用性较差,适用岩体相对单一,但结果简单直观,一目了然。基于 H-B 强度准则,引入地质特征参数来划分岩体风化、结构情况,是目前国内外研究学者量化 GSI 值常用的方法之一^[8-9]。王可意等^[10]依据 H-B 强度准则中估算 GSI 值的两大影响要素,提出采用岩体风化系数 K_f 和岩体完整系数 K_v 来量化 GSI,通过工程实例验证,所求岩体力学参数值符合规范要求。为了提高 H-B 强度准则的岩体力学参数取值精度,更有不少学者引入多个地质特征指标来量化 GSI 值^[11-12]。

本文选用五个具有代表性的地质特征参数,利用正交试验对五个指标进行敏感性排序。引入岩体结构等级 SR、结构面表面等级 SCR 的区间数来概化出 GSI 区间范围;引入岩体完整系数 K_v 、波速比 K'_v 量化出精确 GSI 值,为岩体力学参数的估算和 FLAC^{3D} 数值模拟提供数据。

1 正交试验设计

1.1 正交试验因素

正交试验是一种能够考虑多因素多水平的试验研究方法。若考虑所有因素进行全面试验,则试验规模很大,会增加试验难度。采用正交试验就是从优选区全面试验点中挑选出具有代表性的部分试验点进行试验,通过少量试验次数,得到相对真实可靠的试验结果。

岩体风化状况和岩体结构类型是决定 GSI 值的两大主要因素,选用岩体结构等级(SR)、岩体完整性系数(K_v)、岩体基本质量指标(BQ)来表征岩体结构类型,岩体结构等级(SCR)、波速比(K'_v)来表征岩体风化状况。选用上述岩体地质特征参数作为正交试验五个因素,同时,为了减少由于水平次序所引起的系统误差,将各因素水平随机排列。根据清家沟隧道实际地质钻孔资料显示,该处围岩主要是风化后的石英砂岩,其岩体较完整、稳定性良好,岩体未被扰动,一般发育 2~3 组节理面,统计各指标取值范围。岩体地质特征参数被划分为三个水平,五因素三水平正交试验参数取值如表 1 所示。

表 1 正交试验因素水平表

Tab. 1 Factor level table of orthogonal test

水平编号	Hoek-Brown 准则参数				
	K_v	SR	K'_v	SCR	BQ
1	0.65	56	0.58	6.8	430
2	0.67	58	0.60	7.0	440
3	0.69	60	0.62	7.2	450

1.2 正交试验结果分析

根据表 1 岩体地质特征参数取值范围,以五个岩体地质特征参数取值为自变量,地质强度指标 GSI 为因变量。通过 Design-Expert 8.0.6 软件进行交互分析,得到正交试验二次多项式的方差分析如表 2 所示。

表 2 GSI 值二次多项式模型的方差分析

Tab. 2 Analysis of variance of quadratic polynomial model with GSI value

方差来源	均方	自由度	平方和	P 值
模型	12.05	20	0.60	<0.000 1
K_v	2.20	1	2.20	<0.000 1
SR	2.03	1	2.03	<0.000 1
K'_v	2.29	1	2.29	<0.000 1
SCR	3.26	1	3.26	<0.000 1
BQ	1.73	1	1.73	<0.000 1
K_v -SR	0.02	1	0.02	0.122 8
K_v - K'_v	3.03E-003	1	3.03E-003	0.563 4
K_v -SCR	2.50E-005	1	2.50E-003	0.958 0
K_v -BQ	2.03E-003	1	2.03E-003	0.636 0
SR- K'_v	0.01	1	1.00E-002	0.297 2
方差来源	均方	自由度	平方和	P 值
SR-SCR	0.04	1	0.04	0.043 2
SR-BQ	0.09	1	0.09	0.003 8
K'_v -SCR	0.04	1	0.04	0.038 7
K'_v -BQ	0.01	1	0.01	0.274 2
SCR-BQ	0.06	1	0.06	0.013 4
K_v - K_v	0.10	1	0.10	0.002 7
SR-SR	0.18	1	0.18	0.000 2
K'_v - K'_v	0.10	1	0.10	0.003 0
SCR-SCR	0.09	1	0.09	0.003 2
BQ-BQ	0.04	1	0.00	0.056 6
残差	0.23	25	8.82E-003	—
失拟项	0.22	20	0.11	0.128 6
纯误差	0.01	5	0.12	—
总和	12.28	45	—	—

由表 2 可得,模型失拟项 P 值大于 0.05,表明模型拟合程度高,误差很小;由岩体地质特征参数 P 值可知这五个试验因素对 GSI 值都具有非常大的影响且该回归模型高度显著。

通过 Design-Expert 8.0.6 软件对岩体地质特

征参数和 GSI 进行交互分析,得到单因素指标与 GSI 之间线性关系如图 1 所示。由图 1 可得,GSI 随各岩体地质特征参数变化规律大体一致,基本呈现正线性相关。五个试验因素对 GSI 敏感性显著,但敏感程度略有差异,各自变量在规定范围内变化时,对应的 GSI 变化范围如表 3,根据表 3 中 GSI 值的增幅情况可得五个试验因素对 GSI 值的敏感性排序为:SCR> K'_V >SR> K_V >BQ,选用敏感性靠前的岩体地质特征参数来量化 GSI 值。

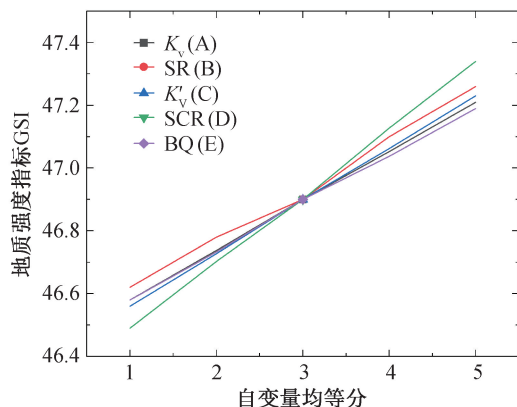


图 1 单因素指标与 GSI 值的线性关系

Fig. 1 Linear relationship between single factor index and GSI value

表 3 单因素变化对应的 GSI 取值范围

Tab. 3 Single factor change corresponds to the value range of GSI

Hoek-Brown 准则参数	GSI 值变化范围	GSI 值的增幅
K_V	46.58~47.21	0.63
SR	46.62~47.26	0.64
K'_V	46.56~47.23	0.67
SCR	46.49~47.34	0.85
BQ	46.58~47.19	0.61

2 GSI 值的量化方法

岩体结构类型描述指标为:岩体完整性系数(K_V)、岩体结构等级(SR);岩体风化等级描述指标为:波速比(K'_V)、结构面表面等级(SCR)(为了与岩体完整性系数 K_V 区分,将波速比命为 K'_V)。

2.1 岩体完整性系数

参考《公路隧道设计规范》^[13](JTG 3370.1—2018),选用岩体完整性系数 K_V 对岩体结构进行划分。 K_V 定义为室内岩体波速与岩石弹性纵波波速比值的平方,弹性纵波波速可以采用动力法来测量。 K_V 表达式为

$$K_V = \left(\frac{V_{pm}}{V_{pr}} \right)^2 \quad (1)$$

式中: V_{pm} 为室内岩体波速, V_{pr} 为岩石弹性纵波波速。

2.2 岩体结构等级

Sonmez^[14]将岩体结构类型按岩体体积节理数 J_V 划分为 6 个等级,GSI 量化取值表中岩体结构类型按岩体破碎程度也被划分为 6 类,两者具有较好的关联性,岩体结构类型与体积节理数、岩体完整性系数之间关系如表 4 所示。利用表 4 各等级之间的关联性,采用分段拟合,得出 SR 关于 J_V 表达式:

$$SR = \begin{cases} 83.3333 - 7.2382 \ln(J_V) & (J_V \leq 1) \\ 84.353 - 15.76 \ln(J_V) & (1 \leq J_V \leq 60) \\ 30.005 - 3.2578 \ln(J_V) & (J_V \geq 60) \end{cases} \quad (2)$$

同理,得出 SR 关于 K_V 表达式:

$$SR = \begin{cases} 149.56K_V^3 - 195.05K_V^2 + 134.4K_V + 11.811 & (0.043 \leq K_V \leq 1) \\ 387.6K_V & (0 \leq K_V \leq 0.043) \end{cases} \quad (3)$$

表 4 岩体结构类型与体积节理数、岩体完整性系数的关系描述

Tab. 4 The relationship between rock mass structure type and volume joint number and rock

mass integrity coefficient		
岩体结构类型	岩体体积节理数 $J_V / (\text{条} \cdot \text{mm}^{-3})$	岩体完整性系数 K_V
完整或块体状结构	≤ 1	≥ 0.89
块状结构	1~3	0.89~0.75
镶嵌结构	3~10	0.75~0.55
碎裂结构/扰动	10~30	0.55~0.20
散体结构	30~60	0.20~0.04
层状/剪切带	≥ 60	0.00~0.04

2.3 波速比

《公路隧道设计规范》中指出,波速比 K'_V 、风化系数 K_f 是描述岩体风化程度的两大指标。 K'_V 定义为风化岩石与新鲜岩石压缩波速之比,岩体波速的测量具有简单、方便、快速等优点,因此本文选用 K'_V 来描述岩体风化程度。两者的定量关系如表 5 所示。

2.4 结构面表面等级

结构面表面等级 SCR 的主要影响因素是结构面粗糙度系数(R_r)、风化系数(R_w)与充填系数

(R_f), 将其定义为三者之和^[4], SCR 表达式为

$$SCR = R_r + R_w + R_f \quad (4)$$

各系数取值如表 6 所示:

表 5 岩体风化程度与波速比的关系描述

Tab. 5 Description of the relationship between weathered degree of rock mass and wave velocity ratio

风化程度	K'_v	风化程度定性描述
未风化	0.9~1.0	新鲜岩体, 偶有风化迹象
微风化	0.8~0.9	结构基本没有变化, 只是节理表面有轻微变色, 有些许风化迹象
弱风化	0.6~0.8	构造被部分破坏, 风化裂隙较多, 部分矿物发生蚀变
强风化	0.4~0.6	构造遭到破坏, 大部分矿物发生蚀变, 风化裂隙较多
全风化	0~0.4	结构基本已损坏, 存在镜面摩擦

表 6 结构面表面等级取值表

Tab. 6 Structural plane surface grade table

系数类	评价情况	取值	
R_r	非常粗糙	6	
	粗糙	5	
	较粗糙	3	
	较光滑	1	
	光滑	0	
R_w	未分化	6	
	微分化	5	
	中分化	3	
	强分化	1	
	全分化	0	
	无填充	6	
R_f	硬质充填	<5 mm	4
		>5 mm	2
	软质充填	<5 mm	2
		>5 mm	0
结构面表面条件评分 $SCR=R_r+R_w+R_f$			

2.5 GSI 量化取值表格

引入岩体完整性系数 K_v 、岩体结构等级 SR 、波速比 K'_v 、结构面表面等级 SCR 构建 GSI 量化表, 如表 7 所示。结合实际地质钻孔资料, 得出 SR 、 SCR 区间数, 分别表示为 $[SR^L, SR^R]$ 、 $[SCR^L, SCR^R]$ (L 表示取值下限, R 表示取值上限), 利用 SR 、 SCR 区间数概化出 GSI 区间范围, 表示为 $[GSI^L, GSI^R]$ ^[15]。Hoek 等指出由于野外岩体地质情况繁杂多变, 选用岩体风化指标和岩体结构指标初步量化 GSI 值, GSI 取定值反而不太精确。引用区间数初步表示 GSI 区间范围, 更加符合野外实

际情况。

采用 FLAC^{3D} 有限差分程序对隧道进行数值模拟, 需要用到精确的 GSI 值, 而且精确的 GSI 值能快速估算出岩体力学参数值, 因此仍需将 GSI 值量化。采用线性插值的方法, 引入 K_v 、 K'_v , 两者线性相交, 交点落在 GSI 概化区间范围内, 此时交点对应的值就是量化 GSI 值。

3 工程分析

3.1 工程概况

清家沟隧道是分离式单洞三车道隧道, 全长 850 m, 高度 6.25 m, 最大埋深约 145 m; 单洞净宽 14.5 m, 净高 6 m, 总里程为 ZK68+010—ZK68+860。

根据地质钻孔资料显示, 此处围岩主要组成成分是风化后的石英砂岩, 其岩体较完整、稳定性良好, 岩体未被扰动, 一般发育 2~3 组节理面。通过对地质资料统计、分析, 得 SR 、 SCR 区间范围分别为 $[56, 60]$ 、 $[6.8, 7.2]$, 从而推算出 GSI 概化区间范围为 $[46, 50]$, 这个值可用于工程早期对 GSI 值的预估。随机选取多处样本求取 K_v 、 K'_v 平均值, 得 $K_v = 0.67$ 、 $K'_v = 0.61$ 。

3.2 岩体参数估算

通过表 7 量化出 GSI 值为 48, 由文献[7]可知石英砂岩的 H-B 常数 $m_i = 21$, 石英砂岩的岩体扰动参数 $D = 0$, 代入含有扰动参数 D 的岩体参数取值公式:

$$\begin{cases} m_b = \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right)m_i \\ s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right) \\ \alpha = 0.5 + \frac{1}{6}\left[\exp\left(-\frac{GSI}{15}\right) - \exp\left(-\frac{20}{3}\right)\right] \end{cases} \quad (5)$$

可得: $m_b = 3.28$, $s = 0.0031$, $\alpha = 0.5$ 。

将上述的 m_b 、 s 、 α 值代入广义的岩体 H-B 强度准则公式:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_c} m_b + s \right)^\alpha \quad (6)$$

由摩尔库伦强度准则可知 $0 < \sigma_3 < \frac{\sigma_c}{4}$, 与式

(6) 相结合取其临界值有: $\sigma_{3\max} = \frac{\sigma_c}{4} = 7.75 \text{ MPa}$ 。

在 σ_3 处取 $0 \sim 7 \text{ MPa}$ ^[16], 将摩尔-库伦强度准则变形公式(7)改为公式(8)。

表 7 GSI 量化表
Tab. 7 GSI quantization table

节理岩体地质强度 指标GSI	SR	结构面表面等级SCR																规范 GB50218—94, GB50287—99, GB50021—2001 中岩体完整性 分类				
		非常好: 未风 化、很粗糙	好: 轻微风化、 粗糙	一般: 弱风化、 有点光滑	差: 强风化、 光滑, 有密实 的膜覆盖	很差: 强风化、 非常光滑, 有镜面摩擦																
		18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0		
完整结构。完整岩 体, 偶尔能见到少 量的大间距结构面	100																				完整 $K_v>0.75$	
	95		90																			
	90																					
	85																					
块状结构。有三到 四组相交节理面的 未扰动岩体, 呈块状	80																				较完整 $0.55\leq K_v\leq 0.75$	
	75																					
	70																					
	65																					
镶嵌结构。有四组以 上相交节理面的部分 扰动岩体, 结构相互 咬合, 呈棱角状	60																				较破碎 $0.35\leq K_v\leq 0.55$	
	55																					
	50																					
	45																					
碎裂或扰动结构, 有 少量不连续面割裂的 缝隙, 具有连续片 理面, 呈角状	40																				破碎 $0.15\leq K_v\leq 0.35$	
	35																					
	30																					
	25																					
散体结构。岩体破 碎极为严重, 相互 咬合, 呈棱角状 和圆状	20																				极破碎 $K_v<0.15$	
	15																					
	10																					
	5																					
	0	$0.9<K'_v\leq 1.0$		$0.8<K'_v\leq 0.9$		$0.6<K'_v\leq 0.8$		$0.4<K'_v\leq 0.6$		$0<K'_v\leq 0.4$												
		波速比 K'_v																				

$$\sigma_1 = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_3 + \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (7)$$

$$\sigma_1 = k\sigma_3 + b \quad (8)$$

其中

$$\left\{ \begin{aligned} k &= \frac{\sum \sigma_1 \sigma_3 - \frac{\sum \sigma_1 \sum \sigma_3}{n}}{\sum \sigma_3^2 - \frac{(\sum \sigma_3)^2}{n}} \\ b &= \frac{\sum \sigma_1 - k \sum \sigma_3}{n} \end{aligned} \right. \quad (9)$$

回归分析结果见表 8, 可得 $k=4.4, b=4.8$, 则

$$\sigma_1 = 4.4\sigma_3 + 4.8.$$

将 k, b 值代入式(7)有:

$$\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} = 4.4 \quad (10)$$

$$\frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} = 4.8 \quad (11)$$

可求得: $\varphi = 39^\circ, c = 1.1 \text{ MPa}$ 。

表 8 回归分析表

Tab. 8 Regression analysis table

σ_3	σ_1	$\sigma_1 \sigma_3$	σ_3^2
0	1.72	0.00	0
1	11.23	11.23	1
3	20.55	61.65	9
5	27.61	138.05	25
7	33.73	236.11	49
$\Sigma = 16$	$\Sigma = 94.84$	$\Sigma = 447.04$	$\Sigma = 84$

3.3 数值模拟误差分析

3.2 节所求黏聚力 c 和内摩擦角 φ 满足 III₂ 级围岩参数规定范围,为了进一步验证该方法量化 GSI 值的准确性,采用 FLAC^{3D} 有限差分程序对 ZK68+445—ZK68+496 段隧道进行数值分析。隧道总长 51 m,采用 H-B 本构模型,利用 3.2 节所求岩体参数对模型进行设定。选取 ZK68+445—ZK68+496 段隧道中点为监测断面,统计监测面拱顶沉降位移值。该断面拱顶竖向位移云图如图 2。

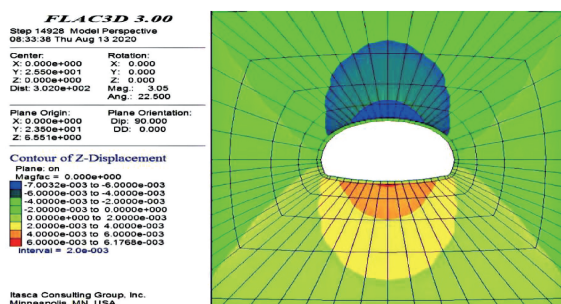


图2 监测断面拱顶竖向位移云图

Fig. 2 Vertical displacement cloud image of vault of monitoring section

从图 2 可知,监测断面处的拱顶最大沉降值为 7.003 2 mm,现场实测拱顶沉降值为 6.9 mm,求得相对误差为 1.5%。依据工程经验,当相对误差小于 10%时,认为估算结果比较接近实际,说明该方法算出的岩体力学参数值比较可靠。

4 结论

1)通过正交试验得出岩体地质特征参数对 GSI 敏感性排序为: $SCR > K'_v > SR > K_v > BQ$,选用敏感性靠前的四个地质特征参数构建 GSI 量化取值表。用多个地质特征参数约束 GSI 取值,降低 GSI 取值主观性,提高了 H-B 强度准则中岩体力学参数取值精度。

2)结合摩尔-库伦强度准则,利用量化的 GSI 值求出 III₂ 级围岩岩体力学参数 c 、 φ 值,结果满足《公路隧道设计规范》围岩参数取值范围,对比监测断面拱顶沉降值与现场实测拱顶沉降值,求得相对误差值为 1.5%,验证了本文量化的 GSI 值满足精度要求。

参考文献:

[1] HOEK E, CARRANZA-TORRES C. Hoek-Brown Failure Criterion - 2002 Edition [C]//Proceedings of the Fifth

North American Rock Mechanics Symposium. Toronto: University of Toronto, 2002: 18-22.

- [2] 夏开宗,陈从新,刘秀敏,等. 基于岩体波速的 Hoek-Brown 准则预测岩体力学参数方法及工程应用[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(07):1458-1466.
- [3] 王新刚,胡 斌,王家鼎,等. 基于 GSI 的 Hoek-Brown 强度准则量化研究[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(S2):3805-3812.
- [4] 张东旭. Hoek-Brown 准则中地质强度指标研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2016.
- [5] HASHEMI M, MOGHADDAS S, AJALLOEIAN R. Application of Rock Mass Characterization for Determining the Mechanical Properties of Rock Mass: A Comparative Study [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2010, 43(3): 305-320.
- [6] HOEK E, CARTER T G, DIEDERICH S. Quantification of the Geological Strength Index Chart [C]//47th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. San Francisco: OnePetro, 2013: 23-26.
- [7] 廖 卓,许小路,赵国斌,等. 地质强度指标 GSI 量化及岩体残余强度的确定[C]//2018 年全国工程勘察学术大会论文集,2018.
- [8] 林达明,袁广祥,尚彦军,等. 基于岩芯分级的 Hoek-Brown 准则参数研究及应用[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(01):143-149.
- [9] MARINOS V, CARTER T G. Maintaining Geological Reality in Application of GSI for Design of Engineering Structures in Rock[J]. Engineering Geology, 2018, 239: 282-297.
- [10] 王可意,徐东强. 量化 GSI 在估计岩体力学参数中的应用研究[J]. 铁道科学与工程学报,2016,13(11): 2168-2173.
- [11] 姜光成,胡乃联,洪根意,等. 基于 GSI 值量化和修正方法的岩体力学参数确定[J]. 岩土力学,2018,39(06):2211-2218.
- [12] 冯文凯,王 琦,张光鑫,等. Hoek-Brown 准则的改进及在大光包滑坡碎裂岩体力学强度评价中的应用[J]. 岩石力学与工程学报,2017,36(S1):3448-3455.
- [13] JTG 3370. 1-2018,公路隧道设计规范[S].
- [14] SONMEZ H, ULUSAY R. Modifications to the Geological Strength Index (GSI) and Their Applicability to Stability of Slopes [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, 36(6): 743-760.
- [15] 胡盛明,胡修文. 基于量化的 GSI 系统和 Hoek-Brown 准则的岩体力学参数的估计[J]. 岩土力学,2011,32(03):861-866.
- [16] KARAMAN K, KAYA A, KESIMAL A. Use of the Point Load Index in Estimation of the Strength Rating for the RMR System [J]. Journal of African Earth Sciences, 2015, 106: 40-49.

(责任编辑 王利君)