

文章编号: 1000-7598 (2012) 增2-0201-04

基于 Hoek-Brown 准则的岩体分级法 在地下工程中的应用

李彦恒, 冯 利, 罗立平

(第二炮兵工程设计院, 北京 100011)

摘 要: 根据Hoek-Brown破坏准则和等面积原则, 通过岩石力学试验数据和野外地质调查结果, 算出工程岩体主要的力学参数, 可用于地下工程的岩体分级。该方法能够较好地反映岩体的赋存条件和力学状态, 对岩体的工程力学性质认识更加深入, 为地下工程设计和施工支护提供更加科学、合理的依据。实践表明, 相比于最常用的BQ分级法, 文中方法在深埋地下工程中更加科学、适用。

关 键 词: Hoek-Brown准则; 地质强度指标; 岩体力学参数; BQ分级法

中国分类号: TU 452

文献标识码: A

Classification of rock masses based on Hoek-Brown criterion and its application to underground projects

LI Yan-Heng, FENG Li, LUO Li-Ping

(The Second Artillery Engineering Design Research Institute, Beijing 100011, China)

Abstract: According to Hoek-Brown failure criterion and equivalent-area principle, strength parameters of engineering rock masses can be estimated by data from lab test and field geological survey. These parameters are naturally applied to engineering classification of rock masses. In terms of deep-buried engineering, this classification practically reflects local environment and mechanical states of rock even better than traditional BQ classification.

Key words: Hoek-Brown criterion; geological strength index; strength parameters of rock masses; BQ classification

1 引 言

岩体分级是把影响围岩稳定的主要地质条件进行综合评价分析, 划定出不同的级别, 作为地下工程设计与施工的依据。通常定量的岩体分级方法要对岩体的几何参数、物性进行测量、现场统计, 这些参数最好是常规、易测的。常见的方法有工程岩体分级标准中的BQ分级^[1]、挪威Barton的Q分级^[2]、南非的RMR分级^[3]等, 此外, 水利水电、铁路、公路、国防等行业也有自己的分级标准。这些方法各自存在一定的缺陷, 如分类指标过于笼统、参数难以获取、适用范围较窄等。

根据Hoek-Brown破坏准则和等面积原则, 通过岩石力学试验数据和野外地质调查结果, 算出工程

岩体主要的力学参数, 可用于地下工程的岩体分级。这种方法能够较好的反映岩体的赋存条件和力学状态, 对岩体的工程力学性质认识更加深入, 为地下工程设计和施工支护提供更加科学、合理的依据。实践表明, 相比于最常用的BQ分级法, 这种方法在深埋地下工程中更加科学、适用。

2 分级方法

地下工程建设中都要进行钻孔勘探和常规岩石力学实验, 本文就利用这两项工作的结果采用基于Hoek-Brown准则^[4-7]进行定量地岩体分级。对于深埋地下工程, 由于Hoek-Brown破坏准则是在岩石力学和工程领域得到广泛应用的强度理论, 它是在总结大量试验数据的基础上获得的经验准则, 能够反

映岩石断裂、层理、完整性的一种非线性的强度准则,因此,这种分级法能更好地反映复杂地质条件下岩体的赋存条件和力学状态。

推广修正后的Hoek-Brown准则^[8]为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^a \\ m_b &= m_i \exp \left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D} \right) \\ s &= \exp \left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D} \right) \\ a &= \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left[\exp \left(\frac{-GSI}{15} \right) - \exp \left(\frac{-20}{3} \right) \right] \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: σ_1 为岩体破坏时的最大主应力; σ_3 为岩体破坏时的最小主应力或者三轴试验中的围岩; σ_c 为岩石的单轴抗压强度; m_b 、 s 、 a 为岩体材料常数; D 为岩体扰动参数; GSI 为地质强度指标, 确定主要基于岩体的岩性、结构和不连续面的条件等, 是通过侧墙、掌子面及钻孔岩芯等表面开挖或暴露的岩体进行的节理裂隙统计来评定; m_i 为完整岩石的 Hoek-Brown 常数, 根据岩石的成因划分, 可通过室内完整岩块的单轴、三轴压缩试验得出, 也可通过类比法确定, 当无试验数据时, 通过查表估算^[9]。

由于该强度准则更好地反映了岩体的强度特性且实用性很强, 被工程界尤其是欧美国家所广泛采用。Hoek 采用等面积原则, 将这一准则描述的非线性行为简化为线性^[10], 计算中用常数等效黏聚力 c 和等效内摩擦角 φ 确定的直线, 代替极限状态应力变化的非线性关系。加拿大 ROCKSCIENCE 公司开发的 RocLab 软件基于这一准则和等面积原则算出岩体力学参数, 包括岩体抗剪断峰值强度、变形模量、单轴抗压强度、整体抗压强度、单轴抗拉强度等。根据《工程岩体分级标准》^[11]附录 C: 岩体及结构面物理力学参数 (见表 1), 可用作量化的岩体分级。本文采用这一软件对某工程钻探结果和

某地下工程围岩的岩石力学试验结果进行初步计算, 由此将这种岩体分级方法和传统的 BQ 分级法计算结果进行对比。

3 实例

本文采用上述两种方法对 2 个工程的围岩进行分级, 结合施工中的工程地质现象和围岩的支护效果, 对两者结果进行比较。

实例 1. 工程区属中低山地貌, 区内断裂构造发育, 出露岩性为片麻岩、白云质大理岩、千枚岩等, 表层强风化, 岩体节理裂隙较发育。本次工程钻探共布钻孔 2 个, 均为水平孔, 孔深 70 m, 编号为 A、B 孔, 钻探工艺为双管钻进, 全孔取芯。钻孔 A 揭露岩层为灰白色~白色白云质大理岩、青灰色片麻岩, 全孔平均岩芯采取率为 93.24%, 平均 RQD 值为 39.07%, 钻进过程中从 9.60 m 开始循环水全部漏失。表 2 为钻孔 A 的地层岩性及 RQD 值的统计表。钻孔 B 揭露岩层为风化碎石覆土层 (12.8 m)、灰白色~白色白云质大理岩、青灰色片麻岩, 全孔平均岩芯采取率为 89.94%, 平均 RQD 值为 33.88%, 钻进过程中循环水大量漏失。

表 2 实例 1 中钻孔 A 地层岩性及 RQD 值一览表

Table 2 Lithology and RQD of rock core from borehole A of example 1

孔段 /m	厚度 /m	地层及岩性	岩芯长度 /m	采取率 /%	RQD /%
0~8.3	8.3	白云质大理岩, 灰白色, 中细粒结构, 厚层构造, 微风化, 裂隙发育, 裂隙面呈褐红色, 岩体结构破碎	6.20	74.70	20.60
8.3~31.5	23.2	白云质大理岩, 灰白色~白色, 中细粒结构, 厚层构造, 裂隙发育, 裂隙面呈铁锈色, 岩体结构较破碎	22.90	98.71	36.72
31.5~46.0	14.5	白云质大理岩, 灰白色~白色, 中细粒结构, 厚层构造, 裂隙发育, 裂隙面呈铁锈色, 岩体结构较完整	14.30	98.62	59.45
46.0~50.4	4.4	片麻岩, 青灰色, 中细粒结构, 裂隙发育, 裂隙面呈铁锈色, 岩体结构较破碎	4.10	93.18	30.45
50.4~59.8	9.4	白云质大理岩, 灰白色~白色, 中细粒结构, 厚层构造, 裂隙发育, 裂隙面呈铁锈色, 岩体结构较完整	9.00	95.75	50.53
59.8~70.0	10.2	片麻岩, 青灰色, 中细粒结构, 裂隙发育, 裂隙面含大量云母聚集体, 岩体结构破碎	8.77	85.98	23.63

表 1 岩体物理力学参数与岩体质量分级对应表
Table 1 Correspondence between physico-mechanical parameters and classification of rock mass

岩体基本 质量级别	重力密度 /(kN/m ³)	抗剪断峰值强度		变形模量 /GPa	泊松比
		内摩擦角 /(°)	黏聚力 /MPa		
I	>26.5	>60	>2.1	>33	<0.2
II		60~50	2.1~1.5	33~20	0.2~0.25
III	26.5~24.5	50~39	1.5~0.7	20~6	0.25~0.3
IV	24.5~22.5	39~27	0.7~0.2	6~1.3	0.3~0.35
V	<22.5	<27	<0.2	<1.3	>0.35

根据室内岩石力学试验结果, 白云质大理岩的天然块体密度为 2.71~2.81 g/cm³, 平均为 2.75 g/cm³; 单轴抗压强度为 56.2~102 MPa, 平均为 74.1

MPa, 其中单轴抗压强度和饱和弹性模量变化较大。白云质大理岩属坚硬岩。片麻岩的天然块体密度为 $2.69 \sim 2.86 \text{ g/cm}^3$, 平均为 2.77 g/cm^3 ; 单轴抗压强度为 $14.2 \sim 77.2 \text{ MPa}$, 平均为 52.6 MPa , 其中钻孔 A 的终孔段 A-4 ($60.0 \sim 70.0 \text{ m}$) 片麻岩的力学强度参数异常, 单轴抗压强度仅为 14.2 MPa , 属软岩, 其余 2 段片麻岩也属坚硬岩。

根据《工程岩体分级标准》, 岩体基本质量指标 BQ 可按式计算:

$$BQ = 90 + 3R_c + 250K_v \quad (2)$$

式中: R_c 为岩石饱和单轴抗压强度; 当 $R_c > 90K_v + 30$, 则应以 $R_c = 90K_v + 30$, 当 $K_v > 0.04R_c + 0.4$, 则应以 $K_v = 0.04R_c + 0.4$; K_v 为岩体完整性指数。当存在高地应力特征和地下工程条件时, 该标准按下式进一步修正, 即岩体基本质量指标修正值 $[BQ]$:

$$[BQ] = BQ - 100(K_1 + K_2 + K_3) \quad (3)$$

式中: K_1 为地下水影响修正系数; K_2 为主要软弱结构面产状影响修正系数; K_3 为初始应力状态影响修正系数。

根据钻孔情况, 以两种岩石为标志可设置 2 组工程岩体, 其 BQ 值计算结果见表 3。按照 BQ 岩体分级标准, 白云质大理岩组可定为 III 级 ($450 \sim 351$), 片麻岩组分级为 IV 级 (< 250)。

表 3 实例 1 中 2 组岩体的 BQ 分级法结果

Table 3 Classification result of two groups of rock masses obtained by BQ methods

岩石名称	分级参数						$[BQ]$
	R_c / MPa	K_v	K_1	K_2	K_3	BQ	
白云质大理岩	74.1	0.35	0	0.2	0	400	380
片麻岩	52.6	0.2	0	0.5	0	298	248

同样, 也可以采用 Hoek-Brown 准则计算出岩体力学参数来确定围岩等级。本工程的钻孔方向水平, 位于坡度约为 45° 的山坡坡脚处, 用 RacLab 中的斜坡模式, 白云质大理岩的斜坡高度取 100 m , 片麻岩的取 150 m , 根据 RQD 值和现场基岩出露及岩芯裂隙发育情况 (见图 1~4), 白云质大理岩的地质强度指标 GSI 取 55 , 片麻岩的地质强度指标 GSI 取 45 , 算出的岩体力学参数见表 4。根据表 4, 白云质大理岩分级为 III 级, 片麻岩分级为 IV 级, 这和采用 BQ 围岩分级标准的结果相同。因此, 对于浅埋工程, 基于 Hoek-Brown 准则的分级方法同传统的 BQ 分级法结果较为一致。

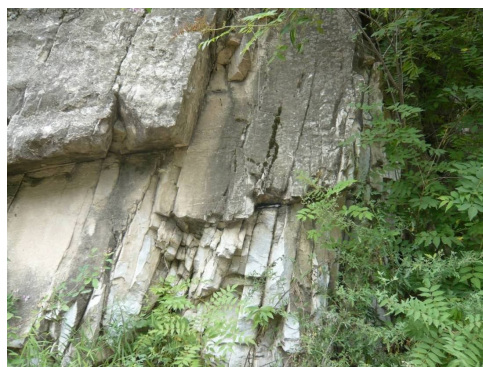


图 1 实例 1 中 A 孔附近的白云质大理岩基岩露头
Fig.1 Outcrops of dolomite marble near borehole A of example 1



图 2 实例 1 中 A 孔上方的基岩露头
Fig.2 Outcrops above borehole A of example 1



图 3 实例 1 中 A-3 孔段白云质大理岩的岩芯照片
Fig.3 Photo of dolomite marble core in segment A-3 of example 1



图 4 实例 1 中 B-7 孔段片麻岩的岩芯照片
Fig.4 Photo of gneiss core in segment B-7 of example 1

表 4 RacLab 软件算出的岩体力学参数
Table 4 Mechanical parameters of rock mass
from RacLab

名称	重力密度 /(kN/m ³)	内摩擦角 / φ (°)	黏聚力 c/ MPa	变形模量 E/ GPa	泊松比	抗压强度 / MPa
白云质大理岩	27.5	47.71	1.26	14.7	0.22	6.03
片麻岩	27.7	36.42	0.86	5.6	0.23	2.33

实例 2. 对于大深埋、高地应力的地下工程, 用通常的 BQ 围岩分级方法存在一定的局限性, 因为这种方法不能反映高围压下非线性岩体力学的一些特点 (诸如硬岩软化等), 从而可能导致过高估计岩体的强度, 造成施工支护的强度和措施不够, 设计防护的要求和实际情况不符。

某深埋地下工程, 工程岩体的岩性以近水平产状的砂岩为主, 夹少量泥质砂岩、泥岩, 地应力极高 (最大主应力约为 45 MPa), 砂岩单轴抗压强度平均为 180 MPa, 泊松比为 0.275, 钻孔的 RQD 值平均在 80% 以上, 完整性指数取 0.9, 围岩的基本质量指标 $BQ = 90 + 333 + 225 = 648$ 。

为反映围岩的高地应力状态, 取修正系数 $K_3 = 1.0$, 反映泥岩夹层对岩体整体强度的影响, 取 $K_2 = 0.4$, 由于无地下水, 取 $K_1 = 0$, 则修正后的砂岩岩体 $[BQ] = 648 - 140 = 508$ 。根据岩体质量指标分类的围岩分级标准, 该工程的围岩分级为 II 级 (550~451)。

若采用 Hoek-Brown 准则估计岩体力学参数, 用 RacLab 的沉积地层的厚层硬岩夹软岩 (Flysch) 模式, 地质强度指标 GSi 取 70。最大第三主应力采用自定义模式取值为 15 MPa, 扰动参数 D 取 0.75 (爆破扰动大: 非光爆掘进, 单爆破进尺 3~4 m), E 取 39 GPa, 计算出的 c 值为 5.2 MPa, φ 值为 39°, 岩体单轴抗拉强度为 1.08 MPa, 岩体单轴抗压强度为 17.77 MPa, 岩体变形模量为 12.3 GPa。根据表 1, 该工程砂岩岩体分级为 III 级。

施工前期阶段, 由 BQ 法的围岩分级结果, 按照《锚杆喷射混凝土支护技术规范》^[11]中提供的 II 类围岩初期支护措施, 进行围岩初护作业, 即毛洞跨度在 5~10 m 之间, 采用 80~100 mm 厚喷射混凝土或者 50 mm 厚喷射混凝土, 设置 1.5~2.0 m 长的锚杆进行初护。掘进支护完成后的一年多来, 不断出现侧墙、拱角处围岩喷层破坏, 这一现象个别地方甚至反复出现, 这说明按照 II 类围岩的初护措施不符合实际的围岩强度。在后期施工过程中, 加强初护强度: 在前期初护措施的基础上增加钢筋网, 在交叉部位还设置钢拱架, 事实上按照 III 类围

岩来做初护, 之后的围岩喷层破坏大大减少, 这说明实际的围岩条件就应该按照 III 类进行初护。因此, 对深埋地下工程的围岩分级, BQ 法存在一定的局限性, 不能真实反映围岩的力学状态, 采用基于 Hoek-Brown 准则的围岩分级更加符合深埋地下工程实际的围岩质量情况。

4 结 语

通过两个工程实例的围岩分级计算结果对比分析可见, 对于浅埋工程, 基于 Hoek-Brown 准则的分级方法同传统的 BQ 分级法结果较为一致。对深埋地下工程的围岩分级, 采用 BQ 分级法存在一定的局限性, 不能真实反映围岩在大埋深、高地应力条件下的力学状态和工程地质特性, 本文方法更加符合深埋地下工程实际的围岩质量情况, 无论是浅埋地下工程, 还是深埋地下工程, 基于 Hoek-Brown 准则的围岩分级法都更加科学、适用。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国水利部, 中华人民共和国建设部发布. GB 50218-94 工程岩体分级标准[S]. 北京: 中国计划出版社 1994. 7
- [2] BARTON N, LIEN R, LUNDE J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support[J]. *Rock Mechanics*, 1974, 6(4): 183-236.
- [3] BIENIAWSKI Z T. Estimating the strength of rock materials[J]. *J. S. Mr. Inst. Min. Metall.*, 1974, 74(8): 312-320.
- [4] HOEK E, BROWN E T. Underground excavations in rock[M]. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1980.
- [5] HOEK E, BROWN E T. Empirical strength criterion for rock masses[J]. *J. Geotech. Eng. Div., ASCE*, 1980, 106(Gq9): 1013-1035.
- [6] OER E. Strength of jointed rock masses[J]. *Rankine Lecture. Géotechnique*, 1983, 33(3): 187-223.
- [7] HOEK E, BROWN E T. The Hoek-Brown failure criterion-a 1988 update[C]//Proc. 15th Canadian Rock Mech. Symp. Toronto: University of Toronto, 1988: 31-38.
- [8] HOEK E, Carranza-Torres C, CORKUM B. Hoek-Brown failure criterion[C]//Proceeding of NARMS-TAC Conference. Toronto: University of Toronto Press, 2002: 267-273.
- [9] HOEK E, BROWN E T. Practical estimates of rock mass strength[J]. *Int. J. Rock Mech. and Min. Sci.*, 1997, 34(8): 1165-1187.
- [10] HOEK E. Estimating Mohr-Coulomb friction and cohesion values from the Hoek-Brown failure criterion[J]. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 1990, 27(3): 227-229.
- [11] 原国家冶金工业局. GB 50086-2001 锚杆喷射混凝土支护技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社 2001.