

文章编号: 1000-7598 (2011) 03-837-07

岩体强度估算方法研究及应用

林达明^{1,2}, 尚彦军¹, 孙福军³, 孙元春^{1,2}, 吴锋波^{1,2}, 刘志强⁴

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所 工程地质力学重点实验室, 北京 100029; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049;
3. 中铁十二局第二工程公司, 太原 030032; 4. 东北煤田地质局物探测量队, 沈阳 110101)

摘 要 岩体强度问题在实际工程中是工程师关心的问题, 由于受时间和经费的限制, 难以进行大量现场原位试验, 而其复杂性目前尚无破坏准则能较好满足实际要求。对于含有多组节理的岩体, 结合收集的大量数据对国外基于节理化岩体强度估算经验公式进行了修正, 从实测数据中拟合出弹性波波速与岩体强度的关系表达式, 同时收集了国内外基于节理密度、岩体分类、弹性波的岩体强度估算公式, 对这 3 种方法进行了对比研究, 并应用于旧堡隧道, 发现 3 种方法估算的强度值接近实际岩体强度, 说明了在一定情况下岩体强度是可以粗略估计出来的。

关 键 词: 岩体强度估算; 岩体分类; 节理密度; 弹性波
中图分类号: TU452 **文献标识码:** A

Study of strength assessment of rock mass and application

LIN Da-ming^{1,2}, SHANG Yan-jun¹, SUN Fu-jun³, SUN Yuan-chun^{1,2}, WU Feng-bo^{1,2}, LIU Zhi-Qiang⁴

(1. Key Laboratory of Engineering Geomechanics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;
2. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. The Second Engineering Firm, 12 Bureau, China Railway Construction Corporation, Taiyuan, 030032, 4. Geophysical Survey Team of Northeast Coal Geology Bureau, Shenyang 110101, China)

Abstract: In-situ tests can not be broadly used due to time and funds restrictions, so the strength assessment of jointed rock mass is the problem what engineers concern in practical engineering. Because of its complexity at present there is not yet any rock mass failure criterion can meet practical requirements. For the jointed rock mass, the authors refer research results at home and abroad, Combined with large amount of collected-data and amended the empirical formula based on joint density, a relationship between rock elastic wave velocity and rock mass strength is presented; collect number of empirical formulas based on joint density, rock mass classification, elastic wave velocity, the authors apply their three methods to Jiubao and find that the results fit the practical rock mass strength.

Key words: strength assessment of rock mass; rock mass classification; joint density; elastic wave

1 引 言

岩体由岩石及各种节理组成, 其强度不仅取决于岩石强度, 还受岩体结构控制。岩体的结构削弱了岩体的强度, 可使岩体强度比其主体物质——岩石的强度小几倍到几十倍。而现阶段获取岩体力学参数的方法、设备、手段与岩体工程需求尚有差距。无论是岩石试验还是岩体原位试验, 获得的力学参数直接用于岩体工程分析计算是不妥的。即使是现场原位岩体力学试验结果, 由于试体的大小、模拟条件的差别、试验手段的不完善, 也使其代表性和可靠性受到一定的局限, 不能原封不动地应用于岩

体工程。总之, 力学试验所得到的力学参数应用于岩体工程时要考虑岩石与岩体的差别、岩体与岩体工程的差别, 通过处理才能获得比较接近岩体工程实际的强度指标^[1]。

许多学者对岩石破坏进行了大量的研究, 但还没有什么破坏准则能够较好地满足实际要求, 许多现行的破坏理论能对岩石性态某些方面的问题作出很好的解释, 但不能推广到某一特定应力条件以外的范围^[2]。节理的存在是导致岩体成为各向异性体的重要原因之一, 对于含有一组节理的各向异性岩体, 其破坏特征受结构面的方位控制, 常用 Jaeger^[3]在 1960 年发展的单弱面理论解释。含有 2 组或 3

收稿日期: 2009-10-13

基金项目: 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室开放基金 (No. GZ2007-07) 资助; 国家自然科学基金项目 (No. 40972199)。

第一作者简介: 林达明, 男, 1984 年生, 博士研究生, 主要从事隧道工程稳定性评价的研究工作, E-mail: sun99shine2008@yahoo.com.cn

组结构面各向异性岩体强度预测, 目前确定岩体强度的通常做法是分步运用单弱面理论。

建立岩体强度与地质条件某些因素之间的经验关系是岩体强度估算的重要途径。Jaeger 和 Cook 曾对各种破坏理论进行了综合分析, 特别是 Griffith 理论以及由 Mc Clintock 和 Walsh 所修正的 Griffith 理论, 这些理论构成了 Hoek-Brown 经验破坏理论的发展基础^[2, 4]。Hoek 从 1980 年到现在仍然致力于其破坏准则的研究和改进, 到 2002 年提出基于 GSI (geological strength index) 估算经验判据。

Hoek 和 Brown^[2]认为, 含有 4 组以上结构面的岩体, 其强度按各向同性处理是可以的。另外, 岩体的各向异性程度还受围压 σ_3 的影响, 随着 σ_3 的增高, 岩体会由各向异性向各向同性转换。一般认为, 当 σ_3 接近岩体单轴抗压强度 σ_c 时, 岩体可认为是各向同性体^[2-5]。本文着重讨论含有多组 (>4 组) 节理岩体的强度估算问题。

对于岩体强度估算, 目前国内少数学者对工程中岩石强度的折减进行了探讨^[4-5], 尚未见到对各种岩石岩体强度关系进行系统的研究和讨论。针对含有多组 (>4 组) 的岩体力学参数估算问题, 本文参考国内外各种文献资料, 结合收集的国内工程实际资料和参加的工程实践, 拟合出基于弹性波强度估算的经验公式; 对基于节理密度的强度估算提出修正, 并对国外很多学者提出的基于不同原理的经验公式展开讨论, 针对旧堡隧道对比分析各种岩体强度估算方法。

2 岩体强度估算方法

2.1 基于节理密度的岩体强度估算及修正

岩体中结构面的方向、性质、密度和组合方式对岩体力学性质及变形特征的影响, 从而产生了结构效应。节理对工程岩体的完整性、渗透性、物理力学性质及应力传递等都有显著的影响, 是造成岩体非均质、非连续、各向异性和非弹性的本质原因之一。

对于岩体与岩块之间的强度关系, 国外学者 Vardar 年基于节理密度提出^[6]:

$$\frac{\sigma_{cm}}{\sigma_c} = \frac{1 + \lg(N/f)}{1 + \lg N} \quad (1)$$

式中: N 为岩体样品中节理的总条数; f 为相关系数, 在不同工程种类中为不同的常数, 该系数在 10~30 之间, 在隧道工程中, f 一般取 30, σ_{cm} 、 σ_c 分别为岩体和岩块的单轴抗压强度。

Protodyakonov 在隧道工程中基于节理系数得出^[6]:

$$\frac{\sigma_{cm}}{\sigma_c} = \left(\frac{l}{L} \right)^{0.3} \quad (2)$$

式中: 节理系数是指节理间距与样品的长度的比值; l 为节理间距 (m); L 为试样长度 (m)。

工程实践证明, 两种方法在野外可行性比较高, 可以在短时间根据现场粗略估算出岩体的强度。Vadar 提出的经验公式 (1) 得出的值与实际比较吻合, Protodyakonov 经验公式中 l 一般定义为典型段试样长度为 10 m 的节理间距 (即 $L=10$ m)。在野外的岩石边坡工程中, 可取典型段来估算岩体强度, 但在隧道工程中掌子面由于受爆破影响, 常导致掌子面节理密度偏大, 应用该法计算结果偏大。

上述两个基于节理密度的经验公式重点考虑节理, 没有考虑水对岩石的软化作用。笔者认为, 对于岩块的强度应该进一步修正。因为除了岩块孔隙中流体内压力的影响外, 无压力空隙流体的存在对岩块 (尤其软弱岩石) 强度具有很大的影响。Colback 等指出, 对页岩或砂岩试件来说, 水的存在使其强度大大降低, 即饱和样比烘干样的强度减小一半; 对于黏土岩、泥质胶结的砂岩、砾岩、泥灰岩等岩石, 软化性较强, 岩石的软化系数一般为 0.4~0.6^[6]。Hoek 和 Bray 认为, 孔隙压力会减少岩体结构面的抗剪强度^[3, 7]。

笔者根据收集的 1 180 个国内工程岩石试验得出水对岩石的软化图, 收集的岩石试样主要为岩浆岩和变质岩, 从图 1 可以明显看出, 水对岩体的软化具有很强的规律性, 其整体呈近直线状。作者根据一元线性回归, 可得

$$\sigma_{cw} = 0.9 \sigma_c - 25, R^2 = 0.8513 \quad (3)$$

式中: σ_{cw} 为岩块的饱和抗压强度。

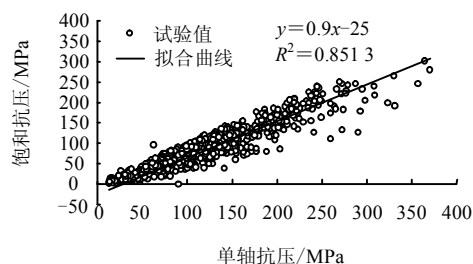


图 1 实际工程各类岩石的湿干抗压强度比值
Fig.1 Ratios of wet dry compressive strength in practical engineering

在实际工程中,若岩体处于地下水位以下,应该用式(3)对基于节理密度的岩体强度估算进行修正,即用式(3)的 σ_{cw} 来代替式(1)、(2)中的 σ_c 。笔者通过对一些工程实际的验证,发现式(3)对于岩石单轴抗压强度为50~250 MPa岩石比较适用。

2.2 基于弹性波的岩体参数估算

弹性波纵波反映岩体的压缩及拉伸变形特性,而横波反映了岩体的剪切变形特性,波速和岩体介质各种弹性参数密切相关。近年来在工程岩体稳定性评价及强度估算的研究中,根据弹性波在岩体中的传播特征,进行岩体物理力学性质与状态的测试和评估进展快速^[8]。

弹性波波速估算岩体强度的方法由于避免了很多主观因素影响,因此,使用广泛。笔者根据文献[9]关于岩体强度和弹性波波速实测的数据,结合国外学者收集的数据汇总,得出了弹性波波速与岩体强度关系曲线分布如图2所示,根据回归分析得出关系曲线:

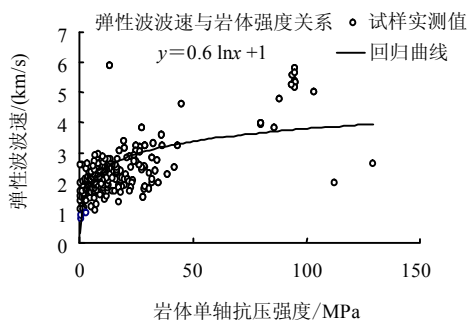


图2 实测弹性波波速与岩体强度
Fig.2 Relationships between V_{pm} and σ_{cm}

$$V_{pm} = 1 + 0.6 \ln \sigma_{cm} \quad (4)$$

Ikeda 根据岩体中弹性波的传播速度提出强度经验公式^[7]:

$$\frac{\sigma_{cm}}{\sigma_c} = \left(\frac{V_{pm}}{V_{pc}} \right)^2 \quad (5)$$

式中: V_{pm} 、 V_{pc} 分别为弹性波纵波在岩体和岩块的传播速度。

由式(5)可知,岩体结构面发育程度可以用岩体中弹性波纵波波速与岩石试件纵波波速之比的平方来表示^[10]。通过 $(V_{pm}/V_{pc})^2$ 与岩体变形模量与动弹模之比 E_0/E_d 之间关系研究结构面密度对岩体变形的影响如图3所示^[9]。从图可以看出,随着 $(V_{pm}/V_{pc})^2$ 由1降到0.65时,模量比迅速下降,由

0.65继续下降则模量比变化不大,说明结构面密度再加大对岩体变形的影响就不大了。

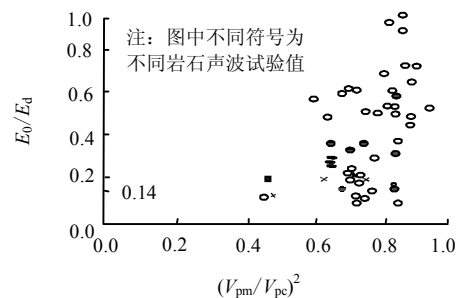


图3 岩体 $(V_{pm}/V_{pc})^2$ 与模量比 E_0/E_d 关系
Fig.3 Relationships between $(V_{pm}/V_{pc})^2$ and E_0/E_d

Ito 建议在隧道工程中可以利用下式估算岩体抗压强度^[3, 7]:

$$\sigma_{cm} = \left(\frac{V_{pm}}{1.6} \right)^{6.9} \quad (6)$$

当纵波传播速度小于1.4 km/s时,可以利用下式估算^[6]:

$$\sigma_{cm} = \left(\frac{V_{pm}}{1.562} \right)^6 \quad (7)$$

式(6)、(7)在泥岩和凝灰岩中应用效果比较好。

Barton 认为,岩体弹性波波速与岩体抗压强度的关系为^[6]

$$V_{pm} = 3 \ln \sigma_{cm} - 0.28 \quad (8)$$

式(5)可以根据 $\left(\frac{V_{pm}}{V_{pc}} \right)^2$ 把岩体的完整性分为3

种,但有时出现岩体的弹性波传播速度比完整岩块还大的矛盾。Ito 提出了岩体强度和岩体波速的单因素式(6)、(7),能直接避免式(5)的上述速度差值缺陷。比较式(4)与式(8)可以发现,这两个式子中的波速是岩体强度的指数函数,表达式形式接近,说明了式(4)有一定的合理性。

为配合岩体现场测试,可以进行室内岩石样品的试验及弹性波模拟研究,这时应用低频超声技术,工作频率达到50~200 kHz。另外,在工程勘探中,如果能够得到横波波速,还可以根据岩体的纵波、横波波速估算出岩体的泊松比、体积模量、拉梅系数、剪切模量等参数,这些参数在数值模拟计算中可以运用^[9-10]。

2.3 基于岩体分类的强度估算

岩体分类的方法很多,但是 Q 和 RMR 两种方法最为通用。因此,很多学者基于 Q 和 RMR 值来估算岩体强度和变形参数, Hoek-Brown、Prest-Brown、Kalamaras-Bieniawski^[11-12]等先后对 Q 、 RMR 与岩体强度关系给出曲线(如图4所示)。

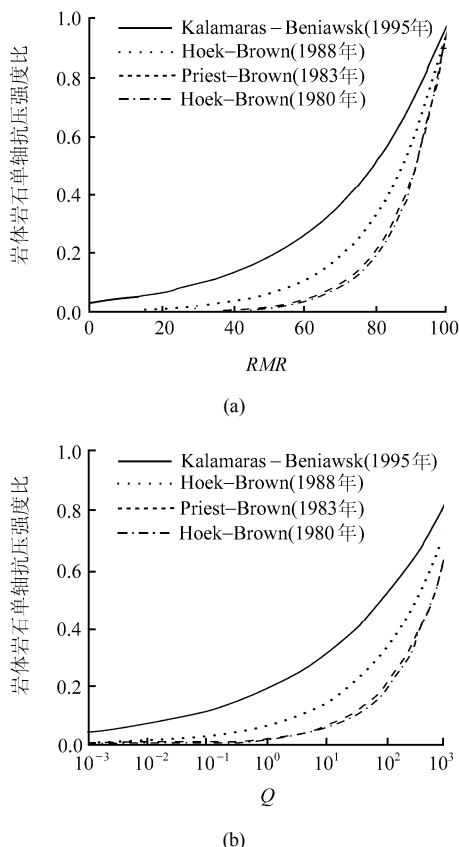


图4 岩体岩块单轴强度比与岩体质量指标关系曲线
Fig.4 Relationships between rock mass strength ratio and rock quality index

从图可以看出, Hoek 和 Brown、Priest 和 Brown 利用 Q 和 RMR 值来估算岩体强度的研究结果很接近,但是这4条曲线中,当 $Q < 1$ 或 $RMR < 40$ 时, Hoek-Brown、Priest-Brown 的研究曲线显示岩体的强度接近0,此时岩体在强度性质上接近砂土。显然,该方法在此时估算出来的值没有什么意义。鉴于上述的缺陷, Singh 提出改进的岩体强度的估算经验公式:

$$\sigma_{cm} = 0.7\gamma Q^{\frac{1}{3}} \quad (9)$$

式中: γ 为岩体的重度; σ_{cm} 为岩体抗压强度(MPa)。

Kalamaras、Beniawsk 根据研究得出岩体单轴抗压强度和岩石单轴抗压强度的比值为^[11-12]

$$\frac{\sigma_{cm}}{\sigma_c} = (RMR - 15)/170 \quad (10)$$

Beniawsk 提出的基于 RMR 的岩体强度计算式(10)应用结果显示:当 $RMR < 80$ 时,经验公式估算出来的岩体强度值与实际较符合;当 $RMR > 80$ 时,即岩体质量较好时这些经验公式估算出来的岩体抗压强度值偏大。

Hoek-Brown 早期也是根据 RMR 推导过岩体破坏准则,而随着工程实践的检验,该法则在软弱岩土中适用性比较低,而后引进地质强度指标 GSI ,本文引用 Hoek-Brown 在 2002 年得出的通用破坏准则^[10,12],其岩块和岩体破坏时主应力之间的关系为

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_c} + s \right)^a \quad (11)$$

式中: σ'_1 、 σ'_3 分别为岩体破坏时的最大、最小主应力; σ_c 为岩块单轴抗压强度; m_b 、 s 均为经验参数; m_b 为 m_i 关于 GSI 的表达式, m_i 为组成岩体的完整岩块的 Hoek-Brown 常数,在 RocLab 中 m_i 的取值与岩石的种类有关,还可以考虑岩体结构进行取值。 s 反映岩体破坏程度,其取值范围在 0~1 之间。对于完整岩块来说 $s=1$,即岩块的抗压强度;对于裂隙岩体来说,必有 $s < 1$ ^[10]。

令 $\sigma_3=0$,可得岩体强度估算公式为

$$\sigma_{cm} = s^a \sigma_c \quad (12)$$

不少研究表明, Hoek-Brown 准则会过高地评价岩体强度,特别对于非硬岩^[2,11]。当岩体中包含一条规模更大、更长结构面,或结构面中有较多断层泥充填时,则不能直接应用 Hoek-Brown 准则,只能在计算其他几组结构面切割形成的岩体强度后,用预测含一组结构面岩体强度的方法进行估算。另外,根据 Serrano 的研究,对于泥岩、板岩、页岩等软岩,由于岩块强度与结构面强度接近,所以即使其中含 1~3 组结构面,也可看作各向同性均质材料^[12-13]。

常用的数值模拟软件中没有 Hoek-Brown 的判断准则模型,研究表明:经过 Hoek-Brown 强度准则折减后的各种力学参数代替摩尔-库仑的参数用于计算是可行的,可以根据需要在 Roclab(一款基于最新版本的 Generalized Hoek-Brown failure 标准,可以用来确定岩体强度参数的工具)软件得出数值模拟所需参数^[14]。

3 工程应用研究

3.1 现场地质概况

以张家口—集宁铁路旧堡隧道工程为例,该隧

道开挖半径为 7 m, 采用 3 台阶法开挖, 施工揭露的太古代地层普遍发育隐性节理、断层、构造挤压破碎带、节理密集带、岩脉等, 将岩体切割成碎石状结构, 结构面多擦痕镜面和动力变质及热液蚀变矿物, 并普遍含泥化夹层, 围岩主要为麻粒岩、片麻岩, 岩体破碎, 岩块的单轴抗压强度为 67.6 MPa, 围岩自稳性极差, 且遇水易软化。在 DK30+882 掌子面处出现大变形, 突水严重, 拱顶位移为 45 cm, 水平收敛达到 52 cm。



图5 隧道洞口附近构造挤压破碎岩
Fig.5 Tectonic extrusion-broken rocks near entry



图6 隧道掌子面破碎岩体
Fig.6 Fractured rocks at working face

3.2 掌子面附近岩体强度估算

通过对隧道地应力分析及围岩变形研究得到本文经验公式的围岩参数。现场地下水发育, 经常出现管涌, 而节理走向与隧道走向相交有 70° 左右, 节理面常含厚度大于 5 mm 的软弱夹层, 夹层中含有一定黏土矿物, 张开度为 1~5 mm, 足以阻止节理壁接触, 因此, 参考 RMR 、 Q 的分类参数及取值标准, 得出 RMR 、 Q 、 J_r 、 J_a 值; l 值是现场典型段测量得出的, 而 σ_c 、 E_c 、 γ 等参数是在实验室得出的。

表1 利用经验公式估算岩体强度所需的参数及结果列表

Table 1 List of parameters needed in empirical formulas of rock mass strengths

参数	Q	RMR	l/m	σ_c/MPa	$\gamma/(\text{kN/m}^3)$	J_r	J_a	$V_{pm}/(\text{m/s})$	$V_{pc}/(\text{m/s})$	E_c/GPa
试验值	0.11	30	0.1	67.6	26.0	1	8	2.059×10^3	4.65×10^3	35

V_{pm} 、 V_{pc} 等参数根据现场超声波测试得出的, 在利用 Heok 和 Brown 经验公式时, 围岩岩性基本为麻粒岩片麻岩等, m_i 取 32, 而 GSI 根据现场的节理发育密度取 33。值得注意的是由于隧道岩体复杂, 表 1 的很多参数在不同部位变化幅度比较大, 因此, 作者在获取参数值时, 是根据一个范围取平均值。为了比较方便, 表 2 共列出 8 个估算公式,

根据计算结果值排列, 由于弹性波波速为 2.059 km/s, Ito 的估算公式选择式 (6), 所以式 (7) 不在比较行列, 对于式 (1)、(2), 作者是根据修正后的 σ_{cw} 代替 σ_c 进行计算。岩石的单轴抗压强度为 67.6 MPa, 按照《铁路工程岩土分类标准》和《工程岩体分级标准》^[15-18] 属于极硬岩, 而从表 2 可以明显看出。

表2 经验公式计算岩体强度值

Table 2 Empirical formulas and computed rock mass strengths

公式编号	经验公式	计算岩体单轴强度值/MPa	公式编号	经验公式	计算岩体单轴抗压强度值/MPa	公式编号	经验公式	计算岩体单轴强度值/MPa
(4)	$V_{pm}=1+0.6\ln\sigma_{cm}$	5.80	(12)	$\sigma_{cm}=s^a\sigma_c$	5.97	(10)	$\frac{\sigma_{cm}}{\sigma_c}=(RMR-15)/170$	5.96
(8)	$V_{pm}=3\ln\sigma_{cm}-0.28$	6.02	(1)	$\frac{\sigma_{cm}}{\sigma_c}=\frac{1+\lg N/f}{1+\lg N}$	9.10	(9)	$\sigma_{cm}=0.7\gamma Q^{\frac{1}{3}}$	8.78
(6)	$\sigma_{cm}=\left(\frac{V_{pm}}{1.6}\right)^{6.9}$	5.70	(2)	$\frac{\sigma_{cm}}{\sigma_c}=\left(\frac{l}{L}\right)^{0.3}$	8.75			

岩体强度值分布在 5.8~9.1 MPa, 而且主要集中在 6 MPa 左右, 比原来低了十多倍, 由于隧道埋

深 300 多米, 地下水流动性强, 根据 Q 值分类, 围岩定性分级为很差, 岩体完整性系数 K_v 为 0.442,

围岩较破碎,参考铁路隧道围岩分级围岩为Ⅳ级,而原先设计的Ⅲ围岩支护强度明显不够,考虑现场条件复杂和埋深,通过协商设计方在 DK30+882 附近区域变更为Ⅴ级,从而保证了隧道安全施工。

4 讨 论

日本的 Aydan 研究结果表明:在隧道工程中,式(1)、(2)计算结果偏高^[6];根据爆破对围岩质量影响研究显示:爆破对围岩质量的影响范围超过了 25 倍比例距离,即岩体基本质量指标减小了 10%~30%,所以根据实际岩体节理密度估算出来的岩体强度值偏高^[14-15]。表 2 中式(1)、(2)基于节理密度的岩体强度估算结果与这两个观点吻合。

值得一提的是,式(1)、(2)的计算结果是利用作者修正的式子进行估算,如果不利用作者修正的岩块强度而直接计算,结果分别为 17.42 MPa 和 16.83 MPa,显然超出了实际的岩体强度,而修正后计算结果与实际岩体强度更加接近,相对岩体的单轴抗压强度为 67.6 MPa,该误差相对较小,说明了修正后的岩体强度估算公式的可行性与科学性。

岩体强度可以直接利用 V_{pm} 计算,式(4)、(6)、(8)是单因素形式,如作者统计出来的式(4)和 Barton 统计的公式形式接近,均为对数函数。式(6)为幂函数形式。基于岩体分类的估算公式(10)、(12)估算结果和实际非常吻合,这再一次验证了 Hoek-Brown 强度准则的科学性,而且该准则在 1995 年的估算公式也是利用 RMR 来计算表达式(12)的 m_b 、 s 等参数,在旧堡隧道岩体强度估算中基于 RMR 的计算结果和 Hoek-Brown 准则的计算接近,在一定程度上说明早期基于 RMR 的 Hoek-Brown 强度准则的可行性。由于上面 5 个经验公式之间的吻合度非常高,因此,相互之间验证得出了一个比较科学的强度。特别注意的是,本文基于 Q 的经验公式结果高于实际结果,这点与文献[17-18]研究结果相吻合。

5 结 语

在实际工程中获得精确的岩体强度是非常困难的,因此,基于节理密度、弹性波、岩体分类的几种经验估公式,在实践中相互补充验证,从而粗略得出较为可信的估值区间。

节理岩体强度按式(3)修正的估算值更加接近实际,说明水的存在也是影响岩体强度的一个重要因素;弹性波估算岩体强度避免了很多主观因素影响,得出的经验公式与国外的经验公式计算结果和

实际吻合度高,也说明了式(4)的科学性。

分析旧堡隧道的计算结果表明,基于节理和 Q 的经验式(1)、(2)、(9)明显过高评价围岩强度;而基于声波技术的式(4)、(6)、(8)和 Hoek-Brown 准则式(12)之间评价结果吻合度很高,因此,基于声波技术和 Hoek-brown 的经验公式在隧道工程围岩强度评价是更为有效的评价方法。

参 考 文 献

- [1] 刘佑荣,唐辉明.岩体力学[M].武汉:中国地质大学出版社,1998.
- [2] HOEK EVERT, BROWN E T. 岩石地下工程[M].连志升,田良灿,王维德译.北京:冶金工业出版社 1986.
- [3] 宋建波,张卓元,于远忠,等.岩体经验强度准则及其在地质工程中的应用[M].北京:地质出版社 2002.
- [4] 乔春生,张清,黄修云.岩体力学参数预测的新方法[J].北方交通大学学报,1999,23(4): 48—52.
QIAO Chun-sheng, ZHANG Qing, HUANG Xiu-yun. A new method for estimating mechanical parameters of rock mass[J]. *Journal of Northern Jiaotong University*, 1999, 23(4): 48—52.
- [5] 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—688.
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—688.
- [6] AYDANLI R, ULUSAY T KAWAMOTO. Assessment of rock mass strength for underground excavations[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 1997, 34(3—4): 18.
- [7] 赵明阶,吴德伦.工程岩体的超声波分类及强度预测[J].岩石力学与工程学报,2000,19(1): 89—92.
ZHAO Ming-jie, WU De-lun [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000, 19(1): 89—92.
- [8] HOEK EVERT, BROWN E T. Practical estimates of rock mass strength[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 1998, 34: 1165—1186.
- [9] 肖树芳,杨淑碧.岩体力学[M].北京:地质出版社.1987.
- [10] 王思敬,唐大荣,杨志法,等.声波技术在工程岩体测试中的初步应用[J].地质科学,1974,2(3): 269—282.
WANG Si-jing, TANG Da-rong, YANG Zhi-fang, et al. Preliminary application of acoustic technique for engineering rock measurements [J]. *Scientia Geologia Sinica*, 1974: 2(3): 269—282.

- [11] 水利水电科学研究院, 水利水电规划设计总院, 水利电力情报研究所等. 岩石力学参数手册[M]. 北京: 水利水电出版社, 1991.
- [12] BIENIAWSKI Z. T. Determining rock mass deformability experience from histories[J]. **Int. Journal Rock Mech. Min. Sci.**, 1974, 15: 237—247.
- [13] 杨小林, 王梦恕, 王树仁. 爆破对岩体基本质量的影响及试验研究. [J]. 岩土工程学报, 2000, 22(4): 461—464. YANG Xiao-lin, WANG Meng-shu, WANG Shu-ren. Blasting effect on basic quality of rock mass and its experimental investigation[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering** 2000, 22(4)461—464.
- [14] 中华人民共和国国家建设部. GB 50218—94 工程岩体分级标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995.
- [15] 中华人民共和国铁道部. TB 10077—2001 铁路工程岩土分类标准[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2007.
- [16] 于丽, 王明年, 房敦敏, 等. 岩质围岩施工阶段亚级分级的数量化理论研究[J]. 岩土力学, 2009, 30 (12): 3846—3850. YU Li, WANG Ming-nian, FANG Dun-min, et al. Study of quantification theory of rocky surrounding rock sub-classification during construction[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(12): 3846—3850.
- [17] 徐干成, 乔春生, 刘保国, 等. 富溪双连拱隧道围岩强度及稳定性评价[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(2): 259—264. XU Gan-cheng, QIAO Chun-sheng, LIU Bao-guo, et al. Estimation of strength and stability of surrounding rock mass for Fuxi double-arch tunnel[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(2): 259—264.
- [18] CATRIN EDELBRO. Evaluation of rock mass strength criteria[D]. Norway: Lulea University of Technology, 2004.