

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

夏开宗, 陈从新, 刘秀敏, 郑允, 周意超

(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, 湖北 武汉 430071)

摘要: 根据建立的由岩体波速估算地质强度指标 GSI 和岩体扰动参数 D 的计算公式, 引入 Hoek-Brown 准则, 给出岩体波速预测岩体力学参数方法(简称岩体波速法)。以中缅油气管道(国内段)澜沧江跨境工程边坡岩体力学参数研究为例, 并以室内岩石物理力学参数和场区声波测试数据为基础, 采用岩体波速法和 E. Hoek 建议法预测场区的岩体力学参数。结果表明: 岩体波速法和 E. Hoek 建议法所得的结果平均相对误差均较小, 两者基本等效, 数值模拟结果更进一步验证了工程应用效果的合理性。该方法在试验资料不足的情况下, 能为岩体力学参数的快速评价提供一条新途径。

关键词: 岩石力学; 岩体力学参数; 岩体波速; 地质强度指标; 岩体扰动参数; Hoek-Brown 准则

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2013)07-1458-09

ESTIMATION OF ROCK MASS MECHANICAL PARAMETERS BASED ON ULTRASONIC VELOCITY OF ROCK MASS AND HOEK-BROWN CRITERION AND ITS APPLICATION TO ENGINEERING

XIA Kaizong, CHEN Congxin, LIU Xiumin, ZHENG Yun, ZHOU Yichao

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

Abstract: According to the established calculation formulae of geological strength index(GSI) and disturbed factor D for rock masses estimated by ultrasonic velocity of rock mass, the rock mass mechanical parameters are predicted by Hoek-Brown criterion based on ultrasonic velocity(the method of rock mass ultrasonic velocity for short). Then, taking Lancang River cross domain engineering slope rock mass of China—Myanmar oil and gas pipelines(domestic section) for example, based on the rock physico-mechanical parameters which were obtained by laboratory test and the wave test data, the rock mass mechanical parameters can be assessed according to the method of rock mass ultrasonic velocity and the Hoek-Brown criterion. It is shown that the calculation results of the method of rock mass ultrasonic velocity accords well with that of the method proposed by E. Hoek. The rationality of the method of rock mass ultrasonic velocity is further explained by numerical results. In addition, the proposed method provides a new approach to determine the mechanical parameters of rock mass, when test data are scant.

Key words: rock mechanics; mechanical parameters of rock mass; rock mass ultrasonic velocity; geological strength index(GSI); disturbed parameter of rock mass; Hoek-Brown criterion

收稿日期: 2012-11-14; **修回日期:** 2013-01-25

作者简介: 夏开宗(1988-), 男, 2012年毕业于贵州大学土木建筑工程学院岩土工程专业, 现为博士研究生, 主要从事边坡稳定性、地下采矿稳定性等方面的研究工作。E-mail: xiakaizhong1988@sina.com

1 引言

怎样获得可靠的岩体力学参数，一直是岩土工程学者研究的重要课题^[1]。在获取岩体力学参数的诸多方法中，最直接、最准确的方法是进行大型现场原位试验，但这种试验需要的周期长、费用高，且还存在着一些尚待解决的技术问题，因此，岩体力学参数的获取仍比较困难，其发展受到一定的限制。

寻求能为众多工程普遍接受的方法，已成为近年来人们关注的另一个目标和趋势。实践证明，以室内岩石力学试验为基准，综合考虑岩体中节理裂隙、地下水和尺寸效应的影响，将岩石力学参数进行修正后换算成岩体力学参数，可以满足工程需要。这类方法中，Hoek-Brown 准则由于较全面地反映了岩体的结构特征对岩体强度的影响，是发展最完善的方法。用 Hoek-Brown 准则预测岩体力学参数时，关键是确定地质强度指标 GSI 和岩体扰动参数 D ，其值对工程稳定性影响较大^[2-3]。E. Hoek 虽然给出了 GSI 概化区间范围^[4-6]和 D 的概化取值^[7]，但无法使其定量化，主观性强，有时取值与实际偏差大。随后苏永华等^[1, 8]利用 RMR 分类值、岩体块度指数、风化指标等来量化 GSI 值；闰长斌等^[9-10]依据岩体完整性指数、岩体损伤变量来确定 D 值，但获取各项定量指标(如岩体块度指数、风化指标等)较为复杂或考虑的因素太单一(如把损伤变量直接作为岩体扰动参数 D)，因此，现有估算方法很难快速、准确地评价 GSI 和 D 值，从而影响到岩体质量的评价。

岩体波速有着测试方便、快速和控制范围大等特点，能够反映岩体完整性，表征岩体结构面性状和岩块性质，有较好应用效果的指标，同时它与一些岩体的力学参数之间也有较好的相关性^[11]。本文建立了由岩体波速估算地质强度指标 GSI 值和岩体扰动参数 D 值的计算公式，引入 Hoek-Brown 准则，给出了岩体波速预测岩体力学参数方法。在中缅天然气管道(国内段)澜沧江跨域工程边坡岩体的应用中，将岩体波速法与 E. Hoek 建议法所得的结果进行了对比分析探讨，同时依据岩体波速法所推荐的岩体力学参数，采用 FLAC^{3D} 法对大理岸桥面平台开挖区边坡进行了数值模拟稳定性计算，以验证其工程应用效果。

2 岩体波速与 GSI 及 D 值的关系

2.1 岩体波速与 GSI 值的关系

N. Barton^[12]通过挪威、瑞典、中国内地及香港特别行政区的大量岩石工程数据的统计和总结，给出了工程岩体波速 V_p (km/s)与岩体质量指标 Q 之间的如下关系：

$$Q = 10^{V_p - 3.5} \quad (1)$$

随后 N. Barton^[12]又提出了 RMR_{89} 分类值与 Q 之间的关系：

$$RMR_{89} = 15 \lg Q + 50 \quad (2)$$

式中： RMR_{89} (rock mass rating)为地质力学分类指标，由南非科学和工业研究委员会(Council for Scientific and Industrial Research)提出的 CSIR 分类指标值，即 Z. T. Bieniawski 于 1989 年作了进一步修改后所建立起来的一套岩体分级系统^[3]。

可将式(1)和(2)结合起来，便得到岩体波速 V_p 与 RMR_{89} 分类指标值之间的如下关系：

$$RMR_{89} = 15V_p - 2.5 \quad (3)$$

结合 RMR_{89} 分类指标值与地质强度指标 GSI 值之间存在如下定量关系^[8, 13]： $GSI = RMR_{89} - 5$ ($RMR_{89} > 23$)，建立了用岩体波速 V_p 来表示地质强度指标 GSI 之间的如下关系式：

$$GSI = 15V_p - 7.5 \quad (4)$$

由于地质强度指标 GSI 值与岩体结构、岩体中岩块的嵌锁状态及结构面表面特征有关，不考虑开挖爆破对 GSI 的影响，所以式(4)中 V_p 指的是未扰动的岩体波速，且只适合于波速大于 1 700 m/s 的岩体，对于质量很差的岩体并不适用。

为了评价式(4)利用岩体波速估算地质强度指标 GSI 值的可靠度，以宋彦辉和巨广宏^[13]给出的玛尔挡水电站实测岩体波速数据为例，按式(4)计算出了相应的地质强度指标 GSI (见表 1)，宋彦辉和巨广宏^[13]依据 BQ 指标值也给出了 GSI 值一同列于表 1。

从表 1 可以看出，由式(4)计算的 GSI 值比宋彦辉和巨广宏^[13]给出的 GSI 值稍偏低，平均差值约为 4.76，说明式(4)和宋彦辉和巨广宏^[13]给出的地质强度指标 GSI 基本等效，有很强的一致性，所以式(4)估算的地质强度指标 GSI 可靠度较高。

表1 GSI 值比较

Table 1 Comparison of GSI values

试样编号	岩性	风化程度	GSI	
			式(4)	E. Hoek 法
T18-1	二长岩	微新	75	77
T18-2	二长岩	微新	73	76
T21-1	二长岩	弱风化	51	59
T21-2	二长岩	微新	71	75
T32-1	二长岩	微新	63	69
T35-1	二长岩	微新	63	68
T31-1	变质砂岩	微新	69	75
T31-2	变质砂岩	微新	74	77
T35-1	变质砂岩	微新	72	76
T35-2	变质砂岩	微新	64	71

2.2 岩体波速与 D 值的关系

国内外学者对岩体扰动参数 D 的确定建立了诸多关系,但其求取的过程均存在一定的不足,如:闫长斌和徐国元^[9]提出了用岩体完整性指数 K_v 来表示岩体扰动参数 D 的关系,由于 K_v 表征的是岩石与岩体间的声波传播速度关系,并非扰动前后岩体性质的变化;巫德斌和徐卫亚^[10]考虑了岩体扰动参数 D 与岩体扰动前后的有效弹性模量之间的关系,引入岩体波速来确定岩体扰动参数 D,巫德斌其实是将损伤变量直接作为岩体扰动参数 D^[14],而损伤变量与岩体扰动系数 D 并无直接关联。可见,现有的估算岩体扰动参数 D 的关系其准确性及估算方法等仍需进一步完善。

针对上述学者估算岩体扰动参数 D 值的不足,本文从实用和简便的原则出发,尝试了重新推导 D 值的估算式。另外, E. Hoek 等建议岩体变形模量 E_m 可用下式^[10]进行估算:

$$E_m = \begin{cases} \left(1 - \frac{D}{2}\right) \sqrt{\frac{\sigma_c}{100}} 10^{\left(\frac{GSI-10}{40}\right)} & (\sigma_c \leq 100 \text{ MPa}) \\ \left(1 - \frac{D}{2}\right) 10^{\left(\frac{GSI-10}{40}\right)} & (\sigma_c > 100 \text{ MPa}) \end{cases} \quad (5)$$

岩体未受扰动时,扰动参数 $D = 0$, 变形模量为 E_{ud} ; 受扰动岩体的扰动参数为 D, 变形模量为 E_d 。 E_{ud} 与 E_d 之商为(与式(5)所得结果相同)

$$\frac{E_{ud}}{E_d} = \frac{1}{1 - D/2} \quad (6)$$

利用 N. Barton 等的研究成果:岩体变形模量 E_m 与 Q 系统之间存在着如下关系^[15]:

$$E_m = 10Q^{1/3} \quad (7)$$

于是,将式(1)代入式(7)中,从而可得

$$E_m = 10 \times 10^{(V_p - 3.5)/3} \quad (8)$$

联立式(6)及(8)可得

$$D = 2 \left[1 - \frac{10^{(V_{ud} - 3.5)/3}}{10^{(V_d - 3.5)/3}} \right] \quad (9)$$

即

$$D = 2(1 - R_s) \quad (10)$$

其中,

$$R_s = 10^{(V_u - V_{ud})/3} \quad (11)$$

式中: R_s 为岩体受扰动后波速的下降程度, $R_s = 1$ 对应 $D = 0$ 情形,表示岩体未受任何扰动或扰动极小;当 $R_s = 0.5$, 对应 $D = 1.0$ 情形,表示岩体遭受强烈扰动。值得注意的是:当 $R_s < 0.5$ 时,取 $R_s = 0.5$ 。

3 基于岩体波速的 Hoek-Brown 准则预测岩体力学参数的方法

3.1 岩体波速法原理

E. Hoek 和 E. T. Brown 在分析 Griffith 强度理论和修正的 Griffith 强度理论的基础上,通过对大量的岩块三轴试验资料和岩石现场试验成果的统计分析,于 1980 年第一次提出了狭义的 Hoek-Brown 非线性经验破坏强度准则^[9], 2002 年针对该强度准则的不足,提出了修正后的经验公式^[7]:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^a \quad (12)$$

式中: σ_1, σ_3 分别为岩体破坏时的最大和最小主应力; σ_c 为岩块单轴抗压强度; m_b, s, a 均为岩体的材料参数,与其岩性与结构面情况有关,均可表示为地质强度指标 GSI 分类体系值和岩体受扰动程度参数 D 的函数,按修正后 Hoek-Brown 准则^[7]可表示为

$$\left. \begin{aligned} m_b &= m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right) \\ s &= \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right) \\ a &= \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{\frac{-GSI}{15}} - e^{-\frac{20}{3}} \right) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中： D 为爆破破坏和开挖卸荷对节理岩体的扰动程度； m_i 为完整岩块的 Hoek-Brown 准则常数，反映岩石的软硬程度； GSI 与岩体结构、岩体中岩块的嵌锁状态及结构面表面特征有关。

从 Hoek-Brown 准则原理可以看出，要预测岩体力学参数关键是确定常数 m_b, s, a ，这 3 个常数均与地质强度指标 GSI 和岩体扰动参数 D 有关。而从式(4)和(10)可以看出，地质强度指标 GSI 以及岩体扰动参数 D 与岩体波速之间存在一定的关系，因此可以在 Hoek-Brown 准则中引入岩体波速，于是将式(4)和(10)代入式(13)便得到由岩体波速确定的 m_b, s, a 参数关系式为

$$\left. \begin{aligned} m_b &= m_i \exp\left(\frac{15V_{ud} - 107.5}{28R_s}\right) \\ s &= \exp\left(\frac{15V_{ud} - 107.5}{3 + 6R_s}\right) \\ a &= \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{\frac{7.5 - 15V_{ud}}{15}} - e^{-\frac{20}{3}} \right) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

至此，在 Hoek-Brown 准则的基础上，建立了由岩体波速预测岩体力学参数的原理。

3.2 岩体波速法的力学参数预测

在基于岩体波速获得 Hoek-Brown 准则常数 m_b, s, a 之后，岩体力学参数求取方法如下：

(1) 岩体单轴抗压和抗拉强度^[7]

在式(12)中，令 $\sigma_3 = 0$ 可求得岩体的单轴抗压强度^[7]为

$$\sigma_{cm} = \sigma_c s^a \quad (15)$$

对于脆性材料，单轴抗拉强度等同于双轴抗压强度。所以，将 $\sigma_1 = \sigma_3 = \sigma_{tm}$ 代入式(12)，可得岩体的单轴抗拉强度^[7]为

$$\sigma_{tm} = -\frac{s\sigma_c}{m_b} \quad (16)$$

(2) 岩体变形模量

将式(4)和(10)代入式(5)便得到由岩体波速确定岩体变形模量 E_m 关系式为

$$E_m = \begin{cases} R_s \sqrt{\frac{\sigma_c}{100}} 10^{\frac{15V_{ud} - 17.5}{40}} & (\sigma_c \leq 100 \text{ MPa}) \\ R_s 10^{\frac{15V_{ud} - 17.5}{40}} & (\sigma_c > 100 \text{ MPa}) \end{cases} \quad (17)$$

(3) 岩体抗剪强度

E. Hoek 等^[7, 16]研究表明：对 Hoek-Brown 准则，

与之等效的岩体抗剪强度参数内摩擦角 φ 和黏聚力 c 的计算公式分别为

$$\varphi = \sin^{-1} \left[\frac{6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}} \right] \quad (18)$$

$c =$

$$\frac{\sigma_c [(1+2a)s + (1-a)m_b\sigma'_{3n}](s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)\sqrt{1 + [6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}]/[(1+a)(2+a)]}} \quad (19)$$

其中，

$$\sigma'_{3n} = \sigma_{3max} / \sigma_c \quad (20)$$

E. Hoek 等^[7]提出，对于均质岩石边坡工程和隧道工程，最小主应力上限值 σ_{3max} 表示如下：

$$\frac{\sigma_{3max}}{\sigma_{cm}} = \begin{cases} 0.47 \left(\frac{\sigma_{cm}}{\gamma H_t} \right)^{-0.94} & \text{(隧道工程)} \\ 0.72 \left(\frac{\sigma_{cm}}{\gamma H_s} \right)^{-0.91} & \text{(边坡工程)} \end{cases} \quad (21)$$

式中： σ_{cm} 为岩体抗压强度， γ 为岩体重度， H_t 为隧道埋深， H_s 为边坡的波高。在隧道工程中，当水平应力大于垂直应力时， γH_t 被水平应力取代。在满足应力范围 $0 < \sigma_3 < 0.25\sigma_c$ 时，岩体抗压强度 σ_{cm} 可用下式^[7]表示：

$$\sigma_{cm} = \sigma_c \frac{[m_b + 4s - a(m_b - 8s)](m_b / 4 + s)^{a-1}}{2(1+a)(2+a)} \quad (22)$$

4 工程应用研究

4.1 工程概况

中缅油气管道(国内段)澜沧江跨域工程位于大瑞铁路澜沧江特大桥上游约 200 m，采用悬索一跨过河，拟建跨越长度约 400 m。跨域工程位于澜沧江深大断裂带内，夹持在近 SN 向的平坡断层、燕子窝断层之间，拟建场区属于次不稳定区，场地复杂程度为一级，地基复杂程度为一级，工程重要性等级为一级^[17]。

研究区地层主要为三叠系上统大水塘上段第二岩组(T₃d²⁻²)白云质灰岩层，大理岸在边坡上部还存在约 15 m 厚的泥晶灰岩。由室内岩石物理力学试验所得的场区岩石物理力学参数如表 2 所示。通过对场区 18 个钻孔 3 337 个测试点进行了岩体纵波波速统计和计算，给出了岩体波速值见表 3。在进行扰动岩体和未扰动岩体波速统计和计算时，首先确定爆破开挖对岩体的扰动范围和未扰动范围，通过

表 2 室内岩石物理力学参数

Table 2 Physico-mechanical parameters of rocks from laboratory tests

位置	岩体名称 (风化程度)	平均 重度/ ($kN \cdot m^{-3}$)	单轴抗 压强度/ MPa	饱和抗 压强度/ MPa	变形 模量/ GPa	黏聚 力/ MPa	内摩 擦角/ ($^{\circ}$)	泊松 比
保 山 岸	白云质灰岩 (微风化)	27.11	61.78	60.01	29.67	-	-	0.224
	白云质灰岩 (中风化)	26.60	45.90	45.13	-	10	50	-
大 理 岸	白云质灰岩 (微风化)	27.04	55.03	53.31	33.42	-	-	0.258
	白云质灰岩 (中风化)	26.60	44.80	50.20	-	-	-	-
	泥晶灰岩 (中风化)	26.60	56.00	43.56	-	-	-	-

表 3 岩体波速平均值

Table 3 Average ultrasonic velocity values of rock mass

位置	岩体名称 (风化程度)	波速/($m \cdot s^{-1}$)	
		扰动岩体	未扰动岩体
保 山 岸	白云质灰岩(微风化)	4 549.45	4 764.55
	白云质灰岩(中风化)	4 062.77	4 444.50
大 理 岸	白云质灰岩(微风化)	4 214.98	4 479.69
	白云质灰岩(中风化)	3 096.85	3 706.82
	泥晶灰岩(中风化)	3 992.57	3 992.57

计算一定深度内 2 个相邻测试点之间的岩体波速变化率 η ，如果 $\eta > 10\%$ ，则认为波速较小的测试点上伏岩体为爆破开挖扰动范围，下伏岩体为未扰动范围，下伏岩层波速即为原岩波速^[18]。

4.2 岩体波速估算 GSI 和 D 值

将表 3 中的数据代入式(4)和(10)可获得由岩体波速估算的 GSI 和 D 值。为了便于比较，将由岩体波速估算的 GSI 和 D 值与由 E. Hoek 建议法^[4-7]给出的 GSI 和 D 值一同列于表 4 中，括号内的数据为由 E. Hoek 建议的 GSI 和 D 值。结果表明：由岩体波速给出的 GSI 和 D 值与由 E. Hoek 建议的 GSI 和 D 值基本是一致的，从而证实了岩体波速估算 GSI 和 D 值的可行性。

表 4 岩体 RMR 值评价结果

Table 4 Evaluation results of rock mass RMR value

位置	岩体名称(风化程度)	GSI 指标值	D 值
宝 山 岸	白云质灰岩(微风化)	64 (65)	0.30 (0.30)
	白云质灰岩(中风化)	59 (59)	0.51 (0.50)
大 理 岸	白云质灰岩(微风化)	60 (60)	0.37 (0.40)
	白云质灰岩(中风化)	48 (53)	0.75 (0.80)
	泥晶灰岩(中风化)	52 (50)	0.00 (0.00)

4.3 岩体力学参数预测

根据现场岩体的岩性情况，由 P. Marinos 和 E. Hoek^[5]查得的 m_i 值，表 3 中所列出的岩体波速，利用式(14)可确定 m_b ， s ， a (见表 5)。

表 5 Hoek-Brown 常数

Table 5 Hoek-Brown constants

位置	岩体名称	风化程度	m_i	m_b	s	a
宝 山 岸	白云质灰岩	微风化	10	2.193 0	0.011 6	0.502 1
	白云质灰岩	中风化	9	1.132 8	0.003 1	0.503 6
大 理 岸	白云质灰岩	微风化	9	1.529 4	0.005 9	0.502 9
	白云质灰岩	中风化	8	0.402 3	0.000 4	0.506 7
	泥晶灰岩	中风化	8	1.460 9	0.005 0	0.504 9

表 6 为由岩体波速法预测的岩体力学参数(括号内的数据为由 E. Hoek 建议法预测的岩体力学参数)。

表 6 岩体波速预测的岩体力学参数

Table 6 Mechanical parameters of rock mass predicted by ultrasonic velocity

位置	岩体名称 (风化程度)	岩体抗压 强度/ MPa	岩体抗拉 强度/ MPa	岩体变形 模量/ GPa	抗剪强度	
					黏聚力/ MPa	内摩擦 角/($^{\circ}$)
保 山 岸	白云质灰岩 (微风化)	6.6(7.1)	0.33(0.36)	14.9(15.8)	1.78(1.85)	36(36)
	白云质灰岩 (中风化)	2.5(2.9)	0.13(0.15)	7.5(8.5)	1.08(1.16)	32(32)
大 理 岸	白云质灰岩 (微风化)	4.2(4.2)	0.21(0.22)	10.5(10.6)	1.30 (1.30)	35(34)
	白云质灰岩 (中风化)	0.9(1.2)	0.04(0.07)	3.7(4.8)	0.61(0.69)	27(28)
	泥晶灰岩 (中风化)	3.9(3.4)	0.19(0.16)	8.6(7.5)	1.24(1.17)	34(34)

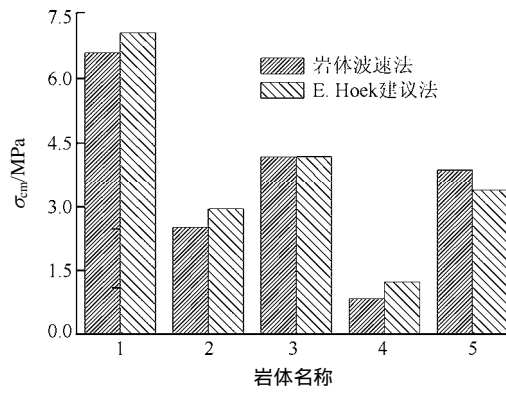
有关说明如下：

(1) 由表 5 所列出的 Hoek-Brown 常数 m_b ， s ， a 以及表 2 所列室内岩石物理力学参数，运用式(15)~(17)分别得到了岩体单轴抗压强度、岩体单轴抗拉强度以及岩体变形模量等力学参数。

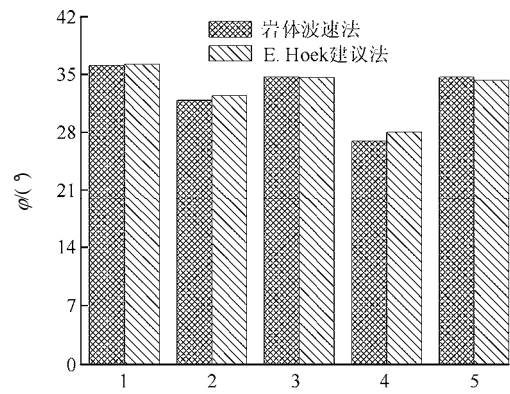
(2) 根据工程地质详勘资料研究得出，保山岸的边坡波高 $H_s = 231$ m，大理岸 $H_s = 200$ m，运用式(21)计算得保山岸微风化白云质灰岩、中风化白云质灰岩、大理岸微风化白云质灰岩、中风化白云质灰岩、中风化泥晶灰岩的最小主应力上限值 σ_{3max} 分别为 4.60，4.05，3.76，3.11，3.64 MPa。再依据式(18)及式(19)计算出相应的岩体的抗剪强度参数。

4.4 计算结果分析

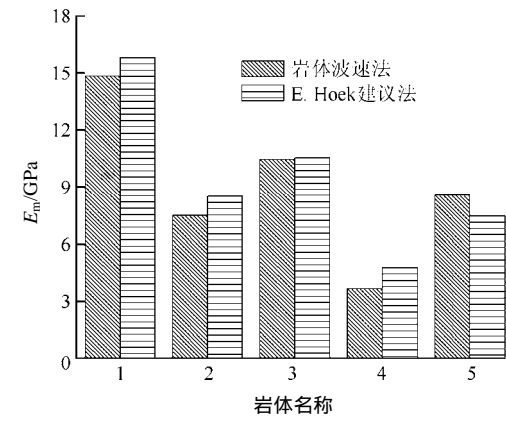
根据表 6，将岩体波速法和 E. Hoek 建议法预测值示于图 1，图中横坐标 1 代表保山岸微风化



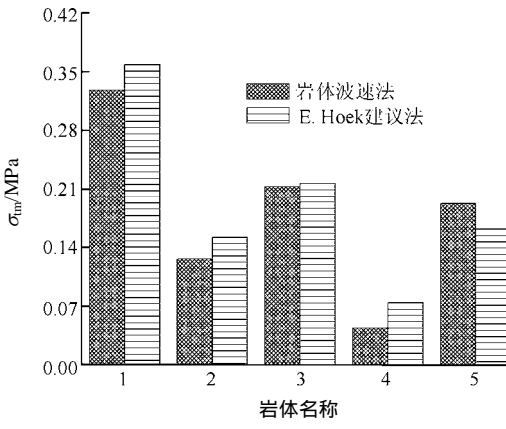
(a) 抗压强度



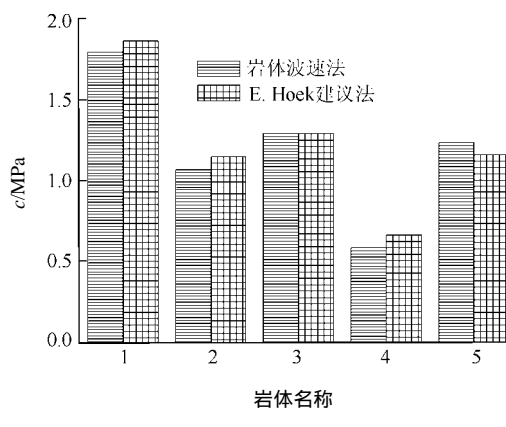
(e) 内摩擦角



(b) 变形模量



(c) 抗拉强度



(d) 黏聚力

图 1 2 种算法所得的岩体力学参数比较

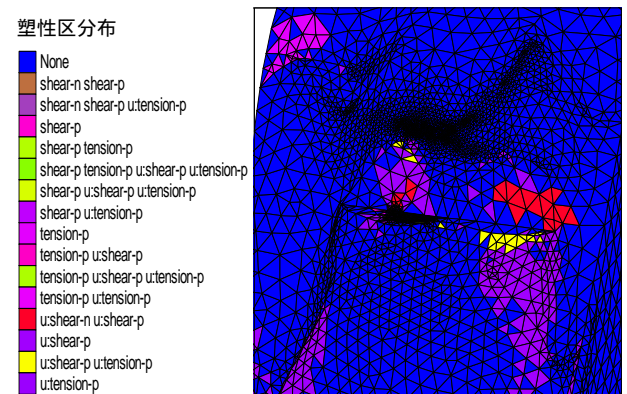
Fig.1 Comparison of rock mass mechanical parameters from two methods

白云质灰岩，2 代表保山岸中风化白云质灰岩，3 代表大理岸微风化白云质灰岩，4 代表大理岸中风化白云质灰岩，5 代表大理岸中风化泥晶灰岩。

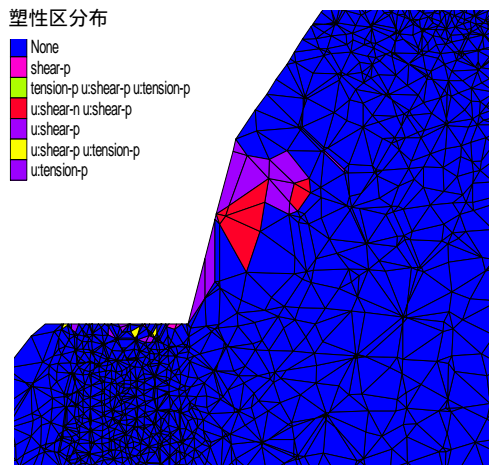
通过岩体波速法和 E. Hoek 建议法所得岩体力学参数结果对比分析可知(见图 1)，两者在 σ_{cm} 值上的平均相对误差 13.39%，在 σ_{tm} 值上的平均相对误差 17.30%，在 E_m 值上的平均相对误差 11.41%，在 c 值上的平均相对误差 5.79%，在 ϕ 值上的平均相对误差 1.46%，差别均比较小，说明两者在预测岩体力学参数上基本等效。可见，岩体波速法预测岩体力学参数是可行的。

4.5 数值模拟结果

限于篇幅，本文根据上述基于岩体波速法所得的岩体力学参数，只对大理岸桥面平台在山体开挖处边坡采用 FLAC^{3D} 法进行了稳定性分析。图 2 为山体开挖处和过下游隧道锚剖面塑性区分布。其中，None 表示未发生屈服，shear 表示剪切屈服，tension 表示拉伸屈服，n 表示当前步进入屈服，p 表示过去步进入屈服，u 表示层面屈服。



(a) 山体开挖处



(b) 过下游隧道锚剖面

图 2 山体开挖处边坡和过下游隧道锚剖面塑性区分布

Fig.2 Plastic zone distributions of slope at mountain excavation and anchor profile over the downstream tunnel

从图 2 可以看出，边坡在不支护的情况下，开挖后的坡面(特别是靠近下游的地方)出现了一定范围的节理剪切和拉伸破坏区，并且在桩基开挖平台临江侧坡面岩体处于临塑状态；而从现场调查观测了解到，场区边坡节理裂隙比较发育，特别是开挖处边坡坡面岩体较为破碎，有些地段甚至出现了岩块塌落的现象(见图 3)，且开挖以后在桩基平台上方开挖处边坡进行了锚索加网喷的方式防护以及在桩基平台临江侧自然坡面采取了锚杆加网喷方式支护^[19]。

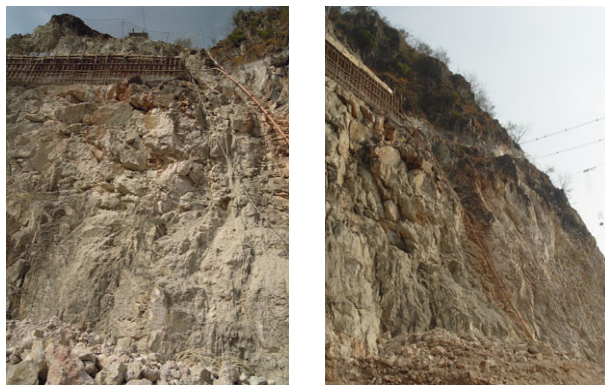


图 3 开挖区边坡下游岩块塌落现象

Fig.3 Rock collapsed phenomena of excavation slope downstream

从以上分析和对比可以看出，图 3 所示的边坡实际变形破坏特征与图 2 数值模拟显示的塑性区云图结果基本吻合。也就是说，根据岩体波速法所推荐的岩体力学参数进行工程数值模拟，其结果与现

场调查观测的情况基本一致。

5 岩体波速法预测力学参数讨论

从以上的论述和分析以及工程应用效果可知，岩体波速法估算岩体力学参数是可行的，且具有简便、快捷、经济等优点，因此，对工程应用有较好的参考价值。但由于岩体波速法是建立在 Hoek-Brown 准则的基础上的，下面对其研究基础和适用范围与 Hoek-Brown 准则的关联性做进一步论述。

(1) 从研究基础上来说，众所周知，声波在岩体中的传播主要与岩块的性质和结构面的一系列性状有关。就岩块性质而言，宏观上可由岩块的强度来反映；就结构面性状而言，与试件几何形态、张开程度、充填物性质及地下水的赋存状况等都对波的传递有重要影响。地质强度指标 GSI 与岩体结构、岩体中岩块的嵌锁状态及结构面表面特征等有关，综合各种地质信息进行估值；岩体扰动参数 D 的估值与爆破破坏和开挖卸荷的程度有关，当一定范围内的岩体遭受爆破和开挖时，岩体原有结构面扩展、张开及错动，甚至产生新的裂隙。可见岩体波速在随岩体介质的变化规律与地质强度指标 GSI 和岩体扰动参数 D 在估值上考虑的因素基本是一致的，也就是说岩体波速法与 Hoek-Brown 准则在估算岩体力学参数的研究基础上基本是一致的。

(2) 从适用范围来说，Hoek-Brown 准则主要适用于各向同性均质的岩体^[3]，包括不含结构面的完整岩体，或含 4 组及其以上的等规模、等间距、强度基本相同的结构面的节理岩体或破碎岩体以及强度较低的软弱岩体。而对于非均质岩体，Hoek-Brown 准则虽然仍然适用，但由于构造作用往往引起非均质岩体的强弱频繁交互， GSI 值的确定比较困难，目前还没有很好的解决办法。P. Marinos 和 E. Hoek^[5]在这方面进行了初步研究，在确定岩体强度时，主要是采用坚硬与软弱岩层的岩体强度加权值，至于这方面的研究仍在探索中。以本文提出的岩体波速法很好地突破了这方面的瓶颈，提供了一种强弱频繁交互的非均质岩体 GSI 值的估算方法，如：对于存在岩脉和多层不同岩性岩层强弱频繁交互(见图 4, 5)的非均质岩体，由于岩体波速能够较好地反映强弱岩体的完整性，表征岩体结构面性状和岩块性质，强硬岩层的岩体的波速高，软弱岩层的岩体波速低，因此，可以依据强硬和软弱岩层的厚

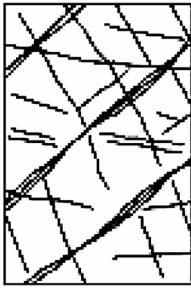


图 4 薄粉砂互层的砂岩

Fig.4 Sand stone with thin interlayers of silt stone



图 5 砂岩层的黏土质页岩

Fig.5 Clayey shale with sandstone layers

度比来取一定数量的波速，以它们的平均值来确定 GSI 值。

所以，岩体波速法与 Hoek-Brown 准则在求取岩体力学上的研究基础基本是一致的；而对于岩体波速法的适用范围，其在求取岩体力学参数的过程中与 Hoek-Brown 准则唯一不同的是地质强度指标 GSI 和岩体扰动参数 D 的确定，所以岩体波速法与 Hoek-Brown 准则的适用范围也应该一样，主要适用于各向同性均质的岩体。但对于强弱频繁交互的非均质岩体，岩体波速法突破了 Hoek-Brown 准则中 GSI 值无法提供其准确值的局限性，为这种类型的岩体在求取 GSI 值上提供了一条新途径。

6 结 论

(1) 岩体波速有着测试方便、快速和控制范围大等特点，由于其随岩体介质的变化规律与地质强度指标 GSI 和岩体扰动参数 D 在估值上考虑的因素基本一致，建立了由岩体波速估算地质强度指标 GSI 和岩体扰动参数 D 的关系式，并引入 Hoek-Brown 准则，给出了岩体波速预测岩体力学参数的新方法。

(2) 采用岩体波速法和 E. Hoek 建议法对研究区边坡岩体力学参数进行了工程处理，结果表明：

两者所得的结果平均相对误差均较小，可以认为是基本等效的，所以本文提出的岩体波速预测岩体力学参数的方法具有的一定的合理性。

(3) 以本文提出的岩体波速法所推荐的岩体力学参数为依据进行了大理岸桥面平台开挖区边坡岩体稳定性数值模拟，其计算结果与现场实际观测情况基本一致，验证了其工程应用效果的合理性。

(4) 岩体波速法与 Hoek-Brown 准则的研究基础基本是一致的，但本文所提出的岩体波速法突破了 Hoek-Brown 准则中 GSI 值在多层不同岩性岩层强弱频繁交互的非均质岩体中无法提供准确值的局限性，为这种类型的岩体在求取 GSI 值上提供了一条新途径。

综上所述，岩体波速法为确定岩体力学参数提供了一种可行、快捷而比较经济的方法。倘若未开展室外原位剪切试验，直接运用本文提出的岩体波速法来估算的岩体力学参数基本上可以满足工程实践所需的精度要求，达到降低成本和实现安全的目的。因此，对工程应用有较好的参考价值。

参考文献(References)：

- [1] 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 - 686.(SU Yonghua, FENG Lizhi, LI Zhiyong, 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 - 686.(in Chinese))
- [2] 彭国城. Hoek-Brown 强度准则中扰动系数的确定[硕士学位论文][D]. 昆明: 昆明理工大学, 2011.(PENG Guocheng. The study of disturbance factor in Hoek-Brown strength criterion[M. S. Thesis][D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2011.(in Chinese))
- [3] 黄高峰. Hoek-Brown 强度准则在岩体工程中的应用研究[硕士学位论文][D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2008.(HUANG Gaofeng. Application research of the Hoek-Brown strength criterion to rock mass engineering[M. S. Thesis][D]. Xianyang: Northwest Agriculture and Forestry University, 2008.(in Chinese))
- [4] MARINOS V, MARINOS P, HOEK E. The geological strength index: applications and limitations[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2005, 64(1): 55 - 65.
- [5] MARINOS P, HOEK E. GSI: a geologically friendly tool for rock

- mass strength estimation[C]// Proceedings of the 2000 International Conference on Geotechnical and Geological Engineering. Melbourne , Australian : [s. n.] , 2000 : 1 422 – 1 442.
- [6] HOEK E , MARINOS P. BENISSI M. Applicability of the geological strength index(GSI) classification for very weak and sheared rock masses[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment , 1998 , 57(2) : 151 – 160.
- [7] HOEK E , CARRANZA-TORRES C , CORKUM B. Hoek-Brown failure criterion-2002edition[C]// Proceedings of NARMS-TAC 2002 , Minging Innovation and Technology. Toronto : [s. n.] , 2002 : 267 – 273.
- [8] HOEK E , KAISER P K , BAWDEN W F. Support of underground excavations in hard rock[M]. Rotterdam : A. A. Balkema , 1995.
- [9] 闫长斌, 徐国元. 对 Hoek-Brown 公式的改进及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005 , 24(22) : 4 030 – 4 035.(YAN Changbin , XU Guoyuan. Modification of Hoek-Brown expressions and its application to engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2005 , 24(22) : 4 030 – 4 035.(in Chinese))
- [10] 巫德斌, 徐卫亚. 基于 Hoek-Brown 准则的边坡开挖岩体力学参数研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2005 , 33(1) : 89 – 93.(WU Debin , XU Weiya. Hoek-Brown criterion-based study on mechanical parameters[J]. Journal of Hohai University : Natural Sciences , 2005 , 33(1) : 89 – 93.(in Chinese))
- [11] 马 莎, 崔江利, 陈尚星, 等. RQD 和 V_P 合理取值分析与计算[J]. 华北水利水电学院学报, 2003 , 24(3) : 46 – 49.(MA Sha , CUI Jiangli , CHENG Shangxing , et al. Analysis and calculation of reasonable selection of RQD and V_P [J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power , 2003 , 24(3) : 46 – 49.(in Chinese))
- [12] BARTON N. Some new Q -value correlations to assist in site characterization and tunnel design[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences , 2002 , 39(2) : 185 – 216.
- [13] 宋彦辉, 巨广宏. 基于原位试验和规范的岩体抗剪强度与 Hoek-Brown 准则估值比较[J]. 岩石力学与工程学报, 2012 , 31(5) : 1 000 – 1 006.(SONG Yanhui , JU Guanghong. Determination of rock mass shear strength based on in-situ tests and codes and comparison with estimation by Hoek-Brown criterion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2012 , 31(5) : 1 000 – 1 006.(in Chinese))
- [14] 郭 强, 葛修润, 车爱兰. 岩体完整性指数与弹性模量之间的关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011 , 30(增 2) : 3 914 – 3 919.(GUO Qiang , GE Xiurun , CHE Ailan. Research on relationship of rock mass integrity index and rock mass elastic modulus[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2011 , 30(Supp.2) : 3 914 – 3 919.(in Chinese))
- [15] 宋彦辉, 巨广宏, 孙 苗. 岩体波速与坝基岩体变形模量关系[J]. 岩土力学, 2011 , 32(5) : 1 507 – 1 512.(SONG Yanhui , JU Guanghong , SUN Miao. Relationship between wave velocity and deformation modulus of rock masses[J]. Rock and Soil Mechanics , 2011 , 32(5) : 1 507 – 1 512.(in Chinese))
- [16] 盛 佳, 李向东. 基于 Hoek-Brown 强度准则的岩体力学参数确定方法[J]. 采矿技术, 2009 , 9(2) : 12 – 14.(SHENG Jia , LI Xiangdong. Determination of rock mass mechanical parameters based on Hoek-Brown strength criterion[J]. Mining Technology , 2009 , 9(2) : 12 – 14.(in Chinese))
- [17] 中国科学院武汉岩土力学研究所. 中缅天然气管道工程(国内段)澜沧江跨越工程边坡稳定性专题研究[R]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2012.(Institute of Rock and Soil Mechanics , Chinese Academy of Sciences. Study on the slope stability of China—Myanmar oil and gas pipelines(domestic section) Lancang river across domain engineering[R]. Wuhan : Institute of Rock and Soil Mechanics , Chinese Academy of Sciences , 2012.(in Chinese))
- [18] 中华人民共和国行业标准编写组. DL/T5389—2007 水工建筑物岩石基础开挖工程施工技术规范[S]. 北京: 中国电力出版社, 2007.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. DL/T5389—2007 Construction technology standard for hydraulic structure rock foundation excavation engineering[S]. Beijing : China Electric Power Press , 2007.(in Chinese))
- [19] 中国科学院武汉岩土力学研究所. 中缅天然气管道工程(国内段)澜沧江跨越工程边坡防护设计[R]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2012.(Institute of Rock and Soil Mechanics , Chinese Academy of Sciences. Study on the slope protection design stability of China—Myanmar oil and gas pipelines(domestic section) Lancang river across domain engineering[R]. Wuhan : Institute of Rock and Soil Mechanics , Chinese Academy of Sciences , 2012.(in Chinese))