

岩体物理力学参数测定及其工程处理方法的研究

刘业科,曹 平,汪亦显,宋 恒

(中南大学 资源与安全工程学院,湖南 长沙 410083)

摘 要:在巷道工程和边坡工程稳定性分析中,力学参数的测定与选取会对计算结果产生重大影响.确定岩体力学参数的现场大型原位试验方法工程浩大、费用高昂,受到多种环境和技术条件限制.因此,本文采用 Singh 法、Kalamaras 法和 Hoek - Brown 法等多种工程处理方法对由室内岩块试验获得的岩块力学参数进行了工程处理,考虑了岩块与岩体之间的差异,得到了符合工程实际情况的岩体力学参数.

关键词:岩体力学参数;室内岩块试验;工程处理方法

中图分类号:TU458

文献标识码:A

Study on Determination and Engineering Treatment Method of Rock Mass Mechanical Parameters

LIU Ye-ke, CAO Ping, WANG Yi-xian, SONG Heng

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China)

Abstract: The determination and choice of mechanical parameters has great influence on calculation result of stability analysis in laneway engineering and slope engineering. The spot test method which can get mechanical parameters of rock mass is restricted by many environment conditions and technique conditions and need much money. Therefore, several engineering treatment methods like Singh method, Kalamaras method and Hoek - Brown method, are used to deal with mechanical parameters of rock gaining from indoor rock testing. The methods consider the difference between rock and rock mass and obtain mechanical parameters of rock mass which accord with engineering practice.

Key words: mechanical parameters of rock mass; indoor rock testing; engineering dealing method

0 引言

岩体力学参数的测定是巷道工程和边坡工程

分析、设计的先期工作,是进行岩石工程稳定性分析的必要工作.岩体中存在的结构面受到地应力、水和风化的作用,使得岩体的力学行为与室内岩

收稿日期:2008-10-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50774093);2006 年高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20060533071);中南大学研究生学位论文创新选题基金资助项目(134377237).

作者简介:刘业科(1981-),男,广西融安人,中南大学博士研究生.主要研究方向:岩土工程与地下空间工程.

块测试中体现的力学行为之间存在着不小的差异。并且,在巷道工程和边坡工程稳定性分析中,巷道围岩体力学参数的选取会对计算结果产生重大影响。

按照试验地点划分,岩体力学参数的测定方法分为现场大型原位试验和室内岩块试验两类。虽然前者确定的岩体力学参数比后者更为接近工程实际,但是其工程浩大、费用高昂,受到多种环境和技术条件限制。所以,一般工程上,多采用后者取得岩块力学参数以应用于岩体工程。值得注意的是后者须考虑岩块与岩体之间的差异,即必须对参数进行工程处理,以使得岩块力学参数的工程处理分析结果更接近于现场岩体的实际情况。因此需要利用室内试验资料,采用多种工程处理方法,得到符合工程实际的岩体力学参数。

岩体在力场作用下的性质包括两个方面:岩体的变形特征和强度特征。主要的代表性力学参数包括岩体变形模量、岩体抗剪强度指标 c 、 φ 值、岩体抗拉强度、岩体抗压强度等。岩块的上述几项力学参数均可以通过室内岩石试块试验获得,岩体力学参数可以用 Singh 法、Kalamaras 法和 Hoek - Brown 法等多种工程处理方法对由室内岩块试验获得的岩块力学参数进行了工程处理求得。国内外众多著名专家学者在岩体物理力学参数测定及其工程处理方面开展了研究。郭启良采用了水压致裂技术进行了岩石抗劈裂强度和高水压透水率的测试^[1]。尹贤刚采用先进的 MTS 实验系统和声波测试系统,对岩石的单轴抗压强度、抗拉强度、泊松比、弹性模量、内摩擦角、粘结力以及岩石声波速度进行了室内试验研究^[2]。

1 室内岩块力学参数的测定

1.1 抗拉强度试验

试验方法:采用间接法 - 劈裂拉伸法来测量试件的单轴抗拉强度。

试件规格:直径 $\times$ 高度 = 5 cm $\times$ 5 cm 的圆柱体。

实验设备:RYL - 600 微机控制岩石剪切试验机,试验机为由德国进口全数字伺服控制器(EDC)与计算机控制的高档的、先进的、高精度的岩石剪切流变试验设备。这种试验机具有操作简便、控制精度高、测量准确、可以长时间工作等特点,还具有可靠性强、保护功能全等优点。

RYL - 600 微机控制岩石剪切试验机主要用于岩石单轴压缩和横向直剪的剪切试验、岩石单

轴压缩流变和横向直剪的剪切流变试验;在试验中可以检测出岩石的抗压强度、剪切强度;可以实时画出岩石单轴压缩的应力 - 应变全过程曲线、画出岩石单轴压缩流变曲线、剪切流变曲线。试验完成后可以计算试验结果,选择打印试验报告。

本实验采用位移、荷载转换控制,即先用位移控制,实验中选择 10 mm/min 的速率和恒定 0.2 kN 的荷载加载,等符合某一要求(荷载达到要求或位移达到要求)即停止加载,再转换为 200 N/s 和 20 mm 的荷载、位移控制。直到试件破坏,记录相关曲线,求出抗拉强度。

拉伸强度按下式计算:

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi DL}$$

式中: P ——峰值载荷; D ——试件直径; L ——试件高度。

1.2 单轴抗压试验

实验设备:RYL - 600 微机控制岩石剪切试验机。

实验采用位移控制,荷载 - 位移全过程曲线由 $x - y$ 函数记录仪直接绘出。加载速度采用 0.05 mm/min,应力速率在 0.5 ~ 1.0 MPa/s 的限度内。为准确获得岩样的泊松比,对各类典型岩石进行了大量试验,在试件高度的中部,轴对称的两个位置,按照贴应变片的技术要求,用 502 胶水作胶粘剂,在轴向和环向各粘上纸基电阻应变片(应变灵敏度约为 5×10^{-6}),两应变片串联,连同补偿片,按单臂桥路分别接到 Y6D - 3 型应变仪,然后又分别联接到 SC16 型光线记录示波器上,记录纵向应变和横向应变。

1.3 剪切试验

实验设备:RYL - 600 微机控制岩石剪切试验机。

实验采用位移控制,荷载 - 位移全过程曲线由 $x - y$ 函数记录仪直接绘出。

试件加工成 5 cm $\times$ 5 cm $\times$ 5 cm 的立方体。实验采用位置控制,利用剪切模具分别做了 $45^\circ \sim 70^\circ$ 的室内变角度剪试验。

剪应力与法向应力按下列公式计算:

$$\text{法向应力} \quad \sigma_n = P \cos \alpha / A,$$

$$\text{剪应力} \quad \tau = P \sin \alpha / A$$

对于剪切强度的最后取值,可以利用岩石的单轴抗拉强度 σ_t 以及单轴抗压强度 σ_c 对 c 、 φ 值进行校核。即求岩块的内摩擦角和粘结力时,设 Mohr 圆单轴抗拉强度 σ_t 及单轴抗压强度 σ_c 的

包络线由摆线段直线段组成,可以推导得到内摩擦角 φ 和粘结力 c 分别满足:

$$f(\varphi) = \pi - 2\varphi - 2\cos\varphi - \frac{4\sigma_1\cos\varphi}{\sigma_c} \quad (1)$$

$$C = \frac{\sigma_c(\frac{1}{\cos\varphi} - \tan\varphi)}{2} \quad (2)$$

由式(1)得到:

$$f(\varphi) = \pi - 2\varphi - 2\cos\varphi - \frac{4\sigma_1\cos\varphi}{\sigma_c} \quad (3)$$

依牛顿切线法,有:

$$\varphi_{i+1} = \varphi_i - \frac{f(\varphi_i)}{f'(\varphi_i)} \quad (4)$$

对式(4)进行迭代求解,求出内摩擦角 φ . 将求得的内摩擦角 φ 代入式(2)即可确定岩石的粘结力 C .

2 室内岩块力学参数的工程处理

2.1 Hoek - Brown 破坏准则的岩体强度

工程上,利用 Hoek - Brown 破坏强度准则计算岩体强度比较普遍,大量工程实践表明利用该准则所计算出的数值,与现场的实验结果比较接近自 1980 年以来,Hoek 及其合作者对该准则进行了多次修正^[3],使其实用性和准确性得到进一步提高,目前 Hoek - Brown 强度准则已经发展到 2002 版. 故可以采用 Hoek - Brown 破坏强度准则计算得到的岩体强度.

Hoek - Brown 准则的岩体强度公式为^[1]:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_c\sigma_3 + s\sigma_c^2} \quad (5)$$

$$m = m_i \exp\left[\frac{RMR - 95}{14}\right] \quad (6)$$

$$S = S_i \exp\left[\frac{RMR - 100}{6}\right] \quad (7)$$

式中: σ_1, σ_3 ——破坏时最大主应力、最小主应力; σ_c ——岩块单轴抗压强度; m_i, s_i ——为完整岩块的 m, s 值,完整岩石 $s_i = 1; m, s$ ——岩体力学参数的随机变量.

m, s 值的大小取决于岩石的矿物成分、岩体中结构面的发育程度、几何形态、地下水状况及充填物性质等.

根据野外岩体的地质特征和岩体的 RMR 分类得分与岩体强度参数的关系,就可以估算岩体弱化后的强度参数值.

当 $\sigma_3 = 0$ 时,可导出弱化后的岩体单轴抗压强度 σ_{mc} 为:

$$\sigma_{mc} = \sqrt{s}\sigma_c \quad (8)$$

利用 RMR 系统评分,各种岩性的 RMR 评分值可以参考岩体 RMR 总评分表.

近年来,Hoek - Brown 准则重新考虑了岩体的地质环境,Hoek - Brown 提出了地质强度指标 GSI. 推广后的新 Hoek - Brown 准则为:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(\frac{m_b \sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^\alpha \quad (9)$$

$$m_b = m_i \exp\left[\frac{GSI - 100}{28}\right] \quad (10)$$

式中: σ_1, σ_3 分别为岩体破坏时的最大主应力和最小主应力; σ_c 为组成岩体完整岩块的单轴抗压强度; m_b 为岩体的 Hoek - Brown 常量; m_i 为组成岩体的完整岩块的 Hoek - Brown 常数,可以查表 1 求出; s, α 为取决于岩体特性的常数.

$GSI > 25$ 的岩体: $s = \exp[(GSI - 100)/9]$, $\alpha = 0.5$

$GSI < 25$ 的岩体: $s = 0$ $\alpha = 0.65 - GSI/200$

GSI 为岩体的地质强度指标. 然而,由 Hoek - Brown 所定义的岩体地质强度指标 GSI 确定岩体结构的划分时,岩体结构的描述缺乏定量化;即使在岩体结构的一种形态描述中,由于缺乏定量化,难以细定岩体地质强度指标 GSI . 为使岩体结构的描述定量化,引入岩体参数 J_v (节理数/ m^3). J_v 与 Hoek - Brown 岩体结构特征的对应关系如表 1 所示.

表 1 岩体结构特征定量描述的 J_v 表示

Table 1 Quantitative description of rock mass structure property

岩体结构	J_v /(节理数· m^{-3})
3 块状	<3
非常块状	3~10
块状/褶曲	10~30
碎块状	>30

据此,由大体积节理化岩体的 J_v 可细定节理化岩体的地质强度指标 GSI . 当使用表评价岩体的地质强度指标 GSI 时可由岩体的结构特征 J_v 和表面条件与表的斜线相交,就可确定该岩体的地质强度指标 GSI ^[2].

当用 Hoek - Brown 准则估计节理化岩体强度与力学参数时,需用 3 个基本参数:

- 1) 组成岩体的完整岩块的单轴抗压强度 σ_c ;
- 2) 组成岩体的完整岩块的 Hoek - Brown 常

数 m_i ;

3) 岩体的地质强度指标 GSI .

由此,当 $\sigma_3 = 0$ 时,可导出弱化后的岩体单轴抗压强度 σ_{mc} 为:

$$\sigma_{mc} = \sqrt{s} \sigma_c \quad (11)$$

若 $\sigma_1 = 0$,可得弱化后的岩体单轴抗拉强度 σ_{mt} 为:

$$\sigma_{mt} = \frac{1}{2} \sigma_c [m - \sqrt{m^2 + 4s}] \quad (12)$$

可以推出岩体粘结力 C_m 为:

$$C_m = \frac{\sqrt{\sigma_{mc} \sigma_{mt}}}{2} \quad (13)$$

岩体的摩擦角 φ_m 为:

$$\varphi_m = \arctg\left(\frac{\sigma_{mc} - \sigma_{mt}}{2\sqrt{\sigma_{mc} \sigma_{mt}}}\right) \quad (14)$$

2.2 围岩分类指标法确定的岩体强度

多因素岩体分类综合考虑了影响岩体性质的多种复杂因素,因此,根据岩体分类级别或评价指标,进行岩体力学参数的确定是可行的,是合理的.参照 RMR, Q 岩体分类系统的评分原则,可以得到巷道内围岩的各种岩性的 RMR, Q 岩体分类系统评分值,由各系统的评分值,又可以估算岩体的力学参数.

2.2.1 岩体抗压强度参数的计算

1) Singh 等提出的岩体抗压强度 σ_{mc} 与 Q 系统评分值的关系:

$$\sigma_{mc} = 0.7\gamma Q^{\frac{1}{3}} \quad (15)$$

式中: γ 为岩体密度 (kN/m^3), σ_{mc} 单位为 MPa. Q 为 Q 系统评分值.

2) Kalamaras 等提出岩体抗压强度 σ_{mc} 与 RMR 系统评分值的关系:

$$\sigma_{mc} = 0.5 \cdot \sigma_c \cdot \frac{RMR - 15}{85} \quad (16)$$

公式中: σ_c 为岩块抗压强度,单位为 MPa. RMR 为其评分值.

3) Arid Palmstrom 提出如下公式:

$$\sigma_{mc} = \sigma_c \cdot JP = \sigma_c \cdot 0.2 \cdot \sqrt{JC} \cdot Vb^{0.37JC-0.2} \quad (17)$$

式中: $JC = JA * JR/JL$, JA 为节理蚀变度值评分值, JR 为节理粗糙度因子评分值, JL 为节理尺寸和连续性因子评定值. Vb 为岩石块体的平均体积 (m^3). JA, JL, JR, Vb 等大小可以参阅参考文献 [3] 的相关内容.

2.2.2 岩体变形模量 E_m 的确定

1) Serafim, Pereira 等提出 E_m 与 RMR 的关系:

$$E_m = 10^{\frac{RMR-10}{40}} \quad \text{单位为 GPa} \quad (18)$$

或

$$E_m = 0.0097 RMR^{3.54} \quad \text{单位为 MPa} \quad (19)$$

2) Aydan 等给出 E_m 与 σ_{mc} 的关系:

$$E_m = 80 \sigma_{mc}^{1.4} \quad \text{单位为 MPa} \quad (20)$$

2.3 经验折减法确定的岩体强度

岩体抗剪切强度 c_m, φ_m 的工程处理一般采用经验折减法获取,常用的方法有:

若用 C_m 表示岩体的粘结力, C_l 表示试样测试得到的岩石的粘结力,取折减系数为 I ,则有:

$$C_m = C_l \cdot I \quad (21)$$

I 值的大小依经验公式的不同而异,常用的折减经验公式有 M. Georgi 公式及费辛科公式两类,即:

1) M. Georgi 公式,有折减系数:

$$I = 0.114 \exp[-0.48(i-2)] + 0.02 \quad (22)$$

式中: i ——节理裂隙密度指数(条/m)

2) 费辛科公式,有:

$$I = 1/(1 + a \ln \frac{H}{L}) \quad (23)$$

式中: a ——为取决于岩石裂隙特性的指数; H ——巷道净高; L ——单元块节理裂隙宽度.

3 工程应用实例

笔者采取了贵州某矿矿区内的各类典型岩石试样,加工后在室内进行了大量岩块实验,经过测试,获得各种典型岩石的岩块力学参数,然后通过上述公式进行求解确定工程岩体的力学参数.实验在中南大学岩土力学与工程研究所"湖南省硬岩深部开采与环境控制重点实验室"进行,实验过程的相关操作,严格按照《水利水电工程岩石试验规程》(SL264-2001)的相关规定进行^[4].

经过岩块测试的实验数据,可以估算出岩体的相关力学参数,见表 2 和表 3.

4 结论

1) 由表 2 和表 3 计算结果和当地地质资料的比较得知,利用上述几种折减方法得到的结果与现场实验的结果比较接近,因而可以采用上述折减方法估算工程岩体的物理力学参数.

表 2 不同方法折减后的岩体抗压、拉强度(单位 MPa)

Table 2 Rock mass compressive strength and tensile strength modified with different methods

岩石类别		岩体抗压强度				岩体抗拉强度	
		Singh 法	Kalamaras 法	Hoek - Brown 法 (RMR 评分)	Hoek - Brown 法 (GSI 评分)	Hoek - Brown 法 (RMR 评分)	Hoek - Brown 法 (GSI 评分)
上盘白云岩	干	32.108 ~	32.95 ~ 47.86	3.705 ~ 18.05	6.742 ~ 21.381	0.078 ~ 0.474	0.172 ~ 0.720
	湿	44.50	24.66 ~ 35.81	2.77 ~ 13.51	4.37 ~ 17.66	0.058 ~ 0.355	0.102 ~ 0.519
下盘白云岩	干	29.22 ~	13.51 ~ 19.39	1.27 ~ 5.25	2.33 ~ 7.19	0.026 ~ 0.130	0.091 ~ 0.319
	湿	41.25	8.97 ~ 12.88	0.846 ~ 3.487	1.69 ~ 7.33	0.017 ~ 0.086	0.107 ~ 0.225
矿石	干	35.37 ~	30.49 ~ 41.83	3.639 ~ 13.807	5.89 ~ 19.02	0.081 ~ 0.373	0.106 ~ 0.514
	湿	49.72	7.27 ~ 9.97	0.868 ~ 3.292	1.92 ~ 9.22	0.019 ~ 0.089	0.044 ~ 0.128
砂岩	干	12.62 ~	4.12 ~ 8.52	0.137 ~ 0.519	0.487 ~ 1.34	0.005 ~ 0.021	0.011 ~ 0.072
	湿	30.73	1.30 ~ 2.69	0.043 ~ 0.164	0.12 ~ 0.69	0.002 ~ 0.007	0.008 ~ 0.011

表 3 岩体粘结力、内摩擦角与变形模量 E_m 工程折减结果

Table 3 Engineering dealing result of cohesion、friction angle and deformation modulus

岩石类别	岩体变形模量 E_m /GPa			折减后岩体的粘结强度 c /MPa					折减后岩体内摩擦角 φ /($^{\circ}$)		
	Serafi-m, Pere-ira 法	Aydan 法	E_m 建议取值	Hoek - Brown 法		Georgi 公式法	费辛柯法 (4 m、8 m、10 m)	建议取值	GSMR 法	经验公式法取值	建议取值
				RMR 系统评分	GSI 系统评分						
上盘白云岩	1.59 ~ 4.41	0.64 ~ 1.25	1.42	0.75	0.97	0.73	1.19、0.98、0.93	0.85	23.25	21.56	22.41
下盘白云岩	1.32 ~ 3.47	0.50 ~ 1.02	1.17	0.92	1.12	0.72	1.18、0.97、0.92	0.92	49.34	47.36	48.35
矿石	1.70 ~ 4.02	0.65 ~ 1.16	1.43	0.14	0.28	0.17	0.36、0.30、0.28	0.22	52.6	49.64	51.12
砂岩	0.75 ~ 1.64	0.09 ~ 0.3	0.53	0.13	0.26	0.15	0.32、0.27、0.26	0.20	45.4	42.81	44.11

2)一般说来,岩体抗拉强度和抗压强度的大小,与岩体的地质特征的 RMR 分类评分法和岩体的地质强度指标 GSI 评分法所得到结果差异并不大,这表明利用 Hoek - Brown 破坏强度准则计算岩体强度的科学性.工程上宜采用其它折减方法计算的相关结果,作为利用 Hook - Brown 破坏强度准则计算出的岩体强度参数的参考值.

参考文献:

[1] 郭启良,丁立丰.岩体力学参数的原地综合测试技术

与应用研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(23):3928-3931.

[2] 尹贤刚,李庶林,唐海燕,等.厂坝铅锌矿岩石物理力学性质测试研究[J].矿业研究与开发,2003,23(5):12-16.

[3] Hook E, Brown E T. 岩石地下工程[M]. 连志升,田连灿,王维德,译.北京:冶金出版社,1986.

[4] 中华人民共和国行业标准编写组. SL264-2001 水利水电工程岩石试验规程[S]. 北京:中国水利水电出版社,2003.