

# 基于 Hoek-Brown 准则的岩体力学参数确定\*

Determination of Rock Mass Mechanical Parameters based on Hoek-Brown Criterion

高 颖, 杜春雪, 张高青

(河北工程大学 土木工程学院, 河北 邯郸 056038)

**摘 要:** 国内外岩体力学参数测定的方法多不胜数, 其中室内岩石力学参数试验法能较准确地确定岩体各类参数。以昆阳某磷矿为工程背景, 进行现场采样并制备标准试件, 分别对顶板、磷矿层以及底板岩样进行室内岩石物理力学参数试验。为提高参数结果的准确性, 以及使数据更接近工程实际情况, 将采用 Hoek-Brown 准则对参数计算结果进行折减, 并进一步对经验准则中引入的扰动系数  $D$ 、地质强度指标 GSI 以及完整岩石材料常数  $m_i$  的取值进行分析。经过折减后, 其结果表明, 经折减后的力学参数综合考虑了更多的现场因素, 使试验结果更准确, 提高了后续现场相关工作的准确性。

**关键词:** 岩体力学参数; Hoek-Brown 经验公式; 强度折减法; 地质强度指标; 室内实验

**中图分类号:** TU458      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-8249 (2023) 05-0007-07

**DOI:** 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2023.05.002

GAO Ying, DU Chunxue, ZHANG Gaoqing

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

**Abstract:** There are many methods for measuring rock mass mechanical parameters at home and abroad, among which the indoor rock mechanical parameter test method can more accurately determine various parameters of rock mass. Taking a phosphate mine in Kunyang as the engineering background, field sampling was carried out and standard specimens were prepared. Indoor rock physical and mechanical parameters test were carried out on rock samples of roof, phosphate rock layer and floor respectively. In order to improve the accuracy of parameter results and make the date closer to the actual situation of the project, the Hoek-Brown criterion will be used to reduce the parameter calculation results, and further analyze the values of disturbance coefficient  $D$ , geological strength index GSI and complete rock material constant  $m_i$  introduced in the empirical criterion. After reduction, the results show that the reduced mechanical parameters comprehensively consider more field factors, which makes the test results more accurate and improves the accuracy of subsequent on-site related work.

**Keywords:** rock mass mechanical parameters; Hoek-Brown empirical formula; strength reduction method; geological strength index; indoor experiment

\* 基金项目: 国家重点实验室项目 (项目编号 SKLMRDPC19KF04)。

作者简介: 高颖 (1977—), 女, 博士, 副教授, 主要从事公路与水路运输、材料科学和建筑科学与工程等方面的研究。

通信作者: 张高青 (1981—), 男, 硕士, 讲师, 主要从事岩石力学和隧道工程方面的研究。

收稿日期: 2022-08-02

## 0 引言

岩体力学参数取值的确定一直以来都是采矿工程分析研究的一个关键性问题, 参数的准确性和可靠性严重影响到后续的开采设计以及矿区安全防护设置。历年来, 为使岩体力学参数的取值

## 岩土力学

更全面并准确, 学者们一般采用的参数确定方法包含有现场试验法、室内试验法、数值分析法、反分析法、经验分析法、人工神经网络法、工程类比法以及不确定性分析法等<sup>[1-3]</sup>。通过采用上述参数确定方法, 学者们对力学参数进行了许多详细的研究, 如李治广等<sup>[4]</sup>对西柏坡纪念馆不稳定斜坡采用反分析法和室内试验法进行结构面抗剪强度参数进行确定并对比研究, 发现两种参数确定方法误差小于 10%, 结果相近; 付成华等<sup>[5]</sup>采用了位移反分析法, 并结合神经网络法以及有限元法对力学参数进行了反演和预报; 严秋荣等<sup>[6]</sup>通过将节理岩体离散为岩块以及节理两部分, 分别进行室内试验, 再应用数值试验方法确定岩体宏观力学参数; 胡启军等<sup>[7]</sup>从岩体力学参数存在结构关联性和随机不确定性的方面进行分析, 采用随机-关联空间插值法, 建立力学参数概率模型, 利用样本信息对力学参数进行空间插值。

相比较而言, 室内试验法在岩体力学参数的确定过程中最为直接且应用是较为广泛的。由于室内试验采用的岩样一般是完整岩体, 而实际上岩体受到节理构造、风化、裂隙、软弱结构面等各种因素的影响。因此, 将采用引入岩石扰动系数  $D$  和地质强度指标  $GSI$  的 *Hoek-Brown* 准则对实验结构进行折减, 提高参数的准确性。

### 1 工程概况

该昆阳矿区地貌应属中山地貌, 其地形的总体特点大致可看作北高南低, 山岭由西南向东北延伸, 其形状似长蛇状。除此之外, 从矿区构造方面来看, 矿区地质构造较为简单, 其中矿区岩溶不发育, 断裂构造同样不发育, 并且仅在西南部有两条断层, 其规模较小, 虽破坏了矿体的连续性, 但对矿床开采产生的影响较小。总体来看, 矿区构造应属于单斜构造类型, 大体方向上属东南方并为缓倾斜矿层, 其地层倾向为  $150^\circ$  左右, 倾角范围  $10^\circ \sim 30^\circ$ 。考虑矿区的气候条件, 矿区地下水资源多半来源于地表大气降水, 但由于该矿区地质构造结构较为特殊, 较多沟谷分布在该矿区上, 则地表水可通过沟谷进行引流并排泄,

减少地下水聚集。矿区降水多发于 5-10 月, 约占全年降水量的 87.4%, 最高气温多出现在 8 月, 月平均气温达到  $24.7^\circ\text{C}$ 。

### 2 岩体力学参数试验

#### 2.1 采样与标准试件制备

矿体岩石采样要遵守代表性、便捷性以及岩样完整性的原则, 有利于后续数据的可靠性, 使试验结果更具有真实性以及可参考性。现场采样完成后, 立即将采集好的岩样用塑料薄膜和胶带进行密封包裹, 并尽快采用专用的运输箱运送至实验室进行加工, 将其制作成标准试件, 尽可能地保留岩样的岩性, 提高实验数据的准确性。

根据各试验需求, 共制备岩样 30 个, 其中顶板、磷矿层和底板分别制备 10 个, 包含单轴压缩试验所需的 3 个圆柱体试件, 抗拉强度试验的 3 个扁平圆柱体试件以及三轴压缩试验 4 个圆柱体试件, 具体加工尺寸和精度要求如表 1 所示。

表 1 岩样尺寸及加工精度要求  
Table 1 Rock sample size and machining accuracy requirements

| 试验项目   | 尺寸/cm |     | 岩样数量 | 加工精度  |
|--------|-------|-----|------|---|
|        | 直径    | 高度  |      |   |
| 单轴压缩试验 | 5     | 10  | 3    | 直径误差 $\leq 0.3 \text{ mm}$<br>不平行度 $\leq 0.05 \text{ mm}$ |
| 三轴压缩试验 | 5     | 10  | 4    | 直径误差 $\leq 0.3 \text{ mm}$<br>不平行度 $\leq 0.05 \text{ mm}$ |
| 抗拉强度试验 | 5     | 2.5 | 3    | 直径误差 $\leq 0.1 \text{ mm}$<br>不平行度 $\leq 0.1 \text{ mm}$  |

#### 2.2 密度试验

采用量积法对圆柱体岩样进行体积测量, 岩样标准试件如图 1, 按照式 (1) 进行密度计算。



图 1 圆柱体岩样试件  
Fig. 1 Cylinder rock sample diagram

$$\rho = \frac{M}{AH} \quad (1)$$

式中： $M$  表示为自然状态下岩样的重量，g； $A$  表示为各岩样横截面的平均面积， $\text{cm}^2$ ； $H$  表示岩样的平均高度，cm。

### 2.3 单轴压缩试验

试件在无侧向压力情况下，通过在轴向上施加荷载，测得试件破坏时的最大荷载并带入公式 (2) 计算单轴抗压强度  $\sigma_c$ 。

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \quad (2)$$

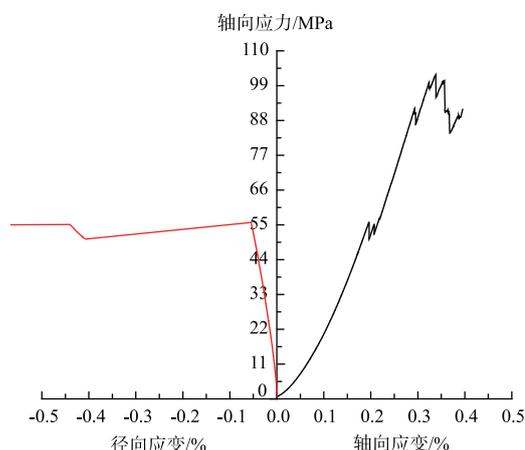
式中： $\sigma_c$  表示为要测得的岩石单轴抗压强度，MPa； $P$  为试验过程中最大破坏荷载，N； $A$  表示为垂直于加载方向的横截面积， $\text{mm}^2$ 。

除此之外，岩石还包含另外两个参数即弹性模量  $E$  和泊松比  $\mu$ ，将通过岩石压缩轴向应力和轴向应变以及径向应变的关系曲线分析计算。其弹性模量以及泊松比都将通过采用单轴压缩试验测得的数据进行计算，包含 50% 单轴抗压强度时的应力以及此时的径向和轴向应变值，具体计算公式如下式 (3) 所示：

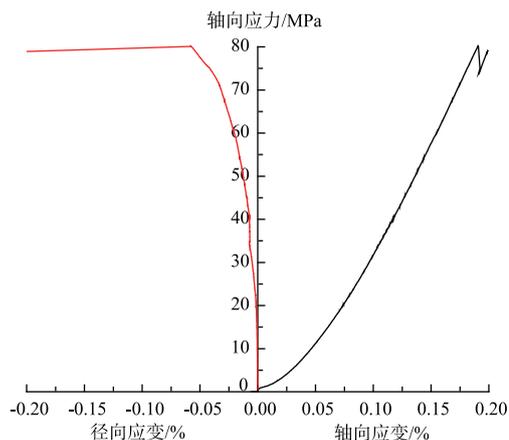
$$\begin{cases} E = \frac{\sigma_{c(50)}}{\varepsilon_{h(50)}} \\ \mu = \frac{\varepsilon_{d(50)}}{\varepsilon_{h(50)}} \end{cases} \quad (3)$$

式中： $\sigma_{c(50)}$  表示岩石单轴抗压强度 50% 的应力值，MPa； $\varepsilon_{h(50)}$  为 50% 单轴抗压强度对应的轴向应变值； $\varepsilon_{d(50)}$  为 50% 单轴抗压强度对应的径向应变值。

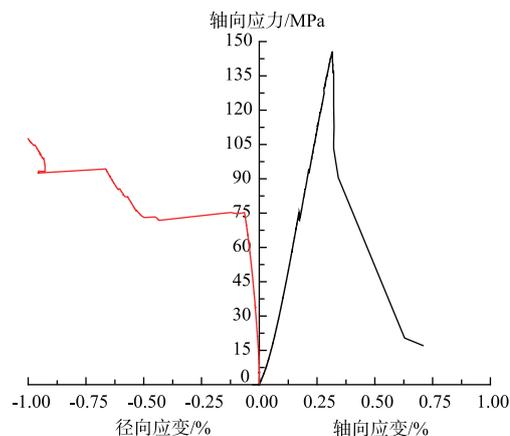
根据试验过程中采集到的应力和应变数据，对矿区顶底板以及磷矿层分别绘制应力-应变关系曲线，如图 2。根据相应的关系曲线得到单轴抗压强度的 50% 时的轴向应变以及径向应变值，带入式 (3) 可分别求出每一个岩样的弹性模量和泊松比的值，再取其平均值定为相应岩块的试验值。



(a) 顶板岩样压缩应力-应变关系曲线



(b) 磷矿层岩样压缩应力-应变关系曲线



(c) 底板岩样压缩应力-应变关系曲线

图 2 岩样应力-应变关系曲线

Fig. 2 Rock sample stress-strain relationship curve

### 2.4 三轴压缩试验

对岩样分别施加 5 MPa、10 MPa、15 MPa、20 MPa 的侧向应力，记录试件破坏时的轴向荷载，

岩土力学

通过式 (4) 计算相应的轴向应力  $\sigma_1$ 。

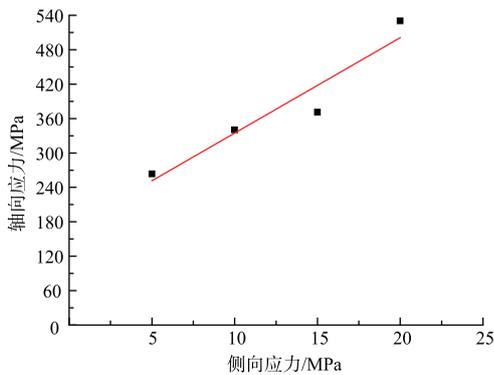
$$\sigma_1 = \frac{P}{A} \quad (4)$$

式中:  $\sigma_1$  为不同侧向应力时的轴向应力值, MPa;  $P$  为试件破坏时的轴向荷载, N;  $A$  为试件的横截面积,  $\text{mm}^2$ 。

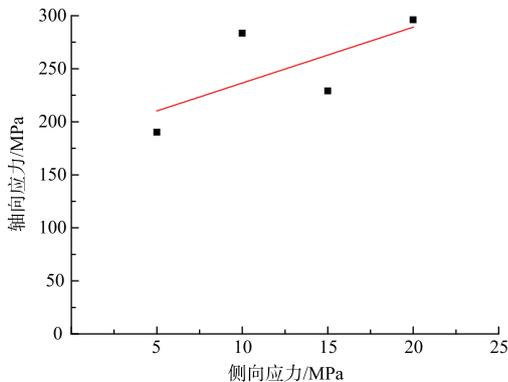
分别对顶板、磷矿层以及底板绘制  $\sigma_1 - \sigma_3$  关系曲线, 如下图 3, 从而得到相应的拟合方程。通过拟合方程的斜率和纵坐标截距以及下式 (5) 分别计算岩块的内摩擦角  $\varphi$  和黏聚力  $c$ 。

$$\begin{cases} \varphi = \arcsin\left(\frac{k-1}{k+1}\right) \\ c = \frac{\sigma_c(1-\sin\varphi)}{2\cos\varphi} \end{cases} \quad (5)$$

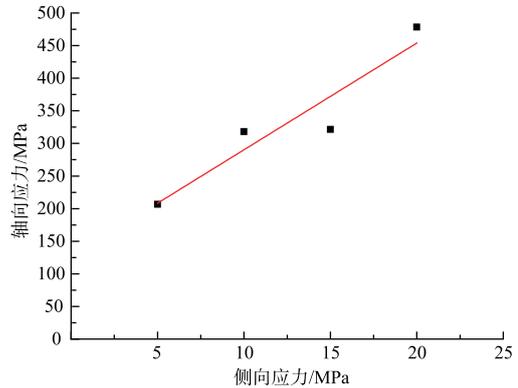
式中:  $\sigma_c$  为绘制的侧向应力与轴向应力关系曲线中纵坐标的应力截距, MPa;  $k$  为对应关系曲线的斜率。



(a) 顶板岩样  $\sigma_1 - \sigma_3$  关系曲线



(b) 磷矿层岩样  $\sigma_1 - \sigma_3$  关系曲线



(c) 底板岩样  $\sigma_1 - \sigma_3$  关系曲线

图 3 岩样  $\sigma_1 - \sigma_3$  关系曲线  
Fig. 3 Rock sample  $\sigma_1 - \sigma_3$  relationship curve

由图 3 可知各岩样的拟合曲线关系如下:

$$\begin{cases} \sigma_1 = 16.627\sigma_3 + 168.39 & (a) \\ \sigma_1 = 5.268\sigma_3 + 183.87 & (b) \\ \sigma_1 = 16.373\sigma_3 + 126.485 & (c) \end{cases} \quad (6)$$

将上式拟合方程斜率与截距分别带入式 (5) 可计算出岩样的内摩擦角  $\varphi$  和黏聚力  $c$ 。

2.5 岩石抗拉试验

该实验也称为巴西劈裂试验, 岩样标准试件采用的是扁圆柱体, 如图 4 所示。通过对岩样在直径方向上施加一定荷载, 试件会沿着直径方向产生裂缝, 从而导致试件沿直径方向上贯穿破坏, 记录岩样破坏时的荷载数据, 间接测定岩石的抗拉强度, 将试件破坏时的最大荷载带入式 (7) 可计算岩石抗拉强度  $\sigma_t$ 。

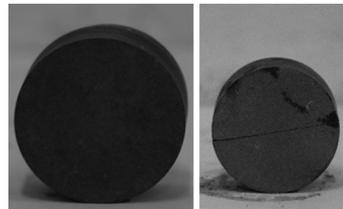


图 4 岩石抗拉试验岩样  
Fig. 4 Rock sample for tensile test

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi DH} \quad (7)$$

式中:  $P$  为试件破坏时的最大荷载, N;  $D$  为试件直径, mm;  $H$  为标准试件的厚度, mm。

2.6 试验结果

根据上面提到的计算方法可得到主要的岩石

物理力学参数，整理分析如表 2 所示。

表 2 岩石物理参数试验结果  
Table 2 Test results of petrophysical parameters

| 岩层特性 | 密度/(g/cm <sup>3</sup> ) | 抗拉强度/MPa | 单轴抗压强度/MPa | 弹性模量/GPa | 泊松比  | 粘聚力/MPa | 内摩擦角/° |
|------|-------------------------|----------|------------|----------|------|---------|--------|
| 顶板   | 2.74                    | 3.40     | 103.55     | 28.06    | 0.29 | 17.66   | 63.52  |
| 磷矿层  | 2.80                    | 5.03     | 81.81      | 35.18    | 0.18 | 19.37   | 55.09  |
| 底板   | 2.71                    | 4.52     | 146.85     | 42.89    | 0.40 | 12.17   | 63.59  |

### 3 Hoek-Brown 准则参数折减

#### 3.1 广义 Hoek-Brown 准则

此强度准则是 1980 年由 Hoek 和 Brown 首次提出，进一步研究了在非线性问题方面参数取值的方法<sup>[8]</sup>。最初提出的公式主要被用于节理岩体中，后续加入了扰动岩体以及非扰动岩体的概念，从而引入了岩体质量指标  $RMR$ 。1992 年又因考虑了节理岩体抗拉强度可能为零的情况，引入了材料参数  $a$ 。后续再次改进了强度准则，并引入扰动系数  $D$  和地质强度指标  $GSI$  来考虑脆弱岩体的情况以及用来描述岩体应力释放和爆炸破坏对岩体的扰动作用<sup>[9-11]</sup>。

首先，可知其广义的 Hoek-Brown 强度准则基础公式如下：

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (8)$$

式中： $\sigma_1$  和  $\sigma_3$  表示为岩石破坏时的最大主应力和最小主应力，MPa； $\sigma_{ci}$  表示为完整岩石的单轴抗压强度，MPa； $m_b$ 、 $s$ 、 $a$  均为完整岩石的材料参数。

强度准则修正过程中，也对岩石的参数材料即  $m_b$ 、 $s$ 、 $a$  进行了理论性修正，其修正公式如下：

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

式中： $m_i$  为完整岩石材料常数； $D$  为岩体扰动系数，一般取值范围为 0~1； $GSI$  是地质强度指标，规定取值范围为 0~100。

#### 3.2 $GSI$ 、 $D$ 、 $m_i$ 参数的确定

地质强度指标  $GSI$  以 25 为界限值，对于大于 25 质量较好的岩石来说， $GSI$  的取值将通过引入

分类系统值  $RMR$  进行计算，具体计算公式如下<sup>[12]</sup>。

$$GSI = RMR - 5 \quad (10)$$

其中，分类系统值  $RMR$  将从六个方面进行系统估算，包括完整岩石材料强度  $R_1$ 、岩石质量  $R_2$ 、结构面的间距  $R_3$ 、结构面的条件  $R_4$ （包括其粗糙程度、风化程度以及连续性等）、地下水条件  $R_5$  以及结构面调整权值  $R_6$ <sup>[13]</sup>。根据工程实际地质条件，分别对上述六个方面的参数进行估值，由于人工干扰的可能性，其值具有一定的经验性。分类系统值计算公式如下：

$$RMR = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 \quad (11)$$

扰动系数  $D$  是在 2002 年修正的广义强度准则中提出的，主要由爆破开挖对岩石产生扰动影响的程度以及产生损伤的范围确定。将具体根据工程经验考虑不同情况下扰动系数  $D$  的估值，如下表 3 所示。

表 3 岩石扰动系数  $D$  的估值  
Table 3 Estimation of rock disturbance coefficient  $D$

| 岩体特征                        | $D$ 的估值                          |
|-----------------------------|----------------------------------|
| 优质爆破或 TBM 开挖、机械或人工开挖，扰动很小   | $D=0$                            |
| 爆破很差导致局部损伤 2-3m             | $D=0.8$                          |
| 小规模边坡爆破导致中等程度岩体破坏           | $D=0.7$ (爆破良好)<br>$D=1.0$ (爆破较差) |
| 大规模露天边坡开采对岩体产生严重的扰动影响       | $D=0.7$ (机械开挖)<br>$D=1.0$ (生产爆破) |
| 挤压问题导致典型的底板起鼓，扰动严重，除非发生临时转化 | $D=0.5$ (没有转化)                   |

完整岩石材料常数  $m_i$  没有实际的物理定义，为简化计算过程，可以采用完整岩石的单轴抗压强度和抗拉强度的比值来近似代替材料常数  $m_i$  的值<sup>[16]</sup>。

岩土力学

3.3 岩石力学参数折减

通过上述强度准则计算公式对试验获得的主要力学参数数据进行适当折减, 主要内容如下:

(1) 单轴抗压强度

令  $\sigma_3 = 0$  带入式 (8) 可得到岩石单轴抗压强度公式:

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

(2) 抗拉强度

岩石抗拉强度计算公式简化为:

$$\sigma_t = \frac{1}{2} \sigma_{ci} (m - \sqrt{m^2 + 4s}) \quad (13)$$

(3) 弹性模量

岩石弹性模量根据 *Hoek-Diederichs* 经验公式计算<sup>[17]</sup>, 如下:

$$E = E_i \left( 0.02 + \frac{1 - D/2}{1 + e^{[(60+15D-GSI)/11]}} \right) \quad (14)$$

(4) 内摩擦角和粘聚力

运用 *Hoek-Brown* 准则和等效 *Mohr-Coulomb* 准则以及其线性拟合关系直接计算等效  $c$ 、 $\varphi$  值<sup>[18]</sup>, 计算公式如下:

$$\begin{cases} \varphi = \sin^{-1} \left[ \frac{6am_b (s + m_b \sigma_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b (s + m_b \sigma_{3n})^{a-1}} \right] \\ c = \frac{\sigma_{ci} [(1+2a)s + (1-a)m_b \sigma_{3n}] (s + m_b \sigma_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a) \sqrt{1 + \frac{6am_b (s + m_b \sigma_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)}}} \end{cases} \quad (15)$$

其中,  $\sigma_{3n} = \sigma_{3max} / \sigma_{ci}$ 。

3.4 试验参数折减结果

岩石力学参数经强度准则折减后, 结果如下表 4:

表 4 岩石力学参数折减表

Table 4 Rock mechanics parameter reduction table

| 岩层特性 | 密度/(g/cm) <sup>3</sup> | 抗拉强度/MPa | 单轴抗压强度/MPa | 弹性模量/GPa | 泊松比  | 粘聚力/MPa | 内摩擦角/° |
|------|------------------------|----------|------------|----------|------|---------|--------|
| 顶板   | 2.74                   | 2.15     | 71.74      | 17.03    | 0.29 | 12.89   | 53.80  |
| 磷矿层  | 2.80                   | 1.31     | 27.62      | 18.74    | 0.18 | 7.66    | 42.73  |
| 底板   | 2.71                   | 1.80     | 70.43      | 24.69    | 0.40 | 12.89   | 54.89  |

4 结论

本文对力学参数的确定采用的方法是室内试验法, 通过岩块采样与试件制备并分别进行相关力学实验, 得到主要力学参数数据后, 再运用 *Hoek-Brown* 强度准则对矿区单轴抗压强度等主要岩体力学参数进行折减, 从而得到更接近实际工程情况的力学参数。得到如下结论:

(1) 室内试验法确定岩石力学参数具有直观性, 试验过程施加的应力条件、应力路径以及应变速率都是可控, 且岩石力学参数可以直接测定;

(2) 通过 *Hoek-Brown* 强度准则对参数进行折减, 解决了非线性问题, 并且可以减小现场采样过程中扰动因素产生的误差, 降低岩体构造、裂隙等自然条件对岩体参数的影响;

(3) 强度准则中引入的地质强度指标 *GSI* 以及扰动系数 *D* 的确定具有一定的经验性, 只能大致对工程进行估算。

参 考 文 献

[1] 谭力良. 浅议边坡岩体力学参数的确定方法[J]. 民营科技, 2010(1):6.

[2] 周火明, 孔祥辉. 水利水电工程岩石力学参数取值问题与对策[J]. 长江科学院院报, 2006(4):36-40.

[3] 刘丰收, 侯清波, 温秋生. 岩体力学参数确定方法探讨[C]. 全国岩土与工程学术大会论文集(上册), 2003:299-305.

[4] 李治广, 董昕, 马健. 反分析法与室内试验法确定岩质边坡结构面抗剪强度对比研究——以西柏坡纪念馆不稳定斜坡为例[J]. 工程地质学报, 2009, 17(4):569-573.

[5] 付成华, 潘燕芳, 李瑞青. 基于位移反分析法的岩体力学参数动态反馈分析[J]. 科协论坛(下半月), 2010(10):96-99.

[6] 严秋荣, 冯君, 杨涛, 等. 节理岩体力学参数确定的数值试验方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(2):188-194.

[7] 胡启军, 俞钧耀, 刘明, 等. 基于随机-关联空间插值法的工程岩体力学参数确定[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(8):90-96.

[8] 林杭, 曹平, 赵延林, 等. 强度折减法在 *Hoek-Brown* 准则中的应用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2007(6):1219-1224.

(下转第 19 页)

的影响与造价成本的综合考虑, 止水帷幕插入比深度可介于 0.875~1 之间。

### 参 考 文 献

- [1] 冯海涛. 深基坑地下水控制的有限元模拟及分析 [D]. 天津: 天津大学, 2007.
- [2] ZHOU N Q, PIETER A V, LOU R X, et al. Numerical simulation of deep foundation pit dewatering and optimization of controlling land subsidence [J]. *Engineering Geology*, 2010, 114 (3): 251-260.
- [3] 冯晓腊, 李栋广. 落底式止水帷幕条件下基坑涌漏量计算 [J]. *水文地质工程地质*, 2013, 40 (5): 16-21.
- [4] 李伟, 童立元, 王占生, 等. 不同地连墙插入深度下降水对周边环境的影响分析 [J]. *地下空间与工程学报*, 2015, 11 (S1): 272-277.
- [5] WANG J X, LIU X T, WU Y B et al. Field experiment and numerical simulation of coupling non-darcy flow caused by curtain and pumping well in foundation pit dewatering [J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 549: 277-293.
- [6] XU Y S, YAN X X, SHEN S L, et al. Experimental investigation on the blocking of groundwater seepage from a waterproof curtain during pumped dewatering in an excavation [J]. *Hydrogeology Journal*, 2019, 27 (7): 2659-2672.
- [7] 哈达, 朱敢平, 李竹, 等. 天津市承压含水层条件下地下连续墙深度优化 [J]. *地下空间与工程学报*, 2018, 14 (2): 490-499.
- [8] WU Y X, SHEN S L, LYU H M, et al. Analyses of leakage effect of waterproof curtain during excavation dewatering [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 583 (C): 1-13.
- [9] 王军辉, 陶连金, 韩焯等. 悬挂式帷幕入土深度对涌水量影响及优化设计 [J]. *北京工业大学学报*, 2015, 41 (9): 1390-1398.
- [10] 张志红, 秦文龙, 张钦喜, 等. 悬挂式止水帷幕基坑控水优化方法 [J]. *东北大学学报 (自然科学版)*, 2021, 42 (2): 242-251.
- [11] 张柳. 止水帷幕在深基坑支护及降水中的作用效果研究 [D]. 济南: 山东大学, 2015.
- [12] SHEN S L, WU Y X, ANIL M. Calculation of head difference at two sides of a cut-off barrier during excavation dewatering [J]. *Computers and Geotechnics*, 2017, 91: 192-202.
- [9] Hoek E. Hoek-Brown failure criterion-2002 edition [J]. *Proceedings of the Fifth North American Rock Mechanics Symposium*, 2002, 1: 18-22.
- [10] Hoek E, Brown E T. Empirical strength criterion for rock masses [J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1980, 106 (15715): 1013-1035.
- [11] Hoek E. Twenty-third Rankine Lecture: strength of jointed rock masses. [J]. *Geotechnique*, 1983, 33 (3): 187-223.
- [12] 谭文辉, 周汝弟, 王鹏, 等. 岩体宏观力学参数取值的 GSI 和广义 Hoek-Brown 法 [J]. *有色金属 (矿山部分)*, 2002 (4): 16-18+15.
- [13] 巫德斌, 徐卫亚. 岩石边坡力学参数取值的 GSMR 法 [J]. *岩土力学*, 2005 (9): 1421-1426.
- [14] 崔明, 李森. 围岩扰动系数 D 的量化取值 [J]. *中国矿业*, 2015, 24 (10): 123-127.
- [15] 占绍祥, 黄华杰, 舒峥, 等. Hoek-Brown 扰动系数 D 对边坡稳定性的影响 [J]. *长江科学院院报*, 2020, 37 (6): 147-152.
- [16] Sari M. A Simple Approximation to Estimate the Hoek-Brown Parameter ' $m_i$ ' For Intact Rocks [C] // *ISRM International Symposium - EUROCK 2010*. 2010.
- [17] 蒋建兰, 李攀峰. 基于 Hoek-Diederichs 公式的岩体变形模量估算 [J]. *四川地质学报*, 2011, 31 (3): 341-343.
- [18] 任俊, 陈曦, 王冬勇. 基于 Hoek-Brown 准则的强度折减法及进展 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2016, 36 (4): 664-671.

(上接第 12 页)