

# 基于正态分布的一种岩石(岩块)弹性纵波速度取值方法

洪明宏,张军鹏,左国青

(中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司,长沙 410014)

**摘要:**新鲜完整岩石(岩块)波速( $V_{pr}$ )是计算岩体完整性系数的重要参数,岩石弹性纵波速度取值对岩体完整性评判具有重要作用,但其取值具有较强人为随意性的缺点,对同一类型岩石原位测试进行统计分析,得到了岩石弹性纵波速度分布的概率分布模型。通过不同概率保证率,可以利用概率分布模型得到完整岩体波速的上限值,得到岩石弹性纵波速度参数取值范围。以某抽水蓄能电站中花岗岩试验数据为例,通过实际工程算例表明,所提出的基于正态分布的岩体弹性波参数取值的方法可为实际工程中确定岩体完整性评价提供参考。

**关键词:**  $V_{pr}$ ; 正态分布; 弹性波; 波速

**中图分类号:** TV221.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2024.03.06

## 0 引言

工程勘测中,岩体的完整程度反映了它的裂隙性,而裂隙性是岩体十分重要的特性,破碎岩石的强度和稳定性较完整岩石大大削弱,尤其对边坡和基坑工程更为突出<sup>[1-2]</sup>。

而判断岩体完整程度,往往需要通过测试波速的方法进行计算,岩石弹性纵波速度  $V_{pr}$  取值(部分规范称为完整岩块压缩波速度)对岩体完整性评判具有重要作用,该参数选取是一个非常复杂的问题,不仅涉及到岩土材料在试验室及试验现场的问题,而且岩土体所处的地质环境以及环境变化都会对参数确定起到较大的影响作用。

目前岩土工程勘察、试验相关规程、规范均要求岩体完整性系数  $K_v$  的计算<sup>[3]</sup>,如:

1) GB50021-2001(2009版)《岩土工程勘察规范》规定,岩体完整性系数  $K_v$  定义为岩体压缩波速度  $V_p$  与岩块压缩波速度之比的平方<sup>[4]</sup>。

2) GB50287-2016《水力发电工程地质勘察规

范》、GB50218-2014《工程岩体分级标准》岩体完整性系数  $K_v$  定义为岩体的纵波速度  $V_{pm}$  与相应岩石的纵波波速  $V_{pr}$  之比的平方<sup>[5-6]</sup>。

3) SL264-2020《水利水电工程岩石试验规程》岩体完整性系数  $K_v$  定义为岩体的纵波速度  $V_{pm}$  与相应岩块的纵波波速  $V_{pr}$  之比的平方<sup>[7]</sup>。

4) SLT291.1-2021《水利水电工程勘探规程第一部分物探》岩体完整性系数  $K_v$  定义为岩体的纵波速度  $V_{pm}$  与新鲜完整岩块的纵波波速  $V_{pr}$  之比的平方<sup>[8]</sup>。

以上规程规范只是说明“应针对不同的工程地质岩组或岩性段,选择有代表性的测段,测试岩体弹性纵波速度,并应在同一岩体中取样,测试岩石弹性纵波速度”,但并未详细说明如何获取具有代表性的岩石(岩块)弹性纵波速度。

在实际勘察工作中,一般工程技术人员获取岩石弹性纵波速度的取值采用以下方法:①现场获取的岩体最大纵波速度作为岩石(岩块)弹性纵波速度计算岩体完整性指数  $K_v$ ;②根据岩性特点采用经验值,缺乏足够的依据;③采用岩石(岩块)完整测段的

波速平均值;④选取岩芯样进行实验室波速测试,但室内测试忽略了工区的应力环境和地质条件;同一岩性不同区域可以取不同  $V_{pr}$  值,理论上,新鲜完整岩块的波速在地应力水平极低、岩样不受损伤的情况下才和原位时一致,因此推荐以原位测试为主。

一个服从正态分布的变量只要知道其均数与标准差就可根据公式估计任意取值范围内频数比例。根据正态分布法,我们可以选取完整性好的测段,进行波速统计分析,根据研究目的和使用要求选定正态分布概率密度函数曲线适当的百分界值,如 80%,90%,95% 和 99%,探索使用正态分布上界值,作为完整性岩石波速取值进行 Kv 计算。

## 1 一维正态分布

设定波速参数的正态分布为一维正态分布,波速  $v$  服从一个位置参数为  $\mu$ 、尺度参数为  $\sigma$  的概率分布,且其概率密度函数为:

$$f(v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(v-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

则波速变量就称为正态随机变量,正态随机变量服从的分布就称为正态分布, $v \sim N(\mu, \sigma^2)$ ,记作  $v$  读作服从  $N(\mu, \sigma^2)$ ,或  $v$  服从正态分布。

正态分布两个参数,即期望(均数) $\mu$  和标准差  $\sigma$ , $\mu$  是服从正态分布的随机变量的均值, $\sigma^2$  是此随机变量的方差,所以正态分布记作  $N(\mu, \sigma^2)$ , $\mu$  是正态分布的位置参数,描述正态分布的集中趋势位置。概率规律为取与  $\mu$  邻近的值的概率大,而取离  $\mu$  越远的值的概率越小。我们把完整岩石波速,进行正态分布统计分析,利用上界值,作为小概率事件,进行完整岩石波速取值<sup>[9-11]</sup>。

## 2 构建样本

笔者通过广西某抽水蓄能电站,选取钻孔完整段 436 个测点波速数据、平洞地震波 39 个波速测试数据,该段数据可以近似认为完整岩体波速“大概率事件”,选取此区间段波速数据构建样本。

### 2.1 统计样本

统计样本的总数、最大、最小值、平均值和标准差,如表 1。

### 2.2 概率模型检验

#### 1) 图形检测

频度分布直方图图形检测,观测分布图钟形对

称,即可认为数据服从正态分布,见图 1。抽样的波速数据频数分布直方图的形状比较接近于倒扣的“钟形”,左右两边具有对称性,可认为该数据为正态分布数据,见图 2。

表 1 波速样本统计

Tab. 1 Wave velocity sample statistics

波速	区域	统计个数	波速均值/ (m/s)	最高波速/ (m/s)	标准差
钻孔声波	地下厂房段	436	5 494	5 950	183
平洞地震波	厂房支洞段	39	5 196	5 450	131

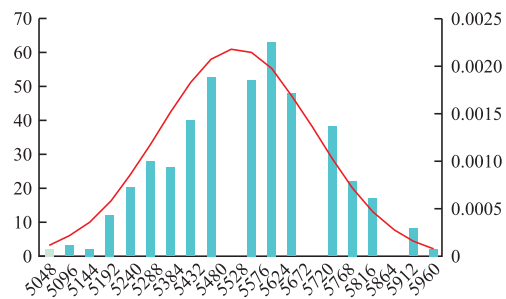


图 1 钻孔波速样本数据正态分布图

Fig. 1 Normal distribution of borehole wave velocity sample data

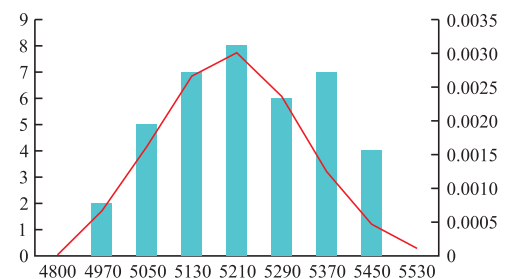


图 2 平洞地震波波速样本数据正态分布图

Fig. 2 Normal distribution map of seismic wave velocity sample data in flat cave

通过 SPSS 软件进行样本分析,Q-Q 图(图 3)反映了变量的实际分布与理论分布的符合程度,若数据服从正态分布,则数据点应与理论直线基本重合。本例中,波速大多数的点能分布在一条直线上,直线趋势明显,可认为该连续数据服从正态分布。

#### 2) 偏度、峰度检测

偏度主要用于判定数据的对称性,整体数据偏左还是偏右,峰度是用于判定数据分布的陡缓程度,SPSS 软件进行样本分析,如表 2。

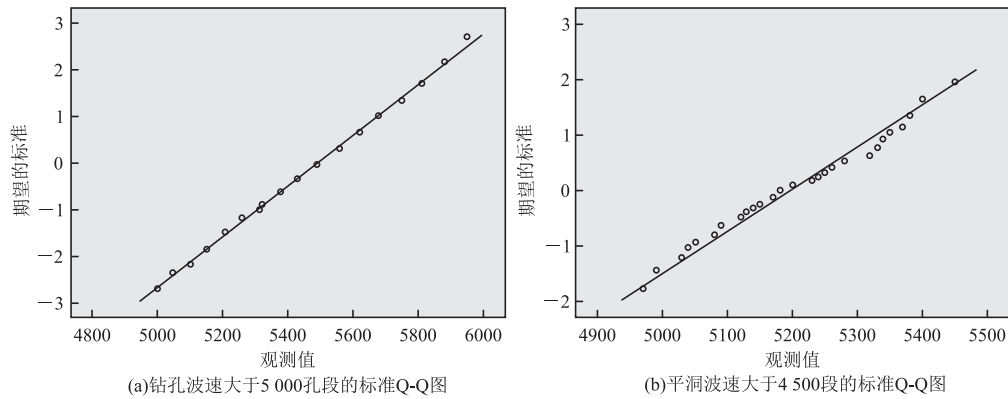


图 3 钻孔波速与平洞地震波波速样本数据标准 Q-Q 图

Fig. 3 Standard Q-Q diagram of borehole wave velocity and seismic wave velocity sample data in flat cave

表 2 描述统计量

Tab. 2 Descriptive statistic

波速	统计个数 N	波速均值/ (m/s)	标准差	偏度		峰度	
				统计量	标准错误	统计量	标准错误
钻孔声波	436	5 494	183	-0.09	0.117	-0.356	0.233
平洞地震波	39	5 196	131	0.044	0.378	-1.009	0.741

钻孔声波偏度系数:

$$Z = \frac{|S-0|}{Sk} = \frac{|-0.09-0|}{0.117} = 0.77 < 1.96 \quad (2)$$

钻孔声波峰度系数:

$$Z = \frac{|K-0|}{Sk} = \frac{|-0.356-0|}{0.233} = 1.53 < 1.96 \quad (3)$$

平洞地震波偏度系数:

$$Z = \frac{|S-0|}{Sk} = \frac{|0.044-0|}{0.378} = 0.12 < 1.96 \quad (4)$$

平洞地震波峰度系数:

$$Z = \frac{|K-0|}{Sk} = \frac{|-1.009-0|}{0.741} = 1.36 < 1.96 \quad (5)$$

由以上结果可知,偏度系数和峰度系数的绝对值均小于 1.96,可以认为该两组样本数据符合正态分布。

### 3)非参数检测

正态性检验属于非参数检验,原假设为“样本来自的总体与正态分布无显著性差异”,只有  $P > 0.05$  才能接受原假设,即数据符合正态分布。

常见的正态性检验有 Kolmogorov-Smirnov 检验(即柯尔莫戈洛夫—斯米诺夫检验,简称 K-S 检验)和 Shapiro-Wilk 检验(即夏皮—威尔克检验,简称 S-W 检验),K-S 检验适用于大样本数据,S-W 检

验适用于小样本数据,当检验结果的  $P$  值小于 0.05,则认为数据不满足正态性。

通常,数据量  $\leq 50$  时,倾向于以夏皮洛—威尔克(S-W)检验结果为准;当数据量  $> 50$  时,倾向于以柯尔莫戈洛夫—斯米诺夫(K-S)检验结果为准;

本例中,钻孔声波样本数量为 436,K-S 检测结果为参考,平洞地震波样本数量为 39,S-W 检测结果为参考,如表 3。

从表 3 中可知,钻孔声波正态性检验结果的统计量为 0.094, $P$  值为 0,小于 0.05。因为样本量较大的时候,检验结果会过于敏感,只要数据略有偏离, $P$  值就会小于 0.05,检验结果倾向于拒绝原假设,认为数据不服从正态分布,但结合直方图、P-P、Q-Q 图,可以认为钻孔波速样本数据来自的总体也是服从正态分布。

表 4 中可知,平洞地震波正态性检验结果的统计量为 0.968, $P$  值为 0.328,大于 0.05,同时结合直方图和 Q-Q 图,可认为平洞波速样本服从正态分布。

表 3 正态性检验

Tab. 3 Normality test

	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
	统计量	df	p	统计量	df	p
钻孔声波	0.094	436	0.000	—	—	—
平洞地震波	—	—	—	0.968	39	0.328

表 4 钻孔声波、平洞地震波完整岩体波速概率模型统计  
Tab. 4 Probabilistic model statistics of borehole sound wave and wave velocity in intact rock mass

部位	分布形式	特征值		概率模型
		均值	标准差	
钻孔声波	正态	5 494	183	$f(v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(v-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$
平洞地震波	正态	5 196	131	

### 3 岩石波速确定

对完整岩石波速样本,进行正态分布统计分析,高波速作为小概率事件,进行完整岩石波速取值,根据研究目的和使用要求选定适当的百分界值,如 90%,95%和 99%,探索使用正态分布上界值,作为完整性岩石波速取值进行 Kv 计算。

在得到岩体波速服从正态分布的基础上,可以确定给定概率保证率下的岩体波速参数取值范围,对于正态分布来说,在其概率分布密度函数确定后,当确定了其相应的概率保证率后,可以确定在不同区域、环境且给定概率保证率下的波速上限值,也就确定了完整岩石(岩块)波速 Vpr 取值。

所以确定波速的极值分布,特别是极值分布的尾部,是非常有必要的,基于上述原因,研究随机波速的极值响应估计问题,具有非常重要的工程价值。

#### 3.1 取值步骤

1)通过孔壁成像、岩心编录选取测段,随机抽取岩体完整性好的测段进行波速采样,控制测量误差,获取完整性好的波速样本数据;

2)样本数据进行统计分析,要求近似正态分布,选定适当的百分比,95%为例;

3)正态分布中,波速过高、过低都认为是异常值,但高波速,恰恰是完整性岩石波速的指标,正态分布法求取 95%参考值范围,  $\bar{v} \pm 1.96\sigma$ , 选用正态分布单侧上界,即  $\bar{v} + 1.96\sigma$ , 正态分布法求取上界 2.5%参考值范围,以该界限作为完整岩石(岩块)波速取值。

表 6 某钻孔不同 Vpr 波速完整性统计

Tab. 6 Integrity statistics of different Vpr wave velocities in a borehole

Vpmin	Vpmax	Vpave	Kvmin	Kvmax	Kvave	破碎	较破碎	完整性差	较完整	完整	Vpr
3 250	6 020	5 360	0.29	1.00	0.80	0.00%	0.09%	1.72%	22.38%	75.81%	6 000
3 250	6 020	5 360	0.29	1.00	0.80	0.00%	0.09%	1.08%	8.50%	90.33%	5 850
							0.05%	0.77%	3.16%	96.02%	5 580

#### 参考文献:

[1] 段世委,许仙娥. 岩体完整性系数确定及应用中的几个

### 3.2 工程案例

以 2.1 节的工程数据为例,统计符合正态分布的样本的总数、最大、最小值、平均值和标准差,如表 5。

表 5 波速样本统计

Tab. 5 Wave velocity sample statistics

波速	统计个数	波速均值/(m/s)	标准差
钻孔声波	436	5 494	183
平洞地震波	39	5 196	131

则钻孔声波获取的岩石(岩块)波速取值为

$$V_{pr\text{ 声波}} = \bar{v} + 1.96\sigma = 5\,494 + 1.96 \times 183 \approx 5\,850 \text{ m/s} \quad (6)$$

则平洞地震波波获取的岩石(岩块)波速取值为

$$V_{pr\text{ 地震波}} = \bar{v} + 1.96\sigma = 5\,196 + 1.96 \times 131 \approx 5\,450 \text{ m/s} \quad (7)$$

无依据可以遵循,地球物理波速测井中,该工程引用花岗岩经验参数,选取 6 000 m/s 作为岩石(岩块)波速,室内岩芯测试试验获取 Vpr 为 5 580 m/s,某钻孔统计数据如表 6:

表中可以看出,该钻孔整体完整性好,经验参数取值的 Vpr 与我们采用正态分布概率分布法求取的 Vpr 计算得到的完整性分布统计结果中,对较完整和完整岩体分布还是存在较大差异的,结合钻孔全景数字成像分析,证明该方法更加切合实际。

### 4 结论

1)相对于传统的完整岩石(岩块)纵波波速取值,笔者提出基于正态分布岩石弹性波速的取值试验方法,即利用较少的完整岩体波速样本数量,可准确地估计非线性极值响应的尾部小概率波速分布,工程实践证明该方法切实可行。

2)通过建立合适的概率模型并绘制出概率曲线,取曲线上界所对应的数值为符合已知样本集统计规律的优势方向更为合理。

问题探讨[J]. 工程地质学报, 2013, 21(4): 548—553.  
DUAN S W, XU X E. Discussion of problems in calculation and application of rock mass integrity coefficient[J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21

- (4): 548—553. (In Chinese)
- [2] 侯兴民,孙蒙,张一林. 振动法与超声波法测试岩块纵波波速的实测对比研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(9): 264—269.  
HOU X M, SUN M, ZHANG Y L. Comparison between vibration method and ultrasonic method in measuring longitudinal wave velocity of rock block[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(9): 264—269. (In Chinese)
- [3] 李广场. 新鲜完整岩块波速的取值及应用[J]. 水利规划与设计, 2014(2): 84—88.  
LI G C. Value and application of wave velocity of fresh intact rock block[J]. Water Resources Planning and Design, 2014(2): 84—88. (In Chinese)
- [4] 中华人民共和国建设部. 岩土工程勘察规范: GB 50021—2001[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004. Ministry of Construction of the People's Republic of China. code for investigation of geotechnical engineering: GB 50021—2001[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004. (In Chinese)
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 工程岩体分级标准: GB/T 50218—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for engineering classification of rock mass; GB/T 50218—2014[S]. Beijing: China Planning Press, 2015. (In Chinese)
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 水力发电工程地质勘察规范: GB 50287—2016[S]. 北京: 中国计划出版社, 2017. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. code for hydropower engineering geological investigation; GB 50287—2016[S]. Beijing: China Planning Press, 2017. (In Chinese)
- [7] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程岩石试验规程: SL/T 264—2020[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020. Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Rock test code for water conservancy and hydropower engineering: SL/T 264—2020[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2020. (In Chinese)
- [8] SLT291. 1—2021 水利水电工程勘探规程 第一部分物探[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2021. SLT291. 1—2021 Exploration Rules for Water Conservancy and hydropower engineering Part I Geophysical Exploration [S]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2021. (In Chinese)
- [9] 梁德旺,张世英. 脉动压力为正态分布时瞬时畸变的随机统计特性及其最大值的预估[J]. 航空学报, 1990, 11(4): 195—198. LIANG D W, ZHANG S Y. The statistical properties and maximum value of instantaneous distortion caused by Gaussian fluctuating pressure[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1990, 11(4): 195—198. (In Chinese)
- [10] 王宇龙,赵宇飞,张宏涛,等. 基于二维正态分布的岩体抗剪强度参数取值范围确定[J]. 水利水电技术, 2017, 48(2): 74—78. WANG Y L, ZHAO Y F, ZHANG H T, et al. 2-D normal distribution-based study on parameter selecting range for shear strength of rock mass[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(2): 74—78. (In Chinese)
- [11] 刘海涛,吴蒙蒙,李振龙,等. 基于岩体波速正态分布拟合的岩体质量分级[J]. 人民长江, 2018, 49(增刊 2): 251—254. LIU H T, WU M M, LI Z L, et al. Gradation of rock quality based on rock wave velocity fitted by normal distribution[J]. Yangtze River, 2018, 49(Suppl 2): 251—254. (In Chinese)

## Value of elastic compressive wave velocity of rock (rock block) based on normal distribution

HONG Minghong, ZHANG Junpeng, ZUO Guoqing

(Powerchina zhongnan engineering corporation limited, Changsha 410014, China)

**Abstract:** The wave velocity ( $V_{pr}$ ) of fresh intact rock (rock block) is an important parameter for calculating the integrity coefficient of rock mass. The value of the elastic compressive wave velocity of rock mass plays an important role in the evaluation of the integrity of rock mass, but its value has the disadvantage of strong randomness. The probability distribution model of the elastic longitudinal wave velocity distribution of rock mass is obtained through statistical analysis of the original test of the same type of rock. Through different probability assurance rates, the upper limit value of the wave velocity of the complete rock mass can be obtained by using the probability distribution model, and the value range of the elastic longitudinal wave velocity parameter of the rock can be obtained. Taking the test data of granite in a pumped storage power station as an example, the practical engineering example shows that the proposed method based on the normal distribution of elastic wave parameters of rock mass can provide a reference for determining the integrity evaluation of rock mass in practical engineering.

**Keywords:**  $V_{pr}$ ; normal distribution; elastic wave; wave velocity