

砂砾岩点荷载强度与单轴抗压强度关系

陈玉良*, 张亚, 林亮

(江西省核工业地质局 二六一大队, 江西 南昌 330013)

摘要:针对九江地区砂砾岩呈现岩芯破碎,多呈碎块状,少量呈短柱状、块状等问题,造成现阶段岩样品不具有代表性,制样极其困难.因此,分析并试验九江地区砂砾岩具有重要的意义.点荷载试验是一种快速确定岩石单轴抗压强度的方法,在工程现场得到了广泛的研究及应用.然而,点荷载强度指标和单轴抗压强度之间的变换关系式存在较大的不确定性.本文以九江地区砂砾岩点荷载测定数据为基础,分析了不规则点荷载强度指标 I_s 和点荷载强度标准值 $I_{s(50)}$ 之间的变化情况,得到了4组点荷载强度标准值 $I_{s(50)}$,并对不同的点荷载强度标准值与砂砾岩单轴抗压强度进行线性拟合与非线性拟合.最后确定了九江地区砂砾岩单轴抗压强度和点荷载强度标准值之间的最佳关系.

关键词:砂砾岩;点荷载试验;单轴抗压强度;非线性拟合

中图分类号:TD131 文献标志码:A 文章编号:1672-9102(2020)04-0067-07

The Relationship Between Point Load Strength and Uniaxial Compressive Strength of Glutenite

Chen Yuliang, Zhang Ya, Lin Liang

(No. 261 Team, Jiangxi Nuclear Industry Geology Bureau, Nanchang 330013, China)

Abstract: The glutenite core is broken, mostly in the shape of fragments, and a small amount is in the shape of short columns and blocks in Jiujiang. As a result, the rock samples are not representative and the sample preparation is extremely difficult at this stage. Therefore, the analysis and test of glutenite in Jiujiang area is of great significance. Point load test is a method to quickly determine the uniaxial compressive strength of rock, and it has been widely studied and applied in engineering sites. However, the transformation relationship between the point load strength index and the uniaxial compressive strength has greater uncertainty. Based on the point load measurement data of glutenite in Jiujiang, this paper analyzes the changes between the irregular point load strength index I_s and the point load strength standard value $I_{s(50)}$, and obtains the point load strength standard value $I_{s(50)}$ by four sets of methods. Then, the different point load strength standard value and the uniaxial compressive strength of glutenite for linear fitting and nonlinear fitting are discussed in detail. Finally, the most optimal relationship between the uniaxial compressive strength and the point load strength standard value of glutenite in Jiujiang is determined.

Keywords: glutenite; point load test; uniaxial compressive strength; nonlinear fitting

单轴抗压强度是岩石的最基本的力学参数之一,对于岩石的分类及质量评价具有重要的影响.目前,测定单轴抗压强度一般方法是标准单轴抗压强度试验,但其试件制作工序复杂,试验周期长,成本较高,且难以满足工程现场对岩石强度特性的要求等^[1].为了克服标准单轴抗压强度试验存在的局限性,大量研究表明,采用点荷载试验方法测定岩石单轴抗压强度时,其试件操作要求低,在工程现场能够快速有效地测

定岩石的抗压强度且成本低^[2,3].点荷载试验能够对不规范的或难以制成标准试件的岩石,快速准确地得到其单轴抗压强度,因此,近年来点荷载试验在岩体质量分级与工程设计中得到了广泛的研究及应用.然而,国内外相关文献[4-7]发现,如果所有岩石的强度测定使用相同关系式进行转换计算,在实际的岩体工程应用过程中将会产生较大误差,导致对岩石的分析检测度不够准确.

20世纪70年代Broch等^[8]提出了岩石单轴抗压强度与其点荷载强度指数表现为一定关系.1985年国际岩石力学学会建立了ISRM方法,清楚地表明了岩石单轴抗压强度是岩石点荷载强度标准值的20~25倍^[9].近年来,许多国内外研究人员就岩石的点荷载强度与单轴抗压强度的关系进行了大量的研究.Quana^[10],Akram^[11]等发现岩石单轴抗压强度与其点荷载强度呈现简单的线性关系;Santi P M^[12],Kahraman S^[13]等得出岩石单轴抗压强度与其点荷载强度标准值呈现幂函数关系;Diamantis K^[14]等得到两者表现指数函数关系;Kilic A^[15]等分析其呈现对数函数关系;张建明等^[16]又表明它们呈现二次函数关系.然而,岩石的点荷载试验强度与单轴抗压强度转化的关系式不同,将导致很大的测定误差.此外,不同岩石类型以及岩石所在地区不同,都会影响岩石的强度,例如地区的地质构造、温度及风化程度等因素的影响^[17].

九江地区的砂砾岩,其砾石含量小于5%,其性质属于含砂砾岩,广泛分布于九江地区.此砂砾岩呈现岩芯破碎,多为碎块状,造成现阶段岩样品不具有代表性,制样极其困难.因此,本文采用点荷载试验的方法测定九江地区砂砾岩的单轴抗压强度,考虑不同地区岩石的点荷载强度指标与单轴抗压强度的关系具有不确定性,如修正系数、点荷载强度标准值等,我们通过对九江多个地区的砂砾岩取样进行点荷载和单轴抗压强度试验,并利用线性函数与一般的非线性函数拟合,确定了九江地区砂砾岩点荷载强度和单轴抗压强度的最佳关系式,这将对九江的砂砾岩及生态环境建设具有重大意义.

1 点荷载试验分析

1.1 仪器与岩样

本次试验采用的点荷载试验仪器为HKDZ-3型点荷载试验仪(绍兴市上虞华达土工仪器厂),如图1a所示.点荷载试验仪器的力传感器最大量程100 kN,精度达到0.001 k,外形尺寸250 mm×280 mm×700 mm;试样量程为5~120 mm;千斤顶最大工作压力100 MPa.试验时将待测岩样(九江砂砾岩如图1b所示)放在样品台,操作千斤顶对岩样施加集中荷载至岩样破坏,最后通过峰值压力得到相应的砂砾岩点荷载强度.选取九江地区具有代表性的15个地点砂砾岩为岩样,且每个地点取样20次进行试验,求其平均值.室内试验是基于《工程岩体试验方法标准(GB/T 50266—2013)》^[18]规定,对标准岩样(Φ50 mm×100 mm)在干燥、饱水状态下测试单轴抗压强度.

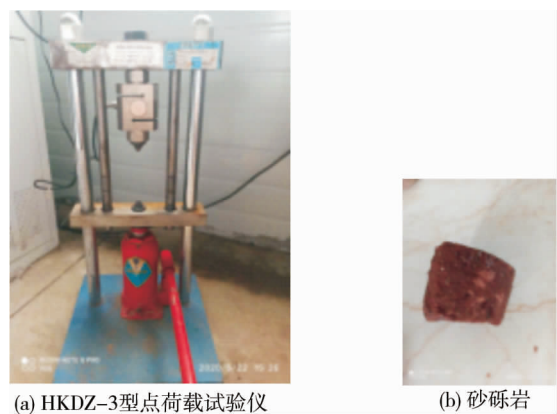


图1 试验仪器与砂砾岩样品

1.2 标准点荷载强度的测定

Broch等^[8]把圆柱状试样沿着直径方向破坏成理想化平面,将其视为基本模型,提出了点荷载强度标准值 $I_{s(50)}$ 的计算公式,如式(1)所示.

$$I_{s(50)} = FI_s \quad (1)$$

式中: F 为岩石点荷载强度标准值与不规则点荷载强度指标的修正系数; I_s 为不规则点荷载强度指标,它与破坏荷载强度 P 和岩心等价直径 D 有关,如式(2)所示.

$$I_s = P/D^2 \quad (2)$$

岩心等价直径由岩样通过加载点最小截面的平均宽度与加载点间距决定,如式(3)所示.

$$D^2 = 4Wd/\pi. \quad (3)$$

式中: W 为通过加载点最小截面的平均宽度, mm; d 为加载点间距, mm.

在工程上确定岩样 ($\Phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$) 径向试验点荷载强度值为其点荷载强度标准值 $I_{s(50)}$. 岩石点荷载强度标准值 $I_{s(50)}$ 与不规则点荷载强度指标 I_s 存在一个修正关系, 修正系数 F 与岩心等价直径和修正指数有关^[19,20], 如式(4)所示.

$$F = (D/50)^m. \quad (4)$$

式中: m 为修正指数, 岩石规则时取 0.5, 不规则时取 0.45.

蔡美峰^[21] 又指出修正系数与加载间距有关, 加载间距 $d < 55 \text{ mm}$ 与 $d \geq 55 \text{ mm}$ 时, 修正系数采用不同的计算公式, 如式(5)所示.

$$\begin{cases} F = 0.2717 + 0.01457d, d < 55 \text{ mm}; \\ F = 0.754 + 0.0058d, d \geq 55 \text{ mm}. \end{cases} \quad (5)$$

还有部分研究人员^[22,23] 采用式(6)表示岩石点荷载强度标准值 $I_{s(50)}$ 与不规则点荷载强度指标 I_s 的关系, 也有利用不规则点荷载强度平均值等于其点荷载强度标准值的计算方法.

$$\lg I_{s(50)} = 0.256 + \lg I_s - 1.008e^{-0.027D}. \quad (6)$$

1.3 室内单轴抗压强度的测定

室内单轴抗压强度的测定是基于《工程岩体试验方法标准 (GB/T 50266—2013)》的规定, 在干燥、饱水状态下进行单轴抗压强度试验. 利用 HKDZ-3 型点荷载试验仪测定直径 50 mm、高度 100 mm 的不同区域标准砂砾岩. 单轴抗压强度

$$U = P/A. \quad (7)$$

式中: P 为岩样破坏荷载, kN; A 为试件承压面积, mm^2 .

2 实验结果与分析

2.1 点荷载强度指标 I_s

本次试验样品是 15 组九江不同区域的砂砾岩. 我们把采用式(4)与式(5)求得的修正系数分别记为 F_1 和 F_2 , 且对应的点荷载强度标准值分别记为 $I_{s(50)1}$ 和 $I_{s(50)2}$, 根据式(6)计算得出的点荷载强度标准值记为 $I_{s(50)3}$, 将采用不规则点荷载强度平均值得到的点荷载强度标准值记为 $I_{s(50)4}$. 利用点荷载试验仪测定九江地区砂砾岩的单轴抗压强度, 通过试验及计算得到的各项数据见表 1. 由表 1 发现点荷载强度指标 I_s 为 0.42~0.85 MPa, 表明砂砾岩点荷载强度指标值相差较大, 说明同种岩石在不同地区, 其分化程度等环境因素对其点荷载强度指标具有较大的影响.

表 1 九江不同区域砂砾岩的点荷载强度指标、修正系数、点荷载强度标准值及单轴抗压强度试验数据

组号	I_s/MPa	F_1	F_2	$I_{s(50)1}/\text{MPa}$	$I_{s(50)2}/\text{MPa}$	$I_{s(50)3}/\text{MPa}$	$I_{s(50)4}/\text{MPa}$	U/MPa
1	0.47	1.04	1.07	0.49	0.50	0.50	0.47	6.12
2	0.78	0.95	0.93	0.74	0.72	0.70	0.78	8.32
3	0.59	1.00	0.99	0.59	0.59	0.58	0.59	7.04
4	0.85	0.86	0.79	0.74	0.68	0.64	0.85	7.41
5	0.71	0.94	0.90	0.66	0.64	0.62	0.71	6.75
6	0.54	0.98	0.98	0.53	0.52	0.52	0.54	7.22
7	0.66	0.97	0.95	0.64	0.63	0.61	0.66	7.19
8	0.50	1.02	1.03	0.51	0.52	0.51	0.50	5.92
9	0.62	0.88	0.83	0.55	0.51	0.49	0.62	7.54
10	0.42	0.97	0.95	0.41	0.40	0.40	0.42	4.19
11	0.52	0.95	0.92	0.49	0.48	0.46	0.52	5.86
12	0.56	0.93	0.89	0.52	0.50	0.48	0.56	7.02
13	0.73	0.92	0.87	0.67	0.64	0.62	0.73	7.15
14	0.46	0.96	0.94	0.44	0.43	0.42	0.46	4.05
15	0.45	0.94	0.91	0.42	0.41	0.40	0.45	4.32

2.2 点荷载强度标准值 $I_{s(50)}$

岩石的点荷载强度标准值与修正系数 F 成正相关,由表 1 可看出计算得到的 2 组修正系数相差不大.图 2 为 15 组岩样的 2 组修正系数的变化关系,从图 2 可以看出,整体上修正系数 F_1 略大于 F_2 ;图 3 是 2 种修正系数的具体分布,从图 3 可以看出修正系数 F_1 的值比较集中且残差平方和较小(0.047 48),而修正系数 F_2 的残差平方和是 0.072 11.综合考虑修正系数 F_1 比修正系数 F_2 更为可靠.

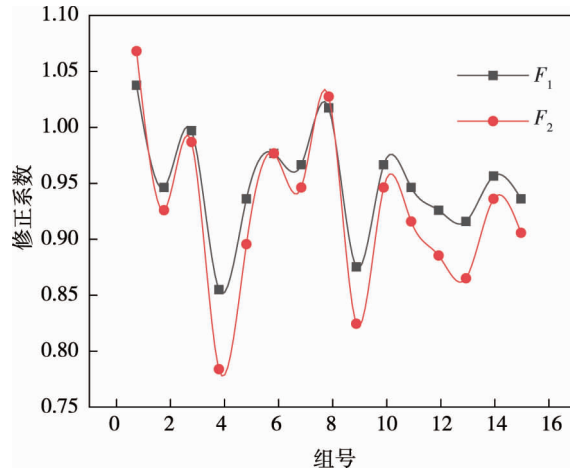


图 2 2 种修正系数 F 的变化

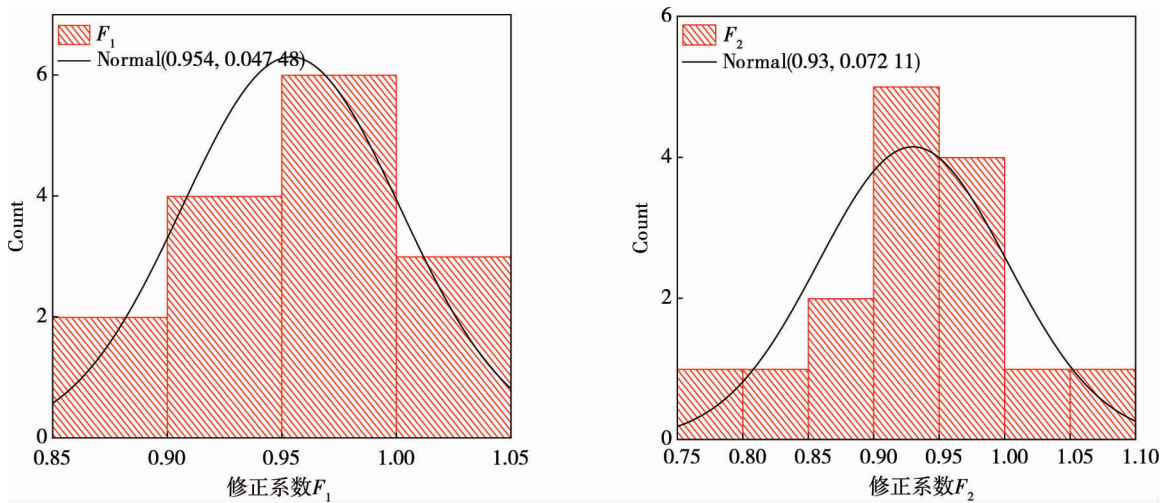


图 3 2 种修正系数 F 的分布

由表 1 可以看出,通过 4 种方法得到的点荷载强度标准值为 0.40~0.85 MPa,而且 4 组数据比较接近,说明这 4 种方法在工程上都适用.其中点荷载强度标准值 $I_{s(50)4}$ 相对于 $I_{s(50)1}, I_{s(50)2}, I_{s(50)3}$ 偏大,这是由于 $I_{s(50)4}$ 的值是直接利用点荷载强度平均值计算得到的,其计算简单方便,可能相对误差较大.

2.3 室内单轴抗压强度

通过试验结果(表 1)发现九江砂砾岩的单轴抗压强度为 4.05~8.32 MPa,说明该地区砂砾岩的单轴抗压强度是有变化的,且随着点荷载强度指标 I_s 的增加,砂砾岩的单轴抗压强度也增加.

2.4 点荷载强度标准值与单轴抗压强度的关系

2.4.1 线性关系

为了确定九江地区砂砾岩点荷载强度标准值与单轴抗压强度之间是否存在一定的关联,利用测得的这 4 组点荷载强度标准值 $I_{s(50)}$ 与单轴抗压强度 U 进行线性拟合,如图 4 所示.从图 4 可以看出,试验测得的点荷载强度标准值在其拟合线上下分布比较散乱,说明线性拟合的拟合优度不高.

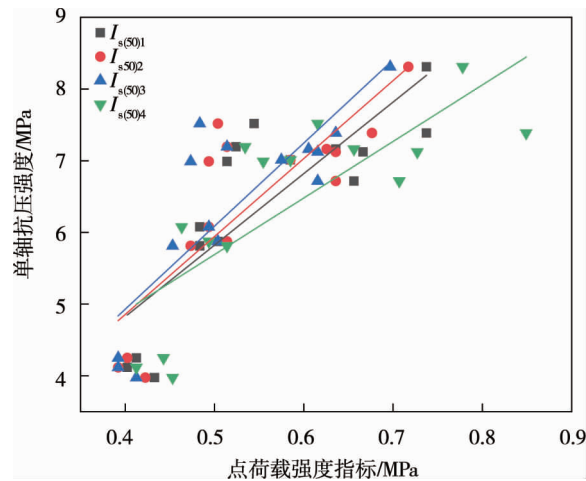


图 4 4 组点荷载强度标准值 $I_{s(50)}$ 与单轴抗压强度 U 的线性拟合

线性拟合参数见表 2.由表 2 可以看出点荷载强度标准值 $I_{s(50)1}$ 与 $I_{s(50)2}$ 单轴抗压强度线性相关性最大,残差最小.而点荷载强度标准值 $I_{s(50)4}$ 与单轴抗压强度线性相关性最小.

表 2 点荷载强度标准值 $I_{s(50)}$ 与单轴抗压强度 U 的线性拟合参数

点荷载强度标准值	拟合优度 R^2	残差平方和
$I_{s(50)1}$	0.684	7.622
$I_{s(50)2}$	0.684	7.630
$I_{s(50)3}$	0.682	7.666
$I_{s(50)4}$	0.612	9.192

2.4.2 非线性关系

通常非线性拟合比简单的线性函数的拟合优度要高.为了进一步研究九江地区砂砾岩点荷载强度标准值与单轴抗压强度之间存在的关联,本文通过 Origin 软件对 4 组点荷载强度标准值与单轴抗压强度分别进行了对数函数、二次函数、指数函数以及幂函数的非线性拟合,如图 5~图 8 所示.从图 5~图 8 中发现这 4 种函数拟合线比线性拟合线的拟合度要相对偏高.可见,九江地区砂砾岩点荷载强度标准值与单轴抗压强度并不是简单的线性关系,而是存在着某种复杂的非线性关系.

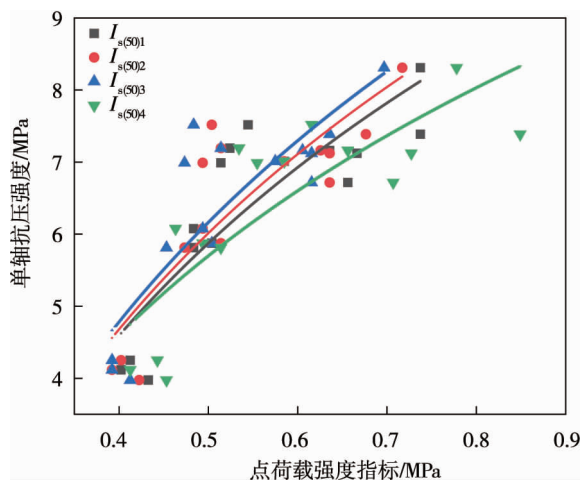


图 5 点荷载标准强度 $I_{s(50)}$ 与单轴抗压强度 U 的对数函数拟合

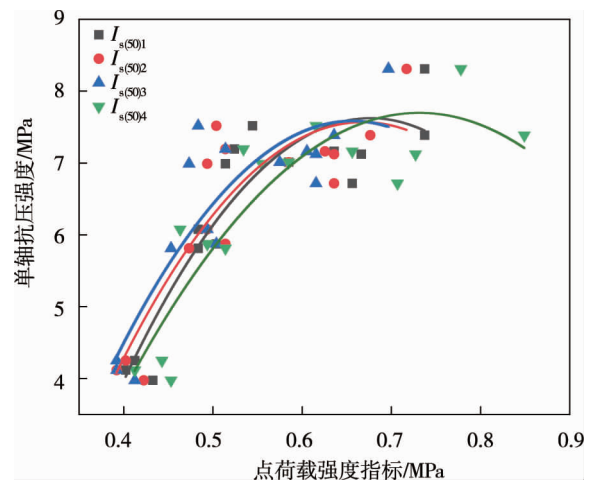


图 6 点荷载标准强度 $I_{s(50)}$ 与单轴抗压强度 U 的二次函数拟合

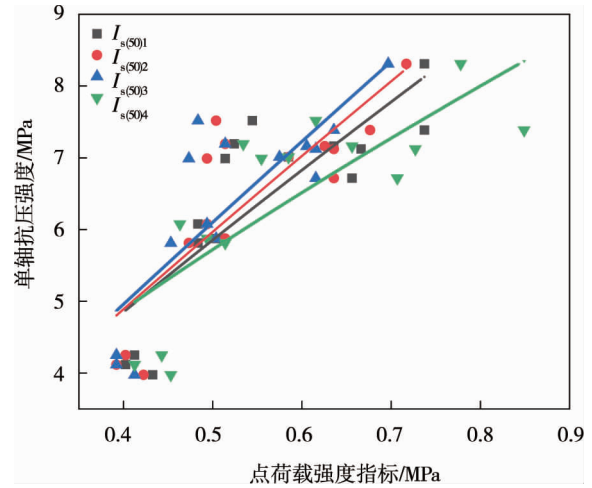
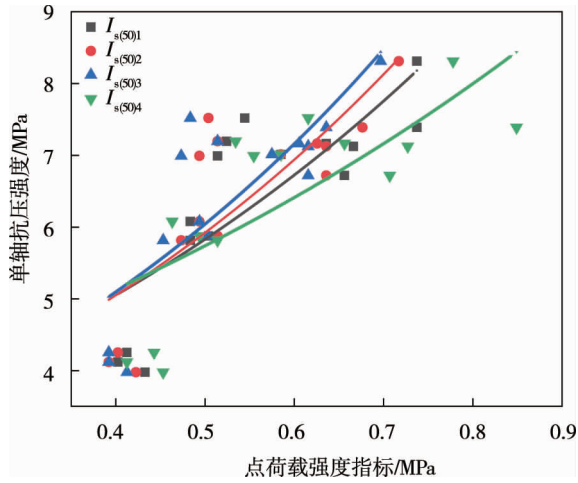


图7 点荷载标准强度 $I_{s(50)}$ 与单轴抗压强度 U 的指数函数拟合 图8 点荷载标准强度 $I_{s(50)}$ 与单轴抗压强度 U 的幂函数拟合

九江地区砂砾岩点荷载强度标准值与单轴抗压强度的对数函数、二次函数、指数函数和幂函数拟合的拟合优度 R^2 见表3.其中幂函数拟合优度为0.636~0.692,这与线性拟合的 R^2 值比较接近,且拟合度还是不够;二次函数拟合优度比其他3种非线性函数的都高,最高的 R^2 值为0.832.然而,对于二次函数,随着横坐标点荷载强度标准值的不断增加,岩石单轴抗压强度将会呈现下降的趋势,这与现场的实际情况不符,这说明二次函数的拟合不符合真实情况;对数函数的拟合优度 R^2 为0.681~0.737,是拟合优度相对较高的.

表3 4种函数拟合的拟合优度 R^2

点荷载强度标准值	对数函数	二次函数	指数函数	幂函数
$I_{s(50)1}$	0.737	0.832	0.639	0.692
$I_{s(50)2}$	0.727	0.783	0.645	0.687
$I_{s(50)3}$	0.720	0.765	0.646	0.684
$I_{s(50)4}$	0.681	0.798	0.573	0.636

从表3还可以看出,4组点荷载标准强度中 $I_{s(50)1}$ 的拟合优度 R^2 最高,说明九江地区砂砾岩点荷载强度标准值 $I_{s(50)1}$ 相对于 $I_{s(50)2}, I_{s(50)3}, I_{s(50)4}$ 对研究砂砾岩点荷载强度标准值与单轴抗压强度之间的关系更具有代表性、准确性.点荷载强度标准值 $I_{s(50)1}$ 是利用修正系数 F_1 得到的.前文分析了修正系数 F_1 比 F_2 的残差平方和更小,更具有准确性.这一结论再次验证了修正系数 F_1 比 F_2 在研究九江砂砾岩的点荷载强度标准值与单轴抗压强度之间的关系中更合适.

根据上述分析可知对数函数拟合度最好,利用 Origin 软件得出点荷载强度标准值 $I_{s(50)1}$ 与单轴抗压强度 U 的具体关系为 $U = 9.893 + 5.837 \ln I_{s(50)}$. 该对数函数是九江砂砾岩单轴抗压强度和点荷载强度标准值最有效的关系式.

3 结论

- 1) 九江地区砂砾岩的点荷载强度指标 I_s 值为0.42~0.85 MPa.
- 2) 4组点荷载强度标准值比较接近且在工程上都适用,其中点荷载强度标准值 $I_{s(50)1}$ 最合适.
- 3) 九江地区砂砾岩单轴抗压强度与点荷载强度标准值的最有效关系为 $U = 9.893 + 5.837 \ln I_{s(50)}$.

参考文献:

[1] 李鸿鹏,吴义阳,葛成,等.大理岩点荷载强度与抗压和抗拉强度的关系[J].科学技术与工程,2019,19(32):294-299.

- [2] Azimian A, Ajalloeian R, Fatehi L. An Empirical Correlation of Uniaxial Compressive Strength with P-wave Velocity and Point Load Strength Index on Marly Rocks Using Statistical Method[J]. *Geotech Geol Eng*, 2014, 32(1): 205-214.
- [3] Karakul H. Investigation of saturation effect on the relationship between compressive strength and Schmidt hammer rebound[J]. *Bulletin of Engineering Geology & the Environment*, 2017, 76(3): 1143-1152.
- [4] Gunsallus K L, Kulhawy F H. A comparative evaluation of rock strength measures[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1984, 21(5): 233-248.
- [5] Sabatakakis N, Koukis G, Tsiambaos G, et al. Index properties and strength variation controlled by microstructure for sedimentary rocks[J]. *Engineering Geology*, 2008, 97(1/2): 80-90.
- [6] Yilmaz I. A new testing method for indirect determination of the unconfined compressive strength of rocks[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2009, 46(8): 1349-1357.
- [7] Kahraman S. The determination of uniaxial compressive strength from point load strength for pyroclastic rocks[J]. *Engineering Geology*, 2014, 170: 33-42.
- [8] Broch E, Franklin J A. The point-load strength test[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1972, 9(6): 669-676.
- [9] Franklin J A. Suggested method for determining point load strength[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1985, 22(2): 51-60.
- [10] Quane S L, Russell J K. Rock strength as a metric of welding intensity in pyroclastic deposits[J]. *European Journal of Mineralogy*, 2003, 15(5): 855-864.
- [11] Akram M, Bakar M Z A. Correlation between uniaxial compressive strength and point load index for salt-range rocks[J]. *Pakistan Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2007, 1: 1-8.
- [12] Santi P M. Field Methods for Characterizing Weak Rock for Engineering[J]. *Environmental & Engineering Geoscience*, 2006, 12(1): 1-11.
- [13] Diamantis K, Gartzos E, Migiros G. Study on uniaxial compressive strength, point load strength index, dynamic and physical properties of serpentinites from Central Greece: Test results and empirical relations[J]. *Engineering Geology*, 2009, 108(3/4): 199-207.
- [14] Kohno M, Maeda H. Relationship between point load strength index and uniaxial compressive strength of hydrothermally altered soft rocks[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2012, 50: 147-157.
- [15] Kilic A, Teymen A. Determination of mechanical properties of rocks using simple methods[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2008, 67(2): 237.
- [16] 张建明,唐志成,刘泉声.点荷载强度指数估算与岩浆岩的单轴压缩强度的关系[J].*岩土力学*, 2015, 36(2): 595-600.
- [17] Tandon R S, Gupta V. Estimation of strength characteristics of different Himalayan rocks from Schmidt hammer rebound point load index and compressional wave velocity [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2015, 74(2): 521-533.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部.工程岩体试验方法标准: GB/T 50266—2013[S].2013: 19-21.
- [19] Kahraman S. Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2001, 38(7): 981-994.
- [20] Heidari M, Khanlari G R, Kaveh M T, et al. Predicting the Uniaxial Compressive and Tensile Strengths of Gypsum Rock by Point Load Testing[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2012, 45(2): 1131-1135.
- [21] 蔡美峰.岩石力学与工程[M].北京:科学出版社,2006.
- [22] 王茹,唐春安,王述红.岩石点荷载试验若干问题的研究[J].*东北大学学报(自然科学版)*, 2008(1): 130-132.
- [23] 李安平,刘洋树,周明,等.岩石点荷载强度与单轴抗压强度关系研究[J].*有色金属(矿山部分)*, 2014, 66(3): 53-58.