

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2018.05.12

不同试验方式岩石点荷载强度与单轴抗压强度对比分析

陈嘉祺^{1,2}, 魏作安^{1,2}

(1. 重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044;

2. 重庆大学资源及环境科学学院, 重庆 400044)

摘要:对重庆地区常见的砂岩、泥岩和灰岩进行了轴向、径向和不规则体三种试样的点荷载试验及单轴抗压强度试验,将试验所得点荷载强度值和单轴抗压强度值进行对比分析。结果表明:利用点荷载试验可以比较好地获得该地区的砂岩、泥岩和灰岩的单轴抗压强度值。相比于不规则试件,用规则试件进行点荷载试验得到的结果更加准确、可靠,且通过轴向和径向试验获得的强度值基本一致。

关键词:岩石强度;点荷载试验;单轴抗压强度;不规则试件

中图分类号: TU456

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2018)05-0072-06

Comparison of rock strength from different point load tests and the uniaxial compressive strength

CHEN Jiaqi^{1,2}, WEI Zuo'an^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. College of Resources and Environmental Science, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Point load test and uniaxial compressive strength test of three kinds of specimens (i. e. axial, radial and irregular) were carried out to study the values of point load strength ($I_{s(50)}$) and uniaxial compressive strength (UCS). The specimens were made of sandstone, mudstone and limestone that widely distributed in Chongqing. The experimental results show that UCS of sandstone, mudstone and limestone in Chongqing area can be obtained more accurately by $I_{s(50)}$. In addition, compared with the irregular specimens, the $I_{s(50)}$ obtained by the regular specimens are more accurate and reliable, and the strength values obtained through axial and radial tests are basically the same.

Keywords: point load strength; uniaxial compressive strength; conversion formula; irregular specimen

岩石最重要的力学性质之一的单轴抗压强度是确定地基承载力、进行岩体分类的一个必需参数,其值多采用单轴抗压强度试验进行测定。单轴抗压强度试验对试件的尺寸、精度要求严格,试验过程繁琐、耗时且成本较高,基于不同点荷载试验推算岩石单轴抗压强度的试验研究,具有实际意义和工程应用价值。因此,早在 20 世纪 70 年代,国际岩石力学学会便将点荷载测试技术建议为测定岩石强度的推荐方法,并对点荷载测试技术在生产实践中的应用进行了积极地推广。

用岩石点荷载强度推算单轴抗压强度的关键在于两者之间的换算公式,对此,国内外学者进行了广泛研究。D'ANDREA^[1]较早研究了点荷载强度与单轴抗压强度之间换算关系,通过回归分析获得了两种测试强度之间的关系式;BROCH 等^[2]发现岩石单轴抗压强度值与点荷载强度值的换算系数为 24;FRANKLIN^[3]指出,较软和较硬的岩石有不同的换算系数;QUANE 等^[4]对各类岩石测量结果建立了经验关系后发现,对于硬岩和软岩,单轴抗压强度与点荷载强度之间的关系分

收稿日期: 2018-03-19; 修订日期: 2018-04-27

第一作者: 陈嘉祺(1994-),男,云南保山人,硕士,主要研究方向为岩石力学与工程。E-mail: chenjiaqicqu@163.com

别为线性和非线性;GUNSALLUS 等^[5]对来自美国东北部的 8 个岩性相似的志留纪沉积岩单元进行了强度变化比较研究给出了岩石点荷载强度与单轴抗压强度的换算公式为 $USC = 16.5I_{s50} + 51$;HAWKINS^[6]的研究表明,换算系数受到样品形状、尺寸和含水状态的影响,通常情况下,干燥岩石的换算系数往往要比饱和岩石高 50%;PALCHIK 等^[7]的研究表明,多孔白垩岩的单轴抗压强度和点荷载强度之间的比例不是恒定的(范围 8 ~ 18),它受到孔隙率的影响;SABATAKAKIS^[8]等通过试验,对于不同强度的岩石(岩石点荷载强度 ≤ 2.5 MPa, $2 \sim 5$ MPa, ≥ 5 MPa),得到了三个不同的换算系数;向桂馥^[9]在进行了一系列点荷载对比试验后,给出了单轴抗压强度和点荷载强度指数的换算系数为 18 ~ 19;魏克和^[10]通过对花岗岩试验测定得到的换算系数为 19 ~ 21;王雅范等^[11]在对太白金矿、延安大桥等工程中总结了单轴抗压强度和点荷载强度之间的换算系数为 26.4。

以上研究表明,不同地区、不同类型的岩石,点荷载强度与单轴抗压强度之间的换算公式都有所差别。另外,对于点荷载试件(轴向、径向和不规则体)是否会影响点荷载强度方面的研究开展较少。本文选取了重庆地区常见的砂岩、泥岩和灰岩为研究对象,分别进行轴向、径向和不规则试件点荷载试验以及单轴抗压强度试验,建立了重庆地区常见岩石的点荷载强度与单轴抗压强度换算关系式,以及不同试件对它们的影响,成果可供开展相关工作借鉴。

1 试验方法

1.1 试验仪器

点荷载试验使用的仪器为 STDZ-3 型点荷载仪,如图 1 所示,点荷载仪主要分为加荷系统和液晶显示仪两个部分,其中,加荷系统又包括液压千斤顶、承压框架和上下两个压头。该点荷载仪采用卧式结构,方便力的加载,稳定性很好;采用圆筒状的反力架,对中性好,不偏心,结构十分紧固,可用其对强度高、尺寸大的岩芯试样进行测试。

单轴抗压强度试验的仪器(图 2),该试验机主要由控制系统、驱动系统和测量系统三部分组成,能提供的最大载荷为 250 kN。

1.2 试件制备

试验使用的泥岩、砂岩、灰岩岩样分别取自重庆沙坪坝嘉陵江边、石柱县以及万盛南桐煤矿。点荷载径向实验和轴向实验的岩芯试件,直径都在 23.5 ~



图 1 STDZ-3 型点荷载仪

Fig. 1 STDZ-3 Point load tester



图 2 岛津 AG-IS 高精度电子万能材料试验机

Fig. 2 Shimadzu AG-IS high-precision electronic universal testing machine

24 mm,长度与直径之比分别在 1.1 ~ 1.4;不规则块体试件,尺寸在 15 ~ 50 mm,两加载点间距与加载处平均宽度之比为 0.3 ~ 0.5。用于单轴压缩试验的岩样与用于点荷载实验的为同一批次。试件加工为圆柱状,直径宜为 48 ~ 54 mm,试件高度与直径之比宜为 2.0 ~ 2.5^[12]。

1.3 试验方法

1.3.1 点荷载试验

分别开展径向、轴向和不规则块体试验,加载方式如图 3 所示。安装好试件后,用千斤顶加压机杆拧紧千斤顶底部螺丝,对试件进行固定,平稳地施加荷载,使试件在 10 ~ 60 s 内破坏,记录岩石破坏过程中的最大

载荷。

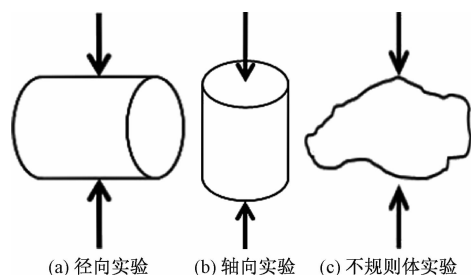


图3 点荷载试验试件加载方式

Fig. 3 Specimen loading method in point load test

1.3.2 单轴抗压强度试验

启动单轴抗压强度实验系统,将岩石试件放置于试验机承压板中心位置,通过试验机右侧的控制面板,调整压头高度,使试件两端面与试验机上下承压板刚好接触;以0.6~1.0 MPa/s的速度对试件施加荷载,直至试件破坏,在此过程中,记录破坏载荷。

1.4 数据处理

1.4.1 点荷载强度计算

先确定岩石的等效岩芯直径 D_e 。径向实验,等效岩芯直径 D_e 的计算为:

$$D_e^2 = D \cdot D' \quad (1)$$

式中: D ——加载点间距/mm;

D' ——上下锥端发生贯入后,试件破坏瞬间加载点间距。

轴向和不规则块体实验,等效岩芯直径的计算公式为:

$$D_e^2 = \frac{4WD'}{\pi} \quad (2)$$

式中: W ——通过两加载点最小截面的宽度或平均宽度/mm。

计算岩石点荷载强度,在没有尺寸修正时,岩石点荷载强度的计算公式为:

$$I_s = \frac{P}{D_e^2} \quad (3)$$

式中: I_s ——未经修正的岩石点荷载强度/MPa;

P ——破坏载荷/N。

当等效岩芯直径不为50 mm,且实验数据较少时岩石点荷载实验强度指数按以下公式进行修正:

$$I_{s(50)} = F \cdot I_s \quad (4)$$

$$F = \left(\frac{D_e}{50}\right)^m \quad (5)$$

式中: $I_{s(50)}$ ——修正后的点荷载强度指数/MPa;

F ——修正系数;

m ——修正指数,可取0.40~0.45,本文中 m 取值为0.45。

1.4.2 单轴抗压强度计算

单轴抗压强度实验后,实验所得到的数据为岩石试件所能承受的最大载荷,即岩石的破坏载荷,其计算公式为:

$$R_c = \frac{P}{A} \quad (6)$$

式中: R_c ——岩石的单轴抗压强度/MPa;

P ——破坏载荷/kN;

A ——岩石试件的截面积/ m^2 。

试件为圆柱体,部分试件的直径为50 mm,但高度不是100 mm,高径比不等于2,由此计算得到的单轴抗压强度值需要进行修正,在相关文献^[15]中提出了一个修正公式效果较好。因此,在本文中选用该式对单轴抗压强度进行修正,即:

$$R_c = R_0 \left(2.0 \cdot \frac{D}{H}\right)^{-0.1712} \quad (7)$$

式中: R_c ——岩石的单轴抗压强度/MPa;

R_0 ——岩石实测的单轴抗压强度/MPa;

D ——岩石试件的直径/m;

H ——岩石试件的高度/m。

1.4.3 用点荷载强度计算单轴抗压强度

《工程岩体分级标准》^[13]中推荐的强度换算公式为:

$$R_c = 22.82 I_{s(50)}^{0.75} \quad (8)$$

式中: R_c ——岩石饱和单轴抗压强度/MPa;

同时,采用点荷载试验转换得到的单轴抗压强度与室内标准岩样的单轴抗压强度参数的相对误差来验证结果的可靠性^[14]。相对误差的定义如下:

$$\delta = \frac{|R'_c - R_c|}{R_c} \times 100\% \quad (9)$$

式中: R'_c ——利用岩石点荷载强度计算得到的饱和单轴抗压强度值;

R_c ——标准试件的单轴抗压强度实际值;

δ ——相对误差。

2 试验结果及分析

2.1 点荷载强度试验

由图4可以看出,分别对砂岩、泥岩和灰岩的轴向、径向和不规则块体试件进行点荷载试验,所得到的点荷载强度均基本满足正态分布规律,可以利用统计学方法对其进行区间估计计算,其结果见表1。

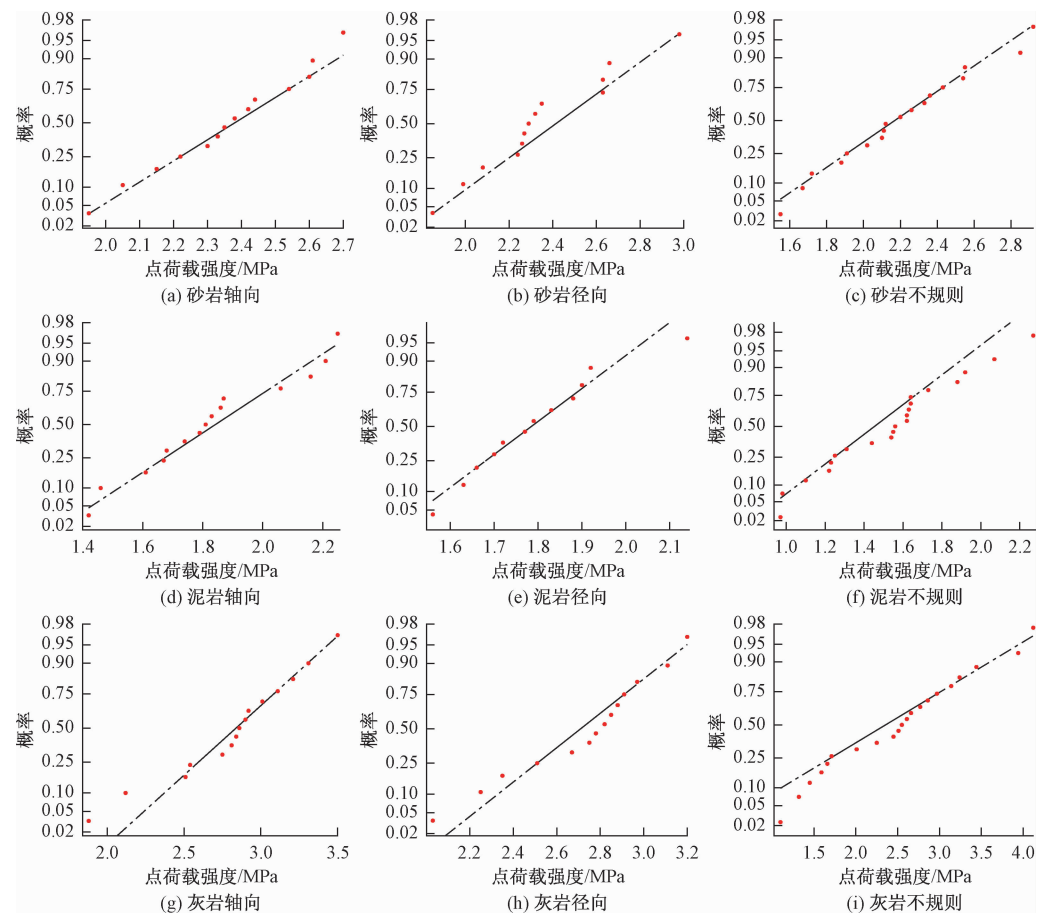


图 4 点荷载强度指标正态频率分布检验图

Fig. 4 Normal frequency distribution test chart of $I_{s(50)}$

表 1 岩石点荷载强度计算结果
Table 1 Calculation results of $I_{s(50)}$

岩性	强度值/ MPa	均值/ MPa	标准差	置信区间/ MPa	离散系数
砂岩	轴向	2.350	0.307	[2.176, 2.524]	0.131
	径向	2.360	0.217	[2.242, 2.478]	0.092
	不规则体	2.196	0.380	[2.015, 2.377]	0.173
泥岩	轴向	1.828	0.253	[1.695, 1.961]	0.138
	径向	1.792	0.157	[1.699, 1.885]	0.088
	不规则体	1.532	0.341	[1.382, 1.682]	0.223
灰岩	轴向	2.818	0.426	[2.595, 3.041]	0.151
	径向	2.720	0.330	[2.541, 2.899]	0.121
	不规则体	2.493	0.834	[2.127, 2.859]	0.334

在 95% 的置信度下,对同种岩石在不同试验方法下得到的点荷载强度值的均值、标准差、置信区间和离散系数比较分析后可知:3 种岩石不规则试件试验结果的离散系数相对于规则试件(轴向、径向)都更大,这表明,在点荷载试验中,岩石试件的形状对点荷载强度值的离散性会产生影响,岩石形状越不规则,离散性也越大;3 种岩石通过径向试验得到的点荷载强度值的离散系数分别为 0.092、0.088 和 0.121,都比轴向和

不规则块体试验得到的结果要小,证明了径向试验所得到的点荷载强度更加稳定;对比 3 种岩石的轴向、不规则体试验得到的点荷载强度值的均值进行对比发现,轴向与径向点荷载试验所得强度值偏差很小,基本保持一致;而不规则体与轴向和径向两种试验的结果都存在一定的偏差。

2.2 单轴抗压强度预测值与实测值的对比分析

由表 2 可以看出,砂岩、泥岩和灰岩通过轴向、径向和不规则块体三种方式的点荷载试验所得到的单轴抗压强度的计算值与室内标准岩石单轴抗压强度试验所得到的单轴抗压强度实测值之间的对误差在 0.1% ~ 14.1%。使用规则的岩样进行试验时,两者之间的误差最大仅为 5.9%。基于以上的测试分析结果,我们得出结论:对于重庆地区常见的岩石,可以使用轴向、径向和不规则体三种点荷载试验方法去获得可靠的岩石单轴抗压强度值。由于不规则体的实验简单、快速、低成本,是获取岩石单轴抗压强度最为简单有效的方法。但不规则岩样获得的结果偏差相对规则

岩样较大。因此,在选取试样时,尽量选择规整的试样进行试验测试。

表 2 单轴抗压强度计算值和实测值及两者的误差

Table 2 Calculated and measured values of uniaxial compressive strength and the error

岩石类型	实验类型	点荷载强度测量值	单轴抗压强度预测值	单轴抗压强度测量值	相对误差
砂岩	轴向	2.350	43.31		5%
	径向	2.360	43.45	45.61	4.7%
	不规则体	2.196	41.16		9.8%
泥岩	轴向	1.828	35.86		1.6%
	径向	1.792	35.34	35.29	0.1%
	不规则体	1.532	31.42		11%
灰岩	轴向	2.818	49.63		5.9%
	径向	2.720	48.33	52.72	8.3%
	不规则体	2.490	45.27		14.1%

表 3 点荷载强度与单轴抗压强度值的对应关系

Table 3 Corresponding relationship between $I_{s(50)}$ and UCS

岩石类型	编号	R_c/MPa	轴向 I_s	径向 I_s	不规则块体 I_s
砂岩	1	46.996	2.563	2.493	2.362
	2	43.825	2.130	2.233	2.048
	3	45.888	2.330	2.366	2.203
	4	45.729	2.380	2.360	2.165
泥岩	5	37.000	1.968	1.893	1.688
	6	32.552	1.643	1.683	1.255
	7	33.931	1.661	1.706	1.418
	8	37.679	1.995	1.883	1.822
灰岩	9	54.793	3.010	2.960	2.804
	10	55.159	3.168	2.903	2.816
	11	47.946	2.500	2.470	2.121
	12	52.978	2.515	2.128	2.482

2.3 强度换算公式建立

通过前面的分析可知,参考《工程岩体分级标准》推荐公式进行点荷载强度与单轴抗压强度换算时,试件是否规则对强度的预测结果影响较大,由此,可认为对于不同的点荷载试验方法,强度换算公式也不一样。将取自同一块岩石的试件所得的点荷载强度与单轴抗压强度值确定为一组数据,共得到 36 组数据(表 3)。根据以上数据,分别对规则试件和不规则试件的点荷载强度与岩石单轴抗压强度进行幂函数拟合,从而得到适用性更强的换算公式(图 5)。

其中,对于使用不规则试件的点荷载试验,点荷载强度与单轴抗压强度的换算公式为:

$$\text{UCS} = 22.72I_{s(50)}^{0.82} \quad (10)$$

$$R^2 = 0.9515$$

对于使用规则试件的点荷载试验,点荷载强度与单轴抗压强度的换算公式为:

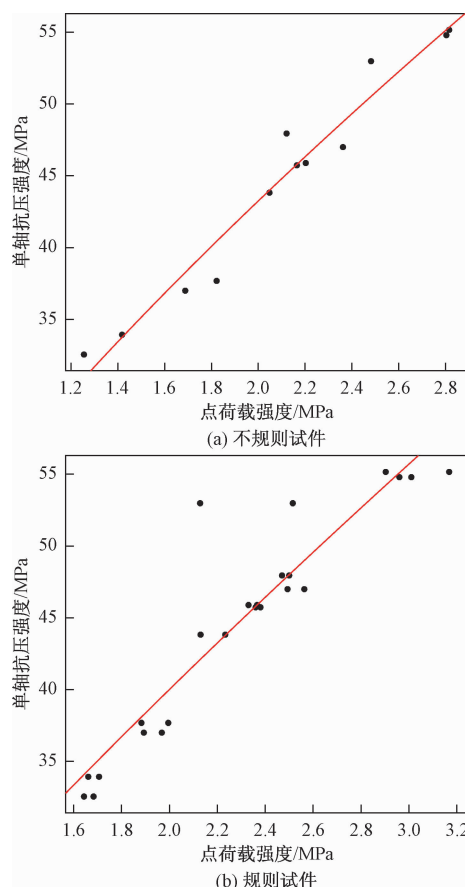


图 5 点荷载强度与单轴抗压强度关系

Fig. 5 Relationship between $I_{s(50)}$ and UCS

$$\text{UCS} = 26.24I_{s(50)}^{0.72} \quad (11)$$

$$R^2 = 0.8571$$

3 结论

通过对重庆地区常见的砂岩、泥岩和灰岩取样进行轴向、径向、不规则体点荷载试验和单轴抗压强度试验,研究基于不同点荷载试验方法推算岩石单轴抗压强度值及强度换算公式的拟合。得出以下结论:

(1) 利用不同试验方法得到的点荷载强度都可以比较准确的推算出重庆地区的砂岩、泥岩和灰岩的单轴抗压强度值,同时,相比于不规则试件,用规则试件进行试验得到的结果更加准确、可靠,且通过轴向和径向试验获得的强度值基本一致。

(2) 参考《工程岩体分级标准》中推荐的强度换算公式,对不同岩石试件得到强度值的适用性有较大差别,当使用规则试件进行试验时,公式的适用性较好,而对于不规则试件适用性则相对较差。

(3) 依据点荷载试验使用的试件形状是否规则,

通过幂函数关系曲线拟合,得到了拟合相关系数更强的强度换算公式:

$$UCS = 26.24I_{S(50)}^{0.72} \text{ (规则试件)}$$

$$UCS = 22.72I_{S(50)}^{0.82} \text{ (不规则试件)}$$

参考文献:

- [1] D'ANDREA D V, FISHER R L, ELSON D E. Prediction of compression strength from other rock properties [J]. Coal Sic Mines Q, 1964, 59 (4B) : 623 - 40.
- [2] BROCH E, FRANKLIN J A. The point-load strength test [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 1972, 9 (6) : 669 - 676.
- [3] FRANKLIN J A. Rock mechanics laboratory testing in the context of a consulting engineering organization [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 1977, 14 (5 - 6) : 93 - 101.
- [4] 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.
- [5] GUNSALLUS K L, KULHAWY F H. A comparative evaluation of rock strength measures [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Science, 1984, 21 (5) : 233 - 248.
- [6] HAWKINS A B. Aspects of rock strength [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 1998, 57 (1) : 17 - 30.
- [7] PALCHIK V, HATZOR Y H. The influence of porosity on tensile and compressive strength of porous chalks [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2004, 37 (4) : 331 - 341.
- [8] 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.
- [9] 向桂馥. 岩石点荷载试验的对比研究 [J]. 水文地质工程地质, 1981, (1) : 45 - 48 + 53.
XIANG Guifu. Comparative study on rock point load test [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1981, (1) : 45 - 48 + 53.
- [10] 魏克和. 用点荷载法对花岗岩风化程度进行定量评价的研究 [J]. 水文地质工程地质, 1982, (2) : 28 - 31.
WEI Kehe. Study on quantitative evaluation of weathering degree of granite by point load method [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1982, (2) : 28 - 31.
- [11] 王雅范, 郭庆国. 岩石点荷载试验方法的究与应用 [J]. 西北水电, 1994, (2) : 47 - 50.
WANG Yayuan, GUO Qingguo. Research and application of rock point load test method [J]. Northwest Hydropower, 1994 (2) : 47 - 50.
- [12] 工程岩体试验方法标准 [S]. GB/T 50266—2013. Standard for tests method of engineering rock mass [S]. GB/T 50266—2013.
- [13] 工程岩体分级标准 [S]. GB/T 50218—2014. Standard for engineering classification of rock mass [S]. GB/T 50218—2014.
- [14] 何晓晴. 岩石“非标准试件”的单轴抗压试验强度换算关系的研究 [J]. 城市建设理论研究: 电子版, 2012, (34) : 33 - 36.
HE xiaoqing. Research on the conversion of strength of uniaxial compression test for rock “Non-standard specimen” [J]. Urban Construction Theory Research, 2012, (34) : 33 - 36.
- [15] 王成春. 不规则岩块点荷载试验抗压强度的取值 [J]. 工程勘察, 2015, 43, (3) : 19 - 22.
WANG Chengchun. Selection of uniaxial compressive strength from point load tests for irregular rock specimens [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2015, 43, (3) : 19 - 22.