

2015-1740DOI: 10.16285/j.rsm.2016.S1.086

针贯入仪在软岩强度测试中的应用

李志刚¹, 徐光黎^{1,2}, 袁 杰¹, 黄 鹏¹, 赵 欣³, 伏永朋³, 苏 昌⁴

(1. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 中国地质大学(武汉)地质调查研究院, 湖北 武汉 430074;
3. 中国地质调查局 武汉地质调查中心, 湖北 武汉 430250; 4. 湖北省地质局水文地质工程地质大队, 湖北 荆州 434020)

摘 要: 软岩强度较低, 结构松散, 难以加工成标准试件测其单轴抗压强度, 为解决这一工程实践难题, 引入了日本的一种通过测试软岩针贯入指标间接推算其抗压强度的试验仪器——针贯入仪。首先简要地介绍了针贯入试验的仪器装置、操作过程、注意事项以及数据处理方法, 然后运用该仪器在现场和室内分别对不同软岩进行强度测试。统计分析测试结果表明, 测试数据离散性大小与岩性均一程度、结构面分布情况密切相关。最后, 选取了一组软岩岩样进行针贯入和点荷载对比试验, 计算得出两种试验结果相差不大。因此, 采用针贯入仪测试软岩强度是合理可行的, 可在软岩工程中推广使用。

关 键 词: 软岩; 针贯入仪; 针贯入试验; 点荷载试验; 单轴抗压强度

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000—7598 (2016) 增 1—0651—08

Application of needle penetrometer to soft rock strength test

LI Zhi-gang¹, XU Guang-li^{1,2}, YUAN Jie¹, HUANG Peng¹, ZHAO Xin³, FU Yong-peng³, SU Chang⁴

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China; 2. Institute of Geological Survey, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China; 3. Geological Survey Center in Wuhan, China Geological Survey, Wuhan Hubei 430250, China;
4. Hubei Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Jingzhou, Hubei 434020, China)

Abstract: How to get the uniaxial compressive strength value of soft rocks is always a problem in engineering because of their low strength, loose structure and difficult processing. Needle penetrometer invented by Japanese, can be used to calculate compressive strength of soft rocks indirectly by testing its needle penetration index (NPI). The paper introduces experimental instrument, operating procedures, announcements and data processing methods of needle penetration test(NPT). Then the strengths of different soft rocks are tested by needle penetrometer in situ and laboratory. According to statistical analysis of test results, the discreteness of sampled value is closely related to rock uniformity and structural discontinuous surface. Finally, contrast methods of NPT and point load test on a set of soft rock samples. It turns out that the results based on these two methods are similar. Therefore, NPT is reasonable and feasible in soft rock strength test and it can be popularized and applied to the soft rock engineering in China.

Keywords: soft rocks; needle penetrometer; needle penetration test(NPT); point load test(PLT); uniaxial compressive strength

1 引 言

单轴抗压强度是岩体分级和岩体特性描述使用最多的性质, 也是岩土工程中不同计算、设计方法中使用的一个重要参数。根据我国相关标准和国际岩石力学学会 (ISRM) 推荐的方法, 单轴抗压强度试验需制备高质量的标准岩样试件, 而制备标准岩样试件需要花费较长时间且测试所需重型试验设备, 使得单轴压缩试验价格昂贵、实施困难。由于规范和推荐方法中固定尺寸的标准试件常无法获

得, 尤其是那些风化程度较深、未完全成岩的软岩, 根本无法用单轴压缩试验来测试强度指标^[1]。

点荷载强度试验 (PLT) 是一种使用较为广泛的强度指标测试方法, 既可以使用规则的岩样也可以使用不规则的岩样, 最后通过点荷载强度指数 IS_{50} 乘以相关因子 k , 推算得出岩石单轴抗压强度、抗拉强度^[2-5]。 K 与岩石类型、风化程度有关, 一般较难准确得出^[6]。另外, 许多自然和人造的历史岩石构造、遗迹或建筑, 对其进行地质工程性质或者修复研究有时可能需要确定强度性质, 由于保护和

收稿日期: 2015-08-03

基金项目: 国家自然科学基金 (No.41472263); 中国地质调查局资助项目 (No. 12120114038701)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41472263) and China Geological Survey (12120114038701).

第一作者简介: 李志刚, 男, 1988 年生, 博士研究生, 主要从事地质灾害防治方面的研究工作。E-mail: lzgdyy@163.com

通讯作者: 徐光黎, 男, 1963 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土力学、地质灾害等方面的教学与研究工作。E-mail: xu1963@cug.edu.cn

其他的一些原因,不允许从这些古老的场地取样^[7],也无法测其强度。

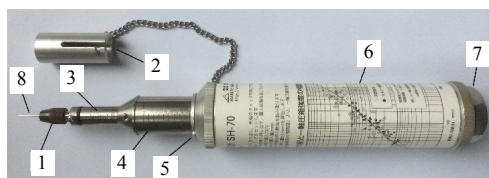
为解决以上存在的这些问题,日本发明了一种便携、无损、专门用来测试软岩强度的仪器——针贯入仪,测试软岩强度的针贯入指标,推算单轴抗压强度。这种试验方法既可以在现场进行,也可以在实验室中进行,无需制备标准岩石试样。目前针贯入试验成为国际岩石力学协会(ISRM)推荐的岩体强度测试方法之一,在日本、土耳其、埃及、印尼等国获得了广泛使用^[8]。我国也是软岩分布较广的国家,越来越多的工程项目遇到了软岩强度测试的问题,本文系统地介绍针贯入仪、针贯入仪在软岩强度测试中的应用以及测试结果及影响测试结果的因素,旨在为我国软岩强度测试引入一种新的方法。

2 针贯入试验

针贯入仪是由日本发明的一种用来测试软岩强度的便携式仪器,其操作简单,经济快捷,已被广泛应用到软岩工程实践中。由于国内目前还没有使用针贯入仪测试软岩强度的先例,也没有相关文献资料,首先简要的介绍针贯入试验仪器装置、操作过程、主要事项以及数据处理方式。

2.1 仪器装置

针贯入仪由按压子(测量贯入力和保护贯入针)、夹头(固定贯入针)、贯入量刻度、贯入力刻度、指示圈(指示贯入力的大小)、针贯入比和单轴抗压强度关系图、后盖(取开后,手握部内装有贯入针)、贯入针等部分组成,如图1所示^[9]。仪器参数:贯入力为10~100 N,最小刻度为10 N;贯入针材质为硬质钢,末端直径为0.84 mm,针长39.5 mm;贯入量为0~10 mm,最小刻度为1 mm;尺寸为最大直径40 mm×全长285 mm;重量约为700 g。



1—夹头 2—按压子 3—贯入量刻度 4—贯入力刻度 5—指示环
6—针贯入比和单轴抗压强度关系图 7—后盖 8—贯入针

图1 针贯入仪

Fig.1 Needle penetrometer and its parts

2.2 操作过程

针贯入仪既可以用于岩石露头的原位测试,也可以用于采集的岩样,无需制备标准试件。针贯入

可以沿任意方向贯入,但所贯入方向岩体厚度必须大于15 mm。选择岩石表面比较平整的部位进行测试,由于所测岩石较软,可使用砂轮或者砂纸将欲测部位磨平,然后按以下步骤进行试验^[10-11]:

① 安针。打开针贯入仪后盖将贯入针取出,将按压子从贯入量刻度部取下来,逆时针缓慢转动夹头螺母、插入贯入针。向顺时针方向转动夹头螺母,转紧,将针固定,再把按压子嵌入贯入量刻度部。

② 端点调整。测试前,需将按压子的端面调整至贯入量刻度的0点处,通过贯入针的进出来调整。再用手使测量贯入力的指示环滑动,使其接触到手握部的下端,此时显示贯入力为0。

③ 贯入及停止贯入。进行贯入试验时,要将按压子垂直地顶在测定处,贯入针的贯入深度达到10 mm后立即停止施加压力,将其慢慢拔出,从贯入力刻度处的指示环的位置,读出贯入力、记录下贯入力和贯入量。如果岩石较硬,贯入针在贯入至10 mm之前。如果贯入力已达到100 N立即停止施加压力,慢慢拔出,从贯入量刻度处的按压子的位置读出贯入深度。记录下贯入力和贯入深度。

2.3 注意事项

(1) 根据文献[8]针贯入仪最佳测试范围为0.5~20 MPa。根据文献[12-14]搜集的数据,针贯入仪尽管可以测试单轴抗压强度高达35 MPa的岩石,但在对硬度较大的岩石进行针贯入试验时,经常会造成贯入针崩断的现象,并且所测数据离散性也会增大。为了获得更准确的结果,在针尖没有受到任何损伤的情况下贯入深度应该不小于1 mm。

(2) 在同一岩石表面需重复测试3~5次,如果所测结果离散性太大,测试次数可以适当增加。为了避免前次测试因扰动岩样而对以后测试产生影响,每次测试的贯入点要与上次测试的贯入点之间保持1 cm以上的距离。

(3) 贯入过程中可能会产生一些裂缝,形成一个放射性的破坏区,拔出针的时候岩样上会留下一个倒置的圆锥小孔,也可能产生一些裂缝。若裂缝是在贯入过程中产生,那么本次测试结果应当被舍弃,无效测试时岩样破坏形式如图2所示。若裂缝是在拔出针的时候产生,本次结果则可以作为有效结果予以保留。另外,在贯入过程中若引起岩样沿着软弱结构面发生拉张劈裂,如沿着层理或片理劈裂,那么此次所测数据应舍弃^[14]。

2.4 数据处理

(1) 针贯入比

通过针贯入试验可以获得软岩针贯入强度指

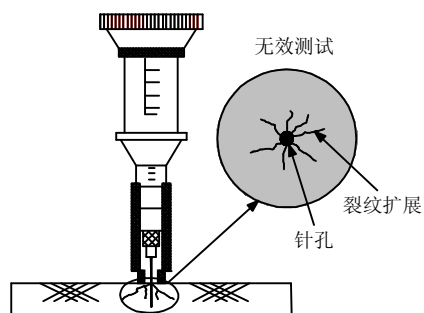


图2 针贯入无效测试岩样破坏示意图

Fig.2 Rock damage sketch of an invalid needle penetration test

标 (NPI 针贯入比)。然后采用经验公式进行单轴抗压强度换算。 NPI 值通过式 (1) 求得^[8]。

$$\left. \begin{array}{l} \text{当 } F = 100 \text{ N, } D \leq 10 \text{ mm 时,} \\ NPI = 100/D \\ \text{当 } D = 10 \text{ mm, } F \leq 100 \text{ N 时,} \\ NPI = F/10 \end{array} \right\} \quad (1)$$

式中： F 为贯入力； D 为贯入深度。 NPI 值一般小于 100 N/mm，大于 1 N/mm，即 $F \leq 100 \text{ N}$ 且 $D \geq 1 \text{ mm}$ 。

(2) 单轴抗压强度换算

单轴抗压强度 R_c 的换算有两种方式，一种是读图法，另一种是回归公式计算法。(1) 读图法：在针贯入仪手柄上有一张针贯入比值和单轴抗压强度关系，如图 3 所示。通过该关系图可快速读出每次所测得的单轴抗压强度值。(2) 公式计算法：日本土木学会通过对大量的试验数据进行统计分析，得出了普遍适用的经验公式 (2)，直接进行单轴抗压强度换算：

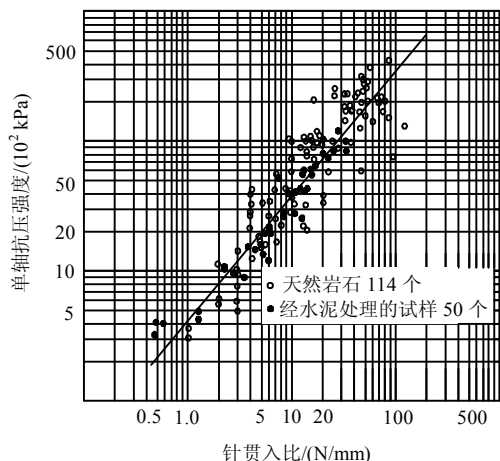


图3 针贯入比与单轴抗压强度关系

Fig.3 Relational graph of NPI and uniaxial compressive strength

$$\lg 10y = 0.978 \lg 10x + 2.621 \quad (2)$$

式中： y 为单轴抗压强度 (MPa)； x 为针贯入度 (N/mm)。

3 针贯入仪在软岩强度测试中的应用研究

鄂西北地处我国地势第二阶梯向第三阶梯过渡带，受区内的两郧大断裂控制，广泛出露区域变质岩，主要岩性有武当山群石英云母片岩和云母片岩，震旦系绿泥片岩、炭质板岩，寒武系千枚岩、炭质板岩、志留系泥质板岩、粉砂质板岩等。该地区岩体岩性和结构特征复杂，风化程度深、节理裂隙发育，片理面间结合力较弱，结构松散，强度较低，属于软变质岩，这类岩石在进行岩样加工时极易沿着片理面断裂，利用单轴压缩试验测试其抗压强度极其困难。为了测试本地区软变质岩强度，也为了探究针贯入仪在软变质岩强度测试中的适用性，选取了典型岩石进行了现场原位测试和室内试验。

3.1 针贯入原位测试

十堰市竹山县城关镇莲花村谷竹高速公路滑坡是一处软变质岩滑坡，滑坡岩性为志留系大贵坪组云母片岩，岩体风化程度深，节理裂隙发育，结构松散破碎。滑坡体岩体呈碎块状、薄片状、薄板状，易捏碎，易折断，易沿片理面掰裂，强度极低。为确定该滑坡云母片岩的强度，在滑坡区选取了基岩露头较平整、代表性良好、性质均一的部位进行原位针贯入测试。测试前用地质锤将露头表面松软部分去除，并将测试部位整平。由于云母片岩片理发育，呈各向异性的性质，强度测试分为垂直片理和平行片理两个方向进行，每个方向贯入 12 次。野外基岩露头原位测试见图 4，云母片岩平行和垂直片理方向针贯入试验测试结果见表 1。



图4 野外基岩露头针贯入原位测试

Fig.4 Application of NPT on a rock exposure in the field

表1 云母片岩针贯入试验结果
Table 1 Test results of NPT on mica schist

序号	针贯入试验						单轴抗压	
	力/N		贯入量/mm		贯入比/(N/mm)		强度/MPa	
	垂直向	水平向	垂直向	水平向	垂直向	水平向	垂直向	水平向
1	81	20	10.0	10.0	8.10	2.00	3.23	0.82
2	84	20	10.0	10.0	8.40	2.00	3.35	0.82
3	55	19	10.0	10.0	5.50	1.90	2.21	0.78
4	65	23	10.0	10.0	6.50	2.30	2.61	0.94
5	57	16	10.0	10.0	5.70	1.60	2.29	0.66
6	67	11	10.0	10.0	6.70	1.10	2.68	0.46
7	61	20	10.0	10.0	6.10	2.00	2.45	0.82
8	68	22	10.0	10.0	6.80	2.20	2.72	0.90
9	58	13	10.0	10.0	5.80	1.30	2.33	0.54
10	62	16	10.0	10.0	6.20	1.60	2.49	0.66
11	68	12	10.0	10.0	6.80	1.20	2.72	0.50
12	66	18	10.0	10.0	6.50	1.80	2.61	0.74
最大值	84	23	10.0	10.0	8.40	2.30	3.35	0.94
最小值	55	11	10.0	10.0	5.50	1.10	2.21	0.46
标准差					0.85	0.38	0.35	0.15
平均值					6.59	1.75	2.65	0.72
变异系数					0.13	0.21	0.13	0.21

针贯入现场原位测试得出云母片岩垂直片理方向的针贯入比均值为 6.59 N/mm, 由式 (2) 推算得出其单轴抗压强度为 2.65 MPa, 平行片理方向的针贯入比均值为 1.75 N/mm, 单轴抗压强度为 0.72 MPa。根据《工程岩体分级标准》^[15]对岩性坚硬程度的划分规定 (见表 2), 强风化云母片岩属于极软岩。

表2 R_c 与定性划分的岩石坚硬程度的对应关系
Table 2 Corresponding relationships between R_c and qualitative classification of rock hard degree

R_c /MPa	坚硬程度	R_c /MPa	坚硬程度
>60	坚硬岩	15~5	软岩
60~30	较坚硬岩	<5	极软岩
30~15	较软岩		

垂直片理面方向的测试数据变异系数为 0.13, 平行片理面方向的为 0.21, 可见垂直片理面方向的测试数据离散性较小, 平行片理面方向的离散性较大。平行片理面方向的测试数据离散性比垂直方向的离散性大, 主要原因是平行片理面方向所测试的表面是岩体断裂面, 岩性不均一, 且表面不平, 呈丝束状; 垂直片理面方向所测试的是表面是岩体的片理面, 片理面一般较平整, 岩性较均一。

在平行片理方向的测试过程中, 由于片理面的存在, 针尖极易插入片理面中, 造成片理面的开裂, 导致无效测试。虽垂直片理面方向也会造成表层岩体开裂, 导致无效测试, 但平行片理面方向产生的

无效测试数据要远远多于垂直片理面方向产生的无效数据, 可见片理面的分布情况也会对针贯入测试产生一定的影响。

3.2 针贯入室内试验

十堰市竹山县上庸镇和官渡镇广泛分布着泥质板岩, 由于岩性较软, 板理面发育, 跨越该岩性分布区的公路边坡失稳滑塌多发。从 S236 省道一边坡垮塌处选取较完整的泥质板岩带回实验室, 切割成表面平整、规则的方块状岩样。对该岩样分别进行垂直板理方向和平行板理方向的针贯入试验, 对于规则岩样, 测试数据离散性一般较小, 每块岩样每个方向可只测试 3 次。针贯入室内试验见图 5, 试验结果见表 3。



图5 针贯入室内试验

Fig.5 NPT on a slate sample in laboratory

表3 泥质板岩针贯入试验结果
Table 3 Results of NPT on slate samples

序号	针贯入试验						单轴抗压	
	力/N		贯入量/mm		贯入比/(N/mm)		强度/MPa	
	垂直向	水平向	垂直向	水平向	垂直向	水平向	垂直向	水平向
1-1	100	100	3.00	6.0	33.33	16.67	12.89	6.55
1-2	100	100	3.00	5.1	33.33	19.61	12.89	7.67
1-3	100	100	2.90	5.6	34.48	17.86	13.33	7.00
2-1	100	100	3.00	6.8	33.33	14.71	12.89	5.79
2-2	100	100	3.00	6.8	33.33	14.71	12.89	5.79
2-3	100	100	2.90	5.6	34.48	17.86	13.33	7.00
3-1	100	100	3.00	7.0	33.33	14.29	12.89	5.63
3-2	100	100	3.00	6.5	33.33	15.38	12.89	6.05
3-3	100	100	2.90	8.0	34.48	12.50	13.33	4.94
最大值	100	100	3.00	8.0	34.48	19.61	13.33	7.67
最小值	100	100	2.90	5.1	33.33	12.50	12.89	4.94
标准差					0.57	2.42	0.22	0.93
平均值					33.72	15.97	13.04	6.28
变异系数					0.02	0.15	0.02	0.15

针贯入室内试验得出泥质板岩垂直片理面方向的针贯入比均值为 33.72 N/mm, 由式 (2) 推算得出其单轴抗压强度为 13.04 MPa, 平行片理面方向的针贯入比均值为 15.97 N/mm, 单轴抗压强度为 6.28 MPa, 据表 2 可知泥质板岩属于软岩。

垂直板理面方向的测试数据变异系数为 0.02, 平行板理面方向的为 0.15, 垂直板理面方向的测试数据离散性极小, 平行板理面方向的离散性稍大。由于所测板岩岩样经过切割和打磨, 岩样表面光滑平整, 性质均一, 平行板理面方向的测试数据离散性较大主要受板理面的影响。当贯入针贯入板理面时, 板理面没有开裂测出的数据是有效的, 这时所测数据通常偏小; 若板理面开裂, 则所测数据无效, 有时还会损坏岩样, 导致岩样沿板理面整体开裂。

对云母片岩和泥质板岩分别进行针贯入现场原位测试和室内试验, 测试数据离散性主要受岩性均一程度、所测岩石表面平整程度以及结构面分布情况的影响, 若岩性均一、表面平整、结构面不影响测试时, 所测数据离散性小, 反之则大。贯入针进入岩石内部直径最大处只有 0.7 mm, 测试面积小, 只能反映所测范围之内岩性所代表的完整岩块的强度, 不能反映受节理、裂隙控制的岩体强度。针贯入试验可测抗压强度为 0.5~20.0 MPa 岩石, 根据表 2 可以测极软岩、软岩和部分较软岩的强度。

4 针贯入与点荷载试验对比分析

变质岩岩石经过不同程度的风化, 岩体破碎、强度较低, 无法加工用来做单轴压缩试验的标准试件, 可以采用点荷载试验测试不规则岩样的方法, 对针贯入试验测试结果的准确性进行对比分析。根据试验及理论研究^[2-5, 16-18], 不同形状的试样在点荷载作用下其加荷轴面上应力状态基本相同, 为不规则试样进行点荷载试验提供了依据, 试验岩样采自十堰市竹山县城关镇莲花村谷竹高速公路滑坡。

4.1 对比试验方案

从滑坡体挑选了 25 块岩性基本相同且较完整的云母片岩岩样进行对比试验。为了增加对比试验的可靠度, 对每一块岩样先进行针贯入试验, 然后再进行点荷载试验。同一岩样针贯入试验进行 6 次, 针贯入和点荷载试验部位如图 6 所示。针贯入点位距岩块边大于 1 cm, 两点间距离也须大于 1 cm。由于贯入针较细, 在岩样上产生的破坏区域较小, 对岩样完整性和强度影响可以忽略不计。若针贯入试验使岩样产生较大的拉裂性破坏, 则该岩样应该舍弃, 不可再做对比试验。

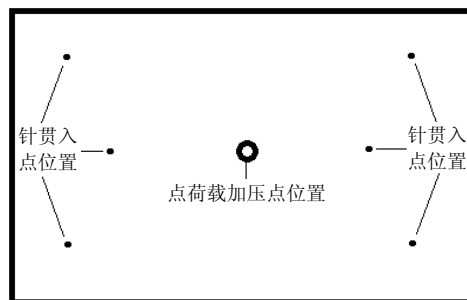


图 6 针贯入试验贯入点和点荷载试验加荷点位置
Fig.6 Schematic illustration of NPT and PLT position

试验过程中部分岩样在点荷载加压破坏之后, 岩块极为破碎, 无法测量其破坏面宽度, 故作为无效试验处理。针贯入和点荷载试验都做成功的岩块剩余 15 块, 符合《工程岩体试验方法标准》^[19]中对点荷载试验不规则岩样数量的要求。

4.2 强度换算公式

针贯入试验选取日本土木学会推荐的经验公式 (3) 进行单轴抗压强度换算, 点荷载试验选取《工程岩体分级标准》^[15]、《工程岩体试验方法标准》^[19]所推荐的经验公式 (3) 进行单轴抗压强度换算。

$$\left. \begin{aligned} I_s &= \frac{p}{D_c^2}; D_c^2 = \frac{4WD}{\pi} \\ I_{s(50)} &= I_s F; F = (D_c / 50)^{0.45} \\ R_c &= 22.82 I_{s(50)}^{0.75} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: I_s 为修正的点荷载强度指数; p 为破坏荷载; D_c 为等效直径; D 为加荷点间距; $I_{s(50)}$ 为标准点荷载强度指数; W 为通过两加荷点最小截面的宽度; F 为修正系数; R_c 为岩石单轴抗压强度。

4.3 试验结果及分析

对 15 块岩样通过针贯入试验得出的针贯入比和抗压强的均值、最值、标准差和变异系数分别进行了统计分析, 结果见表 4。将每一块岩样通过针贯入试验和点荷载试验分别得出的单轴抗压强度结果进行了对比分析, 如表 5、图 7 所示。

15 块岩样测试结果的变异系数在 0.06~0.35 之间, 除岩样 Y-1、Y-3、Y-10、Y-19 的变异系数大于 0.3 外, 其余均不大于 0.25, 测试数据的离散性整体较小。造成单个岩样测试数据的离散性较大的原因除了表面不平、测量误差之外, 主要是岩石矿物组成和排列的不均一性引起的。通过镜下观察, 云母片岩主要组成矿物是云母、石英、长石。石英和长石为粒状矿物强度较高, 云母为片状矿物, 强度较低。岩石矿物排列不均匀, 当贯入点位于云母聚集的地方, 所测强度就较低; 当贯入点位于石英、

表 4 针贯入试验
Table 4 Results of needle penetration test

序号	岩样编号	贯入比 $NPI/(N/mm)$			R_c / MPa				变异系数
		最大	最小	均值	最大	最小	标准差	均值	
1	Y-1	10.00	3.89	6.77	3.97	1.58	0.95	2.71	0.35
2	Y-2	9.80	5.00	6.68	3.90	2.02	0.62	2.68	0.23
3	Y-3	12.00	4.71	7.02	4.75	1.90	0.94	2.81	0.33
4	Y-4	14.06	6.67	9.62	5.54	2.67	0.89	3.82	0.23
5	Y-5	12.50	8.08	10.67	4.94	3.22	0.71	4.23	0.17
6	Y-6	10.53	8.89	9.72	4.18	3.54	0.24	3.86	0.06
7	Y-8	13.33	9.76	10.75	5.26	3.88	0.50	4.26	0.12
8	Y-10	20.00	6.15	13.37	7.82	2.47	1.63	5.27	0.31
9	Y-12	10.53	8.00	9.39	4.18	3.19	0.36	3.73	0.10
10	Y-14	22.22	13.33	18.54	8.67	5.26	1.09	7.26	0.15
11	Y-17	20.00	10.00	13.54	7.82	3.97	1.35	5.34	0.25
12	Y-18	32.50	22.22	25.81	12.58	8.67	1.38	10.04	0.14
13	Y-19	22.00	8.67	13.99	8.59	3.45	1.71	5.51	0.31
14	Y-20	25.00	18.00	21.33	9.73	7.06	1.03	8.33	0.12
15	Y-22	26.00	15.63	18.67	10.11	6.15	1.32	7.31	0.18
平均值				13.06			0.98	5.14	0.20

表 5 点荷载试验与针贯入试验结果

Table 5 Results of uniaxial compressive strength comparison of needle penetration test and point load test

岩样编号	岩样编号	$NPI/(N/mm)$	$R_c(NPT)/MPa$	$R_c(PLT)/MPa$	强度差 (NP-PL)
1	Y-1	6.77	2.71	2.13	0.58
2	Y-2	6.68	2.68	7.58	-4.90
3	Y-3	7.02	2.81	3.93	-1.12
4	Y-4	9.62	3.82	5.67	-1.85
5	Y-5	10.67	4.23	5.28	-1.05
6	Y-6	9.72	3.86	3.11	0.75
7	Y-8	10.75	4.26	5.37	-1.11
8	Y-10	13.37	5.27	3.86	1.41
9	Y-12	9.39	3.73	7.28	-3.55
10	Y-14	18.54	7.26	7.70	-0.44
11	Y-17	13.54	5.34	3.61	1.73
12	Y-18	25.81	10.04	12.76	-2.72
13	Y-19	13.99	5.51	4.04	1.47
14	Y-20	21.33	8.33	5.02	3.31
15	Y-22	18.67	7.31	7.69	-0.38
标准差		5.23	2.13	2.55	
均值		13.06	5.14	5.67	-0.53
变异系数		0.42	0.41	0.45	

长石等粒状矿物聚集的地方, 所测强度就较高。因此, 相对于矿物成分分布均匀的泥质板岩, 造成云母片岩的测试数据的离散性较大的主要原因是矿物的组成和排列方式不均一。鉴于此, 每块岩样需测试多个部位, 以消除因矿物组成和排列不均一对岩样整体强度测试产生的影响, 多次测试的均值可以较好的反映单块岩样的强度值。

首先采用格拉布斯准则对两种试验数据进行检验, 剔除异常值^[20]。当

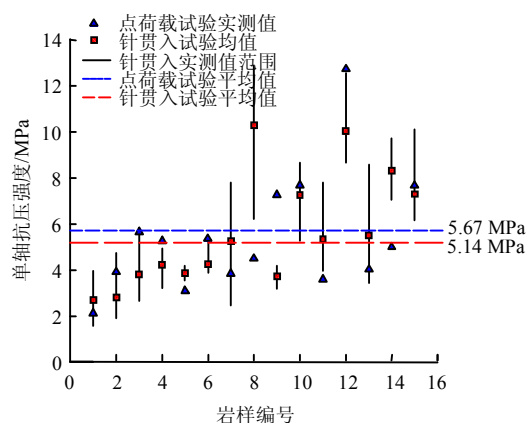


图 7 点荷载试验与针贯入试验结果对比

Fig.7 Results comparison between needle penetration test and point load test

$$|d_p| = |X_p - \bar{X}| > G_{(\alpha, n)} S \quad (4)$$

时, 则应将 X_p 从该组试验值中剔除。式中: X_p 为试验数据值; $\bar{X}$ 为均值; S 为标准差; $G_{(\alpha, n)}$ 为格拉布斯检验临界值; α 为显著性水平, 取 0.05; n 为试验数据个数。

检验结果无超限数据, 15 组数据均参与统计分析, 无须剔除。从表 5、图 7 中可知, 15 块岩样针贯入比值为 6.77~25.81 N/mm, 均值为 13.06 N/mm。由式 (2) 可推算出的云母片岩单轴抗压强度值为 2.71~10.04 MPa, 均值为 5.14 MPa。通过点荷载试验推算出的云母片岩单轴抗压强度值为 2.13~12.76 MPa, 均值为 5.67 MPa, 除岩样 Y-2、Y-12、Y18、Y-20 两种试验测出结果相差较大外, 其余大部分岩样使用两种方法测试出来的抗压强度结果相

差较小, 均值仅相差 0.53 MPa, 表明利用针贯入仪测试云母片岩抗压强度值是合理可行的, 能很好的反映其坚硬程度。从表 5 中可见, 利用针贯入仪测出各岩块单轴抗压强度的变异系数为 0.41, 利用点荷载试验测出的为 0.45。两种试验方法测试结果离散性均较大, 主要是因为该区变质岩变质程度、风化程度、结构面分布情况不同, 以及岩石矿物晶体的细微观排列不均匀等因素造成各岩样岩性差别较大。通过增加测试岩样数量, 多次测量求其均值, 可以消除岩性差别的影响, 较准确地测出软岩的抗压强度。

5 结 论

(1) 针贯入仪可以测得软岩针贯入强度指标, 间接推算其单轴抗压强度, 无需制备样品, 可在现场和室内进行, 具有操作方便简单, 经济快捷的优点。

(2) 针贯入仪是专门测试软岩强度的仪器, 最佳测试范围在 0.5~20 MPa, 可测得极软岩、软岩和部分较软岩的强度。由于每次测试面积小, 只能反映所测范围之内岩性所代表的完整岩块的强度, 不能反映有裂隙面存在的岩体强度。试验数据的离散性和所测岩石岩性均一程度、表面平整程度、以及结构面分布情况有关, 若岩性均一、表面平整、结构面不影响测试时, 所测数据离散性小, 反之则大。

(3) 对于同一种软岩的多个样品进行针贯入和点荷载试验, 所得试验数据相差不大, 表明针贯入试验运用到软岩强度测试中是合理可行的。两种试验结果离散性均较大, 主要是因为所测云母片岩各岩样变质程度、风化程度、结构面分布情况不同, 以及岩石矿物晶体的细微观排列不均匀等因素造成的。

针贯入仪可较成功地运用到软岩抗压强度测试中, 针贯入试验还可获得软岩的抗拉强度, c 、 ϕ 值等其他力学参数, 但还需进行大量的试验和理论计算, 有待于今后更进一步的研究。

参 考 文 献

- [1] NGAN-TILLARD D J M, ENGIN H K, VERWAAL W, et al. Evaluation of micro-structural damage caused by needle penetration testing[J]. *Bull Eng. Geol. Environ.*, 2012, 71: 487—498.
- [2] 李先炜, 付学敏. 不规则岩块点荷载试验的研究[J]. *岩土工程学报*, 1987, 9(1): 1—11.
- LI Xian-wei, FU Xue-min. A study on the point load test of irregular lump rocks[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1987, 9(1): 1—11.
- [3] 王祥厚, 李明勇, 余洛斐, 等. 点荷载测试岩石强度使用不规则试件的研究与探讨[J]. *岩土力学*, 1995, 16(4): 46—56.
- WANG Xiang-hou, LI Ming-yong, SHE Luo-fei, et al. Discussion and research with irregular test piece of the point load measurement rock strength[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1995, 16(4): 46—56.
- [4] 付志亮, 王亮. 煤层顶底板岩石点荷载强度与抗压强度对比试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(1): 88—96.
- FU Zhi-liang, WANG Liang. Comparative experimental research on point load strength, uniaxial compressive strength and tensile strength for rocks in roof and floor of coal seam[J]. *Chinese Journal Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(1): 88—96.
- [5] 杨帆, 谢永利. 点荷载试验确定岩石强度指标的效果分析[J]. *广西大学学报(自然科学版)*, 2013, 38(1): 138—143.
- YANG Fan, XIE Yong-li. Determination of rock strength with point load test[J]. *Journal of Guangxi University (Natural Science)*, 2013, 38(1): 138—143.
- [6] READ J, THORNTON P, REGAN W. A rational approach to the point load test[C]//Proceedings of 3rd Australia- New Zealand Conference on Geomechanics. Wellington: New Zealand Institution of Engineers, 1980: 35—39.
- [7] ULUSAY R, ERGULER Z A. Needle penetration test: Evaluation of its performance and possible uses in predicting strength of weak and soft rocks[J]. *Engineering Geology*, 2012, (149—150): 47—56.
- [8] ULUSAY R, AYDAN O, ERGULER Z A, et al. ISRM suggested method for the needle penetration test[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, 47: 1073—1085.
- [9] AYDAN O, SATO A, YAGI M. The inference of geo-mechanical properties of soft rocks and their degradation from needle penetration tests[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, 47: 1867—1890.
- [10] 地盤工学会. 地盤調査の方法と解説[M]. 東京: 丸善

- 出版, 2012: 426—432.
- Japanese Geotechnical Society. Japanese standards and explanations of geotechnical and geoenvironmental investigation methods[M]. Tokyo: JGS Publication, 2012: 426—432.
- [11] Japan Society of Civil Engineers. A suggested method for investigation and testing of soft rocks[M]. Japan: Committee on Rock Mechanics of JSCE, 1991.
- [12] AYDAN O. The inference of physico-mechanical properties of soft rocks and the evaluation of the effect of water content and weathering on their mechanical properties from needle penetration tests[J]. **Symposium of ARMA, Chicago**, 2012, 1: 410—415.
- [13] AYDAN O, SEIKI T, ITO T, et al. A comparative study on engineering properties of tuffs from Cappadocia of Turkey and Oya of Japan[C]//Proceedings of the Symposium on Modern Applications of Engineering Geology. Denizli: Turkish National Group of Engineering Geology, 2006: 425—433.
- [14] ERGULER Z A, ULUSAY R. Estimation of uniaxial compressive strength of clay-bearing weak rocks using needle penetration response[C]//Rock Mechanics, Proceedings of 11th Congress on International. Lisbon: [s.n.], 2007: 265—268.
- [15] 长江水利委员会长江科学院. GB 50218-2014 工程岩体分级标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. GB 50218-2014 Standard for engineering classification of rock masses[S]. Beijing: China Planning Press, 2014.
- [16] GERCEK H. Poisson's ratio values for rocks[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2007, 44: 1—13.
- [17] BROOK N. The use of irregular specimens for rock strength tests[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 1977, 14: 193—202.
- [18] PENG S S. Stress analysis of cylindrical rock discs subjected to axial double Point load[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1976, 13: 97—101.
- [19] 中国水电顾问集团成都勘测设计研究院, 水电水利规划设计总院, 中国电力企业联合会. GB/T 50266-2013 工程岩体试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
- Chengdu Hydroelectric Investigation and Design Institute of SPC, Water Resources and Hydropower Planning and Design General Institute, China Electricity Council. GB/T 50266-2013 Standard for testing method of engineering rock mass[S]. Beijing: China Planning Press, 2013.
- [20] 张国锋, 刘志双, 陈显坤, 等. 点荷载法测试易风化泥质岩强度的可靠性分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(增刊 1): 292—298.
- ZHANG Guo-feng, LIU Zhi-shuang, CHEN Xian-kun, et al. Reliability analysis of measuring strongly weathered grey mudstone strength with point load measurement[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(Supp.1): 292—298.