

何斌, 江昊琳, 章东, 王凯. 2020. 基于单轴压缩试验的钻孔应变仪岩芯力学性质的研究. 地震学报, 42(6): 697–706. doi: 10.11939/jass.20200012.

He B, Jiang H L, Zhang D, Wang K. 2020. Study on the mechanical properties of core about borehole strain meters based on uniaxial compression experiment. *Acta Seismologica Sinica*, 42(6): 697–706. doi: 10.11939/jass.20200012.

基于单轴压缩试验的钻孔应变仪 岩芯力学性质的研究^{*}

何 斌[†] 江昊琳 章 东 王 凯

(中国南京 210014 江苏省地震局)

摘要 采用室内岩石力学试验方法——单轴压缩试验, 对江苏省钻孔应变仪岩芯试样进行单轴压缩试验, 通过应力–应变曲线特征和变形特性获取了钻孔岩芯的力学参数, 量化地了解和掌握钻孔岩芯性质; 在观测资料的基础上计算面应变耦合系数, 对比研究试样的单轴抗压强度和弹性模量与面应变耦合系数的关系. 结果表明, 弹性模量 E 对面应变耦合系数 A 有显著的影响, 随着岩石弹性模量的增大, 面应变耦合系数呈线性增长, 二者具有很好的相关性.

关键词 岩石力学 力学性质 面应变耦合系数

doi: 10.11939/jass.20200012

中图分类号: P313.1

文献标识码: A

Study on the mechanical properties of core about borehole strain meters based on uniaxial compression experiment

He Bin[†] Jiang Haolin Zhang Dong Wang Kai

(Jiangsu Earthquake Agency, Nanjing 210014, China)

Abstract: First, using uniaxial compression experiment to the borehole cores of body strain meters in Jiangsu, based on the stress strain curve and characteristics of deformation to obtain the mechanical properties of strain meters borehole core quantitatively. Second, using analysis method to calculate coupling coefficient of the plane strain so as to obtain the relationship between coupling coefficient of the plane strain and the mechanical properties. We observe the effects between coupling coefficient of the plane strain and the uniaxial compressive strength and elastic modulus. The results show that the elastic modulus of borehole has obvious influence on coupling coefficient of the plane strain, and with the increase of coupling coefficient of the plane strain, the elastic modulus of rock increase in linear, and the two have a good correlation. The main factor of the mechanical properties of borehole leads to the great difference of coupling coefficient of the plane strain for borehole strain.

Key words: rock mechanics; mechanical property; plane strain coupling coefficient

^{*} 基金项目 中国地震局“三结合”课题(3JH-202002009, 3JH-201901050)资助.

收稿日期 2020-01-20 收到初稿, 2020-05-27 决定采用修改稿.

[†] 通信作者 e-mail: jsdz_hb@126.com



引言

1968 年, 第一台钻孔应变仪, Sacks-Evertson 型体应变仪在美国研制成功. “十五”期间中国地震局在全国重点地震监测区布设了 80 套 TJ-2 型体应变仪和 40 套 YRY-4 型分量式应变仪, 初步建成了我国的地壳应变监测网(中国地震局监测预报司, 2008). TJ-2 型体应变仪和 YRY-4 型分量式应变仪是中国地震局自主研发的具有自主知识产权的定点形变观测仪器, 体应变仪和分量应变仪统称钻孔应变仪, 均为地应力观测仪器, 根据其观测结果可以考察测区应力状态的变化(池顺良等, 2007; 牛安福等, 2011; 刘序俨等, 2014; 邱泽华, 2017).

钻孔应变仪由井下传感器和地面仪器两大部分组成, 井下传感器通过井下钻孔施工取芯, 在预安装区间段根据岩芯状况进一步确定准确的安装位置, 采用膨胀水泥固结方式对井下传感器与观测层岩石进行耦合. 目前钻孔应变仪观测理论模型是“双环模型”, 仪器的耦合与套筒内、外径和围岩、填充水泥以及套筒材料的弹性模量和泊松比都有复杂的关系. 耦合涉及三个方面: 传感器、介质(岩石及土壤)和耦合材料(特殊水泥). 其中仪器和特制水泥, 可以通过制作过程严格控制其性质, 但是介质因素是不可控的, 介质中岩石弹性模量和泊松比系数等各种力学参数都会影响观测结果(张凌空, 牛安福, 2013). 姚瑞等(2016)认为钻孔围岩中裂隙的存在造成钻孔岩石力学性质分布不均匀, 降低岩石的弹性模量和强度极限, 并通过建立多个模型从不同角度模拟裂隙对观测的影响. 何斌等(2018)结合钻孔柱状图和仪器运行状况, 定性地探讨 M_2 波潮汐因子、气压和水位相关系数与岩性和井孔特性的关系, 提出对钻孔岩芯的力学性质进行动力学测试, 测试报告和相关数据作为重要资料保存, 未来可以进行定量化的研究, 达到资源的高效利用. 张凌空和牛安福(2019)建立相关力学模型, 求解气压对钻孔应变仪的影响系数, 探寻背景场的变化规律, 但是由于缺乏观测井岩芯标本的力学参数, 无法开展理论值与实测值的比较. 贾媛等(2019)采用集中载荷模型反演钻孔应变仪抽水源集中力的深度和集中力, 但是由于模拟计算中涉及岩石弹性参数, 结果存在一定的参数误差. 杨小林等(2020)采用经验模态分解等方法系统地分析并揭示了超强台风“利奇马”对我国东南沿海地区钻孔体应变影响的全貌, 但是在理论计算中仅依据各台站的台基岩性取弹性模量和泊松比的经验值, 较真实情况存在偏差, 因此计算值均偏小于观测值. 总之, 涉及钻孔应变的数值模拟计算离不开岩石的弹性模量和泊松系数等各种力学参数, 因此需要对井下传感器附近的岩芯进行取样测试, 这是一项非常重要的基础工作. 但是, 由于条件限制等多方面的原因, 观测点岩样的实际弹性参数的测试计算相关工作开展很少, 基本处于空白状态, 随着时间的推移有些台站会出现岩芯保存不完整和丢失的现象, 所以非常有必要抓紧完成这一基础工作.

本文采用 WAW-D1000 型电液伺服万能试验机对江苏省钻孔应变仪井下传感器安装段的钻孔岩芯试件进行单轴压缩试验, 重点分析应力-应变曲线和变形特性, 获取钻孔岩芯试件抗压强度和弹性模量, 在基础资料中增加钻孔岩芯定量化的力学特性资料, 同时, 结合观测资料计算钻孔应变仪的面应变耦合系数, 讨论面应变耦合系数与抗压强度和弹性模量的关系.

1 地质背景

江苏省钻孔应变仪的布设主要围绕着省内区域活动性较强且与现代地震有着密切关系的两条重要断裂带——郯庐断裂带苏皖段和茅东断裂带, 形成了有效的钻孔形变观测台网.

郯庐断裂带苏皖段主要由 4 条主干断裂组成, 走向为北北东向, 其中江苏段较窄, 以第四纪陆相碎屑岩建造为主. 根据历史地震重演原则和地质构造类比原则, 认为郯庐断裂带泗洪南(王集)—嘉山一带存在发生 $M \geq 7.0$ 强地震的可能性(熊振等, 2016). 茅东断裂带位于下扬子陆块, 走向为北北东向, 新构造期以大面积的升降运动为主, 沉积层十分发育, 地震活动性较强, 1979 年 7 月 9 日溧阳 $M_s 6.0$ 地震, 是有记载以来江苏陆地所发生的最大地震(王恒知等, 2019).

进行钻孔岩芯试验的观测点共有 7 个, 主要围绕郯庐断裂带江苏段和茅东断裂带分布(图 1). 钻孔 JS06 位于郯庐断裂带江苏段上, JS01 和 JS07 分别在郯庐断裂带西南侧和东北侧, 距 JS06 分别 113.2 km 和 83.1 km, JS02, JS03 和 JS05 在茅东断裂带西北侧, JS04 位于茅东断裂带东南侧.

2 试验设计与方法

2.1 试件制作

选取 JS01—JS07 钻孔的岩芯进行单轴压缩试验. 钻孔岩芯直径为 150 mm, 单块长度为 300 mm. 钻孔岩芯主要分为灰岩、砂岩、安山岩和片麻岩, 试验共选取岩芯试件 7 件: 灰岩、砂岩和安山岩各 2 件, 片麻岩 1 件. 直接将岩芯试件加工成圆柱体, 每件岩芯制成 2 组试样. 为了减少“端部效应”, 将试样端部削平或磨平, 试验前在试样与加压板之间加入润滑剂, 以充分减少加压板与试样断面之间的摩

表 1 取样岩芯深度、尺寸及岩石名称
Table 1 The depth, size and properties of rock samples

岩石属性	钻孔编号	组号	取样深度/m	试样尺寸/mm	
				直径	高度
灰岩	JS01	1	51	31.23	108.35
		2		31.23	106.74
	JS02	3	87	31.23	61.21
		4		31.23	28.97
安山岩	JS03	5	50	31.50	116.61
		6		31.50	113.50
	JS04	7	60	31.50	116.46
		8		31.50	115.77
砂岩	JS05	9	44	31.50	82.36
		10		31.50	94.81
	JS06	11	60	31.50	113.15
		12		31.50	110.83
片麻岩	JS07	13	61	31.23	59.45
		14		41.59	46.41

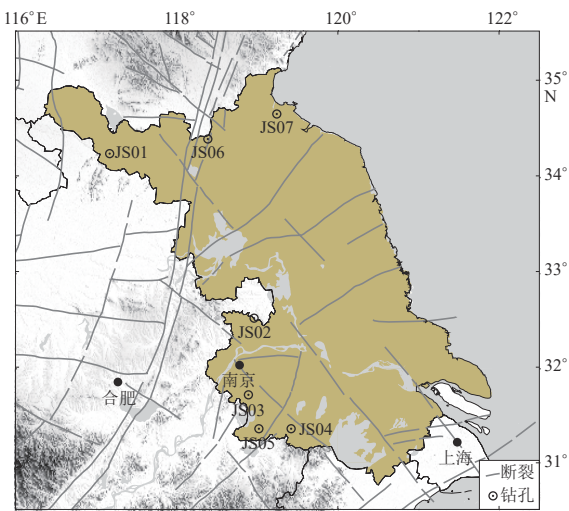


图 1 钻孔分布图
Fig. 1 Borehole distribution

擦力. 试样尺寸列于表 1, 直径为 31.23—41.59 mm, 高度为 28.97—116.61 mm.

2.2 试验方案与设备

将 14 组岩石试样的单轴压缩试验(中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2013)编号为 1—14, 通过 WAW-D1000 型电液伺服万能试验机对自然状态下的试件采用荷载速率加载控制(图 2), 为避免偏心加载, 试样轴线与试验机加载轴线基本重合, 加载速率为 0.1 kN/s, 变形参数通过在岩石试样表面粘贴电阻应变片的方法来获取. 由于应变片容易损坏, 为保证数据的可靠性, 在试样上贴了两组应变片. 试验荷载和试验数据全



图 2 单轴压缩试验照片
Fig. 2 Photos of uniaxial compression experiment

部由计算机程序控制和采集，已获得相应试件的全程应力和应变参数。通过单轴压缩试验测试出每个试件的单轴抗压强度，再根据试件的应力、应变值计算出每个试件的弹性模量。该试验在中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室完成。

从岩性的角度出发，图 3—6 给出了灰岩、安山岩、砂岩和片麻岩的应力-应变曲线。不同岩芯试样的应力应变曲线呈现一定的差异性，但根据实验过程，其大致可分为 4 个阶段：

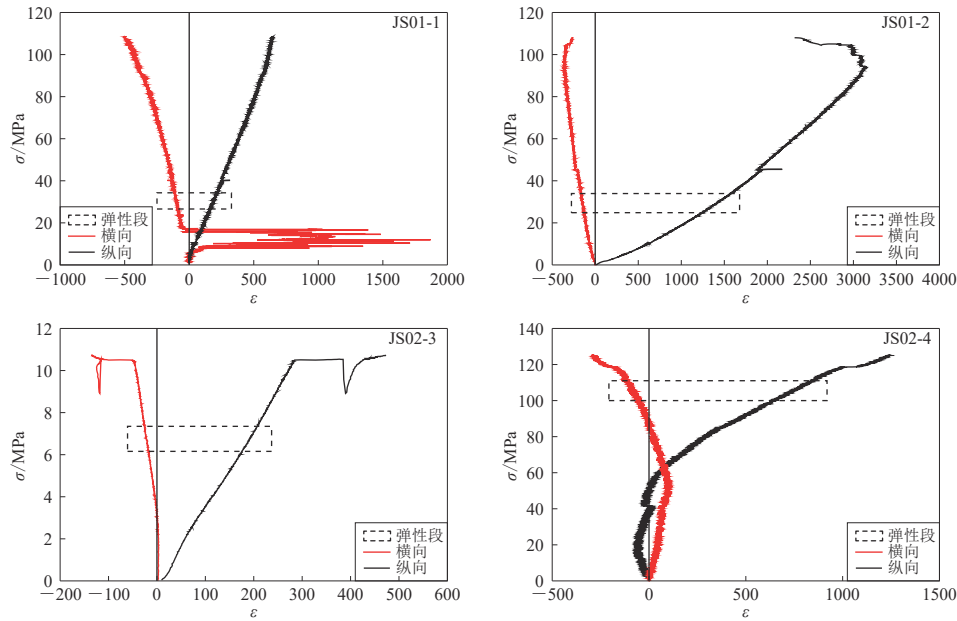


图 3 单轴压缩条件下灰岩应力-应变曲线
Fig. 3 Stress-strain curves of limestone samples in uniaxial compression experiment

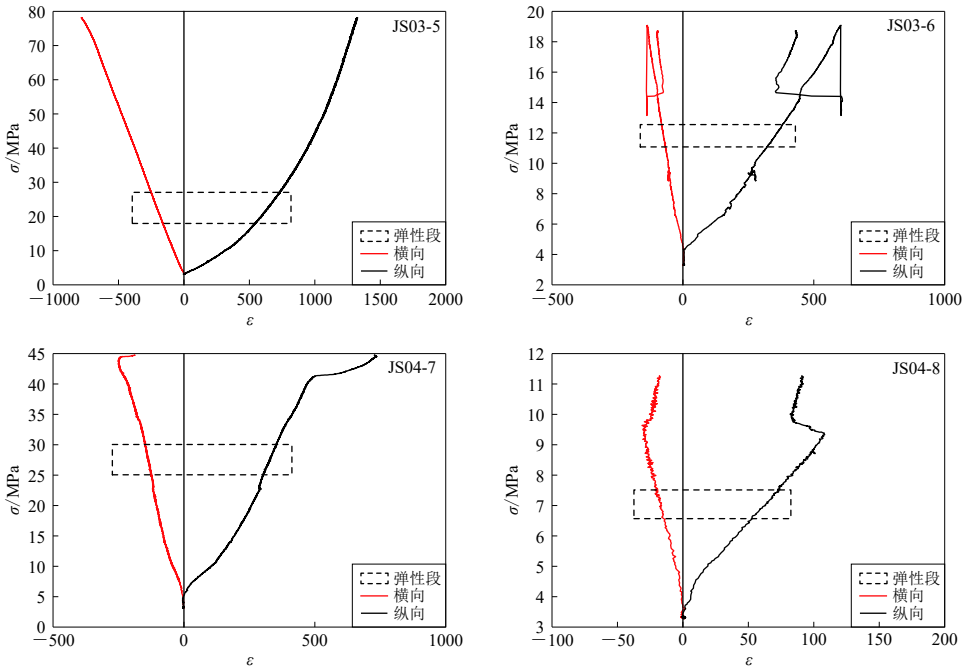


图 4 单轴压缩条件下安山岩应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of andesite samples in uniaxial compression experiment

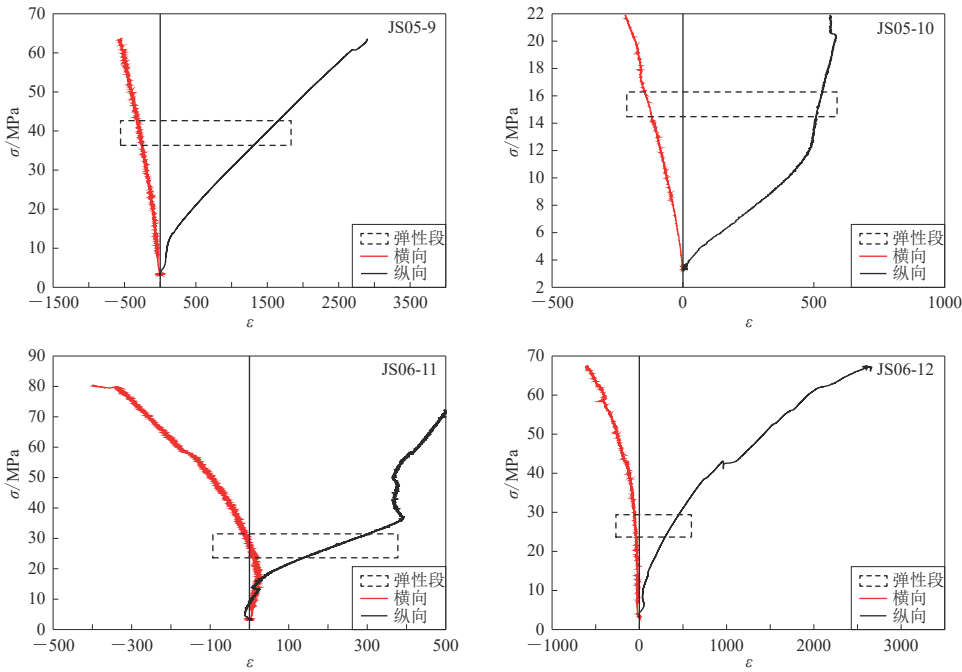


图 5 单轴压缩条件下砂岩应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of sandstone samples in uniaxial compression experiment

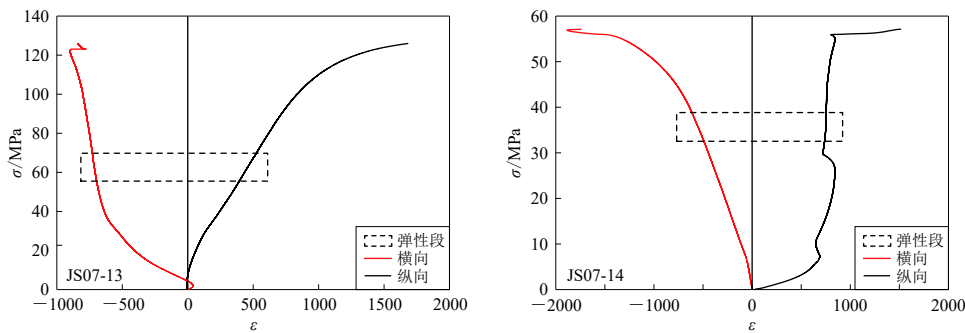


图 6 单轴压缩条件下片麻岩应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves of gneiss samples in uniaxial compression experiment

初始压密阶段、弹性阶段、扩容阶段和破坏阶段。

3 试验结果与分析

岩石单轴抗压强度反映了岩石在单向受压作用下被破坏时所能承受的极限压应力值，即为试件应力-应变曲线上轴向应力的峰值。计算公式为

$$R=\frac{P}{A}, \tag{1}$$

式中： R 为岩石单轴抗压强度，单位为 MPa； P 为破坏载荷，单位为 N； A 为试件截面积，单位为 mm^2 。

岩石的变形特性也是从应力-应变曲线中获得，弹性模量 E 是最常用的岩石材料的变形指标。其计算方法为

$$E=\frac{\sigma}{\varepsilon_a}, \tag{2}$$

式中： E 为岩石的弹性模量，单位为 GPa； σ 为应力-应变曲线弹性段抗压强度； ε_a 为应力-应变曲线弹性段纵向应变。应力-应变曲线的弹性段内计算弹性模量，即应变曲线上一段比较平直的线段斜率就是弹性模量，图 3—6 中虚线框为弹性段。通过单轴压缩试验，获得各试样的力学参数（表 2）。

表 2 各岩样的力学参数

Table 2 The mechanical parameters of rock samples

钻孔编号	组号	抗压强度 R/MPa	弹性模量 E/GPa
JS01	1	108.78	23.1
	2	105.82	15.3
JS02	3	15.42	34.7
	4	205.05	56.5
JS03	5	80.01	24.8
	6	22.76	18.7
JS04	7	44.95	28.6
	8	16.45	47.7
JS05	9	64.00	19.1
	10	22.28	16.1
JS06	11	84.12	48.6
	12	68.41	34.5
JS07	13	129.41	36.7
	14	77.56	40.9

试样单轴抗压强度均值为 74.64 MPa，极差为 189.63 MPa，标准差为 50.45。其中，灰岩、安山岩、砂岩和片麻岩的单轴抗压强度均值、极差和标准差分别为 108.77 MPa，189.63 MPa 和 67.07；41.04 MPa，63.56 MPa 和 24.87；59.70 MPa，61.84 MPa 和 22.87；103.49 MPa，51.85 MPa 和 25.93。

试样弹性模量均值为 31.81 GPa，极差为 41.2 GPa，标准差为 12.69。其中，灰岩、安山岩、砂岩和片麻岩的弹性模量均值、极差和标准差分别为 32.4 GPa，41.2 GPa 和 15.53；

29.9 GPa, 29 GPa 和 10.84; 29.58 GPa, 32.5 GPa 和 13.01; 38.8 GPa, 4.2 GPa 和 2.1.

4 面应变耦合系数

钻孔应变仪的观测对象是孔径的相对变化, 其直接观测数据并不是“当地”的应变分量. 为了得到“当地”面应变, 必须进行应变的换算. 四分量钻孔应变观测的理论模型是“双环模型”, 当相对远处有均匀水平主应变 ε_1 和 ε_2 时, 钻孔的 θ 方向的孔径相对变化为

$$S_{\theta}=A(\varepsilon_1+\varepsilon_2)+B(\varepsilon_1-\varepsilon_2)\cos2(\theta-\Phi), \tag{3}$$

式中, Φ 为主方向的方位角, A 为面应变耦合系数, B 为剪应变耦合系数.

A 和 B 的大小与套筒内、外径和围岩、填充水泥以及套筒材料的弹性模量和泊松比都有复杂的关系(邱泽华等, 2005): ① 将原始观测值归零处理, 为消除仪器或人为干扰所产生的线性漂移、阶变和缺数等, 对部分观测数据进行去除线性趋势和线性内插等处理. 由于室内观测环境与仪器的实地观测环境不同, 故对观测数据进行相对标定, 即元件灵敏度的一个校正 $S_i=k_i s_i$, S_i ($i=1, 2, 3, 4$) 为四个元件经过相对标定后的值, k_i 为相对校正系数, s_i 为原始观测数据. ② 对经过相对标定的观测数据小时值进行差分. 根据邱泽华(2017)提出的方法, 观测数据绝对标定之后得到耦合系数 A 和 B .

JS01—JS07 钻孔均安装了钻孔应变仪, 包括分量应变仪和体应变仪, 均能观测记录到清晰的固体潮变化, 数据采样率为 1 min/次, 观测数据的连续性和稳定性均较好. 因每年 7、8 月降雨比较集中, 面应变和井水位曲线有波动, 因此统一选取 2015 年 10 月至 2016 年 6 月的观测数据计算耦合系数 A , 将到 JS01—JS07 的耦合系数 A 分别为 0.82, 1.32, 0.86, 1.04, 0.60, 0.47 和 0.92.

4.1 耦合系数 A 与单轴抗压强度之间的关系

随着单轴抗压强度的增大, 耦合系数 A 未表现出明显的变化趋势(图 7). 从表 2 可以看到, 试样的单轴抗压强度标准差高达 50.45, 离散性较大, 没有一定的规律可循, 这可能是岩石试件尺寸效应导致变形存在一定的随机性. 考虑到本次试验的岩芯比较复杂, 含有许多节理、裂隙等, 因此制造圆柱体试样的过程中尺寸无法实现统一. 由表 1 可知, 试样高度从 28.97 mm 到 116.61 mm, 75% 的试样高径比为 3, 高径比为 2 和高径比为 1 的试样各占 12.5%. 尽管岩石参数计算方法本身很严格, 但是不能忽略岩体力学性质的尺寸效应(陈瑜等, 2010), 因此在今后的研究中需进一步分析尺寸效应对单轴抗压强度的影响(王文星, 2004).

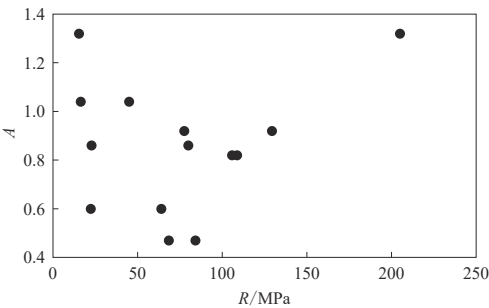


图 7 耦合系数 A 与单轴抗压强度 R 之间的关系
Fig. 7 The relationship between the uniaxial compressive strength R and coupling coefficient A of the plane strain

4.2 耦合系数 A 与弹性模量之间的关系

分析耦合系数 A 与弹性模量之间的关系. 剔除个别较为离散的点, 试样表现出耦合系数 A 随着弹性模量的增大而增大的趋势. 从图 8 可以看出, 两者之间基本呈线性函数关系, 拟合耦合系数 A 与弹性模量 E 之间的关系, 得到函数关系式为

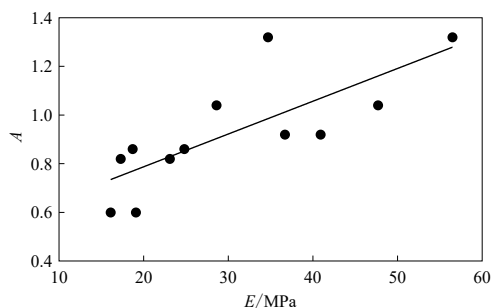


图 8 耦合系数 A 与弹性模量 E 之间的关系

Fig. 8 The relationship between modulus

E and coupling coefficient A of the plane strain

灰岩的标准差最大,说明灰岩试样的单轴抗压强度分散性较大,这与灰岩的岩芯内部存在显著的节理层面有关.明显的节理层面可以从应力-应变曲线中看到(图 3),其对试样的抗压强度有显著的影响.

2) JS01 和 JS02 岩石属性为灰岩,但是前者位于郯庐断裂带江苏段,后者位于茅东断裂带,两个钻孔的弹性模量存在明显的差异性,JS01 的弹性模量明显小于 JS02;同样的现象也存在于 JS05 和 JS06 的试样,两者均为砂岩,但是位于茅东断裂带附近的试样 JS05 的弹性模量明显小于位于郯庐断裂带江苏段附近的试样 JS06. 尽管岩性相同但是因为位于不同的构造带,定量化的岩芯性质存在显著差异.

3) 对 14 组岩芯试样计算其单轴抗压强度和弹性模量,并绘制出关系曲线.在不考虑试样的尺寸效应下,单轴抗压强度对耦合系数 A 的影响是随机的,离散性较大.单轴抗压强度需要进一步考虑尺寸效应,本文不作展开分析.耦合系数 A 与弹性模量之间具有明确的相关性,弹性模量随着耦合系数 A 的增大而增大.

本文对江苏省钻孔应变仪所取钻孔岩芯试样开展了一系列室内试验研究,初步分析了钻孔岩芯在单轴压缩条件下的力学特性.除了观察到符合一般岩石力学规律的现象,更重要的是通过尝试加入室内试验的方法,测试获取了钻孔岩芯强度和弹性模量参数.作为一种依赖于井下环境的特殊仪器,获取传感器埋深环境的数字化资料,了解钻孔环境形成的观测背景,对进一步剖析钻孔应变观测机理提供一定的基础资料.

本次钻孔岩芯测试未考虑试样的各向异性和孔隙压力,主要是因为:①基岩岩芯加工成圆柱体的标准试样后,外观没有显著的裂纹和非均匀性;②由于试样很短,平均高度仅为毫米级,对于块状的岩石可以看作各向同性;③本次测试仅考虑岩芯试样的力学性质,对于地层的各向异性则未在计算中过多考虑;④由于钻孔岩芯提取后放置室外接近 10 年,地层中原始含水量难以确定,在试验时将岩样的孔隙压力取为零,故所加的应力即为有效应力.

井下传感器的赋存环境很复杂,并且是三向受力,本文只进行了单轴受压的试验,仅作了一些探索性的工作.后续有条件可以开展关于岩石试件在三轴应力条件下的试验研究.由于地下岩体裂隙对岩石的影响较为显著,可以开展相应的试验以深入分析裂隙发育程度,诸如对试样进行自然吸水率试验,通过密度和吸水性指标换算求出对应试件的孔隙率,进而用来表征不同试件的裂隙发育程度,了解岩芯的裂隙状况,分析观测影响因素.

$$A = 0.5178 + 0.0135E, R^2 = 0.5460. \quad (4)$$

5 讨论与结论

本文以江苏省钻孔应变仪钻孔岩芯为研究对象,通过单轴压缩试验,探讨钻孔岩芯力学性质.主要结果如下:

1) 江苏省钻孔应变仪测量段的岩芯属性主要分为四类,分别是灰岩、安山岩、砂岩和片麻岩.单轴抗压强度均值最小的是安山岩,弹性模量均值最小的是砂岩.各试样的单轴抗压强度离散性较大,极差近 190 MPa. 试样中

参 考 文 献

- 陈瑜, 黄永恒, 曹平, 衣永亮, 李娜, 李丽娟. 2010. 不同高径比时软岩强度与变形尺寸效应试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), **41**(3): 1073–1078.
- Chen Y, Huang Y H, Cao P, Yi Y L, Li N, Li L J. 2010. Size effect experimental study of strength and deformation in different height-to-diameter ratio soft rocks[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, **41**(3): 1073–1078 (in Chinese).
- 池顺良, 武红岭, 骆鸣津. 2007. 钻孔应变观测中潮汐因子离散性与各向异性原因探讨: “十五”数字地震观测网络分量钻孔应变仪首批观测资料分析解释[J]. *地球物理学进展*, **22**(6): 1746–1753.
- Chi S L, Wu H L, Luo M J. 2007. Discussion on strain tidal factor separation and anisotropy: Analysis of first data of borehole component strain-meter of China's digital seismological observational networks[J]. *Progress in Geophysics*, **22**(6): 1746–1753 (in Chinese).
- 何斌, 田韬, 王恒知. 2018. 基于钻孔特性的体应变观测相关性研究[J]. *地震工程学报*, **40**(1): 153–158.
- He B, Tian T, Wang H Z. 2018. Study on correlation of volume strain observation based on borehole features[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, **40**(1): 153–158 (in Chinese).
- 贾媛, 甘卫军, 李杰, 朱成林, 殷海涛, 卢双苓, 鞠佳斌. 2019. 抽水对泰安地震台钻孔分量应变的影响及其机制[J]. *地震地质*, **41**(6): 1429–1443.
- Jia Y, Gan W J, Li J, Zhu C L, Yin H T, Lu S L, Ju J B. 2019. Influence of pumping on four-component borehole strain at Tai'an seismic station and its interference mechanism[J]. *Seismology and Geology*, **41**(6): 1429–1443 (in Chinese).
- 刘序俨, 王紫燕, 方宏芳, 黄声明, 王林. 2014. 对当前四分量钻孔应变观测的审视: 以应变不变量为标尺[J]. *地球物理学报*, **57**(10): 3332–3346.
- Liu X Y, Wang Z Y, Fang H F, Huang S M, Wang L. 2014. Analysis of 4-component borehole strain observation based on strain invariant[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **57**(10): 3332–3346 (in Chinese).
- 牛安福, 张凌空, 闫伟, 吉平. 2011. 中国钻孔应变观测能力及在地震预报中的应用[J]. *大地测量与地球动力学*, **31**(2): 48–52.
- Niu A F, Zhang L K, Yan W, Ji P. 2011. Borehole strain measurement and application to earthquake prediction in China[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, **31**(2): 48–52 (in Chinese).
- 邱泽华, 石耀霖, 欧阳祖熙. 2005. 四分量钻孔应变观测的实地相对标定[J]. *大地测量与地球动力学*, **25**(1): 118–122.
- Qiu Z H, Shi Y L, Ouyang Z X. 2005. Relative in-situ calibration of 4-component borehole strain observation[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, **25**(1): 118–122 (in Chinese).
- 邱泽华. 2017. 钻孔应变观测理论 and 应用[M]. 北京: 地震出版社: 93–116.
- Qiu Z H. 2017. *Borehole Strain Observation, Theory and Application* [M]. Beijing: Seismological Press: 93–116 (in Chinese).
- 王恒知, 周昱辰, 何斌, 王俊. 2019. 溧阳地区强震动台站场地特征研究[J]. *防灾减灾工程学报*, **39**(6): 1005–1009.
- Wang H Z, Zhou Y C, He B, Wang J. 2019. Study on site characteristics of strong motion stations in Liyang city[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, **39**(6): 1005–1009 (in Chinese).
- 王文星. 2004. 岩石力学[M]. 长沙: 中南大学出版社: 5–12.
- Wang W X. 2004. *Rock Mechanics* [M]. Changsha: Central South University Press: 5–12 (in Chinese).
- 中国地震局监测预报司. 2008. 地形变测量[M]. 北京: 地震出版社: 226–245.
- Monitoring and Forecasting Department of China Earthquake Administration. 2008. *Ground Deformation Measurement* [M]. Beijing: Seismological Press: 226–245 (in Chinese).
- 熊振, 李清河, 张元生, 侯康明, 金淑梅, 周彩霞. 2016. 郯庐断裂带鲁苏皖段未来强震可能发生地段初探[J]. *地震地质*, **38**(4): 964–977.
- Xiong Z, Li Q H, Zhang Y S, Hou K M, Jin S M, Zhou C X. 2016. Preliminary discussion on the possible area of strong earthquake occurrence in future along the Shandong-Jiangsu-Anhui segment of Tancheng-Lujiang fault zone[J]. *Seismology and Geology*, **38**(4): 964–977 (in Chinese).
- 姚瑞, 杨树新, 王迪. 2016. 裂隙对四分量钻孔应力-应变观测影响的数值模拟分析[J]. *岩土工程学报*, **38**(2): 331–335.
- Yao R, Yang S X, Wang D. 2016. Numerical simulation analysis of effects of cracks on 4-component borehole observation of

- stress-strain[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, **38**(2): 331–335 (in Chinese).
- 杨小林, 杨锦玲, 危自根. 2020. 中国东南沿海地区钻孔体应变对超强台风“利奇马”的响应特征与机制[J]. *地震学报*, **42**(3): 306–318.
- Yang X L, Yang J L, Wei Z G. 2020. Signature and physical mechanism of borehole dilatometers in response to super typhoon Lekima in southeastern coastal area of China[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **42**(3): 306–318 (in Chinese).
- 张凌空, 牛安福. 2013. 分量式钻孔应变观测耦合系数的计算[J]. *地球物理学报*, **56**(9): 3029–3037.
- Zhang L K, Niu A F. 2013. Component borehole strain observations coupling coefficients calculation[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **56**(9): 3029–3037 (in Chinese).
- 张凌空, 牛安福. 2019. 周期气压波对地壳岩石应变测量影响的理论解[J]. *地球物理学进展*, **34**(4): 1366–1370.
- Zhang L K, Niu A F. 2019. Theoretical solution of periodic pressure wave effect on crustal rock strain measurement[J]. *Progress in Geophysics*, **34**(4): 1366–1370 (in Chinese).
- 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 2013. GB/T 50266—2013 工程岩体试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社: 19–21.
- Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. 2013. GB/T 50266—2013 *Standard for Test Methods of Engineering Rock Mass*[S]. Beijing: China Planning Press: 19–21 (in Chinese).