

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.2192

岩石类材料拉伸弹性模量测量方法的对比研究

张 燕¹, 于大伟², 叶剑红³

(1. 武汉理工大学 资源与环境学院 安全工程系, 湖北 武汉 430070; 2. 中国地质大学(北京) 工程技术学院 土木工程系, 北京 100083;
3. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘 要: 研究表明岩石材料在拉应力、压应力条件下具有不同的力学行为, 因此, 岩石材料存在两种弹性模量, 分别为拉伸弹性模量和压缩弹性模量。为了甄别出直梁弯折试验和巴西劈裂试验哪一种更加适合测试岩石材料的拉伸弹性模量, 以大理岩、花岗岩和砂岩为典型的岩石类型, 开展了一系列的单轴压缩、直接拉伸、三点弯折和巴西劈裂试验, 测试了岩石材料的拉伸弹性模量; 并对测试结果的可靠性、准确性开展了系统的对比研究。最终发现, 巴西劈裂试验因为较好的测量精度、制样简便、试验操作简单等因素, 可以成为测量岩石材料拉伸弹性模量的推荐方法。

关 键 词: 拉伸弹性模量; 直接拉伸试验; 岩石弹性模量; 三点弯折试验; 巴西圆盘劈裂试验

中图分类号: TU 454

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2018)06-2295-09

Study on measurement methodology of tensile elastic modulus of rock materials

ZHANG Yan¹, YU Da-wei², YE Jian-hong³

(1. Department of Safety Engineering, School of Resources & Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China;

2. Department of Civil Engineering, School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

3. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics,

Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: It is well known that rock materials have different mechanical behaviors under the compressive and tensile loading. Correspondingly, there are two types of elastic modulus; they are compressive elastic modulus E_c , and tensile elastic modulus E_t , respectively. In order to distinguish which indirect test methodologies, including three-points bending test and Brazilian disc test, is more suitable to measure the tensile elastic modulus E_t of rock materials, a series of experimental tests, including uniaxial compressive test (UCT), direct tensile test (DTT), three-points bending test, as well as the Brazilian disc test is performed for three typical types of rock: white marble, granite and sandstone. Based on these experimental results, comprehensive comparative investigation on the reliability of these measurement methods for tensile elastic modulus E_t of rock materials is systematically conducted. Finally, it is found that the Brazilian disc test could be a suitable and reliable method to measure the tensile elastic method of rock materials, due to the excellent agreement with that measured by direct tension tests, and due to the simplicity of sample preparation, as well as test operation.

Keywords: tensile elastic modulus; direct tensile test; elastic modulus of rocks; three-points bending test; Brazilian disc test

1 引 言

弹性模量是描述岩石材料受力变形的一个重要参数, 无论在岩石工程定量的数值计算, 还是在定性的岩体质量评价体系中都扮演着重要的作用。前人的研究已经清晰地表明岩石材料在拉、压力作用

下具有不同的力学行为^[1-2]。因此, 岩石材料就拥有两种弹性模量, 分别是拉伸弹性模量和压缩弹性模量。通常而言, 岩石具有非常好的抗压性能, 较弱的抗拉性能, 在工程设计中往往尽量避免拉应力出现。但是实际工程中拉应力仍然不可避免地存在于一些特殊的工程部位和环境中, 例如大型边坡的后

收稿日期: 2017-12-29

基金项目: 国家自然科学基金青年基金 (No.41702308); 武汉理工大学自主创新基金。

This work was supported by the National Natural Science Foundation (41702308) and the Innovation Fund of Wuhan University of Technology.

第一作者简介: 张燕, 女, 1983 年生, 博士, 讲师, 主要从事采矿工程、采煤巷道突水方面的研究工作。E-mail: yanzhang2009@gmail.com

通讯作者: 叶剑红, 男, 1981 年生, 博士, 教授, 主要从事海洋岩土工程、计算力学方面的研究工作。E-mail: yejianhongcas@gmail.com

缘坡肩部位、水电工程中高地应力地区大型地下洞室围岩中^[3-4]，爆破工程中炮孔周围的岩石中^[5-6]。

前人的研究工作中较少特别关注岩石（体）工程中的拉伸变形和拉伸裂隙，一般将岩石材料在压缩、拉伸应力条件下力学行为视为无区别，工程计算中只输入压缩弹性模量这一个参数。这种做法当然可能给岩石（体）工程带来潜在的设计和施工上的风险。近年来，拉伸变形和拉裂隙形成的力学机制吸引了越来越多的研究人员的注意^[7-8]。拉伸弹性模量作为一个评估岩石材料拉伸变形的重要参数，非常有必要发展一种可靠、操作方便的测试方法。

拉伸弹性模量的测量方法通常有 3 种：①直接拉伸试验；②直梁弯折试验；③巴西劈裂试验。毫无疑问，直接拉伸试验是最可靠的测试方法。但是由于制样、试验操作比较复杂，试件端部容易产生应力集中等因素，造成直接拉伸试验的成功率不高。由于间接测试方法的试验成功率相对较高，采用间接方法测试岩石材料的拉伸弹性模量在时间、经费成本上具有较大优势。传统上直梁弯折试验常用来测试岩石的抗拉强度，李炜等^[9]进一步发展了相关的测试理论，使直梁弯折试验还可以同时测量岩石的拉伸弹性模量和压缩弹性模量。直梁弯折试验的成功率一般较直接拉伸试验要高，但是也存在一个问题，那就是直梁试件加工起来比较费时，而且也难以保证切割出来的直梁前、后、上、下 4 个面严格保持平行或垂直关系。巴西圆盘试验是当前测量岩石抗拉强度最为常用的方法。Hondros^[10]、喻勇^[11]、Wang^[12]等基于巴西劈裂试验提出了测量岩石弹性模量的方法，然而这些方法并没有严格区分拉伸弹性模量和压缩弹性模量。Ye 等^[13]同样基于巴西劈裂试验提出了一个理论较为完善的测量拉伸弹性模量的方法。该方法提出之后，不仅得到了岩石力学学者的关注^[14-15]，而且还得到了材料科学，如复合材料^[16]、陶瓷^[17]等研究领域学者的应用。在此基础上，Ye 等^[18]进一步提出利用数字图像相关（DIC）技术观测圆盘试件的变形而同时测量岩石材料的拉伸和压缩弹性模量的试验方法。之后，利用 DIC 技术观测巴西劈裂试验中圆盘试件的变形这一做法被很多学者所采用^[19-20]。由于 DIC 技术测量应变的精度很难达到 1.0×10^{-6} 量级，所以 Ye 等^[18]所提出的测试方法对硬脆岩石不太适用。

如前所述，当前已经存在直梁弯折和巴西劈裂两种间接试验方法可以测量岩石材料的拉伸弹性模量，但是目前还没有针对这两种间接测试方法开展系统性的对比研究，以回答以下两个方面的问题：

①直梁弯折和巴西劈裂试验哪种测试方法所得到的拉伸弹性模量更接近直接拉伸的测量值？②鉴于测试结果的可靠性和试验操作的简便性，直梁弯折和巴西劈裂哪种测试方法更值得被推荐？

为了回答以上两个方面的问题，本文以大理岩、花岗岩和砂岩为典型的岩石类型，开展了一系列的单轴压缩、直接拉伸、三点弯折和巴西劈裂试验，测试岩石材料的拉伸弹性模量；并对测试结果的可靠性、准确性开展了系统的对比研究。最终发现，巴西劈裂试验因为较好的测量精度、制样简便、试验过程简单等因素，可以成为测量岩石材料拉伸弹性模量的推荐方法。

2 试验方法

2.1 单轴压缩试验

由于采用巴西圆盘试验测量岩石的拉伸弹性模量时需要知道该岩石在压缩条件下的泊松比，所以必须开展单轴压缩试验，以获取所测试岩石的压缩状态泊松比；同时还可以了解所测岩石的抗压强度和压缩弹性模量。如图 1 所示，在压缩试样上对称粘贴 4 对应变花，用以记录轴向和径向应变；很显然由于试样变形的不均匀，4 对应变花的测试结果肯定比 1 对的结果要可靠得多。试验采用位移控制，试验机的压缩速率设置为 0.15 mm/min 。

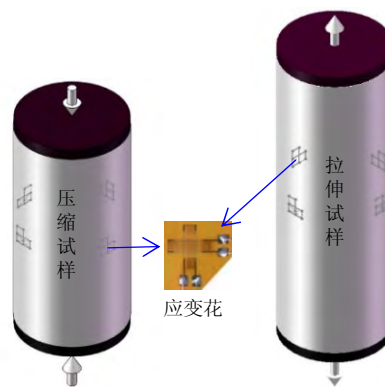


图 1 单轴压缩、直接拉伸试验应变片粘贴示意图

Fig.1 Four strain rosettes glued on lateral side of samples in uniaxial compression tests

2.2 直接拉伸试验

直接拉伸试验是最为直接的方法去测量岩石材料的拉伸弹性模量、抗拉强度和拉伸泊松比。由于在试样上直接加载拉力比较困难，而且在拉伸时端部极易产生应力集中，试验的难度大，导致成功率较低。前人往往制作狗骨头形状试样来开展该类试验，但是这种样品制作也甚复杂，所以直接拉伸试验开展较少。近些年，由于出现了黏结强度极高的

胶水，可以将圆柱试样和特殊设计的加载夹具牢牢地黏结在一起，大大降低了直接拉伸试验的难度。本文就是采用该方法实现了直接拉伸试验。与压缩试样一样，也在拉伸圆柱试样侧面粘贴 4 个应变花，以测量拉伸变形。本文开展直拉试验的目的是直接测量岩石的拉伸弹性模量及抗拉强度，为后续评价三点弯折和巴西原盘试验的测试数据质量提供标准。试验采用位移控制，试验机的拉伸速率设置为 0.15 mm/min。

2.3 三点弯折试验

三点弯折试验是在一根直梁中间对称面上施加荷载，使直梁的下部分受拉力，上部分受压力。由于岩石抗压能力远强于抗拉能力，所以梁的破坏一定是在底部开始的。传统上利用这一特征来测量岩石的抗拉强度。曾有学者进一步发展了这种相类似的试验方法^[9]，利用四点弯折试验来同时测量岩石的压缩弹性模量和拉伸弹性模量。本文参考该方法，发展三点弯折试验来同时测量岩石的压缩和拉伸弹性模量，推导过程请参考文献[9]，测量公式为

$$E_c = \frac{3PL}{4h^2b} \left(1 + \frac{\epsilon_t}{\epsilon_c} \right) \frac{1}{\epsilon_c} \quad (1)$$

$$E_t = \frac{3PL}{4h^2b} \left(1 + \frac{\epsilon_t}{\epsilon_c} \right) \frac{\epsilon_c}{\epsilon_t^2} \quad (2)$$

$$\sigma_t = \frac{3PL}{4h^2b} \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_t} + 1 \right) \quad (3)$$

式中： P 为施加的荷载； ϵ_c 为梁顶部最大压应变； ϵ_t 为梁底面最大拉应变； σ_t 为对应的最大拉应力； E_c 为压缩弹性模量； E_t 为拉伸弹性模量； b 为梁的厚度； h 为梁的高度； L 为两支撑点之间的距离。

试验中，只要在梁的侧面粘贴应变片，如图 2 所示，用以测量最大压应变 ϵ_c （1 号应变片），和最大拉应变 ϵ_t （4 号应变片），就可以根据式（1）~（3）测得岩石的压缩、拉伸弹性模量以及岩石的抗拉强度（注：需要取破坏时的 ϵ_c 和 ϵ_t 值）。

值得一提的是，传统上采用三点弯折试验测量抗拉强度的公式中不包含梁的应变值，是因为传统方法认为岩石的拉、压性能一样，所以梁受力后中性面和对称面重合，变形协调关系必须是 $\epsilon_c / \epsilon_t = 1$ 。所以式（3）就与应变无关系。如果考虑到岩石的拉、压性能的异同，那么三点弯折试验测量抗拉强度就一定与破坏时拉、压应变比值相关，而且这个比值肯定与岩石种类相关。岩石的拉、压性能差别越大，

传统方法带来的误差也就越大。

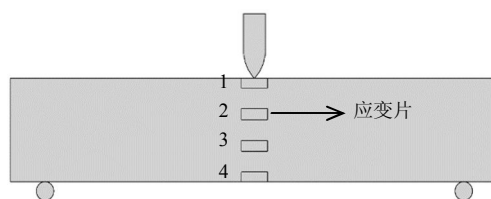


图 2 三点弯折试验应变片粘贴示意图
Fig.2 Four strain gauges glued on front lateral side of samples in three-points bending test

2.4 巴西劈裂试验

由于直接拉伸试验的费用高、成功率较低，所以巴西劈裂试验因制样方便、操作简单、成功率高而被广泛用来替代直拉试验测试岩石的抗拉强度。2009 年 Ye 等^[13]进一步发展了巴西劈裂试验的理论方法，采用在原盘中心粘贴应变片测量拉伸应变方法（如图 3 所示），用来测量岩石的拉伸弹性模量。

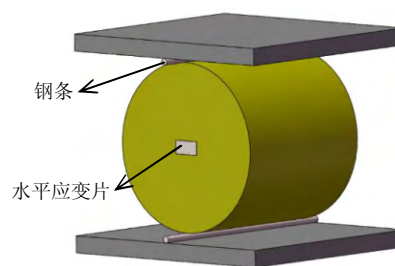


图 3 巴西劈裂试验装置示意图
Fig.3 Sketch of Brazilian disc test

测量 E_t 的解析式为

$$E_t(t) = \frac{2P(t)}{\pi D l \epsilon_t(t)} \left\{ \left(1 - \frac{D}{L} \arctan \frac{2L}{D} \right) (1 - \nu) + \frac{2D^2(1 + \nu)}{4L^2 + D^2} \right\} = A E_s \quad (4)$$

其中，

$$E_s = \frac{2P}{\pi D l \epsilon_t} \quad (5)$$

$$A = \left(1 - \frac{D}{L} \arctan \frac{2L}{D} \right) (1 - \nu) + \frac{2D^2(1 + \nu)}{4L^2 + D^2} \quad (6)$$

式中： D 为圆盘直径； L 为应变片半长度； ν 为压缩条件下的泊松比； P 为集中线荷载； l 为圆盘厚度； A 是一个与原盘、应变片尺寸相关的修正系数； E_s 被定义为劈裂模量，就是圆盘中心点拉应力-应变曲线中线弹性近直线部分的斜率。根据上述方法，试

验中只要记录荷载 P 和圆盘中心的拉伸应变 ϵ_t ，就可以非常方便地确定出岩石的拉伸弹性模量。

3 试验结果

3.1 试验样品

采用花岗岩、大理岩、砂岩 3 种典型的岩石类型来开展相关的试验测试工作。根据相关试验规范制作试块；为了保证每种试验结果的可靠性，每种岩石类型（3 种）的每种试验（4 种）平行开展 5 次，总共制作 60 件试样（见图 4）。单轴压缩试件加工为直径 50 mm、高度 100 mm 的标准圆柱形；直接拉伸试件为直径 50 mm、高度 140 mm 圆柱形；三点弯曲试件加工成方梁，尺寸为长 280 mm、高 60 mm、宽 30 mm；巴西劈裂试验试件是直径 50 mm、高度 25 mm 圆盘。

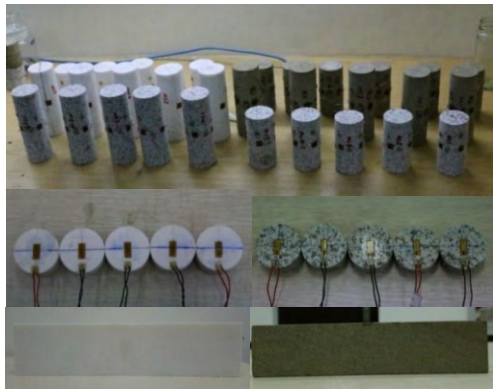


图 4 3 种岩石类型的压缩、拉伸、三点弯折和巴西劈裂试验的试件

Fig.4 A view of rock samples for UCT, DTT, three-point bending test and Brazilian disc test

本文对试件的编号遵循以下原则：①第 1 个字母表示岩石种类，M 表示大理岩，G 表示花岗岩，S 表示砂岩；②第 2 个字母表示试验种类，C 代表单轴压缩试验，T 代表直接拉伸试验，P 表示巴西劈裂试验，W 表示三点弯曲试验；③第 3 个数字代表该试件在平行试验中的顺序。

3.2 单轴压缩、直接拉伸试验结果

针对 3 种典型的岩石类型，一共开展了 15 个样品的单轴压缩、15 个样品的直接拉伸试验。图 5 展示了典型的试件压缩加载和破坏后形态。图 6 展示了典型的试件直接拉伸加载和破坏后形态。本研究中采用高强度胶水将试件和拉伸加载夹具牢牢地黏结在一起的方法，直拉试验取得了较高的成功率。从图 6 中展示的试件拉伸破坏形态来看，试件确实基本上是在中间部位被拉断，符合直接拉伸试验对试验成功的要求。下面分别分析大理岩、花岗岩和

砂岩的试验结果：

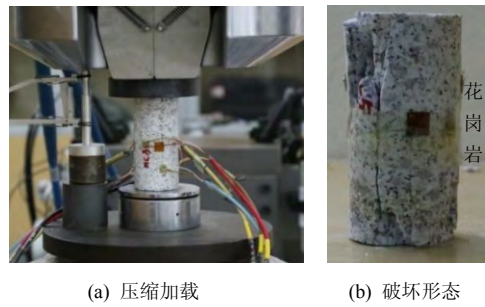


图 5 花岗岩压缩加载及试件破坏形态

Fig.5 A real view of UCT and typical failure model of rock samples after UCT

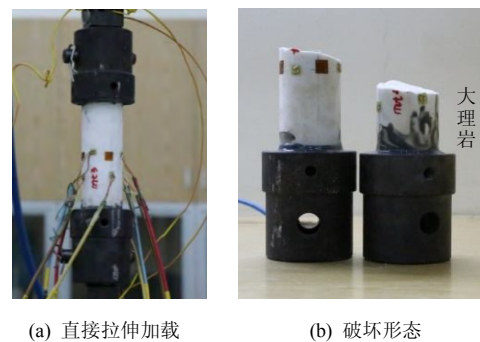


图 6 大理岩直接拉伸加载及试件破坏形态

Fig.6 A real view of DTT and typical failure model of rock samples after DTT

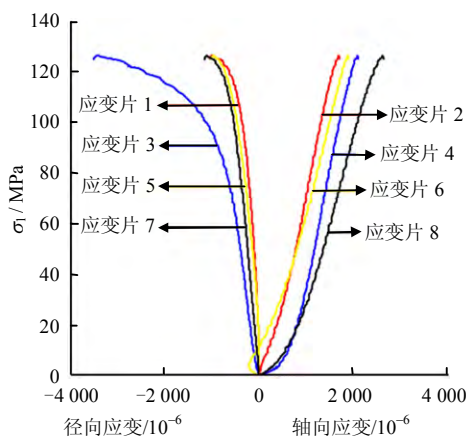
(1) 大理岩

单轴压缩和直接拉伸试验中大理岩的应力-应变典型曲线如图 7 所示。由于试样上粘贴了 4 对应变片，所以对每个试件可以得到 4 组应力-轴向或径向应变曲线。从图 7 中可以看出，对于同一件试件，4 对应变片所记录的应变并不完全相同，除了测量误差因素之外，最主要的原因肯定是试件的变形并不是均匀的；所以如果只粘贴一对应变片，对试件应变的测量可能存在很大的随机性，难以可靠表征整个试样的应变。每个试件的 4 组应变数据中，由于应变片粘贴不规范而难免出现质量很差的数据，对于该类数据，在数据处理过程中予以剔除；其余的应变数据进行平均后再用于确定岩石的弹性模量。

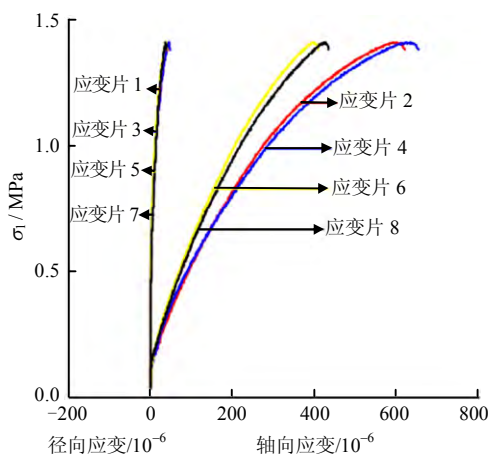
根据试验中记录的荷载和应变的时程曲线，可以确定出每个大理岩压缩试件的压缩弹性模量、抗压强度、压缩状态泊松比，或者拉伸试件的拉伸弹性模量、抗拉强度和拉伸状态泊松比。大理岩的测试结果列于表 1 中，可以看出该大理岩的抗压强度 σ_c 极高，平均为 107.6 MPa，但是抗拉强度 σ_t 却很低，只有 1.3 MPa；压、拉强度比值达到 83，压、拉弹性模量的比值为 17.2，较为少见。该大理岩取

自北京房山区，中国地质大学（北京）张中俭等^[21]大量测试过该大理岩的强度值，本文的测量值与他们所测的值比较接近，表明对该大理岩的测试是可靠的，但是为什么拉、压性能差距如此巨大，未来需要从该岩的微观结构、颗粒间的黏结矿物等方面进行研究。

方法一样，花岗岩压缩试件的压缩弹性模量、抗压强度、压缩状态泊松比，或者拉伸试件的拉伸弹性模量、抗拉强度和拉伸状态泊松比列于表 2 中。表 2 显示，该花岗岩的抗压、抗拉强度比值为 22.7，压、拉弹性模量比值为 2.52，拉压性能差异远小于大理岩。



(a) MC4



(b) MT2

图 7 大理岩单轴压缩试验和直接拉伸试验中典型应力-应变曲线

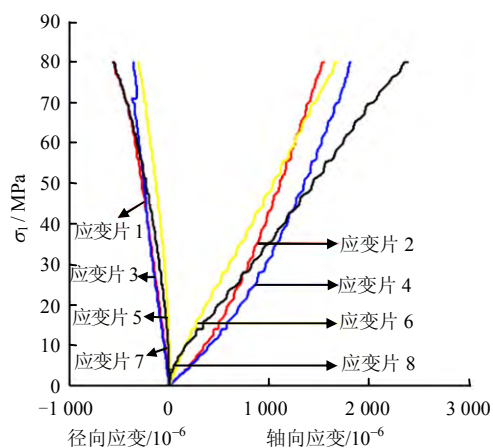
Fig.7 Typical stress-strain curves obtained from UCT and DTT for marble

表 1 大理岩压缩、直接拉伸试验测试结果
Table 1 Test results of UCT and DTT for marble

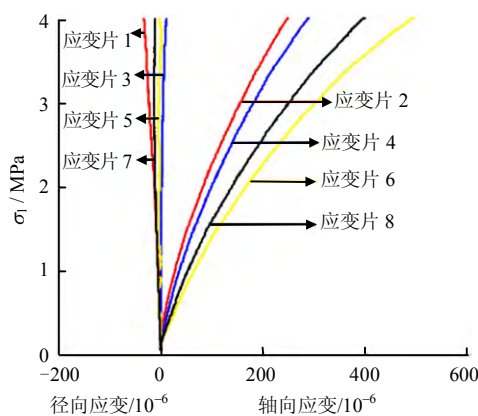
| 编号 | E_c / GPa | ν | σ_c / MPa | 编号 | E_t / GPa | ν | σ_t / MPa |
|-----|----------------|-------|---------------------|-----|----------------|-------|---------------------|
| MC1 | 66.0 | 0.28 | 123.7 | MT1 | 2.2 | 0.11 | 1.4 |
| MC2 | 51.7 | 0.27 | 98.8 | MT2 | 3.2 | | 1.4 |
| MC4 | 65.7 | 0.23 | 126.2 | MT3 | 4.3 | 0.05 | 1.4 |
| MC5 | 71.2 | 0.31 | 81.8 | MT4 | 3.7 | | 0.7 |
| | | | | MT5 | 2.7 | | 1.4 |
| 平均值 | 63.6 | 0.27 | 107.6 | 平均值 | 3.7 | 0.10 | 1.3 |

(2) 花岗岩

单轴压缩和直接拉伸试验中花岗岩的应力-应变典型曲线如图 8 所示。与处理大理岩的测试数据



(a) GC2



(b) GT1

图 8 单轴压缩试验和直接拉伸试验中花岗岩试样典型应力-应变曲线

Fig.8 Typical stress-strain curves obtained from UCT and DTT for granite

表 2 花岗岩压缩、直接拉伸试验测试结果
Table 2 Test results of UCT and DTT for granite

| 编号 | E_c / GPa | ν | σ_c / MPa | 编号 | E_t / GPa | ν | σ_t / MPa |
|-----|----------------|-------|---------------------|-----|----------------|-------|---------------------|
| GC1 | 39.7 | 0.19 | 70.6 | GT1 | 12.2 | 0.08 | 4.0 |
| GC2 | 48.6 | 0.17 | 80.5 | GT3 | 16.1 | 0.04 | 2.2 |
| GC3 | 25.3 | | 61.5 | GT4 | 16.2 | 0.04 | 3.8 |
| GC4 | 35.4 | 0.20 | 84.8 | | | | |
| GC5 | 37.7 | 0.20 | 70.5 | | | | |
| 平均值 | 37.3 | 0.19 | 74.7 | 平均值 | 14.8 | 0.05 | 3.3 |

(3) 砂岩

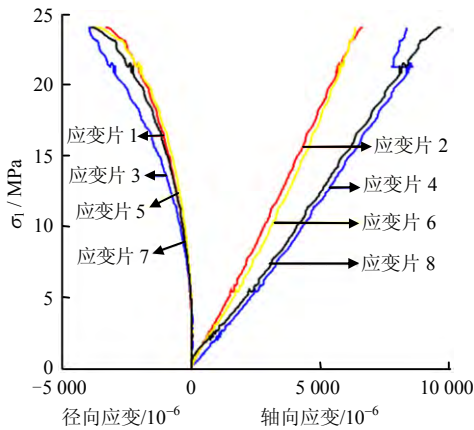
单轴压缩和直接拉伸试验中砂岩的应力-应变典型曲线如图 9 所示。花岗岩压缩试件的压缩弹性

模量、抗压强度、压缩状态泊松比，或者拉伸试件的拉伸弹性模量、抗拉强度和拉伸状态泊松比列于表3中。表3显示，该砂岩的抗拉强度也较小，均小于1 MPa；抗压、抗拉强度比值为40，压、拉弹性模量比值为1.13。该砂岩显示出来的拉压性能异同的特征和花岗岩类似，即强度上差距大，而弹性模量上拉压性能差异较小。

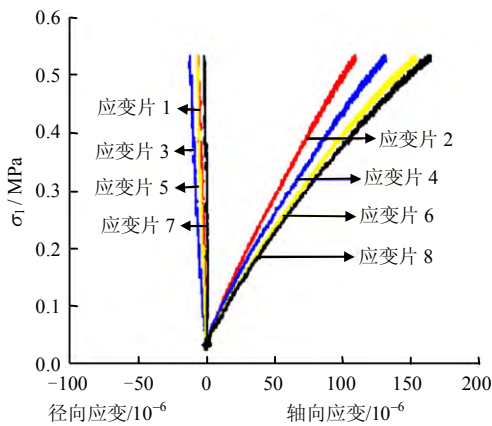
表3 砂岩压缩、直接拉伸试验测试结果

Table 3 Test results of UCT and DTT for sand stone

| 编号 | E_c /GPa | ν | σ_c /MPa | 编号 | E_t /GPa | ν | σ_t /MPa |
|-----|---------------|-------|--------------------|-----|---------------|-------|--------------------|
| SC1 | 3.4 | 0.14 | 24.0 | ST2 | 2.8 | 0.23 | 0.44 |
| SC2 | 3.8 | 0.23 | 20.5 | ST3 | 2.0 | 0.08 | 0.99 |
| SC4 | 4.0 | 0.16 | 24.7 | ST4 | 3.5 | 0.09 | 0.54 |
| SC5 | 3.2 | 0.10 | 21.4 | ST5 | 3.7 | 0.25 | 0.27 |
| SC6 | 2.7 | 0.13 | 21.6 | | | | |
| 平均值 | 3.4 | 0.15 | 22.4 | 平均值 | 3.0 | 0.16 | 0.56 |

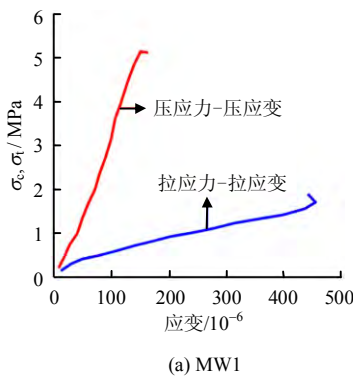


(a) SC1

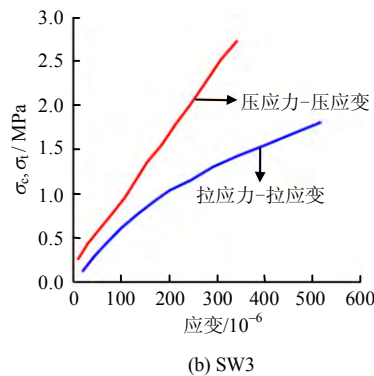


(b) ST4

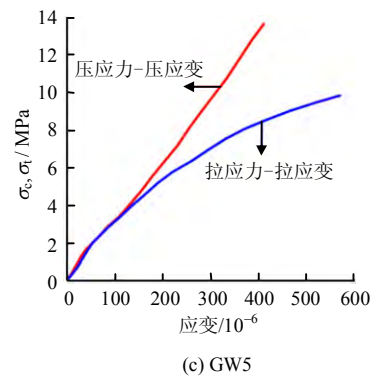
图9 单轴压缩试验和直接拉伸试验中砂岩试样典型应力-应变曲线
Fig.9 Typical stress-strain curves obtained from UCT and DTT for sand stone



(a) MW1



(b) SW3



(c) GW5

图11 三点弯曲试验中典型的应力-应变曲线

Fig.11 Typical stress-strain curves of marble, granite and sand stone obtained from three-point bending test

3.3 三点弯折试验结果

针对3种典型的岩石类型，一共开展了15个方梁试件的三点弯折试验，试验加载及试件破坏形态如图10所示。可以看出，方梁的破坏裂纹基本上是沿着加载面发展的，属于典型的拉伸破坏类型。由于方梁制样、应变片粘贴，试验操作等许多不可控因素，本次试验中只有6个试件的试验取得了成功，成功率较低。

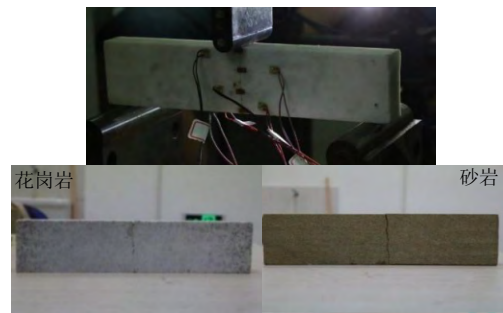


图10 三点弯折试验加载图及方梁试件破坏形态
Fig.10 Typical failure model of rock samples after three-point bending test

试验中记录的方梁顶部的压应力-压应变(1号应变片所记录)、方梁底部的拉应力-拉应变(4号应变片所记录)的典型关系曲线如图11所示。图中的压应力、拉应力是根据式(1)~(3)计算得出。根据试验中各个试件的应力-应变数据，即可得到该

试件的压缩、拉伸弹性模量，以及抗拉强度，所有测试结果列于表 4 中。

表 4 三点弯曲试验测得的拉、压弹性模量平均值
Table 4 Test results of three-point bending test for marble, granite and sand stone

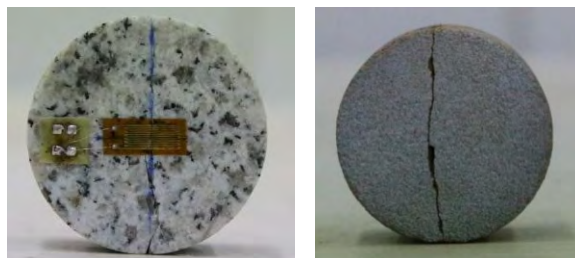
| 编号 | E_c / GPa | E_t / GPa | E_c / E_t | σ_t / MPa |
|-----|-------------|-------------|-------------|------------------|
| MW1 | 11.7 | 8.0 | 1.46 | 3.8 |
| MW2 | 31.4 | 4.0 | 7.89 | 1.8 |
| MW4 | 17.5 | 10.4 | 1.68 | 3.0 |
| 平均值 | 20.2 | 7.5 | 2.71 | 2.9 |
| GW1 | 53.4 | 24.1 | 2.21 | 8.2 |
| GW5 | 31.2 | 26.3 | 1.19 | 10.0 |
| 平均值 | 42.3 | 25.2 | 1.68 | 9.1 |
| SW3 | 8.8 | 5.2 | 1.71 | 1.8 |

从表 4 中看出，三点弯折试验测得的大理岩的压、拉弹性模量比值平均为 2.71，相比于单轴压缩和直接拉伸试验确定的压、拉弹性模量比值 17.2，三点弯折试验确定的比值大幅度减小。另外三点弯折试验测定的花岗岩、砂岩的压、拉弹性模量比值平均分别为 1.68、1.71；与单轴压缩和直接拉伸试验确定的比值较为接近，一定程度上表明采用三点弯折试验测量岩石材料的拉、压弹性模量具有可靠度。

3.4 巴西劈裂试验结果

针对 3 种典型的岩石类型，一共开展了 15 个圆

盘试件的劈裂试验，试件的破坏形态如图 12 所示。可以看出，圆盘破坏裂纹基本上是沿着竖直加载面发展的，属于典型的圆盘劈裂拉伸破坏。由于巴西劈裂试验制样方便，试验操作简单，该试验的成功率较高，只有 3 个试件的试验失败。



(a) 花岗岩 (b) 砂岩

图 12 巴西劈裂试验中圆盘试件的典型破坏形态
Fig.12 Typical failure model of rock samples after Brazilian disc test

试验中记录的圆盘中心拉应力-拉应变的典型关系曲线如图 13 所示。图中的圆盘中心拉应力是根据 $\sigma = 2P / \pi D l$ 公式计算确定的，其中 P 为施加的线荷载， D 为圆盘直径， l 为圆盘厚度。在图 13 中，可以确定出圆盘试件的劈裂弹性模量 E_s （由式 (5) 定义）。最终，根据修正系数 A 的式 (6) 和式 (4)，即可确定出每个试件的拉伸弹性模量，并列于表 5 中。

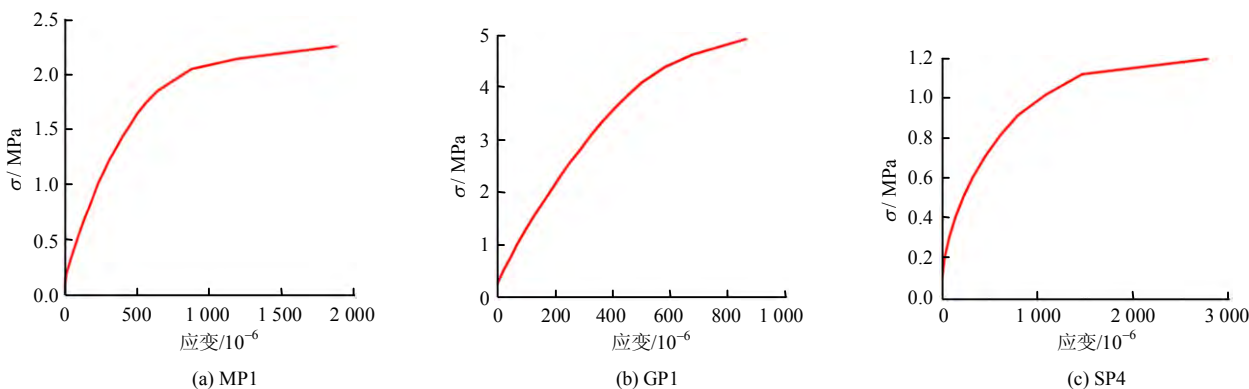


图 13 巴西劈裂试验中典型的应力-应变曲线
Fig.13 Typical tensile stress-strain curves at disc center in Brazilian disc test

表 5 中的泊松比来源于同种岩石的单轴压缩试验。表 5 显示大理岩、花岗岩和砂岩的拉伸弹性模量平均值分别为 6.2、13.5、2.5 GPa。由于 Ye 等^[13]所发展的方法只能测量材料的拉伸弹性模量，所以在该试验中无法得到压、拉弹性模量比。

3.5 对比分析

本文的研究工作通过一系列的直接拉伸、三点

弯折和巴西劈裂试验工作，已经获取了大理岩、花岗岩和砂岩 3 种岩石类型的拉伸弹性模量。本文开展这一工作的核心目的是要甄别出哪种试验方法能够方便、简单地测量出岩石材料的拉伸弹性模量。将单轴压缩、直接拉伸、三点弯折和巴西劈裂试验方法分别测得的 3 种岩石的压缩、拉伸弹性模量值同时列于表 6 中，用于对比研究分析。

表 5 巴西劈裂试验的测试结果

Table 5 Test results of Brazilian disc test for marble, granite and sand stone

| 试样 种类 | 编号 | E_c /GPa | ν | D /mm | L /mm | A | E_t /GPa |
|-------------|-----|------------|-------|---------|---------|------|------------|
| 大理 岩 | MP1 | 3.0 | | 49.8 | | | 5.1 |
| | MP2 | 3.6 | | 49.8 | | | 6.2 |
| | MP3 | 4.6 | 0.27 | 49.8 | 5 | 1.74 | 7.9 |
| | MP4 | 3.5 | | 49.8 | | | 6.0 |
| | MP5 | 3.3 | | 49.9 | | | 5.7 |
| | 平均值 | 3.6 | | | | | 6.2 |
| 花 岗 岩 | GP1 | 9.8 | | 49.7 | | | 14.7 |
| | GP2 | 8.3 | | 49.7 | | | 12.4 |
| | GP3 | 8.9 | 0.19 | 49.8 | 5 | 1.49 | 13.3 |
| | GP4 | 9.1 | | 49.9 | | | 13.6 |
| | 平均值 | 9.0 | | | | | 13.5 |
| 砂 岩 | SP1 | 1.7 | | 49.8 | | | 2.4 |
| | SP2 | | | 49.7 | | | |
| | SP3 | 1.8 | 0.15 | 49.8 | 5 | 1.38 | 2.5 |
| | SP4 | 1.9 | | 49.8 | | | 2.6 |
| | SP5 | | | 49.7 | | | |
| | 平均值 | 1.4 | | | | | 2.5 |

表 6 4 种试验测得拉压弹性模量结果对比

Table 6 Summarized test results of E_c and E_t determined by four types of test method

| 试样 种类 | 单轴压缩 E_c /GPa | 直接拉伸 E_t /GPa | 三点弯曲 | | 巴西劈裂 E_t /GPa |
|----------|--------------------|--------------------|------------|------------|--------------------|
| | | | E_c /GPa | E_t /GPa | |
| 大理岩 | 63.6 | 3.7 | 20.2 | 7.5 | 6.2 |
| 花岗岩 | 37.3 | 14.8 | 42.3 | 25.2 | 13.5 |
| 砂岩 | 3.4 | 3.0 | 8.8 | 5.2 | 2.5 |

因为直接拉伸是最为直接和可靠的测试方法,所以直接拉伸所测得的岩石拉伸弹性模量值在对比分析中应该作为标准值。对比发现,三点弯折试验测得的拉伸弹性模量普遍偏大 1.7~2.0 倍,而巴西劈裂试验测得的拉伸弹性模量普遍偏小,但很接近直接拉伸试验的测量值。除此之外,由于三点弯折试验的方梁试件制作起来非常不方便,试验操作也相对比较复杂,导致试验成功率较低。所以综合以上两个方面的因素,如果考虑时间、经费成本而不能开展直接拉伸试验,那么选择巴西劈裂试验方法测量岩石材料的拉伸弹性模量是优先推荐的方法。

4 结 论

为了甄别出测量岩石类材料拉伸弹性模量的较为合适的间接测试方法,针对大理岩、花岗岩和砂岩 3 种岩石类型,本文开展了一系列的单轴压缩、直接拉伸、三点弯折和巴西劈裂的试验工作,获取了大量的拉伸弹性模量实测值。通过对比分析,考

虑到测量的可信度、测试工作的时间、经费方面的成本,试验操作的简便性,本文推荐采用巴西劈裂试验方法测量岩石材料的拉伸弹性模量。

参 考 文 献

- [1] GERCEK H. Poisson's ratio values for rocks[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2007, 44(1): 1-13.
- [2] SUNDARAM P N, CORRALES J M. Brazilian tensile strength of rocks with different elastic properties in tension and compression[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 1980, 17(2): 131-133.
- [3] 卢波,王继敏,丁秀丽,等. 锦屏一级水电站地下厂房围岩开裂变形机制研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(12): 2429-2940.
LU Bo, WANG Ji-min, DING Xiu-li, et al. Study of deformation and cracking mechanism of surrounding rock of Jinping I underground powerhouse[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(12): 1198-1205.
- [4] 魏进兵,邓建辉,王悌劼,等. 锦屏一级水电站地下厂房围岩变形与破坏特征分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(6): 2429-2940.
WEI Jin-bing, DENG Jian-hui, WANG Di-kai, et al. Characterization of deformation and fracture for rock mass in underground powerhouse of Jinping I hydropower station[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(6): 2429-2940.
- [5] 陈士海,吴建. 双孔微差及长柱药包爆破振动数值模拟研究[J]. *爆破*, 2007, 34(3): 46-52.
CHEN Shi-hai, WU Jian. Numerical simulation study on vibration of double holes millisecond blasting and long cylindrical charge blasting[J]. *Blasting*, 2007, 34(3): 46-52.
- [6] 王雁冰,雷谦,杨仁树,等. 爆炸荷载下缺陷介质裂纹扩展规律数值分析研究[J]. *爆破*, 2007, 34(3): 1-6.
WANG Yan-bing, LEI Qian, YANG Ren-shu, et al. Numerical simulation research of crack propagation in media containing flaws under explosive load[J]. *Blasting*, 2007, 34(3): 1-6.
- [7] WU Fa-quan, HU Xiu-hong, GONG Man-fu, et al. Unloading deformation during layered excavation for the

- underground powerhouse of Jinping I Hydropower Station, southwest China[J]. **Bulletin of Engineering & Environment**, 2010, 69(3): 343—351.
- [8] WU Fa-quan, LIU Tong, LIU Jian-you, et al. Excavation unloading destruction phenomena in rock dam foundations[J]. **Bulletin of Engineering & Environment**, 2010, 68(2): 257—262.
- [9] 李炜, 尹建国. 一种测试岩石拉伸和压缩弹性模量的方法[J]. **岩土力学**, 1998, 19(3): 93—96.
- LI Wei, YIN Jian-guo. A method for measuring both tensile and compressive elastic modulus of rock-like material[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1998, 19(3): 93—96.
- [10] HONDROS G. The evaluation of Poisson's ratio and the modulus of materials of a low tensile resistance by the Brazilian (indirect tensile) test with particular reference to concrete[J]. **Australian Journal of Applied Science**, 1959, 10: 243—268.
- [11] 喻勇, 王天雄. 三峡花岗岩劈裂抗拉特性与弹性模量关系的研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2004, 23(19): 3258—3261.
- YU Yong, WANG Tian-xiong. Study on relationship between splitting behavior and elastic modulus of three Gorges granite[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(19): 3258—3261.
- [12] WANG Q Z, WANG X M, JIA S Q, et al. The flattened Brazilian disc specimen used for testing elastic modulus, tensile strength and fracture toughness of brittle rocks: Analytical and numerical results[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2004, 41: 245—253.
- [13] YE J H, WU F Q, SUN J Z. Estimation of the tensile elastic modulus of rock materials with Brazilian disc by applying opposite concentrate load diametrically based on isotropy[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2009, 46(3): 568—576.
- [14] LI D Y, WONG LOUIS N Y. The Brazilian disc test for rock mechanics applications: Review and new insights[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2013, 46(2): 269—287.
- [15] MING Feng, LI Dong-qing, ZHANG Ming-yi, et al. A novel method for estimating the elastic modulus of frozen soil[J]. **Cold Regions Science and Technology**, 2017, 141: 1—7.
- [16] TANKS J D, HARRIS D K, SHARP S R. Mechanical response of unidirectional composite bars loaded in transverse compression[J]. **Composites Part B: Engineering**, 2016, 97: 18—25.
- [17] CICEK B, TUCCI A, BERNARDO E, et al. Development of glass-ceramics from boron containing waste and meat bone ash combinations with addition of waste glass[J]. **Ceramics International**, 2014, 40(4): 6045—6051.
- [18] YE J H, ZHANG Y, JI H G, et al. Estimation of the bi-modulus of materials through deformation measurement in a Brazilian disk test[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2012, 52(4): 122—131.
- [19] MELENKA G W, CAREY J P. Evaluation of fiber reinforced cement using digital image correlation[J]. **PLoS One**, 2015, 10(6): e0128644.
- [20] ZHU D L, ZHOU L, ZHANG X R, et al. Simultaneous determination of multiple mechanical parameters for a DNAN/HMX melt-cast explosive by Brazilian disc test combined with digital image correlation method[J]. **Propellants, Explosives, Pyrotechnics**, 2016, 42(8): 864—872.
- [21] 张中俭, 杨曦光, 叶富建, 等. 北京房山大理岩的岩石学微观特征及风化机理讨论[J]. **工程地质学报**, 2015, 23(2): 279—286.
- ZHANG Zhong-jian, YANG Xi-guang, YE Fu-jian, et al. Microscopic characteristics of petrography and discussion on weathering mechanism of fangshan marble in Beijing[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2015, 23(2): 279—286.