

灰岩强度特性的三轴压缩试验分析

郭中华¹ 朱珍德² 余湘娟² 渠燕军² 张爱军²

(1. 东南大学交通学院, 江苏 南京 210096; 2. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 对灰岩进行三轴压缩试验, 分析与比较了其应力、应变关系曲线, 并进行了曲线拟合. 结果表明, 岩石的变形可以分为 5 个不同的阶段, 围压对岩石的应力、应变关系有一定影响, 用多项式函数拟合应力、应变关系曲线是比较理想的. 而依据岩石的应力、应变关系可以在一定的强度理论下得到强度参数 c, φ 值, 能为有关工程提供参考与借鉴.

关键词 三轴试验; 围压; 轴压; 应力、应变关系; 曲线拟合

中图分类号 :TU458⁺.3 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-1980(2002)03-0093-03

地壳中的岩石绝大多数是处于三向应力状态, 研究岩石在三向应力状态下的强度特征和变形特征, 对于岩石破坏机理的探讨等有重要的意义^[1]. 虽然在实验室中对岩石的单轴抗压、单轴抗拉等的强度试验都做了大量的工作, 但这些都是处于特殊的应力条件下, 为了使室内试验更接近岩体天然的三向应力状态, 需模拟类似的应力条件, 针对这一问题, 对多组灰岩做了三轴压缩试验, 分析了其应力、应变关系发展规律, 通过比较应力、应变曲线, 笔者分别对其进行了拟合.

1 试验仪器简介

本三轴试验在 RMT-150B 多功能刚性岩石试验机上进行, 该仪器是在美国 MTS 公司的岩石伺服试验机的基础上, 结合国情得以改进, 由中国科学院武汉岩土力学研究所研制的. 岩石三轴压缩试验设备的特点, 是除了有施加轴向压力的设备外, 还必须要有能够施加侧向压力的专门装置. 由各轴向施加的力而产生的轴向及横向应变有相互抵消作用, 使得试件变形、破坏都比较困难, 故试验机的吨位必须相应提高^[2]. 该仪器可施加轴压最大为 1000 kN, 围压最大为 50 MPa, 加荷方式为均布荷载. 围压 σ_3 利用气压通过航空油施加, 轴压 $\sigma_1 - \sigma_3$ 是在气压的基础上通过活塞机械施加.

2 试验结果与分析

2.1 岩石的变形

试验中采用正圆柱体的标准试件, 直径为 50 mm、高度为 100 mm 左右, 围压控制在 8 ~ 25 MPa 的范围内. 岩石的三轴压缩变形可以分成 5 个阶段: 压密阶段、弹性变形阶段、稳定破裂发展阶段、不稳定破裂发展阶段与强度丧失、完全破坏阶段. 岩石是一种微观不均质、多天然缺陷(微断裂)的物质. 在开始施加轴向压力时, 岩石被压密, 部分裂隙闭合, 岩石中孔隙比减小, 从而产生瞬间轴向压缩变形, 应力、应变曲线呈下凹状; 在侧向应力不大的条件下, 岩石表现出明显的线弹性, 当岩石被瞬时压密之后, 增加轴向应力 $\sigma_1 - \sigma_3$, 变形继续发展, 应力、应变关系曲线转为下降, 弹模为负值, 且逐渐增大趋于零. 岩石的变形不断积累以致于试件中出现贯通的破坏面, 强度减弱到残余强度. 当然, 各个试件的应力、应变关系曲线在局部不尽相同, 有的曲线出现下降后局部抬高的现象, 这是因为试件在开裂破坏时产生的轴向压缩变形, 在该处使原有的孔隙减小, 从而试件的承载力得到较小的提高. 显然, 这种情况并非岩石应力、应变关系的主要表征. 强调岩石的主要力学性质时, 可不予考虑. 通过不同围压下的应力、应变关系曲线可以看出, 随着围压的加大, 试件的最大轴向压力加大, 破坏时应变一般来说有所增大, 弹性模量和变形模量也增大, 不过, 这种递增的关系并非是线性的. 详细结果见图 1. 以上结果表明, 岩石的力学性质除了与矿物成分有关外, 还与它的结构及应力状态有密切

关系.在常温及低应力状态下,岩石可以视为弹性介质,在高温、高压、极高速或极低速加载条件下,岩石可能表现出非弹性性质^[3].过去一般认为,岩石应力达到破坏极限后,就完全丧失了承载能力.但事实证明,岩石在破坏点以后虽然岩石结构发生了变化,但仍保持一部分承载能力.在常规三轴压缩试验条件下,岩石的变形特征将受到围压的影响,随着围压的增加,峰值应力所对应的应变值有所增大,岩石的变形特征表现出低围压下的脆性向高围压下的塑性转换的规律.但弹性变形阶段的斜率随围压大小变化并不大,即弹模 E 和泊松比 ν 与单轴压缩下基本相同,从而,可以基于单轴压缩试验确定复杂应力状态下的弹性常数.

2.2 应力、应变关系曲线的拟合

工程上为简便起见,往往只是将应力、应变关系分成几段线性函数加以研究,笔者曾做了大量的灰岩三轴试验,得到了较为丰富的试验资料.通过对成百个试件的应力、应变曲线的分析、归类,结果表明,该灰岩的应力、应变曲线形状大致可以分为4组,可以很好地用多项式函数拟合曲线,即

$$\sigma_1 - \sigma_3 = a_N \varepsilon_1^N + a_{N-1} \varepsilon_1^{N-1} + \dots + a_1 \varepsilon_1 + a_0 \quad (1)$$

由于岩芯取样深度不同,试件所受围压不同,则该多项式函数的系数不同,应力、应变关系曲线形状也不同.结果见图2.

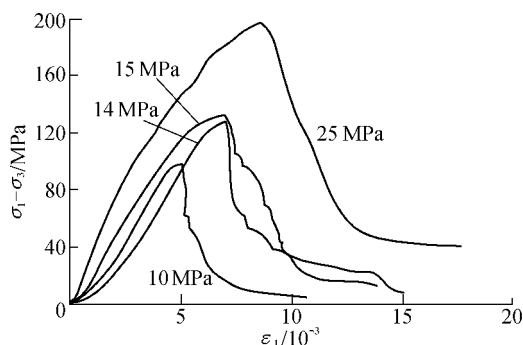


图1 应力、应变关系曲线

Fig.1 Stress-strain relationship

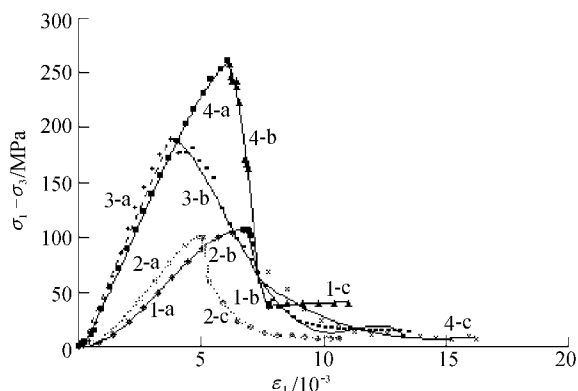


图2 应力、应变关系拟合曲线

Fig.2 Fitting of stress-strain relationship

2.3 岩石的强度特性

岩石的三向抗压强度是指在三向压缩应力作用下岩石抵抗外荷载的最大应力.目前,岩石的三向抗压强度难以用一个具体的显式函数给出,常常由试验结果来建立.

影响岩石三向抗压强度的因素主要有:矿物成分、试件尺寸、围压、加荷速率、应力路径、孔隙水压力、湿度及温度等.由于不同的矿物本身有着不同的强度,使得不同矿物组成的岩石,具有不同的三向抗压强度,比如,石英砂岩的抗压强度比灰岩的要大得多,不过,因受颗粒大小、胶结情况、生成条件等的影响,由相同矿物组成的岩石,其抗压强度也相差较大,同样含有石英颗粒的石英岩状砂岩的抗压强度就要比岩屑石英砂岩大.茂木认为,圆柱体试件在一个大气压下,岩石的强度随试件的高径比增大而显著降低,但当围压较高时,该影响将消失.本次试验中,高径比为2左右,试件内的应力分布较均匀,岩石三向抗压强度值已趋稳定,对其强度来说是合理的.随着围压的增大,岩石的强度普遍都升高,但均以非线性变化,一般地,较脆的岩石线性较强,塑性较大的岩石则线性较弱.关于加荷速率和应力路径的影响,由于围压的存在,使得远比单向压缩条件复杂,现今,仍无明确的说法,有待于对更广泛的岩石种类,采用更多的加荷速率和应力路径进行试验,才会有正确的结论.此外,岩石的三向抗压强度还随孔隙水压力的上升、湿度的存在、温度的增加而降低.

莫尔-库仑强度准则广泛运用于实际工程,通过灰岩圆柱体试件的三轴压缩试验,根据该准则,可求出该灰岩的强度参数 c 、 φ 值.笔者从8组50多个试件中选取了3组有代表性的试验数据,依据最小二乘法分析,回归得到了强度参数 c 、 φ 与试件平均尺寸 d 、 h 及平均弹性模量 E 的关系式(见图3),即

$$c = -41.14\sqrt{d} + 24.44\sqrt{h} + 17.76\ln E \quad (2)$$

$$\varphi = -63.04\sqrt{d} + 41.87\sqrt{h} + 25.54\ln E \quad (3)$$

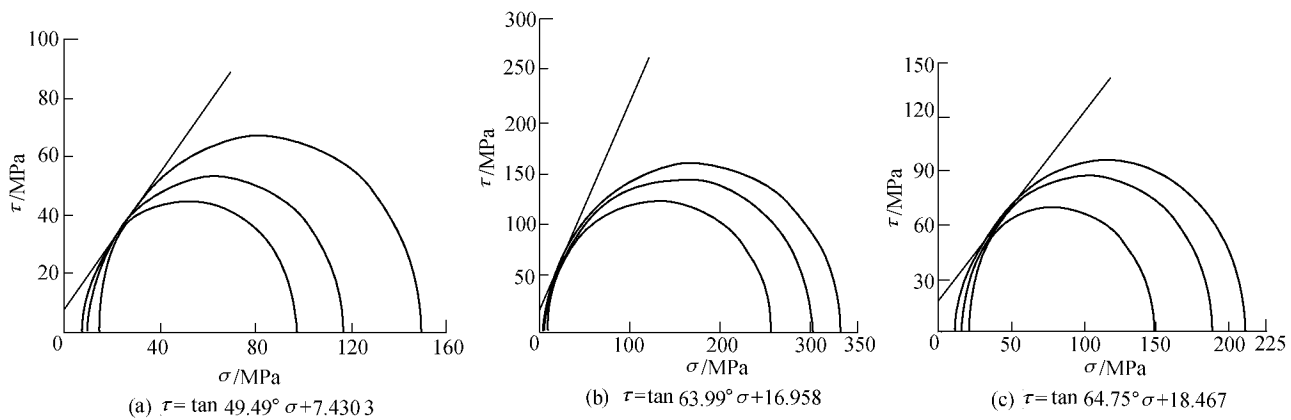


图 3 莫尔应力圆及包络线

Fig.3 Mohr stress circle and intrinsic curve

3 结 论

室内三轴压缩试验是对天然岩石三向受压状态的比较合理的反映,虽然常规三轴压缩试验只能研究轴对称的应力状态,但是可由该试验结果推求出岩石的粘聚力及内摩擦角这两个很重要的强度参数。

岩石的应力、应变关系全过程的探明,对于研究岩石强度理论、支护与岩体的相互作用,以及支护和矿柱设计都有十分重要的意义。

试验表明 (a)灰岩在三向压缩下的变形大致可分为 5 个阶段:压密阶段、弹性变形阶段、稳定破裂发展阶段、不稳定破裂发展阶段与强度丧失、完全破坏阶段。随着围压的提高,弹性段的斜率变化并不大,即弹模 E 和泊松比 ν 与单轴压缩下基本相同。因此,可以从单轴压缩试验确定复杂应力状态下的弹性常数。而屈服极限、峰值时的应变值、强度峰值和残余强度值,都与围压成单调增长关系,但并非非线性关系。(b)灰岩在各个阶段的应力、应变曲线都可以很好地用多项式函数进行拟合。(c)根据回归分析,可得到灰岩强度参数的关系式。

参考文献：

[1] 李先炜. 岩块力学性质 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1983. 181 ~ 200.

[2] 李世平, 吴振业, 贺永年, 等. 岩石力学简明教程 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1996. 11 ~ 13.

[3] 陶振宇. 岩石力学的理论与实践 [M]. 北京: 水利出版社, 1981. 95 ~ 99.

Analysis of Stress-Strain Relationships for Limestone by Triaxial Test

GUO Zhong-hua¹, ZHU Zhen-de², YU Xiang-juan², QU Yan-jun², ZHANG Ai-jun²

(1. Transportation College, Southeast Univ., Nanjing 210096, China;

2. College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract : The stress-strain relationships for limestone from triaxial tests are analyzed and compared, and curve fitting of the relationships is performed. The result shows that the deformation of limestone can be divided into five stages, that the confining pressure has a certain influence on the stress-strain relationships, and that the stress-strain relationships can be ideally fitted by polynomial functions. According to the relationships, the strength parameters c and φ can be obtained, providing a reference for related engineering projects.

Key words : triaxial test; confining pressure; axial stress; stress-strain curve; curve fitting