

岩石三轴压缩实验的强度特性及应用

李亚林, 高雷, 郭德顺, 颜玉定

(广东省地震局, 广东 广州 510070)

摘要: 结合实例对岩石三轴实验数据的一些主要特点和适合应用的领域进行了探讨。结果为: 岩石的三轴抗压、抗剪强度随围压(或深度)的增大而增大。低围压时, 呈线性增大; 当围压超过某一值后, 变为增长率逐渐下降的非线性增大; 至更高围压后, 抗压强度与围压的应力差、抗剪强度将趋于某一常数。岩石的单轴强度是强度中的极小值。工程应用中应采用三轴强度, 以降低造价、避免浪费。在现有的各种岩石力学实验方法中, 三轴实验得出的凝聚力 C 和内摩擦角 ϕ 相对最准确。岩石三轴实验数据在与地学相关的领域内有着广泛的用途。

关键词: 岩石; 压缩实验; 三轴强度; 凝聚力; 内摩擦角; 破裂角

中图分类号: P315.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8662(2006)04-0074-05

前言

岩石三轴压缩实验(简称三轴实验), 实质是对处于三向受压环境中的地壳岩体的力学性状的一种模拟。相对于其它一些所谓的常规实验, 三轴实验属较复杂的高级实验, 它可以获取相应于岩体不同围压(或深度)的抗压强度、抗剪强度、弹性模量、泊松比以及准确的凝聚力 C 和内摩擦角等数据。若使用三轴伺服压力机, 还能得到应力—应变($\sigma - \epsilon$)的全程曲线, 进而获得岩石的残余应力、永久变形数据等。这些都是一些重大工程建设、岩石力学和某些地学项目研究及应用中必不可少的重要参数。

本文结合实例, 对三轴压缩实验的岩石强度(下称三轴强度)等数据的特性及其在工程中的应用作一些探讨。

1 岩石三轴强度

虽然目前已有多个力学强度理论, 但尚无适用于各种材料的力学强度理论。实用中, 通常根据不同的材料选择不同的强度理论。实践证明, 在诸多强度理论中, 摩尔强度理论比较适用于拉伸与压缩强度不相等的岩石之类的脆性物质。因此在工程和岩石力学实验中被广泛应用。通常在岩石实验中把摩尔强度称为三轴强度。

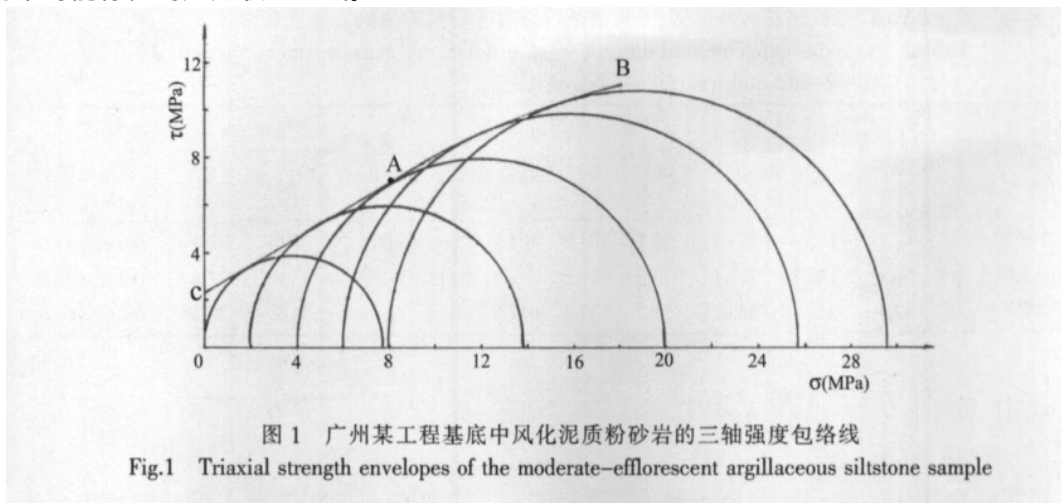
收稿日期: 2006-11-20

作者简介: 李亚林(1979-), 男, 助理工程师. 主要从事地震监测.

1.1 摩尔强度理论简介

1900 年，由德国工程师摩尔（Mohr）创立的强度理论，被后人称为摩尔强度理论。

以广州某重大工程基底中风化泥质粉砂岩的三轴强度包络线图（图 1）为例，对摩尔强度理论的一些具体内容作一简述：图中横坐标 σ 为正应力、纵坐标 τ 为剪应力。曲线 CAB 为强度包络线。与包络线相切的每个应力圆均表示一种围压下的极限应力状态。圆与横坐标的左侧交点为围压 σ_3 ，右侧交点为该围压下的抗压强度 σ_c （ σ_1 ）。过切点的半径与横坐标正方向的夹角为 2 倍破裂角，破裂角定义为破裂面法线与主应力 σ_1 方向所夹的锐角。本文称此为理论破裂角 θ 。切点的纵坐标为该圆所在围压下的抗剪强度 τ ，亦即破裂面上的剪应力 τ ，横坐标为破裂面上的正应力 σ_n 。包络线与纵坐标的交点为凝聚力 c ，直线 CA 与横坐标所夹的锐角为内摩擦角 ϕ 。包络线下部是不会发生破裂的、稳定的应力状态区域，上部为不可能存在的应力状态区域。



1.2 岩石三轴强度的特点

表 1 为中风化泥质粉砂岩的部分三轴实验结果和相关数据。结合图 1 和表 1 阐述岩石三轴强度的特点：

表 1 中风化泥质粉砂岩部分三轴实验数据

Table 1 Triaxial experimental data of the moderate-efflorescent argillaceous siltstone

围 压 σ_3 /MPa	抗压强度 σ_c /MPa	抗剪强度 τ /MPa	凝聚力(c)和内摩擦角(ϕ)			破裂角($^\circ$)	
			c /MPa	ϕ ($^\circ$)	适用范围 (MPa)	实际	理论
0	7.7	3.3				90	90
2	13.9	5.2				60	60
4	20.1	6.8	2.2	30.5	$0 \leq \sigma_3 \leq 5.2$	55	60
6	25.7	9.1				60	56
8	29.6	10.3				60	54

(1) 随着围压的增加，岩石的抗压、抗剪强度不断增大。

在低围压 [如图 1 的 CA 段 ($0 \leq \sigma_3 \leq 5.2$ MPa)] 时， σ_3 与 σ_c 、 τ 的关系近似呈线性。

$\Delta\tau/\Delta\sigma$ 为常数, τ 与 α_h 的关系式为

$$\tau = c + \alpha_h \operatorname{tg} \Phi \quad (1)$$

式中凝聚力 c 即为 $\alpha_h = 0$ 时的极限剪应力, $\Phi = \operatorname{tg}^{-1} (\Delta\tau/\Delta\sigma)$ 。

当围压超过某一值后 (如图 1 的 A 点后, $\alpha_3 > 5.2 \text{ MPa}$), α_3 与 α_h 、 τ 不再呈似线性关系, $\Delta\tau/\Delta\sigma$ 随 α_3 的增大而逐渐变小, 式 (1) 已不再适用。至更高围压后, $\Delta\tau/\Delta\sigma$ 将趋于 0, τ 、 α_h 、 α_3 将趋于某一常数。

(2) 围压为 0 的强度即为单轴强度, 是强度的极小值 (参见表 1)。

表 2 为经我们实验的 3 种微风化的花岗片麻岩、花岗岩质混合岩和石英砂岩的三轴实验数据。虽因岩石不同, 数据也不同 (作出的包络线也不同), 但它们的数据和包络线的变化特点都与上述中风化泥质粉砂岩的相同。

表 2 微风化花岗片麻岩、花岗岩质混合岩和石英砂岩的三轴实验数据
Table2 Triaxial experimental data of weak efflorescent granite-gneiss, granitic
chorismite and quartz-sandstone

α_3 /mpa α_1 /mpa	0	20	40	60	80	100	120	140	凝聚力 c 和内摩擦角 Φ		
									c (MPa)	Φ ($^\circ$)	适用范围 (MPa)
花岗片麻岩	82.1	155.4	229.1	296.7	360.0	404.8	—	480.6	21.6	35.3	$0 \leq \alpha_3 \leq 47.6$
花岗岩质混合岩	66.4	139.8	229.1	336.6	421.2	—	574.6	623.3	15.6	42.4	$0 \leq \alpha_3 \leq 60.8$
石英砂岩	132.4	249.4	343.1	454.8	522.6	547.5	603.6	633.4	31.5	42.1	$0 \leq \alpha_3 \leq 63.6$

2 应用探讨

在实际应用中, 我们更习惯于将一些物理指标与岩体的深度相关联, 因此常将围压换算成对应的深度^[4]。可视岩体为弹性体, 用广义虎克定理, 经简单的推导并代入岩石的力学、物理参数, 便可算得。

2.1 一般的工程应用

2.1.1 应用分析

就一般的工程而言, 与其有关的岩体深度不会太大, 通常均处于包络线的线性段, 式 (1) 适用。以图 1 的中风化泥质粉砂岩的三轴实验结果为例, 包络线的 CA 为线性段, 围压约为: $0 \leq \alpha_3 \leq 5.2 \text{ MPa}$, 深度 h 约为: $0 \leq h \leq 690 \text{ m}$ 。

(1) 在一般工程的地基承载力设计中, 所用的岩石抗压强度, 大多取用单轴强度。上已述及, 单轴强度是强度中的极小值。它可能导致地基的持力层加深, 或使本可位于强风化岩层内的持力层, 延伸至中风化甚至微风化岩层内。无疑使工程造价大幅度增加。若应用三轴抗压强度就可避免此类不合理的选择不必要的浪费。一个典型的例子^[2]: 某工程要求地基持力层的岩石抗压强度为 19.6 MPa (2000 tf/m^2)。若采用单轴抗压强度, 即使在 180 m 的深度, 仍达不到要求, 而用三轴抗压强度, 仅在 20 m 就能满足要求了。

(2) 由三轴抗压强度实验可得到理论破裂角 θ , 此 θ 即为破裂面的倾角。可为工程设计者提供应作重点应力分析的剖面。如岩体内存在薄弱结构面, 此薄弱面的倾角若与 θ 相近,

应视为潜在的活动结构面，在设计和监测中要予以特别重视。

理论上，无论取自何处的岩石，只要试件较均质，在单轴抗压强度实验中的 θ 都是 90° 。此破裂角度仅代表地表岩石，用于地下岩体极有可能带来错误。

2.1.2 在工程基础稳定性中应用

在工程基础、边坡和地下工程的稳定性分析中，凝聚力 c 和内摩擦角 ϕ 是不可缺少的重要参数。由岩石三轴实验得到的 c 、 ϕ 值，其准确性和权威性是目前其它实验方法难以企及的。

残余应力、永久变形等数据可为工程地基的许用承载力和允许位移量提供设计参考。

破裂角 θ 可作为一些地质灾害评估的重要分析依据。

岩石的三轴抗剪强度可作为预防滑坡等防灾工程的有用参数。

2.2 在地震科学中的应用

国内外多次大震的灾害分布特征表明，在建筑物抗震设计和施工质量得到保证的条件下，地震断层错动引起的地表破裂或地基失效在建构筑物破坏中的作用较为突出^[3]。

与岩石三轴强度包络线相切的每一个应力圆，均代表着一种特定条件下的极限应力状态。该应力状态为地震震源的研究提供了许多有意义的参考数据^[4]。如地震时的构造应力、震源破裂面方位（与主应力 σ_1 方向的夹角）、 σ_1 以及震源破裂面内正、剪应力的的大小等。这些实验结果对研究断层的破裂方向和错动形式都有一定意义。

另外，在地面运动随机模拟等方法中，需要考虑应力降等参数^[5]，由 σ - ε 曲线中可得到岩体的体应变和扩容资料、粘滑信息以及残余应力、永久变形等数据，为应力降的研究和其它地震参数的估计提供重要的参考依据。

3 结论与讨论

3.1 结论

自摩尔强度理论创立以来的 100 多年间，按此理论进行的大量岩石三轴压缩实验（包括我们的许多实验），均可证实或得到下述结论：

（1）岩石的三轴抗压、抗剪强度随围压（或深度）的增大而增大。低围压时，强度随围压的增加而线性地增大；当围压超过某一值后，变为增长率越来越小的非线性增大；至更高围压后，抗剪强度 τ 和抗压强度与围压的应力差（ $\sigma_1 - \sigma_3$ ）将趋于某一常数。

（2）岩石的单轴强度是强度中的极小值。工程应用中应采用三轴强度，以降低造价、避免浪费。

（3）在现有的各种岩石力学实验方法中，三轴实验得到的岩石的凝聚力 c 和内摩擦角 ϕ 相对最准确。

（4）岩石三轴实验数据在与地学相关的领域内有着广泛的用途。

3.2 讨论

岩石内不但存在着孔隙、裂隙，而且组成岩石的矿物常常也是多种多样，且颗粒的大小不一，胶结物和胶结程度亦不同，说明岩石并非是均质的、各向同性的真正弹性体，只能算得上亚弹性体。因此，一些借助于弹性理论计算出的物理量，与实验或由实验数据计

算的结果总会有着一定的误差。在一般工程应用和地震科学应用中必须充分考虑这一因素。

参考文献：

- [1] 尹祥础. 固体力学 [M]. 北京：地震出版社，1988.
- [2] 颜玉定，廖远群. 工程建设中岩石三轴强度的应用问题 [J]. 广东土木与建筑，2000，增刊：171- 176.
- [3] 姜慧，沈军，俞言详，等. 逆断层地震近场地震动影响场和地表形变模拟 [J]. 地震工程与工程震动，2006，26（1）：11- 17.
- [4] Yan Yuding, Li Yalin, Zhang Zhuan et al, Experiment on Hydraulic Fracturing in Rock and Induced Earthquake, Earthquake Research in China, 2005, 19（4）：354-370.
- [5] 姜慧，胡聿贤，赵凤新，等. 用随机模拟方法研究设定地震的地面运动参数 [J]. 地震工程与工程震动，2006，26（3）：44- 46.

Strength Characteristics and Application of Rock Triaxial Compression Experiment

LI Yalin, GAO Lei, GUO Deshun, YAN Yuding

(Earthquake Administration of Guangdong Province, Guangzhou 510070, China)

Abstract： In this paper, we discuss the characteristics and application of rock triaxial strength test with the laboratorial examples. The experimental results are shown as follows. The rock triaxial compression and shearing strengths are shown increment with the confining pressure (depth). Under the low confining pressure, the strengths increase linearly. But when the confining pressure is over the limit, the strengths increase nonlinearly with the accretion rate gradually going down. Under the higher confining pressure, the shearing strength and the differential stress between the compression strength and confining pressure tend to be the constant. The rock uniaxial strength is the minimum in the all. So the triaxial strength should be applied in the engineering in order to reduce the cost and avoid wasting. In all of present rock mechanics experimental methods, the cohesion (C) and angle of internal friction (Φ) from the triaxial experiment is relatively best precise. The data from rock triaxial test are benefit to the study of the domain correlative to the geology.

Keywords: Rock; Compression experiment; Triaxial strength; Cohesion; Internal friction angle; Fracture angle