

文章编号: 1000-7598-(2007) 01-0107-04

膨胀性泥岩应力-应变关系的试验研究

李杭州¹, 廖红建^{1,2}, 孔令伟², 冷先伦²

(1. 西安交通大学 土木工程系, 西安 710049; 2. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 武汉 430071)

摘 要: 通过应变控制式固结不排水三轴试验, 测定并分析了膨胀性泥岩的应力-应变关系以及强度变化特性, 结果表明, 膨胀性泥岩的应力-应变曲线呈应变软化型, 泥岩中的裂隙结构面等是影响泥岩强度的重要因素, 说明了膨胀性泥岩不同的破坏模式对应着不同的应力-应变曲线; 还说明了峰值强度、残余强度以及残余强度比是随围压的变化而变化的; 孔隙水压力变化分为 3 个阶段。通过控制不同的剪切速率的固结不排水三轴试验, 研究和分析了应变率对应力-应变关系、强度变化特性以及孔隙水压力的变化。

关 键 词: 膨胀性泥岩; 应变软化; 强度; 剪切速率

中图分类号: TU 458^{+.3}

文献标识码: A

Experimental study on stress-strain relationship of expansive mud-stone

LI Hang-zhou¹, LIAO Hong-jian^{1,2}, KONG Ling-wei², LENG Xian-lun²

(1. Department of Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Based on strain control consolidated undrained triaxial tests, stress-strain relationship and strength characteristic of expansive mud-stone are investigated and analyzed. The results show that the stress-strain relationship appears strain softening, and joints in mud-stone are important factor that influences strength characteristic. Different failure modes have different stress-strain relationships. Furthermore, the results also show that the peak strength, residual strength and residual strength ratio change with variation of confining stress, and development of pore pressure has three stages. By controlling shear speed ratio of triaxial test, influences of shear speed ratio on the stress-strain relationships and strength characteristic are discussed.

Key words: expansive mud-stone; strain softening; strength; shear speed ratio

1 引 言

膨胀岩是指在水的物理化学作用下易产生体积膨胀、破碎和分解的一类岩石, 从发生膨胀的机理可以分为两大类, 一类为化学转化为膨胀岩; 另一类指含有较多的亲水矿物的黏土质岩石。泥质膨胀岩是属于易风化和软化的软弱岩石, 当岩体受到扰动后, 特别是环境湿度和压力条件变化时, 膨胀岩的性状将发生较大的改变, 产生体积膨胀和收缩, 对位于其上的工程建筑物产生很大的危害性, 严重影响工程的稳定性。膨胀岩在我国范围内分布较广, 先后在 20 多个省市发现膨胀岩, 由于这些膨胀岩的胀缩性, 给这些地区的工程带来了极大的灾害, 造

成这些灾害的原因主要是对膨胀岩的变形及力学特性等还不清楚。

目前有关硬岩及软岩的应力-应变关系的研究较多, 但由于膨胀泥质岩取样及运输容易受到扰动, 因此, 对于泥质膨胀岩的应力-应变关系研究尚不多见, 本文的目的就是通过对原状膨胀泥岩进行应变控制式固结不排水三轴试验, 测定膨胀性泥岩的应力-应变关系及强度变化特性, 以及孔隙水压力的变化, 进而分析膨胀性泥岩的应力-应变关系、裂隙等软弱结构面对强度的影响, 以及膨胀性泥岩的破坏模式。在此基础上进一步通过不同的控制应变速率的固结不排水三轴试验, 研究应变率对应力-应变关系和强度变化特性。

收稿日期: 2005-01-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50379043), 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学重点实验室基金项目 (No. Z110503)。

作者简介: 李杭州, 男, 1977 年生, 博士研究生, 主要从事岩土材料强度特性方面的研究工作。

2 试验条件

所用试样采自广西南宁地区强风化膨胀性泥岩, 取岩深度在 4 m 左右, 其直径为 10 cm, 高为 20 cm 的岩样, 在试验室内制成直径为 5 cm, 高为 10 cm 的圆柱试样, 试样完全饱和, 进行不同围压下的固结不排水三轴剪切试验。其颗粒大小分布曲线见图 1, 主要物理力学参数指标见表 1。

表 1 泥岩物理力学指标

Table 1 Physico-mechanical properties of soil rock

密度	含水量	液限	塑限	孔隙比	自由膨胀率
$\rho_0 / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$w_0 / \%$	$w_L / \%$	$w_P / \%$	e_0	$/ \%$
2.032	22.98	62.98	15.73	0.67	60

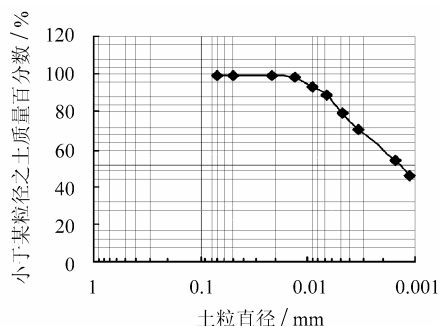


图 1 颗粒大小分布曲线

Fig.1 Distribution curves of particle size

3 试验结果及分析

3.1 应力-应变分析

根据泥岩的单轴压缩试验及固结试验可以确定其前期固结压力约为 0.75 MPa。泥岩固结不排水剪切试验的应力-应变曲线如图 2 所示。从图中可以看出, 泥岩的应力-应变曲线呈现应变软化型, 同普通软岩的应力-应变关系相比^[1], 膨胀性泥岩的应变软化现象并没有随围压的增大而有减弱的趋势, 且试验结果具有较大的离散性, 与文[2, 3]有着同样的结果, 这主要是由于在取样和运输过程中的不可避免地扰动, 以及泥岩中存在一些裂隙及结构面有关, 而裂隙和软弱结构面是影响其强度的主要因素, 这与文[2]中指出的将原状膨胀土的强度区分为土块强度、裂隙面强度和软弱面强度的观点一致。在制样时可以观察到岩样中存在大量的植物残骸, 以及一些软弱结构面, 甚至还有一些土建所遗留的水泥砂等, 这进一步验证膨胀泥岩中的裂隙及结构面对泥岩的强度有着明显的影响。而且其不同的应力-应变曲线形式对应不同的破坏方式, 其中几种典型的破坏模式如图 3 所示, 图 3(a)类型呈 X 型破坏, 所对应应力-应变曲线形状为在泥岩达到峰值强度

后, 有微弱的软化, 随后强度又逐渐升高; 图 3(b)类型有一个明显的剪切带, 另外还有一条横向的裂隙, 其应力-应变具有软化现象, 而后在强度接近应变 15 % 时又有回升现象; 图 3(c)类型有两个明显的剪切带, 所得的应力-应变曲线具有明显的软化现象; 图 3(d)类型出现大量的裂隙, 所对应应力-应变曲线为硬化曲线; 图 3(e)类型具有一个剪切带, 其应力-应变曲线为应变软化型。根据图 3 也可以得出泥岩中的裂隙以及结构面不仅影响着应力-应变关系, 而且还影响着泥岩的破坏模式。文[4]对硅藻质软岩试样进行人工切割成含结构面试样进行固结不排水三轴试验, 结果表明, 结构面对软岩的应力-应变关系及强度有着明显的影响。

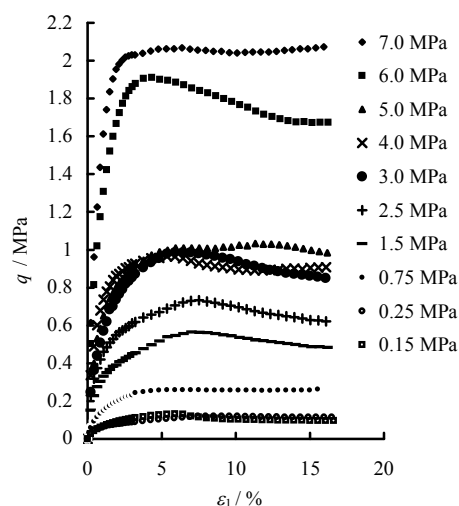


图 2 应力-应变关系

Fig.2 Stress-strain curves

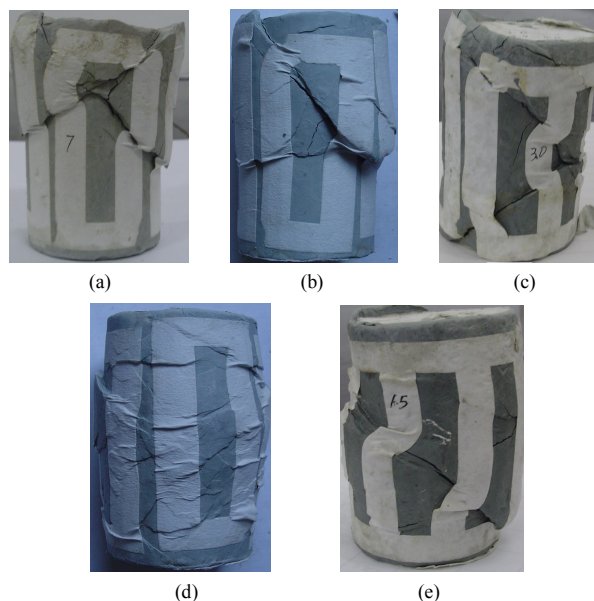


图 3 膨胀泥岩的剪切破坏模式

Fig.3 Failure modes of expansive mudstone

3.2 强度特性及强度参数

从图2可以看出, 泥岩峰值强度 q_t 随着围压的增大越来越大。假设以轴向应变为15%所对应的偏应力为残余强度值 q_r , 则 q_r 同样随着围压的增大而增大, 且随着应变的增大趋于一定值。把残余强度与峰值强度的比称为残余强度比, 由图2整理出峰值强度、残余强度、以及残余强度比和围压的关系如图4所示。可以看出, 峰值强度和残余强度均随围压的增大呈线性增大趋势, 且两者几乎平行, 整理出的残余强度比几乎为一定值, 可见, 在正常固结状态下, 膨胀性泥岩的峰值强度和残余强度随围压的增大幅度几乎一致。而文[4]中硅藻质软岩正常固结状态下的残余强度比随着围压的增大而增大, 增长趋势较为明显, 由此可以看出, 不同的软岩具有不同的强度特性, 它取决于软岩的性质。

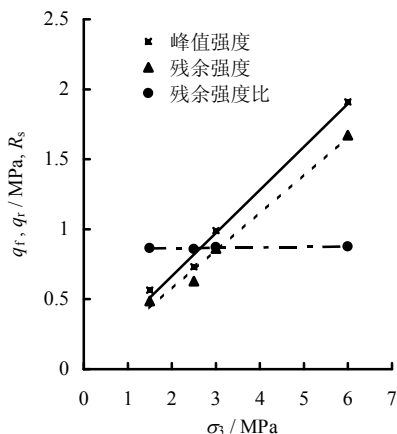


图4 峰值强度、残余强度、残余强度比与围压的关系
Fig.4 Relationship between peak strength, or residual strength, or residual strength ratio and confining pressure

3.3 孔隙水压力的影响

膨胀性泥岩的孔隙水压力与应变的关系如图5所示, 从中可以看出, 孔隙水压力的变化可以分为3个阶段。在最初阶段孔压增长较为缓慢, 此时应力-应变基本上呈线性关系; 而后孔隙水压快速增长, 其对应着应力-应变的峰值阶段; 随后随着剪切的进行孔隙水压的增长又逐渐缓慢下来, 最后趋于一定值, 它对应着应力-应变的软化阶段。正是由于这种孔隙水压在达到峰值强度后仍然逐渐增大, 从而导致其强度降低, 直至达到变形的稳定状态而维持其稳定强度^[5]。在孔隙水压力第1、第2阶段, 随着剪切的进行, 软岩内的微裂隙的不断增长发育, 这对微裂隙水压力的变化起这主要的控制作用, 从而使得孔隙水压力增长较快; 在第3阶段, 软岩的强度达到峰值, 软岩内出现大的裂隙, 进而产生剪

切面, 直至到残余破坏状态, 在这一过程中, 孔隙水压力的变化取决于软岩剪切过程中大裂隙及其剪切面, 因此, 孔隙水压力增长较为缓慢。

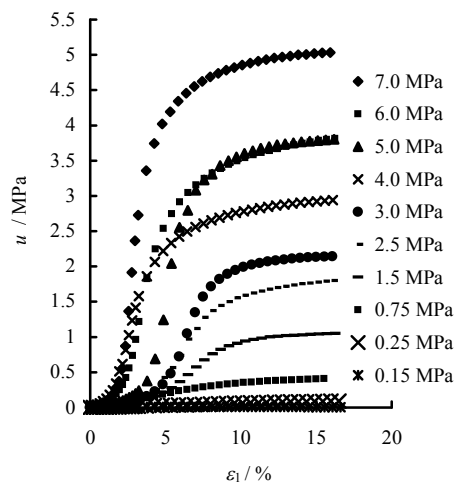


图5 孔压-应变关系曲线
Fig.5 Pore pressure-strain curves

3.4 应变率对膨胀性泥岩的应力-应变关系的影响

为考虑时间对软岩应力-应变的影响, 在三轴仪上做了不同应变速率的固结不排水剪切试验, 试验结果如图6所示, 孔压-应变关系如图7所示。

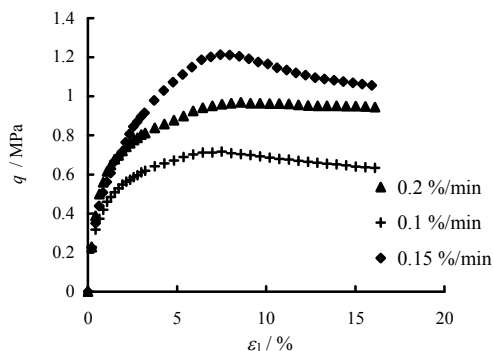


图6 不同应变率下应力-应变曲线
Fig.6 Stress-strain curves under different strain ratios

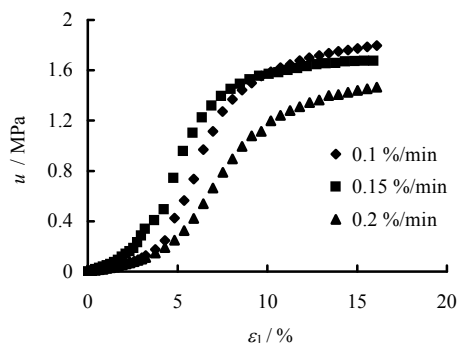


图7 不同应变率下孔压-应变曲线
Fig.7 Pore pressure-strain curves under different strain ratios

可以看出,不论在何种速率下膨胀性泥岩均呈现应变软化型。在速率大于 $0.15\%/\text{min}$ 时,峰值强度随应变速率的增大而增大,在应变速率大于 $0.15\%/\text{min}$ 时,峰值强度随着应变速率的增大而减小,这说明膨胀性泥岩的强度并不是随围压的增大一直在增大,而是存在一个门槛值,当控制应变速率小于该值时,泥岩的峰值强度随速率的增大而增大;大于该值时,峰值强度随控制应变速率的增大而减小。文[6]中对结构性黏土变控制速率剪切试验中峰值强度随应变速率的变化存在同样的规律,该文中把这个门槛值称为临界应变速率软化。峰值强度随应变速率变化的这一现象是土的黏滞性、触变性、结构性、以及固结压力等共同作用的结果,当应变速率较高时,触变效应明显,黏滞性减小,土体颗粒之间的变形加大,这是临界应变速率软化的主要原因^[6]。

4 结 论

(1) 试验表明,膨胀性泥岩具有应变软化特性,试样中的裂隙结构面影响着泥岩的强度及破坏方式,并使得试验结果具有离散性。

(2) 膨胀性泥岩孔隙水压力变化可以分为 3 个阶段,最初孔压增长较为缓慢,然后快速增长,最后又逐渐平缓,而且其变化与应力-应变关系变化相对应。

(3) 应变速率的变化对膨胀性泥岩的应力-应变关系有着明显的影响,它存在一个门槛值,当应变速率小于该值时,泥岩的强度随应变速率的增大而增大,大于该值时强度随应变速率的增大而减小。

参 考 文 献

- [1] 廖红建, 宁春明, 俞茂宏, 等. 软岩的强度变形时间之间的关系试验研究[J]. 岩土力学, 1998, 19(2): 8—13.
LIAO Hong-jian, NING Chun-ming, YU Mao-hong, et al. Experimental study on strength-deformation-time relationship of soft rock[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1998, 19(2): 8—13.
- [2] 卢再华, 陈正汉, 曹继东. 原状膨胀土的强度变形特性及其本构模型研究[J]. 岩土力学, 2001, 22(3): 339—342.
LU Zai-hua, CHEN Zheng-han, CAO Ji-dong. A study on strength and deformation characteristic and constitutive model of natural expansive soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2001, 22(3): 339—342.
- [3] 河满潮, 冷曦晨, 衡朝阳, 等. 延边地区公路沿线膨胀性软岩的发现与试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7): 1 151—1 155.
HE Man-chao, LENG Xi-chen, HENG Chao-yang, et al. Research on expansive soft rock in Yanbian region[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(7): 1 151—1 155.
- [4] 廖红建, 韩波, 高小育, 等. 软岩中断裂面对应力应变关系的影响[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(3): 362—365.
LIAO Hong-jian, HAN Bo, GAO Xiao-yu, et al. The effect of discontinuous plane on stress-strain relationship of soft rock[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2001, 23(3): 362—365.
- [5] 栾茂田, 罗锦添, 李焯芬, 等. 不排水条件下全风化花岗岩残积土工程特性与本构模型[J]. 大连理工大学学报, 2000, 22(增 1): 83—89.
LUAN Mao-tian, LUO Jin-tian, LI Zhuo-fen, et al. Fundamental behavior and constitutive modeling of CDG residual soil under undrained shear[J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 2000, 22(Supp. 1): 83—89.
- [6] 周成. 结构性土的本构描述与数值模拟[D]. 南京: 南京水利科学研究院, 2002.
ZHOU Cheng. Constitutive model and numerical analysis of structured soil[D]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2002.