

文章编号: 1001-4888(2017)04-0472-07

砂质泥岩各向异性特征试验研究*

石昊¹, 付昱凯¹, 周波², 李同录¹

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西西安 710054; 2. 陕西工程勘察研究院, 陕西西安 710068)

摘要: 为研究砂质泥岩各向异性特征, 取长轴与层面不同夹角的圆柱试样, 在岩石试验机上做了三轴剪切试验, 得到应力—应变曲线, 分析了围压和夹角对砂质泥岩强度及破坏模式的影响。结果表明, 砂质泥岩在相同围压下, 峰值强度及残余强度的关系随夹角呈 U 型曲线, 且其各向异性程度随着围压的增加而降低。根据莫尔-库伦强度准则, 砂质泥岩的内摩擦角与粘聚力随夹角呈凹型曲线。其破坏模式表现出明显的各向异性, 可分为三类, 即张拉剪切复合破坏、沿层面剪切破坏和贯穿层面剪切破坏。其中 90°为张拉剪切复合破坏, 60°和 45°为沿层面剪切破坏, 30°和 0°为贯穿层面剪切破坏。试验结果可为砂质泥岩地区相关工程稳定性分析提供参考。

关键词: 砂质泥岩; 强度; 各向异性; 三轴试验

中图分类号: TU458 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-16-149

0 引言

岩体在成岩过程及后期构造作用下会形成软弱结构面。软弱结构面和荷载的不同空间组合会导致其变形破坏模式及强度表现出显著的各向异性。目前, 国内外对岩体各向异性的试验研究主要集中在片岩、页岩等。Jung 等^[1]对不同角度下的片麻岩进行单轴压缩以及巴西劈裂试验, 结果表明片麻岩弹性参数具有各向异性特点。赵文瑞^[2]对泥质粉砂岩进行单轴压缩试验、间接拉伸试验和双面剪切试验, 研究了其强度的各向异性。高春玉等^[3]对平行于软弱面和垂直于软弱面的砂板岩试样进行单轴和三轴试验, 探讨了层面对强度特征及力学性质的影响。刘胜利等^[4]对绿泥石片岩进行单轴压缩和间接拉伸试验, 讨论了其力学和变形破坏特征各向异性。俞然刚等^[5]对砂岩岩芯进行了三轴剪切试验及声波测试, 讨论了其物理力学性质的各向异性及其与深度的关系。衡帅等^[6,7]对页岩进行直剪及三轴试验, 对其力学特征破裂模式和破坏机理进行了研究。

泥岩在我国沉积地层中分布较广, 常夹于砂岩、页岩和灰岩中, 形成软弱带, 对边坡、地下工程及水电工程造成不利影响; 另一方面, 泥岩又是核废料储存备选场地之一, 具有极高的利用价值。泥岩也具有显著各向异性, 各向异性对其力学及工程特性具有很大的影响。因此, 有必要对泥岩强度特征、破坏模式的各向异性进行研究。本文以陕西延安某深埋隧道采取的砂质泥岩为对象, 对其进行不同夹角的三轴剪切试验, 研究其力学参数、破坏特征及破坏模式的各向异性, 本文结果可为相关工程分析评价提供参考。

* 收稿日期: 2016-08-15; 修回日期: 2016-12-31

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(项目批准号: 2014JQ5186); 长安大学中央高校基本科研业务费专项资金资助(0009-2014G1261057)

通讯作者: 付昱凯(1983—), 男, 博士, 讲师, 主要从事岩土材料的试验及本构模型研究。Email: fw@chd.edu.cn

1 试验方案及结果

1.1 试样制备

所用试样取自陕西省延安市某深埋隧道,为侏罗系砂质泥岩,灰-深灰,层理发育,中薄层,地层产状近水平,取样点隧道埋深约 118m,其物理性质如表 1 所示。

表 1 试验所用砂质泥岩的物理性质

Fig. 1 Physical properties of sandy mudstone tested

干密度(g/cm ³)	天然含水率(%)	颗粒密度	孔隙率(%)
2.45	4.31	2.59	5.41

为了研究砂质泥岩力学性质的各向异性,分别从与岩石层面法线方向夹角 θ (下文简化为夹角 θ) 为 0° 、 30° 、 45° 、 60° 和 90° 的 5 个方向(图 1)钻取直径 50mm,高 100mm 的圆柱样,如图 2 所示。

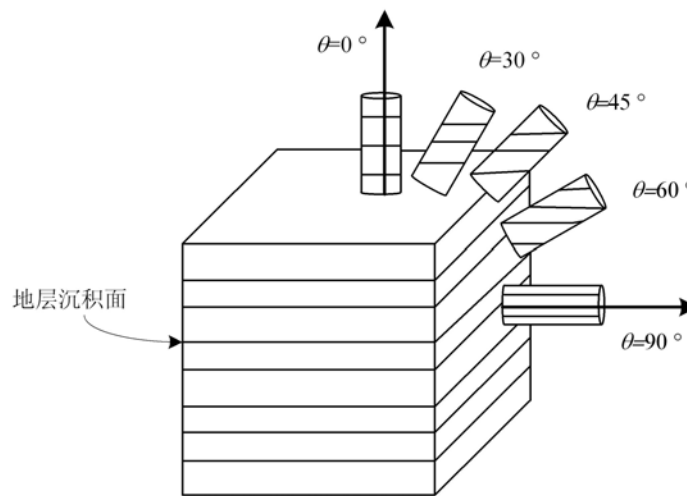


图 1 取样方向示意图

Fig. 1 Sampling directions



图 2 不同角度试样(浅色线为标识的层面)

Fig. 2 Specimens prepared at different orientation angles

1.2 试验设备和试验方案

试验采用 RMT-150C 型岩石力学试验系统,该系统使用隔离式三轴试验装置,利用隔离套内的压力油对试样的围压进行控制。

试验先以应力控制的方式施加围压和轴压,加载速率为 $0.002\text{MPa} \cdot \text{s}^{-1}$,待达到预定围压和轴压后,稳压 30s,试验围压分别为 0.5MPa、1.0MPa、1.5MPa。待围压稳定后保持围压不变,采用应变控制施加轴压,轴向变形速率为 $0.002\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$,待残余强度稳定后结束试验,加载过程中采集试样轴向力和轴向位移,由于试验仪器构造的限制,本次试验未对岩样在试验过程中的体应变进行测量。

1.3 试验结果

由三轴剪切试验得到层面与大主应力方向呈不同夹角的试样在不同围压下的应力-应变曲线,如

图3所示。

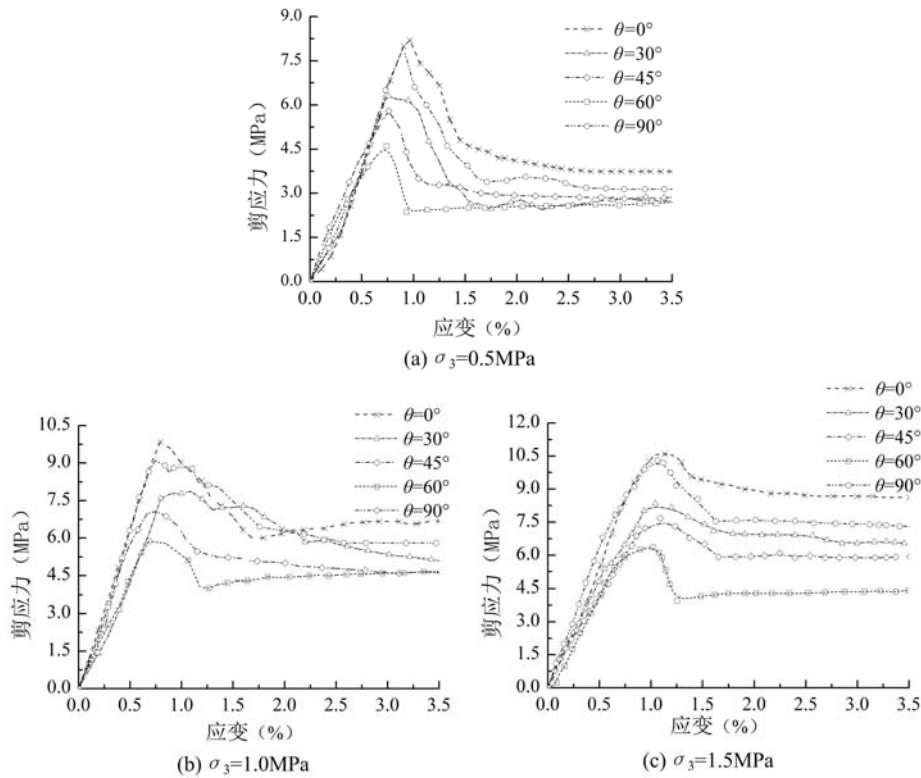


图3 三轴试验应力—应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves at different confining stresses and orientation angles

2 砂质泥岩强度各向异性

2.1 强度各向异性表现

由三轴剪切试验得到在不同围压下, 夹角 θ 分别为 0° 、 30° 、 45° 、 60° 和 90° 的试样三轴试验峰值强度及残余强度, 其值如表 2、表 3 所示。峰值强度、残余强度与夹角 θ 的规律如图 4、图 5 所示。

表 2 不同围压下各岩石峰值强度 (单位: MPa)

Tab. 2 Failure strength at different confining pressure (unit: MPa)

夹角 θ	0°	30°	45°	60°	90°
$\sigma_3=0.5\text{MPa}$	8.71	6.83	6.28	5.10	8.52
$\sigma_3=1.0\text{MPa}$	10.84	8.86	8.07	6.78	10.5
$\sigma_3=1.5\text{MPa}$	12.07	9.84	9.16	7.80	11.8

表 3 不同围压下各岩石残余强度 (单位: MPa)

Tab. 3 Residual strength at different confining pressure (unit: MPa)

夹角 θ	0°	30°	45°	60°	90°
$\sigma_3=0.5\text{MPa}$	4.24	3.36	3.23	3.19	3.62
$\sigma_3=1.0\text{MPa}$	7.68	6.08	5.60	5.64	6.80
$\sigma_3=1.5\text{MPa}$	10.12	8.03	7.43	6.02	8.80

由图 4 可知, 在同一围压下, 夹角 θ 由 0° 增加到 60° 时, 砂质泥岩峰值强度降低; 当 θ 由 60° 增加到 90° 时, 峰值强度随之显著提升。此外, 夹角 θ 由 0° 到 45° 时峰值强度变化较为平缓, 而由 45° 到 60° 时峰值强度变化则比较显著。砂质泥岩峰值强度总体上呈现出两边高中间低的 U 型变化规律。由此可知,

对于砂质泥岩,受层面的影响,其峰值强度呈现出明显的各向异性。

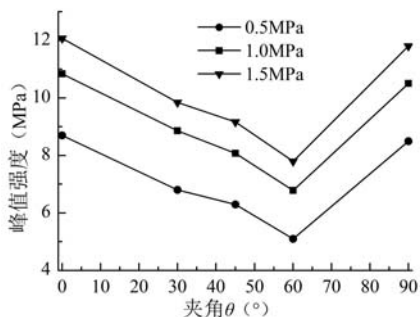


图 4 峰值强度与夹角的关系

Fig. 4 Failure strength versus orientation angles at different confining stress

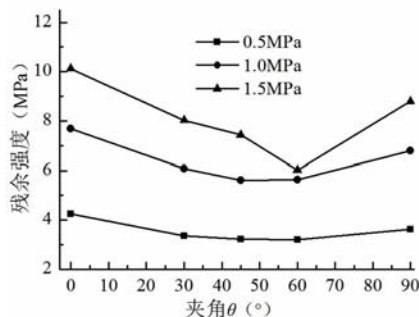


图 5 残余强度与夹角的关系

Fig. 5 Residual strength versus orientation angles at different confining stress

由图 5 可以看出,与砂质泥岩峰值强度的规律相似,砂质泥岩残余强度总体上呈现两边高中间低的 U 型变化规律,与峰值强度的变化相比,在相同围压下不同夹角试样的峰值强度变化比残余强度变化明显。此外,由图 5 可以看出,随着围压的增加,残余强度的变化幅度也随之增加。

2.2 围压对峰值强度各向异性度的影响

由图 4 可以看出,随着围压的增大,峰值强度的变化幅度减小,岩石各向异性随着围压的增加有减小的趋势。为了定量表征砂质泥岩在不同围压下峰值强度的各向异性程度定义强度各向异性度^[7]为:

$$R_c = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}} \quad (1)$$

式中, R_c 为各向异性度; σ_{\max} 为同一围压下各个应力加载角度中的最大峰值强度; σ_{\min} 为同一围压下各个应力加载角度的最小峰值强度。表 4 及图 6 为本文试验及搜集相关文献得到的随着围压的增加各岩石试样峰值强度的各向异性度变化情况,可以看出,岩石的各向异性度与围压在半对数坐标中呈现近似的负相关关系,随着围压的增加,其峰值强度的各向异性度降低。即随着围压的增加,层面对岩石峰值强度的影响会逐渐降低。

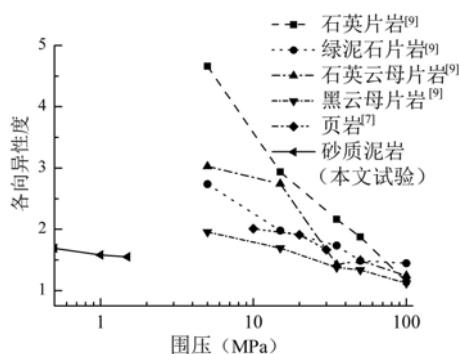


图 6 各向异性度与围压的关系

Fig. 6 Variation of degrees of anisotropy with different confining pressure

表 4 不同围压下各岩石峰值强度的各向异性度

ab. 4 Degrees of anisotropy of failure strength at different confining pressure

围压(MPa)	5	15	35	50	100
石英片岩 ^[9]	4.65	2.93	2.16	1.87	1.14
绿泥石片岩 ^[9]	2.73	1.98	1.73	1.49	1.44
石英云母片岩 ^[9]	3.02	2.74	1.42	1.49	1.24
黑云母片岩 ^[9]	1.95	1.69	1.38	1.33	1.12
围压(MPa)	10	20	30		
页岩 ^[7]	2.01	1.91	1.67		
围压(MPa)	0.5	1.0	1.5		
砂质泥岩(本文)	1.71	1.60	1.55		

2.3 抗剪强度参数各向异性表现

对于岩土材料,其抗剪强度参数的确定对工程稳定性有着重要影响。根据莫尔-库伦破坏准则,利用不同围压下的各沉积面夹角试样的三轴试验应力-应变曲线峰值强度,做峰值强度应力摩尔圆的破坏包线,求得不同夹角 θ 的粘聚力 c 及内摩擦角 φ ,如表 5 所示。粘聚力 c 和内摩擦角 φ 与层面夹角 θ 的关系如图 7、图 8 所示。

表 5 不同夹角的试样强度参数

Fig. 5 Shear strength parameters at different orientation angles

夹角 θ	0°	30°	45°	60°	90°
$c(\text{MPa})$	1.92	1.52	1.45	1.15	1.87
$\varphi(^{\circ})$	33.3	30.1	29.2	27.7	32.4

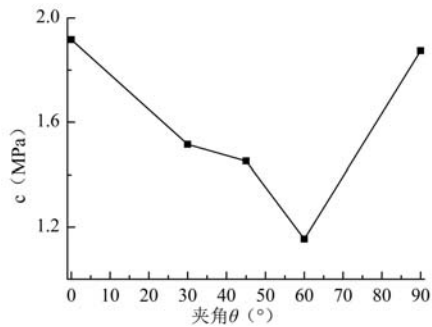


图 7 粘聚力 c 与夹角 θ 的关系

Fig. 7 Variation of cohesion with orientation angles

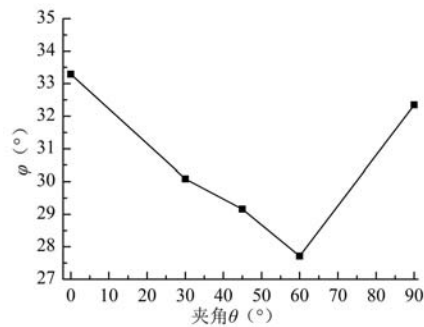


图 8 内摩擦角 φ 与夹角 θ 的关系

Fig. 8 Variation of angle of internal friction with orientation angles

由图 7、图 8 可知,砂质泥岩的强度指标随着夹角不同,呈现出明显的各向异性特征。由图 7 可知,粘聚力随着夹角 θ 的变化而变化,夹角 θ 在 $0^\circ \sim 60^\circ$ 时粘聚力随着角度的增加而减小,在 $60^\circ \sim 90^\circ$ 时粘聚力随着角度的增加而增大,总体形成中间低两端高类似于 U 型的分布特点。值得注意的是,夹角由 45° 增大到 60° 时,粘聚力减小更为显著。由图 8 可以看出,内摩擦角与夹角的关系与粘聚力与夹角的关系类似,同样随着夹角 θ 的不同形成中间低两端高类似于 U 型的分布特点。

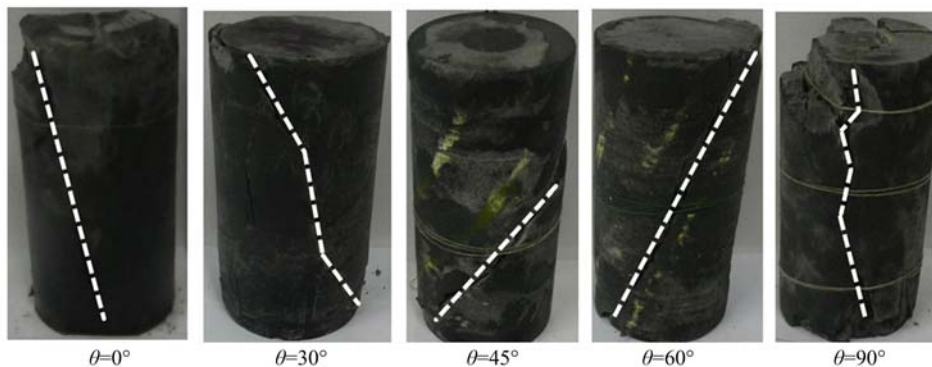


图 9 三轴试验典型破坏样式图

Fig. 8 Typical failure modes of triaxial compression test

3 试样破坏模式各向异性

图 9 展示了本文三轴剪切试验中不同夹角 θ 的砂质泥岩试样的典型破坏形态,各夹角试样破坏特征如下:

(1) $\theta=0^\circ$: 试样破坏时形成一个破裂面,该破裂面贯穿试样两端面,与层面大角度相交。

(2) $\theta=30^\circ$: 试样破坏时形成一主破裂面与多个次级破裂面,主破裂面贯穿试样两端面并与层面斜交,主破裂面总体上呈折线型。

(3) $\theta=45^\circ$: 试样破坏时形成一个破裂面,该破裂面由试样中部开始延伸至试样底部,总体上与层面平行,破裂面较平整。

(4) $\theta=60^\circ$: 试样破坏时形成一个破裂面,该破裂面贯穿试样两端面,与层面基本平行,剪切面较平整。

(5) $\theta=90^\circ$: 试样破坏时形成一个破裂面,该破裂面贯穿试样两端面,剪切面有一定程度弯曲,破裂面部分与层面斜交。

总结各角度试样的破坏规律,可将其破坏模式分为以下三种:

(1) 张拉剪切复合破坏。试样破坏后,主破裂面沿着层面破坏,端部出现部分张拉裂缝,破裂面缝隙较大且随着围压的增加破裂面开口逐渐减小。夹角 θ 为 90° 时,试样破坏多为张拉剪切复合破坏。

(2) 沿层面剪切破坏。试样破坏后,主破裂面沿着层面剪切破坏,破裂面平整。夹角 θ 为 60° 和 45° 时,试样破坏多为沿层面剪切破坏。

(3) 贯穿层面剪切破坏。试样破坏后,主破裂面与层面斜交,破裂面有不同程度的弯曲。夹角 θ 为 30° 和 0° 时,试样破坏多为贯穿层面剪切破坏。

将泥岩峰值强度的各向异性特征与试样破坏模式进行对比可见:当试样沿着层面剪切破坏时,其峰值强度处于较低水平;当试样贯穿层面剪切破坏时,其峰值强度变大;当张拉剪切复合破坏时,其峰值强度也处在较高水平。这表明层面为岩体试样的软弱面,层面与层间岩块在荷载下的相互作用是砂质泥岩峰值强度、破坏模式差异的原因。

4 结论

通过不同夹角 θ 和围压下的砂质泥岩试样三轴剪切试验,得到以下结论:

(1) 相同围压下,夹角为 0° 时,试样峰值强度最高, 90° 次之, 60° 最低,峰值强度总体上呈 U 型分布,具有明显的各向异性。峰值强度随夹角 θ 的变化幅度随着围压的增加而减小,即砂质泥岩的各向异性度随着围压的增加逐渐降低。

(2) 在相同围压下,试样的残余强度总体上呈现 U 型分布,其中在夹角 θ 为 0° 时残余强度最高,在 60° 附近残余强度最低。此外,残余强度随夹角 θ 的变化幅度随围压的增加逐渐增加。

(3) 根据莫尔-库伦强度准则,砂质泥岩的抗剪切强度参数有明显的各向异性。内摩擦角和内聚力随夹角 θ 的变化呈勺型分布。

(4) 砂质泥岩破坏模式与沉积面夹角 θ 密切相关, θ 为 0° 和 30° 时试样为贯穿层面剪切破坏, θ 为 45° 和 60° 时试样为沿层里面剪切破坏, θ 为 90° 时试样为拉张剪切复合破坏。

参考文献:

- [1] Jung W C, Hanna K, Seokwon J, et al. Deformation and strength anisotropy of Asian gneiss, Boryeong shale, and Yeoncheon schist[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2012, 50:158-169.
- [2] 赵文瑞. 泥质粉砂岩各向异性强度特征[J]. 岩土工程学报, 1984, 6(1):32-36 (ZHAO Wenrui. Strength properties of anisotropic rock of an argillaceous siltstone[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1984, 6(1):32-36 (in Chinese))
- [3] 高春玉, 徐进, 李忠洪, 等. 雪峰山隧道砂板岩各向异性力学特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(5):1360-1364 (GAO Chunyu, XU Jin, LI Zhonghong, et al. Experimental study of anisotropically mechanical characteristics of sandy slate in Xuefeng mountain tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(5):1360-1364 (in Chinese))
- [4] 刘胜利, 陈善雄, 余飞, 等. 绿泥石片岩各向异性特性研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(12):3616-3623 (LIU Shengli, CHEN Shanxiong, YU Fei, et al. Anisotropic properties study of chlorite schist[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(12):3616-3623 (in Chinese))

- [5] 俞然刚, 田勇. 砂岩岩石力学参数各向异性研究[J]. 实验力学, 2013, 28(3):368—375 (YU Rangang, TIAN Yong. On the rock mechanics parameters anisotropy of sandstone[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2013, 28(3):368—375 (in Chinese))
- [6] 衡帅, 杨春和, 曾义金, 等. 基于直剪试验的页岩强度各向异性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014(5):874—883 (HENG Shuai, YANG Chunhe, ZHENG Yijin, et al. Anisotropy of shear strength of shale based on direct shear test [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014(5):874—883 (in Chinese))
- [7] 衡帅, 杨春和, 张保平, 等. 页岩各向异性特征的试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(3):609—616 (HENG Shuai, YANG Chunhe, ZHANG Baoping, et al. Experimental research on anisotropic properties of shale [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(3):609—616 (in Chinese))
- [8] Oka F, Kimoto S, Kobayashi H, et al. Anisotropic behavior of soft sedimentary rock and a constitutive model[J]. Soils and Foundations, 2002, 42(5):59—70.
- [9] Nasser M H B, Rao K S, Ramamurthy T. Anisotropic strength and deformational behavior of Himalayan schists [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(1):3—23.
- [10] Fu Y K, Iwata M, Ding W Q, et al. An elastoplastic model for soft sedimentary rock considering inherent anisotropy and confining-stress dependency[J]. Soils and Foundations, 2012, 52(4):575—589.

Experimental Study of Sandy Mudstone Anisotropic Properties

SHI Hao¹, FU Yu-kai¹, ZHOU Bo², LI Tong-lu¹

(1. School of Geological Engineering and Surveying, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

2. Shaanxi Institute of Engineering Prospecting, Xi'an 710068, Shaanxi, China)

Abstract: In order to study anisotropy properties of sandy mudstone, conventional triaxial shear experiment was carried out for cylindrical specimen with different angles between long axis and bedding surface, based on rock testing machine; its stress-strain curves were obtained. The impact of confining pressure and bedding surface inclination angle on sandy mudstone strength and failure mode was analyzed. Results show that the relations among failure strength, residual strength and bedding surface inclination angle of sandy mudstone exhibit U-shape curves under the same confining pressure. The anisotropic degree decreases with the increase of confining pressure. Based on Mohr-Coulomb criterion, the relations among sandy mudstone internal friction angle, cohesive strength and bedding surface inclination angle also exhibit U-shaped curves. Its failure mode exhibits obvious anisotropic characteristics. There are three categories of failure mode: tension-shear composite failure, sliding failure along bedding surface and shear failure penetrating bedding surface. When inclination angle is 90° , tension-shear composite failure occurs; When inclination angle are 60° and 45° , sliding failure along bedding surface occurs; When inclination angle are 30° and 0° , shear failure penetrating bedding surface occurs, respectively. Above results may provide reference for rock engineering stability in sandy mudstone areas.

Keywords: sandy mudstone; strength; anisotropy; triaxial experiment