

卸载条件下粉砂的抗剪强度特性研究

曹宇春,汪科迪

(浙江科技学院 土木与建筑工程学院,杭州 310023)

摘要: 为了研究卸载条件下粉砂抗剪强度的特性,采用粉砂试样进行了一系列卸载后的室内直剪试验,分析了卸载作用、超固结比(over-consolidation ratio,OCR)、先期固结压力和剪胀性对粉砂抗剪强度的影响。结果表明:对于同样的卸载后竖向应力,OCR越大,相同剪切位移对应的剪应力越大;当OCR较小时,峰值强度基本上随其增加而增加,当OCR较大时,它对峰值强度的影响较小;当卸载后竖向应力较小时,峰值强度随竖向应力几乎呈线性增加,当竖向应力增加到一定数值以上后,竖向应力变化对峰值强度几乎没有影响;并且得到了OCR为1、2、4时,其内摩擦角分别为 22.2° 、 28.0° 和 31.9° 。

关键词: 粉砂;直剪试验;抗剪强度;超固结比;先期固结压力;内摩擦角

中图分类号: TU441.5

文献标志码: A

文章编号: 1671-8798(2019)05-0405-07

Study on shear strength characteristics of silty sand under unloading conditions

CAO Yuchun, WANG Kedi

(School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, Zhejiang, China)

Abstract: A series of laboratory direct shear tests were carried out on silty sand samples after being unloaded to analyze the effects of unloading action, over-consolidation ratio (OCR), pre-consolidation pressure and dilatancy on shear strength of silty sand. The test results show that shear stress under certain shear displacement increases with OCR for the same vertical stress after being unloaded; peak strength basically increases with OCR when over-consolidation ratios being fairly low while the effect of OCR on peak strength can be almost neglected for fairly large over-consolidation ratios; peak strength practically increases linearly with vertical stress after being unloaded when the vertical stress being fairly small while the vertical stress

收稿日期: 2018-12-24

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(40406019);浙江省公益性技术应用研究计划项目(2014C33037);浙江省自然科学基金项目(LY14E080012)

通信作者: 曹宇春(1972—),男,山西省大同人,副教授,博士,主要从事土的力学特性与地基处理研究。E-mail: shtjcyc@163.com。

has virtually no effect on peak strength when being increased to a certain level. Moreover, the internal friction angles reached 22.2° , 28.0° and 31.9° under different over-consolidation ratios of 1, 2 and 4, respectively.

Keywords: silty sand; direct shear test; shear strength; over-consolidation ratio (OCR); pre-consolidation pressure; internal friction angle

随着中国经济的高速发展,基础设施建设(基坑工程、隧道工程及其他地下工程)如火如荼。由于施工会影响周边土体,卸载条件下土体的力学特性成为工程界日益关注的问题。砂土作为自然界中广泛存在的一种材料,大面积地分布在全国各地,了解其卸载后的力学特性对相关工程建设非常重要。因此,对卸载后砂土的抗剪强度进行深入研究十分必要。目前,人们针对卸载^[1-2]或超固结比^[3-4](over-consolidation ratio, OCR)对砂土力学特性的影响进行了一定的研究。在直剪试验研究方面,Simoni等^[5]研究了砂砾混合料的抗剪强度和剪胀性;朱顺然等^[6]研究砂土-土工织物界面的力学特性;王军等^[7]研究了砂土颗粒级配对格栅-土界面静、动力直剪特性的影响。在三轴试验研究方面,Della等^[8-9]研究了 OCR 及围压对饱和中密砂力学特性的影响,发现了初始围压的增大导致了砂土液化阻力的增大,OCR 提高了砂土刚度,加速了剪胀,增加了砂土的内摩擦角。Henni 等^[10]研究了 OCR 对粉砂的单调不排水剪切特性的影响,发现 OCR 的增加导致了粉砂抗剪强度和剪胀性的增加。El-Sekelly 等^[11]利用离心模型试验研究了卸载-再加载条件下 Ottawa 砂的静止土压力系数 K_0 与 OCR 之间的关系,发现二者呈正相关。Mahmoudi等^[12]对细粒含量为 $0\% \sim 40\%$ 的重塑饱和砂土与砂粉混合土试样,在不同 OCR 下进行了一系列三轴固结不排水试验,发现不排水峰值抗剪强度与 OCR 近似呈正比关系。

从国内外已有研究看,目前对卸载条件下粉砂的应力-应变关系、抗剪强度随竖向应力和 OCR 的变化规律研究尚不够深入。因此本文拟在前人研究的基础上对粉砂进行一系列卸载条件下的直剪试验,以探讨卸载后竖向应力及 OCR 对抗剪强度的影响。由于卸载作用导致砂土处于超固结状态,往往使砂土具有明显的剪胀性^[13-14]。又因本试验所用材料为粉砂,根据试验结果,只有在 OCR 特别大时,试样才会展现剪胀特性,其余均为剪缩,故本文不讨论粉砂在 OCR 情况下的剪胀特性。

1 试验设备与材料

1.1 试验设备

本试验所用设备为德国 Wille 公司产全自动机电式直剪仪,见图 1。剪切盒为方形,土样横截面积为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$,高度为 35.7 mm ,见图 2。



图 1 全自动机电式直剪仪

Fig. 1 Fully automatic electromechanical direct-shear apparatus

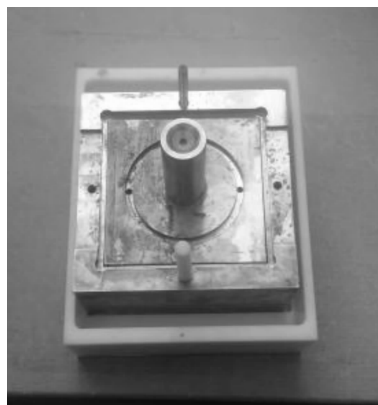


图 2 试验用剪切盒

Fig. 2 Shear box for test

1.2 试验材料

本试验用砂如图 3 所示,为次棱角形-亚圆形均匀砂,颗粒级配曲线如图 4 所示,物理性质指标如下:粉砂试样的相对密度为 2.61;颗粒粒径 d_{10} 、 d_{30} 、 d_{60} 分别为 0.026、0.120、0.190 mm;不均匀系数 C_u 为 7.31;曲率系数 C_c 为 2.91;砂土在最松散状态时的孔隙比,即最大孔隙比 e_{\max} 为 0.98;砂土在最密实状态时的孔隙比,即最小孔隙比 e_{\min} 为 0.67。根据 GB 50007—2011《建筑地基基础设计规范》^[15],该砂土可判定为粉砂。



图 3 试验用粉砂

Fig. 3 Silty sand for test

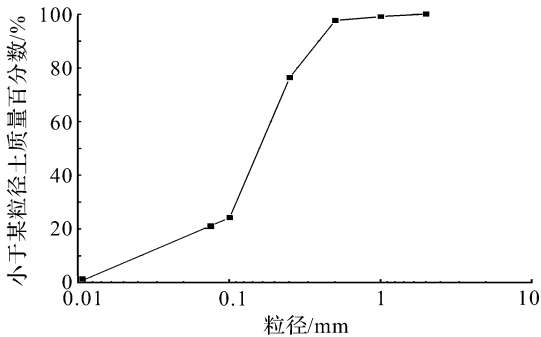


图 4 试验用粉砂的颗粒级配曲线

Fig. 4 Grain size distribution curves of silty sand for test

2 试验方案

为了系统研究卸载和 OCR 对粉砂抗剪强度的影响,本文采用了卸载直剪试验来对砂土的抗剪强度特性进行研究,首先对土样施加竖向正应力,然后将竖向正应力卸载至一定数值。参照 GB/T 50123—1999《土工试验方法标准》^[16]的直剪试验方法,将剪切速率控制在 0.8 mm/min,具体方案见表 1。

表 1 试验方案汇总

Table 1 Summary of testing program

| 初始含水率/% | 卸载后相对密度 | 卸载前竖向应力/kPa | 卸载后竖向应力/kPa | OCR |
|---------|---------|-------------|-------------|-------|
| 4.49 | 0.03 | 50 | 50 | 1.00 |
| 4.72 | 0.16 | 100 | 100 | 1.00 |
| 4.52 | 0.22 | 200 | 200 | 1.00 |
| 4.39 | 0.31 | 300 | 300 | 1.00 |
| 4.44 | 0.33 | 400 | 400 | 1.00 |
| 4.45 | 0.44 | 600 | 600 | 1.00 |
| 6.30 | 0.18 | 300 | 200 | 1.50 |
| 4.31 | 0.36 | 600 | 400 | 1.50 |
| 4.24 | 0.40 | 800 | 600 | 1.33 |
| 4.05 | 0.30 | 400 | 300 | 1.33 |
| 6.08 | 0.18 | 100 | 50 | 2.00 |
| 6.17 | 0.19 | 200 | 100 | 2.00 |
| 3.99 | 0.23 | 400 | 200 | 2.00 |
| 4.07 | 0.36 | 600 | 300 | 2.00 |
| 4.01 | 0.48 | 800 | 400 | 2.00 |
| 3.84 | 0.51 | 800 | 300 | 2.67 |
| 3.67 | 0.26 | 300 | 100 | 3.00 |
| 4.45 | 0.35 | 600 | 200 | 3.00 |
| 6.24 | 0.24 | 200 | 50 | 4.00 |
| 3.84 | 0.25 | 400 | 100 | 4.00 |
| 4.21 | 0.38 | 800 | 200 | 4.00 |
| 3.71 | 0.29 | 300 | 50 | 6.00 |
| 4.12 | 0.38 | 600 | 100 | 6.00 |
| 3.92 | 0.29 | 400 | 50 | 8.00 |
| 4.02 | 0.38 | 800 | 100 | 8.00 |
| 4.18 | 0.25 | 600 | 50 | 12.00 |
| 4.61 | 0.36 | 800 | 50 | 16.00 |

3 卸载作用对粉砂抗剪强度的影响

3.1 卸载对粉砂剪应力与剪切位移关系的影响

图 5 为在 5 种竖向应力水平及不同 OCR 下的剪应力与剪切位移关系曲线,由于本试验试样均为粉砂,且含水率均小于 6.5%,故超孔隙水压力可忽略不计,图 5 中 σ' 为卸载后的竖向有效应力。初始阶段,剪应力与剪切位移基本上呈线性关系且增加较快;之后二者关系变为非线性直至达到峰值强度;到达峰值强度后,剪应力随剪切位移的增加趋于稳定。由图 5 可知,对于同样的卸载后竖向应力,OCR 越大,相同剪切位移对应的剪应力越大。

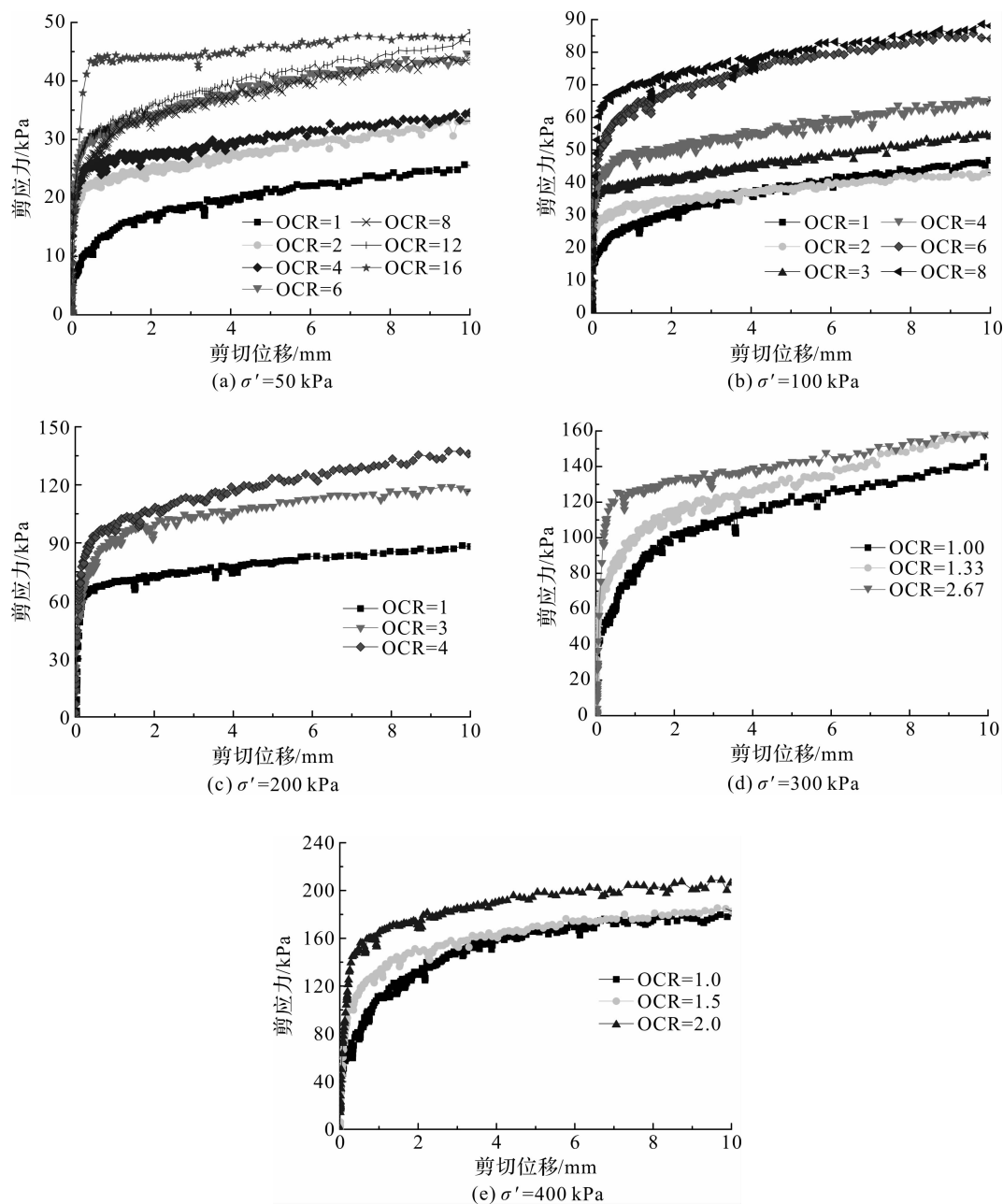


图 5 不同卸载后竖向应力下剪切应力和剪切位移的关系

Fig. 5 Relationships between shear stresses and shear displacements for different vertical stresses after being unloaded

3.2 卸载后 OCR 对粉砂峰值强度的影响

图 6 为各级卸载后竖向应力条件下粉砂试样峰值抗剪强度与 OCR 的关系。对于各级卸载后竖向应

力,总体来看,当 $OCR \leq 6$ 时,峰值强度基本上随 OCR 的增加而增加。当 $\sigma' = 50$ kPa 时,对于 OCR 为 2 和 4 两种情况,二者的峰值强度相差不大;对于 $\sigma' = 50$ kPa 与 OCR 为 6、8、12 和 16 四种情况,以及 $\sigma' = 100$ kPa, OCR 为 6 和 8 两种情况,其对应的峰值强度均相差不大。这说明当 OCR 比较大时,它对粉砂抗剪强度的影响较小。产生这一现象的原因是:对于较大且相近的若干组 OCR ,由于加载-再卸载引起的压密作用相差不大,因而砂土的密实度比较接近,从而导致了峰值强度相近。

3.3 先期固结压力及剪切前竖向应力对粉砂峰值强度的影响

图 7 为 3 种先期固结压力 σ_p 及不同卸载后竖向应力条件下粉砂试样剪应力与剪切位移的关系曲线,图 8 为正常固结粉砂试样的剪应力与剪切位移的关系曲线。

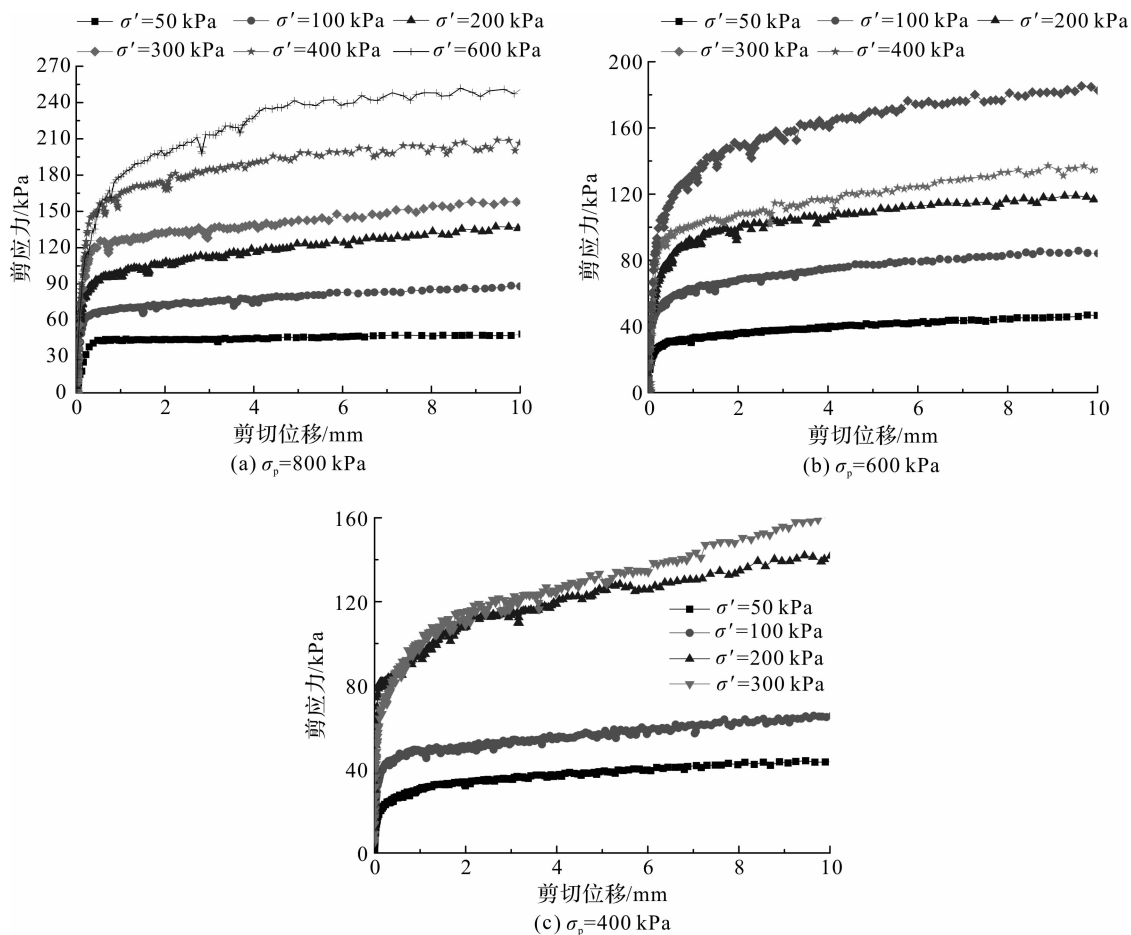


图 7 相同先期固结压力下剪应力和剪切位移的关系

Fig. 7 Relationships between shear stresses and shear displacements under the same pre-consolidation pressures

由图 7~8 可得不同竖向应力条件下的峰值强度数值,如图 9 所示。由图 9 可知:无论正常固结还是先期固结压力固结的试样,峰值强度均随竖向应力呈线性增加。当竖向应力较小(50 kPa)时,不同先期固结压力试样峰值强度明显大于正常固结试样且大小保持一致。这是因为当竖向应力较小时,其 OCR 均大于 8,此时土的密实度基本上保持一致;随着竖向应力增至 100 kPa 时,对于 3 种先期固结压力试样中最小的固结压力 400 kPa,其峰值强度略小,但是大于正常固结试样强度,这是因为此时 400 kPa 先期固结压力的试样 OCR 只有 4,该组试样的密实度没有达到高 OCR 那么密实;随着竖向应力增至 200 kPa

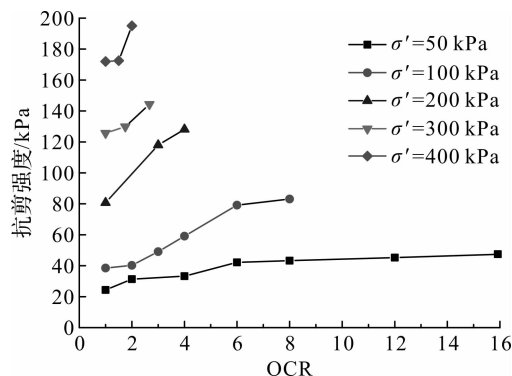


图 6 不同卸载后竖向应力下 OCR 对粉砂抗剪强度的影响

Fig. 6 Influence of OCR on shear strengths of silty sand for different vertical stresses after being unloaded

时,固结压力为 600 kPa 的试样也脱离 800 kPa 先期固结压力试样强度趋势,但是大于正常固结试样;随着竖向应力增至 300~400 kPa 时,400 kPa 和 600 kPa 先期固结压力试样强度跟正常固结试样基本上一致,800 kPa 先期固结压力试样强度略有降低,且大于正常固结试样,但是强度增长趋势基本上一致。由此可知,随着竖向应力的增加,OCR 越小的试样越容易接近正常剪切试样。

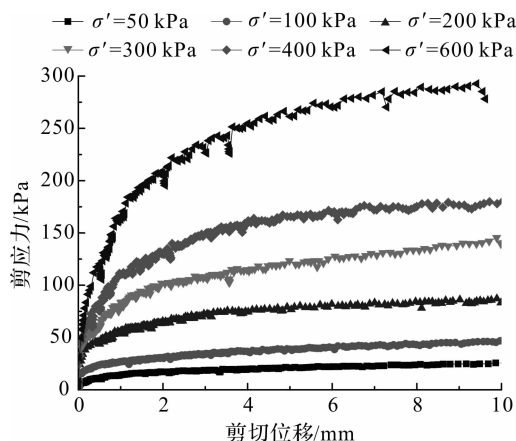


图 8 正常固结粉砂试样剪应力和剪切位移的关系

Fig. 8 Relationships between shear stresses and shear displacements for normally-consolidated silty sand specimens

3.4 OCR 对粉砂内摩擦角的影响

图 10 是 OCR 为 1、2、4 时,其抗剪强度与竖向应力之间的关系,根据摩尔-库伦原理进行拟合。由图 10 可知,随着 OCR 的增大,其拟合直线的斜率也增大,斜率分别为 0.409 3、0.535 4、0.628 6,并且该斜率为其内摩擦角的正切值,因此可以得到其内摩擦角分别为 22.2°、28.0°和 31.9°。由图 9~10 可知,粉砂抗剪强度的大小与 OCR 呈正比,但当粉砂一直处于高 OCR 时,由于土样已较为密实,其抗剪强度大小不会发生较大变化。

4 结 论

本文对粉砂样进行了一系列卸载后的室内直剪试验,根据试验结果及数据分析得到以下结论:

1)初始剪切阶段,卸载后粉砂试样的剪应力与剪切位移基本上呈线性关系且增加较快,之后二者关系变为非线性直至达到峰值强度,峰值强度后的剪应力随剪切位移的增加趋于稳定。对于同样的卸载后竖向应力,OCR 越大,相同剪切位移对应的剪应力越大。

2)当 OCR 较小时,卸载后粉砂试样的峰值强度基本上随 OCR 的增加而增加;当 OCR 较大时,它对粉砂峰值强度的影响较小,这反映出高 OCR 时加载-再卸载对砂土的压密作用相差不大,从而导致了峰值强度相近的情况。

3)无论对正常固结还是不同先期固结压力的试样,当卸载后竖向应力较小时,峰值强度均随竖向应力呈线性增加,当竖向应力增加到一定数值以上时,竖向应力变化对峰值强度几乎没有影响。

4)OCR 为 1、2、4 时,其内摩擦角分别为 22.2°、28.0°和 31.9°。

志谢:感谢德国纽伦堡应用技术大学(Technische Hochschule Nürnberg)Konrad Gell 教授、Michael Volkmer 先生、Tilo Vollweiler 先生在试验过程中给予的指导和帮助。

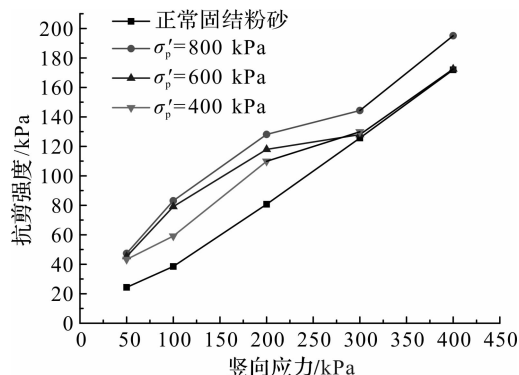


图 9 先期固结压力对粉砂峰值强度的影响

Fig. 9 Influence of pre-consolidation pressures on peak strengths of silty sand

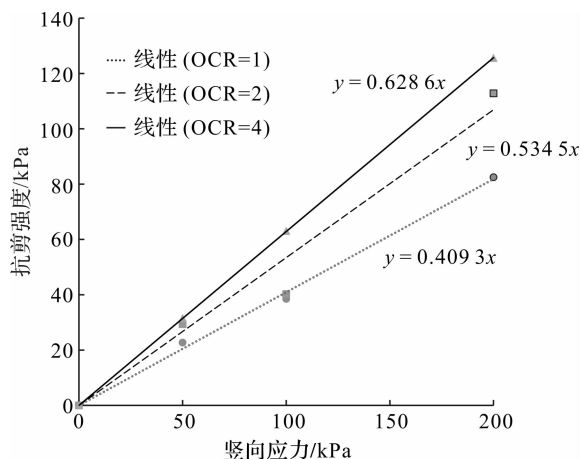


图 10 OCR 对粉砂抗剪强度的影响

Fig. 10 Influence of OCR on shear strength of silty sand

参考文献:

- [1] 张书丰,陆航,沈晓伟.大范围覆土严重卸载条件下的盾构隧道保护技术研究[J].中国安全生产科学技术,2017,13(12):167.
- [2] 何森,刘恩龙,陈亚军,等.不排水条件下轴向加卸载时结构性土的力学特性探讨[J].岩石力学与工程学报,2017,36(2):466.
- [3] 郝兵兵.各向异性超固结温州软黏土小应变剪切模量与剪切特性试验研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.
- [4] 高彦斌,陈忠清.基于原位十字板强度的沿海地区软黏土超固结比分析[J].岩石力学与工程学报,2017,36(10):2572.
- [5] SIMONI A, HOULSBY G T. The direct shear strength and dilatancy of sand-gravel mixtures[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2006, 24(3):523.
- [6] 朱顺然,徐超,丁金华.土工织物-砂土界面的叠环式剪切试验[J].岩土力学,2018,39(5):1775.
- [7] 王军,施静,刘飞禹,等.砂土颗粒级配对格栅-土界面静、动力直剪特性的影响[J].岩土力学,2019,40(1):109.
- [8] DELLA N, MISSOUM H, ARAB A, et al. Experimental study of the overconsolidation and saturation effects on the mechanical characteristics and residual strength of Chlef river sandy soil[J]. Periodica Polytechnica Civil Engineering, 2010, 54(2):107.
- [9] DELLA N, ARAB A, BELKHATIR M. A laboratory study of the initial structure and the overconsolidation effects on the undrained monotonic behavior of sandy soil from Chlef northern Algeria[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2011, 4(5/6):983.
- [10] HENNI A D, ARAB A, BELKHATIR M, et al. Undrained behavior of silty sand: effect of the overconsolidation ratio[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2013, 6(2):297.
- [11] EL-SEKELLY W, ABDOUN T, DOBRY R. Effect of overconsolidation on K_0 in centrifuge models using CPT and tactile pressure sensor[J]. Geotechnical Testing Journal, 2015, 38(2):150.
- [12] MAHMOUDI Y, CHERIF TAIBA A, BELKHATIR M, et al. Experimental investigation on undrained shear behavior of overconsolidated sand-silt mixtures: effect of sample reconstitution[J]. Geotechnical Testing Journal, 2016, 39(3):515.
- [13] TAYLOR D W. Fundamentals of soil mechanics[M]. New York: John Wiley and Sons, 1948.
- [14] BOLTON M D. The strength and dilatancy of sands[J]. Géotechnique, 1986, 36(1):65.
- [15] 中国建筑科学研究院.建筑地基基础设计规范:GB 50007—2011[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [16] 南京水利科学研究院.土工试验方法标准:GB/T 50123—1999[S].北京:中国计划出版社,1999.