

文章编号:1673-9469(2022)03-0049-07

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2022.03.008

不同密度粉质粘土 K_0 固结侧向卸荷三轴试验研究

吴 映^{1,2}, 朱俊高^{1,2*}, 黄浩然³, 褚福永⁴

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098; 3. 浙江省水利水电勘测设计院, 浙江 杭州 310002; 4. 丽水学院 工学院, 浙江 丽水 323000)

摘要: 针对侧向卸荷等特殊应力路径下应力应变关系对土体本构模型的影响, 利用应力控制式三轴仪, 对南京某工程粉质粘土的重塑样进行了 K_0 固结条件下侧向卸荷三轴固结排水剪试验, 研究了侧向卸荷路径下干密度对粉质粘土应力应变及强度特性的影响规律, 建立了一个土体因干密度变化引起内摩擦角变化的经验公式, 提出了一个侧向卸荷条件下土体破坏时的侧向应变经验公式, 并提出了据此公式估计基坑支挡结构的极限位移的方法。

关键词: 粉质粘土; 干密度; 三轴试验; 侧向卸荷

中图分类号: TU443

文献标识码: A

Triaxial Test Study on K_0 Consolidation of Different Density Silty Clays with Lateral Unloading

WU Yi^{1,2}, ZHU Jungao^{1,2*}, HUANG Haoran³, ZHU Fuyong⁴

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 2. Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 3. Zhejiang Water Resources and Hydropower Survey and Design Institute, Hangzhou, Zhejiang 310002, China; 4. Engineering College, Lishui University, Lishui, Zhejiang 323000, China)

Abstract: Soil deformation has a significant stress path correlation, and the loading along different stress paths will have different stress, strain and strength properties. Understanding the stress-strain relationship under special stress paths such as lateral unloading is of great significance to the in-depth study of soil constitutive models and engineering design of foundation pit excavation. A stress-controlled triaxial apparatus was used to carry out lateral unloading triaxial consolidation drainage shear tests on a remodeled sample of silty clay in a certain engineering in Nanjing under the condition of K_0 consolidation, and the effect of dry density under the lateral unloading path was studied. The influence laws of the stress, strain and strength characteristics of silty clay are established. An empirical formula for the change of the internal friction angle of the soil due to the change of dry density is established, and an empirical formula for the lateral strain of the soil under the condition of lateral unloading is proposed. A method for estimating the ultimate displacement of the retaining structure of a foundation pit based on the proposed formula is proposed.

Key words: silty clay; dry density; triaxial test; lateral unloading

近年来城市地下空间开发迅猛, 基坑的开挖范围及深度逐渐增大, 基坑设计的安全稳定性也因此受到更多人的关注。在基坑工程中, 支护结

构后的土体荷载作用方式与一般的加载不同, 即为侧向卸荷。众所周知, 应力路径的不同会对土体的强度、变形造成很大的影响^[1-4], 利用有限元

收稿日期: 2022-01-07

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51479052)

作者简介: 吴映(1998-), 女, 江苏苏州人, 硕士研究生, 主要从事土体基本性质及本构关系、土石坝工程研究。

* 通讯作者: 朱俊高(1964-), 男, 博士, 教授, 主要从事土石坝工程、边坡稳定及土体本构关系研究。

等数值方法对基坑等侧向卸荷的土工结构进行应力变形分析时,能否考虑卸荷这种特殊路径下土体的应力应变特性对其变形及稳定性预测的准确性有着重大影响^[5]。本构模型的深入研究以及现有本构模型的验证也依赖于更多的类似侧向卸荷等特殊应力路径下试验成果。因此,研究土体在侧向卸荷路径下的强度与变形特性具有重要意义^[6]。

对于基坑工程中土体在侧向卸荷应力路径下的应力应变及强度特性,前人已经进行了大量的研究。曾国熙^[7]等认为开挖时土体可分为两个区域:主动区域与被动区域。刘国彬^[8]以某粉质粘土为例,进行了不同路径下的室内加荷以及卸荷试验。并推导出了侧向卸荷路径下的模量公式,公式显示固结压力和应力路径对其结果影响较大。刘熙媛^[9]等研究发现侧向卸荷的土体抗剪强度远低于常规三轴试验。殷德顺^[10]进行了侧向卸荷、加荷的应力路径三轴试验,提出了相应的模量公式,验证表明该公式能够更好地模拟基坑问题。张玉等^[11]用真三轴仪对黄土进行了侧向卸荷探究,发现侧向卸荷条件下土体破坏时的应变远小于竖向加载和常规三轴试验。以上学者的研究成果为基坑工程设计提供了重要参考。但目前针对侧向卸荷条件下土体变形特性规律的研究还很不充分。比如,上述研究一般都是基于各向等压固结的常规三轴剪切试验结果^[12]。事实上,地基开挖前一般是处于无侧向变形的 K_0 固结状态^[13-14],而且,开挖时基坑支护后面的填土经历的是侧向卸荷,与常规三轴剪切的应力路径相差甚远。因此,进行等压固结的三轴试验,即使考虑卸荷,也与实际情况有误差。有必要弄清楚 K_0 固结后侧向卸荷条件下土体应力应变及强度的特性。从而,为更科学合理地建立比较完善的本构模型,进行基坑受力变形准确分析提供基础。再如,现有本构模型基本都是基于常规三轴压缩试验建立^[15-18],这些模型反映诸如侧向卸荷等特殊应力路径下的应力应变关系能力有限,有时甚至很差。它们对侧向卸荷路径的适用性并没有得到充分验证,需要更多、更接近实际应力路径的试验来验证,并进一步总结相关应力应变规律。为此,本文针对某粉质粘土,利用应力控制式三轴剪切仪,进行 K_0 固结下的侧向卸荷三轴固结排水剪试验,研究不同干密度粉质粘土侧向卸荷路径下土体的强度特性以及变形特性,并进一步总结密度对强度、侧向应变的影响规律。

1 试验土料与试验方案

试验土样采用南京浦口区滨江大道某段取得的粉质粘土,其基本物理性质指标见表1。经测定,该土料为低液限粉质粘土。

表1 试验土体的基本物理性质指标

比重 G_s	含水率 ω /%	初始孔隙比 e_0	液限 ω_{L10} /%	塑限 ω_p /%	塑性指数 I_p
2.71	39.6	1.22	38.6	21.5	17

本文试验采用重塑样。将扰动土样采用人工压实方法制备成直径 3.91 cm、高 8 cm 的三轴圆柱试样。

为研究基坑开挖过程中周围土体的应力应变关系及强度特性,对试样先进行 K_0 固结试验,固结围压分别为 50、100、200、300 kPa;固结完成后,进行轴向应力(大主应力)不变、围压减小的应力路径试验。

这里对三种不同干密度试样(1.27、1.45、1.57 g/cm³)进行试验,以便研究密度对试验结果的影响。具体试验方案见表2。

表2 试验方案

固结方式	干密度/ (g · cm ⁻³)	围压 /kPa			
K_0 固结	1.27	50	100	200	300
	1.42	50	100	200	300
	1.57	50	100	200	300

2 试验结果分析

2.1 侧向卸荷路径下土体应力应变关系

依据表2的试验方案,进行了3种不同密度粉质粘土 K_0 固结的侧向卸荷试验。侧向卸荷路径下试样的轴向应变和轴向附加应力, $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_a$, 关系曲线如图1所示。为便于分析干密度对试验结果的影响,将同一围压下不同干密度粉质粘土关系曲线绘制于同一幅图中。

2.2 强度特性对比分析

从图1可以看出,相同轴向应变和围压条件下,随着干密度的增加,轴向附加应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 均呈增大趋势,且随着干密度的增加,曲线的初始切线斜率显著变大,即试样的初始变形模量随干密度增大而增大。

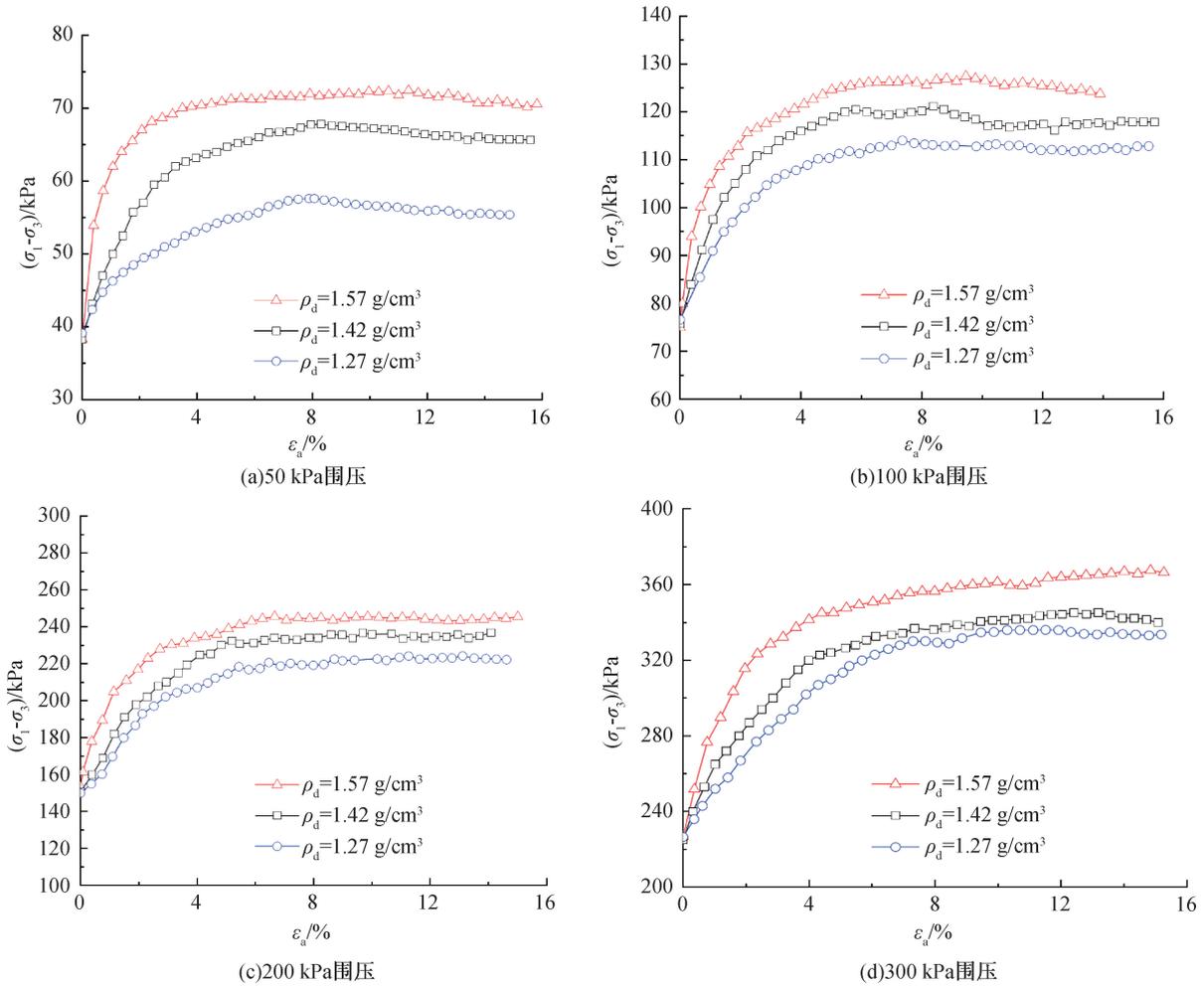


图1 不同干密度 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_a$ 曲线

Fig. 1 Relationship between $(\sigma_1 - \sigma_3)$ and ε_a of soils with different dry densities

为进一步探究密度对侧向卸荷路径下土体强度的影响,整理出土体破坏(即峰值强度或15%轴向应变)时对应的 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 与干密度的关系,绘制成曲线如图2所示。由图可知,相同围压下,随干密度的增大,试样剪切破坏时的 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 也略微增大。

绘制土体的强度包络线,如图3所示。得出土体的强度参数并列于表3。从表3可以看出,随着干密度的增加,粘聚力看不出明显规律,内摩擦角则呈现出略微增大的趋势。

表3 试验土样抗剪强度指标

Tab. 3 Shear strength index of test soil samples

干密度 ρ_d /($g \cdot cm^{-3}$)	强度参数	
	C/kPa	$\varphi/(^\circ)$
1.27	1.9	27.2
1.42	10.1	27.6
1.57	8.8	30.1

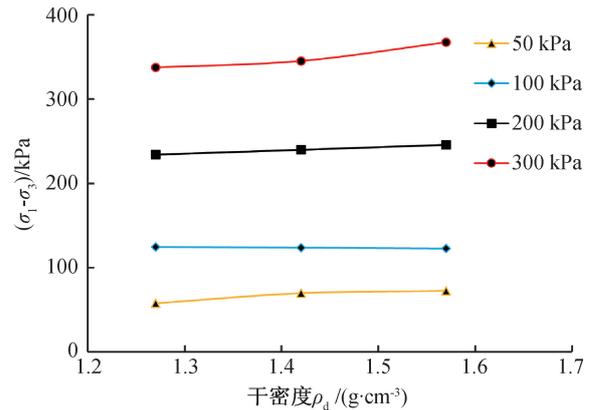


图2 土样破坏时 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 随干密度 ρ_d 变化关系

Fig. 2 Relationship between $(\sigma_1 - \sigma_3)$ and dry density during soil sample failure

为进一步研究干密度对强度的影响规律,在 $\sigma - \tau$ 坐标系中过原点分别作围压 50、100、200、300 kPa 时剪切破坏的莫尔圆切线,切线与横坐标夹角记为 φ_s ,该值具有摩擦角的概念,这里作者称

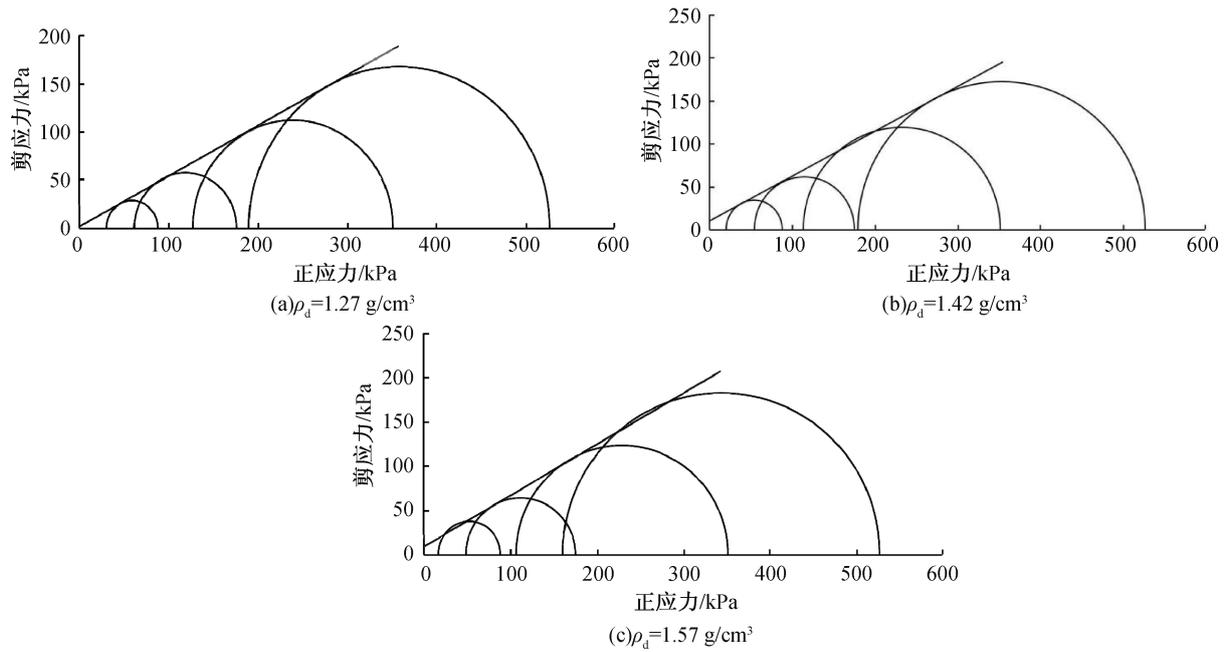


图3 不同密度试验强度包络线

Fig.3 Intensity envelope plot of soils with different dry densities

表4 各围压下的视摩擦角(单位:(°))

Tab.4 Apparent friction angle under different confining pressures

干密度 /(g·cm ⁻³)	围压/kPa			
	50	100	200	300
1.27	29.79	29.42	28.4	28.3
1.42	39.18	31.8	30.71	29.15
1.57	44.04	34.61	32.18	32.17

之为“视摩擦角”。结果整理成表4。

由表4可以看出,相同围压下,视摩擦角随着干密度的增加而逐渐增加,较为直观地表明随着土体干密度的增加,抗剪强度逐渐增大,且近似成线性关系。为此,作者整理了不同围压下视摩擦角随干密度变化关系,并用直线拟合,如图4所示。

图4中拟合直线斜率的物理意义是干密度每增加1 g/cm³所增加的摩擦角值。为了方便应用,这里,将该斜率值除以10,以Δ表示,则Δ为干密度每增加0.1 g/cm³所增加的摩擦角。

整理Δ-σ₃/Pa关系曲线,如图5所示。深入研究发现,Δ-σ₃/Pa关系的试验数据点可以用式(1)很好拟合。

$$\Delta = \delta - \frac{(1 + \delta) \log\left(\frac{\sigma_3}{Pa}\right)}{\alpha + \beta \log\left(\frac{\sigma_3}{Pa}\right)} \quad (1)$$

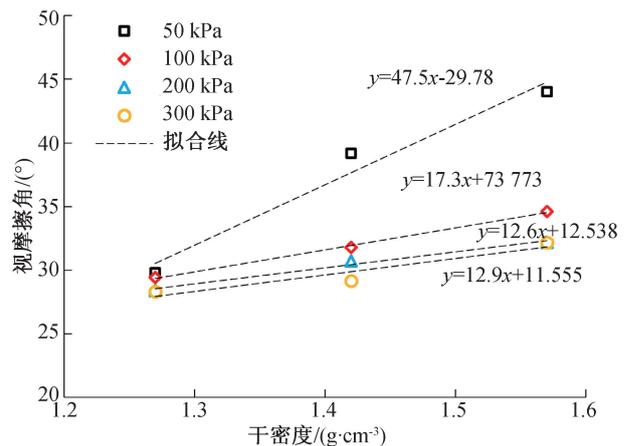


图4 不同围压下视摩擦角随干密度变化关系

Fig.4 Relationship between apparent friction angle and dry density under different confining pressures

式中,α、β、δ为拟合参数,这里,其值分别为1.73、1.31和3.45。注意,应用此式时,干密度的单位为g/cm³,Δ单位为(°/0.1 g⁻¹·cm⁻³),且这些拟合参数的大小与土类有关。

式(1)有一定的实用价值,依据它就可以估计粉质粘土因干密度变化而引起的摩擦角的变化。比如,对某粉质黏土层,如果厚度较大,其干密度一般随埋深增大,此时,只要知道某埋深处的内摩擦角,而且知道压缩曲线或干密度随深度变化的规律,就可以用式(1)估算内摩擦角随深度变化的规律。可以使相关计算或设计更精细。

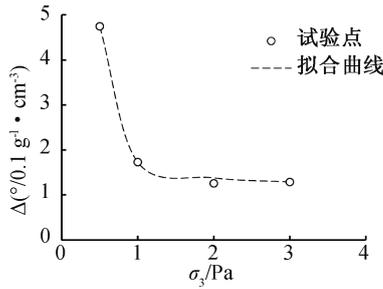


图 5 $\Delta - \sigma_3 / \text{Pa}$ 关系试验点与拟合曲线比较

Fig. 5 Comparison of $\Delta - \sigma_3 / \text{Pa}$ relation curve between experimental results and fitting curve

2.3 变形特性对比分析

为对比不同密度条件下试样的变形特性,将同一围压下不同干密度土体的体积应变与轴向应变($\varepsilon_v - \varepsilon_a$)关系曲线绘制在图 6 中。从图 6 可以看出,随干密度增大,土样的剪胀性增强。以围压 100 kPa 为例,对干密度 1.27 g/cm³ 的试验,破坏时体变约为 0.25%,而干密度为 1.57 g/cm³ 的试样,破坏时体变约为 -1.5%。

图 6 显示,围压越低,土样发生相变(体积由压缩转为膨胀)对应的轴向应变越小。以干密度 1.42 g/cm³ 的试样为例,在 50 kPa 围压下,轴向应

变等于 2%时就发生相变,而在 100 kPa 围压下,轴变到 4%才发生相变。

为进一步分析不同干密度下试样破坏时的侧向变形规律,整理出各试样破坏时的侧向应变如表 5 所示。由表可看出,同一干密度下随着围压的增加,试样破坏时的侧向应变逐渐减小;而相同围压下,随着干密度的增加,试样破坏时的侧向应变增大。分析产生原因,与剪胀性有关。由前文已知,干密度越大,土体的剪胀性越明显,再加上实验时附加轴向应力逐渐增大,侧向却在卸荷、解除约束,土体颗粒便会向两侧移动,增大侧向应变。

表 5 试样破坏时侧向应变(%)

Tab. 5 Lateral strain during specimen failure

密度 $\rho_d / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	围压/kPa			
	50	100	200	300
1.27	7.55	7.40	7.27	7.21
1.42	8.06	7.73	7.43	7.30
1.57	8.72	8.13	7.82	7.47

上述分析表明,侧向应变受干密度、围压共同影响。为了进一步探究干密度、围压与侧向应变三者的关系,依据试验结果整理出同一围压下,破坏时侧向应变与干密度的关系,如图 7 中试验点所示。

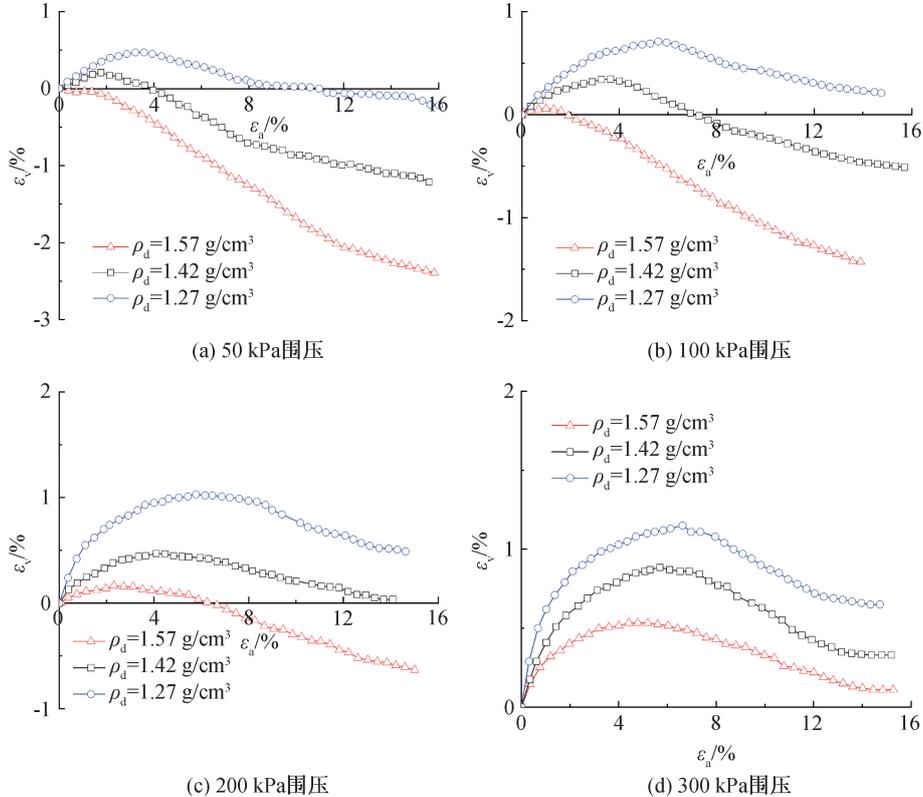


图 6 不同干密度土体 $\varepsilon_v - \varepsilon_a$ 曲线对比图

Fig. 6 Comparison of $\varepsilon_v - \varepsilon_a$ curves of soils with different dry densities

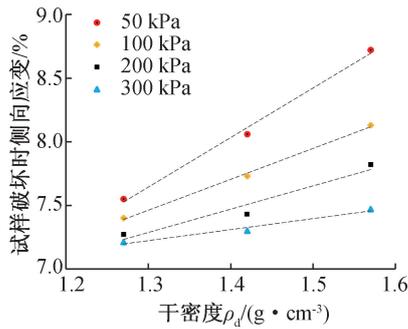


图7 不同干密度土体侧向应变对比图
Fig. 7 Comparison of lateral deformation of soil with different dry densities

由图7可知,破坏时侧向应变与试样密度具有良好的线性相关性,因此用直线进行拟合:

$$\varepsilon_r = k\rho_d + b \quad (2)$$

式中, ε_r 为侧向应变(%), ρ_d 为试样干密度, k 、 b 为拟合参数。将不同围压对应的 k 、 b 以及 R^2 值(相关系数)列于表6中, R^2 均大于0.94,表明拟合良好。依据式(2)可估算在侧向卸荷条件下土体破坏时的侧向应变。

表6 不同围压对应的拟合参数值

Tab. 6 Fitting parameter values corresponding to different confining pressures

参数	围压 σ_3 /kPa			
	50	100	200	300
k	3.90	2.64	1.83	0.87
b	0.58	4.00	4.90	6.10
R^2	0.995	0.990	0.945	0.969

由表6可以看出, k 、 b 的大小与围压相关,分别将它们与围压的关系在图8和图9中点绘出来。进一步研究发现, k 、 b 的值与围压的关系可采用式(3)、(4)进行拟合:

$$k = C_1 \ln \sigma_3 + D_1 \quad (3)$$

$$b = C_2 \ln \sigma_3 + D_2 \quad (4)$$

式(3)、(4)中, σ_3 为固结围压(单位为kPa), C_1 、 D_1 、 C_2 、 D_2 为拟合参数。对于 k 值, C_1 、 D_1 值分别为-1.62和10.20, R^2 可达0.987,对于 b 值, C_2 、 D_2 分别为1.82和-4.44, R^2 可达0.961,拟合均较为良好。

依据式(2)~(4),可以初步估计基坑等工程开挖后支挡结构的极限位移。假定支挡结构后土体破坏时主动破坏区范围如图10所示,滑动面与水平面夹角为 $(45^\circ + \varphi/2)$ 。从而,可以计算任意深度处的滑动区水平范围,如图10中的 L 。根据

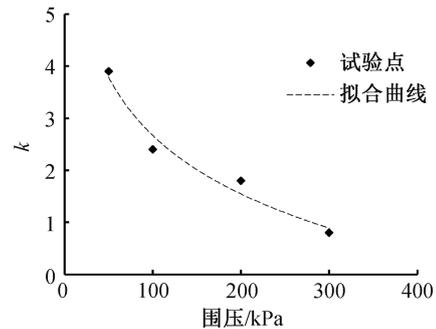


图8 k 值与围压关系试验点与拟合曲线比较
Fig. 8 Relationship between k value and confining pressure

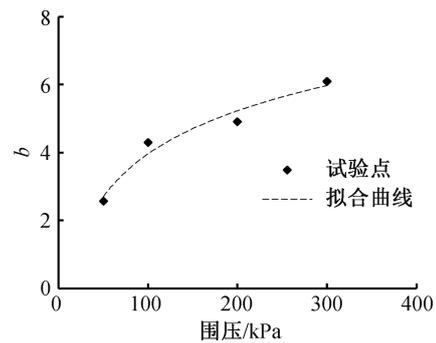


图9 b 值与围压关系试验点与拟合曲线比较
Fig. 9 Relationship between b value and confining pressure

该埋深处土体的干密度及小主应力,就可用式(2)计算出破坏应变(极限应变, ε_r),从而,该处的极限位移为 $u_r = \varepsilon_r L$,如果考虑一定的安全储备,该值就可以作为基坑变形监测的预警值。

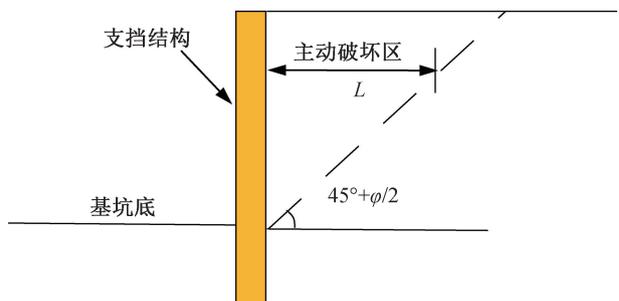


图10 支挡结构后土体主动破坏区范围
Fig. 10 Range of active failure zone of soil after retaining structure

3 结论

1)不同干密度粉质粘土试样在 K_0 固结侧向卸荷路径下,均表现出明显的剪胀性,此性质与常规三轴压缩路径下相似;且随干密度的增加,土体的剪胀性增强,强度指标也逐渐增大。

2)依据试验结果,提出了一个土体因干密度变化引起内摩擦角变化的经验公式,利用该公式

可以估计土体摩擦角随深度(密度)的变化,使得相关计算或设计更精细。

3) 土体破坏时的侧向应变随着密度的增加而增加,但随着围压的增大,密度的影响逐渐减小。提出了一个侧向卸荷条件下土体破坏时侧向应变公式,并建议了据此公式估计基坑支挡结构的极限位移方法。

参考文献:

- [1] LADE P V, DUNCAN J M. Stress-path Dependent Behavior of Cohesionless Soil[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1976, 102(1): 51-68.
- [2] 牛建东, 李泽玮, 肖剑, 等. 考虑应力路径基坑变形计算及支护性能研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(1): 71-80.
- [3] 丁国洪. 不同应力路径下黏性土的力学特性研究[J]. 城市道桥与防洪, 2020(10): 150-153+20-21.
- [4] 盛志强, 崔挺. 基坑开挖卸荷应力路径地基土工程特性[J]. 建筑科学, 2018, 34(7): 1-11.
- [5] 刘颖, 相斌辉, 扶名福. 沿海地区复杂地质条件下三角形深大基坑变形实测分析与数值模拟研究[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(5): 207-212+217.
- [6] 陈昆, 闫澍旺, 孙立强, 等. 开挖卸荷状态下深基坑变形特性研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(4): 1075-1082.
- [7] 曾国熙, 潘秋元, 胡一峰. 软粘土地基基坑开挖性状的研究[J]. 岩土工程学报, 1988, 10(3): 13-22.
- [8] 刘国彬. 软土卸荷变形特性的试验研究[D]. 上海: 同济大学, 1993.
- [9] 刘熙媛, 闫澍旺, 窦远明. 基坑开挖卸荷对土体抗剪强度指标的影响[J]. 河北工业大学学报, 2004, 33(4): 54-57.
- [10] 殷德顺, 王保田. 基坑工程侧向卸、加载应力路径试验及模量计算[J]. 岩土力学, 2007(11): 2421-2425.
- [11] 张玉, 邵生俊. 平面应变条件下黄土的竖向加载变形与强度特性分析[J]. 土木工程学报, 2016, 49(3): 112-121.
- [12] 姚建业. 软土地区采用三轴剪切试验强度验算基坑支护工程稳定性的讨论[J]. 岩土工程界, 2009, 12(12): 18-19.
- [13] 张坤勇, 李广山, 梅小洪, 等. 基于 K_0 固结排水卸荷应力路径试验粉土应力-变形特性研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(7): 1182-1188.
- [14] 童华炜, 邓祎文. 土体 K_0 固结-卸荷剪切试验研究[J]. 工程勘察, 2008(5): 13-16.
- [15] 宋广, 宋二祥. 基坑开挖数值模拟中土体本构模型的选取[J]. 工程力学, 2014, 31(5): 86-94.
- [16] 胡小荣, 蔡晓锋, 汪日堂. 正常固结饱和黏性土三剪有限变形弹塑性本构模型研究[J]. 固体力学学报, 2021, 42(2): 156-179.
- [17] 万征, 孟达, 宋琛琛, 等. 状态变量相关三维饱和黏土结构性本构模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(4): 817-828.
- [18] 刘家顺, 王来贵, 张向东, 等. 部分排水条件下饱和黏土渐近状态本构模型研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(2): 485-491.

(责任编辑 王利君)