

双折线形体变控制的三轴试验研究

陈默子^{1,2}, 周星辰³

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 南京 210098; 2. 河海大学 江苏省岩土工程技术工程研究中心, 南京 210098; 3. 上海市基础工程集团有限公司, 上海 200082)

摘要: 通过控制最大排水体变的双折线形应变路径三轴试验, 研究了控制排水条件对抗剪强度的影响。试验结果表明双折线形应变路径加载条件下, 土体的峰值抗剪强度仅与受剪土样的最大排水体变相关, 两者近似呈线性关系; 在双折线形应变路径试验剪切全程中, 试样都不会达到临界状态; 体变与剪应变对于试样的剪切特性影响与剪应变水平有关。

关键词: 双折线形; 排水条件; 抗剪强度; 应变路径; 临界状态

中图分类号: TU 472.33

文献标志码: A

Experimental study of triaxial test controlled by double fold linear volumetric strain

CHEN Mozi^{1,2}, ZHOU Xingchen³

(1. Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Jiangsu Research Center for Geotechnical Engineering Technology, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Shanghai Foundation Engineering Group Co., Ltd, Shanghai 200082, China)

Abstract: The study on the effect of drainage conditions on clay strength was carried out with double fold linear strain path triaxial test controlled by maximum drainage volumetric strain. The results show that under the condition of double fold linear strain path, the peak shear strength is merely linear to the maximum drainage volumetric strain of soil. In the whole test the sample does not reach the critical state. The effect of volumetric strain and shear strain on shear characteristic are related to shear strength level.

Key words: double fold linear; drainage conditions; shear strength; strain path; critical state.

黏土地基破坏通常发生于堆载期间或者堆载后的短期内^[1-7]。对于一些堆载速度较慢的工程, 以及设有竖向排水体的地基, 随着孔隙水排出, 土体发生固结同时剪切, 地基土强度不断增长, 若使用不排水抗剪强度进行设计计算和稳定性分析便过于保守。不少研究表明排水条件对土体的强度有着非常大的影响, 黏土多以改变试样的剪切速率来实现排水条件的改变, 但它不易于定量分析, 因此本文提出通过改变试样体变来实现不同排水条件, 从而模拟在堆载过程中地基土固结同时剪切的状态, 实现定量分析排水条件对土体强度的影响^[8-12]。试验中, 持续的体积收缩导致超静孔隙水压力在早期达到峰值后持续消散, 平均有效应力水平和偏应力水平持

续上升, 试样持续应变硬化, 有效应力路径到了后期呈直线持续发展且存在渐近现象, 土样不会发生剪切破坏, 这种规律在黏土中也得到了验证^[13]。由于持续的硬化导致土体的剪应力无法达到该排水条件下的抗剪强度, 因此本文采用双折线形体变控制的试验方案, 使其总的排水量受到一定的限制, 得出部分排水强度, 为实际工程提供参考。

1 试验仪器、土样及试验方案

1.1 试验仪器

本文试验仪器为应力应变控制式三轴剪切渗透仪。该设备可以在试样进行三轴压缩试验^[13]的过程

收稿日期: 2018-02-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51278171, 51778211); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2017B20614)

作者简介: 陈默子(1994-), 女, 江苏如皋人, 硕士研究生, 主要从事软土地基处理方面的研究工作。

中,通过伺服电机以及体变测量及反压力控制器,同时控制试样的轴向变形速率以及排水速率,从而实现应变路径的控制。

1.2 试验土样

本文采用的试验土样为重塑高岭土,其各项物理性质指标见表1。

1.3 试验方案

试验前,将风干的重塑高岭土与水按照20:3的质量比进行混合调匀,制得含水率约20%的湿样,并用击实法制得干密度 1.39 g/cm^3 、孔隙比为0.95的直径3.91 cm、高8 cm圆柱样,并用抽真空饱和法对试样进行饱和处理,饱和后的含水率为35.1%,液性指数为0.595,土样处于可塑态。装样完成后进行排气以及反压饱和,饱和所用的反压力大小为150 kPa,饱和后试样的Skempton孔隙水压力系数 $B>0.98$,可认为试样为饱和样,准备开始试验。

本试验采用的剪前固结压力均为100 kPa且采用等向固结的方式。本文的剪切试验需要对试样的最大排水体变进行控制,为实现该目的,所有试验基于直线形应变路径进行一定的改进,具体为:试

表1 试验用高岭土物理性质指标

指标名称	指标值
比重 G_s	2.71
塑限含水率 $w_p/\%$	22.2
液限含水率 $w_L/\%$	43.7
塑性指数 I_p	21.5
风干含水率 $w_d/\%$	4.5
粒径 $d \leq 0.005$ 颗粒含量 $/\%$	84
粒径 $0.005 < d \leq 0.075$ 颗粒含量 $/\%$	10

样开始剪切后,先按照某一固定的 $\varepsilon_v/\varepsilon_a$ 进行直线形应变路径加载,即试样的轴向变形速率以及排水速率均保持一个常数不变,待试样的排水量达到某一水平后,关闭排水阀,使试样在不排水的状态下继续进行剪切直至达到其抗剪强度为止。这种加载方式实际上是一种双折线形应变路径加载。为尽可能满足单元体试验中试样内部应力分布均匀的要求,试验中应保证试样内的孔压梯度尽量小,故前期试样对外排水阶段,排水速率均应设置为仪器所能达到的最低值0.003 mL/min,通过改变轴向变形速率来实现不同的 $\varepsilon_v/\varepsilon_a$ 大小。这种双折线形应变路径,前期的 $\varepsilon_v/\varepsilon_a$ 以及最大排水体变是两个可能影响试样部分排水抗剪强度的主要因素,因此,分别考虑最大排水体变相同的情况下前期 $\varepsilon_v/\varepsilon_a$ 对部分排水强度的影响,以及前期 $\varepsilon_v/\varepsilon_a$ 相同的情况下最大排水体变对部分排水强度的影响。本文的具体试验方案见表2。

2 试验结果及分析

在最大排水体变同为2 mL的情况下,试样表现出的剪切特性见图1。前期由于 $\varepsilon_v/\varepsilon_a$ 不同,因此土样表现出不同的剪切特性, $\varepsilon_v/\varepsilon_a$ 越大,应变硬化越显著,超静孔压水平越低且由上升转为下降的时间越早。试样的体变达到最大值停止向外排水后,排水条件的突变使得超静孔压由之前的逐渐消散转为迅速上升,如图1(c)所示,且前期的 $\varepsilon_v/\varepsilon_a$ 越大,停止排水后的超静孔压上升幅度也就越大,超静孔压迅速上升引起有效应力水平骤降,因此在停止排水后有效应力路径中 p' 由增大的趋势转为减小的趋势;停止排水后随着剪切的继续,试样的超静孔压上升到某一个峰值后开始转为下降,且下降速度明显慢于前期排水阶段,虽然前期排水阶段试样的剪

表2 双折线形体变控制三轴剪切试验方案

序列	试验代号	轴向加载速率 $/(\text{mm}\cdot\text{min}^{-1})$	前期排水速率 $/(\text{mL}\cdot\text{min}^{-1})$	前期 $\varepsilon_v/\varepsilon_a$	最大排水体变 $/\text{mL}$
1	L-S-L	0.022	0.003	0.119	1.000
2	L-S-M	0.022	0.003	0.119	2.000
3	L-M-L	0.011	0.003	0.239	1.000
4	L-M-M	0.011	0.003	0.239	2.000
5	L-M-H	0.011	0.003	0.239	3.000
6	L-F-M	0.007	0.003	0.359	2.000
7	L-F-H	0.007	0.003	0.359	3.000

切特性明显受到了 $\varepsilon_v/\varepsilon_a$ 的影响，但是后期不排水阶段土样的应力状态逐渐趋于相同，其中偏应力最终会达到一个最大值，最大值之后存在略微的软化趋势，这个最大值与前期的 $\varepsilon_v/\varepsilon_a$ 基本无关。

类似的现象也发生于最大排水体变为 1 mL 以及 3 mL 时，如图 2 和图 3 所示，以最大偏应力作为衡量土体抗剪强度的依据，那么，在双折线形应变路径下，土样的抗剪强度与前期的排水状态无关，

同一最大排水体变对应唯一的抗剪强度。

前期 $\varepsilon_v/\varepsilon_a$ 相同的情况下，最大排水体变对试样剪切特性的影响如图 4 所示。前期应变路径相同，因此 L-M-H、L-M-M 以及 L-M-L 三组试验的试样表现出相同的剪切特性，之后各自在达到不同的轴向应变时停止排水，图 4(b)–(d) 显示，停止排水时对应的轴向应变越小，停止排水后应力状态的后续变化越大，具体体现在，图 4(b) 和 (c) 中最大排水

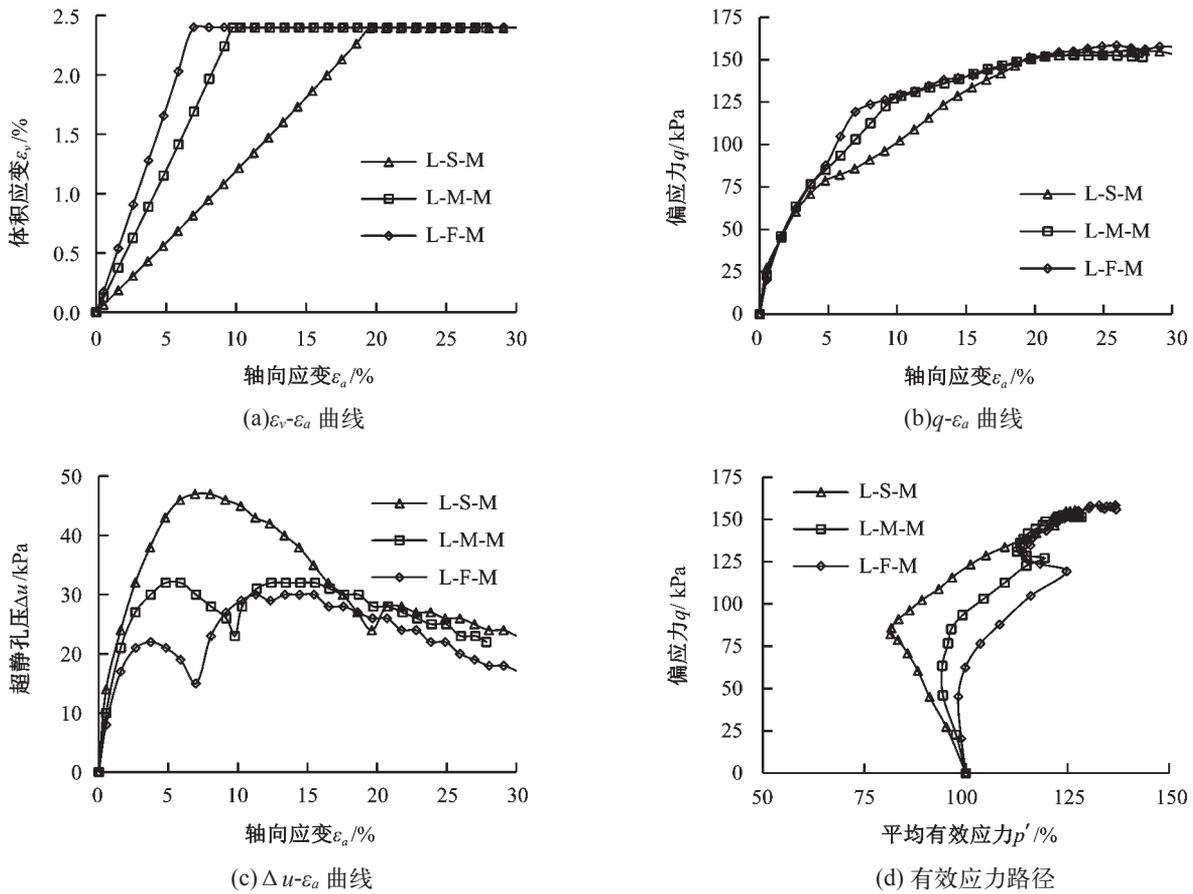


图 1 最大排水体变为 2 mL 的情况下土样剪切曲线

Fig.1 Shearing curves when maximum drainage volumetric strain is 2 mL

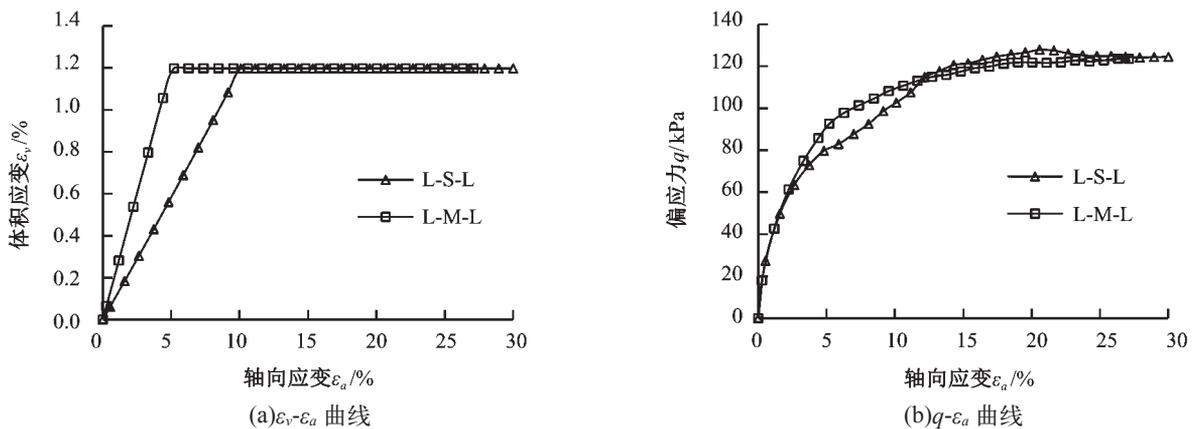


图 2 最大排水体变为 1 mL 的情况下土样剪切曲线

Fig.2 Shearing curves when maximum drainage volumetric strain is 1 mL

体变较低的 L-M-L 试验在应变路径突变后的偏应力仍然有较大的增量,超静孔压的上升则是非常明显,而最大排水体变较大的 L-M-H 在应变路径突变后,其偏应力基本保持在一个稳定的水平,几乎没有后续的增加,超静孔压经历一个微小的上升之后便很快转为缓慢下降的发展态势。

图 4(d) 则显示,前期 $\varepsilon_v/\varepsilon_a$ 相同的情况下,最大排水体变较大时,达到最大排水体变之后,有效应

力路径基本收敛于某一点,最大排水体变较小时,达到最大排水体变之后有效应力路径则会产生明显的变化。

以达到峰值偏应力作为确定土体抗剪强度的标准,图 4(b) 的试验曲线表明,双折线形应变路径下试样的最大排水体变越大,土体的抗剪强度也就越高,最大排水体变为 1、2 以及 3 mL 时对应的峰值偏应力 q_m 分别为 125.9、155.7 和 187.3 kPa。抗

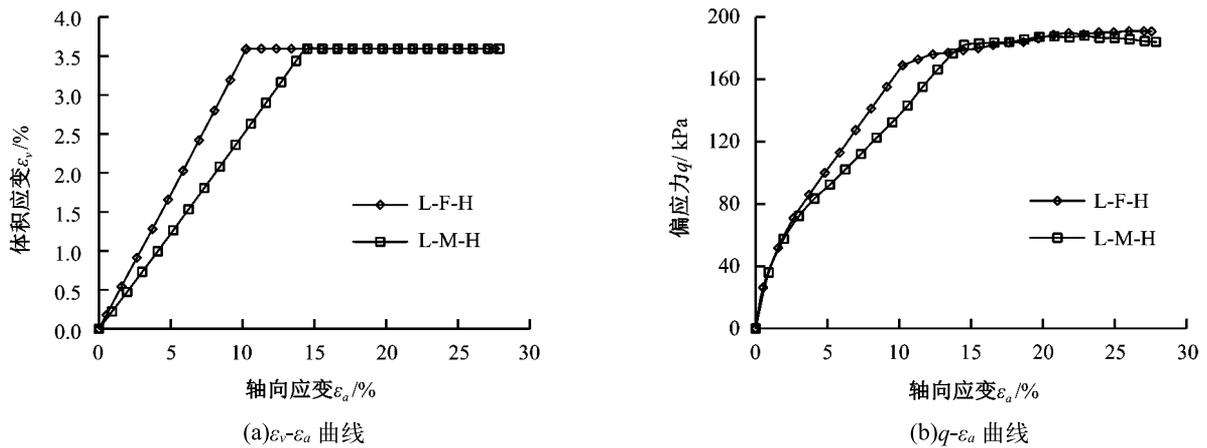


图 3 最大排水体变为 3 mL 的情况下土样剪切曲线

Fig.3 Shearing curves when maximum drainage volumetric strain is 3 mL

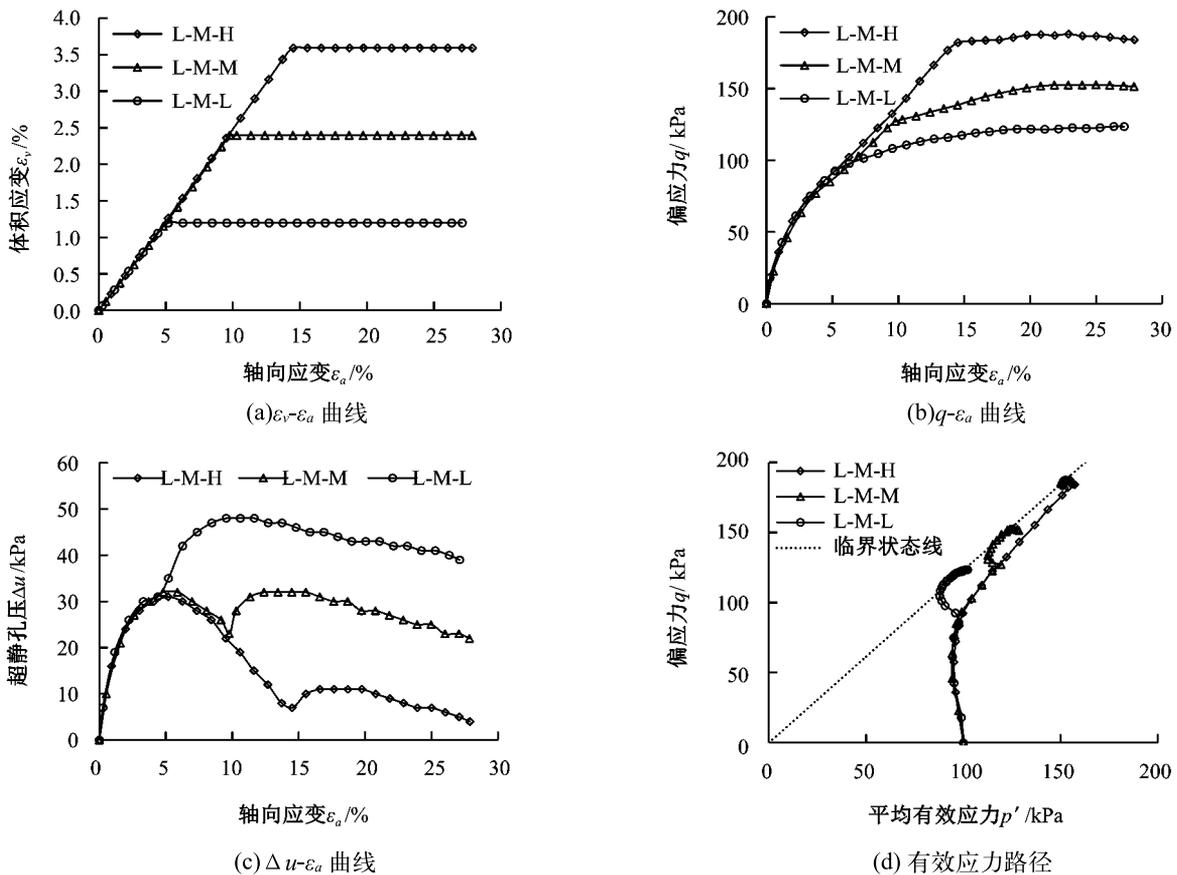


图 4 前期 $\varepsilon_v/\varepsilon_a$ 相同而最大排水体变不同的情况下土样剪切曲线

Fig.4 Shearing curves when the early $\varepsilon_v/\varepsilon_a$ are the same and maximum drainage volumetric strains are different

剪强度 τ_f 取最大剪应力平面上的剪应力值，则有 $\tau_f=0.5q_m$ ，对比同种土体在相同试验条件下得到的抗剪强度以及完全排水抗剪强度，土体的抗剪强度与最大体积应变 $\varepsilon_{v,m}$ 的关系见图 5，可以发现二者的关系基本呈式 (1) 所示的线性关系，线性拟合效果较好。

$$\tau_f=47.695+12.744\varepsilon_{v,m} \quad (1)$$

以达到临界状态作为剪应力达到抗剪强度的评判标准，按照临界状态土力学的理论^[14]，土体受剪达到临界状态时其比体积 $v(v=1+e, e$ 为孔隙比) 与平均有效应力 p' 在半对数坐标系中的关系见图 7，图中 NCL 表示正常固结线，CSL 表示临界状态线，临界状态满足式 (2) 所示的方程组：

$$q = Mp' \quad (2)$$

$$v = \Gamma - \lambda \ln p' \quad (3)$$

M 为 $q-p'$ 系中临界状态线的斜率，如图 4(d) 中的虚线所示， λ 为图 6 中三条斜线的斜率绝对值， v_{ini} 、 Γ 、 λ 、 M 四个参数为土体力学特性参数，与试验加载条件无关。按照本文的常围压试验条件，试样剪切之前在 $p'_c = \sigma'_{3c}$ 的等向有效固结压力下完成固结，那么固结完成时试样的比体积 v_0 与固结压力 σ'_{3c} 满足：

$$\ln(\sigma'_{3c}) = \frac{v_{ini} - v_0}{\lambda} \quad (4)$$

不产生体积变形的完全不排水剪试验全程都有 $v=v_0$ ，代入式 (2) 得到试样的不排水强度 s_u 为：

$$s_u = \frac{q}{2} = \frac{M}{2} p' = \frac{M}{2} \exp\left(\frac{\Gamma - v_0}{\lambda}\right) \quad (5)$$

将式 (4) 代入式 (5) 便可得到归一化不排水强度的表达式：

$$\frac{s_u}{\sigma'_{3c}} = \frac{M}{2} \cdot \exp\left(\frac{\Gamma - v_{ini}}{\lambda}\right) \quad (6)$$

不产生超静孔隙水压力的完全排水剪试验全程都有 $\sigma'_3 = \sigma'_{3c}$ ，从剪切开始直至达到临界状态始终满足：

$$\Delta q = 3 \Delta p' \quad (7)$$

将式 (2) 以及固结完成时的应力状态代入式 (7)，可以得到：

$$q_f = \frac{3M}{3-M} \sigma'_{3c} \quad (8)$$

故土体的归一化排水强度的表达式为：

$$\frac{s_u}{\sigma'_{3c}} = \frac{3M}{6-2M} \quad (9)$$

引入参数 α 用于量化描述排水条件的优劣：

$$\alpha = \frac{\Delta v_m}{\Delta v_{m,d}} \quad (10)$$

其中 Δv_m 表示某一排水条件下的最大体变， $\Delta v_{m,d}$ 表示完全排水条件下达到临界状态时的体变 (对于正常固结土一般也是完全排水剪达到的最大体变)，显然 $0 \leq \alpha \leq 1$ ，0 表示完全不排水，1 表示完全排水。本文的试验结果表明抗剪强度与最大体变呈线性关系，因此折线形应变路径下的部分排水抗剪强度可用内插法表示：

$$\frac{s_{pd}}{\sigma'_{3c}} = \alpha \cdot \frac{3M}{6-2M} + (1-\alpha) \cdot \frac{M}{2} \exp\left(\frac{\Gamma - v_{ini}}{\lambda}\right) \quad (11)$$

式 (11) 表明归一化部分排水剪切强度仅仅与排水条件有关。

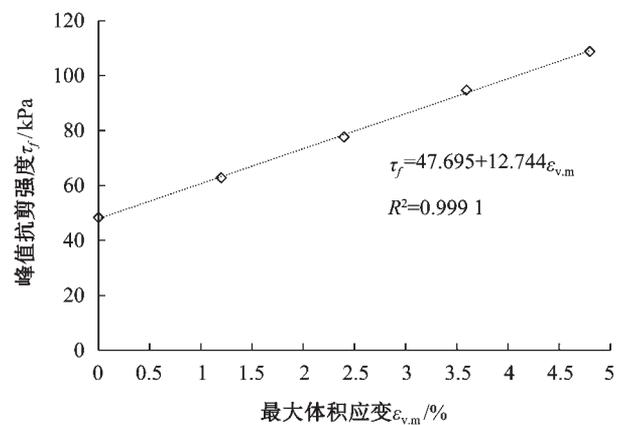


图5 双折线形应变路径下峰值抗剪强度与最大体积应变关系
Fig.5 The relationship of peak shear strength and maximum drainage volumetric strain in double fold linear strain path

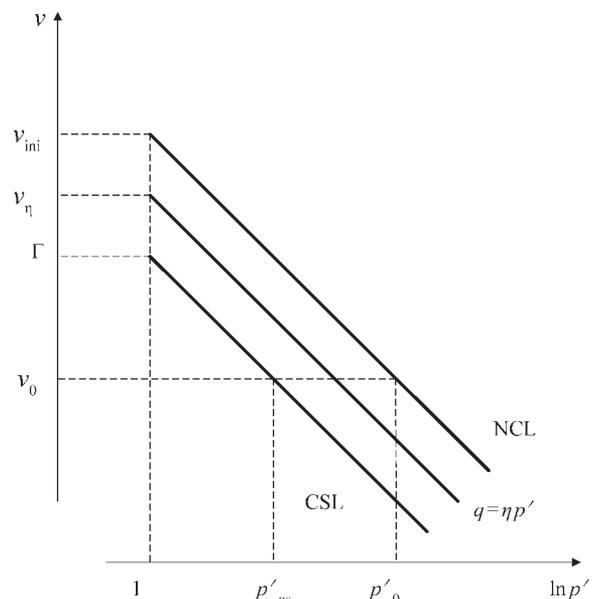


图6 正常固结状态以及临界状态下土体的 $v-p'$ 关系曲线
Fig.6 Curves of $v-p'$ in normal consolidation state and critical state

3 讨论

需要注意的是,图4(d)显示的有效应力路径虽然与临界状态线相交,但是交点处并非代表试样达到了临界状态。因为此处并不满足式(11)所示的临界状态的定义——试样在应力状态及体积不发生改变的情况下持续产生剪切变形,且交点处试样的应力应变状态并不能满足 $v=2.192 \sim 0.113 \ln p'$ 的临界状态方程^[14]。实际上,整个折线形应变路径的部分排水剪切试验全程,试样都没有达到临界状态。而且,式(11)中虽然用到了临界状态参数,但该参数由不排水强度以及排水强度引入,与部分排水条件下应力达到抗剪强度时的状态并无关联。

$$\frac{\partial q}{\partial \varepsilon_q} = \frac{\partial p'}{\partial \varepsilon_q} = \frac{\partial v}{\partial \varepsilon_q} = 0 \quad (12)$$

注意到图2—图4,前期的 $\varepsilon_v/\varepsilon_a$ 虽然不同,但是剪切初期试样的曲线基本呈现一致的发展规律。随着剪应变的增加,不同前期 $\varepsilon_v/\varepsilon_a$ 的试验才逐渐表现出差别,笔者认为,在剪应变较小的情况下,试样的剪切特性受体变的影响较小,决定试样剪切特性的主要是剪应变,随着剪应变的增加,体变的影响逐渐增大,剪应变的影响逐渐减小,因此,当试样处于折线形应变路径的加载条件下,从线性排水转至不排水状态对应的轴向应变(或者剪应变)越大时,转为不排水($\partial \varepsilon_v/\partial \varepsilon_a$)后,其偏应力以及超孔压的发展规律(体现在 $\partial q/\partial \varepsilon_a$ 以及 $\partial \Delta u/\partial \varepsilon_a$)越表现出与试样剪切全程无体变的不排水试验相似的规律。

4 结论

1) 双折线形应变路径加载条件下,土体会表现出峰值抗剪强度,这个峰值强度仅仅与受剪土样的最大排水体变的影响有关,与前期的应变路径具体形式无关。

2) 双折线形应变路径试验得到的部分排水抗剪强度与最大排水体变之间近似呈线性关系,并且可以依据不排水强度以及排水强度通过线性内插法得到。

3) 双折线形应变路径试验全程试样并不会达到临界状态,这与完全不排水剪试验以及完全排水剪试验有所区别。

4) 双折线形应变路径试验结果表明,体变与剪应变对于试样的剪切特性影响与剪应变水平有关,低剪应变水平下试样的剪切特性主要受剪应变影响,

高剪应变水平下试样的剪切特性主要受体变的影响。

参考文献:

- [1] BAUDUIN C, MOLENKAMP F. Evaluation of failure of embankment during heightening[J]. *Géotechnique*, 1991, 41(3): 423-435.
- [2] CRAMFORD C B, FANNIN R J, KERN C B. Embankment failures at Vernon, British Columbia[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1995, 32: 271-284.
- [3] CHUNG S G, KIM S K, KANG Y J, et al. Failure of a breakwater founded on a thick normally consolidated clay layer[J]. *Geotechnique*, 2006, 56(6): 393-409.
- [4] BERRE T. Test fill on soft plastic marine clay on Onsøy, Norway[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2014, 51: 30-50.
- [5] ROCHELLE P L, TRAK B, TAVENAS F. Failure of a test embankment on a sensitive Champlain Clay deposit[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1974, 11: 142-164.
- [6] INDRARATNA B, BALASUBRAMANIAM A S, BALACHANDRAN S. Performance of test embankment constructed to failure on soft marine clay[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1992, 118: 12-33.
- [7] 卓文泽, 周斌. 河内-海防公路软基渗透性及差异沉降研究[J]. *河北工程大学学报:自然科学版*, 2015, 32(1): 14-18.
- [8] 楚剑, 许镇鸿. 应变路径试验方法及其在应变变化研究中的应用[J]. *岩土工程学报*, 1996, 18(5): 46-51.
- [9] WANATOWSKI D, CHU J, LO S C R. Strain-softening behaviour of sand in strain path testing under plane-strain conditions[J]. *Acta Geotechnica*, 2008, 3(2): 99-114.
- [10] WANATOWSKI D, CHU J. Pre-failure instability behavior of sand in strain path testing under plane-strain conditions[J]. *Soils and Foundations*, 2011, 51(3): 423-435.
- [11] CHU J, LO S C R. Asymptotic behaviour of a granular soil in strain path testing[J]. *Géotechnique*, 1994, 44(1): 65-82.
- [12] 周星辰. 部分排水条件下饱和黏土的强度试验研究[J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(20): 223-229.
- [13] 王保光, 沈雪, 沈扬. 基于三轴试验的水-土压力计算[J]. *河北工程大学学报:自然科学版*, 2015, 32(4): 34-37.
- [14] WOOD D M. Soil behaviour and critical state soil mechanics[M]. Cambridgeshire: Cambridge University Press, 1990.

(责任编辑 王利君)