

文章编号: 1000-7598-(2013) 增 2-0121-07

考虑超固结比和应力速率影响的 膨胀土卸荷力学特性研究

李新明¹, 孔令伟¹, 郭爱国¹, 周 恒², 朱明辉²

(1.中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071; 2. 河南省南阳宛达听高速公路建设有限公司, 河南 南阳 473003)

摘 要: 利用 GDS 应力路径三轴试验系统对南阳膨胀土进行 3 种应力速率下、4 种超固结比 (*OCR*) 的被动压缩三轴试验及 3 种超固结比的被动挤伸三轴试验, 分析了不同超固结比和应力速率下其应力 (孔隙水压力)-应变关系、有效应力路径及变形模量的演化规律, 对膨胀土变形模量各向异性特性进行了初步探讨。结果表明, 应力速率、超固结比及卸荷路径均对膨胀土力学特性有一定影响。在被动压缩路径和被动挤伸路径下, 随着应力速率和超固结比的增加, 相同轴向应变时的偏应力值单调增加; 不同超固结比和应力速率时膨胀土的孔隙水压力始终为负值, 且其降幅总体上随超固结比的增加而增大, 但其降幅随应力速率的变化规律与剪切路径有关。在被动压缩路径下, 相同应变时不同应力速率下的孔压降幅基本相同; 而在被动挤伸路径下, 其降幅随应力速率的增加而增大。边坡开挖路径的选择对于边坡变形影响显著, 被动挤伸路径下达到设定极限偏应力时的轴向应变明显大于被动压缩路径。膨胀土变形模量 E_{100} 随着超固结比和应力速率的增加而增加, 但各应力速率下变形模量的各向异性特性则随着超固结比的增加而变弱。

关 键 词: 膨胀土; 超固结; 应力速率; 应力路径; 变形模量

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Effects of overconsolidation ratio and stress rate on unloading mechanical behavior of expansive clay

LI Xin-ming¹, KONG Ling-wei¹, GUO Ai-guo¹, ZHOU Heng², ZHU Ming-hui²

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Nanyang Wandaxin Expressway Construction Co., Ltd., Nanyang, Henan 473003, China)

Abstract: A total number of 21 consolidated undrained triaxial shear tests on Nanyang expansive clay have been performed by GDS stress path triaxial system. The specimens are prepared in kinds of 4 different overconsolidation ratios (*OCR*) for reduced triaxial compression (RTC) shear tests and 3 for reduced triaxial tension (RTT) shear tests, which all sheared at three different stress relief rates. The influences of *OCR* and stress rate on stress-strain relationship, pore water pressure, effective stress path and deformation modulus are investigated. The results show that the influences of *OCR* and stress rate on mechanical behavior of expansive clay in compression and tension are similar. As the increase of stress rate and *OCR*, the deviatoric stress in stress-strain curve increased monotonically to the maximum with the same axial strain. The pore water pressure is always negative with different *OCR*s and unloading stress rates in compression and tension. The decreasing range increased with the increasing of *OCR*, and the influence rule of stress rate on the change range of pore water pressure is shear stress path related. The deformation modulus E_{100} increased with the increasing of *OCR* and stress rate; but the anisotropy of deformation modulus is becoming weaker as the increase of *OCR* under different stress rates.

Key words: expansive clay; overconsolidation; stress rate; stress paths; deformation modulus

1 引 言

膨胀土具有显著的胀缩性、裂隙性和超固结

性, 工程性质较差。膨胀土边坡, 尤其是人工开挖边坡, 采取的防护措施不当时, 易出现边坡失稳、滑塌等灾害。随着工程建设范围的延伸, 膨胀土地

收稿日期: 2013-04-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.51079141, No.10872210); 岩土力学与工程国家重点实验室部署项目(No.Y110021)。

第一作者简介: 李新明, 男, 1987 年生, 博士, 主要从事特殊土力学及边坡工程方面的工作。E-mail:xinmingli01@163.com

区的工程项目随之增多,如何有效整治人工开挖边坡工程灾害是目前重点关注的研究方向之一。

膨胀土边坡失稳除因其胀缩性和裂隙性外,超固结性的影响不容忽视^[1]。超固结性作为膨胀土的重要特征之一,主要表现为历史卸荷作用导致其土层过去受过的固结压力大于现有的土重压力和其水平应力大于垂直应力。在膨胀土边坡开挖过程中,其较一般黏性土水平应力的释放效应更加显著。因此,研究考虑超固结性影响下的膨胀土卸荷力学特性,对于有效地进行膨胀土边坡设计及治理等显得十分必要。

边坡开挖过程中,开挖速率的选择非常重要。目前,对于土体速率效应的研究主要集中于软黏土。其中代表性的成果有:Graham等^[2]引入 $\rho_{0.1}$ 来定量描述应变速率每增加10倍不排水强度的增加值;Sheahan等^[3]提出了普适的 ρ_e 来定量描述应变速率对其不排水强度的影响;Zhu等^[4]提出用 ρ_q 来描述超固结土不排水强度与应变速率的关系。近年来,Saner^[5]、Suzanne^[6]等也指出了研究超固结硬黏土速率效应的必要性和重要性,并对Bearpaw Shale的次固结效应进行了研究。但针对膨胀土强度特性的速率效应,尤其是卸荷速率效应方面的研究尚不充分。

饱和黏土的变形与强度性质在一定程度上还受其应力历史及路径的影响。Sheahan^[3]、Zhu^[4]、张冬梅^[7]等均进行了不同超固结比OCR对土体强度、孔隙水压力等影响的不排水三轴压缩及挤伸试验研究,得到了一些有益的结论。但考虑应力历史及剪切速率的研究成果积累尚不丰富,同时考虑应力历史和剪切速率的硬黏土在不同路径下强度及变形特性的研究尚需深入进行。

本文以膨胀土边坡开挖为背景,以南阳膨胀土为研究对象,通过对3种应力速率下不同超固结比OCR膨胀土进行被动压缩和被动挤伸不排水三轴试验,综合考虑超固结比及应力速率对其应力-应变曲线、孔隙水压力及有效应力路径的影响。最后,对其变形模量及其各向异性进行了初步探讨。

2 试验方案

2.1 土样参数

试验用土样取自南阳某高速公路现场,取样深度约4 m,采用探坑法取样。土样呈褐红色,灰白夹层明显。土样基本参数:天然含水率 $w=26.1\%$,初始饱和度 $S_r=97.2\%$,相对密度 $\rho_s=2.80$,自由膨胀率 $\delta_{ef}=58.5\%$,干密度 $\rho_d=1.57\text{ g/cm}^3$,液限 $w_L=55.4\%$,

塑性指数 $I_p=26.2$,黏粒含量($<0.05\text{ mm}$)为59.5%。

2.2 膨胀土压缩特性

3个原状膨胀土样压缩试验结果如图1所示。根据Casagrande法,确定膨胀土先期固结压力 p_c 为149.0~186.0 kPa,取160 kPa为其平均先期固结压力。

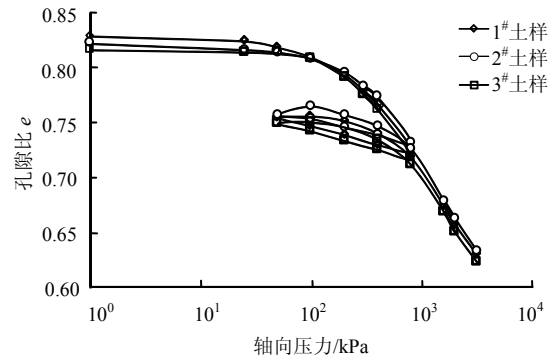


图1 原状膨胀土压缩曲线

Fig.1 Compression curves of undisturbed expansive clay

膨胀土现场静止土压力系数 K_0 的测试^[8]表明,在深度为0.85~4.40 m时, K_0 的变化范围为1~4;根据文献[9]建议的考虑历史卸荷作用的超固结裂土 K_0 计算公式 $K_0=K(h_0/h+1)$,可得该膨胀土 K_0 值为0.94~1.63。其中, K 为正常固结土的静止土压力系数,一般为0.50~0.70, h 为取土深度(取4 m), h_0 为历史卸荷深度(可由先期固结压力和 h 求得),本次试验 K_0 取1.5。

2.3 超固结比的确定方法

通常认为,先期固结压力是指历史上土体受到的最大竖向有效固结压力。王清等^[10]认为,土体的先期固结压力除受上覆荷载控制外,还与其物质组成和结构特征相关。土体从微观上来说,都是具有结构性的,传统方法测定的先期固结压力应为结构屈服压力 σ_k ,结构屈服压力 σ_k 是先期固结压力 p_c 与结构强度之和,而结构强度是由于土沉积过程中的物理化学因素使颗粒相互接触产生的固化联结键而形成的^[11]。此外,取土卸荷及削样过程均会对原状土体产生一定影响。

图2所示为两种固结方法所得膨胀土样的剪应力-应变关系曲线。其中1#为将膨胀土样反压饱和后在有效固结轴压为80 kPa下固结保持轴压不变,围压减小的被动压缩试验;2#为将膨胀土先在平均先期固结压力160 kPa下固结后,再卸荷至80 kPa后进行被动压缩试验,剪切速率均为2 kPa/min。按照Recompression法和SHANSEP法^[12],1#和2#均为超固结比为2的膨胀土样。但从图2中可看出,

在相同卸荷应力路径下,两个膨胀土样的应力-应变曲线相差较大。在室内三轴试验中重新固结应力的大小对其力学特性影响明显。为表征取土卸荷过程及室内重新固结应力对原状膨胀土样的影响,文中均以室内三轴仪上重新固结时的最大压力为其近似先期固结压力,即图 2 中的 1[#]土样的近似先期固结压力为 80 kPa,超固结比为 1。

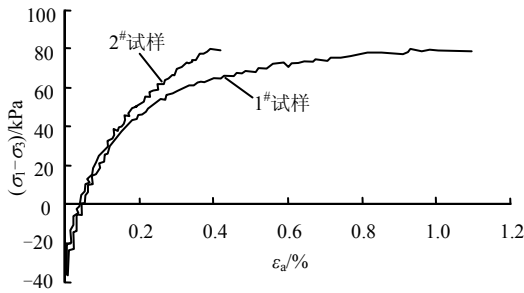


图 2 不同固结条件下的应力-应变关系曲线
Fig.2 Stress-strain relationships under different consolidation conditions

2.4 试验过程

试验在英国 GDS 应力路径三轴试验系统上进行。将削好的尺寸为直径 50 mm、高 100 mm 的原状土样放在三轴仪上反压饱和,反压 $u_b = 200$ kPa,孔隙水压力系数 $B \geq 0.98$ 后进行固结过程。

固结过程:围压和轴向压力分别以 10.0 kPa/h 和 6.7 kPa/h 的速率增至设定压力。初次固结完成时的轴向压力分别为 80、160、240、320 kPa,相应的围压 $\sigma_r' = \sigma_a' K_0$,分别为 120、240、360、480 kPa。孔隙水压力消散后,保持 K_0 均卸荷至轴压 80 kPa,形成为 1、2、3 和 4 的膨胀土样。

剪切过程为应力控制式,围压或轴压减小的速率分别为 0.02、0.20、2.00 kPa/min;试验模拟两种边坡开挖路径,分别为轴压 σ_a 不变、围压 σ_r 减小的被动压缩路径和围压 σ_r 不变、轴压 σ_a 减小的被动挤伸路径。

三轴剪切试验方案如表 1 所示。

表 1 三轴剪切试验方案
Table 1 Triaxial shear schemes

试验类型	剪切路径	K_0	OCR	σ_c'/kPa	σ_0'/kPa	u_b/kPa
被动压缩	轴压不变,围压减小	1.5	1	80	80	200
			2	160	80	200
			3	240	80	200
			4	320	80	200
被动挤伸	围压不变,轴压减小	1.5	1	80	80	200
			2	160	80	200
			3	240	80	200

注: σ_c' 为初始轴向有效固结应力, σ_0' 为卸荷之后剪切之前轴向有效固结应力。

3 试验结果与分析

工程现场观测数据表明,实际工程中土体应变均在 3% 以内,利用常规三轴试验所得力学参数无法反映土体在较小应变范围内的力学特性^[13]。本文着重考察在小极限偏应力下膨胀土的力学行为及其与卸荷速率、OCR 及卸荷路径的关联性。

3.1 应力速率对膨胀土力学特性的影响

相同超固结比时,不同应力速率下的偏应力 q 随应变 ϵ_a 的变化规律类似,仅列出 OCR=3 时的应力(孔隙水压力)-应变曲线如图 3 和图 4 所示, q 及 ϵ_a 为负值,代表挤伸状态。有效应力路径如图 5 所示。其中偏应力 q 与平均有效应力 p' 以有效初始固结压力 p_0' 进行标准化。

一般认为,材料在剪切过程中经历线弹性、弹塑性及塑性流动三阶段^[14]。从图 3 可以看出,在被动压缩路径和被动挤伸路径下,即使在应变很小(如小于 0.5%) 时,其应力-应变关系表现为曲线型。说明膨胀土具有显著的非线性特性。

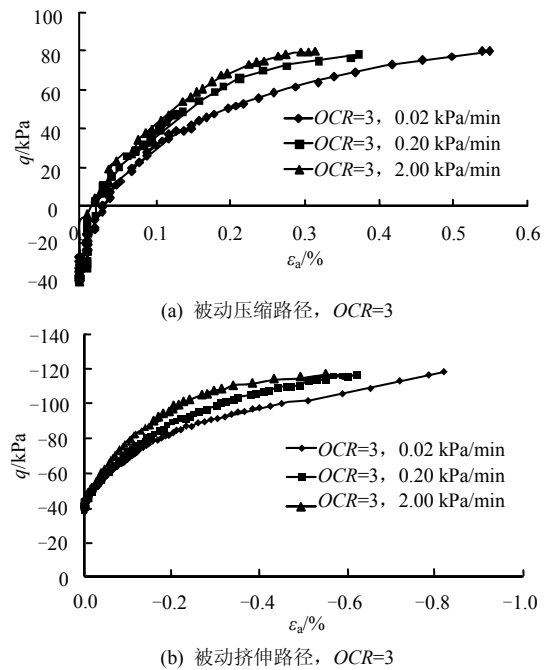


图 3 不同应力速率下膨胀土的应力-应变关系
Fig.3 Stress-strain curves of expansive soil under different stress rates

应力速率对其应力-应变关系曲线的影响规律与应变速率^[2-4]类似,即相同轴向应变时,其偏应力值随应力速率的增大而增大。这与剪切过程中的颗粒错动效应有关,即应力速率越大,颗粒移动越困难,克服阻力所需能量越大,其宏观反映如图 3 所示。

在被动压缩路径下,达到设定极限偏应力时,

卸荷速率为 0.02 kPa/min 和 2.00 kPa/min 时土样轴向应变为 0.55% 和 0.32%，相差约 0.23%，这意味着对于膨胀土边坡开挖而言，开挖速率的选择对其变形发展影响显著。仅从控制边坡变形角度看，宜采用快速开挖的方式进行。

从图 4 可以看出，在被动压缩和被动挤伸路径下，随着轴向应变的增加，孔隙水压力始终为负值，这与常规三轴试验结果不同。对于超固结土，在常规三轴试验中，随着剪切的进行，其孔隙水压力会先增加，出现正峰值后逐渐减小并产生负孔隙水压力

力^[15]。这说明卸荷及加荷剪切路径对其孔隙水压力变化规律影响显著。工程中利用常规三轴试验结果进行边坡开挖卸荷路径下的稳定性计算欠妥。

从图 4 中还可以看出，相同超固结比下被动压缩路径时孔隙水压力-应变关系曲线基本重合，而被动挤伸路径下的孔隙水压力随应力速率单调变化。孔隙水压力是影响不排水剪切强度及有效应力路径的重要因素，但对其速率效应的研究尚未形成共识^[2-4,7]，对于孔隙水压力随超固结比及应力速率之间的变化规律还需深入研究。

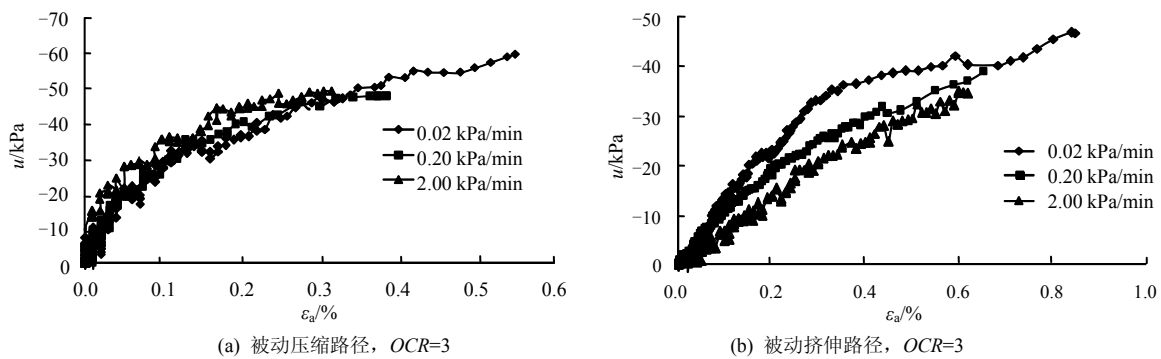


图 4 膨胀土在不同应力速率下的孔隙水压力-应变关系

Fig.4 Pore water pressure-strain curves of expansive soil under different stress rates

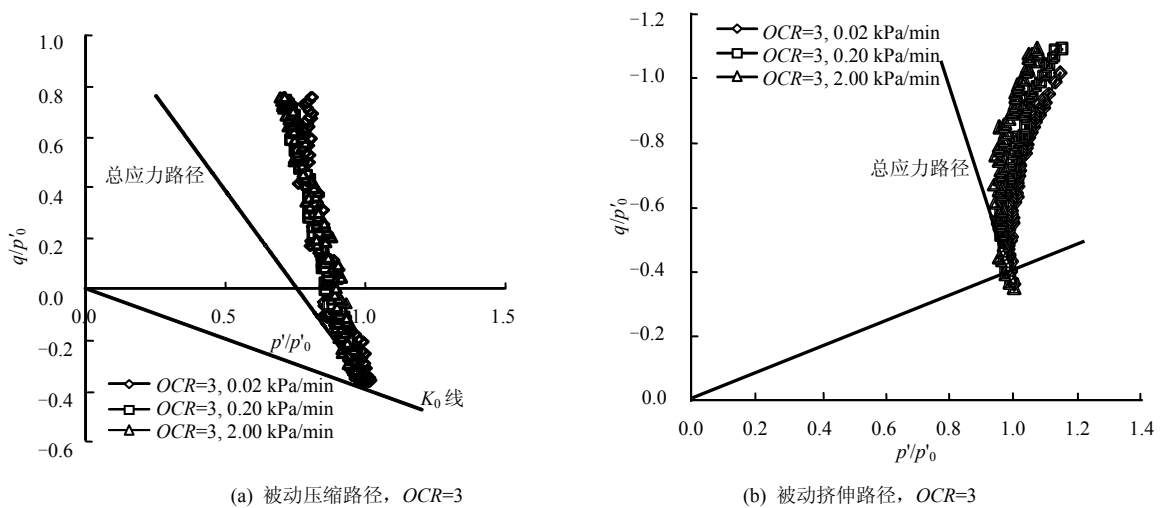


图 5 膨胀土在不同应力速率下的应力路径

Fig.5 Stress paths of expansive soil under different stress rates

3.2 超固结比 OCR 对膨胀土力学特性的影响

相同应力速率 (0.20 Pa/min) 时，不同超固结比下的偏应力 q 随轴向应变 ε_a 的变化规律类似，试验结果如图 6~8 所示。

从图 6 中可以看出，在应力速率为 0.20 kPa/min 时，无论在被动压缩路径下还是在被动挤伸路径下，不同超固结比土样应力-应变关系曲线形态基本类似；随着超固结比的增加，相同轴向应变时偏应力

值依次增大，达到设定极限偏应力时的轴向应变依次减小。如被动压缩路径下超固结比由 1 增至 4 时，达到极限偏应力时的轴向应变分别为 0.76% 和 0.32%，减小了约 58%，这说明应力历史对于膨胀土的变形特性影响显著。就其机制而言，超固结比越大，先期固结压力越大，在经历了卸荷回弹至相同平均固结应力后，由于塑性变形部分无法恢复，其孔隙比较小，宏观表现为较大的强度或模量。

从图 7 中可看出，孔隙水压力随应变的变化规律在被动压缩路径和被动挤伸路径不同。在被动挤伸路径下则随着超固结比的增加，孔隙水压力降幅单调增加。在被动压缩路径下，除 $OCR=1$ 外，其余超固结比时的孔隙水压力降幅相差不大，但仍表现出与被动压缩路径类似的单调变化规律。

从图 7 还可看出，相同应力速率 (0.2 kPa/min) 下，被动压缩路径下的有效应力路径线随着 q 的增大， p' 基本呈线性减小，其斜率可用 dq/dp' 表示。

超固结比的影响可通过该斜率进行反映。被动挤伸路径下，超固结比 $OCR=1$ 时，有效应力路径基本呈竖直状发展，即随着偏应力 q 的增大，平均有效固结应力 p' 基本不变，应力路径的这种发展规律符合虎克定律得到的平均有效应力与偏应力的关系，也就是在该竖直发展的范围内，土样基本表现为弹性变形；随着超固结比的增加，在保持较短的竖直状发展后，有效应力路径线向右偏转，即随着偏应力 q 的增大， p' 也增大。超固结比 (应力历史) 对有效应力路径的发展也有一定的影响。

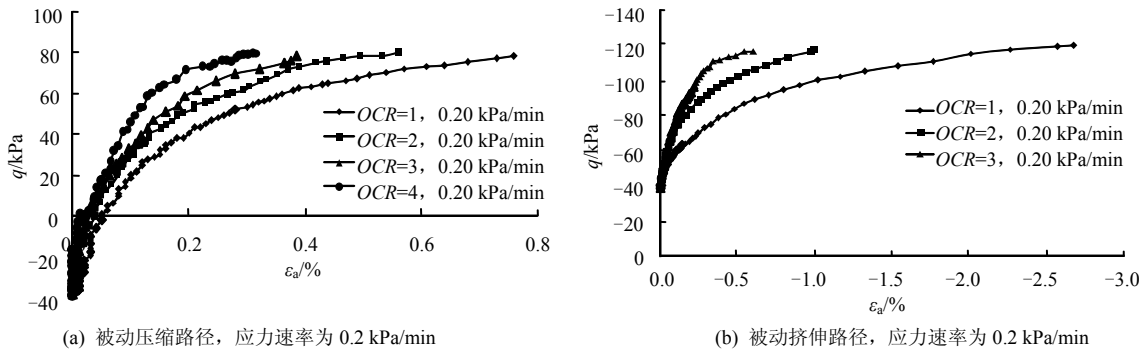


图 6 不同超固结比 OCR 膨胀土的应力-应变关系
Fig.6 Stress-strain curves of expansive soil under different $OCRs$

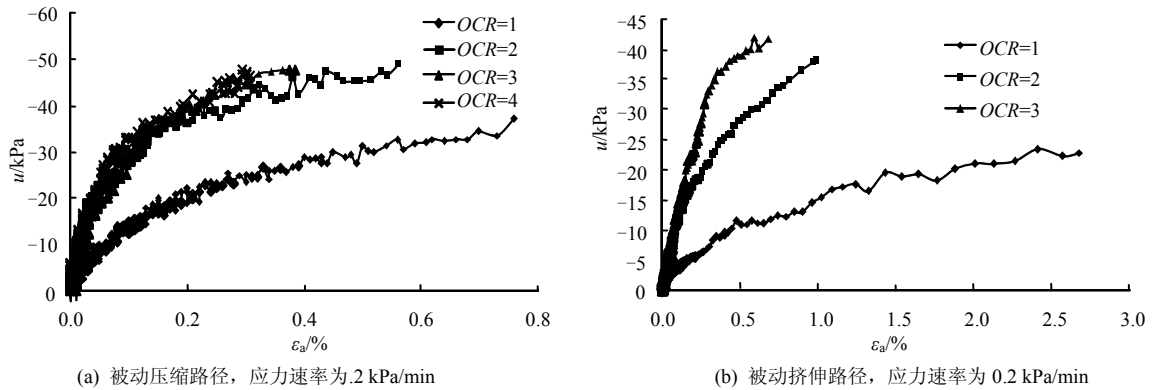


图 7 膨胀土在不同超固结比下的孔隙水压力-应变关系
Fig.7 Pore water pressure-strain curves of expansive soil under different $OCRs$

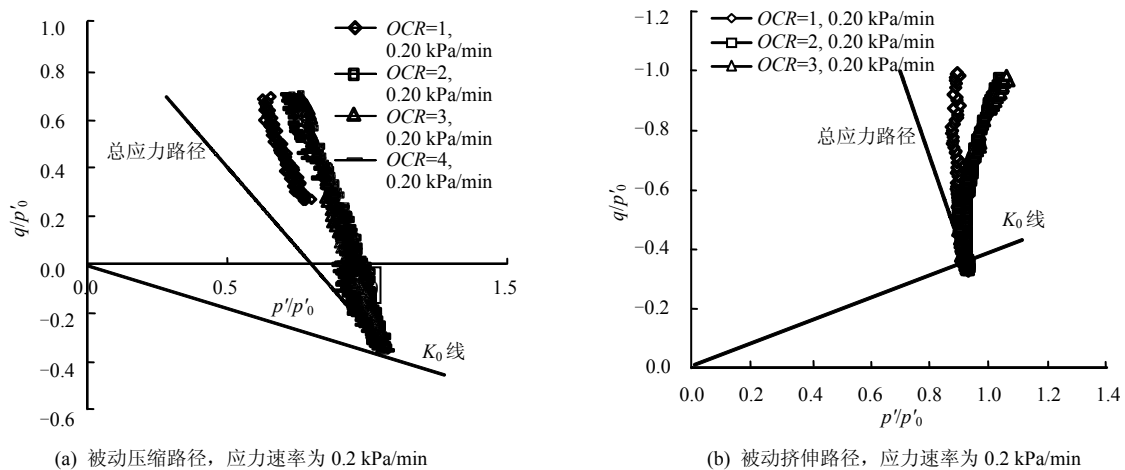


图 8 膨胀土在不同超固结比下的应力路径
Fig.8 Stress paths of expansive soil under different $OCRs$

3.3 卸荷应力路径对膨胀土力学特性的影响

图9为超固结比为3时应力速率为0.20 kPa/min时的应力(孔压)-应变关系曲线。可以看出,被动压缩路径和被动挤伸路径下达到极限偏应力时的轴向应变分别为0.35%和0.71%,被动挤伸路径下达到设定极限偏应力时的轴向应变明显大于被动压缩路径,变化幅度约1倍。这说明在膨胀土地区开挖边坡时,开挖路径的选择对膨胀土体变形特性的影响十分显著。

从图9中还可以看出,孔压在被动压缩路径下的降幅较被动挤伸路径稍大。这说明被动压缩路径下的轴向应变变化幅度较小除与极限偏应力有关外,较小的负孔隙水压力也是导致该现象的一个因素。

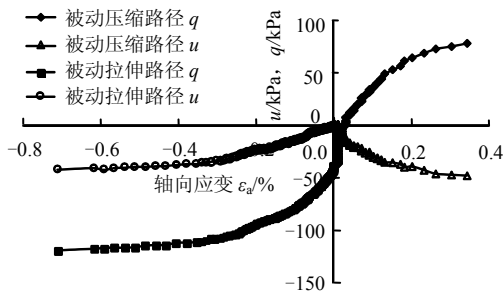


图9 两种路径下的偏应力(孔压)-应变关系曲线
Fig.9 Stress(pore water pressure) - strain curves under two shear paths

4 变形模量

变形模量是土体变形刚度的重要指标,应用广泛。一般用 E_{50} 表示,即 $E_{50}=q_{50}/\epsilon_{50}$ 。 q_{50} 为常规三轴的峰值剪切强度 q_f 的50%, ϵ_{50} 为 q_{50} 所对应的应变。为了解极限偏应力范围内膨胀土卸荷变形模量的变化规律,采用 E_{100} 进行表述。其中, $E_{100}=q_{100}/\epsilon_{100}$, q_{100} 为设定的极限偏应力, ϵ_{100} 为达到极限偏应力时的轴向应变。变形模量 E_{100} 计算结果如表2所示。

表2 被动压缩和被动挤伸路径下膨胀土的变形模量 E_{100}
Table 2 Deformation modulus E_{100} of expansive soil in compression and tension

试验类型	应力速率 (kPa/min)	E_{100}/MPa			
		OCR=1	OCR=2	OCR=3	OCR=4
被动压缩	0.02	9.20	10.26	14.55	17.39
	0.20	10.53	14.29	20.00	25.00
	2.00	13.33	17.39	25.00	29.63
被动挤伸	0.02	3.75	7.95	14.12	
	0.20	4.49	12.12	17.65	
	2.00	5.69	12.63	21.35	

从表2中可以看出,在被动压缩路径和被动挤

伸路径下,随着应力速率的增加,变形模量 E_{100} 单调增加。相同超固结比下,超固结比从1增至4时,速率从0.02 kPa/min增至2.00 kPa/min时被动压缩路径下 E_{100} 随速率的增幅分别为44.9%、69.5%、71.8%、70.4%。这说明应力速率对于压缩路径变形模量的影响随超固结比的增大逐渐增大并趋于稳定。

对比两种卸荷路径可以发现,相同速率、相同超固结比下,被动压缩路径下膨胀土的变形模量 E_{100} 大于被动挤伸路径。

此外,在被动压缩路径和被动挤伸路径下相同应力速率时,超固结比越大,变形模量 E_{100} 越大。说明应力历史对膨胀土变形特性影响较为显著。

为反映两种应力路径下膨胀土卸荷变形模量的变化规律,参考强度各向异性 $((C_u)_C/(C_u)_E)$ 的表示方法^[16],其中 $(C_u)_C$ 为压缩路径下的不排水强度, $(C_u)_E$ 为挤伸路径下的不排水强度;给出变形模量各向异性参数 $((E_{100})_C/(E_{100})_E)$ 与超固结比OCR的关系曲线如图10所示,其中 $(E_{100})_C$ 和 $(E_{100})_E$ 分别为被动压缩路径和被动挤伸路径下的变形模量。

从图10可以看出,在3种应力速率下 $((E_{100})_C/(E_{100})_E)$ 值随超固结比的增加呈下降趋势,下降幅度及规律基本一致。超固结比OCR由1增至3时, $((E_{100})_C/(E_{100})_E)$ 由2.4降至1.1,变形模量的各向异性性质在减弱。这说明膨胀土初始各向异性较为显著,经历卸荷过程后,其变形模量各向异性明显减弱。

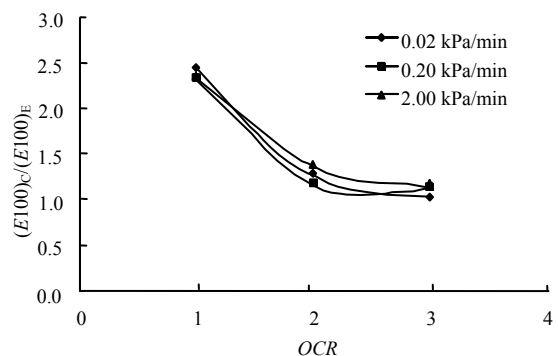


图10 超固结比OCR对变形模量各向异性的影响
Fig.10 Influence of OCR on deformation modulus anisotropy

5 结论

(1) 在被动压缩路径和被动挤伸路径下,相同应力速率和轴向应变时,随着超固结比的增加,偏应力单调增大;相同超固结比和轴向应变时,其偏应力随应力速率的增大而增大。

(2) 被动挤伸路径达到设定极限偏应力时的轴

向应变明显大于被动压缩路径, 膨胀土变形特性的应力路径依赖性显著。

(3) 相同超固结比时, 被动挤伸路径下的孔隙水压力降幅随应力速率单调减小。而被动压缩路径时孔隙水压力-应变关系曲线基本重合。

(4) 在被动压缩和被动挤伸路径下, 随着轴向应变的增加, 孔隙水压力始终为负值; 孔隙水压力的降幅总体上随超固结比的增加而增大, 其降幅随应力速率的变化规律与剪切路径相关。

(5) 变形模量 E_{100} 随超固结比和应力速率的增大而增大, 应力历史和应力速率对膨胀土变形模量的影响显著。随着超固结比的增加, 被动压缩路径和被动挤伸路径下膨胀土变形模量的各向异性特性减弱。

由于试验数据有限, 这里仅对超固结比从 1 增至 3 时的变形模量各向异性进行了初步探讨, 探求这方面的普遍规律还需进一步深入研究。

参 考 文 献

- [1] 廖济川. 硬黏土抗剪强度的研究现状[J]. 岩土工程学报, 1990, 12(4): 89—99.
LIAO Ji-chuan. Research progress of the shear strength of hard clay[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1990, 12(4): 89—99.
- [2] GRAHAM J, CROOKS J H A, BELL A L. Time effects on the stress-strain behavior of natural soft clays[J]. *Géotechnique*, 1983, 33(3): 327—340.
- [3] SHEAHAN T C, LADD C C, GERMAINE J T. Rate-dependent undrained shear behavior of saturated clay[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1996, 122(2): 99—108.
- [4] ZHU JUNGAO, YIN JIANHUA. Strain-rate-dependent stress-strain behavior of overconsolidated Hong Kong marine clay[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2000, 37(6): 1272—1282.
- [5] SAUER E K, MISFELDT G A. Preconsolidation of cretaceous clays of the Western Interior Basin in Southern Saskatchewan[C]//Proceedings of the 46th Annual Canadian Geotechnical Conference. Saskatoon: [s.n.], 1993: 27—29.
- [6] SUZANNE POWELL J, ANDY TAKE W, SIEMENS GREG, et al. Time-dependent behaviour of the Bearpaw shale in oedometric loading and unloading[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2012, 49(4): 427—441.
- [7] 张冬梅, 黄宏伟. 不同应力历史条件下软黏土强度时效特性[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2008, 36(10): 1320—1326.
- ZHANG Dong-mei, HUANG Hong-wei. Time-dependency of undrained behavior of natural soft clay with different pre-shearing stress history based on laboratory test[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2008, 36(10): 1320—1326.
- [8] BRACKLEY I J A, SANDERS P J. In-situ measurement of total natural horizontal stresses in an expansive clay[J]. *Geotechnique*, 1992, 42(2): 443—451.
- [9] 张颖钧. 超固结裂隙黏土堑坡首次滑动的简捷估算[J]. 铁道学报, 1998, 20(1): 95—102.
ZHANG Ying-jun. Simple estimation on initial sliding of a cut slope with over-consolidated fissured clay[J]. *Journal of China Railway Society*, 1998, 20(1): 95—102.
- [10] 王清, 陈剑平, 蒋惠忠. 先期固结压力理论的新认识[J]. 长春地质学院学报, 1996, 26(1): 59—63.
WANG Qing, CHEN Jian-ping, JIANG Hui-zhong. The new knowledge on theory of preconsolidation pressure[J]. *Journal of Changchun University of Earth Sciences*, 1996, 26(1): 59—63.
- [11] 王国欣, 肖树芳, 周旺高. 原状结构性土先期固结压力及结构强度的确定[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(2): 249—251.
WANG Guo-xin, XIAO Shu-fang, ZHOU Wang-gao. Determination of preconsolidation pressure and structural strength of undisturbed structural soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2003, 25(2): 249—251.
- [12] SURACHAT SAMBHANDHARAKSA. Stress-strain-strength anisotropy of varved clays[D]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 1977.
- [13] 王大雁, 马巍, 常小晓, 等. 深部人工冻土在小应变条件下的刚度特性[J]. 岩土力学, 2006, 27(9): 1447—1451.
WANG Da-yan, MA Wei, CHANG Xiao-xiao, et al. Small-strain stiffness properties of frozen soils in deep alluvium[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(9): 1447—1451.
- [14] WANG DAYAN, MA WEI, CHANG XIAOXIAO. Analyses of behavior of stress - strain of frozen Lanzhou loess subjected to K_0 consolidation[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2004, 40(1): 19—29.
- [15] 殷宗泽. 土工原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [16] TAKESHI KAMEI, AKIO NAKASE. Undrained shear strength anisotropy of K_0 -overconsolidated cohesive soils[J]. *Soils and Foundations*, 1989, 29(3): 145—151.