

DOI: 10.11779/CJGE201707003

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

张坤勇^{1, 2}, 李广山^{1, 2}, 梅小洪³, 杜伟^{1, 2}

(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. 江西省建筑设计研究总院, 江西 南昌 330046)

摘要: 针对开挖土体复杂卸荷应力路径, 按不同初始应力状态和卸荷应力比, 对南水北调南干渠粉质黏土开展了 K_0 固结排水卸荷应力路径试验。试样首先在不同围压条件下 K_0 固结稳定, 然后根据不同的轴向应力和径向应力卸荷比, 进行卸荷试验, 以模拟实际土体开挖过程中的应力路径。试验结果表明土体的应力应变特性与应力路径密切相关: 不同卸荷应力比条件下, 试样可能为压缩, 先伸长再压缩或者为伸长变形; 卸荷应力路径下压缩和伸长应力比临界值与初始固结状态和土性相关; 相同平均应力增量条件下, 卸荷应力比越小, 试样体积膨胀绝对值越大; 土体强度参数受加载方式和应力路径影响不大。试验结果和常规三轴试验有显著区别, 需要发展能够描述卸荷应力路径下的土体本构模型, 对开挖土体开展符合工程实际的应力变形分析。

关键词: 卸荷应力路径; K_0 固结; 应力比; 应力应变特性

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)07-1182-07

作者简介: 张坤勇(1975-), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事土的本构关系, 边坡稳定性分析等方面的教学和科研。E-mail: ky_zhang@hhu.edu.cn。

Stress-deformation characteristics of silty soil based on K_0 consolidation and drainage unloading stress path tests

ZHANG Kun-yong^{1, 2}, LI Guang-shan^{1, 2}, MEI Xiao-hong³, DU Wei^{1, 2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Jiangxi Province Architectural Design and Research General Institute, Nanchang 330046, China)

Abstract: Based on different initial stress states and unloading stress ratios, the unloading stress path drainage tests under K_0 consolidation are carried out on the silty clay sampled from the construction site of the South-to-North Water Diversion Project. The specimens are firstly consolidated with a given value of K_0 under different confining pressures. Then, to simulate the stress path at different locations of excavation soil, the stress decrements are applied from both the axial and the radial directions with different stress ratios. The test results show that the stress-strain behavior of soil is closely related to the stress path. Under different unloading stress ratios, the specimen may be compressed, elongated firstly and then compressed or elongated. The critical value of unloading stress ratio determining compression and extension is determined by the initial consolidation state and soil properties. With the decrement of the unloading stress ratio, the value of volume dilation increases. The tests also verify that the loading mode and stress path have little effect on the strength parameters. The characteristics observed from the tests are significantly different from those of the conventional triaxial test results. It is necessary to develop a proper constitutive model, which can describe the unloading stress path of the soil, and to carry out the stress and deformation analysis of the excavation soil.

Key words: unloading stress path; K_0 consolidation; stress ratio;
stress-strain behavior

0 引言

中国目前正处于大规模基础建设时期, 地下空间

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41530637); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2015B17714); 留学回国人员科技活动择优资助经费项目(2016-B10015)
收稿日期: 2016-04-05

开发过程中的基坑工程、调水工程中的输水渠道和航道边坡、西部大开发中的公路铁路路堑, 都广泛存在着由于开挖卸荷引起的土体变形及稳定性问题, 开挖引起的变形和稳定性问题是土木、水利、交通工程建设中常见的岩土工程问题。开挖过程中对应的土体应力变形特性和简单加载条件下有很大不同^[1-2]。长期以来, 边坡、深基坑等开挖工程的数值分析与设计计算所采用的土体强度和变形参数均通过轴向加荷试验方法获得, 缺乏相应的卸荷试验资料和数据, 忽略了开挖中的实际应力路径^[3], 用常规加载试验所得参数和模型计算开挖引起的应力变形单必产生较大误差。土的应力应变关系具有典型的应力路径相关性, 研究不同卸荷应力路径下土体的力学特性, 对开挖工程应力变形分析具有重要的工程应用价值, 同时对深化土的基本特性研究也有较强的理论研究意义。

自 Lambe^[4]提出应力路径概念以来, 国内外已有很多学者针对不同类型岩土材料开展了不同应力路径的试验研究。Nagaraj^[5]、王瑞红等^[6]对砂土的研究表明砂土的应力 - 应变状态与应力路径有关。刘国彬等^[7]对软土的室内应力路径试验研究表明: 软土卸荷模量远大于常规三轴试验所获得的压缩模量或弹性模量, 应力路径对软土的模量影响非常显著, 并建立了考虑应力路径影响的卸荷模量计算公式。郑卫锋等^[8]用三轴数字图像测量技术测试仪器对原状粉质黏土的基坑开挖卸荷进行了研究, 认为经历侧向卸荷应力路径的土体强度小于常规三轴试验所得强度。梅国雄等^[9]利用平面应变仪对南京江浦区某基坑粉质黏土进行了平面应变侧向卸荷试验, 得到侧向应力与侧向应变关系曲线的双曲线关系, 并在邓肯 - 张模型基础上推导了侧向应力 - 侧向应变关系模型。曾玲玲等^[10]通过固结不排水剪应力路径试验分析了广州南沙典型软土在不同固结条件下的力学特性, 试验结果表明, 不排水条件下的有效应力路径主要与土样初始固结状态有关, 而同一固结状态下的有效应力路径具有唯一性。陈林靖等^[11]采用三轴仪对福州市区某基坑影响范围内典型饱和软土进行了系列应力路径试验, 对室内正常固结和相同围压下 K_0 固结的试样剪切试验结果进行了比较, 表明二者在变形和强度上均存在较大差异。殷杰等^[12]通过 GDS 三轴仪对土样进行了 K_0 固结排水应力路径试验。结果表明, 应力路径对不扰动土样的体积变形和剪切变形均有显著影响, 且球应力和偏应力对土的体应变和剪应变存在交叉影响。张春进等^[13]利用 GDS 应力路径三轴仪, 分别在 60, 120, 200 kPa 围压下对宁波淤泥质黏土进行增 p 、等 p 及减 p 3 种应力路径试验。认为不同应力路径对土体的应力 - 应变特性

影响不大。增 p 、等 p 及减 p 三种应力路径试验中土体应力 - 应变特性均呈弱软化型。等 p 、减 p 应力路径试验中土体达到屈服时的轴向应变较增 p 时稍大一些。

本文针对南水北调穿黄工程南干渠粉质黏土, 采用 GDS 应力路径三轴仪, 开展了一系列的应力路径试验, 研究 K_0 固结排水条件下土体的应力变形特性, 为建立卸荷应力路径下的本构模型提供试验依据。

1 试验设计

1.1 应力路径分析

基坑、渠道和边坡开挖与一般堆填加载条件下岩土工程的区别在于相对开挖面不同位置土体单元所经历的应力路径有很大不同。开展符合工程实际的土体开挖卸荷变形特性试验研究, 首先要对开挖卸荷条件下开挖土体不同位置应力变形特征进行分析。根据开挖土体和开挖面相对位置的不同, 可以将边坡或基坑开挖影响区域划分为 3 个部分^[14], 如图 1 所示。

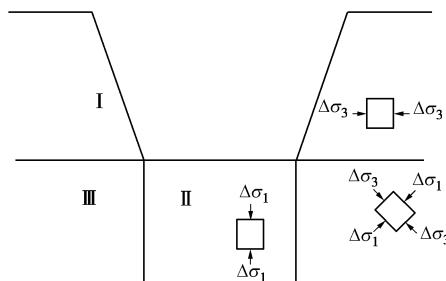


图 1 开挖边坡或基坑示意图

Fig. 1 Schematic diagram of excavation slope or foundation pit

I 区: 随着土体的开挖, 开挖面附近土体发生侧向位移, 这部分土体的水平方向正应力减小, 竖向正应力基本不变, 可以认为水平向正应力处于静止侧压力和主动土压力之间。

II 区: 随着上部土体的开挖, 这部分土体的上覆压力不断减小, 竖向正应力减小, 水平向正应力一般认为不变。

III 区: 此区处于开挖过渡区, 应力状态较 I 区和 II 区更为复杂, 这部分土体的应力状态随该点离坑角距离不同而不同, 一般认为竖向正应力减小, 水平向正应力也同时减小。

图 1 中给出的开挖边坡或基坑工程中 I 区所对应的侧向卸荷应力路径(图 2 中的 OA 应力路径)以及 II 区所对应的轴向卸荷应力路径(图 2 中的 OE 应力路径), 已有大量研究, III 区应力路径试验研究较少^[15]。本文主要针对图 2 中 OC 以下的应力路径的土体变形规律进行试验。 OC 以下应力路径表示轴向卸荷幅度大于侧向卸荷幅度, 取其中几个特定值对应的应力路

径进行试验研究。

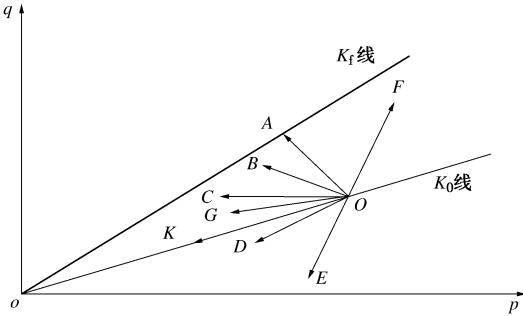


图 2 开挖卸荷应力路径示意图

Fig. 2 Schematic diagram of unloading stress paths of excavation

1.2 试验设备

本文试验采用 GDS 标准应力路径三轴试验仪, 试样规格为高度 $H=80$ mm, 直径 $D=39.1$ mm。轴压传感器量程 4 kN; 压力室压力量程为 1700 kPa; 孔压传感器量程 3447 kPa; 位移传感器量程为 50 mm; 控制器排水体积精度为 1 mm^3 。控制器的各项控制参数如下: 工作力量程为 2 MPa; 体积量程为 $2 \times 105 \text{ mm}^3$; 体变精度为 1 mm^3 ; 压力分辨率为 1 kPa。

1.3 试验方案

本文试验所用土样取自南水北调穿黄河工程南干渠段, 设计桩号 2+300 处, 取土深度 3 m。所在土层土体呈棕褐色, 呈粉土性状。物理力学参数见表 1。

表 1 试验土样物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil samples

风干含水率	湿密度 ρ	干密度 ρ_d	比重 G_s	孔隙比 e	液限 w_L	塑限 w_p	塑性指数 I_p
0.1	1.85	1.36	2.70	1.028	37	27	10

依据《土工测试技术》制取直径为 39.1 mm, 高度为 80 mm 的试样^[16]。由于本文所用土料为粉质黏土, 黏性较低, 没有砂土的渗透性好, 因而难以像黏性土那样进行抽气饱和后装样, 抽气饱和后极易坍塌, 而 GDS 三轴仪的装样过程又难以避免扰动试样。因此, 不进行常规的抽气饱和, 而是装样后再进行抽气饱和。装样时, 将霍尔效应径向传感器安装在土样的中部, 为了尽量避免对土样的扰动, 在传感器的两个径向固定板上涂防水胶, 使其紧紧黏在土样外侧的橡胶膜上, 然后用两根细橡皮筋分别绑在传感器上下两个固定板上。抽气饱和见图 3, 饱和步骤如下:

(1) 试样安装完毕后, 连接真空泵和饱和缸, 用塑料管连接饱和缸通水阀门与压力室反压阀门, 关闭饱和缸通水阀门和压力室反压阀门。在孔压阀门上连接塑料管, 装满水, 打开孔压阀门。

(2) 开启真空泵, 打开反压阀门使试样和饱和缸连通, 抽取饱和缸内空气, 当饱和缸内真空间度达到一

个大气压并维持一段时间后停止抽气。

(3) 关闭真空泵和饱和缸的真空泵阀门, 开启通水阀门, 由于试样内外气压差的作用, 孔压阀门管内水被吸入试样土体, 试样内充满水后, 水便从反压阀门进入饱和缸, 当试样流入水量和流出水量平衡时, 试样接近饱和。

(4) 抽气饱和后, 为使试样进一步饱和, 进行反压饱和, 反压饱和时, 保持围压比反压大 20 kPa, 经过反压饱和后试样饱和度超过 0.96, 饱和完成。



图 3 抽气饱和装置

Fig. 3 Vacuum saturation devices

为模拟土体初始应力状态, 在卸荷试验前先进行 K_0 排水固结。利用 GDS 自带的 K_0 固结控制模块, 按照试验方案施加围压, 施加速率为 10 kPa/h; 轴压根据所施加的围压进行自动跟踪同步施加。在固结过程中通过霍尔效应径向传感器测量土样直径, 并保持试样径向应变(即侧向应变)为 0。固结过程中所产生的孔隙水压力消散为 0, 认为固结完成。通过试验获得该土样 K_0 值约 0.5。土样的卸荷应力路径在 GDS 高级加载模块中按表 2 中的卸荷应力比 R ($\Delta\sigma_a / \Delta\sigma_r$, $\Delta\sigma_a$ 为轴向应力增量; $\Delta\sigma_r$ 为径向应力增量) 进行应力路径设置。

表 2 卸荷应力路径试验方案

Table 2 Unloading stress paths

路径	围压 σ_r /kPa	轴压 σ_a /kPa	卸荷应力比 R ($\Delta\sigma_a / \Delta\sigma_r$)
OC	100	200	1
	200	400	
	300	600	
	400	800	
OG	100	200	1.5
	200	400	
	300	600	
	400	800	
OK	100	200	2
	200	400	
	300	600	
OD	100	200	4
	200	400	
	300	600	
OA	100	200	0
	200	400	
	300	600	
	400	800	

试样在卸荷过程中, 按固结时围压的 1/10 分级减小, 在减小围压的同时, 轴压按试验方案中的卸荷比例进行同步卸荷, 以模拟开挖土体开挖过程, 卸荷速率为 10 kPa/h; 卸荷变形稳定标准为每小时变形量不超过 0.01 mm; 当卸荷至某级压力时, 应变速率急剧增加, 变形无法稳定则试样破坏。试验过程中仪器自动采集试样体积应变、轴向应变、径向应变等试验数据。

2 试验结果及分析

2.1 偏应力-轴向应变关系

为比较不同卸荷应力路径下土体变形规律, 绘制偏应力 q ($\Delta\sigma_a - \Delta\sigma_r$) 与轴向应变 ε_a 的关系曲线。图 4~7 给出了不同围压条件下 (100, 200, 300, 400 kPa), 不同卸荷应力比 ($R=1.5, R=2, R=4$) 的偏应力 q 与轴向应变 ε_a 之间的关系曲线。

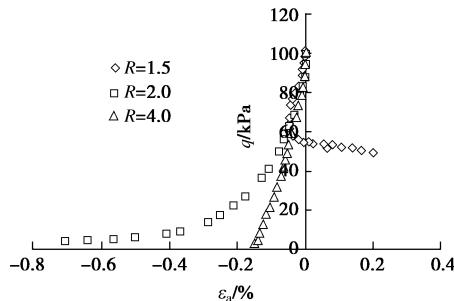


图 4 围压 100 kPa q - ε_a 关系曲线

Fig. 4 q - ε_a curves under confining pressure of 100 kPa

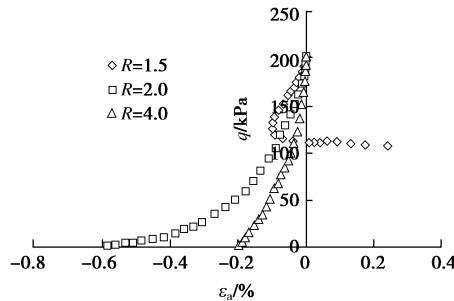


图 5 围压 200 kPa q - ε_a 关系曲线

Fig. 5 q - ε_a curves under confining pressure of 200 kPa

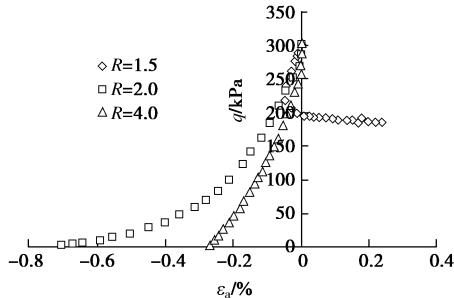


图 6 围压 300 kPa q - ε_a 关系曲线

Fig. 6 q - ε_a curves under confining pressure of 300 kPa

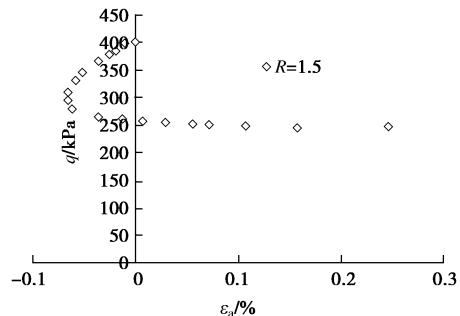


图 7 围压 400 kPa q - ε_a 关系曲线

Fig. 7 q - ε_a curves under confining pressure of 400 kPa

通过上述不同卸荷应力路径、不同围压下偏应力和轴向应变关系曲线可以看出, 不同卸荷应力路径下, 应力应变关系曲线有显著不同^[17]。

当卸荷应力比 $R=1.5$ 时, 试样出现先伸长后压缩, 这是本文试验出现的特殊现象。分析原因如下: 因卸荷初期轴向卸荷量较大, 所以出现一定的回弹。卸荷到一定程度时, 围压很小, 而此时大主应力和小主应力的比值很大, 围压不足以支撑试样的稳定, 从而发生剪切破坏。卸荷应力比 $R=2$ 和 $R=4$ 的卸荷应力路径下, 试样一直为伸长状态, 且应力应变关系曲线近似为双曲线形式, $R=2$ 对应的轴向回弹值大于 $R=4$ 对应的轴向回弹值。这是由于本文试验轴向应力只能卸到与侧向应力相等, 即偏应力只能卸到零, 不能小于零。而 $R=2$ 对应的路径在偏应力卸到零时围压更小, 从而回弹值更大。

2.2 体积应变-平均有效应力增量关系

体积应变是研究土体变形规律的重要因素之一, 因而对不同卸荷应力路径下体积应变和平均有效应力增量关系进行研究。给出不同卸荷应力路径, 不同围压 (100, 200, 300, 400 kPa) 下体积应变 ε_v 和平均有效应力增量 Δp 关系曲线见图 8~11。其中体积应变以压缩为正。

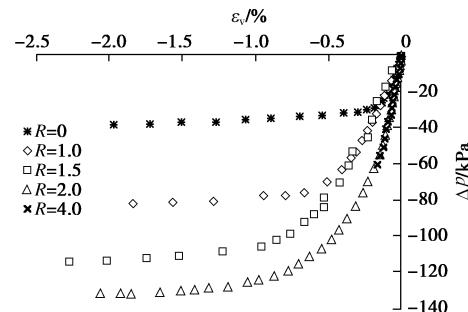


图 8 100 kPa ε_v - Δp 关系曲线

Fig. 8 ε_v - Δp curves under confining pressure of 100 kPa

由图 8~11 可知, 不同卸荷应力路径、不同围压下土体都发生体胀; 相同体变条件下卸荷应力比越大对应的平均应力增量绝对值越大, 也就是说相同平均

应力增量条件下, 卸荷应力比越小, 对应的体积膨胀绝对值越大。

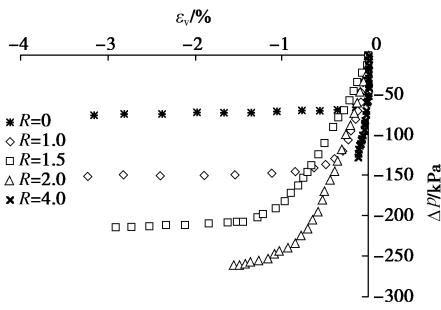


图 9 200 kPa ε_v - Δp 关系曲线

Fig. 9 ε_v - Δp curves under confining pressure of 200 kPa

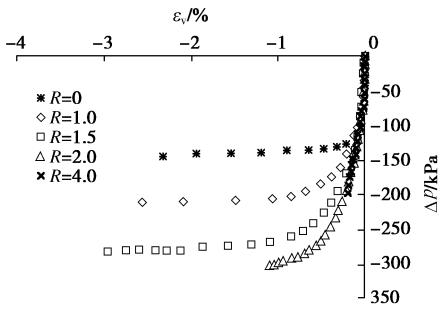


图 10 300 kPa ε_v - Δp 关系曲线

Fig. 10 ε_v - Δp curves under confining pressure of 300 kPa

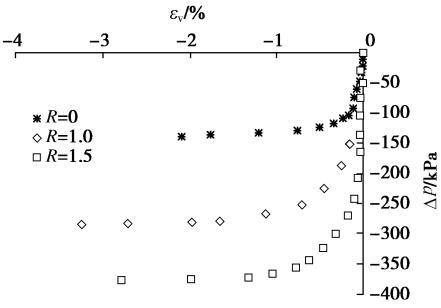


图 11 400 kPa ε_v - Δp 关系曲线

Fig. 11 ε_v - Δp curves under confining pressure of 400 kPa

2.3 不同卸荷条件下强度特性

以上对卸荷应力条件下偏应力和轴向应变关系、体变和轴向应变关系进行了分析, 主要是从变形规律方面探讨卸荷应力路径下土体的应力应变特性。工程实践中, 除了关心开挖卸荷引起的土体位移, 开挖过程中基坑或边坡的稳定性更是开挖工程的重中之重。下面从土体强度方面探讨卸荷应力路径下土体的强度特性。图 12~15 给出不同卸荷应力路径下土体单元莫尔应力圆和破坏强度包线图。可以看出, 不同应力路径试验得到的强度参数差别不大, 由于本文试验是固结排水试验, 得到的参数为有效应力强度参数。不同应力路径试验结果说明, 应力路径对有效应力强度指标影响不大, 这和有效应力强度指标的唯一性理论是一致的。

根据有效应力原理, 土的抗剪强度唯一地决定于破坏面上的法向有效应力, 而与加载方式、排水条件及应力路径等均无关。

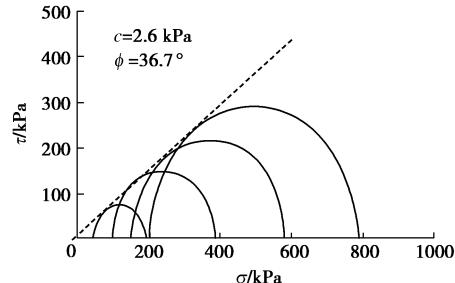


图 12 $R=0$ 莫尔应力强度包线

Fig. 12 Mohr stress intensity envelope for $R=0$

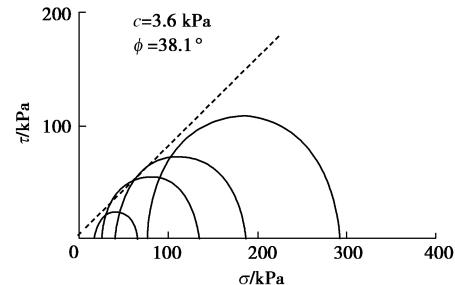


图 13 $R=1$ 莫尔应力强度包线

Fig. 13 Mohr stress intensity envelopes for $R=1$

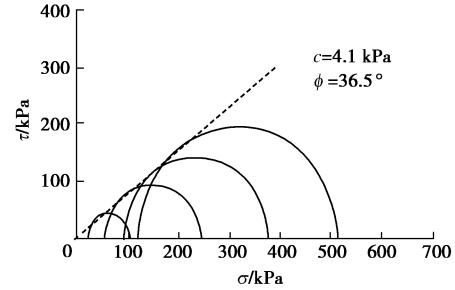


图 14 $R=1.5$ 莫尔应力强度包线

Fig. 14 Mohr stress intensity envelopes for $R=1.5$

2.4 压缩、伸长临界值

由本文试验可知, 当卸荷应力比 $R=0$ 和 $R=1$ 时, 试样为压缩状态, 区别在于 $R=1$ 卸荷初期变形较慢, 当卸荷到围压较小时, 摩尔应力圆离破坏包线越来越近, 土体变形急剧增大, 直至剪切破坏。郑刚等^[18]对天津第一海相层底部粉质黏土进行了 $R=0$, $R=2$, $R=4$, $R=\infty$ 的卸荷试验, 发现试样出现压缩还是伸长不仅取决于轴向和侧向的卸荷应力比, 而且与初始固结状态有关。如果初始固结状态是等向固结, 则压缩区和伸长区分界线为 $R=1$ 所对应的应力路径, 此时为文献[18]所给出的轴向压缩和伸长界限标注, 划分的压缩、伸长分界线应力路径如图 15。从本文试验结果可知, 对初始 K_0 固结的卸荷应力路径 $R=1$ 并非压缩伸长区分界值, 这和文献[18]所给出等向固结试验条件下压缩伸长临界应力比 $R=1$ 的结论不同。

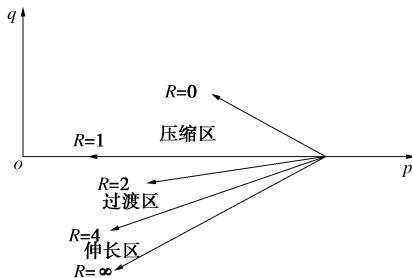
图 15 等向固结试验伸长、压缩区分界线应力路径示意图^[18]

Fig. 15 Stress paths for boundary between elongation zone and compression zone for isotropic consolidation tests

本文试验可以得出, 静止侧压力系数 K_0 的倒数 $1/K_0$ 为压缩伸长分界值, 当卸荷应力比 R 大于 $1/K_0$ 时, 试样伸长, 当卸荷比应力 R 小于 1 时, 试样压缩。当卸荷应力比 R 介于 1 与 $1/K_0$ 之间时, 试样表现为先伸长再压缩, 此为过渡区, 见图 16。刚开始卸荷时, 因为轴向卸荷值稍大于侧向卸荷值, 此时试验会出现伸长现象, 当卸荷到一定程度时, 由于围压较小, 而由前文试验曲线可知此时主应力比很大, 试样不足以承受那么大的偏应力, 此时试样会发生侧向膨胀, 直到剪切破坏。不同初始固结状态, 不同卸荷条件下试验现象不同, 造成这种复杂变形规律的原因在于应力路径的不同。

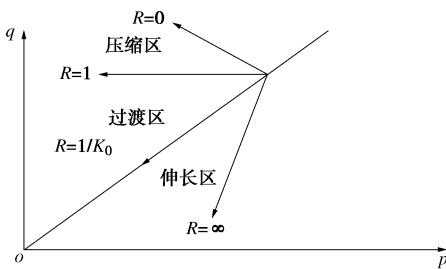
图 16 K_0 固结试验伸长、压缩区分界线应力路径示意图

Fig. 16 Stress paths for boundary between elongation zone and compression zone for K_0 consolidation tests

3 结论与建议

本文通过分析开挖卸荷土体不同位置的典型应力路径, 应用 GDS 应力路径三轴仪开展不同卸荷应力路径下 K_0 固结排水卸荷试验, 得到以下试验结果:

(1) 试验得到不同围压条件不同应力路径下的应力应变关系, 不同卸荷应力路径下, 应力应变关系曲线有显著不同, 试样可能为压缩, 先伸长再压缩, 或者为伸长变形。

(2) 分析了不同卸荷应力路径下平均有效应力增量和体积应变的关系, 不同卸荷应力路径下试样都表现为体积膨胀, 不同应力路径对应的体积膨胀值不同, 相同体变条件下卸荷应力比越大对应的平均应力增量

绝对值越大。

(3) 分析了土体强度参数与卸荷应力路径的关系, 验证了强度参数受应力路径影响不大。

(4) 通过本文试验探讨了卸荷压缩和卸荷伸长的临界值, 压缩和伸长临界值与初始固结状态有关: 静止侧压力系数 K_0 的倒数 $1/K_0$ 为压缩伸长分界值, 当卸荷比 R 大于 $1/K_0$ 时, 试样伸长; 当卸荷比 R 小于 1 时, 试样压缩; 当卸荷比介于 1 与 $1/K_0$ 之间时, 试样表现为先伸长再压缩。

开挖应力路径下的土体应力应变关系和常规三轴压缩试验结果有很大不同。为合理描述开挖应力路径的土体变形, 需要在室内试验基础上, 发展能够反映不同卸荷应力路径下的土体本构模型, 开展数值模拟, 从而对开挖土体的应力和变形规律进行合理描述。

参考文献:

- [1] 张艳刚, 张坤勇, 史桥臻. 开挖卸荷土体本构模型研究方法[J]. 水利与建筑工程学报, 2010, 8(4): 40 - 43. (ZHANG Yan-gang, ZHANG Kun-yong, SHI Qiao-zhen. Research method of constitutive model for excavation unloading soil mass[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2010, 8(4): 40 - 43. (in Chinese))
- [2] 童华炜, 邓袆文. 土体 K_0 固结-卸荷剪切试验研究[J]. 工程勘察, 2008(5): 13 - 16. (TONG Hua-wei, DENG Hui-wen. K_0 consolidation drained shear and unloading tests of soil[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2008(5): 13 - 16. (in Chinese))
- [3] 马晓文, 艾英钵. 基坑开挖土体卸荷特性研究进展[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(增刊 1): 189 - 193. (MA Xiao-wen, AI Ying-bo. Review of soil behaviors under excavation unloading of foundation pits[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(S1): 189 - 193. (in Chinese))
- [4] LAMBE T W. Stress path method[J]. J of Soil Mech and Found Div, ASCE, 1967, 93(6): 268 - 277.
- [5] NAGARAJ T S, SRIDHARAN M K. A incremental loading device for stress path and strength testing of soils[J]. Geotechnical Testing Journal, 1981, 4(2): 154 - 160.
- [6] 王瑞红, 李建林, 蒋昱州, 等. 开挖卸荷对砂岩力学特性影响试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(增刊 1): 156 - 162, 206. (WANG Rui-hong, LI Jian-lin, JIANG Yu-zhou, et al. Experimental study of influence of excavation unloading on mechanical properties of sandstone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(S1): 156 - 162, 206. (in Chinese))
- [7] 刘国彬, 侯学渊. 软土基坑隆起变形的残余应力分析法[J].

- [地下工程与隧道, 1996, **14**(2): 2 - 7. (LIU Guo-bin, HOU Xue-yuan. Residual stress analysis method of foundation pit in soft soil foundation pit[J]. *Underground Engineering and Tunnels*, 1996, **14**(2): 2 - 7. (in Chinese))]
- [8] 郑卫锋, 邵龙潭, 贾金青. 基于数字图像测量技术的基坑开挖卸荷试验研究[J]. *岩土力学*, 2003, **24**(1): 17 - 20. (ZHENG Wei-feng, SHAO Long-tan, JIA Jin-qing. Experimental study on excavation unloading of foundation pit based on digital image measurement technique[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, **24**(1): 17 - 20. (in Chinese))]
- [9] 梅国雄, 陈 浩, 卢廷浩, 等. 坑侧土体卸荷的侧向应力 - 应变关系研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, **29**(1): 3108 - 3112. (MEI Guo-xiong, CHEN Hao, LU Ting-hao, et al. Research on lateral stress-strain relation on side of foundation pit with lateral unloading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, **29**(1): 3108 - 3112. (in Chinese))]
- [10] 曾玲玲, 陈晓平. 软土在不同应力路径下的力学特性分析 [J]. *岩土力学*, 2009, **30**(5): 1264 - 1270. (ZENG Ling-ling, CHEN Xiao-ping. Analysis of mechanical characteristics of soft soil under different stress paths[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, **30**(5): 1264 - 1270. (in Chinese))]
- [11] 陈林靖, 戴自航, 刘志伟. 应力路径对软土应力 - 应变特性影响试验研究[J]. *岩土力学*, 2011, **32**(11): 3249 - 3257. (CHEN Lin-jing, DAI Zi-hang, LIU Zhi-wei. Experimental study of stress path of soft soils in influence range of foundation pit[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, **32**(11): 3249 - 3257. (in Chinese))]
- [12] 殷 杰, 刘夫江, 刘 辰, 等. 天然沉积粉质黏土的应力路径试验研究[J]. *岩土力学*, 2013, **34**(12): 3389 - 3393. (YIN Jie, LIU Fu-jiang, LIU Chen, et al. Stress path tests on natural sedimentary silty clay[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, **34**(12): 3389 - 3393. (in Chinese))]
- [13] 张春进, 陈 斌, 姚燕明. 宁波淤泥质黏土应力路径试验研究[J]. *工程勘察*, 2016(1): 5 - 11. (ZHANG Chun-jin, CHEN Bin, YAO Yan-ming. Experimental study on stress path of Ningbo soft clay[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2016(1): 5 - 11. (in Chinese))]
- [14] 曾国熙, 潘秋元, 胡一峰. 软黏土地基基坑开挖性状的研究[J]. *岩土工程学报*, 1988, **10**(3): 13 - 22. (ZENG Guo-xi, PAN Qiu-yuan, HU Yi-feng. The behavior of excavation in soft clay ground[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1988, **10**(3): 13 - 22. (in Chinese))]
- [15] 施建勇, 雷国辉, 艾英钵, 等. 土压力变化规律的应力路径三轴试验研究[J]. *岩土力学*, 2005, **26**(11): 1700 - 1704. (SHI Jian-yong, LEI Guo-hui, AI Ying-bo, et al. Stress path controlled triaxial experimental study of lateral earth pressure behaviour[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, **26**(11): 1700 - 1704. (in Chinese))]
- [16] 王保田. 土工测试技术[M]. 南京:河海大学出版社, 2005. (WANG Bao-tian. Principle of Geotechnical testing[M]. Nanjing: Hohai University Press, 2005. (in Chinese))]
- [17] 杨雪强, 朱志政, 韩高升, 等. 不同应力路径下土体的变形特性与破坏特性[J]. *岩土力学*, 2006, **27**(12): 2181 - 2185. (YANG Xue-qiang, ZHU Zhi-zheng, HAN Gao-sheng, et al. Deformation and failure characteristics of soil mass under different stress paths[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, **27**(12): 2181 - 2185. (in Chinese))]
- [18] 郑 刚, 颜志雄, 雷华阳, 等. 天津市第一海相层粉质黏土卸荷变形特性的试验研究[J]. *岩土力学*, 2008, **29**(5): 1237 - 1239. (ZHENG Gang, YAN Zhi-xiong, LEI Hua-yang, et al. Experimental studies on unloading deformation properties of silty clay of first marine layer in Tianjin urban area[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, **29**(5): 1237 - 1239. (in Chinese))]