

DOI: 10.11779/CJGE2016S2013

# 成样方法及应力路径对饱和中密细砂 CU 剪切特性影响

郭 莹, 韩 杰

(大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 采用干装敲击法和湿装夯实法制备 50% 相对密实度的饱和细砂, 进行了常规三轴压缩 CTC、等应力三轴压缩 TC、减压三轴压缩 RTC 三种应力路径下的固结不排水 (CU) 剪切试验, 综合分析了成样方法及应力路径对中密细砂力学特性的影响。试验结果表明: 各应力路径条件下, 成样方法对试验结果均有显著影响, 中密状态的饱和细砂试样均表现出显著的剪胀性, RTC 路径试样的剪胀性最强; 应力路径对试样的有效内摩擦角和峰值有效主应力比基本没有影响, 但成样方法对此影响显著。

**关键词:** 饱和中密细砂; 成样方法; 应力路径; CU 剪切试验; 剪胀性

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)S2-0079-06

作者简介: 郭 莹(1963-), 女, 副教授、硕士生导师, 主要从事土力学试验与海洋土力学、土动力学等方面的研究以及土力学与基础工程相关的教学工作。E-mail: dl-guoying@163.com。

## Influence of sampling methods and stress paths on the consolidated undrained shear behavior of saturated fine sand with medium density

GUO Ying, HAN Jie

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** The consolidated undrained shear tests are conducted on saturated fine sand with relative density of 50% prepared by using the dry-rapping method and wet tamping method under three stress paths of conventional tri-axial compression CTC, constant stress tri-axial compression TC, reduced tri-axial compression RTC. According to the test results, a comprehensive analysis of the influence of sampling methods and stress paths on mechanical behavior of fine sand with medium density is proceeded. The test results show that the sample preparing methods have considerable influence under various stress paths. The saturated fine sand with medium density exhibits obvious dilatancy. The strongest shear dilatancy is shown for samples with RTC path. The influence of stress path is not obvious on the effective internal friction angle and the peak effective principal stress ratio, but that of the sampling methods is significant.

**Key words:** saturated fine sand with medium density; sampling method; stress path; CU shear test; dilatancy

## 0 引言

在室内试验研究中, 常通过制备不同初始密实度的重塑样来模拟天然条件下砂土的初始状态。但由于实验室制备砂样不可避免地处于重力场中, 因而土样内颗粒的排列并非完全随机且颗粒间也不可能完全独立无联系, 因此实验室制备的重塑砂样总会表现出一定的结构性。因此, 三轴试验中, 通过不同成样方法制备的砂样在相同试验条件下, 应力应变关系却表现出较大差异。Vaid 等<sup>[1]</sup>在对 40% 相对密实度的 Fraser River 砂的固结不排水常规三轴压缩及拉伸试验中发现: 在相同试验条件下, 水下沉积法所成样在剪切过程中呈体胀趋势, 而湿装夯击法所成样则表现出体缩趋势及液化现象。Wood 等<sup>[2]</sup>对含粉粒的 Nevada 砂进行详尽的研究发现: 在固结不排水三轴剪切试验中相

同试验条件下, 干装漏斗灌入法所制备的中密(54%~65% 相对密实度)砂样出现临时液化现象, 而由水下沉积法制备的砂样应力应变关系均表现应变硬化, 未出现应变软化。郭莹等<sup>[3]</sup>针对饱和疏松南宁细砂的固结排水剪切试验中发现: 相同试验条件下, 干装敲击样表现为应变软化, 破坏模式为剪切破坏, 而湿装夯实样表现为应变硬化, 破坏模式为鼓胀破坏, 差异显著。

成样方法对砂土剪切特性影响的研究大多建立在常规应变控制式三轴试验的基础上。但砂土的应力应变关系还受到应力路径的影响。孙岳崧等<sup>[4]</sup>针对 64% 相对密实度的承德砂进行不同应力路径下的固结排水

剪切试验研究发现, 应力路径对砂土的应力应变关系有较大影响, 导致不同应力路径下的应力应变关系不能在应力比-广义剪应变坐标下完全归一化。许成顺等<sup>[5]</sup>针对 45% 相对密实度的福建标准砂的固结排水剪切试验发现: 不同应力路径下砂土的剪胀与剪缩特性明显不同, 并且压缩条件下比拉伸条件下显示出更明显的剪胀特性。在土工试验中模拟工程实际应力路径探讨土体的真实受力变化越来越受到重视<sup>[6-7]</sup>。

成样方法、应力路径这两个因素各自对砂土剪切特性的影响已有较多资料, 但目前综合考虑成样方法及应力路径对砂土力学特性影响的试验研究尚未见详细的研究成果。本文针对过 0.5 mm 筛的福建标准细砂采用干装敲击法及湿装夯击法制备饱和中密试样, 进行不同应力路径的固结不排水剪切试验, 着重探究成样方法及应力路径对砂土剪切特性的影响。

## 1 试验设备、土料及试验方法

### 1.1 试验设备及土料特性

试验设备采用南京土壤仪器厂生产的“SLB-1 型应力应变控制三轴仪”, 该设备可进行常规应变控制式静力三轴试验, 也可进行不同应力路径控制的静力三轴试验。

由于福建标准砂采用湿装夯击法成样后难以完整脱模<sup>[8]</sup>, 故试验中选用过 0.5mm 筛的福建标准砂。测得土粒相对密度  $G_s=2.64$ , 不均匀系数  $C_u=1.9$ , 曲率系数  $C_c=1.12$ , 最大与最小干密度分别为  $\rho_{d\max}=1.62 \text{ g/cm}^3$ ,  $\rho_{d\min}=1.36 \text{ g/cm}^3$ , 颗粒级配如表 1 所示。根据

《建筑地基基础设计规范》GB50007—2011 可定名为细砂。

表 1 砂料的颗粒级配

Table 1 Particle composition of sand

$>0.5 \text{ mm}$	0.5~0.25 mm	0.25~0.1 mm	0.1~0.075 mm	$<0.075 \text{ mm}$
0%	7.14%	90.31%	2.55%	0%

### 1.2 试验方法

采用干装敲击法(简称干装法)及湿装夯击法(简称湿装法)制备砂样, 初始相对密实度均控制为 50%, 干密度为  $1.48 \text{ g/cm}^3$ 。干装法制样时, 将烘干砂样分为 4 等份逐次装入对开承膜筒中, 必要时敲击承膜筒, 使每份砂样装入后达到固定控制高度。湿装法制样时, 先在称好的 4 份干砂样中加入无气水, 控制初始含水率为 8%, 搅拌均匀后, 在三瓣击实筒中分 4 层夯实至控制高度成样。试样制备完成后统一采用先通二氧化碳 30 min 后再通无气水的方式进行试样饱和, 最终饱和度均在 95% 以上。

在等应力三轴压缩 TC 路径及减压三轴压缩 RTC 路径试验中需要控制围压不断减小, 但围压只能控制为正值。表 2 为部分试验结束段记录的数据, 可见: 初始围压较低时, 例如干装样 TC 路径初始围压为 100 kPa, 剪切中出现围压降到接近 0, 孔压继续下降且主应力差继续上升的状况, 这说明此时试样尚未破坏, 但试验无法继续下去; 也可能出现初始围压较低时, 例如干装样 RTC 路径初始围压为 400 kPa, 主应力差有下降趋势时围压已降低至接近 0, 导致试验不得不中断, 此时应变还很小。

表 2 TC 和 RTC 试验结束段部分数据记录

Table 2 Part recorded data at the end of TC and RTC tests

试验条件	应变 /%	围压 /kPa	孔压 /kPa	主应力差/kPa
干装 TC 路径 100 kPa 固结	1.27	9	-59	338.2
	1.40	5	-67	356.1
	1.55	1	-73	369.9
干装 RTC 路径 400 kPa 固结	2.11	23	-71	410.6
	2.25	5	-84	407.6
	2.40	5	-87	419.8

由于 TC 和 RTC 路径在较低初始围压条件下无法完成, 因此采用较高初始围压条件进行 TC 和 RTC 试验。为了对比同样初始围压下的不同应力路径的试验结果, 补充了 600 kPa 初始围压的 CTC 和 TC 试验。具体的试验方案如表 3 所示。固结稳定后, 在不同应力路径控制条件下进行不排水剪切试验, 剪切速率均为 6 kPa/min。

表 3 试验方案

Table 3 Test schemes

成样方法	应力路径	初始围压/kPa
干装法 湿装法	常规三轴压缩 CTC 路径	100, 200, 300, 600
	等应力三轴压缩 TC 路径	200, 300, 400, 600
	减压三轴压缩 RTC 路径	500, 600, 700

## 2 试验结果及分析

图 1 为湿装样在 600 kPa 初始围压下应力控制试验的实测应力路径, 图中  $q=\sigma_1-\sigma_3$ ,  $p=(\sigma_1+2\sigma_3)/3$ 。可见应力路径控制情况满足试验要求。

### 2.1 CTC 路径试验

图 2 代表性地对比了干装样和湿装样在 100 kPa 初始围压下 CTC 路径的主应力差及孔压随轴向应变变化的试验结果, 其他围压结果与之相似。可见在 CTC 路径试验条件下, 干装样和湿装样的线型及峰值主应力差均存在较大差异, 与针对粉土<sup>[9]</sup>和砂土<sup>[10]</sup>进行的固结不排水剪切试验结果类似。湿装样的应力应

变曲线表现为三段式：初期陡直直线上升后上升斜率稍放缓，之后呈缓慢上升态势，呈现应变硬化；而干装样的应力应变曲线在峰值前近似直线上升，峰值后呈一定幅度下降，表现为应变软化。剪切结束时，两种成样方法获得的试验结果基本接近。

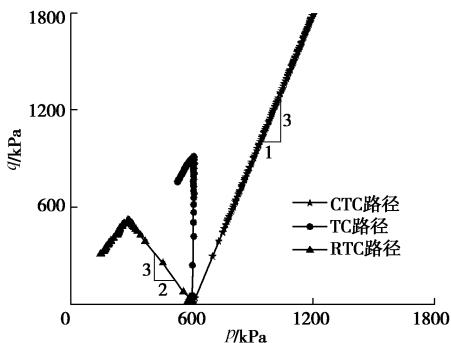


图 1 实测总应力路径

Fig. 1 Measured total stress paths

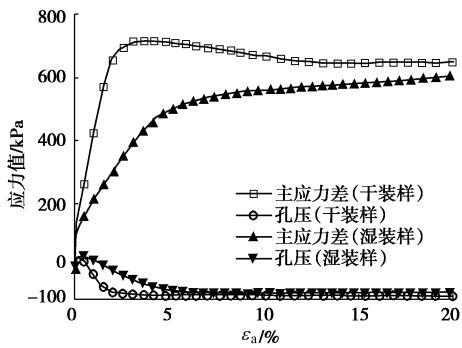


图 2 100 kPa 初始围压下 CTC 路径的试验结果对比

Fig. 2 Comparison of CTC test results under initial confining pressure of 100 kPa

由图 2 可见，在 CTC 路径试验中，干装样和湿装样在剪切过程中孔压随轴向应变的变化规律基本一致：剪切开始后，孔压小幅上升很快到达峰值，之后随应变增加孔压下降至负值并很快趋于稳定，均表现出极强的剪胀性，干装样几乎在孔压趋于稳定开始主应力差达到峰值。中密细砂样的孔压变化规律与黄博等<sup>[11]</sup>针对密实砂土所进行的固结不排水剪切试验结果类似。

Bishop 等<sup>[12]</sup>指出：剪胀性土在不排水剪切时，孔压在轴向变形最初很小一段内会有轻微的上升，当试样开始剪胀时孔压开始下降。理论上孔压下降可逼近负的一个大气压，但当孔压下降至某个值后，由于试样内水蒸气的产生及最初溶解于水中气体的释放导致孔压不会继续下降<sup>[11]</sup>。由图 2 可见：干装样与湿装样仅仅在孔压由峰值降低到稳定值这一段以及稳定值的大小稍有差异。其他围压的试验结果与 100 kPa 的结果类似，各围压下 CTC 路径试验中孔压最后稳定在

-72~ -89 kPa 不等。可见，CTC 路径试样均呈现出明显的剪胀现象。

## 2.2 TC 路径及 RTC 路径试验

图 3 代表性对比了干装样和湿装样在 200 kPa 围压下 TC 路径的主应力差及孔压随轴向应变变化的试验结果，其他围压结果类似。由图 3 可见：干装样与湿装样的应力应变关系均表现为应变软化型，但干装样的应变软化现象比湿装样更明显。干装样的峰值主应力差高于湿装样，各围压条件下均高出 26% 左右；从孔压变化看，TC 路径试验中试样几乎一开始就表现出显著的剪胀性，剪切开始后，孔压几乎没有上升段，很快开始下降，并稳定在 -89 kPa 左右。相对 CTC 路径试样而言，TC 路径的剪胀性更强。应变较大时，两种成样方法获得的试验结果也基本趋于一致。

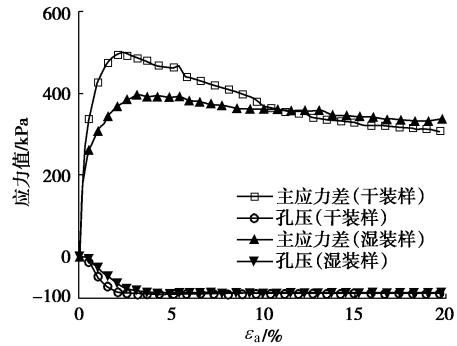


图 3 200 kPa 初始围压下 TC 路径的试验结果对比

Fig. 3 Comparison of TC test results under initial confining pressure of 200 kPa

图 4 代表性地对比了干装样和湿装样在 500 kPa 初始围压下 RTC 路径的主应力差及孔压随轴向应变变化的试验结果，其他围压结果接近。由图 4 可见：相对 CTC 和 TC 路径试验，RTC 路径干装样与湿装样的应力应变关系差别有所缩小，均表现为应变软化型，干装样的峰值主应力差依然高于湿装样，约高出 17% 左右。孔压在剪切开始即下降到负值并趋于稳定，同样表现出显著的剪胀性。应变较大时，两种成样方法获得的试验结果也基本吻合。

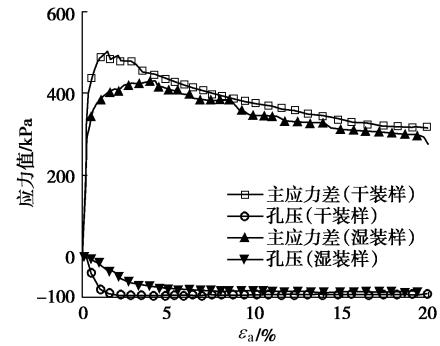


图 4 500 kPa 初始围压下 RTC 路径的试验结果对比

Fig. 4 Comparison of RTC test results under initial confining pressure of 500 kPa

图5给出了各初始围压下TC和RTC路径干装样和湿装样的有效主应力比 $\sigma'_1/\sigma'_3$ 与轴向应变 $\varepsilon_a$ 关系的对比结果。

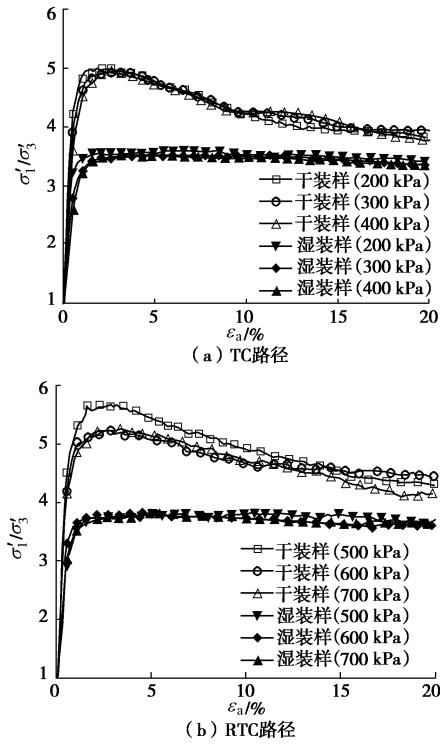


图5 TC 和 RTC 路径的 $\sigma'_1/\sigma'_3 - \varepsilon_a$ 关系

Fig. 5 Relationship between  $\sigma'_1/\sigma'_3$  and  $\varepsilon_a$  under TC and RTC paths

由图5可见：尽管TC和RTC路径试验过程中围压是不断变化的，相同成样方法相同应力路径试验条件下不同初始围压的 $\sigma'_1/\sigma'_3 - \varepsilon_a$ 关系曲线几乎一致，而同一应力路径不同成样方法的曲线关系则表现出明显差别，干装样的 $\sigma'_1/\sigma'_3 - \varepsilon_a$ 曲线与湿装样的曲线形状明显不同。

### 2.3 不同应力路径试验结果比较

在600 kPa初始围压条件下，图6和图7分别针对干装样和湿装样对比了各应力路径的主应力差( $\sigma_1 - \sigma_3$ )与轴向应变 $\varepsilon_a$ 关系、有效主应力比 $\sigma'_1/\sigma'_3$ 与轴向应变 $\varepsilon_a$ 关系以及有效应力路径 $(\sigma_1' - \sigma_3')/2$  -

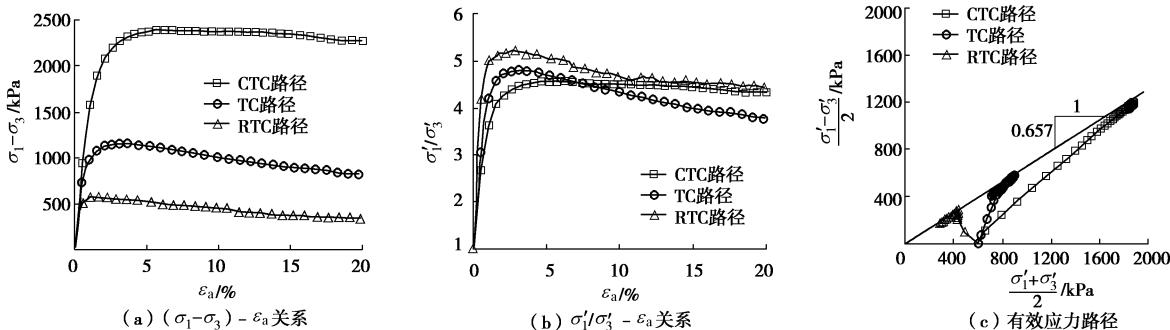


图6 干装样不同应力路径的试验结果对比

Fig. 6 Comparison of test results under different stress paths for samples prepared by dry-rapping method

$(\sigma_1' + \sigma_3')/2$ 的结果。由图6, 7可见：无论是干装样还是湿装样，相同初始围压条件下，不同应力路径试验获得的 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_a$ 关系曲线差异显著，不仅曲线形态有差异，峰值主应力差差异更加显著，表现为CTC路径>TC路径>RTC路径。在 $\sigma'_1/\sigma'_3 - \varepsilon_a$ 关系中可以看出，不同应力路径条件下的曲线形态和峰值有效主应力比依然存在一定差异，说明应力路径对应力应变关系的影响不可忽略。

从图6(c)和图7(c)可以看出：无论是干装样还是湿装样，相同成样方法所成试样的破坏线斜率与应力路径基本无关，说明有效应力强度指标与本文试验应力路径无关；干装样和湿装样的破坏线斜率分别为0.657和0.581，换算成有效内摩擦角分别为41.1°和35.5°。可见，干装样的有效内摩擦角明显高于湿装样的结果。

同样初始围压时，图8分别在各应力路径条件下对比了干装样和湿装样的试验结果。由图8可见，成样方法对试样应力应变关系的影响程度在不同应力路径试验中存在明显差异。对比干装样与湿装样的应力应变曲线的形状和峰值主应力差可见：CTC路径中干装样和湿装样的结果差异最为明显；其次是TC路径，差异也较为明显；RTC路径的差异明显缩小。可见，成样方法及应力路径这两个影响因素之间并不是独立的，它们之间存在交叉影响。

从图8孔压变化可以进一步发现，对饱和中密细砂而言，无论是干装样还是湿装样，在600 kPa初始围压各应力路径下均呈现出显著的剪胀性，其中，试样在RTC路径的剪胀性表现最为强烈，TC路径次之，CTC路径稍弱。

表4给出了各应力路径条件下，各初始围压获得的峰值有效主应力比的平均值及有效内摩擦角，未出现峰值时取15%轴向应变对应的主应力比，有效内摩擦角根据破坏线的斜率确定。由表4可见，应力路径对试样的峰值有效主应力比及有效内摩擦角尽管存在

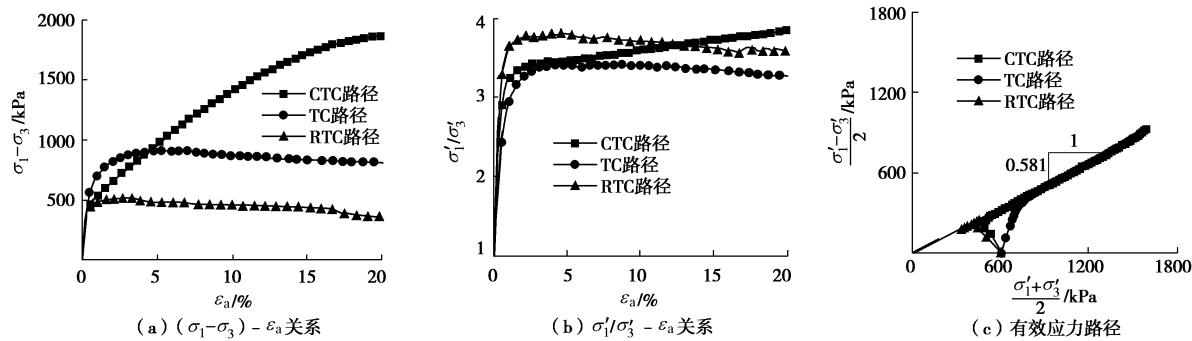


图 7 湿装样不同应力路径的试验结果对比

Fig. 7 Comparison of test results under different stress paths for samples prepared by wet tamping method

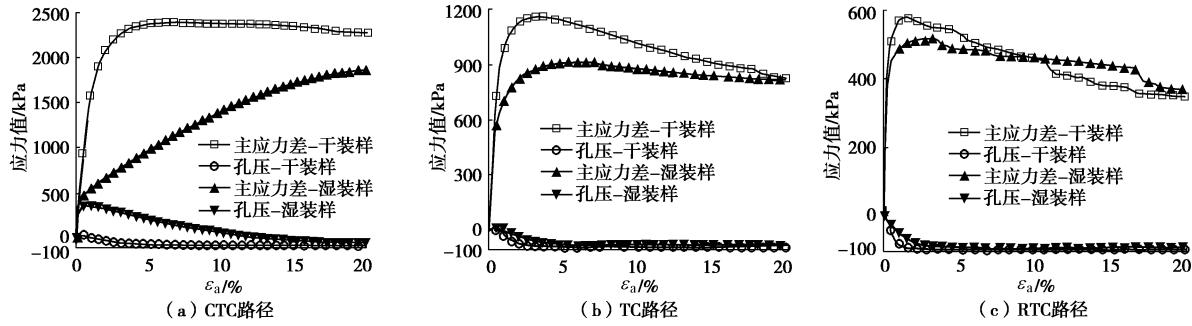


图 8 各应力路径在 600 kPa 围压时成样方法的影响对比

Fig. 8 Comparison of influences of sampling methods in different stress paths under initial confining pressure of 600 kPa  
影响, 但与成样方法的影响相比影响不太明显。峰值有效主应力比及有效内摩擦角受到成样方法的影响更加显著: 干装样的峰值有效主应力比约为 4.7~5.3, 而湿装样约为 3.5~4.2; 干装样的有效内摩擦角在 40.1°~42.3° 左右, 明显高于湿装样的 33.4°~36.4°; 与 CTC 路径的差异相比较, TC 和 RTC 路径的差异更加显著。产生这种差异的原因与不同成样方法制备的试样的初始结构存在差异有关, 有待深入研究。

表 4 试验结果对比

Table 4 Comparison of test results

应力路径	成样方法	峰值有效主应力比均值	有效内摩擦角/(°)
CTC 路径	干装	4.70	40.1
	湿装	4.15	36.4
TC 路径	干装	4.95	41.2
	湿装	3.52	33.4
RTC 路径	干装	5.32	42.3
	湿装	3.81	34.9

### 3 结 论

采用干装敲击法和湿装夯击法制备相对密实度为 50% 的饱和细砂样, 进行了常规三轴压缩 CTC 路径、等应力三轴压缩 TC 路径、减压三轴压缩 RTC 路径等三种应力路径控制固结不排水剪切试验, 比较了成样方法和应力路径对主应力差、有效主应力比变化规律

以及有效内摩擦角的影响。获得主要结论如下。

(1) 相同应力路径条件下, 成样方法对主应力差、有效主应力比及孔压随轴向应变变化的试验结果均有显著影响。针对中密状态的饱和细砂所进行的 CTC、TC 和 RTC 应力路径试验, 试样均表现出显著的剪胀特性, 相对而言, RTC 路径试样的剪胀性更强。

(2) 同样成样方法、不同应力路径获得的主应力差结果差异显著, 有效主应力比差别并不大, 应力路径对试样的有效内摩擦角基本没有影响, 但峰值有效主应力比和有效内摩擦角均受到成样方法的显著影响, 因此, 成样方法的影响不容忽视。

(3) 相同初始围压条件下, 不同成样方法所成试样在各应力路径中的主应力差与轴向应变关系差别大小明显不同: 在 CTC 路径中干装样与湿装样的应力应变曲线差异最为显著, 其次是 TC 路径, 在 RTC 路径中差别较小。这说明成样方法及应力路径这两个影响因素之间并不独立, 两者之间存在交叉影响。

### 参考文献:

- [1] VAID Y P, SIVATHAYALAN S, STEDMAN D. Influence of specimen-reconstituting method on the undrained response of sand[J]. Geotechnical Testing Journal, 1999, 22(3): 187~195.
- [2] WOOD F M, YAMAMURO J A, LADE P V. Effect of

- depositional method on the undrained response of silty sand[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2008, **45**: 1525 - 1537.
- [3] 郭 莹, 王 健. 基于图像测量的饱和细砂排水剪切试验研究[J]. 岩土力学, 2012, **33**(1): 24 - 30. (GUO Ying, WANG Jian. Study of drained tests of saturated fine sand based on digital image measuring[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(1): 24 - 30. (in Chinese))
- [4] 孙岳崧, 潘家骝, 李广信. 不同应力路径对砂土应力 - 应变关系影响[J]. 岩土工程学报, 1987, **9**(6): 78 - 88. (SUN Yue-song, PU Jia-liu, LI Guang-xin. The effects of different stress paths on stress-strain behavior of sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1987, **9**(6): 78 - 88. (in Chinese))
- [5] 许成顺, 文利明, 杜修力, 等. 不同应力路径条件下的砂土剪切特性试验研究[J]. 水利学报, 2010, **41**(1): 108 - 112. (XU Cheng-shun, WEN Li-ming, DU Xiu-li, et al. Experimental study on shear behaviors of sand under different stress path[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, **41**(1): 108 - 112. (in Chinese))
- [6] 刘祖德, 陆士强, 杨天林, 等. 应力路径对填土应力应变关系的影响及其应用[J]. 岩土工程学报, 1982, **4**(4): 45 - 55. (LIU Zu-de, LU Shi-qiang, YANG Tian-lin, et al. The influence of stress path on the stress-strain behavior of earthfills and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1982, **4**(4): 45 - 55. (in Chinese))
- [7] 李广信. 基坑中土的应力路径与强度指标以及关于水的一些问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(11): 2269 - 2275. (LI Guang-xin. Stress path and strength parameters of soil in foundation pits and some problems about water[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(11): 2269 - 2275. (in Chinese))
- [8] 郭 莹, 陈 珍. 成样方法对饱和中砂静力三轴固结排水剪切试验结果的影响[J]. 土木工程学报, 2010, **43**(增刊): 306 - 311. (GUO Ying, CHEN Zhen. The influence of sample-preparing methods on the experiment results of saturated medium sand in static triaxial consolidation drained shear test[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, **43**(S0): 306 - 311. (in Chinese))
- [9] 郭 莹, 张俊峰. 初始主应力方向对饱和粉土固结不排水剪切特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(1): 166 - 171. (GUO Ying, ZHANG Jun-feng. Effect of orientation of initial principal stress on undrained shear behavior of saturated silt[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(1): 166 - 171. (in Chinese))
- [10] PAPADIMITROU A G, DAFALIAS Y F, YOSHIMINE M. Plasticity modeling of the effect of sample preparation method on sand response[J]. Soils and Foundations, 2005, **45**(2): 109 - 124.
- [11] 黄 博, 汪清静, 凌道盛, 等. 饱和砂土三轴试验中反压设置与抗剪强度的研究[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(7): 1313 - 1319. (HUANG Bo, WANG Qing-jing, LING Dao-sheng, et al. Effects of back pressure on shear strength of saturated sand in triaxial tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(7): 1313 - 1319. (in Chinese))
- [12] BISHOP A W, ELDIN G. Un-drained triaxial tests on saturated sands and their significance in the general theory of shear strength[J]. Géotechnique, 1950, **2**(1): 13 - 32.

(责任编辑 明经平)