

不同应力路径下天然沉积软土的应力应变特性

朱楠^{1,2,3,4,5}, 吕海军², 刘天韵^{1,2,3,4,5}, 张晓晓^{1,2,3,4,5}

(1. 中交天津港湾工程研究院有限公司, 天津 300222; 2. 中交第一航务工程局有限公司, 天津 300461;
3. 港口岩土工程技术交通行业重点实验室, 天津 300222; 4. 天津市港口岩土工程技术重点实验室,
天津 300222; 5. 中交集团岩土工程重点实验室, 天津 300222)

摘要: 为了揭示应力路径对天然沉积软土应力应变特性的影响, 对原状天津软土和衡水湖软土开展物理力学指标、颗粒分析、常规三轴和应力路径三轴试验, 系统研究了不同应力路径下天然沉积软土的应力应变特征及其影响因素, 得到以下主要结论: 结构性和胶结特性改变软土的应力应变特征, 排水剪切下结构性和胶结特性较弱的天津软土表现出近似重塑土的应变硬化特征, 而结构性和胶结特性较强的衡水湖软土表现出原状土典型的应变软化特征; 天然沉积软土具有结构性和胶结特性, 可承担一定的拉应力并产生膨胀变形; 衡水湖软土黏粒和胶粒含量较高具有明显的胶结特性, 在轴向卸载路径下抗剪强度更高且膨胀变形更大。研究结论可为天然沉积软土的设计计算和本构模型研究提供借鉴参考。

关键词: 天然沉积软土; 三轴试验; 应力路径; 应力应变特性

中图分类号: U652.21; TU447

文献标志码: A

文章编号: 2095-7874(2024)10-0051-07

doi: 10.7640/zggwjs202410009

Stress-strain characteristics of natural sedimentary soft soil under different stress paths

ZHU Nan^{1,2,3,4,5}, LÜ Hai-jun², LIU Tian-yun^{1,2,3,4,5}, ZHANG Xiao-xiao^{1,2,3,4,5}

(1. Tianjin Port Engineering Institute Co., Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300222, China; 2. CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300461, China; 3. Key Laboratory of Port Geotechnical Engineering, Ministry of Transport, PRC, Tianjin 300222, China; 4. Key Laboratory of Port Geotechnical Engineering of Tianjin, Tianjin 300222, China; 5. Key Laboratory of Geotechnical Engineering, CCCC, Tianjin 300222, China)

Abstract: In order to reveal the influence of stress paths on the stress-strain characteristics of natural sedimentary soft soil, physical and mechanical properties, conventional triaxial and stress path tests were carried out on the undisturbed soft soils of Tianjin and Hengshui Lake. The systematical investigation was conducted on the stress-strain characteristics and influencing factors of natural sedimentary soft soil under different stress paths. The main conclusions are as follows: stress-strain characteristics of soft soil are changed by the variation of the structural and bonding characteristics. Under the drainage shear, Tianjin soft soil with weaker structural and bonding characteristics reveals the strain hardening characteristics similar to remolded soil, while Hengshui Lake soft soil with stronger structural and bonding characteristics exhibits the strain softening characteristics of undisturbed soil. Due to the presence of structural and bonding characteristics, natural sedimentary soft soil can bear tensile stress and show expansion deformation. The content of clay particles and colloidal particles of Hengshui Lake soft soil are higher than Tianjin soft soil, exhibiting obvious bonding characteristics, higher shear strength and more significant expansion deformation under the axial unloading stress paths. The conclusions can provide reference for the design calculation and constitutive model of natural sedimentary soft soil.

Key words: natural sedimentary soft soil; triaxial test; stress path; stress-strain characteristics

收稿日期: 2024-05-07 修回日期: 2024-06-19

基金项目: 中国交通建设集团有限公司科技研发项目 (2021-207-03019)

作者简介: 朱楠 (1987—), 男, 黑龙江佳木斯人, 博士, 工程师, 从事土的力学特性及其工程应用等研究。E-mail: zhn307@163.com

0 引言

应力路径对土体的强度和变形影响很大,在基坑开挖、盾构施工和地基处理等不同类型工程中,土体经历不同的应力路径,表现出不同的应力应变特性^[1-2]。近年来,学者们针对不同应力路径下土体的强度和变形问题开展了许多工作。刘恩龙等^[2]制备人工结构性土开展了常围压、减小围压和增大围压时的排水和不排水三轴试验,对不同应力路径下土体强度、破坏和变形特性进行了探讨。侯伟等^[3]采用 UH 模型研究了正常固结土在常规三轴压缩、三轴伸长和平均有效应力 p' 减小的压缩工况中土的变形特性。张建新等^[4]以天津滨海软土为对象,开展了三轴 CU、三轴 UU 和减 p' 路径的三轴试验,揭示了剪切应力路径对软土强度参数的影响。曾玲玲等^[5-6]研究了不同应力比对天然沉积土压缩性状的影响规律,发现压缩性参数 λ 随应力比增大呈先增大、后减小的变化规律。此外,基于应力路径试验研究了天然沉积土在不同应力路径下的不排水剪切特性,发现相同有效固结应力时偏压固结后土体的峰值强度比等向固结后更大。黄雄等^[7]基于加载-卸载固结试验研究了不同应力路径下土体压缩模量的变化规律。秦鹏飞等^[8]模拟地下工程施工过程中土体的受力状态,进行了常规三轴压缩、等 p' 压缩、等压固结和偏压固结减压压缩试验,发现土体在常规三轴压缩下强度最高,减压压缩下强度最低,且上述应力状态下土体均未出现应变软化。杨爱武等^[9]针对天津滨海吹填土采用三轴 UU 试验,研究了不同应力路径下吹填土应力应变特征及其与累积变形的关系。董金梅等^[10]对苏北地区粉土进行了常规三轴压缩、减压三轴压缩和等压压缩 3 种应力路径试验,发现了粉土应力应变曲线呈双曲线应变软化特征,常规三轴压缩下土体强度最大,减压压缩下土体强度最低的结论。陈勇等^[11]研究了应力路径与黏土变形的相关性,建立了土体再固结系数与加卸载次数及应力状态相关的数学模型,可较好预测反复加卸载下黏土的变形特征。阮永芬等^[12]对泥炭土进行了侧向、轴向、轴侧向同时

卸荷的固结不排水试验,研究了不同应力路径下泥炭土的应力应变、孔压和抗剪强度特性。王智超等^[13]对结构性软土进行了 CTC(CTE)、RTC(RTE)和 PTC(PTE)6 种不同应力路径下的三轴剪切试验,发现基坑被动区卸载路径下土体强度和变形显著降低,开挖卸载路径下土体抗剪强度降低了 80%,揭示了不同应力路径对结构性软土强度和变形的劣化作用。

上述研究取得较多成果,但针对具有结构性和胶结特性的天然沉积软土研究不足,试验研究采用的应力路径多为传统方法,不够全面。天然沉积软土具有结构性和胶结强度,改变了重塑土的应力应变特性,并使土体能够产生一定受拉(膨胀)变形,具有抗拉强度,这与传统土力学的认识有很大区别。此外,应采用更为全面的应力路径开展试验研究,在 $p'-q$ (q 为偏应力)应力空间中考虑全部 4 个象限的应力路径,考虑土体受拉状态,以更为全面地反映天然沉积软土的力学性质。本文开展了应力路径对天然沉积软土应力应变特性影响的试验研究,考虑固结不排水与固结排水常规三轴试验、以及 8 种代表性应力路径三轴试验,揭示应力路径对天然沉积软土应力应变特性的影响,研究成果可为岩土工程设计计算和土体本构模型研究借鉴参考。

1 土样的基本性质

试验土样均取自工程项目现场,天津软土取自天津市河西区地铁 11 号线某基坑工程现场,取样深度为埋深 5~10 m,衡水湖软土取自邢衡高速衡水段某标段工程现场,取样深度为 5~8 m。采用薄壁取样器钻孔取样,进行蜡封并尽快送至实验室,保证土样的结构完整性和含水率。分别进行土的基本物理力学指标和颗粒分析等试验,天然沉积软土的物理力学指标见表 1 所示。根据地勘资料可知,该区域天津软土属于海陆交互相沉积软土,相比湖相沉积软土,土体的含水率、孔隙比较小。衡水湖软土属于饱和湖相沉积软土,其性质相比天津软土更差,具有更高的含水率和更大的孔隙比。

表 1 天然沉积软土的物理力学性质

Table 1 Physical and mechanical properties of natural sedimentary soft soils

土体类型	含水率 $\omega/\%$	土粒比重 G_s	密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	孔隙比 e	液限 $\omega_L/\%$	塑限 $\omega_P/\%$	塑性指数 I_P	液性指数 I_L
天津软土	37.70	2.74	1.96	1.03	47.20	29.70	17.50	1.58
衡水湖软土	45.60	2.72	1.91	1.36	57.70	31.30	26.40	1.11

采用筛分法和密度计法对天津软土和衡水湖软土进行颗粒分析试验, 试验结果见表 2 所示。在表 2 中单独增加土体中小于 0.002 mm 的胶粒含量, 以反映土体的胶粒特性。天津软土大于 0.075 mm 的颗粒占 6.63%, 0.075~0.005 mm 粉粒占 65.5%, 小于 0.005 mm 的黏粒和胶粒占 27.87%, 天津软土以粉粒和黏粒为主, 粉粒偏多。而衡水湖软土黏粒含量占到 47.1%, 胶粒含量更是达到 33.9%, 因而具有较强的胶结特性。

表 2 天然沉积软土的粒径分布
Table 2 Particle size distribution of natural sedimentary soft soils

土样 类型	各粒径占总质量的百分含量/%			
	>0.075 mm 砂粒	0.075~0.005 mm 粉粒	<0.005 mm 黏粒	<0.002 mm 胶粒
天津软土	6.63	65.50	27.87	11.72
衡水湖软土	12.00	40.90	47.10	33.90

2 试验方案

天然沉积软土在工程中会经历不同的应力路径, 在堆载预压、真空预压、基坑开挖和隧道开挖工程中, 软土会经历常规三轴剪切、等向加卸载、轴向加卸载、侧向加卸载及等 p' 纯剪切等复杂应力路径, 表现出特殊的应力应变特征, 即在不同的加卸载路径下表现出不同的变形特性。

为了研究天然沉积软土在不同应力路径下的应力应变特征, 开展常规三轴排水剪切和 $p'-q$ 空间中 8 个不同方向应力路径的三轴试验, 研究不同应力路径下天然沉积软土的受力变形特性及其机理, 以指导工程的设计和施工, 并为软土屈服面确定和本构模型分析提供依据。常规三轴试验采用 TSZ-2.0 应变式三轴仪进行, 针对天津软土和衡水湖软土, 分别进行固结不排水和固结排水三轴剪切试验, 围压考虑 50 kPa、100 kPa、150 kPa、200 kPa 和 250 kPa。应力路径三轴试验采用英国 GDS 应力路径三轴仪进行, 分别对天津软土和衡水湖软土原状土样进行 8 个代表性应力路径的三轴试验。应力路径试验方案见表 3 所示, 其中, 除了初始固结应力不同外, 天津软土与衡水湖软土均采用相同试验编号、应力比与剪切速率, 2 种软土采用不同的初始固结应力、同样进行 8 组完全相同的应力路径试验。天津软土的初始固结状态为 $p'=55.42$ kPa, $q=36.77$ kPa, 衡水湖软土初始固结状态为 $p'=57.29$ kPa, $q=44.96$ kPa。采用应力控制

的方式进行加载, 剪切速率 $\Delta q=0.1$ kPa/min。应力路径试验方案示意图见图 1 所示。

表 3 应力路径试验方案
Table 3 Stress path test plans

试验方法	试验编号	应力比 η	固结状态	剪切速率 $\Delta q/$ (kPa·min ⁻¹)
排水剪切	TCD0	0	天津软土 p' =55.42 kPa; q =36.77 kPa	0.1
	TCD3	3		
	TCD ∞	∞		
	TCD-3	-3		
	TED0	0	衡水湖软土 p' =57.29 kPa; q =44.96 kPa	
	TED3	3		
	TED- ∞	$-\infty$		
	TED-3	-3		

注：试验编号中 TCD 表示轴向加载排水试验；TED 表示轴向卸载排水试验；字母后的数字表述应力比 η 。

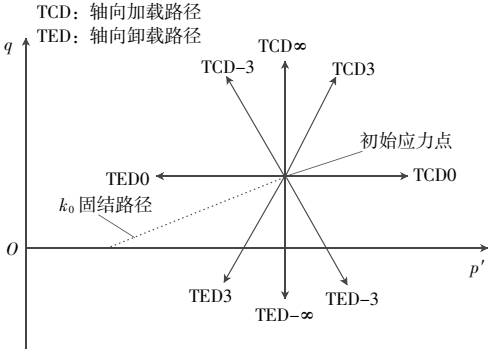


图 1 应力路径试验方案示意图
Fig. 1 Schematic diagram of stress path test plans

3 结果分析

3.1 常规三轴剪切路径下软土的应力应变特性

通过常规三轴试验, 考虑剪切时的排水条件和不同围压影响, 研究不同应力路径条件下天然沉积软土的应力应变曲线形态、峰值强度变化和硬化软化特性。

天津软土在常规三轴不排水和排水应力路径下的应力应变曲线见图 2 所示。在不排水剪切路径下(见图 2(a)), 天津软土应力应变曲线呈弹塑性特征, 具有较明显的屈服点, 且随围压增大土体的屈服点不断增大, 在偏应力 q 超过屈服点后软土的偏应力 q 不再随轴应变 ε_a 增加而继续增大。在排水剪切路径下(见图 2(b)), 软土的应力应变曲线表现出明显的应变硬化特征, 没有明显的屈服点, 土体的偏应力 q 随轴向应变 ε_a 增加而不断增大, 且围压越大相同轴应变 ε_a 下的偏应力 q 越大。上述结果表明, 在相同的应力路径下,

排水剪切增大了土体受到的剪切应力,使原状土的初始结构和胶结连接在剪切初期很快破坏,结

构性和胶结强度很快丧失,表现出类似重塑土的应变硬化特征。

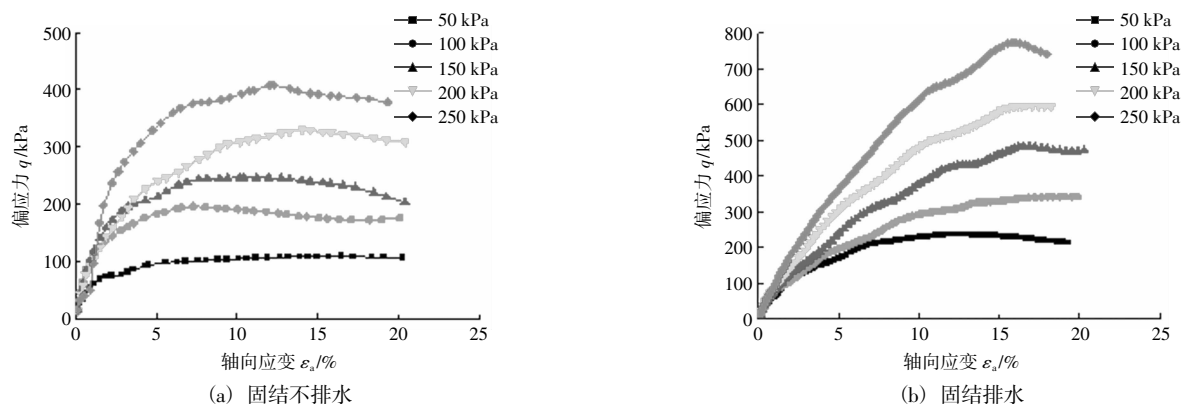


图2 天津软土的应力-应变特性

Fig. 2 Stress-strain characteristics of soft soil in Tianjin

衡水湖软土不排水与排水条件下的常三轴应力应变曲线见图3所示。在不排水条件下,软土的应力应变曲线表现出应变软化特性,并具有明显的峰值点,土体的偏应力 q 峰值随固结压力 σ_3 增大而增大(见图3(a));在排水剪切条件下,衡水湖软土的应力应变曲线仍表现出应变软化性质,但

偏应力 q 峰值相比不排水剪切下的土样有较大提高(见图3(b))。与天津软土对比可知,衡水湖软土的抗剪强度低于天津软土,但其结构性和胶结特性的影响更为显著,天津软土在排水剪切下基本呈现重塑土的应变硬化特征,而衡水湖软土在排水剪切下仍表现出原状土的应变软化特征。

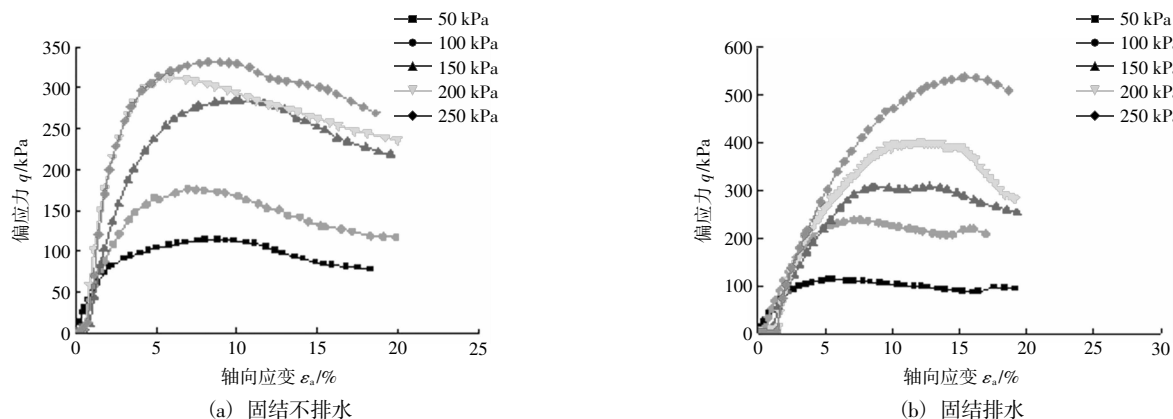


图3 衡水湖软土的应力-应变特性

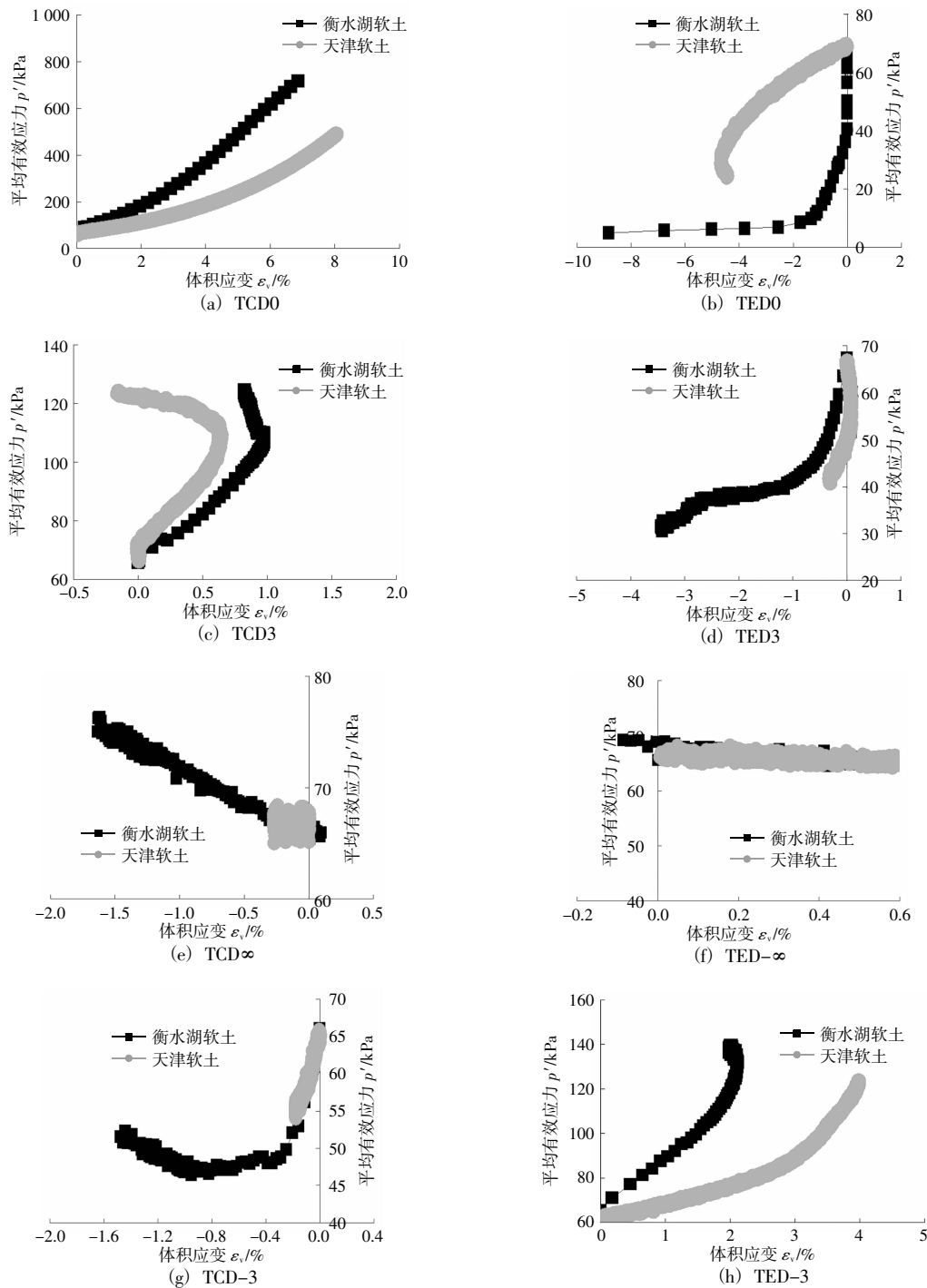
Fig. 3 Stress-strain characteristics of soft soil in Hengshui Lake

3.2 $p'-q$ 空间中不同应力路径条件下软土应力应变特性

基于 $p'-q$ 空间中8种代表性工程典型应力状态的应力路径,开展天然沉积软土的应力路径三轴试验,分析不同应力路径下天然沉积软土的应力应变特征和硬化软化特性,研究天然沉积软土结构性和胶结特性对土体应力应变特性的影响。

1) $p'-\varepsilon_v$ 应力应变特性

天津软土与衡水湖软土不同应力路径的 $p'-\varepsilon_v$ 曲线见图4所示,天津软土相比衡水湖软土的刚度更小,相同平均有效应力 p' 下产生更大的体积变形 ε_v 。除等 p' 纯剪路径(TCD ∞ 和TED $-\infty$)外,其他应力路径加载后土体的体积应变 ε_v 均随平均有效应力增量 $\Delta p'$ 的增加而明显变化。在等 p' 纯剪路径下的平均有效应力增量 $\Delta p'$ 变化较小,基本呈水平向发展,但 $p'-\varepsilon_v$ 曲线略有偏移。

图 4 不同应力路径下软土的 $p'-\varepsilon_v$ 曲线Fig. 4 $p'-\varepsilon_v$ curves of soft soil under different stress paths

分析可知, 在等向压缩(TCD0)路径下, 由于衡水湖软土的结构性更强、胶结强度更大, 因此在平均有效应力增量 $\Delta p' > 0$ 的应力路径中, 衡水湖软土的抗压强度更高且压缩变形更小; 在平均有效应力增量 $\Delta p' < 0$ 的应力路径中, 由于土体结构无法承受拉应力, 荷载主要由胶结连结承担, 并且胶结连结具有一定的延性质, 由于衡水湖

软土的胶结强度大于天津软土, 因此, 当应力路径的平均有效应力增量 $\Delta p' < 0$ 时, 衡水湖软土能够承受较多的拉应力并且膨胀变形更大。

2) $q-\varepsilon_s$ 应力应变特性

不同应力路径下天津软土与衡水湖软土的 $q-\varepsilon_s$ 曲线如图 5 所示, 对比二者在不同应力路径下的剪切应力应变特性。在等向压缩(TCD0)路径和

等向拉伸(TED0)路径加载过程中,土体偏应力 q 基本不变,但仍有剪切应变 ε_s 产生,并且衡水湖软土的剪切变形大于天津软土。当土体处于轴向加载路径(TCD3、TCD ∞ 和TCD-3)时, q - ε_s 曲线呈应变软化或理想弹塑性质,衡水湖软土的抗剪

强度高于天津软土;当土体处于轴向卸载路径(TED3、TED ∞ 和TED-3)时,天津软土与衡水湖软土的 q - ε_s 曲线特征相似,天津软土对负偏应力($-q$)的承载能力略小于衡水湖软土。

分析可知,在土体处于轴向加载路径中时,

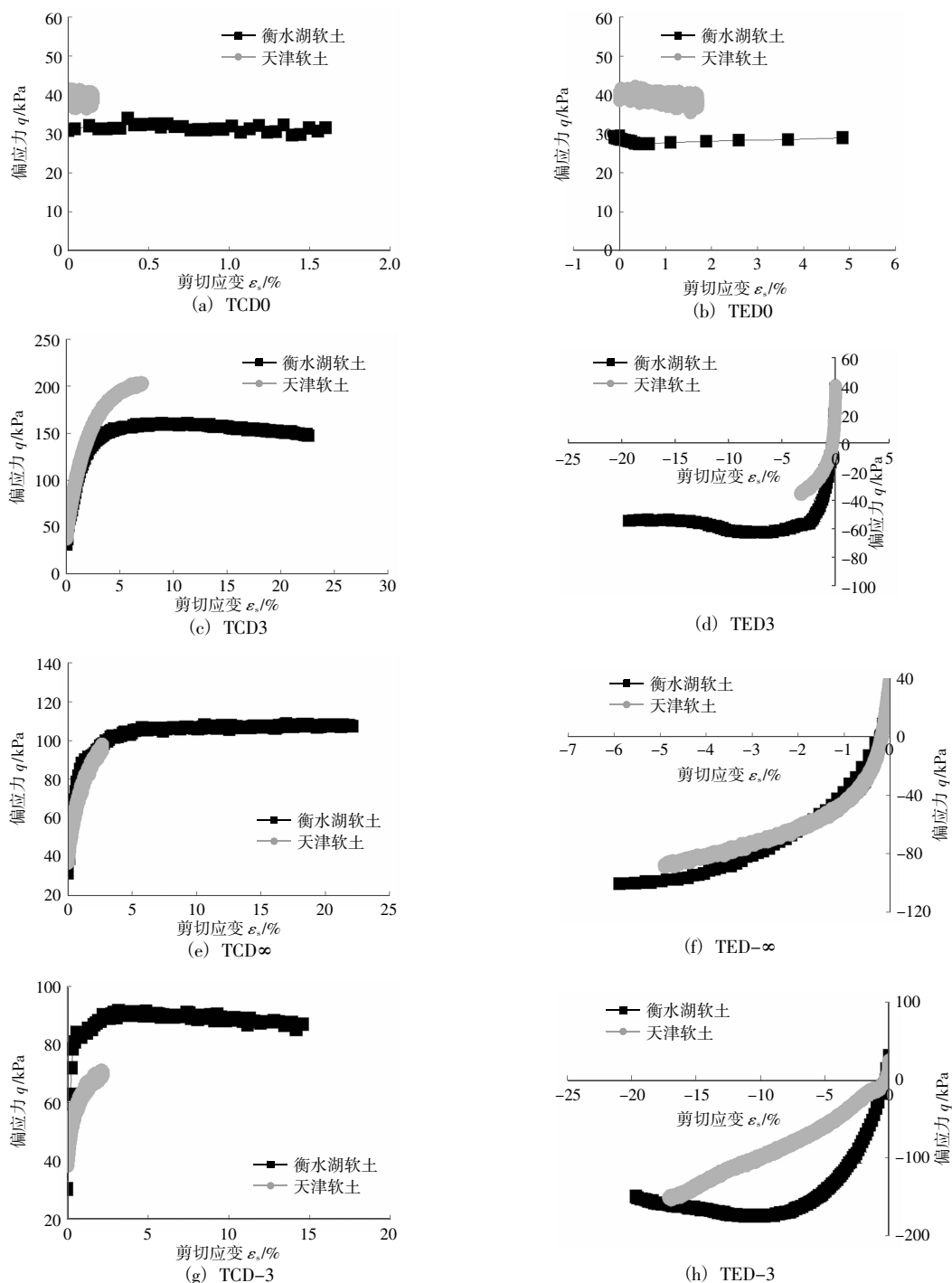


图5 不同应力路径下软土的 q - ε_s 曲线

Fig. 5 q - ε_s curves of soft soil under different stress paths

由于软土的胶结连结和土体组构能够共同承担偏应力 q ,提高了土体的抗剪强度,而衡水湖软土

的胶结强度高于天津软土,因此其抗剪强度高于天津软土;而当土体处于轴向卸载路径中时,在

卸载条件下土体的组构不再承担偏应力 q ,全部偏应力 q 均由胶结连结承担,因此具有更显著胶结特性的衡水湖软土在轴向卸载路径下其抗剪强度同样高于天津软土。

4 结语

通过对天津软土和衡水湖软土开展了物理力学性质、颗粒分析、常规三轴及应力路径三轴试验,研究了应力路径对天然沉积软土应力应变特性的影响,得到以下结论:

1) 在常规三轴剪切路径下,衡水湖软土的固结不排水和固结排水抗剪强度均低于天津软土,但其结构性和胶结特性对应力应变的影响比天津软土更显著,天津软土在排水剪切路径下基本呈现重塑土应变硬化特征,而衡水湖软土在排水剪切路径下仍表现出原状土的应变软化特征。

2) 在轴向卸载路径下,由于天然沉积软土具有胶结特性和结构性,可承担一定的拉应力,能够在拉应力下产生膨胀变形。

3) 衡水湖软土的黏粒和胶粒含量高于天津软土,具有更明显的胶结特性,在轴向卸载路径下,衡水湖软土的抗剪强度更高且膨胀变形更大。

参考文献:

- [1] 张坤勇,张梦,聂美军,等.考虑开挖应力路径深基坑顺逆结合施工支护变形分析[J].中国港湾建设,2023,43(3):29-37.
ZHANG Kun-yong, ZHANG Meng, NIE Mei-jun, et al. Analysis of deformation of supports for deep foundation pit cut with integration of bottom-up and top-down methods considering excavation stress path[J]. China Harbour Engineering, 2023, 43(3): 29-37.
- [2] 刘恩龙,沈珠江.不同应力路径下结构性土的力学特性[J].岩石力学与工程学报,2006(10):2058-2064.
LIU En-long, SHEN Zhu-jiang. Mechanical behavior of structured soils under different stress paths[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006(10): 2058-2064.
- [3] 侯伟,姚仰平.工程中典型应力路径下土的应力-应变特性分析[J].工业建筑,2011,41(9):24-29.
HOU Wei, YAO Yang-ping. Analysis of stress-strain behavior of clay along typical stress paths in practical projects[J]. Industrial Construction, 2011, 41(9): 24-29.
- [4] 张建新,王沛,李晶.不同应力路径下天津滨海软土强度参数试验研究[J].水文地质工程地质,2011,38(6):56-61.
ZHANG Jian-xin, WANG Pei, LI Jing. Experimental studies of mechanical parameters of soft soil under different stress paths in the Tianjin Binhai New Area[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2011, 38(6): 56-61.
- [5] 曾玲玲,洪振舜,刘松玉,等.应力路径对天然沉积土压缩特性影响的试验研究[J].岩土工程学报,2012,34(7):1250-1255.
ZENG Ling-ling, HONG Zhen-shun, LIU Song-yu, et al. Experimental study on different compression behaviors of natural clays caused by various stress paths[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(7): 1250-1255.
- [6] 曾玲玲,洪振舜,刘松玉.考虑固结路径影响的天然沉积土不排水剪切试验研究[J].东南大学学报(自然科学版),2012,42(4):744-748.
ZENG Ling-ling, HONG Zhen-shun, LIU Song-yu. Experimental study on undrained shear behavior of natural sedimentary clays under various consolidation stress paths[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2012, 42(4): 744-748.
- [7] 黄雄,郭玉华,区少凤.土的压缩模量随荷载的变化规律分析[J].水运工程,2013(7):95-99.
HUANG Xiong, GUO Yu-hua, OU Shao-feng. Evolution law of compression modulus of soil under loads' changing[J]. Port & Waterway Engineering, 2013(7): 95-99.
- [8] 秦鹏飞,谢晓杰,马玉林.不同应力路径下饱和粉土强度与变形特性试验研究[J].长江科学院院报,2016,33(4):78-80,85.
QIN Peng-fei, XIE Xiao-jie, MA Yu-lin. Deformation and strength characters of saturated silty soil under different stress paths[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2016, 33(4): 78-80, 85.
- [9] 杨爱武,赵梦生,刘琦.考虑应力路径与累积变形影响吹填土力学特性[J].地下空间与工程学报,2018,14(5):1284-1291.
YANG Ai-wu, ZHAO Meng-sheng, LIU Qi. Mechanics characteristics of soft dredger fill considering stress paths and cumulative deformation[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(5): 1284-1291.
- [10] 董金梅,朱华,叶明鸽.应力路径对粉土力学特性的影响试验[J].南京工业大学学报(自然科学版),2019,41(3):376-382.
DONG Jin-mei, ZHU Hua, YE Ming-ge. Stress path experiments for effect on mechanical properties of silty soil[J]. Journal of Nanjing Tech University(Natural Science Edition), 2019, 41(3): 376-382.
- [11] 陈勇,隆海鹏,曹玲,等.反复等向加卸载路径下粉质黏土变形特性研究[J].防灾减灾工程学报,2020,40(2):145-151.
CHEN Yong, LONG Hai-peng, CAO Ling, et al. Cyclic response and modeling of saturated silty clay due to repeated isotropic loading and unloading[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(2): 145-151.
- [12] 阮永芬,潘继强,杨文辉,等.泥炭质土在不同卸荷路径下的力学特性研究[J].昆明理工大学学报(自然科学版),2022,47(5):172-180.
RUAN Yong-fen, PAN Ji-qiang, YANG Wen-hui, et al. Mechanical properties of peaty soils under different unloading paths[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2022, 47(5): 172-180.
- [13] 王智超,王伟超,彭慧良,等.复杂应力路径下海相结构性软土力学特征试验[J].铁道科学与工程学报,2023,20(8):2868-2877.
WANG Zhi-chao, WANG Wei-chao, PENG Hui-liang, et al. Mechanical characteristic test of structural marine soft clay under complex stress paths[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(8): 2868-2877.