

考虑应力路径与累积变形影响吹填土力学特性^{*}

杨爱武^{1,2}, 赵梦生^{1,2}, 刘琦^{1,2}

(1.天津市软土特性与工程环境重点实验室,天津 300384;2.天津城建大学 土木工程学院 天津 300384)

摘 要: 应力路径与累积变形量影响土体的力学特性。本文以天津滨海新区有一定结构强度的吹填土为研究对象,采用 WF 应力路径试验仪对土体施加不同的应力路径,再控制土体的不同的累积变形量,在此基础上,进行三轴不固结不排水试验,探讨不同应力路径及初始累积变形对吹填土变形特性、强度特性以及孔隙水压力变化规律。试验结果表明,土体三轴剪切应力-应变关系曲线形状与应力路径阶段累积变形量密切相关,应力路径对土体抗剪强度大小以及抗剪强度包线形状有明显影响,抗剪强度指标粘聚力受应力路径的影响比内摩擦角大。土体孔压变化不仅与应力路径有关,还与土体结构屈服有关。3 种不同应力路径下,有效应力路径在土体结构屈服前后都出现明显的偏转,呈现为“S”型。土体的结构屈服应力并不是一个定值,随着应力状态的变化而变化。

关键词: 应力路径;结构性;累积变形;吹填土

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2018)05-1284-08

Mechanics Characteristics of Soft Dredger Fill Considering Stress Paths and Cumulative Deformation

Yang Aiwu^{1,2}, Zhao Mengsheng^{1,2}, Liu Qi^{1,2}

(1. Key Laboratory of Soft Soil Engineering Character and Engineering Environment of Tianjin, Tianjin 300384, P.R. China;
2. Tianjin University of Urban Construction, Civil Engineering School of Tianjin, Tianjin 300384, P.R. China)

Abstract: The mechanical properties of soil was affected by the stress path and the cumulative deformation. The soft dredger fill possessing a certain structural strength in Tianjin Binhai New Area was investigated. Through the triaxial unconsolidation undrained test using the WF stress path apparatus, different stress path was imposed on the soil samples and the different cumulative deformation of soil mass was controlled, the effect of the different stress path and initial cumulative deformation on the soil deformation characteristic, strength characteristic and pore water pressure were obtained. The results showed that the stress-strain relationship curve shape of the soil triaxial shear was closely related to cumulative deformation in the different stress path of loading, the stress path has obvious influence on the shear strength and envelope curve of soil. The cohesion as one of the shear strength index affected by stress path was greater than angle of internal friction affected, The pore pressure of soil was related to not only the stress path but also the soil structure yield stress. Before or after the soil structure yield, the three different effective stress paths have changed obviously and appeared as an inflection of “S” sharp. The structure yield stress of soil was not a constant and changed with stress state.

Keywords: stress path; structure; cumulative deformation; soft dredger fill

^{*} 收稿日期: 2018-04-21 (修改稿)

作者简介: 杨爱武 (1971-), 男, 安徽桐城人, 博士, 教授, 主要从事软土地基处理及土体微观结构研究。

E-mail: tulilab@163.com

基金项目: 国家自然科学基金 (41372291); 天津市科技计划项目 (15JCZDJC40600, 15ZCZDSF00220)

0 前言

近年来,对考虑应力路径影响下土体力学特性的研究已取得不少成果,如李广信^[1]对基坑中土应力路径与强度指标关系进行了分析,指出基坑开挖过程中,地基土不同于常规挡土墙的应力路径以及土体强度的分析方法;曾玲玲等^[2-4]对应力路径对自然沉积土压缩特性、不排水剪切特性以及变形特性进行了研究,并通过对天然沉积土进行不同应力路径下的 GDS 三轴压缩试验,研究不同应力比对天然沉积土压缩性状的影响规律;杨雪强等^[5]探讨了不同应力路径下土体变形与破坏特性,并且指出了这些特性差异的根本原因在于应力路径的不同;周葆春^[6]对重塑土不同应力路径下的有效抗剪强度参数进行了试验研究,通过常规三轴压缩与等 p 三轴压缩试验,得到了 2 种不同应力路径下的有效抗剪强度参数和临界状态线参数等。实际上,自然界中的土体具有一定的结构性,由于结构性的存在,使其在结构屈服前后表现出不同的力学特性。目前对其研究也取得丰硕的研究成果,如吕海波等^[7],Huang 等^[8]通过室内压缩试验,研究了土体结构性对压缩特性的影响,并通过试验发现结构性在天然软粘土中普遍存在,它使土体具有一定的结构强度;邵光辉等^[9]探讨了软粘土的结构性对其次固结变形的影响,刘维正等^[10]通过一系列物理力学实验探讨了软土的结构性及其工程效应问题;殷杰等^[11]对不扰动土的不排水强度进行了研究,通过试验证明了软粘土不扰动土样由于受结构特性的影响产生抵抗作用,因此其不排水强度包线高于重塑土;高彦斌等^[12]通过研究得到软土地基在考虑土结构性情况下折线型强度公式。在对应力应变关系的影响^[13-14]及软土相应的微观结构特性的影响方面也取得了很大的突破,如陈昌禄等^[15]在合理评价土结构性变化规律的基础上建立结构性参数与强度之间的关系,进而基于强度折减法对边坡稳定性进行分析。综上所述,单独考虑应

力路径或结构性影响的土体力学特性的研究均有涉及,但考虑二者共同作用下土体力学特性的研究则较少^[16-17],还有很多工作要做。本文以天津滨海新区经过真空预压处理后有一定结构强度的吹填土作为研究对象,采用 WF 应力路径试验仪对土体施加不同的应力路径,控制土体累积变形,在此基础上,进行三轴不固结不排水试验,探讨不同应力路径与累积变形对结构性吹填软土变形特性、强度特性以及孔隙水压力变化规律,以期为吹填场地地基处理与土地合理利用提供支持。

1 试验方案

1.1 试样基本性质

本文试验材料为天津滨海新区吹填土样,试样深度为地表下 4.0~10.0 m,各项物理力学性质指标统计如表 1。

表 1 表明,现场吹填土为高含水量软土,基本力学性质较差。由图 1 可以看出,原状土的无侧限压缩应力-应变曲线出现明显的拐点,且呈应变硬化趋势,重塑土则未出现拐点,曲线较平滑。由图 1 还可以看出,原状土的无侧限抗压强度远比重塑土的无侧限抗压强度大,即现场吹填土具有结构性。

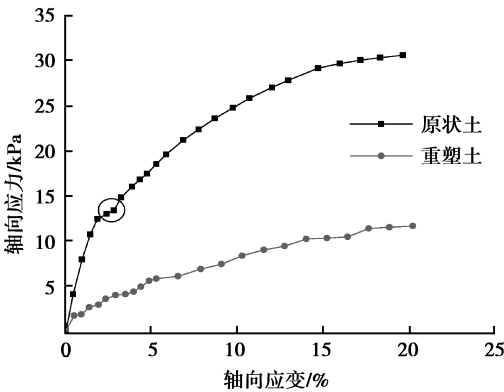


图 1 无侧限压缩应力-应变曲线
Fig. 1 Curves of stress-strain with unconfined compressive test

表 1 土的基本性质

Table 1 Basic properties of soil										
含水量 ω / %	密度 ρ / ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	比重 G_s	饱和度 S_r / %	孔隙比 e	液限 W_L / %	塑限 W_p / %	塑性 指数 I_p	液性 指数 I_L	压缩 系数 a_v	压缩 模量 E_s /MPa
46.9	1.76	2.74	99.9	1.287	43.4	25.9	17.5	1.200	0.878	2.605

1.2 试验方案

先对土样进行 K_0 固结, 固结压力分别为 30 kPa、60 kPa、90 kPa 与 120 kPa (图 2 中分别对应为 A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 点)。在此基础上, 分别进行增 p 路径、等 p 路径、减 p 路径 3 种不同应力路径试验。通过控制每种应力路径上土体不同累积变形量后停止试验, 然后再进行三轴不固结不排水试验, 试验方案示意图如图 2 所示。

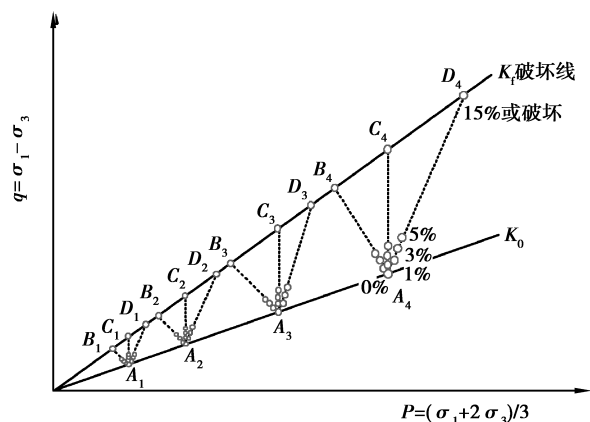


图 2 p - q 应力路径空间

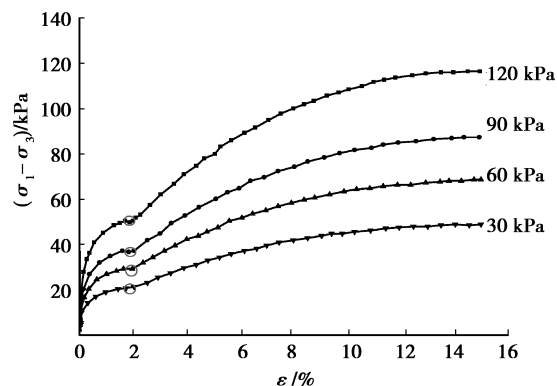
Fig. 2 Space of p - q stress path

图 2 中以每个固结围压为起点 (A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 点) 进行应力路径试验, 达到不同应变时进行三轴试验, 各方案都相同。以围压 30 kPa、增 p 应力路径 A_1D_1 为例: 先进行 K_0 固结, 固结压力达到 30 kPa 后, 进入应力路径阶段, 分别控制应变为 0% (K_0 固结 A_1 点)、1%、3%、5% (参考规范 [GB 50007—2011], 视为土体此时破坏) 时停止该应力路径试验, 然后再进行常规三轴不固结不排水剪切试验, 直至土样被破坏, 可得到不同应力路径下不同结构损伤程度土体变形、强度与孔隙水压力等力学特性。为了书写简洁, 文中所指的应变量为 0%、1% 等指的是应力路径阶段应变量的大小。

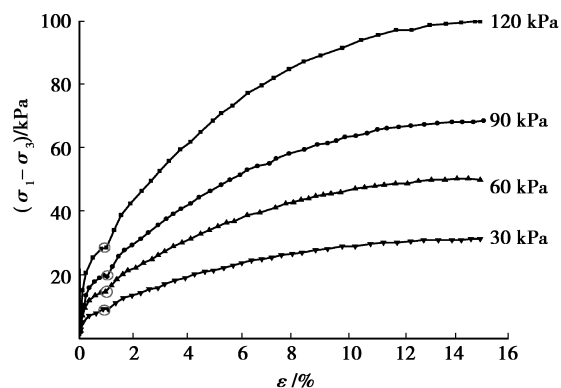
2 试验成果分析

2.1 变形特性研究

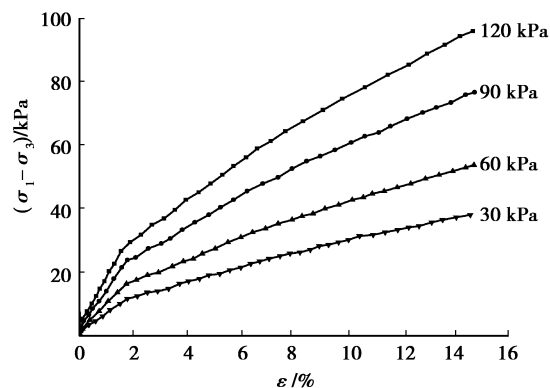
经过 K_0 固结以及相应的应力路径且控制一定的变形量后, 对土体进行常规三轴剪切试验。限于篇幅, 其典型的三轴压缩应力-应变关系曲线如图 3 所示。其中, 图 3(a) 表示 K_0 固结后应力路径阶段变形量为 0% 的三轴剪切应力-应变曲线, 图 3(b) 表示减 p 路径下应变量为 1% 的土样三轴剪切应力-应变曲线, 图 3(c) 表示等 p 路径下应变量为 3% 的土样三轴剪切应力-应变曲线, 图 3(d) 表示增 p 路径下应变量为 5% 的土样的应力-应变曲线。



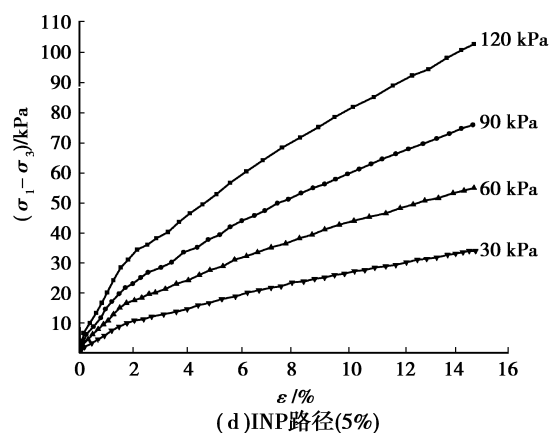
(a) K_0 (0%)



(b) DEP 路径(1%)



(c) KCP 路径(3%)



(d) INP 路径(5%)

图 3 不同应力路径阶段三轴剪切应力-应变曲线

Fig. 3 Curves of stress-strain of triaxial shear under different stages of stress path

由图 3 可以看出,经过不同的应力路径阶段后,三轴剪切应力-应变关系曲线形状与应力路径阶段累积变形量密切相关。应变量为 0%(K_0 固结后土样)和应变量为 1%的应力-应变曲线区别于应变量为 3%和 5%的应力-应变曲线。在图 3(a)和图 3(b)中可以明显看到,应力-应变曲线中存在明显的台阶形拐点(此点即为结构屈服应力点),应力路径阶段应变量为 0%(K_0 固结后土样)的三轴剪切应力-应变曲线的拐点应变量为 2%左右,而应力路径阶段应变量为 1%的拐点应变量为 1%左右,即拐点处对应的应变量为前期应力路径阶段的应变量的 2 倍。这是因为在应力路径阶段应变量为 0%的 K_0 固结后的土结构基本未损伤,达到结构屈服状态需要较大的变形量;应力路径阶段应变量为 1%的土样结构已有损伤,但未完全损伤,即未达到结构屈服状态,需要进一步增加土体的应变,结构才最终完全破坏,所以其达到结构屈服状态的变形量小于 K_0 固结后的土。图 3(c)和图 3(d)表示为应力路径阶段应变量为 3%和 5%。由图看出,三轴剪切应力-应变曲线初始阶段没有出现台阶形的拐点,其应力-应变曲线与重塑土的应力-应变曲线类似。这是因为土体在应力路径阶段结构已经完全破坏所致。由上述讨论可以认为,不管经历的应力路径如何,土体在常规三轴状态下结构屈服与累积变形有关。

2.2 抗剪强度分析

通过对试验数据的分析发现,3 种应力路径下未达到结构屈服状态的土样(应力路径阶段应变量为 0%和 1%的试样),其莫尔包络线并不是一条直线,可用折线拟合;而超过结构屈服状态的土样(应力路径阶段应变量为 3%和 5%的试样),其莫尔包络线近似为一条直线。 K_0 固结后土样(应力路径阶段应变量为 0%)的莫尔包络线转折点对应的坐标为(96.9,34.8)。应变量为 1%时,不同应力路径下莫尔包络线转折点对应的坐标值不同,增 p 、等 p 、减 p 路径应力路径阶段对应的坐标分别为(91.1,32.5)、(91.1,29.5)、(91.0,27.3)。当应力路径阶段应变量为 3%和应变量为 5%时,抗剪强度包线可用直线拟合而不是折线。也就是说,土体剪切结构屈服应力并不是一个定值,而与应力状态及累积变形有关。 K_0 固结后土的剪切结构屈服应力大于有损伤土体的剪切结构屈服应力。另外,在同等条件下,应力路径对土体的剪切结构屈服应力有一定影响,在本文的试验围压下增 p 路径下结构

屈服应力最大,等 p 路径下的结构屈服应力次之,减 p 路径下结构屈服应力最弱。不同应力路径累积变形下土体不排水抗剪强度指标(c 、 φ)值如表 2。

表 2 不同应力路径累积变形下土体抗剪强度指标(c 、 φ)值
Table 2 The values of soil shear strength indicators(c 、 φ) in different stress paths and damage degrees

应力路径	应变率			
	0%	1%	3%	5%
减 p 路径 (DEP)		$\begin{pmatrix} 6.7, 8.8 \\ 1.7, 8.9 \end{pmatrix}$	(3.5, 7.9)	(2.2, 7.7)
等 p 路径 (KCP)	$\begin{pmatrix} 14.1, 8.9 \\ 4.9, 9.2 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 8.4, 8.1 \\ 2.5, 8.5 \end{pmatrix}$	(5.1, 8.1)	(3.5, 7.9)
增 p 路径 (INP)		$\begin{pmatrix} 10.9, 9.4 \\ 4.2, 10.3 \end{pmatrix}$	(5.8, 8.2)	(4.6, 8.3)

注:莫尔包络线为折线时,其抗剪强度指标分别为 c_1 、 φ_1 和 c_2 、 φ_2 , 记为 $\begin{pmatrix} c_1, \varphi_1 \\ c_2, \varphi_2 \end{pmatrix}$,莫尔包络线为直线时,其抗剪强度指标为 c 、 φ , 记为(c 、 φ)。

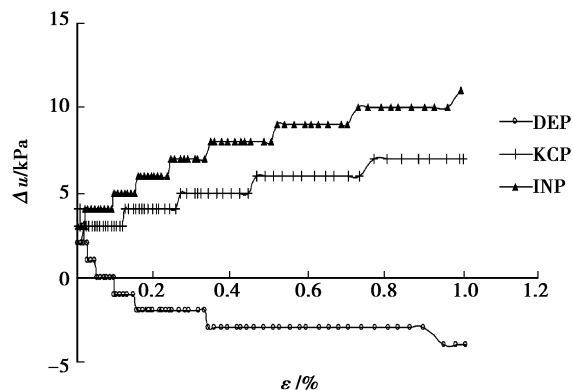
表 2 数据证实了应力路径与累积变形对土体抗剪强度的影响。应力路径相同情况下,累积变形影响较大,即在结构屈服前后,抗剪强度指标区别明显。表现为粘聚力变化大,内摩擦角变化相对较小。另外,在损伤程度相同的条件下(即变形量相等的情况下),应力路径对抗剪强度指标影响明显。增 p 路径下的抗剪强度指标最大;等 p 路径下次之;减 p 路径下最小。

总之,应力路径与累积变形对土体抗剪强度有影响,工程实践中应引起足够的重视。

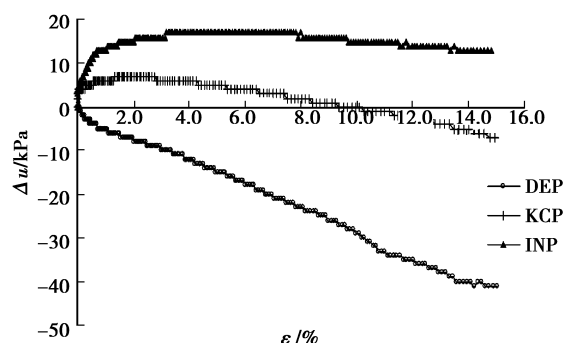
2.3 孔隙水压力变化规律

对不同应力路径下孔隙水压力随应变变化进行了量测,限于篇幅,其典型的孔隙水压力-应变变化关系如图 4 和图 5 所示。其中图 4(a)表示 30 kPa 围压下土体未进入屈服阶段,图 4(b)表示土体已进入完全屈服阶段;同样图 5(a)表示 120 kPa 围压下土体未进入屈服阶段,图 5(b)表示土体已进入完全屈服阶段。

图 4 可以看出,增 p 路径的孔压一直为正值,在土体结构屈服前,孔压随着轴向应变的增加而增大,而当土体结构屈服后,孔压略有降低,但其值均为正值。等 p 路径初始阶段孔压为正值,在结构屈服后(应变率约为 2%)逐渐减小而变成负值。主要是在该路径下,随着轴向应力的增加,侧向应力



(a) 应力路径阶段应变量为1%



(a) 应力路径阶段应变量为15%

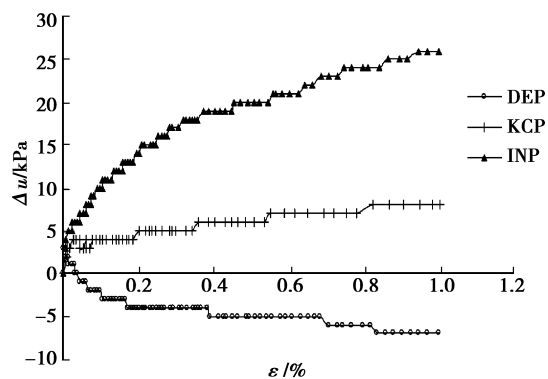
图4 30 kPa 围压下孔压变化量与轴向应变关系曲线

Fig. 4 Curves of pore pressure-strain and axial strain relations under 30 kPa confining pressure

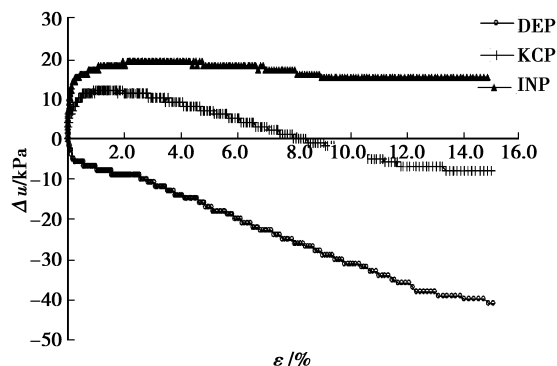
的卸载,土体会出现一定程度的膨胀,导致孔压下降,因此整体上表现为孔压先升后降。减 p 路径阶段的孔压变化与增 p 和等 p 路径阶段有明显的区别,起始很短时间为正值,之后迅速转变为负值。该现象与土体损伤程度有关,一般来说,减 p 路径下土体中存在拉应力,土体最易损伤,损伤程度越大,孔压 Δu 值维持时间越短,所以孔隙水基本上都呈负压状态。

进一步对孔压变化规律进行分析,得到不同应力路径下孔压变化量与主应力差的关系。限于篇幅,以围压 60 kPa 应力路径应变量为 15% 为例进行分析(此试验过程完整,可以很好地体现不同应力路径与累积变形下孔压与主应力差之间的关系),成果如图 6 所示。

图 6 可以看出,3 种路径下孔压在结构屈服前都迅速上升。这是由于在结构屈服前,土结构保持较好,孔隙连通性好,所受外力基本上由孔隙水承担,从而导致孔压迅速上升。结构屈服后,随着 q 值的增大,在增 p 路径中,孔压变化很小,几乎呈直线;在等 p 路径中孔压逐渐增大,当达到一定值时,出现下降的趋势;而在减 p 路径中,孔压逐渐下降。



(a) 应力路径阶段应变量为1%



(a) 应力路径阶段应变量为15%

图5 120 kPa 围压下孔压变化量与轴向应变关系曲线

Fig. 5 Curves of pore pressure-strain and axial strain relations under 120 kPa confining pressure

这是因为,对于饱和土来说,在 Skempton 提出的孔压增量公式中: $d_{uw} = d_p + Ad_q$,其中 d_{uw} 是孔隙水压力的变化, d_p 是施加的球应力增量, d_q 是施加的剪应力增量, A 是正的土体材料常数(当 $0 < A < 1$ 时,其值约为 $1/3$,当 $A < 1$ 时,表示 p 对孔压的贡献比 q 大)。随着 p 单独增大,孔压也会随之增大; p 单独减小,孔压会随之减小。但是随着 q 单独增大,孔压有可能增大,也有可能减小,这是因为孔压的增大或减小,取决于土颗粒之间的相对位置的调整(即土内部结构的变化)。土颗粒间相对位置较大时, q 增大时,根据有效应力原理知孔隙水承担部分外力,此时 q 增大有增大孔压的作用;土颗粒间相对位置变小时,孔隙水承担部分外力减小, q 增大却起到减小孔压的作用,而且土颗粒间相对位置的大小是同时由 p 和 q 的应力水平决定的。因此,在增 P 路径中, q 先起增大孔压的作用,后期当土颗粒间相对位置变小时,起减小孔压的作用,导致试验结果呈现孔压先增大、后稳定;在等 P 路径中, p 无变化,对孔压变化无贡献,当 q 增大时,孔压先期增大, q 继续增大时,导致土颗粒间相对位置变小,因此后期孔压下降(有的降至负值);在

减 P 路径中, p 单独减小使孔压减小, q 单独增大使孔压增大, 但 p 对孔压的贡献比 q 大, 所以使得试验显示的孔压减小。总之, 土体孔压变化不仅与应力路径有关, 还与土体结构屈服有关。

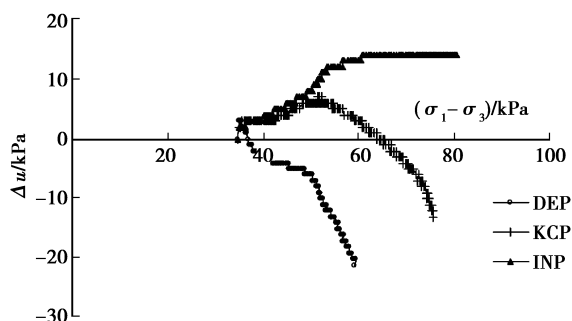
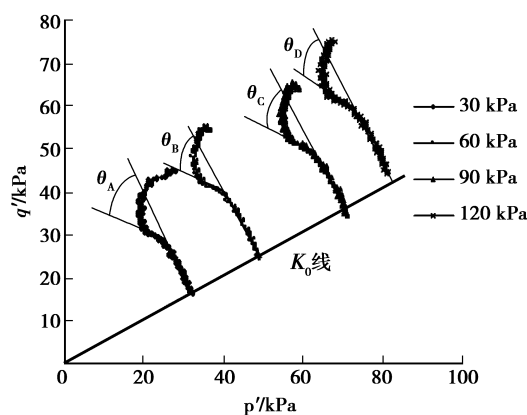


图 6 不同应力路径下孔压与主应力差

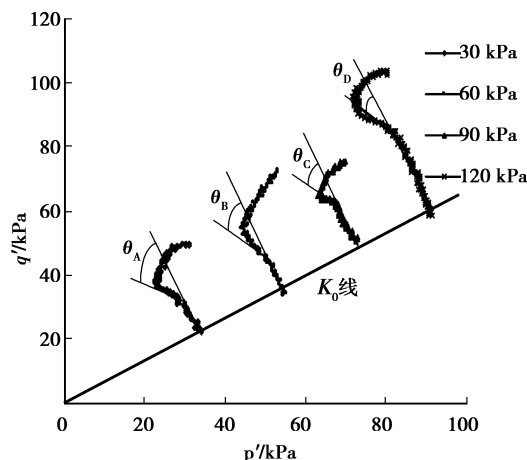
Fig. 6 Curves of pore pressure-stress and principal stress deviator under different stress path

2.4 有效应力路径变化规律

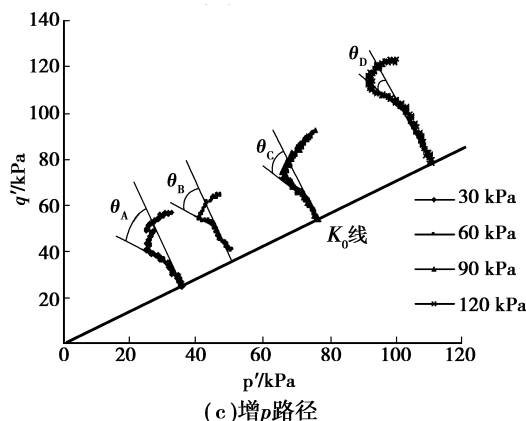
不同围压下增 p 、等 p 、减 p 路径的 p' - q' 有效应力路径如图 7 所示。



(a) 减 p 路径



(b) 等 p 路径



(c) 增 p 路径

图 7 不同应力路径下的有效应力路径

Fig. 7 Curves of effective stress path under different stress path

由图 7 可以看出, 3 种不同应力路径下的有效应力路径在初始阶段几乎成直线状态, 直线段斜率绝对值的大小代表土体经过不同压力 K_0 固结后结构性的强弱。固结后结构性越强, 斜率绝对值越大。在剪切过程中, 土体在结构屈服后应力路径都出现明显的偏转, 由直线段偏转成弧线段。该现象表示, 土体在剪切阶段结构发生剧烈损伤, 偏转角越大, 亦即剪切阶段结构损伤越明显。另外, 有效应力路径在后期又出现一个拐点, 使其整体上呈现为“S”形。第一个拐点是由土体结构损伤所致, 第 2 个拐点则是由于土体由剪缩转变为剪胀, 即相变造成的。直线段斜率的绝对值以及转折处偏转角统计如图 8 所示。

由图 8 可见, 3 种应力路径下随着固结围压的增大, 有效应力路径中直线段斜率的绝对值越来越小, 偏转角也随着固结围压的增大而减小, 说明固结阶段围压的大小对结构损伤有影响。固结围压越大, 固结阶段结构损伤越大, 导致剪切阶段结构强度越小, 抵抗外力能力小, 外在表现为有效应力路径中直线段斜率与转折处偏转角也就越小。围压相等时, 有效应力路径中直线段斜率的绝对值分别为增 p 最大, 等 p 次之, 减 p 最小; 偏转角也随着路径的不同而有变化, 减 p 最大, 等 p 次之, 增 p 最小。综上所述, 固结围压与应力路径都会对土体结构损伤有很大的影响。

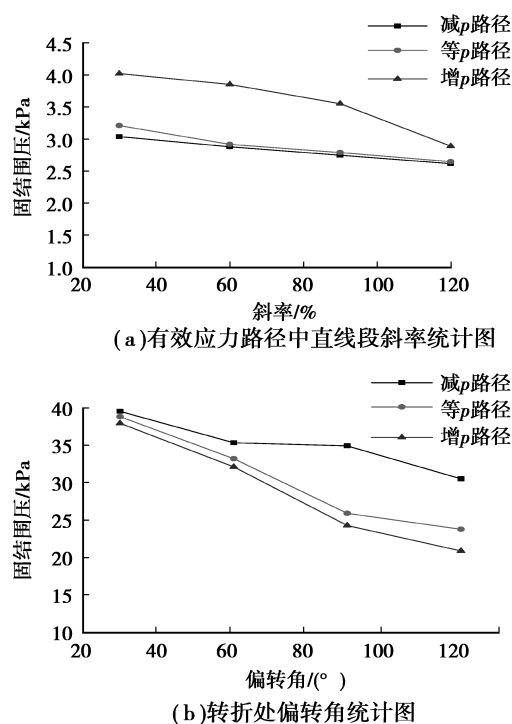


图8 有效应力路径中直线段斜率及转折处偏转角统计图

Fig. 8 Statistical curves of the straight slope and the deflection angle of turning point in effective stress path

3 结论

(1)不同应力路径下,土体三轴剪切应力-应变关系曲线形状与土体结构损伤有关。土体结构屈服取决于累积变形的大小。应力路径对土体抗剪强度有明显影响。增 p 路径的抗剪强度最大,等 p 路径的抗剪强度居中,减 p 路径的抗剪强度最低。不同应力路径阶段,抗剪强度包线形状与其累积变形有关,当结构未完全损伤时,抗剪强度包线呈折线形;而当结构彻底损伤时,抗剪强度包线呈直线形。抗剪强度指标粘聚力受应力路径的影响比内摩擦角大。

(2)不同应力路径条件下,土体孔压变化不仅与应力路径有关,还与土体结构屈服有关。增 p 路径的孔压一直为正值,在土体结构屈服前,孔压随着轴向应变的增加而增大,而当土体结构屈服后,孔压略有降低,但其值均为正值。等 p 路径初始阶段孔压为正值,在结构屈服后逐渐减小最终变为负值。减 p 路径阶段的孔压变化与增 p 和等 p 路径阶段有明显的区别,起始很短时间为正值,之后

迅速转变为负值。

(3)土体的结构屈服应力并不是一个定值,而是随着应力状态的变化而变化。增 p 路径下的结构屈服应力比同条件下的其他路径大,等 p 路径下的结构屈服应力次之,减 p 路径下的结构屈服应力最弱。3种不同应力路径下,有效应力路径在土体结构屈服前后都出现明显的偏转,呈现为“S”形。

参考文献 (References)

- [1] 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,2006,31(11):2269-2275. (Li Guangxin. Stress path and strength parameters of soil in foundation pits and some problems about water [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 31(11): 2269-2275. (in Chinese))
- [2] 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 Lingling, Hong Zhenshun, Liu Songyu, 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. (in Chinese))
- [3] 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,2012,42(4):744-748. (Zeng Lingling, Hong Zhenshun, Liu Songyu. Experimental study on undrained shear behavior of natural sedimentary clays under various consolidation stress paths [J]. Journal of Southeast University, 2012, 42(4): 744-748. (in Chinese))
- [4] 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 Lingling, Chen Xiaoping. Analysis of mechanical characteristics of soft soil under different stress paths [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(5): 1264-1270. (in Chinese))
- [5] 杨雪强,朱志政,韩高升.不同应力路径下土体的变形特性与破坏特征[J].岩土力学,2006,27(12):2181-2185. (Yang Xueqiang, Zhu Zhizheng, Han Gaosheng. Deformation and failure characteristics of soil mass under different stress paths [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(12): 2181-2185. (in Chinese))

- [6] 周葆春.应力路径对重塑黏土有效抗剪强度参数的影响[J].华中科技大学学报(自然科学版),2007,35(12):83-86.(Zhou Baochun. Influence of stress path on effective shear strength parameters of reshaped clay[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Nature Science Edition), 2007, 35(12): 83-86. (in Chinese))
- [7] 吕海波,汪稔,孔令伟,等.结构性对琼州海峡软土压缩特性的影响[J].岩土力学,2001,22(4):467-469,473.(Lü Haibo, Wang Ren, Kong Lingwei, et al. The influences of soil structure on compressibility of Qiongzhou strait soft marine clay[J]. Rock and Soil Mechanics,2001,22(4):467-469,473. (in Chinese))
- [8] Huang Y H, Zhu W, Qian X D, et al. Change of mechanical behavior between solidified and remolded solidified dredged materials[J]. Engineering Geology, 2011, 119(3):112-119.
- [9] 邵光辉,刘松玉.海相结构软土的次固结研究[J].岩土力学,2008,29(8):2057-2061. Shao Guanghui, Liu Songyu. Research on secondary consolidation of structural marine clays[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008,29(8):2057-2061.(in Chinese)
- [10] 刘维正,名磊.长江漫滩相软土结构性特征及其工程效应分析[J].岩土力学,2010,31(2):427-432. Liu Weizheng, Shi Minglei. Structural characteristic and engineering effect analysis of Yangtze River backswamp soft soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010,31(2): 427-432.(in Chinese)
- [11] 殷杰,高玉峰,洪振舜.连云港软黏土的不排水强度试验研究[J].岩土力学,2009,30(11):3291-3301.(Yin Jie, Gao Yufeng, Hong Zhenshun. Research on undrained shear strength tests of soft Lianyungang clay. [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(11): 3291-3301. (in Chinese))
- [12] 高彦斌,郭永发,叶观宝.考虑软土结构性的折线型强度公式及应用[J].岩土力学,2011,32(7):2128-2132. (Gao Yanbin, Guo Yongfa, Ye Guanbao. Polygonal line strength equation of soft soil and its application considering soil structure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011,32(7): 2128-2132. (in Chinese))
- [13] Cotecchia F, Chandler R J. A general frame work for the mechanical behaviour of clays[J]. Geotechnique, 2000, 50(4): 431-437.
- [14] Markgraf W, Horn R, Peth S. An approach to rheometry in soil mechanics-structural changes in bentonite, clayey and silty soils[J]. Soil & Tillage Research 2006, 91(1): 1-14.
- [15] 陈昌禄,邵生俊,邓国华.土的结构性参数与强度的关系及其在边坡稳定分析中的应用[J].中南大学学报(自然科学版),2010,41(1):328-334. (Chen Changlu, Shao Shengjun, Deng Guohua. Relationship between soil structural parameters and strength and its application in slope stability analysis [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2010,41(1):328-334. (in Chinese))
- [16] 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,2006,25(10):2058-2064.(Liu Enlong, Shen Zhujiang. Mechanical behavior of structured soils under different stress paths [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(10):2058-2064. (in Chinese))
- [17] 曾玲玲,陈晓平,刘松玉.软土结构性及不同应力路径对本构模型的影响研究[A]//第一届全国岩土本构理论研讨会论文集[C].2008,206-212. (Zeng Linling, Chen Xiaoping, Liu Sengyu. Studies on the effect of structural properties and different stress paths on the soft soil constitutive model [A]//Proceedings of the First National Symposium on Geotechnical Constitutive Theory[C]. 2008,206-212.(in Chinese))