

DOI: 10.16285/j.rsm.2023.1111

砂土特征状态线及不排水特性的初始状态分区

王宁博^{1,2}, 姚仰平³

(1. 中国建筑科学研究院有限公司 地基基础研究所, 北京 100031; 2. 建筑安全与环境国家重点实验室, 北京 100013;
3. 北京航空航天大学 交通科学与工程学院, 北京 100083)

摘 要: 砂土不排水特性表现出强烈的初始状态依赖性, 为深入探究砂土这一特性, 介绍了 $e-\ln p$ (e 为孔隙比, p 为围压) 平面内砂土已有与不排水特性有关的初始状态特征线, 即最松固结线 (loosest consolidation line, 简称 LCL)、静态液化分界线 (static liquefaction dividing line, 简称 LDL) 以及准稳态分界线 (quasi steady-state dividing line, 简称 QDL), 并在引入砂土正常压缩线 (normal compression line, 简称 NCL) 的基础上, 结合剪胀和屈服理论, 补充论证了 LDL 的存在性, 给出了 QDL 的简易确定方法。基于特征状态线, 将砂土初始状态进行了分区, 分别为 I 静态液化区、II 应变软化区、III 准稳态区、IV 应变硬化区, 使得砂土在同一初始状态特征区表现出相似的不排水剪切特性。分析了初始状态分区的应用, 包括理论应用与工程应用, 以期对砂土不排水特性初始状态依赖性的理解及相关工程实际提供指导。

关 键 词: 砂土; 特征状态线; 不排水特性; 初始状态依赖性; 分区

中图分类号: TU 441

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2023) 11-3165-08

Characteristic state lines and subarea of initial state of sand under undrained shearing

WANG Ning-bo^{1,2}, YAO Yang-ping³

(1. Institute of Foundation Engineering, China Academy of Building Research, Beijing, 100013, China; 2. State Key Laboratory of Building Safety and Environment, Beijing, 100013, China; 3. School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, Beijing, China)

Abstract: The undrained behavior of sand is mainly dependent on its initial state. To better understand and reveal this feature, the characteristic state lines, namely the loosest consolidation line (LCL), the static liquefaction dividing line (LDL) and the quasi steady-state dividing line (QDL), which are related to the undrained behavior of sand in the $e-\ln p$ plane, are presented firstly. Based on the theory of shear yielding and dilatancy, a simple method used to determine QDL is given, and the existence of LDL is demonstrated by introducing the normal compression line (NCL) of sand. Subsequently, the initial state of sand is divided into four characteristic subareas, which can be referred to as the static liquefaction subarea I, the strain softening subarea II, the quasi-steady state subarea III and the strain hardening subarea IV, and sand shows the similar undrained behavior when its initial state places in the individual subarea. Finally, the theoretical and engineering applications of subarea are analyzed.

Keywords: sand; characteristic state line; undrained behavior; initial state dependence; subarea

1 引 言

砂土在不排水剪切过程中, 可表现出复杂的力学特性, 这些特性均表现出强烈的初始围压和密度双重依赖性^[1-3], 即初始状态依赖性。实际工程中, 在不利荷载作用下, 砂土的不排水力学特性将会诱发一系列工程问题, 如自重或者上浮载荷作用下的场地静态液化^[4-5], 松散砂土边坡滑动失稳或者大变形破坏^[6-7], 大规模土石坝的滑动破坏^[8]等。因此,

对砂土不排水特性及其对初始状态依赖性的研究具有非常重要的意义。

针对砂土不排水特性及其对初始状态的依赖性, 许多学者做了大量、有益的研究, 并取得丰硕的成果^[1-3, 9-15]。总而言之, 砂土在不排水静力剪切条件下可表现出如图 1 中所示的 4 种类型剪应力 q -剪应变 ε_d 关系, 以下简称应力-应变关系, 分别为: I 静态液化、II 应变软化、III 准稳态、IV 应变硬化。其中, 静态液化是指剪应力峰值后应变软化至有效

收稿日期: 2023-07-27

录用日期: 2023-09-15

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 51979001)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51979001).

第一作者简介: 王宁博, 男, 1989 年生, 博士, 从事土的力学特性、本构模型及绿色、低碳岩土工程技术研究。E-mail: by1613111@buaa.edu.cn

应力及残余强度为 0 的状态；应变软化是指剪应力峰值后软化至临界状态；准稳态是指峰值后软化至相变点，继而再次应变硬化至临界状态，且在相变点具有明显的应变流动现象，此时，相变点也被称为准稳态点；应变硬化则是剪切过程中持续硬化至临界状态。砂土在不排水剪切过程中具体表现出哪一种类型的应力-应变关系主要取决于初始状态，也即取决于初始密度和初始围压的联合效应，例如，同一初始密度的密砂在低围压条件下表现出应变硬化，而在较高围压条件下则可表现出准稳态，甚至于应变软化^[9]；又如，在围压相同的条件下，随初始密度的减小，砂土也变得越来越“软”，不排水应力-应变关系可由应变硬化→准稳态→应变软化直至静态液化的变化；另外，同一等向压缩线的砂土在不同围压范围内也可能表现出不同类型的不排水应力关系^[10]。由此可见，砂土不排水特性对初始状态的依赖性是其极其复杂的，且现有对砂土不排水特性的初始状态依赖的研究并未形成统一或系统性的结论。

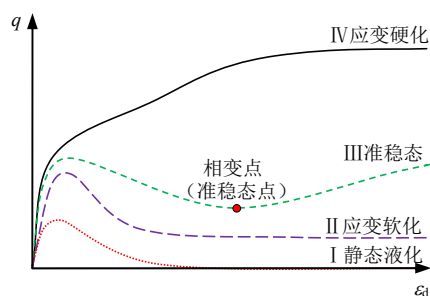


图1 不排水条件下砂土应力-应变关系类型
Fig.1 Stress-strain relations of sand under undrained shearing

为深入研究砂土不排水特性对初始状态的依赖性，Ishihara^[9]在系统总结前人研究的基础上，设计了一系列不排水剪切试验，提出了 3 条与不排水剪切特性有关的初始状态特征线，如图 2 所示，分别为最松压缩线(loosest consolidation line, 简称 LCL)、静态液化分界线(static liquefaction dividing line, 简称 LDL)以及准稳态分界线(quasi steady-state dividing line, 简称 QDL)，此 3 条特征状态线的定义和内涵分别为：①LCL 是砂土初始孔隙比最大时的压缩线，其确定了砂土初始状态的上限，在 $e-\ln p$ (e 为孔隙比， p 为围压) 平面内的形式如图 2 中绿色虚线所示，其中， e_{L1} 为 LCL 在初始围压 $p = 1 \text{ kPa}$ 时的孔隙比；②LDL 为静态液化分界线，当初位于该状态线之上，砂土不排水剪切均发生静态液化，

反之，则均不静态液化，其被猜想为 $p = 0 \text{ kPa}$ 时与土体达到临界状态时所对应的临界状态点的轨迹，即临界状态线(critical state line, 简称 CSL)相交的水平状态线，见图 2 中黑色虚线，其中， e_{c1} 为 CSL 在 $p = 1 \text{ kPa}$ 时的孔隙比，近似等于 CSL 在 $p = 0 \text{ kPa}$ 时的孔隙比 e_{c0} ；③QDL 为不排水剪切是否出现峰值后软化现象的分界线，当砂土初始状态位于该分界线以上时，不排水剪切过程中必定会出现剪应力降低现象，即存在明显的峰值剪应力，位于该分界线之下时则仅有剪胀硬化，该线在 $p = 0 \text{ kPa}$ 时也与 CSL 相交，低围压时位于 CSL 之下，随围压的增加逐渐越至 CSL 之上，具体见图 2 中蓝色实线。

不难发现，由上述 3 条特征状态线可以确定初始状态的 3 个分区，即静态液化区、非稳态区以及剪胀硬化区。砂土在不排水剪切，初始状态位于静态液化区时，最终将发生静态液化，位于非稳态区时将表现出应变软化或者准稳态现象，位于剪胀硬化区则表现为剪切硬化。

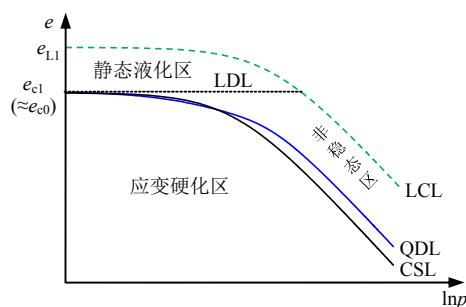


图2 $e-\ln p$ 平面内已有特征状态线及分区图
Fig.2 Characteristic state lines and subarea of initial state of sand in the $e-\ln p$ plane

上述特征状态线使得人们可根据砂土的初始状态大致判断不排水剪切的应力-应变关系类型，一定程度上解释和定性描述了砂土不排水特性的初始状态依赖性，但也存在较大的不足，主要为：①针对 LDL 位置及形式仅停留在假定的层面；②采用试验的方法确定 QDL 不够实际；③已有特征状态线无法划分砂土不排水试验中普遍存在的应变软化和准稳态现象初始状态的边界等问题。另外，上述关于砂土不排水特性的初始状态依赖性的研究多关注于试验现象及对试验规律的总结，缺乏更进一步的细致探讨和应用，这也是现有关于砂土不排水特性初始状态依赖性研究中的共性问题。

针对砂土不排水特性对初始状态的依赖性，Wang 等^[16]也开展了相应的研究，提出了基于初始状对砂土进行分区的概念，本文则侧重于通过在 $e-\ln p$ 平

面内引入 NCL, 结合剪胀和屈服理论, 弥补上述已有特征状态线的不足, 然后将初始状态根据不排水特性进行分区, 并更进一步地深入讨论分区的应用, 以期促进人们对砂土不排水特性的理解。

2 砂土 NCL 及已有特征状态线完善

2.1 砂土的 NCL 及其与不排水特性的关系

砂土根据初始制样密度的不同, 存在无数条不具有前期固结压力的等向压缩线。Yao 等^[17]认为其中应存在一条特殊的参考压缩线, 即剪切不发生塑性体胀的最密固结线, 并将之定义为砂土的 NCL。Wang^[16]、Yao^[17-18]等曾就 NCL 的存在性进行了详细论证, 并在理论上分析得到了 NCL 的位置, 即在 $p = 0$ kPa 时与 CSL 相交。当 $p > 0$ kPa 时, NCL 一直位于 CSL 之上, 在 $e-\ln p$ 平面内, 二者形式及相对关系位置关系如图 3 所示, 同时, 也给出了 NCL 的具体确定方法。理论上而言, NCL 也应是一条与不排水特性密切相关的特征状态线。

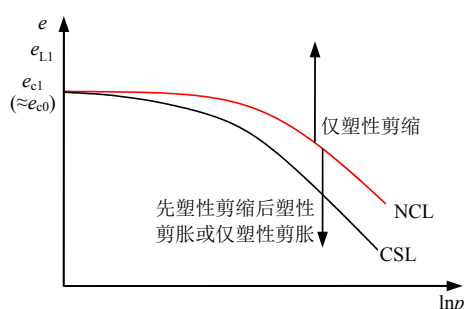


图 3 砂土 NCL 及其与 CSL 位置关系
Fig.3 NCL of sand and its relation to CSL

砂土不排水剪切过程中, 其应力路径和应力-应变关系由屈服特性和剪胀特性共同决定。当砂土初始状态位于 NCL 以上时, 根据 NCL 的物理意义, 剪切仅产生塑性体缩, 基于不排水剪切的体积相容条件可以推知^[19-21], 不排水剪切将持续产生正的孔隙水压力, 有效应力单调减小, 应力路径在 $p-q$ 平面将不发生转折, 则不排水应力路径将与屈服面保持相似, 由于砂土的屈服面表现出水滴型或帽子型^[22-26], 因此, 应力-应变关系将表现出明显的峰后软化现象, 即为图 1 中的 I 型或 II 型应力-应变关系。当初始状态位于 NCL 以下, 剪切过程中必然出现塑性剪胀, 伴随塑性剪胀, 不排水剪切将产生负的孔隙水压力, 有效应力增加, 应力路径发生转折, 后续将发生持续的硬化直至边界状态。根据转折点与屈服面最高点的位置关系, 不难推断, 砂土将表现出图 1 中的 III 型或 IV 型应力-应变关系。

基于以上分析可知, NCL 实际是划分了砂土在不排水剪切中, 出现峰后软化现象之后是否会再次硬化的初始状态边界, 可与已有特征状态线一起, 对砂土初始状态边界进行细致的划分, 以克服现有特征状态线在划分砂土初始状态边界所存在的问题。

2.2 LDL 的论证

LDL 是 Ishihara^[9]根据丰浦砂的试验结果所猜想的特征状态线, 数学上可表示为 $e = e_{c0}$, 这一特征状态线是否确定存在, Ishihara^[9]并未给予论证, 致使其应用受到了一定的限制, 在引入 NCL 之后, 这一问题也随之迎刃而解。

图 4 显示 NCL、CSL 以及假定的 LDL 在 $e-p$ 空间的位置关系, 三者在 $p = 0$ kPa 时相交, $p > 0$ kPa 时, NCL 及 CSL 位于 LDL 之下。砂土不排水静力剪切时, 存在两种边界状态, 分别为静态液化和临界状态 (稳定状态)。对于任意初始孔隙比 e 的砂土, 无论初始围压为多少, 若 $e > e_{c0}$, 如图 4 所示初始状态点为 A_0 的砂土, 由于其也必然位于 NCL 以上, 则不排水应力路径将仅单向向右移动, 直至边界状态, 而在该条件下, 仅有 $p = 0$ kPa 的唯一边界状态 L_0 , 因此, 砂土将最终达至该状态, 即静态液化; 若 $e < e_{c0}$, 如初始状态点为 A_1 、 A_2 、 A_3 的砂土, 无论剪切过程中是否发生塑性剪胀, 应力路径在 $e-p$ 平面内是否发生转折, 根据临界状态理论, 不排水剪切将首先到达图 4 中的临界状态点 C_1 、 C_2 、 C_3 , 静力加载中该状态已是稳定状态, 无法发生静态液化。因此, 假定的 LDL 也为理论上的静态液化分界线。

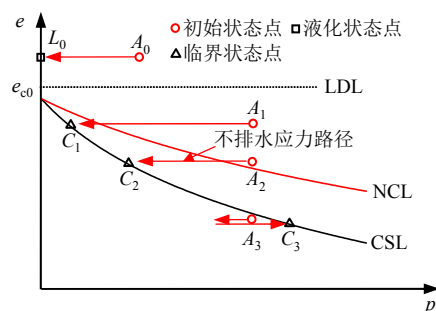


图 4 $e-p$ 平面内不同初始状态砂土不排水应力路径
Fig.4 Stress paths of sand with different initial states under undrained shearing in the $e-p$ plane

2.3 QDL 的确定

确定 QDL 最直接的方法是通过试验得到不同初始围压时, 砂土不排水剪切时恰好不出现峰后软化现象的分界孔隙比, 继而将这些分界点采用平滑的曲线连接而得到。采用上述方法确定 QDL, 不仅

需制备多个初始孔隙比不同的试样,以尽可能较为准确地得到特定围压条件下恰好不发生峰后软化现象的初始状态分界点,而且针对不同围压,需通过试验得到足够多的分界点,以使得到的 QDL 不出现较大的误差。这种仅通过试验方法确定的 QDL 需要巨大的试验量,在实际操作中存在一定的局限性,因此,一个简单易行的确定 QDL 的方法更具实用意义。

图 5 中红色方块和蓝色三角形分别显示了湿陷法制样的丰浦砂最松固结状态点和准稳态分界点,不难发现,若将最松状态点和准稳态分界点分别采用平滑的曲线连接,所得到的 LCL 和 QDL 在 $e-\ln p$ 平面内具有相同的线性形式。考虑到已有研究可实现对 LCL 较为精准的数学描述,在此,可尝试用 LCL 的描述公式对 QDL 进行描述,继而实现对 QDL 的简易确定。

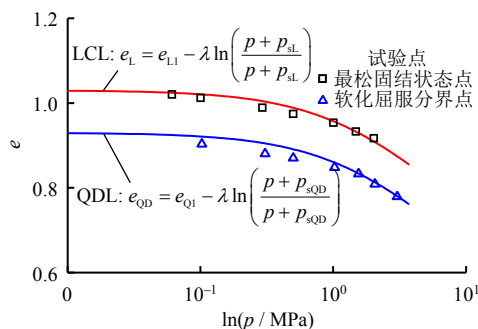


图 5 LCL 和 QDL 的形式及数学描述

Fig.5 Shapes of LCL and QDL in the $e-\ln p$ plane and their mathematical expressions

Yao 等^[17]提出的砂土等向压缩线的描述公式:

$$e = e_{z1} - \lambda \ln \left(\frac{p + p_s}{1 + p_s} \right) \quad (1)$$

式中: e_{z1} 为等向压缩线在 $p = 1$ kPa 时的孔隙比,其余各参数的意义及确定方法可参考文献[17]。图 5 中红色实线和蓝色实线分别为式(1)所描述的 LCL 和 QDL,公式中各参数取值见表 1,其中 e_{L1} 和 e_{Q1} 分别为 LCL 和 QDL 在 $p = 1$ kPa 时的孔隙比,由于 CSL 和 QDL 在 $p = 0$ kPa 相交, e_{Q1} 在实际取值中可近似取为 CSL 在 $p = 1$ kPa 时的孔隙比 e_{c1} ; p_{sL} 、 p_{sQD} 分别为 LCL 和 QDL 所对应的压硬性参数。可以看出,采用式(1)计算而得的 QDL 与试验结果具有良好的一致性,也说明了式(1)能够对 QDL 进行较好的描述。因此,可首先通过试验得到某一特定孔隙比条件下的软化屈服分界点,然后反算出参数 p_{sQD} ,再通过式(1)进行描述,从而得到 QDL。为确保 QDL 的精确性,可再次通过试验得到另一围压下初始状态分界点,对式(1)的参数值进行校正。

表 1 丰浦砂材料参数

Table 1 Parameters of Toyoura sand

参数	λ	e_{L1}	p_{sL}	e_{Q1}	p_{sQD}
丰浦砂	0.135	1.05	1 400	0.93	1 500

3 不排水特性的初始状态分区

在原有砂土态特征状态线的基础上引入 NCL 之后,可将砂土的初始状态划分为 4 个分区,如图 6 所示,分别为: I 静态液化区、II 应变软化区、III 准稳态区、IV 应变硬化区。图 7 为各分区内的砂土不排水剪切特性,砂土不排水剪切时,各分区内砂土的不排水剪切特性将分别对应于图 7 中的 I 型(静

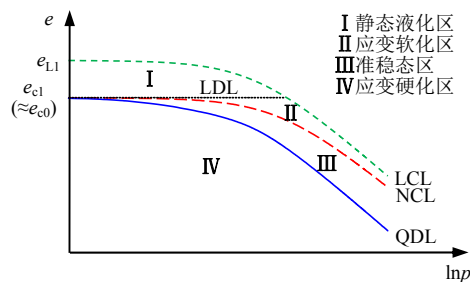
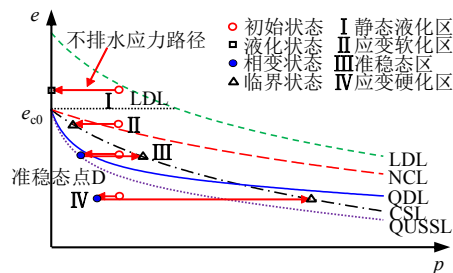
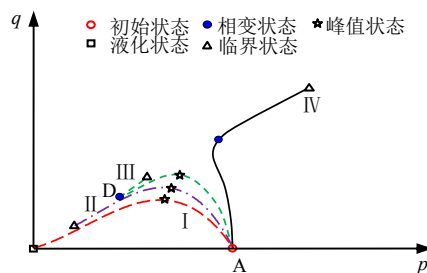


图 6 初始状态分区

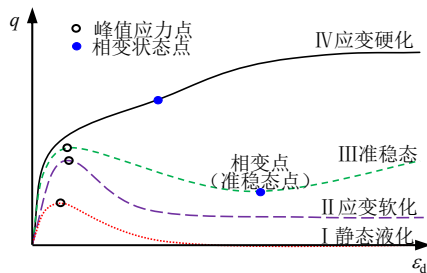
Fig.6 Subareas of sand with different initial states



(a) $e-p$ 平面内应力路径



(b) $p-q$ 平面内应力路径



(c) 应力-应变关系

图 7 各初始状态分区内不排水剪切特性

Fig.7 Undrained behaviors of sand with initial state in different subareas

态液化型)、II 型(应变软化型)、III 型(准稳态型)、IV 型(应变硬化型)应力路径和应力-应变关系。另外,图 7(a)中的 QUSSL(quasi-steady state line, 简称 QUSSL)为准稳态强度线^[9],用以判定初始状态位于 III 区砂土的应力路径转折点和残余强度。

4 不排水特性的验证

为说明以特征状态线为界,根据不排水特性对不同初始状态砂土进行分区的准确性,采用 Ishihara^[9]关于湿陷法制样的丰浦砂不排水试验数据予以验证,图 8 显示了该制样方法下各特征状态线以及点 $D_1 \sim D_{14}$ 所代表的各初始状态的砂土在 $e-p$ 平面内的位置,其中, $D_1 \sim D_3$ 位于分区 I, $D_4 \sim D_7$ 位于分区 II, $D_8 \sim D_{10}$ 分区 III, $D_{11} \sim D_{14}$ 位于分区 IV。

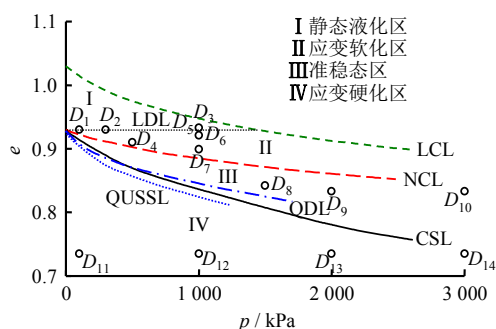


图 8 湿陷法制样丰浦砂初始状态分区
Fig.8 Initial states of Toyoura sand in the $e-p$ plane

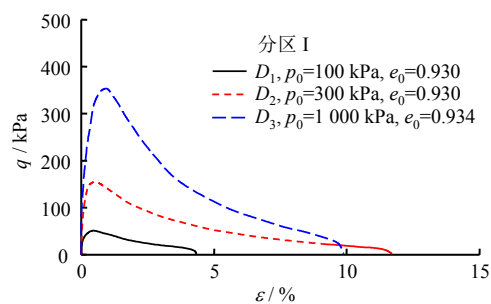
图 9 为不同分区内丰浦砂不排水应力-应变关系^[9],可以看出,在同一分区内,制样方法相同的丰浦砂表现出相同的应力-应变关系类型,且与第 3 节分析一致。图中, p_0 、 e_0 分别为初始围压和初始孔隙比。

5 初始状态分区的应用

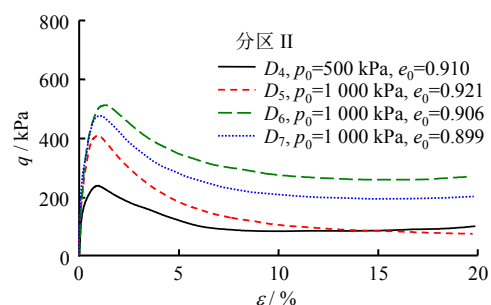
5.1 对于构建状态参数的指导

状态参数构建的出发点是力求无论应力历史如何,在状态参数相同的情况下,砂土剪切表现出相似的力学特性,如相同的相变应力比、峰值应力比等。具有代表性的状态参数 ψ 最早由 Been 等^[1]提出,并由 Li^[27]进一步发展,其被定义为当前状态点与 CSL 的垂直距离。 ψ 在常规围压下具有良好的适用性,并得到了广泛的应用,但在低围压下并不适用性^[27-28],这也为构建统一性的砂土本构模型带来了阻碍,许多学者也曾指出了这一点,但并未对其不适用的原因进行深入分析。基于砂土的不排水特性分区,可在一定程度上对这一问题进行定性的分析。

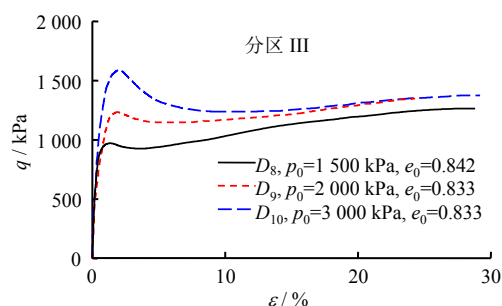
图 10 为相同 ψ 值的不同初始状态砂土所位于的分区,可以看出,一般围压条件下, ψ 值相同时,



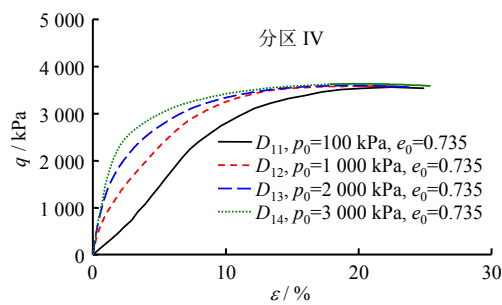
(a) $D_1 \sim D_3$



(b) $D_4 \sim D_7$



(c) $D_8 \sim D_{10}$



(d) $D_{11} \sim D_{14}$

图 9 不同初始固结状态丰浦砂不排水应力-应变关系
Fig.9 Stress-strain relations of Toyoura sand with different initial states

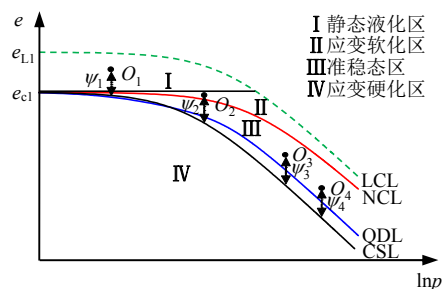


图 10 相同 ψ 值条件下的不同初始围压砂土所处于分区
Fig.10 Locations of sand with the same ψ under different confining pressures

如 ψ_3 、 ψ_4 ，当前状态点 O_3 、 O_4 所处的初始状态分区也相同，均位于 III 区，且 O_3 、 O_4 与其他各特征状态线之间的距离也大致分别相等，因此，具有相同 ψ 值的砂土将表现出相似的不排水剪切特性，而低围压条件下，相同 ψ 值时，当前状态点 O_2 位于 II 区， O_1 位于 I 区，且每一初始状态点与各特征状态线之间的距离也分别不相等，因此，相同 ψ 值的砂土将表现出截然不同的不排水剪切特性。

尽管许多学者试图改进状态参数，但由于缺少 ψ 不适用性原因的深刻认知，其构建状态参数仍遵循以当前状态点与某一特征状态线的水平或垂直距离为思路^[17, 28-29]，导致构建的状态参数具有相同的缺点。而合理的状态参数必须能够恰当地考虑当前状态与各特征状态线或者主要特征状态线的关系，即所构建的状态参数在不同围压条件下，相等状态参数的砂土的当前状态点与各特征线的距离分别对应相等，而非与某一特征状态线距离相等，以使状态参数相同的砂土处于相同的分区。如果采用数学方法，在一个变换的或者归一化的 $e-p$ 空间中，将各特征状态线转化为相互平行的关系，则可以在变换的空间中以一条特征状态线为参考来构建状态参数，以克服现有状态参数的缺点。

5.2 不同影响因素下不排水特性差异性

初始状态相同的砂土，在不同的影响因素下，不排水剪切过程中应力-应变关系不同，其中一个典型的现象是随不均匀系数的增加，砂土排水剪切强度、相变应力比随之降低，也更容易发生静态液化^[30]。图 11 显示了不均匀系数变化后砂土初始状态分区变化情况，可以看出，随不均匀系数的增加，CSL 下移，各特征状态线及分区也随之下移，部分应变硬化区转化为静态液化区，在该区域中，砂土初始状态相同时，不排水剪切由应变硬化变为静态液化，土体表现出“更软”的特性。另外，颗粒破碎、温度等对砂土不排水特性的影响也具有相似的机制^[31-33]。图中， LDL_c 、 NCL_c 、 QDL_c 均为不均匀系数增加后各特征状态线。

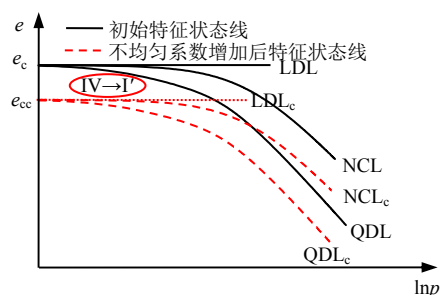


图 11 不均匀系数对初始状态分区的影响
Fig.11 Effect of uniform coefficient on subareas of initial state

5.3 不同围压下初始状态分区及不排水特性

宽应力范围内，砂土的等向压缩线和 CSL 在 $e-\ln p$ 平面内均为 S 型曲线，且各等向压缩线以及 CSL 在高围压条件下趋向于一致^[10, 13, 33]，可以推知，随着围压的增加，剪胀被抑制，QDL 也必然逐渐趋向于 NCL。基于此，可得到图 12 中所示的宽应力范围内的初始状态分区。

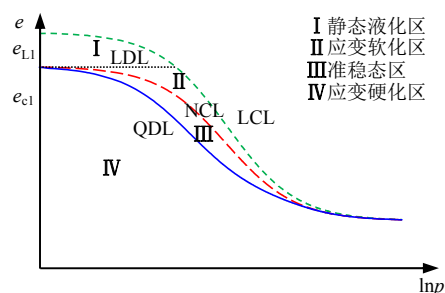


图 12 宽应力范围内砂土不排水特性初始状态分区图
Fig.12 Subareas of sand under a wide range of confining pressures

可以看出，围压较低时，砂土根据初始状态的不同，最多可划分为 I、II、III、IV 4 个区域，随围压的升高，I 区首先消失，当围压升高至一定程度时，III 区也消失。可以推断，围压较低时，砂土不排水剪切最多可表现出图 7 中所示的 4 种类型应力-应变关系，当围压超过一定范围时，将不再出现静态液化现象，当围压足够高时，仅表现为应变硬化和应变软化两种形式的应力-应变关系。上述推论解释了试验中超出一定围压时砂土不排水剪切不再发生静态液化以及高围压条件下仅有应变硬化型和应变软化型应力应变关系的原因^[9, 13]。

5.4 残余强度预测及其在实际工程中的意义

图 6、7 也可用以判断不同初始状态分区砂土的残余强度，若初始状态位于 I 区，则用于稳定性分析的残余强度为 0；若初始状态位于 II 区和 IV 区，则残余强度可通过 CSL 来判定，即与初始孔隙比相同时，CSL 所对应的强度；若初始状态位于 III 区，则可通过 QUSSL 来判定残余强度，即与初始状态相同孔隙比时，QUSSL 所对应的强度。

在实际工程中，针对沉积型砂型场地，其是否会发生静态液化，是场地安全水平评价的首要任务，基于砂土初始状态分区，若涉及到初始状态位于 I 区的砂土，在自重应力或者上覆建筑荷载等静力荷载下，该工程土体将极易发生流化破坏。

另外，需要着重指出的是，在实际工程中，需特别注意初始状态位于 III 区砂土的强度特性。图 13

中点 B_2 、 B_3 、 B_4 表示孔隙比相同, 处于不同分区的砂土, 初始围压分别为 p_{B2} 、 p_{B3} 、 p_{B4} , 且 $p_{B2} > p_{B3} > p_{B4}$ 。不排水剪切条件下, 三者对应的残余强度分别为 q_{r2} 、 q_{r3} 、 q_{r4} , 由于 QUSSL 上应力比小于 CSL 上的应力比, 因此, 三者残余强度之间的关系为 $q_{r2} = q_{r4} > q_{r3}$, 即在 III 区内, 砂土的残余强度为相同初始孔隙比砂土残余强度的最小值。因此, 在 III 区若采用临界状态强度作为强度评价指标以分析工程体的稳定性, 极易引起承载力和安全性的误判, 以致引起实际工程的过大位移, 甚至诱发失稳。上述分析的意义在于, 明确指出了砂土残余强度易误判的初始状态区域, 在实际工程中, 对于涉及到该区域的砂土工程体易引起承载能力的误判, 应注意加强防护。

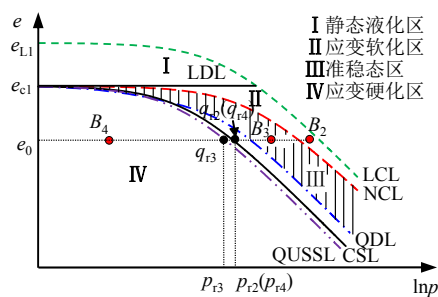


图 13 不同区域内砂土残余强度特性分析
Fig.13 Residual strengths of sand with initial state in different subareas

6 结 论

本文在引入 NCL 的基础上, 完善了 e - $\ln p$ 平面内已有特征状态线的理论基础及确定方法, 继而, 将砂土的初始状态根据不排水特性进行了分区, 并讨论了其应用。

(1) 基于砂土屈服特性以及不排水剪切的体积相容条件, 结合 NCL 的物理意义及其与 LDL 的位置关系, 对 LDL 存在性进行了论证; 通过采用试验和数学描述相结合的方法, 给出了 QDL 的简单易行的确定方法。

(2) 根据不排水剪切特性, 将砂土的初始状态以特征状态线为界进行了分区, 分别为: I 静态液化区、II 应变软化区、III 准稳态区、IV 应变硬化区, 砂土在同一初始转态分区表现出相同类型的不排水应力-应变关系以及相似的应力路径, 并通过已有试验数据验证了分区的合理性。

(3) 分析了砂土初始状态分区的理论应用: 指出了现有状态参数的缺点并为合理的状态参数构建提供了一个新的思路, 给出了不同影响因素下砂土

不排水特性差异的可能原因, 推断并解释了试验中砂土不排水应力-应变关系类型随围压的变化规律及原因。

(4) 阐述了初始状态分区的工程应用: 可在一定程度用于判断沉积砂性场地的静态液化与否; 指出了砂土残余强度易误判的初始状态区域, 即 III 区, 相比于区域 II 和 IV, 初始孔隙比相同条件下, 该区域所对应的砂土残余强度最小, 在实际工程中, 涉及到该区域的工程体易引起承载能力及安全系数的误判, 应注意加强防护。

参 考 文 献

- [1] BEEN K, JEFFERIES M G. A state parameter for sands[J]. *Geotechnique*, 1985, 35(2): 99-112.
- [2] YAO Y P, SUN D A, MATSUOKA H. A unified constitutive model for both clay and sand with hardening parameter independent on stress path[J]. *Computers and Geotechnics*, 2008, 35(2): 210-222.
- [3] VERDUGO R, ISHIHARA K. The steady state of sandy soils[J]. *Soils and Foundations*, 1996, 36(2): 81-91.
- [4] SLADEN J A, D'HOLLANDER R D, KRAHN J. Back analysis of the Nerlerkberm liquefaction slides[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1985, 22(4): 579-588.
- [5] YOSHIMINE M, ISHIHARA K. Flow potential of sand during liquefaction[J]. *Soils and Foundations*, 1998, 38(3): 189-198.
- [6] 栾茂田, 年廷凯. 1976 年香港秀茂坪人工填土边坡滑坡灾害评析[J]. *防灾减灾工程学报*, 2003, (1): 114-117.
- [7] LUAN Mao-tian, NIAN Ting-kai. A case review of landslide of fill slopes at Sau Mau Ping of Hong Kong in 1976[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2003, (1): 114-117.
- [8] FOURIE A B, PAPAGEORGIOU G. Defining an appropriate steady state line for Merriespruit gold tailings[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2001, 38(4): 695-706.
- [9] LUO Y, CHEN L, XU M, et al. Review of dam-break research of earth-rock dam combining with dam safety management[J]. *Procedia Engineering*, 2012, 28(12): 382-388.
- [10] ISHIHARA K. Liquefaction and flow failure during earthquakes[J]. *Géotechnique*, 1993, 43(3): 351-451.
- [11] LADE P V, BOOP P A. Relative density effects on drained sand behavior at high pressures[J]. *Soil and Foundations*, 2005, 45(1): 15-26.
- [12] CASTRO G. Liquefaction and cyclic mobility of saturated sands[J]. *Journal of Geotechnical and*

- Geoenvironmental Engineering**, 1975, 101(6): 551-569.
- [12] POULES S J. The steady state of deformation[J]. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, 1981, 107(5): 553-562.
- [13] LADE P V, YAMAMURO J A. Undrained sand behavior in axisymmetric tests at high pressures[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1996, 122(2): 120-129.
- [14] YAMAMURO J A, LADE P V. Instability of granular materials at high pressures[J]. **Journal of the Japanese Geotechnical Society**, 1997, 37(1): 41-52.
- [15] YAMAMURO J A, LADE P V. Steady-state concepts and static liquefaction of silty sands[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 1998, 124(9): 868-877.
- [16] WANG N B, YAO Y P, CUI W J, et al. Characteristic zones for initial state of sand under undrained shearing[J]. **Transportation Geotechnics**, 2022, 32.
- [17] YAO Y P, LIU L, LUO T. A constitutive model for granular soils[J]. **Science China Technological Sciences**, 2018, 61(10): 1546-1555.
- [18] 姚仰平, 陈凯. 砂土的密度相关状态参量的划分及分析[J]. **土木工程学报**, 2023, 56(9): 116-124.
YAO Yang-ping, CHEN Kai. Classification and analysis of density-dependent state parameters for sand[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2023, 56(9): 116-124.
- [19] 邵生俊, 谢定义. 饱和砂土的物态变化特性[J]. **岩土工程学报**, 2001, 23(1): 58-60.
SHAO Sheng-jun, XIE Ding-yi. Physical state change of saturated sand[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2001, 23(1): 58-60.
- [20] 谢定义, 张建民. 周期荷载下饱和砂土瞬态孔隙水压力的变化机制和计算模型[J]. **土木工程学报**, 1990, 23(2): 51-60.
XIE Ding-yi, ZHANG Jian-min. Transient change mechanism of pore water pressure in saturated sand under cyclic loading[J]. **China Civil Engineering Journal**, 1990, 23(2): 51-60.
- [21] 王刚. 砂土液化后大变形的物理机制与本构模型研究[D]. 北京: 清华大学, 2005.
WANG Gang. Research on physical fundamentals and constitutive model of large post-liquefaction deformation of sand [D]. Beijing: Tsinghua University, 2005.
- [22] JEFFERIES M G. Nor-Sand: a simple critical state model for sand[J]. **Géotechnique**, 1993, 43(1): 91-103.
- [23] SANDLER I S. Review of the development of cap models for geomaterials[J]. **Shock and Vibration**, 2005, 12(1): 67-71.
- [24] OHKAWA H, KUWANO J, NAKADA T, et al. Yielding characteristic and non-coaxiality of Toyoura sand on p' -constant shear stress plane[J]. **Soils and Foundations**, 2011, 51(1): 179-190.
- [25] ALONSO E E, ROMERO E E, ORTEGA E. Yielding of rockfill in relative humidity-controlled triaxial experiments[J]. **Acta Geotechnica**, 2016, 11(3): 455-477.
- [26] HORSTEMEYER M F, STONE T W, HAMMI Y P B. Smooth yield surface constitutive modeling for granular materials[J]. **Journal of Engineering Materials and Technology**, 2017, 139(1).
- [27] LI X S. A sand model with state-dependent dilatancy[J]. **Geotechnique**, 2002, 52(3): 173-186.
- [28] WANG Z L, DAFALIAS Y F, LI X S, et al. State pressure index for modeling sand behavior[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2002, 128(6): 511-519.
- [29] WAN R G, GUO P J. A simple constitutive model for granular soils: modified stress-dilatancy approach[J]. **Computers and Geotechnics**, 1998, 22(2): 109-133.
- [30] 刘映晶. 颗粒材料的级配相关临界状态力学特性模拟[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
LIU Ying-jing. Modeling the influence of the particle size distribution on the critical state mechanical behavior of granular material[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014.
- [31] 郅彬, 王小婵, 刘恩龙. 颗粒形状对粒状材料破碎演化规律及强度准则影响[J]. **岩土力学**, 2023, 44(3): 649-662, 833.
ZHI Bin, WANG Xiao-chan, LIU En-long. Influence of particle shape on the particle crushing law and strength criterion for granular materials[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2023, 44(3): 649-662, 833.
- [32] 刘红. 热力耦合作用下饱和砂土应力变形特性试验与数值模拟研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
LIU Hong. Experimental and numerical evaluations of stress-strain behavior of saturated sand under thermo-mechanical coupling process[D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.
- [33] 刘抗, 陈国兴, 吴琪等. 循环加载方向对饱和珊瑚砂液化特性的影响[J]. **岩土力学**, 2021, 42(7): 1951-1960.
LIU Kang, CHEN Guo-xing, WU Qi, et al. Effects of cyclic loading directions on liquefaction characteristics of saturated coral sand[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2021, 42(7): 1951-1960.