

南京砂的稳态特征研究

朱建群¹, 孔令伟², 高文华¹, 潘江鹏¹

(1. 湖南科技大学土木工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘 要: 以南京砂的固结不排水试验为基础, 对其稳态特征进行了研究。结果表明: 在低围压下稳态线的曲线表达更符合实际情况, 松散南京砂在低围压下广义剪应力终值接近于 0 而表现出不稳定; 稳态是土体固有属性, 稳态内摩擦角不仅可以通过稳定状态下 $p'_{ss} - q'_s$ 的关系得到, 也可通过同一围压下不同密实度南京砂的有效应力路径末端拟合得到, 本研究得到南京砂稳态内摩擦角为 35.2° ; 峰值强度高估了流滑中土体的强度, 土体实际发挥的是残余强度, 研究中建立了南京砂峰值强度和残余强度的关系; 脆性指数能较好地反映南京砂应变软化程度和流滑的可能性; 孔隙比的微小变化可导致南京砂软化程度的较大变化。

关键词: 南京砂; 稳态; 应变软化; 强度; 固结不排水剪试验

中图分类号: TU441 文献标识码: A 文章编号: 1000 - 4548(2012)05 - 0931 - 05

作者简介: 朱建群(1975 -), 女, 江西上饶人, 博士, 副教授, 主要从事特殊土力学性质的研究与教学工作。E-mail: zhu-jq@163.com。

Steady-state properties of Nanjing sand

ZHU Jian-qun¹, KONG Ling-wei², GAO Wen-hua¹, PAN Jiang-peng¹

(1. School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 2. State Key Laboratory of Geo-mechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: The CU tests on the reconstituted samples of Nanjing sand are performed and the experimental results are analyzed based on the steady-state theory. The steady-state line under low confining pressure is a curve, which is suitable for the behaviors of loose Nanjing sand in tests. The ultimate deviatoric stress of loose Nanjing sand under lower confining pressure is close to 0 and the behaviors in tests are unsteady. The steady state is the inherent attribute of soils. The steady-state angle of internal friction, 35.2° for Nanjing sand, is obtained not only by a fitting curve of $p'_{ss} - q'_s$, but also by the linear extremity of effective stress paths under different relative densities. The peak strength of sand is overvalued during the flow slide, and there is the residual strength. The relation between the peak strength and the residual strength is obtained. The strength reduction in the strain softening and flow slide of Nanjing sand is expressed in terms of a brittleness index. A smaller change can lead to the larger change of the strain softening of Nanjing sand to great extent.

Key words: Nanjing sand; steady state; strain softening; strength; CU test

0 引 言

近年来, 砂土的流滑 (flow slide) 失稳引起了人们的广泛关注, 对此问题较为一致的认识是土体应变软化导致了后续的渐进性破坏。但在传统的极限平衡稳定性分析中未考虑到这个渐进过程, 常常出现因采用峰值强度致使稳定性分析存在很大的风险性^[1]。因此, 越来越多的学者开始关注已液化区域中土体的特性, 尤其是土体残余强度。稳态强度法是确定土体残余强度的方法之一, 也是基于稳态的流滑分析过程的重要概念之一。

Casagrande^[2]、Castro^[3]及 Poulos^[4]曾相继提出了“流动结构”, “稳态变形”, “稳态抗剪强度”及“稳态线”等概念, 其已成为现有流滑相关问题分析的基础。所谓“稳态”即“流动结构”状态, 是指土的颗粒结构在受荷过程中发生突然破坏, 抗剪强度大幅降落, 出现流动性大变形, 然后进入较低抗剪强度水平的稳定状态。该状态下的剪应力称为“稳态抗剪强度”

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50874043); 湖南省自然科学基金项目 (10JJ3006); 湖南省科技厅计划项目 (2009TP4039-2)
收稿日期: 2011 - 07 - 04

或“稳态强度”(steady state shear strength),它反映了土体在该状态下抗剪切的能力。稳态线在 $e-p'$ (或 $e-\lg p'$)空间内将砂土分为潜在流动液化区和无流动液化区。鉴于稳态线在判别砂土能否发生流动液化时具有重要作用,国外许多学者对其进行了深入研究^[5-7]。基于稳态理论的液化估计方法认为初始液化并不意味着实际液化,它可产生循环液化而不产生实际液化;当假设砂土液化一旦被触发,问题转变为液化后能否产生滑移或过量变形破坏,其中能否产生滑移则需对采用残余强度进行分析。

南京砂是一种广泛分布于中国长江中下游的粉细砂,其矿物成分以云母和其他深色矿物的风化碎片为主,颜色深暗且呈片状,在外观上与黄白色的石英粒状砂有明显差异。已有研究表明,片状颗粒的南京砂与圆颗粒石英砂在组成和级配等方面都存在差别,各向异性明显,基于石英砂得到的砂土地基失稳破坏标准对南京砂进行判别时,有可能过高估计了其强度^[8]。本文将基于稳态的相关概念,通过南京砂的不排水剪试验,对其稳态强度,稳态线,残余强度与峰值强度关系等特征进行深入研究。

1 试样及试验方案

试验所用土样取自南京河西地区的片状粉细砂,其物理性质指标及颗粒级配曲线分别见表1和图1。不均匀系数 $C_u=1.78$,土样级配为不良,属均粒土。

表1 南京砂土样物理性质指标

Table 1 Physical properties of Nanjing sand samples

平均粒径	有效粒径	不均匀系数	比重	细粒含	干密度/(g cm ⁻³)	
D_{50}/mm	D_{10}/mm	数 C_u	G_s	量/ %	最大	最小
0.171	0.097	1.78	2.73	5.8	1.16	0.67

注:细粒是指粒径小于0.075 mm的颗粒成分。

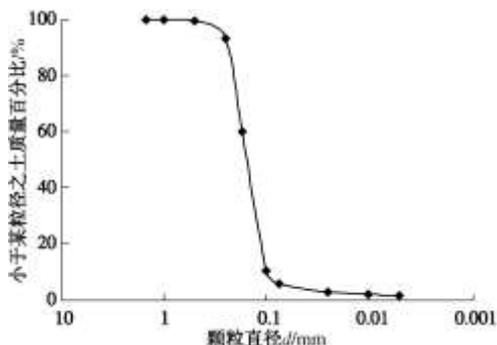


图1 南京砂颗粒级配曲线

Fig. 1 Grain size distribution curve of Nanjing sand

本试验是基于SJ-1A.G型三轴剪切仪上的固结不排水剪试验。试验中重塑砂样均采用湿击法制得;试样直径 $D=3.91$ cm,高 $h=8$ cm,分5层击实;相对

密实度分别为15%,20%,38%和48%,所施加的围压有50,100和200 kPa。试验步骤如下:按照水利部《土工试验规程》(SL237—1999),在试样装入压力室后加20 kPa围压,再向试样中通CO₂约25 min,而后用无气水水头饱和法使试样饱和,饱和控制完成后孔压系数 B 均达到了98%以上;试样饱和后打开排水阀,使试样在所要求的围压下排水固结。考虑到发生流滑现象的土坡、土坝在受荷初始阶段其变形速率很小,加载时采用同一剪切速率0.073 mm/min,以使南京砂强度不会因人为试验操作而偏高。

稳态变形阶段土体颗粒的初始结构在剪应力作用下破坏,并形成新的定向排列。较多学者认为准稳态大多发生在应变为8%~15%,而稳态变形发生在轴向应变为15%以上,且因不同制样方法具有不同初始结构对试样的稳态线及稳态强度影响甚微。因此,本试验过程中逐步增加轴向压力,直至轴向变形达到20%左右。

2 稳态与准稳态

饱和砂土有3种典型的不排水剪切特征:软化、软化-硬化和硬化特征,而软化和软化-硬化的土样在试验过程中均表现出一定的剪缩性状。在实际情况中,正是具有剪缩性状的土体才有可能发生流滑。Casagrande相应地提出了“液化”和“有限液化”,即为稳态和准稳态。Ishihara在文献[9]中给出了判别流滑失稳时应采用的标准强度的确定方法:当准稳态出现时,可采用准稳态强度作为标准强度,使分析结果偏于安全;在仅出现稳态时采用稳态强度作为标准强度。基于以上观点,本研究据此对相关特征值进行取值。

3 稳态线与稳态内摩擦角

稳态时平均主应力 $p'_{ss}(((\sigma'_1+2\sigma'_3)/3)_{ss})$ 与其达到稳态时的孔隙比 e_c 之间建立的关系曲线,即为稳态线(SSL)。

e_c 为各试样固结后的孔隙比,可通过制样时孔隙比 e_i 与固结过程中试样体积变化得到,即有

$$e_c = e_i - \frac{\Delta V}{V_0}(1 + e_i) \quad (1)$$

式中, ΔV 为固结过程中试样的排水体积, V_0 为试样初始体积。

将各数据表示在半对数坐标中,见图2,对趋势线采用线性拟和,其拟合方程列于图中。Verdugo^[10]利用算术坐标下对稳态线进行研究后认为:高应力下稳态线是线性的,但在低应力下是曲线形状。笔者对

比稳态线的各种表达式后, 也认为低围压下稳态线的曲线表达和线性拟合更符合试验结果^[11]。

从图 2 中可看出在较低围压下砂土落于稳态线之上, 即该情况下土体发生流滑破坏的可能性极大。结合试验中土体所表现出的性状, 可分析出: 松散砂土在低围压下表现典型的应变软化特征, 易发生流滑现象, 而在较高围压下表现出应变软化 - 硬化特征, 稳定性反而有所增强。这与 Yamamuro 等^[12]的研究成果是相一致的。

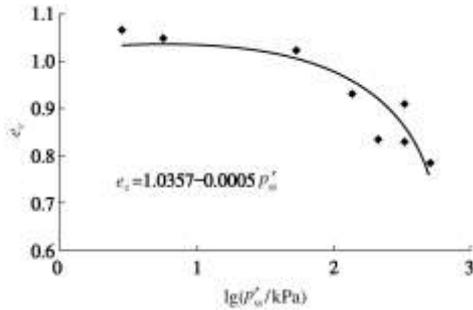


图 2 南京砂的稳态线

Fig. 2 Steady-state line of Nanjing sand

当土体发生稳态变形时, 颗粒呈现出不可逆的体积压缩, 孔隙水压力增大和有效应力减小, 导致“无限度”的流动变形。此时稳态内摩擦角是砂土发生流滑变形最终可动用的有效内摩擦角, 这也是稳态内摩擦角的物理含义。根据的 Mohr-Coulomb 准则, 砂样稳态时的内摩擦角可通过下式反算得到

$$M = \left(\frac{q'}{p'} \right)_{ss} = \frac{6 \sin \phi'_s}{3 - \sin \phi'_s} \quad (2)$$

式中, q' , p' 分别为稳态下土体的广义剪应力和平均主应力, ϕ'_s 即为稳态内摩擦角。

由图 3 可得, 南京砂在稳态时 $M = 1.4268$, 其稳态内摩擦角为 $\phi'_s = 35.2^\circ$ 。

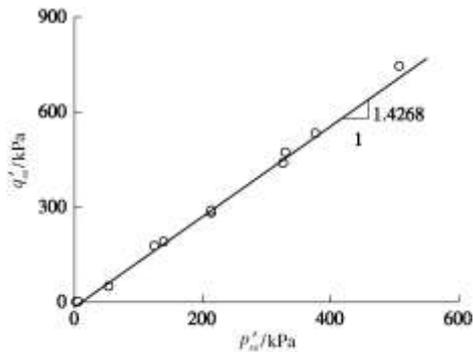


图 3 南京砂稳态时 q'_{ss} 与 p'_{ss} 间的关系

Fig. 3 Relation between deviatoric stress and effective confining stress for Nanjing sand in steady state

稳态是土体的固有属性, 当不同初始条件的土体

达到稳态变形时, 在 $e - p' - q'$ 空间内都始终将处于同一条曲线 (即稳态线上)^[6]。因此, 在不同密度度下的砂土在相同围压下也可得到稳态内摩擦角。如图 4, 根据不同密实度的南京砂在 $p'_0 = 200 \text{ kPa}$ 下的应力路径曲线, 可得: $M = 1.4268$ 。进而, 可根据式 (2) 求得稳态内摩擦角。这也再次证明了稳态是土体的固有属性。

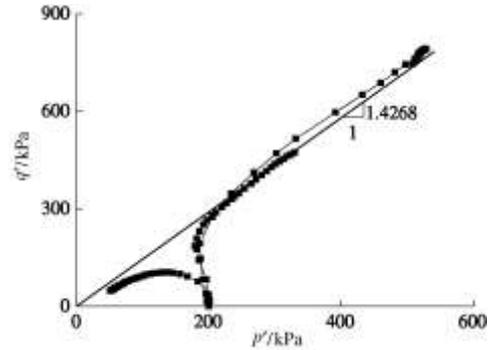


图 4 不同密实度南京砂的有效应力路径

Fig. 4 Effective stress paths of Nanjing sand with different compactnesses

4 峰值强度与残余强度的关系

以往研究表明, 南京砂的峰值强度在相同初始孔隙比条件下是随着初始围压的增大而提高的, 而稳态是砂土的固有属性。因此, 通过建立峰值强度与残余强度间的关系, 将成为提高边坡、堤坝等构筑物传统极限平衡分析法安全度的一个新思路。

土体残余强度由 Castro 等^[9]的研究成果通过下式得到, 即

$$S_{us} = \frac{q'_s}{2} \cos \phi'_s = \frac{M}{2} \cos \phi'_s (p'_s) \quad (3)$$

式中, S_{us} 为土体残余强度, q'_s , p'_s 为应力路径过程中最小广义剪应力 ($\sigma'_1 - \sigma'_3$) 及其所对应的平均主应力 ($(\sigma'_1 + 2\sigma'_3)/3$)。在软化 - 硬化曲线中, 土体表现出准稳态, 即为准稳态下的广义剪应力和平均主应力; 在软化曲线中, 土体表现出稳态, 即为稳态下的广义剪应力和平均主应力。

欲建立峰值强度与残余强度间的关系, 可采用将应力路径曲线同时除以应力路径中的最小平均主应力 p'_s 的修正方法^[13], 即将 $p' - q'$ 空间内的应力变化转化至 $p'/p'_s - q'/p'_s$ 空间内, 如图 5。在此空间内各曲线的峰值均较好地落在同一直线, Sladen 等将该直线定义为坍塌线 (collapse line), 且不同孔隙比的坍塌线在 $e - p' - q'$ 空间内构成坍塌面 (collapse surface)。Sladen、Ishihara 对不同的砂进行研究后认为呈剪缩性的砂土的坍塌线斜率 M_L 在修正的应力空间内是唯一

确定的，且与孔隙比和初始围压无关。

根据图 5，拟合曲线的起点为 $(1, q'_s/p'_s)$ ，因此将坍塌线可表示为

$$\frac{q'_p}{p'_s} - \frac{q'_s}{p'_s} = M_L \left(\frac{p'_p}{p'_s} - 1 \right) \quad (4)$$

其中， M_L 为坍塌线的斜率，如图 5，对于松散南京砂有 $M_L = 0.66$ 。 q'_p 、 p'_p 为广义剪应力峰值及其所对应的平均主应力。

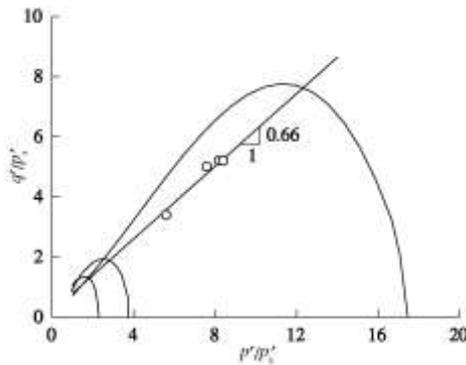


图 5 修正的南京砂有效应力路径

Fig. 5 Normalized curve of effective stress paths

将式 (4) 乘以系数 $1/p'_c$ (p'_c 为初始固结压力)，同时将 $q'_s = Mp'_s$ 代入，则有

$$\frac{q'_p}{p'_c} = M_L \frac{p'_p}{p'_c} + (M - M_L) \frac{p'_s}{p'_c} \quad (5)$$

下面来考察式 (5) 中 p'_p/p'_c 的情况，见图 6。由图 6 可知，对呈剪缩性的南京砂试样而言，其峰值有效主应力与初始固结围压具有很好的线性关系，通过线性拟合即有

$$p'_p/p'_c = 0.72 \quad (6)$$

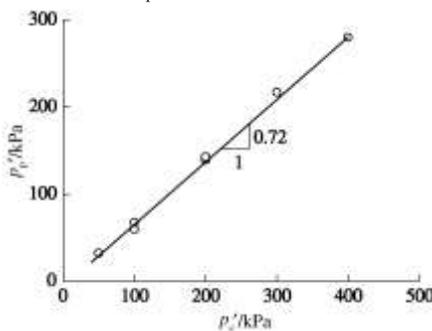


图 6 试样的 p'_c 与 p'_p 关系

Fig. 6 Relation between p'_c and p'_p of samples

考虑不同的初始围压，则式 (3) 变换为式

$$\frac{S_{us}}{p'_c} = \frac{M}{2} \cos \varphi_s \left(\frac{p'_s}{p'_c} \right) \quad (7)$$

变换后有

$$\frac{p'_s}{p'_c} = \frac{2S_{us}}{p'_c} \cdot \frac{1}{M \cos \varphi_s} \quad (8)$$

将式 (8) 带入式 (5) 中，即为

$$\frac{q'_p}{p'_c} = M_L \frac{p'_p}{p'_c} + (M - M_L) \cdot \frac{2S_{us}}{p'_c} \cdot \frac{1}{M \cos \varphi_s} \quad (9)$$

同时定义峰值强度为 S_p ，且有

$$S_p = q'_p/2 \quad (10)$$

将南京砂相关参数 M_L 、 p'_p/p'_c 、 M 及 $\varphi_s = 35.2^\circ$ 代入式 (9) 中，可得到南京砂峰值强度与残余强度间的关系：

$$\frac{S_p}{p'_c} = 0.24 + 0.33 \frac{S_{us}}{p'_c} \quad (11)$$

5 应变软化

松散南京砂在试验中因剪缩而表现出不同程度的应变软化，尤为突出的是在 50 kPa 和 100 kPa 围压的不排水强度接近于 0，而随着围压增加，试样由软化性状过渡到软化-硬化性状。Bishop 用脆性指标 I_B 来反映土体应变软化，进而反映流滑的可能性。脆性指标 I_B 的定义为

$$I_B = \frac{q'_p - q'_r}{q'_p} \quad (12)$$

式中， q'_r 为不排水剪的广义剪应力终值。

由脆性指标的定义可见，对于应变软化型的土体其值的变化范围为 0~1。该参数越高，则意味着剪切过程中应力强度的变化越大，由此引发土体流滑而导致大变形的几率就越大。

将南京砂试样脆性指标与围压的关系绘于图 7，由图 7 可见，南京砂随着围压的增大，脆性指标在减小，土体发生完全应变软化的可能性在减小，即南京砂在低围压下表现不稳定的趋势，而围压的升高反而使南京砂的稳定性得到增强，这就是南京砂“逆向性”的表现，与无细粒含量的纯净砂具有完全不同的力学性状，这也与 Lade、Yamamuro 等对松散粉细砂的试验结果具有相似性。图 7 中同时标注了在固结后土体所对应的孔隙比 e_c ，由于在不排水剪过程试样总体积认为是不发生变化的，因此该孔隙比更能反映实际土样在剪切过程时的物理状态指标。从图 7 中可见，孔隙比的微小变化可导致土体应变软化程度的较大变化。

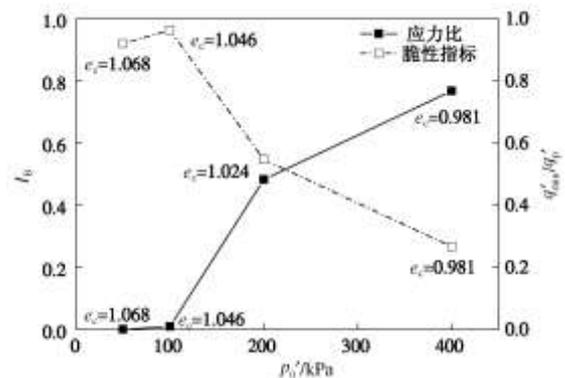


图7 I_B , q'_{min}/q'_p , p'_0 及孔隙比 e_c 间的关系Fig. 7 Correlation curves of I_B , q'_{min}/q'_p , p'_0 and e_c

6 结 论

稳态等相关概念是分析流滑现象的基础, 因此, 对土体稳态性状的研究是十分必要的, 固结不排水剪切三轴试验是稳态理论重要的实用室内试验方法。通过对不同密实度南京砂的稳态性状试验研究, 得到了以下4点结论。

(1) 低围压下稳态线的曲线表达与试验结果更加吻合, 松散南京砂在低围压下表现出不稳定趋势, 最终广义剪应力接近于0。

(2) 稳态是土体固有属性, 不仅可通过稳定状态下 $p'_{ss} - q'_{ss}$ 的关系进行拟合得到, 也可通过同一围压下不同密实度南京砂的有效应力路径末端拟合得到。本试验得到南京砂稳态内摩擦角为 $\varphi'_s = 35.2^\circ$ 。

(3) 采用峰值强度对流滑现象进行分析具有较高的风险性, 而应采用残余强度, 因此需建立峰值强度和残余强度间联系。通过分析研究, 南京砂峰值强度和残余强度间的关系可表达为 $\frac{S_p}{p'_c} = 0.24 + 0.33 \frac{S_{us}}{p'_c}$ 。

(4) 南京砂剪切过程中应力强度的变化情况可用脆性指标 I_B 表征, 其反映了应变软化的程度和流滑发生的可能性。本研究表明, 孔隙比的微小变化可导致土体应变软化程度的较大变化。

参考文献:

[1] 余湘娟, 房震, 严蕴, 等. 震后饱和砂土的液化及边坡稳定问题评述[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2003, **31**(1): 72 - 75. (YU Xiang-juan, FANG Zhen, YAN Yun, et al. Earthquake induced liquefaction of saturated sand and slope stability analysis[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2003, **31**(1): 72 - 75. (in Chinese))

[2] CASAGRANDE A. Liquefaction and cyclic deformation of sands: a critical review[C]// Proc of the Fifth Pan American Conf on Soil Mechanics and Foundations Engineering. Buens Aires: 1975.

[3] CASTRO G. Liquefaction and cyclic mobility of saturated sand[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division,

ASCE, 1975, **101**(GT6):551 - 569.

[4] POULOS S J. The steady state of deformation[J]. J Geotech Engrg Div, ASCE, 1981, **107**(GT5):553 - 561.

[5] LADE V P, YAMAMURO J A. Evaluation of static liquefaction potential of silty sand slopes[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, **48**(2): 247 - 264.

[6] 魏松, 朱俊高, 王俊杰, 等. 砂土的稳态强度固结不排水三轴试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(22): 4151 - 4157. (WEI Song, ZHU Jun-gao, WANG Jun-jie, et al. Consolidated-undrained triaxial tests study on steady state strength of sand[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(22): 4151 - 4157. (in Chinese))

[7] 张津生, 彭芝平, 周景星. 三峡堰基淤砂的流滑特性和抗剪强度指标的选用[J]. 水利学报, 1998(6): 14 - 18. (ZHANG Jin-sheng, PENG Zhi-ping, ZHOU Jing-xing. Flow-sliding property of sand deposit in the cofferdam of the Three Gorges Project and the determination of its shear strength parameters[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998(6): 14 - 18. (in Chinese))

[8] 黄永林. 南京砂的液化与判别[J]. 世界地震工程, 2001, **17**(1): 69 - 74. (HUANG Yong-lin. Liquefaction of the Nanjing sand and its identification[J]. World Information on Earthquake Engineering, 2001, **17**(1): 69 - 74. (in Chinese))

[9] ISHIHARA K. Liquefaction and flow failure during earthquake[J]. Géotechnique, 1993, **43**(3): 351 - 415.

[10] VERDUGO R. The critical state of sands: discussion[J]. Géotechnique, 1992, **42**(4): 655 - 663.

[11] 朱建群. 含细粒砂土的强度特征与稳态性状研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2007. (ZHU Jian-qun. Strength properties and steady-state behavior of sandy soil[D]. Wuhan: Institute of Rock & Soil Mechanics, Chinese Academy of Science, 2007. (in Chinese))

[12] YAMAMURO J A, LADE P V. Steady-state concepts and static liquefaction of silty sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, **124**(2): 868 - 877.

[13] SLADEN J A, DHOLLANDER R D, KRAHN J. The liquefaction of sand, a collapse surface approach[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1985, **22**(4): 546 - 578.