

基于 CPTU 原位测试状态参数的液化判别方法研究^①

储亚, 蔡国军, 刘松玉

(东南大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210096)

摘要:砂土原位状态的性能一直以来都难以有效获取,而其体积变化特征的评价指标(状态参数)就是其中重要的一项。利用状态参数(Ψ)来代替相对密实度表征砂土的状态特性是一种新兴的趋势。考虑到砂土状态参数是关于体积变化的评价指标,在砂土地层中,随着围压的增加,砂土剪胀的趋势增加,液化阻力也增加。因此通过状态参数进行砂土液化的判别是可行的。以宿迁—新沂高速公路工程为背景,建立基于孔压静力触探(CPTU)的状态参数、周期阻力比(CRR)和标准贯入击数(N)之间的相关性模型。提出通过砂土的状态参数判别液化的两种新方法。

关键词:液化; 状态参数; 电阻率; 孔压静力触探

中图分类号: TU441⁺.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2014)04-0905-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2014.04.0905

Study on Liquefaction Estimation Method Based on State Parameters of CPTU in Situ Measurement

CHU Ya, CAI Guo-jun, LIU Song-yu

(Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract: The in situ performance of sandy soil and the volume change characteristics of the evaluation index (state parameter) have always been difficult to effectively determine, although these parameters are very important. Using the state parameter (Ψ) to explain the pore pressure static cone penetration test is an emerging trend. Considering that the soil state parameter is related to the volume change of the evaluation index, the sand dilatancy trend and liquefaction resistance in a sandy soil site were increased with an increase in confining pressure. Therefore, it is viable that the state parameter can be used in the soil liquefaction discrimination. In this paper, the Suqian-Xinyi expressway project is taken as the background, and a relevance model is established among the status parameters of cone penetration test with pore pressure measurement (CPTU), cycle resistance ratio (CRR), and standard penetration number (N). In addition, two types of new methods for estimating sandy soil liquefaction by state parameters are established.

Key words: liquefaction; state parameters; resistivity; cone penetration test with pore pressure measurement (CPTU)

0 引言

状态参数(Ψ)是反映砂土体积变化的一个重要评价指标,由 Been 等^[1]在 1985 年提出用于表示砂

土在剪胀和剪缩状态之间的一个临界状态。之后许

多著名的学者^[2-4]都开展了相关状态参数方面的研

① 收稿日期: 2014-08-20

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41330641); 国家自然科学基金项目(41202203); 全国优秀博士学位论文作者专项资金资助项目(201353); 教育部新世纪人才支持计划(NCET-13-0118); 中央高校基本科研业务费(2242013R30014)

作者简介: 储亚(1987—), 男, 江苏淮安人, 博士研究生, 主要从事环境岩土工程等方面的研究。E-mail: 136235507@qq.com

究,并取得了很好的成效。研究表明^[5-7],砂土的状态参数不仅仅受到相对密度的影响,还受到颗粒结构的定向排列、级配以及原位应力状态等因素的影响。电阻率是土的基本参数之一,与土的孔隙率、饱和度、粒径、级配、颗粒定向性等因素密切相关^[8-9]。

作者在 Plewes 等^[10]、Jefferies 和 Been^[11] 以及 Robertson 等^[12] 通过静力触探(CPT)测试结果和室内标定罐试验数据提出状态参数原位测试预测方法的基础上,提出一种基于原位测试归一化电阻率的状态参数计算方法。研究表明^[3-5],无论是松砂还是密砂,其最终破坏点都会落在空间一条稳定状态线上。在极限状态线上土样只有塑性剪切变形,没有塑性体积变形。随着围压的增加,砂土剪胀的趋势增加,液化阻力也增加。因此砂土的状态参数可以用做液化判别。

在利用状态参数判别液化历程中,逐步采用稳态线判别砂土液化是否发生。在稳态线的图中,稳态线是一个分界线,所以可以利用其将砂土分为两个不同的区域——潜在流动液化区和无流动液化区。密实的砂土可能发生循环变形或循环液化,松散的砂土可能因为孔压的升高而发生流动滑移破坏。在平均有效应力(p')和孔隙比(e)的平面上(图1),稳态线^[13]就是土壤可能达到的临界状态。所以当砂土处于稳态线之上时才有可能会发生流动滑移破坏。黄安斌^[14]进行了状态参数判别液化的研究,并得到了有关状态参数与 CRR 的关系图。

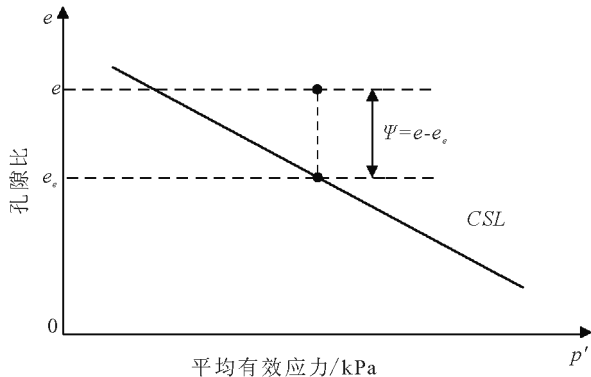


图1 稳态线示意图

Fig.1 The diagram of steady state line

本文在 Seed 简化法^[15] 和标准贯入试验 SPT 方法^[16] 的基础上,引入提出电阻率预测状态参数,建立状态参数和周期阻力比 CRR 以及标准贯入击数 N 之间的关系,进行相应的液化判别。

1 砂土的状态参数

Poulos^[17] 给出了关于稳态变形的定义:“任何颗粒物体的稳态变形是在常体积、常有效应力、常剪切应力、常速度的一种连续变形状态”。Roscoe 等^[18] 定义为:“临界状态是土体在常应力和常孔隙比下的连续变形”。本文提出的临界状态是具有较大影响的临界状态土力学的基石。有些学者把稳态变形与临界状态等同看待^[19]。然而临界状态的概念更广泛,描述的现象也更多,如它可以包括峰值状态和准稳态以及稳态等。在不排水试验中考虑其关系,认为临界状态和稳定状态实为同一状态。

状态参数的概念是利用处在相同平均有效应力下的初始孔隙比 e_0 和临界状态的孔隙比 e_{cs} 定义的。关于状态参数的原位测试计算方法,主要集中在力学参数指标的预测方法,比较可靠的有:

Plewes 等^[10] 提供了一个利用归一化的 SBT 图表用于土体状态的评估,并提出了依赖于现场的原位测试技术计算状态参数的公式,如下:

$$\Psi = \ln \left[\frac{3M + 8.5F}{Q_t(1 - B_q)} \right] / (11.9 - 1.33F) \quad (1)$$

式中, $M = \frac{6 \sin \varphi'_{cv}}{3 - \sin \varphi'_{cv}}$, $\sin \varphi'_{cv}$ 是常体积有效内摩擦角,平均值可取 33° 。

Robertson^[12] 研究了一种只依赖于现场的原位技术的方法计算状态参数:

$$\Psi = c_1 + c_2 \lg Q_{tncn} \quad (2)$$

式中, $c_1 = 0.485$; $c_2 = -0.314$; Q_{tncn} 为等效纯砂的修正归一化锥尖阻力。

研究发现电阻率和状态参数同为物理指标,可以使用电阻率进行状态参数的预测,并通过电阻率 CPTU 提出无量纲变量 $0.01 \exp(I_c^2) \rho_n$ 与状态参数间的关系为

$$\Psi = -0.19 + 0.06 \ln(0.01 e^{I_c^2} \rho_n - 0.84) \quad (3)$$

式中, $\rho_n = \rho / \rho_w$ 为土体归一化电阻率, ρ 和 ρ_w 分别为电阻率 CPTU 测得的土体积电阻率和孔隙水电阻率; Ψ 为状态参数; R^2 为相关系数; I_c 为 CPTU 土类指数。土类指数 I_c , 定义^[20] 为:

$$I_c = \sqrt{(3.47 - \lg Q_{tn})^2 + (1.22 + \lg F_r)^2} \quad (4)$$

$$Q_{tn} = \left(\frac{q_t - \sigma_{v0}}{p_a} \right) \times \left(\frac{p_a}{\sigma_{v0}} \right)^n \quad (5)$$

$$n = 0.381 I_c + 0.05 (\sigma'_{v0} / p_a) - 0.15 \leq 1.0 \quad (6)$$

式中: I_c 为土类指数; Q_{tn} 为归一化锥尖阻力; F_r 为

摩阻比, $F_r = f_s / (q_t / \sigma_{v0}) \times 100\%$; q_t 为经孔压修正后的锥尖阻力, $q_t = q_c + (1 - a)u$, 其中 q_c 为实测锥尖阻力; u 为实测孔隙水压力; p_a 为参考压力, $p_a = 0.1 \text{ MPa}$; σ_{v0} 和 σ'_{v0} 分别为总上覆应力和有效上覆应力。

2 试验研究

2.1 场地描述

试验场地位于江苏省宿—新高速公路宿迁某施工段,属堆积冲积平原区,邻近骆马湖,多河流分布,区内地形平坦。地面标高主要在 18.10~26.50 m 之间,沿线沟渠纵横,地表主要分布粉土。地质构造主要为古 NE 构造处于活动状态的郯庐断裂带,是一条地震活动带,区域内抗震设防烈度为Ⅷ度。试验场地地貌类型以废黄河堆积冲积平原、堆积波状平原为主,零星分布剥蚀残丘。该地段全为第四系全新统及上、中、下更新统松散沉积物。场区表层为近期人工杂填土及素填土,其下均为粉土、粉砂,地下平均水位在 3.8 m。试验场地土层的主要物理力学指标如表 1 所示。

根据《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/TB02—01—2008)^[16]进行场地的液化判别,单孔液化指数为 3.7~9.0,液化等级为轻微~中等。场地 15 m 以浅普遍存在液化问题。

表 1 试验场地土层的主要物理力学性质指标
Table 1 Main physico-mechanical indexes of soils of test site

层号	土名	层厚	含水量/ %	液限 w_L /%	土类指 数/ I_c	标贯击 数/ N
①	素填土	1	11.41	31.85	1.4~2.5	9
②	粉土	3.5	25.87	29.03	1.8~2.6	4
③	粉质砂土	9.5	29.42	28.35	2.0~2.6	10
④	粉土	15.5	27.61	27.53	2.1~3.0	24

2.2 试验设备

试验所用孔压静力触探仪为美国 Hogentogler 原装多功能数字式车载 CPTU 系统,配备最新的多功能数字式探头。系统由钻探车、静力触探系统两部分组成,配备 5 t、10 t、15 t、20 t 四功能数字式孔压探头,具有常规 CPT、孔压、倾斜、地震波和电阻率功能模块。E4FCS 实时数据计算机采集系统, CONELOT 及 CLEANUP 数据处理软件可同步记录贯入过程中的锥尖阻力、侧壁摩擦力、孔隙水压力、电阻率与测斜等。

2.3 试验结果

本试验段的区间范围为:95 m×10 m,进行了钻孔试验 17 孔/次,相关电阻率 CPTU 试验共进行

了 10 孔/次,具体孔位布置见图 2。试验的平均深度达到 20 m。图 3 为本次试验典型电阻率 CPTU 测试结果(试验孔为 K7+665 右侧孔)。从测试结果可以看出,场地粉土的锥尖阻力和侧壁摩阻力较小,且实测孔隙水压力基本呈静水压力,表明试验场地处在松散状态,存在一定的液化风险。试验表明电阻率在地下水位以上多变杂乱,而水位以下电阻率明显降低,并有一定规律,故本文主要研究宿迁地区地下水位以下的饱和粉土。

3 基于状态参数指标的液化判别

液化判别的方法主要有:(1)采用修正的 Seed 法,该方法简化为等效周期应力比(CSR)与地基土的周期应力比(CRR)法进行比较。如果 $CSR > CRR$ 则可判别为液化,而 $CSR < CRR$ 则可判别为不液化;(2)采用标贯击数法,当实测标贯击数大于临界标贯击数时,则可判别为不液化,当实测标贯击数小于临界标贯击数时,则可判别为液化。(3)概率统计分析法;(4)室内试验分析法;(5)土层反应分析法。其中修正 Seed 法和经验分析法是工程上最常用的液化判别方法。

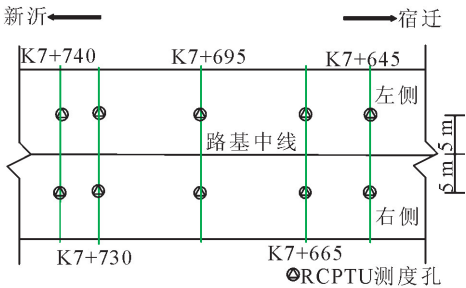


图 2 电阻率 CPTU 试验孔位布点
Fig.2 Layout of resistivity CPTU test points

国内液化判别多采用初判时考虑基本烈度、土层地质年代、地下水位、黏粒含量、上覆非液化土层厚度等因素,再判时以标准贯入试验为主。临界标准贯入锤击数采用《公路桥梁抗震设计细则》^[16]推荐的计算公式。当饱和土标准贯入锤击数 N (未经杆长修正) 小于液化判别标准贯入锤击数临界值 N_{cr} 时,应判为液化土。当有成熟经验时,还可采用其他判别方法。

在地面下 15 m 深度范围内,液化判别标准贯入锤击数临界值可按下式计算:

$$N_{cr} = N_0 [0.9 + 0.1(d_s - d_w)] \sqrt{3/\rho_c}, (d < 15) \tag{7}$$

在地面下 15~20 m 范围内,液化判别标准贯

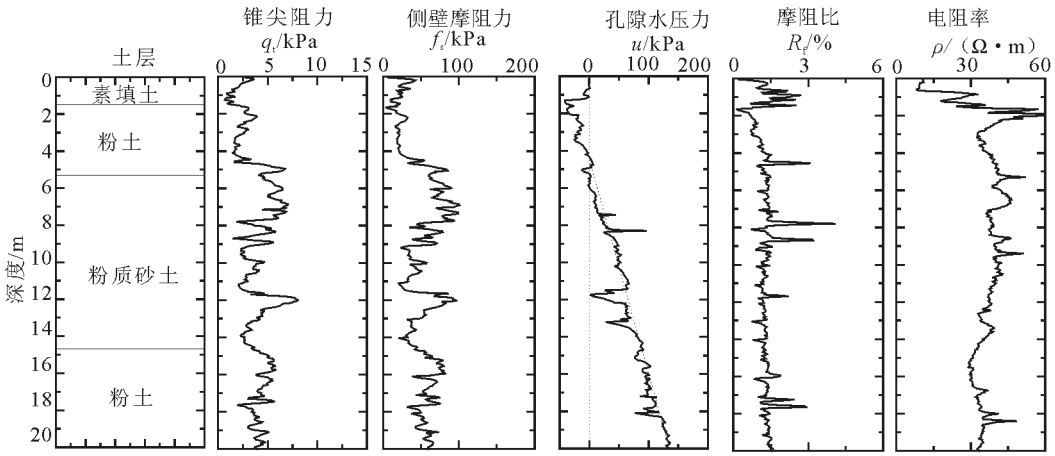


图 3 典型电阻率 CPTU 测试结果

Fig.3 Results of typical resistivity CPTU tests

入锤击数临界值可按下式计算：

$$N_{cr} = N_0 (2.4 - 0.1d_w) \sqrt{3/\rho_c}, (15 < d \leq 20) \tag{8}$$

式中， N_{cr} 为液化判别标准贯入锤击数临界值； N_0 为液化判别标准贯入锤击数基准值； d_w 为地下水位深度(m)，宜按设计基准期内年平均最高水位采用，也可按近期年内最高水位采用； d_s 为饱和土标准贯人点深度(m)； ρ_c 为黏粒含量百分率(%)。

国际上液化评估普遍采用 Seed 等^[15]提出的简化法，所涉及的液化定义为由于振动作用产生大孔隙水压力及其后无黏性土强度剧烈下降的现象。这一方法结合饱和砂土的液化机理，将砂土中由于振动产生的剪应力与产生液化所需的剪应力(即相应动力作用下砂土的抗剪强度)进行比较。前者采用等效周期应力比 $CSR_{7.5}$ ，衡量振动荷载引发液化的能力；后者称为周期阻力比 CRR ，衡量了土体抗液化能力，与测试方法有关。最初 Seed 等^[15]提出的简化法采用标准贯入试验，其后在 1996 年和 1998 年两次召开的国际地震工程研究中心 NCEER 研讨会中，将该简化法应用于 CPT/CPTU 测试技术中^[21-23]，且由于 CPT/CPTU 测试技术具有连续性、可控制性和可重复性等优点而更为推荐。其中工程实践中对采用由简化法演化而来的安全系数法，即定义安全系数 $F_s = CRR/CSR_{7.5}$ ，若 $F_s > 1$ ，则判别为不液化；反之，则判别为液化。

其中，等效周期应力比 $CSR_{7.5}$ 通常采用如下公式^[23]计算：

$$CSR_{7.5} = 0.65 \frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \frac{a_{max}}{g} \gamma_d / MSF \tag{9}$$

式中， $CSR_{7.5}$ 为等效周期应力比，也即通过震级比例

系数转换后 7.5 震级下的周期应力比； σ_{v0} 和 σ'_{v0} 分别为计算深度处土体的总上覆应力和有效上覆应力(kPa)； a_{max} 为地面最大加速度(m/s²)； g 为重力加速度(m/s²)； r_d 为应力折减系数； MSF 为震级比例系数。

周期阻力比 CRR 采用由 Robertson^[24]根据现场 CPTU 试验提出的使用等效纯净砂归一化锥尖阻力 Q_{tncs} 进行计算(后简称 CPTU 法)

$$CRR = \begin{cases} 93(\frac{Q_{tncs}}{1\,000}) + 0.08, & (50 \leq Q_{tncs} \leq 160) \\ 0.833(\frac{Q_{tncs}}{1\,000}) + 0.05, & (Q_{tncs} \leq 50) \end{cases} \tag{10}$$

等效纯净砂归一化锥尖阻力 $Q_{tncs} = k_c Q_{tn}$ ，采用细粒修正系数 k_c 对归一化锥尖阻力 Q_{tn} 进行修正得到。修正系数 k_c 由土类指数 I_c 决定。

3.1 状态参数和周期阻力比的关系

图 4 为电阻率状态参数预测法计算得到的状态参数与周期阻力比 CRR 之间的关系。其表达式为

$$CRR = 0.003 \exp(-\Psi/0.14) + 0.06, R^2 = 0.94 \tag{11}$$

可以看出，状态参数与周期阻力比之间的关系比较良好，可以通过状态参数进行相关的液化判别。其中 Robertson 法的状态参数是由等效纯净砂归一化锥尖阻力进行预测的，与其修正后的 CRR 之间相关性最高。

3.2 基于状态参数的周期阻力比液化判别

采用本文提出的状态参数法预测的 CRR 与 Seed 法预测的 CRR 进行对比(图 5)。

可以看出，本文所提出的基于状态参数的 CRR

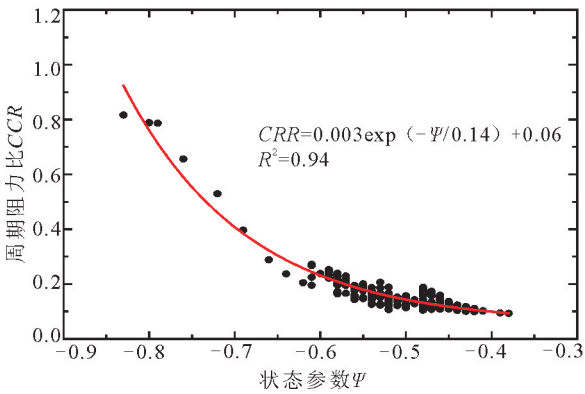


图 4 Ψ 与 CRR 关系曲线

Fig.4 Relationship between Ψ and CRR

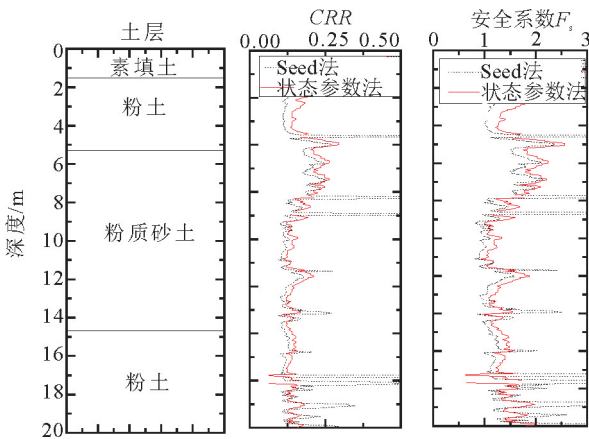


图 5 典型验算结果

Fig.5 Typical calculation results

计算值与 Seed 法得到的 CRR 基本一致,两种方法计算出的周期阻力比 CRR 趋势基本一样。而由两种 CRR 得到的液化安全系数图可以看出 Seed 法偏于保守。发生较大差异之处在 $I_c > 2.5$,如图 5 中 5~8 m 处所示。这是由于 $I_c > 2.5$ 时土黏性较大,根据 Robertson 修正模型,CRR 采用静态液化评估方法计算,而本次研究场地 $I_c > 2.5$ 的数据不足,且 CRR 来源不具备足够可靠度,因此未进行研究。实际应用时会存在较大误差,甚至得到完全相反的结果,此部分有待于更进一步的研究。

3.3 基于状态参数的标贯击数液化判别

考虑到本试验场地所在地区的粉土中有薄层黏性土的存在,而状态参数与土的类别和黏粒含量也有关系,所以通过土的类别和黏粒含量对状态参数进行修改之后,可以使状态参数进行液化判别的适用性更广。《公路桥梁抗震设计细则》(JTGTB02-01-2008)^[18]中规定粉土的黏粒(粒径小于 0.005 mm 的颗粒)含量百分率,Ⅶ度、Ⅷ度和Ⅸ度分别不

小于 10、13 和 16 时,可判为不液化土。故需要对黏粒含量低于 10 的粉土进行黏粒含量修正选择。通过临界标贯击数和状态参数之间的对比发现,当黏粒含量超过 7.36 时状态参数应进行修正,采用:

$$\Psi = \Psi_0 \times [1 + (\rho - 7.36\%)] \tag{12}$$

式中,Ψ 是修正后的状态参数;ρ 是黏粒含量;Ψ₀ 是实际计算的状态参数。

可以通过实测的标贯击数与临界标贯击数之间的对比进行液化判别。如果直接进行状态参数与标贯击数之间建立关系,可以通过统计得到图 6 以及一个非常重要的关系线公式(13)。图 6 为由状态参数确定一条液化线,关系线之上的土不会产生液化,关系线之下的土会发生液化。其液化线的公式为:

$$N = -115\Psi - 1.15 \tag{13}$$

式中,N 为标贯击数;Ψ 为修正后的状态参数。

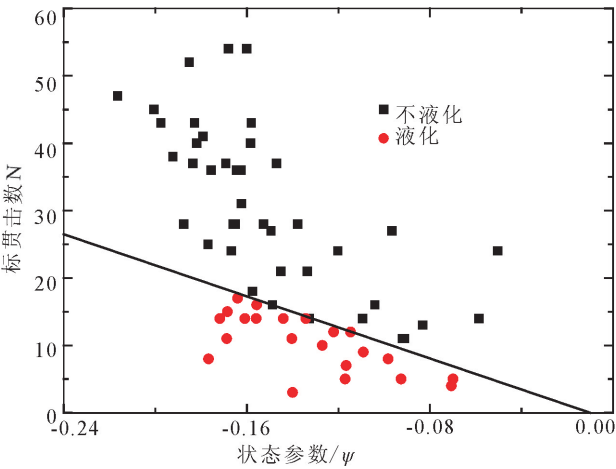


图 6 状态参数 Ψ 与标贯击数 N 关系

Fig.6 Relationship between Ψ and N

式(13)可以代替临界标贯击数的作用,利用它进行比较,在关系线之上的判别为不液化,之下的判别为液化。从式(13)中还可以看出状态参数是土固有的一个参数,所以才能与临界标贯击数进行等价的应用交换,它反映着土本身的性质,这也是状态参数的概念所反映出来的,从这个关系中也可以得到体现,所以证明这个关系式是成立的。

4 结论与建议

本文研究了基于状态参数的砂土液化原位测试判别方法。得到如下结论:

- (1) 对于 $1.8 < I_c < 2.5$ 的正常固结粉土,研究了其状态参数,并通过与周期阻力比建立关系,采用 Seed 简化方法进行液化判别的可能。本文状态参

数方法得到的 CRR 与 Seed 法给出的结果基本符合,对液化的判别也具有类似的准确性,但计算更为简便;同时也为液化评估提供了一个新的角度,即根据状态参数取代相对密实度来评价饱和无黏性土的孔隙率和密实状态,从而评估其抗液化能力。

(2) 建立了 $1.8 < I_c < 2.5$ 的正常固结粉土的状态参数与标贯击数之间的关系。通过分析标贯液化判别的方法,画出一条液化判别线,以判定其液化的可能性。方法简单实用。

(3) 由于所在地区的粉土存在薄层粉质黏土,导致了相关数据的误差,使状态参数法低估了周期阻力比,其原因为黏性土和无黏性土之间的液化原理不同,且本地区的土类有一定的区域性。

参考文献 (References)

- [1] Been K, Jefferies M G. A State Parameter for Sands[J]. Geotechnique, London, 1985, 35(2): 99-112.
- [2] Jefferies M G. Nor-sand: A Simple Critical State Model for Sand[J]. Geotechnique, 1993, 43(1): 91-103.
- [3] Manzari M T, Dafalias Y F. A Critical State Two-surface Plasticity Model for Sand[J]. Geotechnique, 1997, 47(2): 255-272.
- [4] Li X S, Dafalias Y F. Dilatancy for Cohesionless Soils[J]. Geotechnique, 2000, 50(4): 449-460.
- [5] Seed H B, Peacock W H. Test Procedures for Measuring Soil liquefaction Characteristics[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Asce, 1971, 97(SM8): 1099-1119.
- [6] Sharp M K, Dobry R, Philips R. Cpt-based Evaluation of Liquefaction and Lateral Spreading in Centrifuge[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(10): 1334-1346.
- [7] Archie G. The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics [J]. Trans. American Institute of Mining Metallurgical and Petroleum Engineers, 1942, 146: 54-61.
- [8] Rinaldi V A, Cuestas G A. Ohmic Conductivity of Compacted Silty Clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(10): 824-835.
- [9] 蔡国军, 刘松玉, 童立元, 等. 电阻率静力触探测试技术与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊 1): 3127-3133.
CAI Guo-jun, LIU Song-yu, TONG Li-yuan, et al. Resistivity Cone Penetration Test Technique and Data Interpretation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(S1): 3127-3133. (in Chinese)
- [10] Plewes H D, Davies M P, Jefferies M G. CPT based Screening Procedure for Evaluating Liquefaction Susceptibility[C]// Proceedings of the 45th Canadian Geotechnical Conference. Toronto, Ont. 1992, 4: 1-9.
- [11] Jefferies M G, Been K. Soil Liquefaction: a Critical State Approach[M]. Taylor & Francis: CRC Press, 2006.
- [12] Robertson P K. Estimating In-situ State Parameter and Friction Angle in Sandy Soils From CPT[C]// Proceedings of the 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, CPT. 2010, 10: 2-43.
- [13] Polous S J. The Steady State of Deformation[J]. Journal of Geotechnical Engineering Division ASCE, 1981, 107(GT5): 553-562.
- [14] Huang A B, Bunting R D, Carney T C. Piezoblade Tests in a Clay Calibration Chamber[J]. Calibration Chamber Testing, 1991: 161-173.
- [15] Seed H B, Idriss I M. Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Asce, 1971, 97(9): 1249-1273.
- [16] 重庆交通科研设计院. 公路桥梁抗震设计细则 (JTG/T B02-01-2008)[S]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
Chongqing Communications Research and Design Institute. Guidelines for Seismic Design of Highway Bridges (JTG/TB02-01-2008)[S]. Beijing: China Communications Press, 2008. (in Chinese)
- [17] Polous S J. The Steady State of Deformation[J]. Journal of Geotechnical Engineering Division Asce, 1981, 107(GT5): 553-562.
- [18] Roscoe K H, Schofield A N, Wroth C P. On the Yielding of Soil[J]. Geotechnique, 1958, 8(1): 22-53.
- [19] CHU J. An Experimental Examination of the Critical State and Other Similar Concept for Granular Soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1995, 32: 1065-1075.
- [20] Robertson P K. CPT Interpretation a Unified approach[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009.
- [21] Youd T L, Idriss I M. Nceer Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils[R]. Buffalo: National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, 1997.
- [22] Youd T L, Idriss I M. Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 Nceer and 1998 Nceer/nsf Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(10): 817-833.
- [23] Robertson P K. Performance Based Earthquake Design Using the CPT[C]. Keynote Lecture, IS-Tokyo, 2009.