

段伟,蔡国军,刘松玉,等.多功能参数静力触探在地震液化判别方法中的应用进展研究[J].地震工程学报,2020,42(3):764-776.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.03.764

DUAN Wei, CAI Guojun, LIU Songyu, et al. Progress of the Application of the Multifunctional Cone Penetration Test in the Seismic Liquefaction Discrimination Method[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(3): 764-776. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.03.764

多功能参数静力触探在地震液化判别方法中的应用进展研究

段伟^{1,2}, 蔡国军^{1,2}, 刘松玉^{1,2}, 陈瑞锋^{1,2}, 袁俊^{1,2}, 戴济群³

(1. 东南大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 211189;

2. 东南大学 江苏省城市地下工程与环境安全重点实验室, 江苏 南京 211189;

3. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210024)

摘要: 地震液化是引起地基失稳和上部结构损害的直接原因之一,而液化震害预防的第一步就是对工程场地进行液化预测和判别。静力触探(CPT)作为最主要的原位测试技术,因其具有快速、低廉、高效等优点,被广泛用于液化判别。根据国内外近年来CPT技术的发展,对不同形式的CPT[孔压静力触探技术(CPTU)技术,电阻率孔压静力触探(RCPTU)技术、地震波孔压静力触探技术(SCPTU)技术等]在地震液化评价中的应用进行系统的论述。特别介绍一种基于状态参数进行液化判别的方法,另外还简要介绍基于概率统计分析法。比较和梳理各种液化判别方法的差异性,最后,在已有研究成果的基础上分析现有CPT液化判别法存在的问题与不足。分析结果表明:状态参数法能够同时考虑围压应力和孔隙比的影响,有效地将室内试验与现场试验联系起来;SCPTU、RCPTU液化判别框架还需进一步拓展与完善;概率统计分析法需结合相应软件使其更具适用性。

关键词: 多功能静力触探; 电阻率; 剪切波速; 状态参数; 液化

中图分类号: TU413

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2020)03-0764-13

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.03.764

Progress of the Application of the Multifunctional Cone Penetration Test in the Seismic Liquefaction Discrimination Method

DUAN Wei^{1,2}, CAI Guojun^{1,2}, LIU Songyu^{1,2}, CHEN Ruifeng^{1,2}, YUAN Jun^{1,2}, DAI Jiqun³

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, Jiangsu, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Urban Underground Engineering & Environmental Safety, Southeast University, Nanjing 211189, Jiangsu, China;

3. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, Jiangsu, China)

Abstract: Seismic liquefaction is one of the direct causes of the instability of the foundation and

收稿日期: 2018-10-16

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFC0800200); 国家自然科学基金项目(41672294, 41877231); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(KYCX17_0139); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX17_0139)

第一作者简介: 段伟(1989-), 博士研究生, 主要从事土动力学与现代原位测试技术方向的研究。E-mail: zbdxdw@163.com。

通信作者: 蔡国军(1977-), 男, 山东兖州人, 工学博士, 教授。E-mail: focuscai@163.com。

damage to the upper structure, and the first step is to predict and judge the liquefaction of the project site. Therefore, the rationality and reliability of liquefaction discrimination method is an important part of geotechnical seismic investigation. As the main test of in situ technology, the cone penetration test (CPT) is widely used for discrimination of liquefaction due to its advantages of high speed, low cost and high efficiency. In line with the development of CPT technology in the country and abroad in recent years, the application of different CPT technologies in the assessment of earthquake liquefaction has been systematically summarized. In this article, a method of liquefaction discrimination based on state parameters was introduced especially, and the method based on statistical and probability analysis was introduced briefly. Then, the difference between the different liquefaction discrimination methods was compared and analyzed. Finally, based on the results of the existing research, the problems and deficiencies of the existing methods of CPT were studied. The results showed that the method based on state parameters can consider the effects of confinement pressure, stress and void ratio and connect the laboratory test and the field test effectively; The SCPTU and RCPTU liquefaction discrimination structures need to be expanded and improved; the probability and statistical analysis method needs to be combined with the corresponding software to make it more applicable.

Keywords: multi-function cone penetration test; resistivity; shear wave velocity; state parameter; liquefaction

0 引言

在地震荷载作用下,饱和砂土或粉土中孔隙水压力增大和有效应力减小从固态变为液态的过程,称为地震液化。这种现象往往会引起地表喷砂冒水、地基不均匀沉陷、地裂或滑移,危及建筑物的安全与正常使用。因此,地震液化问题一直是岩土抗震工程领域研究的热点;而在地震液化研究领域当中,工程界最关心的是场地液化可能性评估和液化评估方法^[1]。地震液化现场调查和地震现场原位测试是砂土液化研究的最重要、最理想的手段。

静力触探试验(CPT)作为最主要的原位测试

技术,以其快速、数据连续、可重复性高、成本低、可靠性强等优点,代表着液化判别方法的发展趋势。尤其是随着现代信息技术、数字传感技术与计算技术的发展,孔压静力触探测试系统(CPTU)由于具有高精度、高稳定性和高可重复性等优点,在国际上得到了大量、广泛应用;近年来,由于 CPTU 的新传感器的研发成功,使得 CPTU 向多功能和数字化方向发展^[2],拓宽了 CPTU 测试技术应用领域。其中代表性的有电阻率孔压静力触探(RCPTU)、地震波孔压静力触探(SCPTU)等测试技术。RCPTU 技术是一种有效测试土体电阻率的原位测试技术,可提供 4 个沿深度变化的读数(q_1, f_s, u_2, ρ);SCP-TU 技术是在 CPTU 贯入过程中,通过置于探头中力传感器上方的检波器量测地表激振系统产生的剪

切波传播时间,计算土层的剪切波速,可提供 4 个沿深度变化的读数(q_1, f_s, u_2, v_s)。上述多功能静力触探的发展,积累了大量的实测资料和经验公式,而在国内的应用则相对较少^[3],因此,系统地了解多功能 CPT 技术在地震液化中的应用情况,对 CPT 技术在中国地震液化领域的应用具有重要意义,同时也为中国发展新的液化判别方法提供了难得的机遇。

1 基于 CPT 测试的液化判别方法

1.1 国内规范法——经验法

目前,我国工程界基于 CPT 测试的液化判别方法主要采用的是《岩土工程勘察规范》(GB50021—2001)^[4]中的判别方法(以下简称“规范法”)。我国规范法在液化初判中较全面地考虑了场地地震基本烈度、土层地质年代、黏粒含量、地下水位深度、上覆非液化层厚度等重要因素,可有效进行初判,并可作为是否需进行再判提供了依据。更进一步判定计算主要从基本烈度、地下水位深度、黏粒含量、标贯击数和静探阻力等试验结果、试验点深度及其代表厚度等因素出发,对液化及其程度作出定量计算判定划分,并规定对应的处理措施。规范法是以邢台地震(1966 年)、通海地震(1970 年)、海城地震(1975 年)、唐山地震(1976 年)及国外历史上地震后出现喷水、冒砂、滑移与沉陷等地面变形为标志的液化场

地上进行的对比试验数据,运用概率统计法建立起来的,具有较强的实用性和针对性,但是该方法缺乏理论支撑,判别结果趋于保守,尤其是在深层地基土的液化判别情况。

1.2 国外 Seed 简化法——试验分析法

国外较多采用 Seed 简化法^[5],其实质是将砂土中由振动作用产生的剪应力与产生液化所需的剪应力(即在相应动力作用下砂土的抗剪强度)进行比较。经 H.B.Seed 修正后简化成等效周期应力比 CSR 与地基土的周期阻力比 CRR 的比较。如果 $CRR > CSR$,则判别为不液化;如果 $CRR < CSR$,则判别为液化。它属于试验-分析法,也是最早提出的可判别具有水平地面自由场地液化的方法,许多影响液化的因素均得到适当考虑。

1.2.1 周期应力比 CSR

(1) 国外 Seed&Idriss 法

对于周期应力比 CSR,国外一直采用 Seed&Idriss 提出的简化计算式,通过震级比例系数 MSF 将其修正为 7.5。公式如下:

$$CSR_{7.5} = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_{v0}} = 0.65 \left(\frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \right) \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \frac{r_d}{MSF} \quad (1)$$

式中: τ_{av} 为地震产生的平均剪应力; σ_{v0} 、 σ'_{v0} 分别为土体计算深度处竖向总应力和竖向有效应力; a_{max} 为地震动峰值加速度。 g 为重力加速度; r_d 为应力折减系数,具体公式为:

$$r_d = \begin{cases} 1.000 - 0.007 \, 65z & (z \leq 9.15 \text{ m}) \\ 1.174 - 0.026 \, 7z & (9.15 \text{ m} < z < 23 \text{ m}) \end{cases} \quad (2)$$

$$MSF = 10^{2.24/M_w^{2.56}} = (M/7.5)^{-2.56} \quad (3)$$

(2) 国外 Boulanger&Idriss 法

Boulanger^[6] 针对 Seed&Idriss 提出了 $CSR_{7.5}$ 简化计算公式,对其进行了修正。具体如下公式:

$$CSR_{7.5} = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_{v0}} = 0.65 \left(\frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \right) \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \frac{r_d}{MSF} K_\sigma \quad (4)$$

式中: K_σ 为上覆层修正因子;其他参数同上。 r_d 求解:

$$r_d = \exp[\alpha(z) + \beta(z) \cdot M] \quad (5a)$$

$$\alpha(z) = -1.012 - 1.126 \sin(z/11.73 + 5.133) \quad (5b)$$

$$\beta(z) = 0.106 + 0.118 \sin(z/11.28 + 5.142) \quad (5c)$$

其中: z 为相关深度/m。 K_σ 求解如下:

$$K_\sigma = 1 - C_\sigma \ln \left(\frac{\sigma'_v}{P_a} \right) \leq 1.1 \quad (6a)$$

$$C_\sigma = \frac{1}{37.3 - 8.27 (q_{c1Ncs})^{0.264}} \leq 0.3 \quad (6b)$$

式中: P_a 为大气压力; q_{c1Ncs} 为等效洁净砂锥尖阻力,具体算法如下:

$$q_{c1Ncs} = q_{c1N} + \Delta q_{c1N} \quad (7a)$$

$$\Delta q_{c1N} = \left(11.9 + \frac{q_{c1N}}{14.6} \right) \cdot \exp \left[1.63 - \frac{9.7}{FC + 2} - \left(\frac{15.7}{FC + 2} \right)^2 \right] \quad (7b)$$

$$q_{c1N} = C_N q_{cN} = C_N \frac{q_c}{P_a} \quad (7c)$$

$$C_N = \left(\frac{p_a}{\sigma'_v} \right)^m \leq 1.7 \quad (7d)$$

$$m = 1.338 - 0.249 (q_{c1Ncs})^{0.264} \quad (7e)$$

式中: q_{c1N} 为归一化锥尖阻力; q_c 为实测锥尖阻力; FC 为细粒含量。 MSF 由 Boulanger 和 Idriss 修正如下(M 为震级)^[6]:

$$MSF = 1 + (MSF_{max} - 1) \left[8.64 \exp \left(\frac{-M}{4} \right) - 1.325 \right] \quad (8a)$$

$$MSF_{max} = 1.09 + \left(\frac{q_{c1Ncs}}{180} \right)^3 \leq 2.2 \quad (8b)$$

(3) 国外剪切波速法

Dobry^[7] 从 CSR 基本定义 $CSR = \tau_c / \sigma'_{v0}$ 出发,结合砂的割线模量定义 $G = \tau_c / \gamma_c = (G/G_{max})_c G_{max}$, $(G/G_{max})_c$ 为模量折减曲线相应于应变 γ_c 时的值;将其代入, $G_{max} = \rho v_s^2$ 代换,即可得到 CSR 公式:

$$CSR = 0.1 \rho (G/G_{max})_{\gamma_c} \gamma_c \cdot v_{s1}^2 / (\sigma'_{v0})^{0.5} \quad (9)$$

式中: v_{s1} 为归一化剪切速度, $v_{s1} = v_s (100 / \sigma'_{v0})^{0.25}$ 。

1.2.2 周期阻力比 CRR

(1) Robertson 法计算 CRR

Robertson^[8] 提出了 CPT 土质分类公式及液化潜能评估方法,其最大优点就是分析流程中的每一步骤均以数学式表达,可以直接应用 CPT 试验成果计算周期阻力比 CRR。该理论是基于对薄层土锥尖阻力修正和对场地及土性修正的基础上建立的。

$$CRR_{7.5} = \begin{cases} 93 \left(\frac{q_{c1Ncs}}{1 \, 000} \right)^3 + 0.08 & (50 \leq q_{c1Ncs} \leq 160) \\ 0.833 \left(\frac{q_{c1Ncs}}{1 \, 000} \right) + 0.05 & (q_{c1Ncs} < 50) \end{cases} \quad (10)$$

式中: $CRR_{7.5}$ 为转化为震级 $MSF = 7.5$ 下的等效周期阻力比; q_{c1Ncs} 与前述相同,但此时 q_{c1Ncs} 求解为: $q_{c1Ncs} = K_c \cdot q_{c1N}$, K_c 为估算细粒修正系数。

(2) Olsen 算法

Olsen^[9]发展了使用摩阻比 R_f (锥尖阻力 q_c 与侧壁摩阻力 f_s 的比值) 预测 CRR 的方法 (简称 Olsen 法)。Olsen 建议采用应力指数 c 对 q_c 归一化为 q_{c1} , 而应力指数 c 需要一个迭代程序确定, 过程较复杂。为了简捷方便, 提出一个简化方法 (应力指数为常数 0.6)。具体计算表达式为

$$CRR = 0.001\ 28q_{c1} - 0.025 + 0.17R_f - 0.028R_f^2 + 0.001\ 6R_f^3 \quad (11)$$

式中: $R_f = f_s / q_c \times 100\%$; $q_{c1} = q_c / (\sigma'_{v0})^{0.7}$ 。

(3) Boulanger 计算方法

Boulanger^[10]更新数据库,修正了 Idriss 和 Boulanger 液化方法^[11],修正曲线的 q_{c1Ncs} 范围在 80~130 kPa,但是在 q_{c1Ncs} 最低、最高值时数据点稀疏,这与基于 SPT 进行液化判别相一致,相应于液化概率为 16%。修正的确定性液化方法如下:

$$CRR_{7.5} = \exp \left[\frac{q_{c1Ncs}}{113} + \left(\frac{q_{c1Ncs}}{1\ 000} \right)^2 - \left(\frac{q_{c1Ncs}}{140} \right)^3 + \left(\frac{q_{c1Ncs}}{137} \right)^4 - 2.8 \right] \quad (12)$$

2 基于 CPTU 测试的液化判别方法

饱和砂土剪切时,孔隙水压力上升/下降与液化潜势密切相关,表明孔隙水压力变化是砂土液化的基础,土层原位孔隙水压力的量测有助于评价砂土液化势。CPTU 不仅能够测试 q_c 、 f_s ,还能够连续测定孔隙水压力 u_2 ,为改进评估液化提供了可能性。孔压参数 u_2 、孔压参数比 B_q 能够反映土体的体积变化特性及相对渗透性。从液化形成机理看,土体的体积变化特性是重要指标。CPTU 中的孔压参数能揭示出液化判别标准,对提出新的抗液化标准有重要的意义。但到目前为止,还没有提出普适判别方法。目前一些学者进行了相关研究。Ozcak 等^[12]通过 CPTU 孔压消散方法来快速诊断地下水位几乎为零时的细粒土液化是否发生。Winckler 等^[13]指出对于一些松散粉细尾矿,采用传统液化评估方法会带来一定的误差;观察到在贯入过程中,产生极高超孔压比、低的锥尖阻力的情况时表明液化将要发生,采用修正的孔隙水压力参数 P 的正负进行土体状态剪胀剪缩性的判断 (图 1),其中 $P = (u_2 - u_0) / \sigma'_{v0} = (u_{动} - u_{静}) / \sigma'_{v0}$, u_0 为静水压力。

值得注意的是由于砂土破坏模型的复杂性、孔穴扩张引起的体积应变以及孔隙水压力测量位置的不确定性等因素,使得理论上阐述砂土液化势变得

较为复杂,有待进一步深入研究。

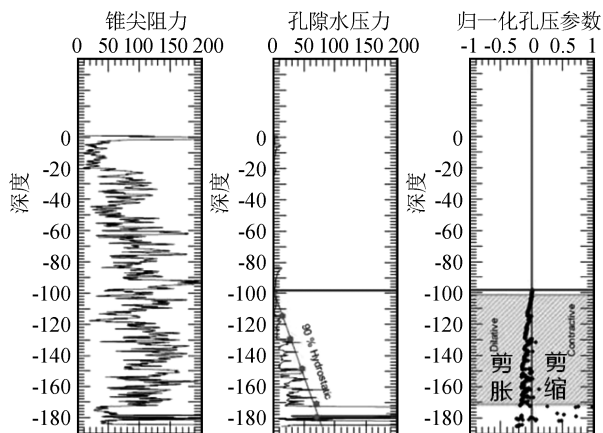


图 1 在动态和静态孔压下典型的剪胀行为^[13]

Fig.1 Typical shear dilation behavior under dynamic and static pore pressures^[13]

3 RCPTU 电阻率判别法

对于砂土液化的研究分析中需要现场土体的一些特性参数,如孔隙率、压缩指数、渗透系数、最大剪切模量、周期应力比等。量化这些参数需要考虑土的基本结构特征,如孔隙率及尺寸、形状与颗粒的方位等。而土壤电阻率主要由土的物质组成和结构特征所决定;能够反映土体的微观结构特性,与颗粒的级配密切相关,表明颗粒的级配状况能够在一定程度上反映其液化的可能性^[14-15]。此外,砂土的密实程度是液化判别的重要因素,而电阻率在一定程度上能够评估土体密实度的变化^[15],进而可知电阻率能够反映其液化能力。

近年来,国内外一些学者基于土体电阻率模型研究了饱和砂土液化评估方法。Arulmoli 等^[16]研究了基于电阻率模型的饱和砂土液化评估方法。Arulanandan 等^[17]采用数值模拟对 Arulmoli 等^[17-18]的液化评估方法进行了验证,指出这一电阻率模型提供了一种无损预测土特性的方法,并避免了取无扰动试样的困难。Jinguiji 等^[18]提出了一种通过电阻率监测实现土体液化可视化的新技术,利用饱和土体孔隙率与电阻率之间的关系,饱和土体密实度的改变可通过电阻率的变化来监测。吴迪等^[14]通过室内土体电阻率试验进行了砂土孔隙率确定方法及液化评价应用的研究。

原位电阻率的测试更加反映土体的电学特性,RCPTU 的出现给电阻率与土体结构性之间的联系提供了便捷的条件,在地基处理尤其是液化地基处理效果方面具有很大的使用价值。邹海峰联合电阻

率和土类指数对砂土的液化势进行判断(图 2),表明土类指数 I_c 为连接饱和土力学特征和电学特征的有效指标之一,电阻率反映饱和和无黏性土的孔隙率和密实状态,从而结合土类评估其抗液化能力^[19]。

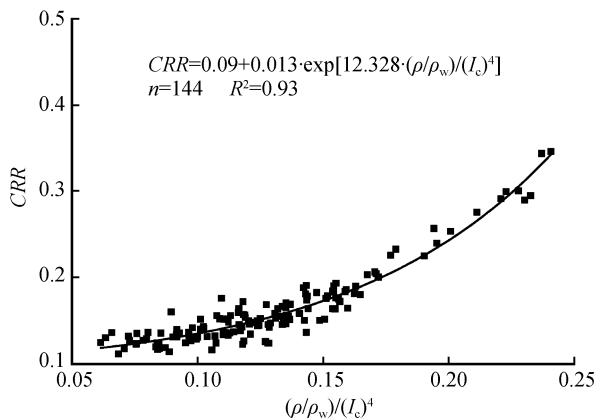


图 2 CRR 与 ρ 和 I_c 关系曲线

Fig.2 Relationship among CRR, ρ and I_c

4 SCPTU 剪切波速判别法

SCPTU 作为一种新型多功能 CPTU 技术被广泛用来进行地震液化势判别^[20]。基于 CPT 或 CP-TU 的液化判别方法前面已叙述,此处不在累赘。本节主要介绍有关剪切波速 v_s 进行液化判别的方法。

相比于 SPT 或 CPT 指标, v_s 更具有明确的物理学意义。主要体现:砂土的液化强度是其剪切强度的一种表现形式,影响砂土液化的因素对 v_s 也有一定相同的影响^[21];土体液化与其状态及工程性质有关,即土体抗剪强度和应力应变关系,这些性质和剪切模量有关系,而土体小应变剪切模量与 v_s 密切相关^[22]; v_s 综合反映土体结构变化、应力状态对 CRR 的影响^[23]。此外,与常规贯入阻力进行液化判别相比而言, v_s 可测试的土类多,如在砂砾中很难用 SPT 或 CPT 进行贯入;剪切波速还可在室内通过弯曲元小试样上进行测试^[24]。

目前基于 v_s 进行液化评价的方法主要分为两类^[23]:第一类基于原状结构性和室内试验的 v_s 抗液化强度直接评价;第二类基于液化震害调查、现场 v_s 测试或室内试验获得 CRR- v_s 相关关系来间接判别液化。第一类方法由于现场冻土原状取样、费用高昂等不足,很难广泛应用推广。

4.1 基于 v_s -CRR 相关性液化判别研究

针对第二类方法,一些学者基于现场震害调查

的 v_s -CRR 相关关系的判别方法进行研究^[25-27]。图 3 给出了基于 v_s 提出的判别图(简称 Andrus 和 Stokoe 法)^[25]。由图可知,这种方法类似于 Seed-Idriss 简化法,用 v_s 比标贯击数更能体现土体结构特征。随着全球地震液化数据库的丰富及更新^[28],一些学者针对该判别图进行修正和细化^[11,29-31],使得 v_s -CRR 关系更加准确。

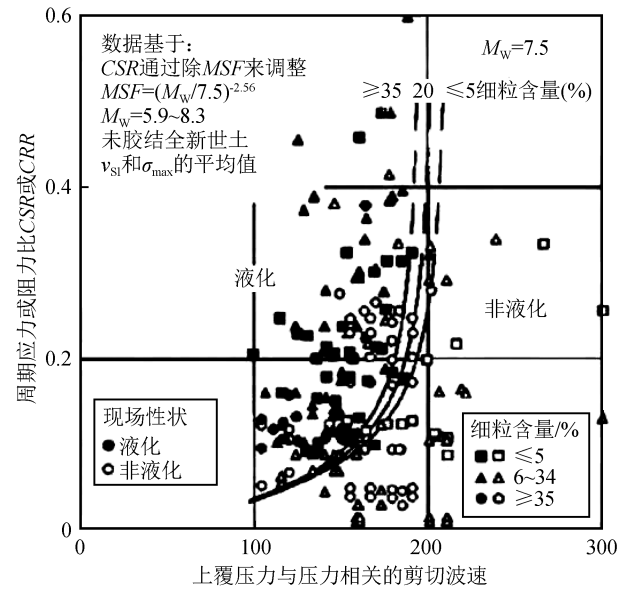


图 3 修正 v_{s1} 为指标的液化判别曲线^[25]

Fig.3 Liquefaction discrimination curves using the modified v_{s1} as the index^[25]

图 3 中对于不同的 FC 值,这三条曲线非常接近。这说明使用 v_s 计算 CRR 时 FC 对液化的发生不敏感,这在已有文献中也证实了这一点^[31]。

针对上述判别表(表 1),一些学者提出其中的不足:它们基本是经验性的;提供了一个液化发生概率的较低下限值,判别结果较保守;未考虑地震环境和荷载历史;没有从机理上说明土体的地震液化行为,同时还受数据稀少的限制,场地调查得到的是地震后的土体特性,与震前土体性质有区别^[32-33]。

图 4 给出基于 v_s 液化判别汇总图。Kayen 等提出的判别曲线(简称 Kayen 法)是基于广泛数据库^[31],应用土类范围(洁净和粉质砂土到砾石)、曲线形状与位置与 Andrus 和 Stokoe 法研究基本一致^[25]。 v_{s1} 值较小时, Kayen 法给出的 CRR 值约为 Andrus 和 Stokoe 法的两倍(当 $v_{s1} = 100$ m/s 时, CRR 分别为 0.067, 0.033)。虽然 Kayen 法数据十分广泛,但也有不足,未包含以下关键部分:在关键液化层(洁净砂、粉细砂、卵石、砂黏质及细粒含量)土种类的识别;土的地质来源(有无压实填充、自然土)。

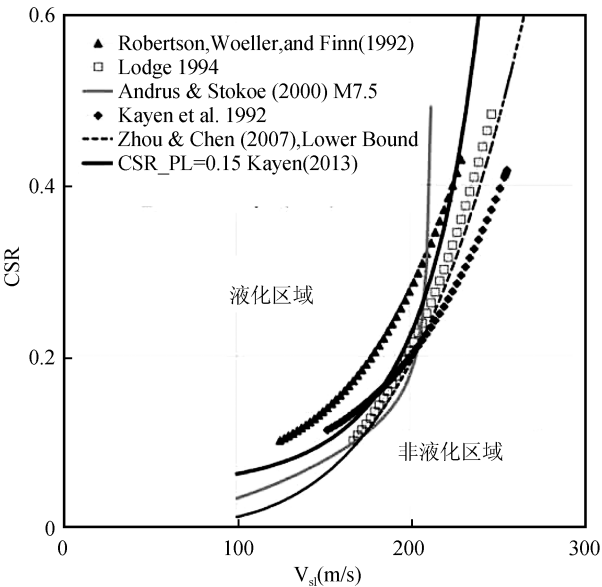


图 4 修正 v_{S1} 的液化判别曲线比较^[31]

Fig.4 Comparison between liquefaction discrimination curves of the modified v_{S1} ^[31]

表 1 剪切波速判别法汇总 (仅考虑砂土判别情况)

Table 1 Summary of discrimination methods of shear wave velocity (Only considering the sand discrimination)

方法	液化判别式	适用范围 d_s/m
水利水电规范 ^[37]	$v_{scri}=291 \sqrt{K_H \cdot d_s \cdot r_d^T}$	0~30
岩土勘察规范 ^[4]	$v_{scri}=v_{s0} (d_s-0.013 \ 3d_s^2)^{0.5} [1-0.185(d_w/d_s)]$	0~15
丁伯阳判别法 ^[38]	$v_{scri}=v_{s0} (d_s-0.008 \ 65d_s^2)^{0.5}$	0~15
刘颖判别法 ^[39]	$v_{scri}=v_{s0} \{ [1+0.125(d_s-3) d_s^{-0.25}-0.05(d_w-2)] (3/\rho_c)^{0.5} \}^{0.2}$	0~20
谢生荪判别法 ^[40]	$v_{scri}=v_{s0} (0.7+0.1d_s)^{0.5}$	0~15

注: v_{scri} 为临界剪切波速; v_{s0} 为液化判别剪切波速基准值; K_H 为地震动峰值加速度系数, $K_H=a_{max}/g$ 。

v_s 基准值对不同的土质取值也不同。丁伯阳建议式中 v_s 基准值仅针对砂土。谢生荪建议判别式中在粉土液化判别中考虑了黏粒含量。

5 状态参数液化判别法在 CPT/CPTU 中的应用

5.1 状态参数的意义

已有研究表明^[41]: 无黏性土的剪胀性不仅与土体的松密状态有关, 还与土体当前所处的应力状态有关。砂土的本构特性同时与密实度和围压相关。基于上述背景, Been 和 Jefferies^[42] 提出了状态参数 Ψ 概念(图 5), 其定义为: 在相同的平均有效应力水平下, 当前孔隙比 e 与临界状态孔隙比 e_{cs} 之差, 即 $\Psi=e-e_c$, 其中 e 为当前孔隙比, e_c 为相同围压下的临界孔隙比。当 $\Psi<0$ 时, 土体表现为密实; 当 $\Psi>0$ 时, 土体表现为松散。 Ψ 直观地将砂土的当前状态量化, 被广泛用来代表土体性质包括密实度与应力水平影响; Ψ 将孔隙比和应力水平同时考虑,

4.2 基于循环剪应变的 v_s -CRR 相关性研究

对砂土 v_s -CRR 相关性的研究最早由 Dobry 等^[34] 提出门槛剪应变的判别方法。在此基础上, 国内汪闻韶首次建立现场 v_s -CRR 相关关系, 提出地基是否液化初步判别的剪切波速法^[35]。同期, 石兆吉等^[36] 提出直接判别饱和土是否地震液化的临界 v_s 以初始液化时的剪应变作为临界剪应变。

Dobry 等^[7] 对液化图表作为周期剪应变变线进行进一步研究, 最终得出 v_s 与 CRR 的另一种表达式:

$$CRR=0.1\rho \frac{(G/G_{max}) \gamma_{cl} \gamma_{cl}}{\sqrt{\sigma'_{vo}}} v_{S1}^2 \tag{13}$$

式中: γ_{cl} 为液化时的门槛剪应变, $\gamma_{cl} \approx 0.03\%$ ^[33], 其他参数同前述所示。国内现行的基于 v_s 液化判别一般依据相关规范规定和相关学者建议列于表 1。

值得注意地是, 水利水电规范需考虑深度修正系数 γ'_d 的分段取值, 岩土勘察规范需注意判别式中

用来反映砂土在剪胀与剪缩状态之间的临界状态。

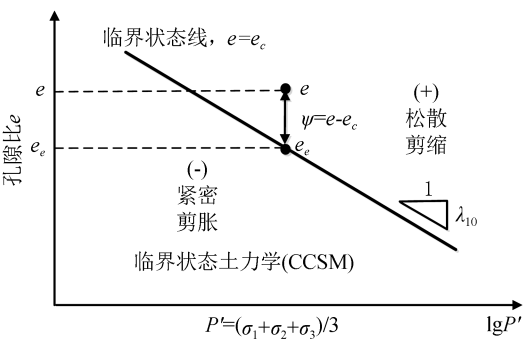


图 5 状态参数的定义^[43]

Fig.5 Definition of state parameters^[43]

5.2 状态参数在液化判别中应用

由前述可知, 液化是一种固体状态物质变成液态的过程, Ψ 的物理意义就是材料状态的改变, 因此可用 Ψ 来进行液化判别^[42]。Jefferies 和 Been^[43] 更进一步系统地对 Ψ 进行了研究, 借助已有的 CPT 与 SPT 液化判别图, 运用转换思想, 将横坐标

q_{c1N} 或 N_{60} 转换为 Ψ ,得到 Ψ 的液化判别图(图6)。图7为尾矿库现场CPTU测试及 Ψ 液化判别示意

图,由图可知 Ψ 能够获得液化所有形式中最重要的部分,并且能够全面表达土体的性质(土体的类型、

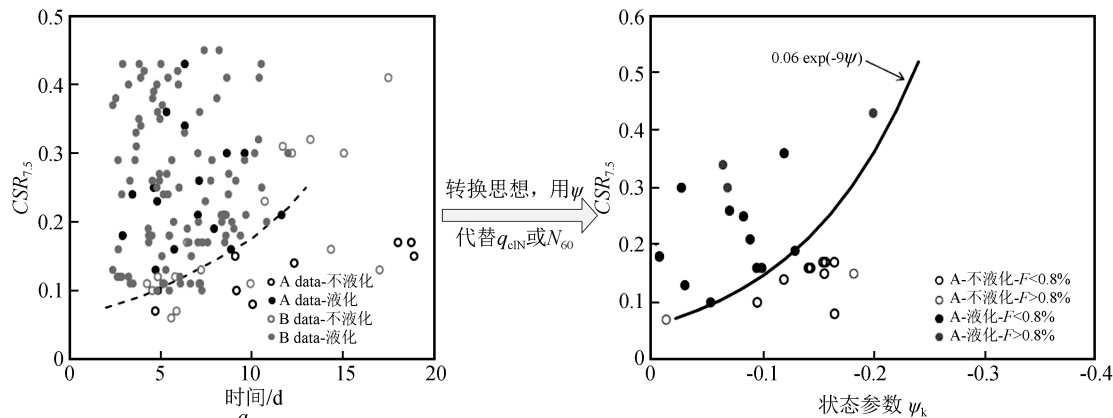


图6 $CRR_{7.5}-\Psi$ 关系^[43]
Fig.6 Relationship between $CRR_{7.5}$ and Ψ ^[43]

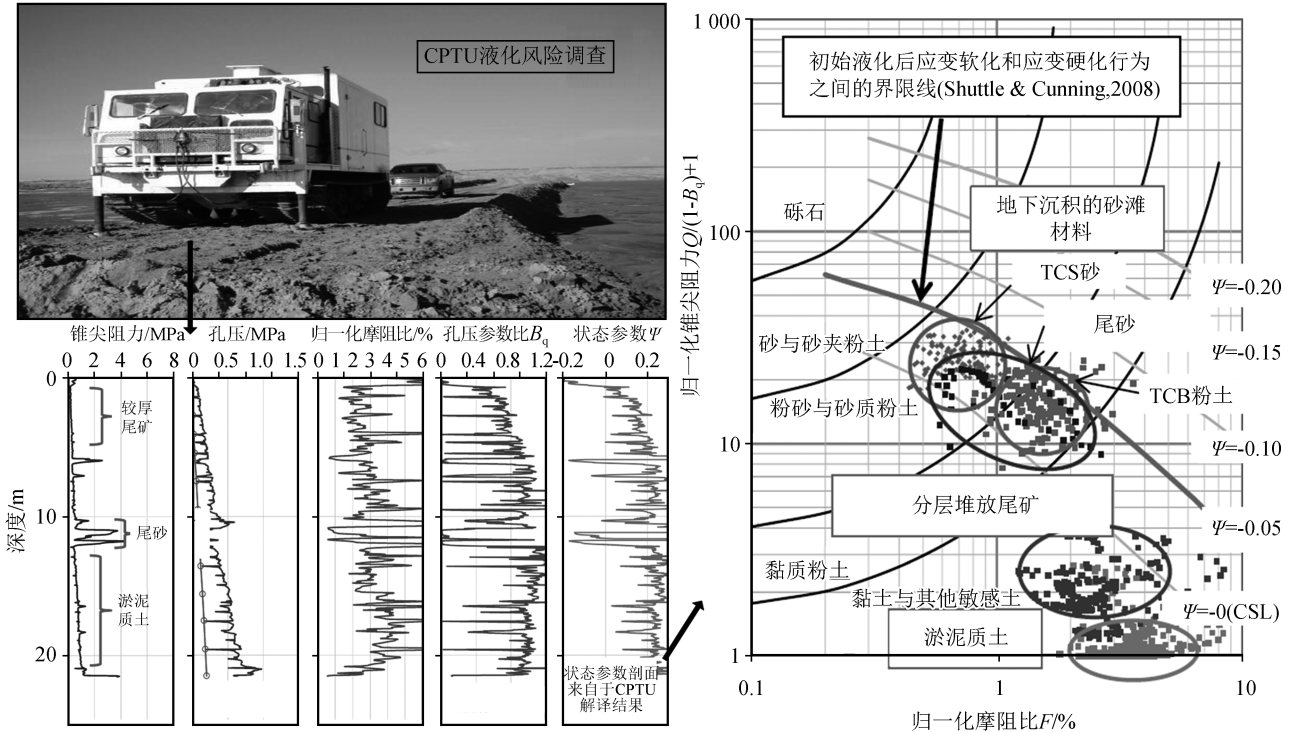


图7 状态参数液化判别法现场试验

Fig.7 In-situ test of state parameter-based assessment method

细粒含量、时间效应)。针对 Ψ 在土体液化领域中的应用,近年来国内外许多学者对其做了大量的研究工作。1987年Been将 Ψ 用于CPT结果^[44]中,Bouckovalas等^[45]基于临界状态机制,对粉砂的 CRR 进行了研究,Jefferies和Been建立了 Ψ 与 CRR 之间的关系。Shuttle^[46]提出基于 Ψ 的地震液化势评价方法,建议在CPT/SBT图表中定义 $\Psi=-0.05$ 的区域,便

于流动液化的敏感性识别。Lee等^[47]基于室内排水三轴试验研究了济州砂的临界状态参数,并建立了 Ψ 与归一化锥尖阻力 Q_p 之间的关系。Bobei^[48]采用修正的 Ψ 表征含细粒砂的静态液化。储亚等^[49]研究了 Ψ 与 CRR 之间的关系,建立了 Ψ 与 CRR 、标贯击数的相关关系,但并没有给出详细 Ψ 的确定方法。Do等^[50]基于静态试验和临界状态方法进行了颗粒土的液化势的评估。

Huang 等^[51] 基于 Ψ 研究了 FC 与 CRR 之间的关系,揭示了 Ψ 比等效孔隙比在建立 CRR 与细粒含量之间关系更具优越性,因为砂的压缩性能够在 Ψ 中很好地反映。Constantine^[52] 采用相对状态参数对粉砂土的液化强度进行了试验研究,建立了相对状态参数与液化阻力比 CRR 之间的关系。

Jefferies 和 Davies 提出归一化的土分类图 (Normalized Soil Behavior Type Classification Chart),也被称为 SBTn 图^[53],包括将孔隙压力直接转化为修正的归一化锥尖阻力 $Q(1-B_q)$,Jefferies 和 Been 更新了这种归一化的土分类图,使用参数 $Q(1-B_q)+1$,克服了软敏感土 $B_q>1$ 的情况^[45]。Robertson^[54] 在前人的基础上,结合自己前期的冰冻试样试验结果,在更新的 SBTn 图中将 $\Psi=-0.05$ 区域带作为区分剪胀与剪缩的边界(图 8)。

将上述的文献中的状态参数与周期阻力比 CRR 之间的关系汇总如表 2 所示。

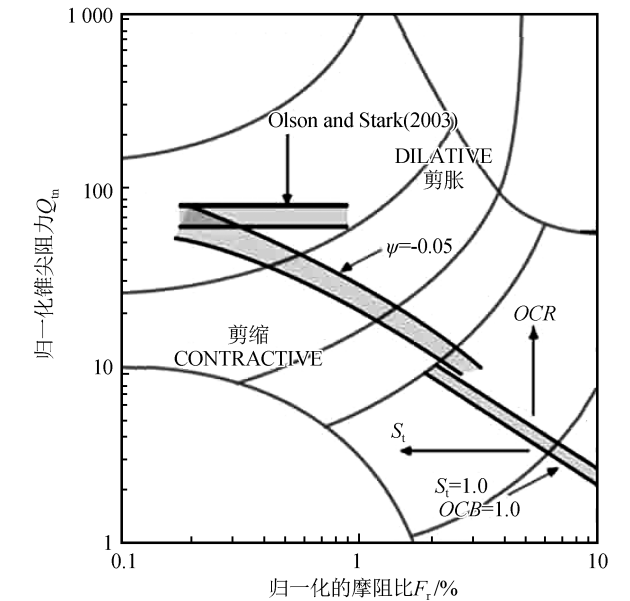


图 8 基于归一化 CPT 参数的剪胀与剪缩边界图^[54]
Fig.8 Shear dilatancy and shear shrinkage boundary based on the normalized CPT parameters^[54]

表 2 状态参数 Ψ 与液化阻力比 CRR 关系汇总
Table 2 Summary of the relationships between Ψ and CRR

文献来源	相关关系	其他说明
Jefferies&Been ^[48]	$CRR_{7.5}=0.03\exp(-11\Psi)$	转换思想给出 $CRR-\Psi$ 关系
Huang ^[51]	$CRR=0.307\exp(-3.408\Psi)$	重塑 Mai Liao 砂静三轴与循环三轴试验
Jefferies&Been ^[66]	$CRR_{7.5}=0.06\exp(-9\Psi)$	更新数据库

5.3 状态参数的确定方法

针对 Ψ 原位测试确定方法的研究大多是基于 CPT 或 CPTU 提出的,Been 等^[55] 基于 CPT 首次提出了一种 Ψ 确定方法,此后在此基础上也形成了其他方法。具有代表性的有:(1)Plewes 法^[56],涉及到部分排水条件下归一化的超孔隙水压力的参数 B_q 和从 F_t 估计的土体压缩性 λ ;(2)Been 和 Jefferies 法^[57],涉及到 B_q 和基于土类指数 I_c 估计土的压缩性 λ ;(3)Shuttle and Jefferies 法^[58],解释了现场土的刚度 G_0 ,塑性硬化模量 H 和水平应力偏差;(4)Schnaid 和 Yu 法^[59],建立了 Ψ 与 q_t 与 G_0 的比值的相关关系;(5)Robertson 法^[60],将 Ψ 与归一化的等效洁净砂锥尖阻力联系起来,建立一个简单适用的线性关系;(6)Ghafghazi 法^[61],该法扩展了 Shuttle and Jefferies 法,运用球孔扩张理论与有限元模型进行分析得到。

从上述 Ψ 解译方法可看出,部分方法适用条件限制性大,其不足之处在于:仅对完全排水条件下 CPT 才有效,即 $B_q=0$,而在贯入含有黏粒砂的过程中会产生大量的孔隙比。Plewes 法及 Been 和

Jefferies 法是部分排水时 Ψ 估计的初步方法。但 这些方法均为一阶近似,说服力可能不强。LeBlanc 等^[62] 针对部分排水土体情况提出一个更先进的方法。DeJong^[63] 建议修正 CPT 贯入速率可获得完全排水与部分排水的土体性质。但是这些方法需要进一步发展与验证^[63]。因此段伟等研究了^[64-65] 基于电阻率、剪切波速进行状态参数确定方法的研究工作。

6 液化评估概率性方法

除了前面叙述的广泛使用的确定性液化评价方法外,一些学者利用概率统计理论,基于大量统计液化数据库资料,得到一些新的液化评估概率性方法^[67],这种方法可以克服确定性方法中基于经验建立的关系式的不确定性^[67]。

邹海峰等^[67] 联合一阶可靠度方法与地质统计学方法进行了液化势概率评估,该方法能够考虑参数的不确定性,绘制的液化概率空间图可为地基加固提供有用的信息。

Chen 等^[68] 在进行 CPT 液化势评价方法中考虑了土体的空间变异性影响,利用地质统计学与创

新的多尺度随机场模型进行了传统经验液化公式的解译,绘制了高分辨率的液化概率空间分布图。

7 讨论

目前,以 SPT、CPT 等场地贯入指标的经验建立与 CRR 相关关系的方法已广泛应用,但两者都是贯入式场地调查,对于一些场地(如砾石土类)的应用并不理想甚至很难开展。SPT 中 N 值为非物理量,利用 N 值求土的各项物理指标,有“一锤定天下”的说法^[3];SPT 试验过程不可避免地引进探杆贯入一定深度后产生挠曲变形,能量损耗等大量的系统误差和偶然误差。CPTU 能够近似连续测试孔隙水压力,为砂土液化的孔压变化判别提供了可能,尤其是孔压参数比 B_q 、归一化的孔压参数 P 的变化能够反映土体的渗透性能和体积剪胀剪缩变化特性,但是目前还没有完全成熟的判别方法。土体剪切波速除了贯入式的 SCPTU,还可以采用表面波反/折射法、表面波频谱分析法等方法获得,能在

绝大多数场地开展,物理意义明确,可同时在现场与室内测试剪切波速,是现场土体结构特征、应力状态的综合反映(具体见表 3),成为目前液化的重要方法^[69-71]。但是 SCPTU 中建立贯入参数与剪切波速之间的关系如 q_t 与 $G_{\max}$ 会存在一个问题: $G_{\max}$ 为土体小应变水平条件下的动力参数,而 q_t 为贯入过程测定的参数(探头周围土体屈服与破坏时发生大变形)。电阻率法能够反映土体的微观结构,综合反映了土体颗粒级配,是液化评价的一种新型方法;但土体电阻率受到地下水、温度等外界环境的影响,温度升高,离子活动性上升,致使土体电阻率下降,该法受外界环境影响大。状态参数能够直观地将砂土当前状态量化,成为表征砂土体积变化的一个重要参数。尤其是基于 CPT 计算的状态参数,内含土体类型指标等 CPT 测试参数,是 CPT 液化判别土体的进一步提升与凝练;将现场 CPT 与室内试验结果直接进行比较,是一种新型且有效的液化判别方法。

表 3 现场试验方法特点归纳
Table 3 Summary of the features of field test methods

方法特点	试验方法					
	SPT	CPT	CPTU(u_2)	RCPTU/电阻率	SCPTU/ v_s	状态参数 Ψ
液化场地资料累积	丰富	丰富	有限	有限/有限	有限/有限	稀少
影响试验的应力应变行为	大应变部分排水	大应变排水	大应变排水	大应变排水	小应变	大应变
质量控制可重复性	缺乏-良好	非常好	非常好	非常好	非常好	非常好
土层变化的探测	对紧密试验好	很好	很好	很好	一般	很好
取样是否	是	否	否	否	否/ 无限制	无限制
试验指标/工程特性	试验指标	试验指标	试验指标	试验指标	试验指标/工程特性	试验指标
土体结构性反映	一般	一般	孔压消散时间、渗透性及剪胀剪缩性	颗粒级配状况	土体结构变化	土体孔隙率的变化
整体优点	国际广泛认同	定量测试技术	测取孔隙水压力连续剖面及孔压消散过程	定量表征土体结构特征,联系微观与宏观特性	v_s 室内室外都可测量	密实度与应力水平,将现场与室内试验结果直接进行比较
适用土类	非砾石土	非砾石土	非砾石土类(软土地区)	非砾石土/所有土类	非砾石土/所有土类	所有土类

液化评估概率性方法虽然能够克服确定性方法的缺陷——不确定性(由于基于经验或室内试验建立的,具有不确定性),能够绘制出清楚高分辨率的液化概率空间分布图,但是模型建立的假设、系统误差、信息的不确定性与不完整性使得概率性方法与实际液化情况产生差异,总之,随着液化数据资料的不断丰富,概率统计模型与软件的不断完善,将成为液化评估方法的未来发展趋势。随着城镇化的加速发展,循环液化与流动液化的判别及构筑物的抗震设计更值得关注^[72],同时对于抗液化措施或液化地

基处理新方法、新设备的研发也提出更高的要求^[73]。

8 结论

本文通过对多功能静力触探在地震液化判别中的应用进行了系统的阐述,主要结论如下:

(1) 静力触探技术作为最常用的原位测试技术,在地震液化中具有广泛的应用,多功能参数 CP-TU 能够更好地确定土体的工程性质及物理力学参数,尤其是 RCPTU、SCPTU 等技术在地震液化判

别方面具有独特的优势。

(2) 土体电阻率为连接颗粒微观与宏观的有效指标之一,可用于液化评价。土体积应变是液化地基处理土性改变的有效表征,需要进一步研究 RCPT/RCPTU 探头贯入过程中体积应变的大小及其分布情况。

(3) 剪切波速判别液化具有重要的物理意义,建立统一剪切波速判别式需要大量试验研究;剪切波速与抗液化能力相互关系的研究仍是今后重点研究的内容。

(4) 状态参数能够很好地表征土体孔隙比与应力水平,可作为砂土液化判别的新标准。然而国内对于状态参数的液化评估应用很少,状态参数的原位测试技术几乎处于空白,今后需要着重研究。

(5) 液化评估概率性方法需要不断地丰富液化数据资料来完善相关模型与统计分析,该液化判别法是与国外规范相接轨的一种方法,也将是国内相关规范未来的发展方向。

参考文献(References)

- [1] DOBRY Ricardo, LADD Richard S. Discussion of Soil Liquefaction and Cyclic Mobility Evaluation for Level Ground during Earthquakes by H. Bolton Seed[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1980.
- [2] 沈小克, 蔡正银, 蔡国军. 原位测试技术与工程勘察应用[J]. 土木工程学报, 2016, 49(2): 98-120.
SHEN Xiaoke, CAI Zhengyin, CAI Guojun. Applications of In-situ Tests in Site Characterization and Evaluation[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(2): 98-120.
- [3] 王钟琦. 我国的静力触探及动静触探的发展前景[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(5): 517-522.
WANG Zhongqi. The Chinese CPT and the Prospect of Penetration Tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(5): 517-522.
- [4] 岩土工程勘察规范: GB50021-2001[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
Code for Investigation of Geotechnical Engineering: GB50021-2001[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001.
- [5] 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.
- [6] Boulanger R W, Idriss I M. CPT-Based Liquefaction Triggering Procedure[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2015, 142(2): 04015065.
- [7] DOBRY R, ABDOUN T, STOKOE K H II, et al. Liquefaction Potential of Recent Fills Versus Natural Sands Located in High-Seismicity Regions Using Shear-Wave Velocity[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2015, 141(3): 04014112.
- [8] ROBERTSON P K, WRIDE CF. Evaluating Cyclic Liquefaction Potential Using the Cone Penetration Test [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(3): 442-459. DOI: 10.1139/t98-017.
- [9] OLSEN R S. Liquefaction Analysis Using the Cone Penetrometer[C]//Proceedings of the 8th World Conference on Earthquake Engineering, San Francisco: Englewood Cliffs, 1984: 247-254.
- [10] BOULANGER R W, IDRISS I M. CPT and SPT Based Liquefaction Triggering Procedures [J]. Rep. No. UCD/CGM-14, 2014, 1.
- [11] IDRISS I M, BOULANGER R W. Soil Liquefaction During Earthquakes[M]. Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA, 2008.
- [12] ÖZÖCAK A, SERT S, BOL E. Evaluation of the Liquefaction Potential through Dissipation Measurement in PCPT [J]. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 2013, 46(3): 337-350. DOI: 10.1144/qjegh2012-028.
- [13] CHRISTINA Winckler, RICHARD Davidson, LISA Yenne, et al. CPTu-based State Characterization of Tailings Liquefaction Susceptibility[C]//Proceedings of the 3rd International Symposium on Cone Penetration Testing, Las Vegas, Nevada, USA, 2014, 3: 863-871.
- [14] 吴迪. 基于电阻率测试的砂土孔隙率确定方法及其应用研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2015.
WU Di. Research of Method Based on the Resistivity Test of Determining the Sandy Soil Porosity and Its Application[D]. Zhenjiang, China: Jiangsu University of Science and Technology, 2015.
- [15] BEIJER LUNDBERG A, DIJKSTRA J, VAN TOL F, et al. Investigation of in Situ Soil Density Change by Resistivity Measurements[C]//GeoCongress 2012, March 25-29, 2012, Oakland, California, USA, Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2012.
- [16] ARULMOLI K, ARULANANDAN K, SEED H B. New Method for Evaluating Liquefaction Potential[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(1): 95-114.
- [17] ARULANANDAN K, MURALEETHARAN K K. Level Ground Soil-Liquefaction Analysis Using in Situ Properties: I [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1988, 114(7): 753-770.
- [18] JINGUOJI M, TOPRAK S, KUNIMATSU S. Visualization Technique for Liquefaction Process in Chamber Experiments by Using Electrical Resistivity Monitoring[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2007, 27(3): 191-199.
- [19] 邹海峰, 刘松玉, 蔡国军, 等. 基于电阻率 CPTU 的饱和砂土液化势评价研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(7): 1280-1288.

- ZOU Haifeng, LIU Songyu, CAI Guojun, et al. Evaluation of Liquefaction Potential of Saturated Sands Based on Piezometric Penetration Tests on Resistivity [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(7): 1280-1288.
- [20] CAI G J, LIU S Y, PUPPALA A J. Liquefaction Assessments Using Seismic Piezocone Penetration (SCPTU) Test Investigations in Tangshan Region in China [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2012, 41: 141-150.
- [21] 石兆吉, 郁寿松. 砂性土剪切波速与液化强度的关系 [J]. 世界地震工程, 1991, 7(3): 16-23.
- SHI Zhaoji, YU Shousong. Relationship between Shear Wave Velocity and Liquefaction Strength of Sandy Soil [J]. Orld Earthquake Engineering, 1991, 7(3): 16-23.
- [22] 张荣祥. 剪切波速判别地震液化势的适用性研究 [J]. 工程地质学报, 1996, 4(1): 53-59.
- ZHANG Rongxiang. Study on the Suitability of Seismic Liquefaction Potential Evaluated by Shear Wave Velocity [J]. Journal of Engineering Geology, 1996, 4(1): 53-59.
- [23] 周燕国. 土结构性的剪切波速表征及对动力特性的影响 [D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- ZHOU Yanguo. Shear Wave Velocity-Based Characterization of Soil Structure and Its Effects on Dynamic Behavior [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
- [24] 张涛, 刘松玉, 蔡国军. 固化粉土小应变剪切模量与强度增长相关性研究 [J]. 岩土工程学报, 2015, 37(11): 1955-1964.
- ZHANG Tao, LIU Songyu, CAI Guojun. Relationship between Small-strain Shear Modulus and Growth of Strength for Stabilized Silt [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(11): 1955-1964.
- [25] ANDRUS R D, STOKOE K H. Liquefaction Resistance of Soils from Shear-Wave Velocity [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, 126(11): 1015-1025.
- [26] ROBERTSON P K, WOELLER D J, FINN W D L. Seismic Cone Penetration Test for Evaluating Liquefaction Potential under Cyclic Loading [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1992, 29(4): 686-695.
- [27] KAYEN, ROBERT E, MITCHELL, et al. Evaluation of SPT-, CPT-, and Shear Wave-based Methods for Liquefaction Potential Assessment Using Loma Prieta data [J]. Technical Report Nceer, 1992, 1(92-0019): 177-204.
- [28] KAYEN R, SEED R B, MOSS R E S, et al. Global Shear Wave Velocity Database for Probabilistic Assessment of the Initiation of Seismic-Soil Liquefaction [J]. Journal of Military Ethics, 2004, 9(3): 286-288.
- [29] CETIN K O, SEED R B, DER KIUREGHIAN A, et al. Standard Penetration Test-Based Probabilistic and Deterministic Assessment of Seismic Soil Liquefaction Potential [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(12): 1314-1340.
- [30] MOSS R E, SEED R B, KAYEN R E, et al. CPT-Based Probabilistic and Deterministic Assessment of in Situ Seismic Soil Liquefaction Potential [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(8): 1032-1051.
- [31] KAYEN R, MOSS R E S, THOMPSON E M, et al. Shear Wave Velocity-Based Probabilistic and Deterministic Assessment of Seismic Soil Liquefaction Potential [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 139(3): 407-419.
- [32] YOUNG 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(4): 297-313.
- [33] DOBRY R, ABDOUN T. An Investigation into Why liquefaction charts work: A necessary step toward integrating the states of art and practice [C]//Proc. 5th Int. Conf. on Earthquake Geotechnical Engineering. Santiago, Chile: Chilean Geotechnical Society, 2011: 13-44.
- [34] DOBRY R, LADD R S, YOKEL F Y, et al. Prediction of Pore Water Pressure Buildup and Liquefaction of Sands during Earthquakes by the Cyclic Strain Method [R]. National Bureau of Standards, 1982.
- [35] 汪闻韶. 土地震减灾工程中的一个重要参量——剪切波速 [J]. 水利学报, 1994, 25(3): 80-84.
- WANG Wenshao. An Important Parameter in Geotechnical Engineering for Earthquake Disaster Mitigation: Shear Wave Velocity [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1994, 25(3): 80-84.
- [36] 石兆吉, 王承春. 预测轻亚粘土液化势的剪切波速法 [C]//中国地震学会第二届代表大会暨学术年会论文集. 北京, 1984: 161-162.
- SHI Zhaoji, WANG Chuncheng. Shear Wave Velocity Method for Predicting Liquefaction Potential of Light Clay [C]//Congress and Academic Annual Meeting of Seismological Society of China, 1984.
- [37] 水利水电工程地质勘察规范: GB50487-2008 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- Code for Engineering Geological Investigation of Water Resources and Hydropower: GB50487-2008 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.
- [38] 丁伯阳, 张树清, 李藩文. 适合西北地区的 v_s 波预测砂土液化势公式 [J]. 世界地震工程, 1991, 7(4): 51-53.
- DING Boyang, ZHANG Shuqing, LI Fanwen. Formula for Predicting Liquefaction Potential of Sandy Soil by v_s . Save Suitable in Northwest China [J]. Orld Earthquake Engineering, 1991, 7(4): 51-53.
- [39] 刘颖. 地震引起的海洋土液化的判别 [J]. 世界地震工程, 1987, 3(1): 25-27, 55.
- LIU Ying. Discrimination of Marine Soil Liquefaction Induced

- by Earthquake[J].Orld Earthquake Engineering,1987,3(1): 25-27,55.
- [40] 谢生芬.剪切波速判别饱和砂土和轻亚粘土液化[C]//中国振动工程学会全国土动力学学术会议.1990.
- XIE Shengfen.Identification of Liquefaction of Saturated Sand and Light Clay by Shear Wave Velocity[C]// National Symposium on Soil Dynamics,Chinese Society of Vibration Engineering.1990.
- [41] 黄茂松,姚仰平,尹振宇,等.土的基本特性及本构关系与强度理论[J].土木工程学报,2016,49(7):9-35.
- HUANG Maosong,YAO Yangping,YIN Zhenyu,et al.An Overview on Elementary Mechanical Behaviors, Constitutive Modeling and Failure Criterion of Soils[J].China Civil Engineering Journal,2016,49(7):9-35.
- [42] BEEN K,JEFFERIES M G.A State Parameter for Sands[J].Géotechnique,1985,35(2):99-112.
- [43] JEFFERIES M, BEEN K. Soil Liquefaction[M]. Abingdon, UK: Taylor & Francis,2006.
- [44] BEEN K,CROOKS J H A,BECKER D E, et al.The Cone Penetration Test in Sands:Part I,State Parameter Interpretation[J].Géotechnique,1986,36(2):239-249.
- [45] BOUCKOVALAS G D,ANDRIANOPOULOS K I,PAPADIMITRIOU A G.A Critical State Interpretation for the Cyclic Liquefaction Resistance of Silty Sands[J].Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2003,23(2):115-125.
- [46] SHUTTLE D A,CUNNING J.Liquefaction Potential of Silts from CPTu[J].Canadian Geotechnical Journal,2007,44(1):1-19.
- [47] LEE M J,KIM R,HONG S J,et al.Evaluation of State Parameter of Crushable Jeju Sand Using Cone Resistance[J].Marine Georesources & Geotechnology,2011,29(1):30-48.
- [48] BOBEI D C,LO S R,WANATOWSKI D,et al.Modified State Parameter for Characterizing Static Liquefaction of Sand with Fines[J].Canadian Geotechnical Journal,2009,46(3):281-295.
- [49] 储亚,蔡国军,刘松玉.基于 CPTU 原位测试状态参数的液化判别方法研究[J].地震工程学报,2014,36(4):905-910.
- CHU Ya,CAI Guojun,LIU Songyu.Study on Liquefaction Estimation Method Based on State Parameters of CPTU in Situ Measurement[J].China Earthquake Engineering Journal,2014,36(4):905-910.
- [50] DO J,HEO S B,YOON Y W,et al.Evaluating the Liquefaction Potential of Gravel Soils with Static Experiments and Steady State Approaches[J].KSCE Journal of Civil Engineering,2017,21(3):642-651.
- [51] HUANG A B,TAI Y Y,LEE W F,et al.Field Evaluation of the Cyclic Strength Versus Cone Tip Resistance Correlation in Silty Sands[J].Soils and Foundations,2009,49(4):557-567.
- [52] STAMATOPOULOS C A. An Experimental Study of the Liquefaction Strength of Silty Sands in Terms of the State Parameter[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2010,30(8):662-678.
- [53] JEFFERIES M G, DAVIES M P. Soil Classification by the Cone Penetration Test: Discussion[J]. Canadian Geotechnical Journal,1991,28(1):173-176.
- [54] ROBERTSON P K.Evaluation of Flow Liquefaction and Liquefied Strength Using the Cone Penetration Test[J].Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2010,136(6):842-853.
- [55] BEEN K,JEFFERIES M G,CROOKS J H A,et al.The Cone Penetration Test in Sands:Part II,General Inference of State[J].Géotechnique,1987,37(3):285-299.
- [56] 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,1992:41-49.
- [57] BEEN K,JEFFERIES MG.Towards Systematic CPT Interpretation[C]//Proceedings of the Wroth Symposium,Oxford.1992:44-55.
- [58] SHUTTLE D,JEFFERIES M.Dimensionless and Unbiased CPT Interpretation in Sand[J].International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics,1998,22(5):351-391.
- [59] SCHNAID F,YU H S.Interpretation of the Seismic Cone Test in Granular Soils[J].Géotechnique,2007,57(3):265-272.
- [60] ROBERTSON P K.Estimating In-situ State Parameter and Friction Angle in Sandy Soils From CPT[C]//2nd International Symposium on Cone Penetration Testing,Huntington Beach,CA,USA.2010.
- [61] GHAFGHAZI M.Towards Comprehensive Interpretation of the State Parameter from Cone Penetration Testing in Cohesionless Soils[D].The University of British Columbia,2011.
- [62] LEBLANC C,RANDOLPH M F.Interpretation of Piezocones in silt, Using Cavity Expansion and Critical State Methods [C]//The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG),Goa,India.2008:1-6.
- [63] DEJONG J T,JAEGER R A,BOULANGER R W,et al.Variable Penetration Rate Cone Testing for Characterization of Intermediate Soils[J].Geotechnical and Geophysical Site Characterization,2012,4:25-42.
- [64] 段伟,蔡国军,刘松玉,等.无黏性土的电阻率 CPTU 状态参数确定方法及其液化评价[J].交通运输工程学报,2019,19(2):59-68.
- DUAN Wei,CAI Guojun,LIU Songyu, et al.Determining Method of Cohesionless Soil State Parameter Based on Resistivity CPTU and Liquefaction Evaluation[J].Journal of Traffic and Transportation Engineering,2019,19(2):59-68.

- [65] 段伟,蔡国军,刘松玉,等.基于 SCPTU 原位状态参数确定方法及液化应用试验研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(增刊1):3151-3162.
- DUAN Wei, CAIGuojun, LIU Songyu, et al. Experimental Study on Determination Method In-situ State Parameter and it Liquefaction Application Based on SCPTU [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38 (Suppl):3151-3162.
- [66] JEFFERIES M, BEEN K. Soil Liquefaction[M]. [S.l]:CRC Press, 2015.
- [67] ZOU H F, LIU S Y, CAI G J, et al. Mapping Probability of Liquefaction Using Geostatistics and First Order Reliability Method Based on CPTU Measurements[J]. Engineering Geology, 2017, 218:197-212.
- [68] CHEN Q S, WANG C F, HSEIN JUANG C. CPT-Based Evaluation of Liquefaction Potential Accounting for Soil Spatial Variability at Multiple Scales[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2016, 142(2):04015077.
- [69] 杨玉生,刘小生,赵剑明,等.土地地震液化评价方法及其优缺点和适用条件[J].水利水电技术,2019,50(8):185-194.
- YANG Yusheng, LIU Xiaosheng, ZHAO Jianming, et al. Methods for Evaluation Onseismic Liquefaction of Soil Mass and Their Merits, Defects and Applicable Condition[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(8): 185-194.
- [70] DUAN W, CAI G J, LIU S Y, et al. Correlations between Shear Wave Velocity and Geotechnical Parameters for Jiangsu Clays of China[J]. Pure and Applied Geophysics, 2019, 176(2):669-684.
- [71] DUAN W, CAI G J, LIU S Y, et al. In-situ Evaluation of Undrained Shear Strength from Seismic Piezocone Penetration Tests for Soft Marine Clay in Jiangsu, China[J]. Transportation Geotechnics, 2019, 20:100253.
- [72] 张晓超,裴向军,贾俊,等.饱和黄土体侧向流滑机制的试验研究[J].地质力学学报,2018,24(5):730-736.
- ZHANG Xiaochao, PEI Xiangjun, JIA Jun, et al. Experimental Study on the Lateral Flow Slide Mechanism of Saturated Loess Mass[J]. Journal of Geomechanics, 2018, 24(5):730-736.
- [73] 黄涛,牛琪瑛,汤黄俊.碎石填芯钢管桩加固抗液化特性的试验研究[J].太原理工大学学报,2016,47(1):32-35.
- HUANG Tao, NIU Qiying, TANG Huangjun. Study on Anti-liquefaction Characteristics of Gravel-filled-steel Tube Pile in Reinforcement Experiment[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2016, 47(1):32-35.