

基于电阻率 CPTU 的饱和砂土液化势评价研究

邹海峰, 刘松玉, 蔡国军*, 杜广印

(东南大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210096)

摘要: 饱和砂土的液化是地基基础震害的主要原因之一, 对饱和砂土的液化势进行有效的评估是非常重要的。由于获得无扰动试样的困难和成本限制, 原位测试方法通常用于砂土液化势的评价。目前出现了许多基于静力触探的液化评估方法, 然而还没有出现哪一种方法最可靠的结论, 高风险项目中通常采用多种方法进行综合评估, 而新的液化评估方法的研究是非常有意义的。以宿迁—新沂高速公路建设为工程背景, 采用电阻率孔压静力触探(RCPTU)对饱和粉质砂土进行了土层电阻率测试。首先, 分析了归一化锥尖阻力与电阻率的关系, 对建立电阻率液化评估方法具有指导意义。其次, 以 Robertson 修正方法给出的周期阻力比为参考值, 研究了联合电阻率和土类指数的周期阻力比计算方法, 并研究了薄黏土层和过渡层对本文所提出电阻率方法的影响。结果表明, 采用电阻率和土类指数能够对饱和砂土的液化势进行有效评估, 然而应用于薄黏土层和过渡层时会低估土的周期阻力比。

关键词: 电阻率; 孔压静力触探; 液化; 土类指数; 周期阻力比

中图分类号: TU413 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2013)07-1280-09

作者简介: 邹海峰(1988-), 男, 湖北天门人, 博士研究生, 从事现代原位测试技术等方面的研究。E-mail: zhf0728@gmail.com.

Evaluation of liquefaction potential of saturated sands based on piezocene penetration tests on resistivity

ZOU Hai-feng, LIU Song-yu, CAI Guo-jun, DU Guang-yin

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

Abstract: The liquefaction of saturated soils is a major concern for the earthquake damage of foundation, and its effective evaluation is rather important. Because of the difficulty and cost constraint of obtaining high-quality undisturbed samples, in-situ testing is commonly applied to evaluate the potential of soil liquefaction. At present, numerous methods based on the cone penetration test (CPT) have been developed, but none of them has been accepted to be the most reliable one. In high risk projects, a comprehensive evaluation based on various methods is usually adopted, and thus the research on new method to evaluate the liquefaction is still necessary. The resistivity of saturated silts and sands is measured using resistivity piezocone penetration tests for the construction of Suqian-Xinyi expressway. First, the relationship between normalized cone tip resistance and resistivity is analyzed and can contribute to the evaluation of soil liquefaction based on resistivity. Second, the study on combination of resistivity and soil behavior type index to directly calculate the cycle resistance ratio (CRR) is conducted with the CRR from Robertson modified liquefaction evaluation model as a reference. The influence of thin cohesive layers and transition zones is also analyzed. It is shown that the resistivity and soil behavior type index can be used for effective evaluation of liquefaction potential of saturated soils. The accuracy of the proposed method is distinct when the cone passes soil interface since the vertical resolution of resistivity is directly proportional to the distance between outer electrodes. Otherwise, the proposed method is not suitable to thin clay layers and transition zones as it may underestimate CRR.

Key words: resistivity; piezocone penetration test; liquefaction; soil behavior type index; cycle resistance ratio

0 引言

地震中, 土体液化常常会引起建筑物基础的不均匀沉降, 是地基基础震害的重要原因之一。因此, 有效进行饱和土液化的评估显得非常重要。通常, 饱和土液化判别方法分为室内试验和原位测试两大类。由于土样在取样及保存中难以保持原位应力状态, 获得

无扰动土样比较困难, 因而采用室内试验方法进行液

基金项目: 国家自然科学基金项目(41202203); 国家科技支撑计划项目(2012BAJ01B02); 江苏省自然科学基金重点项目(BK2010060); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(3221003202)

收稿日期: 2012-09-04

*通讯作者

化判别在工程应用上受到很大限制, 使得原位测试方法在工程中得到广泛应用^[1-3]。目前, 国际上评估土体液化常采用原位试验有标准贯入试验 (SPT) 和静力触探试验 (CPT/CPTU)。然而, 这种根据贯入阻力评估土体发生液化可能性的原位测试方法均可能存在一定误差^[4], 高风险项目中更多采用综合方法评估土体的液化势。为此, 研究并提出新的液化评估方法显然具有重要的实践意义。研究表明^[5-6], 砂土液化不仅仅受到相对密实度的影响, 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^[7-10], 因此土电阻率的改变能一定程度上反映其抗液化能力的改变。

早期 Archie^[7]定义地层因子 F 为砂性介质电阻率 ρ_0 与孔隙流体电阻率 ρ_w 之比, 并建立了孔隙率 n 和饱和度 S_r 之间的经验关系式, 表明饱和砂土的体积电阻率主要受到孔隙流体和孔隙率的影响。其后 Arulmoli 等^[11]同时测得饱和砂土的竖向电阻率 ρ_v 、水平向电阻率 ρ_h 和孔隙水电阻率 ρ_w , 以孔隙率为中间参数将饱和砂土的电阻率与液化势相关联, 兼且考虑各向异性、颗粒形状等因素对液化可能存在的影响, 研究了基于电阻率模型的饱和砂土液化评估方法。Arulanandan 等^[12]采用数值模拟对 Arulmoli 等^[11]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。然而, 本文认为, Arulmoli 等提出的电阻率模型较适用于土质均匀的场地, 主要原因在于该模型采用的关键指标之一, 即反映砂土颗粒形状特征的参数 f , 是通过绘制双对数空间中整个场地地层因子 F 随孔隙率 n 变化的曲线 ($\lg F - \lg n$ 空间中) 取斜率而得到, 也即是采用拟合的平均值 f 描述了整个场地的颗粒形状特征, 则对单个特定的场地而言, f 保持不变, 因此应用于土质空间变异性较强的场地时可能会造成显著的误差。

研究表明^[13-16], 电阻率 RCPTU 提供的土类指数 I_c 可以直接用于正常固结土层的土类划分, 且大部分情况下与室内颗粒分析试验和塑性图所给出的土分类结果符合一致。因此, 可以认为土类指数 I_c 一定程度上反映了颗粒的形状与级配特征, 且 RCPTU 能给出连续的土类指数 I_c 剖面, 尤其适用于变异性较强的复杂地质条件。结合 RCPTU 能提供土层原位电阻率测试剖面的优点, 本文研究了基于电阻率模型的饱和土液化评估原位测试方法, 联合电阻率和土类指数对砂土的液化势进行判断。

1 基于 CPTU 的饱和砂土液化评估

国际上液化评估普遍采用 Seed 等^[17]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 $CSR_{7.5}$, 衡量了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^[17]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^[18-19], 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。

基于 CPTU 的简化法可以分为确定性方法和概率方法两大类^[18-19], 工程实践中仍然较多采用确定性方法, 因该方法计算简单, 液化评估流程中的每一步均以数学公式给出, 概念明确, 且应用时间较长, 积累经验丰富。确定性方法也称为安全系数方法, 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。

1.1 等效周期应力比

Seed 等^[17]提出, 等效周期应力比 $CSR_{7.5}$ 通常采用如下公式计算:

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

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/s^2); g 为重力加速度 (m/s^2); r_d 为应力折减系数; MSF 为震级比例系数。

早期 Seed 等的研究^[17]给出的是 r_d 随深度 z 变化的取值区间, 并不存在唯一的对应函数关系式, 然而在液化评估中通常取该区间的平均值进行计算。NCEER 讨论小组^[18-19]推荐采用 Liao 等的研究成果, 应力折减系数 r_d 按下式计算:

$$r_d = \begin{cases} 1.000 - 0.00765z & (z \leq 9.15 \text{ m}) \\ 1.174 - 0.0267z & (9.15 < z < 23 \text{ m}) \end{cases} \quad (2)$$

其后尽管 Seed 等^[20]、Idriss 等^[21]、Cetin 等^[22]认为还与震级、地震最大加速度以及剪切波速等因素有关, 然而式 (2) 在工程实践中更为常用。

震级比例系数为震级 M_w 的函数, 按下式计算:

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

1.2 周期阻力比

对确定性方法而言, 周期阻力比 CRR 一直以来均是研究的重点, 许多学者提出了不同的基于 CPTU 测试技术的 CRR 计算方法^[18-26]。从严格的理论角度出发, 可靠的 CRR 依赖于高质量钻孔取样和室内动三轴试验^[21], 然而砂土难以获得无扰动试样, 重塑砂土试样使得室内试验测得的土体强度显著低于原状试样的结果, 不同程度的取样扰动使得 CRR 数据库可靠性有所降低^[21, 23]。此外, 注意到建立 CPTU 贯入阻力与 CRR 关系的数据, 来源于已经发生过震动液化后场地的测试成果分析, 此时场地条件已经发生了显著变化, 因此 CRR 的评估还受到震前与震后场地条件改变等因素的影响^[23]。受到上述因素的制约, 目前并未得出哪一种 CRR 计算方法更为可靠的结论, 高风险工程中往往采用多种方法综合评价饱和砂土的液化势, 并从保守的角度选取 CRR 计算方法进行抗液化设计。

Robertson 等^[15]提出基于 CPT 测试的液化评估方法, 在 NCEER 讨论会中^[18-19]得到了推荐, 其后得到了推广和应用。Zhang 等^[25]对这一方法中的贯入阻力归一化提出了改进, Robertson^[26]在此基础上进行了修正, 并提出了修正的 CRR 计算模型(本文称为 Robertson 修正方法)。在缺乏 CRR 数据库和室内试验条件下, 本文拟定采用 Robertson 修正方法给出的 CRR 值作为参考, 建立电阻率 ρ 和土类指数 I_c 与 CRR 的关系。Robertson 修正方法计算流程如下。

Robertson^[26]采用应力指数 n 对 CPTU 实测锥尖阻力进行了归一化, n 反映了土体所处的应力水平, 并提出了相应应力水平下的土类指数 I_c , 定义如下:

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

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

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

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。

然后根据 I_c 估算细粒修正系数 k_c 如下:

(1) 当 $I_c \leq 2.5$ 时, 若 $I_c \leq 1.64$, 或 $1.64 < I_c \leq 2.36$ 且 $F_r < 0.5\%$, 则 $k_c = 1.0$; 反之, 则

$$k_c = 5.58I_c^3 - 0.403I_c^4 - 21.63I_c^2 + 33.75I_c - 17.88. \quad (7)$$

(2) 当 $2.5 < I_c \leq 2.7$ 时

$$k_c = 6 \times 10^{-7} I_c^{16.76}. \quad (8)$$

(3) 当 $I_c > 2.7$ 时, CRR 按照黏土的静态液化处理。

采用细粒修正系数 k_c 对归一化锥尖阻力 Q_{tn} 进行修正, 得到等效纯净砂归一化锥尖阻力 $Q_{tns} = k_c Q_{tn}$ 。

最后根据 Q_{tns} 计算周期阻力比 CRR:

$$\text{CRR} = \begin{cases} 93 \left(\frac{Q_{tns}}{1000} \right)^3 + 0.08 & (50 \leq Q_{tns} \leq 160) \\ 0.833 \left(\frac{Q_{tns}}{1000} \right) + 0.05 & (Q_{tns} \leq 50) \end{cases}. \quad (9)$$

研究表明, 采用 I_c 可以对土类进行有效的鉴别, 因此 I_c 剖面连续反映了场地沿深度的土类变化特征。综合以上考虑, 联合电阻率和土类指数可以从电学特征、土类变化及应力状态等方面对饱和砂土的液化作出有效评估。而 Worth 建议^[27]理论关系式的建立最好采用无量纲变量, 以利用连续力学中的比例法则。因此本文以电阻率 $\rho_w = 10 \Omega \cdot \text{m}$ 对电阻率进行了归一化, 后续表达式中也均以变量 ρ / ρ_w 的形式给出。

2 试验研究

2.1 场地描述

试验场地位于江苏省宿(迁)新(沂)高速公路宿迁一标某施工段, 邻近骆马湖, 多河流分布, 区内地形平坦。地质构造主要为古北东向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 8 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耕植土, 其下均为粉土、粉砂, 地下水位 3.8 m。具体土层自上而下分述如下: ①层素填土, 灰色、灰黄色, 软塑, 稍湿, 以粉土、粉质黏土为主, 局部混少量建筑垃圾, 层厚为 0.9~2.2 m。②层粉土, 灰褐色、灰黄色, 软塑, 稍密, 局部夹流塑状粉质黏土透晶体, 表层广泛分布, 层厚为 3.2~5.6 m。③层粉质砂土, 灰色、灰黄色, 软塑—硬塑, 稍密—中密, 局部夹粉砂薄层, 混粉细砂颗粒, 层厚为 6.1~10.5 m。④层粉土: 灰色、硬塑, 中密, 局部夹粉砂薄层, 混粉细砂颗粒, 层厚为 4.2~7.4 m。试验场地土层的主要物理力学指标如表 1 所示。场地 15 m 以浅普遍存在液化问题。

2.2 试验设备

试验采用东南大学岩土工程研究所 2005 年初引进的美国 Hogentogler 原装多功能数字式车载 RCPTU

系统, 探头的结构图见图 1。

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

层号	土名	层厚 /m	比重 G_s	黏粒含量/%	含水率/%	液限 $w_L/%$	塑性指数 I_p	标贯锤击数 $N_{63.5}$
①	素填土	1.5	2.71	14.9	22.4	26.2	8.8	9
②	粉土	3.8	2.70	3.7	24.1	28.1	5.8	4
③	粉质砂土	9.4	2.69	5.4	33.6	28.7	5.7	10
④	粉土夹砂	未揭穿	2.68	5.6	23.6	31.6	11.3	24

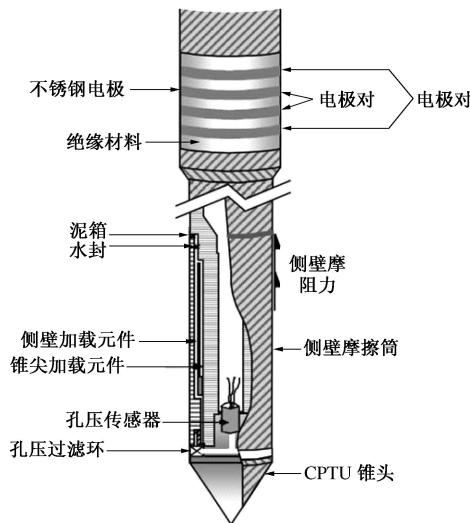


图 1 Hogentogler RCPTU 探头结构简图

Fig. 1 Schematic of Hogentogler resistivity CPTU probe

设备的核心部分为电阻率传感器, 安装在标准 CPTU 探头后部, 测试部分主要由 4 个铜质电极及内部电路系统所组成, 铜电极之间用绝缘塑料隔离, 形成“O”形环状密封系统, 以消除气体发生和电镀可能造成的误差。通过其内部的电路系统与 4 个电极同步, 连续地测量内部两对电极间的电压变化, 并根据欧姆定律编制程序计算电极周围土体的电阻率大小。两相邻铜制电极间距为 5 cm, 工作频率为 1 kHz。

现场数据采集使用 E4FCS 计算机系统, 通过 CPTSNND 软件控制电阻率数据的采集, 使用 CONEPLOT 和 CLEANUP 软件得到数据列表及有关电导率(mS/s)或电阻率图像($\Omega \cdot \text{m}$)。电阻率探头同时还包含全套其他测试功能, 可同步记录贯入过程中的锥尖阻力、侧壁摩擦力、孔隙水压力与测斜等。

2.3 试验结果

在施工段落共进行了 9 个 RCPTU 试验孔, 试验段区间为 $95 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 范围内, 孔位布点见图 2。本文总计完成 CPTU 试验点数 9 个, 试验深度均超过 15 m。图 3 给出了 RCPTU 试验的典型结果, 试验点为 K7+665 左侧 5 m。可以看出场区粉土和粉砂的锥尖阻力普遍较小, CPTU 实测孔隙水压力基本为静水压力, 并无超孔压的聚集和消散, 表明土层处于较松散的状态, 有发生液化的可能。地下水位以上土体的电阻率值较大, 而进入地下水位以下时电阻率有明显降低的过程。对于饱和土, 电阻率表现出随锥尖阻力变化的特征, 即锥尖阻力较大时, 土的电阻率也较大, 从 Archie 方程^[7]也可以看出: 电阻率增大时, 孔隙率减小, 孔隙比也相应减小, 因此锥尖阻力也有增大的趋势。由于③层粉土夹粉砂完全处于地下水位以下, 其饱和度 $S_f=100\%$, 因此作为本次研究的主要对象。

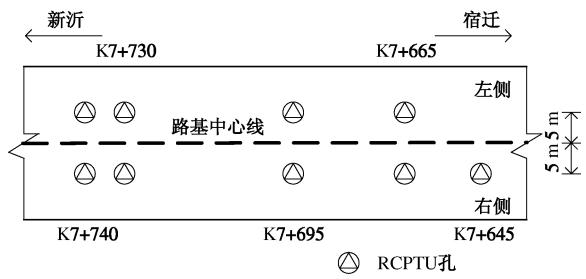


图 2 RCPTU 试验孔位布点

Fig. 2 Layout of RCPTU test points

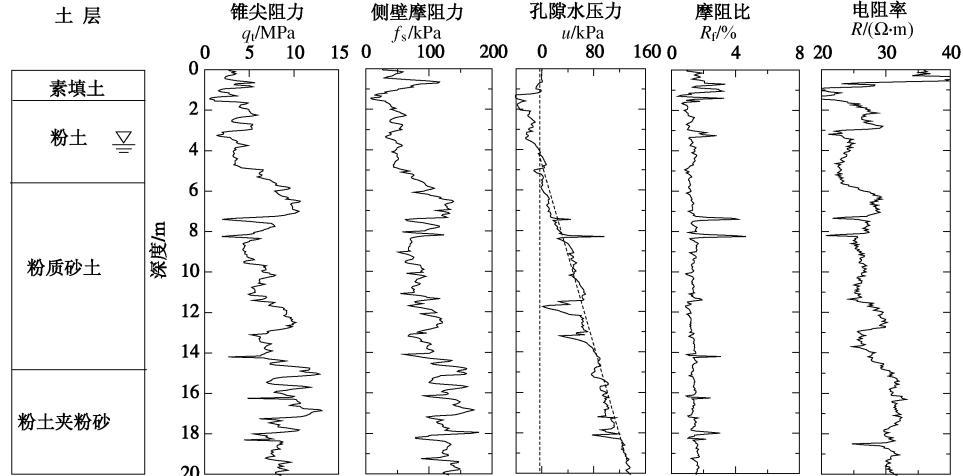


图 3 典型 RCPTU 测试结果

Fig. 3 Typical results of resistivity piezocone tests

3 电阻率指标液化评估

多功能 CPTU 测试结果表明, ③粉质砂土中局部地区夹有薄黏土层。根据液化产生的机理^[2], 对于饱和松散的粉砂和纯净砂, 可以同时发生循环液化和静态液化; 而对黏土层, 由于存在黏聚力, 当有效应力降为零时其变形仍然不会很大, 尽管也会发生循环液化, 然而此时其液化变形往往由蠕变所控制, 因此对于黏土一般仅研究其发生静态液化的可能。Idriss 等^[28]提出了 3 种方法用于计算黏土的 CRR, 指出可靠的 CRR 仅来源于高质量钻孔和室内动三轴试验。本文分析认为, Robertson 修正方法对黏土 ($I_c > 2.7$) 所提出的静态液化 CRR 计算是根据不排水抗剪强度比 s_u/σ'_{v0} 与液化指标的关系近似推导得到, 可靠性不高, 适合于低—中风险工程的液化判别; 而对 $2.5 < I_c < 2.7$ 的土层, Robertson 修正方法所给出的 CRR 计算公式也仅仅是为了保证计算的连续性而进行的过渡计算, 作为本文建立电阻率液化评估方法的参考值时可靠性同样存在质疑。由于数据库的缺乏, 国内外目前并无非常可靠的黏性土 CRR 计算方法, 兼且考虑本文中黏土夹层数据较少, 因此对 $I_c > 2.5$ 土层的液化判别不作考虑。根据锥尖阻力和土类指数, 将每个试验孔下的③粉质砂土分别分为若干亚层, 对每个亚层的数据分别取平均值进行计算, 同时剔除其中 $I_c > 2.5$ 的数据, 以保证结果的合理性。

3.1 RCPTU 测试剖面分层

Hogentogler 车载 RCPTU 测试系统每 0.05 m 提供一组测试数据, 本文包含了 9 个 RCPTU 测试孔的数据, 因此数据信息量大, 数据处理繁琐。为简化计算和降低 RCPTU 测试数据的变异性, 对测试剖面的合理分层是非常有必要的。

本文首先采用自主研发的 CPTU 数据后处理软件, 对各孔的 CPTU 测试数据进行后处理, 计算所有 CPTU 测试孔连续的土类指数 I_c 和周期阻力比 CRR 剖面。然后根据土类指数 I_c , CRR 和电阻率 ρ 将各 CPTU 测试剖面划分为若干亚层, 然后对每一亚层取 I_c , CRR 和 ρ 的平均值。具体而言采用了如下步骤:

(1) 根据 CPTU 实测资料得到连续的 I_c , CRR 和电阻率 ρ 剖面。

(2) 将土类指数 I_c 较为接近的连续数据点合并为同一亚层, 两个连续的亚层之间 I_c 平均值之差不小于 0.05, 当 I_c 剖面不存在陡峰时(也即不存在薄黏土夹层时), 两个连续的亚层之间 I_c 平均值之差不超过 0.1, 以充分利用 RCPTU 测试数据的连续性, 同时舍弃 $I_c > 2.5$ 的亚层。

(3) 对于满足条件(2)的亚层, 若同一亚层内 CRR 变异性显著, 则根据 CRR 值继续划分为若干个亚层, 将 CRR 较为接近的连续数据点合并为同一亚层, 当两个相邻的 CRR 之差超过 0.05 时, 应将其分为不同的亚层。

(4) 对于满足上述条件的亚层, 若其电阻率 ρ 变异性显著, 则作进一步划分, 方法与上述过程类似。

(5) 对划分亚层的 3 项指标 I_c , CRR 和 ρ 取平均值。

采用上述步骤的主要原因在于, 土类指数 I_c 表征了地下正常固结土层的真实剖面信息, 因此作为首次划分亚层的依据; 注意到 I_c 相近的土层, 其抗液化能力也有所不同, 为了降低取平均值操作对 CRR 的影响, 将 CRR 剖面作为第二次划分亚层的依据; 最终根据电阻率 ρ 作出更进一步的矫正。根据此方法, 将 9 个 RCPTU 测试孔的剖面划分为 144 个亚层。

3.2 电阻率与归一化锥尖阻力的关系

在缺乏室内动三轴试验的条件下, 本文采用了 Robertson 修正方法给出的周期阻力比 CRR 作为参考值, 然而注意到, Robertson 修正方法一定程度上是在保守角度上建立的液化评估方法, 也即所计算的 CRR 并非精确代表了土体真实值, 这一点主要反映在中等—较高 CRR 的条件下。因此, 建立电阻率 ρ 与 Robertson 修正方法所给出 CRR 之间的关系, 一定程度上会受到原 Robertson 修正方法准确性的影响, 当然, 在较小 CRR 的条件下还是具有一定可靠性的。

注意到所有基于 CPTU 的液化判别简化法, 均将 CRR 与归一化锥尖阻力 Q_{tn} 相关联, 这些简化法的可靠性主要来源于 CRR— Q_{tn} 图中边界线的不确定性, 而对 Q_{tn} 的计算则不存在误差。因此本文首先研究了电阻率 ρ 与归一化锥尖阻力 Q_{tn} 的关系, 分析电阻率 ρ 是否可以取代 Q_{tn} 来评价饱和土的周期阻力比 CRR。

图 4 建立了归一化电阻率 ρ/ρ_w 、归一化锥尖阻力 Q_{tn} 和土类指数 I_c 之间的关系式, 可以看出, Q_{tn} 为电阻率 ρ 和 I_c 的函数, 而并不单独与其中的某一变量(ρ 或 I_c) 存在简单的对应关系; 而 ρ 与 I_c 联合能与 Q_{tn} 建立良好的相关性关系, 表明 I_c 为连接饱和土力学特征和电学特征的有效指标之一, 这是由于锥尖阻力和电阻率同时受到土类(也即颗粒大小、级配等)的影响。同时, 从图 4 中也可以看出, 电阻率较大的土, 其归一化锥尖阻力也具有较大的趋势, 这一结论与早期 Weemee^[29]的研究相符合; 而对于正常固结的土, 土类指数越大, 土越趋向于黏性, 则归一化锥尖阻力

越小, 此现象与土类指数 I_c 在土类划分的应用相符合。

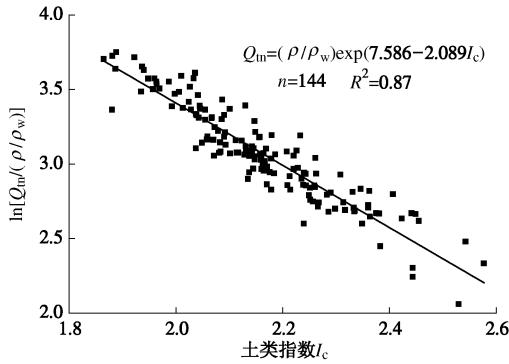


图 4 Q_{tn} 与 ρ 和 I_c 关系曲线

Fig. 4 Relationship among Q_{tn} , ρ and I_c

图 4 中 Q_{tn} , ρ / ρ_w 以及土类指数 I_c 之间关系可用如下方程式表述:

$$\left. \begin{aligned} Q_{\text{tn}} &= \frac{\rho}{\rho_w} \cdot \exp(7.586 - 2.089I_c), \\ R^2 &= 0.87, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中, ρ , ρ_w 分别为 RCPTU 测得的土体积电阻率和孔隙水电阻率, R^2 为确定系数。式 (10) 主要适用于 $1.8 < I_c < 2.6$ 的粉土和粉砂, 因本次 RCPTU 测试中较多的数据位于这一区间内, 而此区间外的数据点相对较少, 应用时需额外注意。

式 (10) 表明, 联合电阻率和土类指数理论上可以替代 Q_{tn} 评价土的 CRR。 Q_{tn} 与电阻率 ρ 存在正的相关关系, 而与 I_c 则存在负的相关关系, 这一结论也与 I_c 的定义相符合。

事实上, 对所有的液化评估方法, 周期阻力比 CRR 均主要受到归一化锥尖阻力 Q_{tn} 的控制, 且两者成正的相关关系, 也即 Q_{tn} 越大, 则 CRR 越大。根据本文对 Q_{tn} , ρ 和 I_c 关系的研究, 可以认为总体上 I_c 应当与 CRR 呈负的相关关系。

尽管在 Robertson 修正方法中, 周期阻力比 CRR 可以由归一化锥尖阻力 Q_{tn} 和土类指数 I_c 直接估算得到。然而注意到, CRR 与等效纯净砂归一化锥尖阻力 $Q_{\text{tn},cs}$ 成 3 次方关系, 也即如果采用相同的细粒修正系数对归一化锥尖阻力进行细粒含量的修正, 则由 Q_{tn} 产生的误差则会得到放大。可以预期直接替代 Q_{tn} 拟合的 CRR 与原 Robertson 修正方法给出的 CRR 存在较大的差异。鉴于此, 本文尝试直接建立电阻率 ρ 与 CRR 的关系, 避免误差传递与扩大。

3.3 电阻率与周期阻力比的关系

为了提高电阻率计算 CRR 的精度, 对 144 个亚层资料进行再次分析, 并建立了 CRR 与电阻率 ρ 和土类指数 I_c 之间的直接关系式, 其中 CRR 由 Robertson 修正方法给出。对试验数据结果的定性分析表明,

CRR 越大, 土类指数 I_c 越小, 而电阻率 ρ 越大, 这与 Q_{tn} 的变化规律相符合。本文尝试将电阻率 ρ 正幂次方与土类指数 I_c 的负幂次方组合, 即建立变量 $(\rho / \rho_w)^n / (I_c)^m$ 与 CRR 的关系 (n 和 m 为正整数, 根据测试数据拟合得到), 发现当 $n=1$ 且 $m=4$ 时, 采用曲线拟合得到的确定系数 R^2 不再发生明显提高, 表明此时精度足以满足拟合要求。拟合结果见图 5, 或以如下方程式表述:

$$\text{CRR} = 0.09 + 0.013 \exp[12.328 \times (\rho / \rho_w) / (I_c)^4], \quad (11)$$

式中, 各参数的含义如前所述, 上式适用于正常固结、 $1.8 < I_c < 2.5$ 的粉质砂土, 是否适用于该范围之外的无黏性土仍然需要更进一步的研究与验证。

图 5 所给出的 CRR, ρ 和 I_c 之间的关系表明, 随着电阻率 ρ 的增加和土类指数 I_c 的降低, 土的抗液化指标 CRR 具有增大的趋势。注意到土类指数 I_c 、电阻率 ρ 和周期阻力比 CRR 之间并不存在两两互相独立的关系。从土类指数 I_c 角度来看, 一方面, 对于纯净砂土 ($I_c < 1.8$), 当 I_c 降低时, 其粒径和强度增大, 因此抗液化能力提高^[30]; 另一方面, 对于正常固结、 $1.8 < I_c < 2.5$ 的粉质砂土, I_c 增大时表明细粒含量 (指土中粉粒与黏粒含量百分比) 增加, 此时砂粒间的空隙由细粒填充, 饱和土的孔隙率降低, 则 ρ 和 CRR 均会增大, 然而细粒表面通常带有电荷, 因此细粒含量的增大也会导致电阻率 ρ 降低。 ρ 和 I_c 均与细粒含量之间的具体关系仍然需要更进一步的研究, 或可依赖于高质量的钻孔取样和室内试验或室内模型试验。

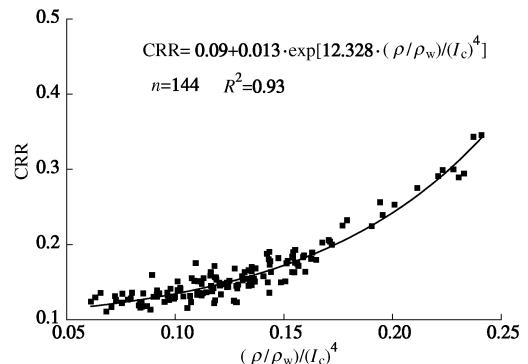


图 5 CRR 与 ρ 和 I_c 关系曲线

Fig. 5 Relationship among CRR, ρ and I_c

根据图 5 所给出的变化趋势, 从整体上而言, CRR 与电阻率 ρ 和土类指数 I_c 分别成正和负的相关关系, 结合上述分析, 可以认为, 电阻率 ρ 主要反映了土的孔隙率或相对密实度, 也即反映了土的原位密实状态特征; 而土类指数 I_c 反映了土的级配与粒径对土体抗液化能力的影响, 也即不同土类的抗液化能力有所不同。两者联合能较为准确的给出土层周期阻力比 CRR,

3.4 薄黏土层的影响

由于天然土层沉积时经历了不同的地质年代,因此地下土体往往具有较强的空间变异性,对于第四系尤为明显。黏土层与无黏性土层的液化机理有所不同,因此计算方法应当也存在差异,目前尚未出现非常可靠、可适用于所有饱和土的液化评估方法,Robertson修正方法虽然考虑了这一点,然而对于黏性土液化评估仍然存在可靠性不足的缺点。其原因在于黏性土液化资料的不足,在高 CRR 区域,所有的液化评估方法均趋于从保守角度出发,选择较低的边界线作为液化评估依据^[23-24]。

本文所提出的方法同样有其局限性,主要在于测试资料中黏性土数据的缺乏和可靠 CRR 来源的不确定性。图 6 给出了基于本文电阻率的液化评估方法与 Robertson 修正方法计算 CRR 结果的对比,包括了 9 个 CPTU 测试孔下 144 个粉质砂土亚层和黏性土层的数据。由于薄黏土层数据较少,分布零散,因此并未划分亚层,每个数据点以该深度处实测值计算。图 6 表明,对于 $1.8 < I_c < 2.5$ 的粉质砂土,本文提出的电阻率方法计算结果与 Robertson 修正方法给出的 CRR 值基本符合,这一结果位于 0.1~0.35 的低至中等 CRR 区间内,该区间内的 Robertson 修正方法具有较高的可靠度^[4],因此其给出的 CRR 可以作为参考值。对于薄黏土层,本文方法给出的 CRR 严重偏离 Robertson 修正方法的计算值,主要表现在于低估了 CRR。

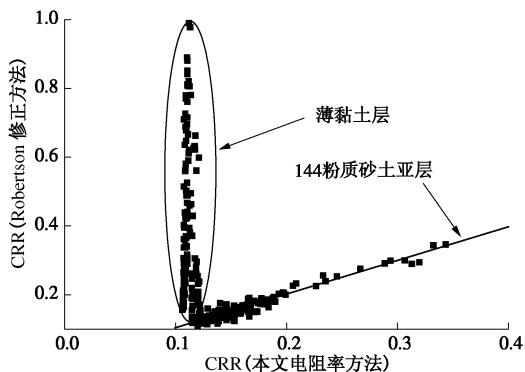


图 6 本文电阻率方法与 Robertson 修正方法计算 CRR 对比

Fig. 6 Comparison of CRR values from proposed method and Robertson modified method

分析本文电阻率方法对于薄黏土层周期阻力比 CRR 预测产生较大误差的原因,认为主要受到黏土与无黏性土的液化机理不同的影响。黏性土由于具有黏聚力而往往发生静态液化,其周期阻力比 CRR 普遍较高,与此同时饱和黏性土由于颗粒表面带有电荷,电阻率 ρ 普遍较低,此时 CRR 与 ρ 并不一定成正的相关关系,因此方程式(11)并不适用。且本文电阻率方法中 ρ 主要反映了土的孔隙率或密实状态,对于

黏性土的静态液化而言,孔隙率的影响尚未明确。

与薄黏土层对本文电阻率方法评价土体 CRR 可靠性有关的另一现象在于过渡层效应。当电阻率 RCPTU 探头贯入成层土体中时,不仅其贯入阻力受到上、下土层之间强度和刚度不同的影响^[14],电阻率 ρ 也受到上、下土层之间电学特性不同的影响。由于 4 个铜制电极之间存在一定的距离,如本文采用的 Hogentogler 车载 RCPTU 测试系统中,两相邻电极之间的间距为 5 cm,因此当铜制电极穿过不同土层间的分界面时,测得的电阻率 ρ 也会产生一定的误差。当探头由黏性土进入无黏性土层,上部的黏性土电阻率较小,使得测得的分界面处无黏性土电阻率 ρ 也会偏低,从而导致 CRR 预测值偏低。过渡层效应影响深度范围正比于外围两个铜制电极之间的间距,本文中分界面上下 15 cm 深度范围内电阻率 ρ 均会受到过渡层效应的影响。在该范围内,应当注意式(11)的使用。

对于所有依赖于 CPT/CPTU 贯入阻力的液化评估方法,其可靠性均受到过渡层效应的影响,主要表现在于锥尖阻力上。Robertson^[14]指出,过渡层效应对锥尖阻力的影响范围可达到土层分界面前后各 15 倍探头直径距离,具体取决于上、下土层的强度-刚度特性和原位有效应力水平。国际标准 CPTU 探头直径为 3.57 cm,因此,当探头由黏性土进入无黏性土时,其过渡层影响范围可达土层分界面前后 54 cm。相比之下,本文电阻率方法受到过渡层效应的影响更低,且影响范围更明确。

3.5 方法验证

为验证所提出方程式的可靠性,以《公路桥梁抗震设计细则》(JTGTB02-01-2008)^[31]所规定标准贯入试验 SPT 方法提供的液化评估结果为依据,对本文方法和 Robertson 修正方法进行了对比分析。为便于采用安全系数 F_s 进行直观的对比研究,定义 SPT 方法安全系数 $F_s = N_m/N_{cr}$, N_m 和 N_{cr} 分别为实测和临界标贯击数。若 $F_s > 1$ 则判别为不液化;反之,则判别为液化。两个相邻 RCPTU 测试孔和标准贯入试验孔的数据分析结果如图 7 所示,表明在绝大部分的数据点下,本文所提出的基于电阻率的 CRR 计算值与 Robertson 方法得到的 CRR 基本符合一致,与国内规范对液化与否的判别基本上得到相同的结论;发生较大差异之处在于 $I_c > 2.5$ 时,如图 7 中 6.3~6.5 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,而本次研究中,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。

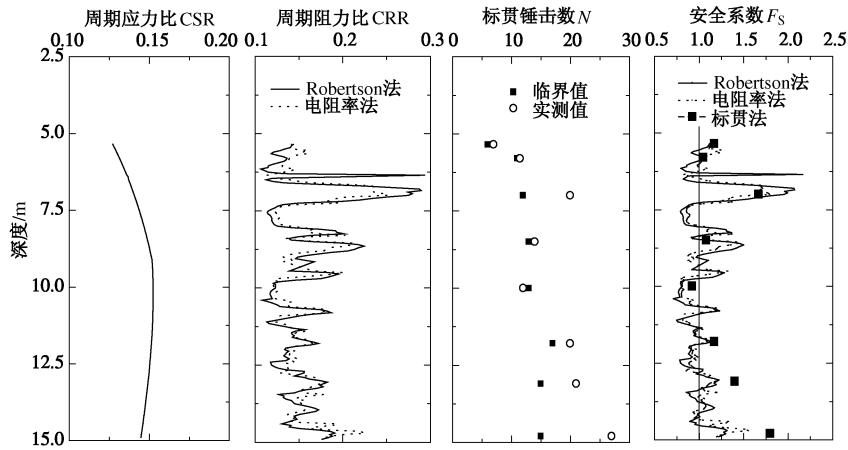


图 7 典型验算结果

Fig. 7 Typical results of model validation

4 结 论

本文研究了采用电阻率孔压静力触探 RCPTU 测试技术进行饱和土液化评估的方法, 建立了周期阻力比 CRR 与电阻率 ρ 和土类指数 I_c 之间的关系, 初步得出了如下结论:

(1) 电阻率表现出随锥尖阻力变化的特征, 也即锥尖阻力较大时, 土的电阻率也较大; 而受到土类的影响, 归一化锥尖阻力与电阻率并不成简单的线性关系, 而还与土类指数 I_c 有关, 同时也表明土类指数 I_c 为连接饱和土力学特征和电学特征的有效指标之一。

(2) 对于 $1.8 < I_c < 2.6$ 的正常固结土, 归一化锥尖阻力 Q_{tn} 并不单独与电阻率 ρ 成简单相关关系, 但是可以表征为 ρ 和 I_c 的函数, 这一关系对于建立基于电阻率的液化评估方法具有指导意义。

(3) 对于 $1.8 < I_c < 2.5$ 的正常固结粉质砂土, 采用电阻率 ρ 和土类指数 I_c 可对 CRR 作出有效评估, 本文电阻率方法得到的 CRR 与 Robertson 修正方法给出的结果基本符合, 对液化的判别应当具有类似的准确性, 然而计算更为简便; 同时也为液化评估提供了一个新的角度, 也即根据电阻率反映饱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。

(4) 提出的电阻率方法与 Robertson 修正方法存在一些相同点和不同点。相同点在于, 首先采用了相同的土类指数 I_c 计算方法; 其次, 采用了 Robertson 修正方法给出的 CRR 作为参考值。不同之处在于, 本文采用统计和分析方法建立了 ρ 和 I_c 与 CRR 的关系, 这一关系式独立于原 Robertson 修正方法, 且与之相比计算更为简便。

(5) 提出的电阻率方法用于薄黏土层时会低估其周期阻力比 CRR, 原因在于黏土与无黏性土的液化机理存在差别, 这一结论也会导致过渡层效应对本文方法的正确理解和使用, 在工程实践中应用时应当注意这一点。

参 考 文 献:

- [1] GB50007—2002 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002. (GB50007—2002 Code for design of building foundation[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2002. (in Chinese))
- [2] LUNNE T, ROBERTSON P K, POWELL J J M. Cone penetration testing in geotechnical practice[M]. London: Chapman & Hall, 1997.
- [3] CAI G J, LIU S Y, ANAND J P. Liquefaction assessments using seismic piezocone penetration (SCPTU) test investigations in Tangshan region in China[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2012, 41: 141–150.
- [4] 蔡国军, 刘松玉, 童立元, 等. 基于 CPT 测试的国内外砂土液化判别方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(5): 1019–1027. (CAI Guo-jun, LIU Song-yu, TONG Li-yuan, et al. Evaluation of liquefaction of sandy soils based on cone Penetration test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(5): 1019–1027. (in Chinese))
- [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] 蔡国军, 刘松玉, 邵光辉, 等. 基于电阻率静力触探的连云港海相黏土成因特性分析[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(4): 529 - 535. (CAI Guo-jun, LIU Song-yu, SHAO Guang-hui, et al. Analysis of formation characteristics of marine clay based on resistivity cone penetration test (RCPT)[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **30**(4): 529 - 535. (in Chinese))
- [11] ARULMOLI K, ARULANANDAN K, SEED H B. New method for evaluating liquefaction potential[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, **111**(1): 95 - 114.
- [12] 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.
- [13] JEFFERIES M G, DAVIES M P. Use of CPTU to estimate equivalent SPT N60[J]. Geotechnical Testing Journal, 1993, **16**(4): 458 - 468.
- [14] ROBERTSON P K. Interpretation of cone penetration tests—a unified approach[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, **46**(11): 1337 - 1355.
- [15] ROBERTSON P K, WRIDE C E. Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, **35**(3): 442 - 459.
- [16] LI D K, JUANG C H, ANDRUS R D, et al. Index properties-based criteria for liquefaction susceptibility of clayey soils: a critical assessment[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, **133**(1): 110 - 115.
- [17] SEED H B, IDRISI I M. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1971, **97**(9): 1249 - 1273.
- [18] YOUD T L, IDRISI 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.
- [19] YOUD T L, et al. 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.
- [20] SEED R B, CETIN K O, MOSS R E S, et al. Recent advances in soil liquefaction engineering and seismic site response evaluation[C]// Proceedings of 4th International Conference and Symposium on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, University of Missouri, Rolla, 2001.
- [21] IDRISI I M, BOULANGER R W. Semi-empirical procedures for evaluating liquefaction potential during earthquakes[C]// Joint Conference, 11th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering (SDEE), and The 3rd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering (ICEGE), Berkeley, 2004: 32 - 56.
- [22] 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.
- [23] MOSS R E S, 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.
- [24] JUANG C H, FANG S Y, KHOR E H. First-order reliability method for probabilistic liquefaction triggering analysis using CPT[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, **132**(3): 337 - 350.
- [25] ZHANG G, ROBERTSON P K, BRACHMAN R W I. Estimating liquefaction-induced ground settlements from CPT for level ground[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, **39**(5): 1168 - 1180.
- [26] ROBERTSON P K. Performance based earthquake design using the CPT[C]// Keynote lecture, IS-Tokyo, 2009.
- [27] WROTH C P. The interpretation of in situ soil test. 24th Rankine Lecture[J]. Géotechnique, 1984, **34**(4): 449 - 489.
- [28] IDRISI I M, BOULANGER R W. Soil liquefaction during earthquakes[M]. Oakland: Earthquake Engineering Research Institute, MNO-12, 2008.
- [29] WEEMEES I A. Development of an electrical resistivity cone for groundwater contamination studies[D]. Vancouver: The University of British Columbia, 1990.
- [30] JUANG C H, KU C S, CHEN C C. Simplified model for evaluating soil liquefaction potential using CPTU[C]// Proceedings of the 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing. Huntington Beach, 2010, **3**: 347 - 354.
- [31] JT/T B02-01-2008 公路桥梁抗震设计细则[S]. 北京: 人民交通出版社, 2008. (JT/T B02-01-2008 Guidelines for seismic design of highway bridges[S]. Beijing: China Communications Press, 2008. (in Chinese))