

基于静力触探与剪切波速联合测试的砂土 液化判别方法

段 伟^{1,2,3}, 赵泽宁², 蔡国军^{2,3}, 刘松玉², 董晓强¹, 陈瑞锋²

(1. 太原理工大学 土木工程学院, 山西 太原 030024; 2. 东南大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 211189;

3. 安徽建筑大学 土木工程学院, 安徽 合肥 230601)

摘要: 基于逻辑回归算法提出一种静力触探(CPT)与剪切波速(V_s)联合测试方法(CPT- V_s 联合方法),并结合唐山地震液化案例对CPT- V_s 相关性方法、 q_c/G_0 方法和CPT- V_s 联合方法进行了比较。结果表明:3种方法的场地液化判别准确率分别为89%、78%和100%,整体液化判别准确率分别为94%、50%、94%;CPT- V_s 相关性方法适用范围受参数值限制, q_c/G_0 方法过于保守,造成非液化区误判;CPT- V_s 联合方法不受参数值限制,可给出较为满意的结果。

关键词: 砂土;液化;静力触探(CPT);剪切波速;周期阻力比
中图分类号: TU443 **文献标志码:** A

accuracies of liquefaction discrimination of the three methods are 94%, 50%, and 94%, respectively; the application scope of CPT- V_s correlation method is limited by parameter values, and the q_c/G_0 method is too conservative, resulting in a large discrimination error in the non-liquefied area; the method proposed is not affected by the limitation of parameter values, and can give satisfactory results.

Key words: sand; liquefaction; cone penetration test (CPT); shear wave velocity; cycle resistance ratio

Liquefaction Discrimination of Sand Based on Cone Penetration Test Combined Shear Wave Velocity Test

DUAN Wei^{1,2,3}, ZHAO Zening², CAI Guojun^{2,3}, LIU Songyu², DONG Xiaoliang¹, CHEN Ruifeng²

(1. College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China; 3. School of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China)

Abstract: A method of cone penetration test (CPT) combined shear wave velocity (V_s) test (CPT- V_s combination method) was proposed based on logistic regression algorithm. In connection with the liquefaction cases of Tangshan earthquake, the comparison was done among CPT- V_s correlation method, q_c/G_0 method and CPT- V_s combination method. It is shown that the site liquefaction discrimination rates of CPT- V_s correlation method, q_c/G_0 method and CPT- V_s combination method are 89%, 78% and 100%, respectively, and the overall

在地震荷载作用下,饱和土体液化导致建筑设施不均匀沉降或结构破坏,因此液化触发评估是液化震害预防的首要任务。静力触探(CPT)作为最主要的原位测试技术,被广泛用于土体液化判别^[1-4],目前基于CPT的液化判别方法已经取得了重要进展^[4-5]。基于CPT或孔压静力触探(CPTU)的液化判别方法可提供详细的剖面图,具有近似连续、可重复测量的优点^[6]。然而,基于CPT的液化判别方法需要根据土体特性进行相应修正,这在细粒含量较高的砂土液化判别时显得尤为重要^[4,7]。

近年来,利用剪切波速(V_s)对砂土液化进行评估已受到国内外广泛关注,并取得了重要的研究成果^[8-9]。该方法的重大优势在于其基本独立于土体特性,如细粒含量和颗粒压缩性^[7],但测试间隔一般为1.0 m或1.5 m,得到的结果缺乏详细的地层信息,而CPT测试间隔一般为0.05 m或0.10 m,可获取连续曲线,并得到较为详细的地层信息^[7]。上述2种方法都是基于大量的历史液化案例数据库,这些数

收稿日期: 2021-03-26

基金项目: 国家自然科学基金(52108332,42072299,41877231);中国博士后科学基金(2021M702421)

第一作者: 段 伟(1989—),男,工学博士,主要研究方向为现代原位测试技术、环境岩土工程。

E-mail: zbdxdw@163.com

通信作者: 蔡国军(1977—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为现代原位测试技术、环境岩土工程。

E-mail: focuscai@163.com



论文
拓展
介绍

数据库中涉及的土体主要为新近沉积的(全新世)或没有胶结的土体。然而,在无法同时具备CPT和 V_s 测试的条件下,采用CPT- V_s 相关性方法可提供一个经济的解决方案^[7,10]。一些学者对CPT与 V_s 测试2种方法进行了比较^[10-11]。例如,Robertson^[7]对基于CPT与 V_s 的液化判别方法进行了对比,给出了同时使用CPT与 V_s 测试进行液化判别的优势。Green等^[11]分析了基于CPT与 V_s 液化判别方法的相对有效性,接受者操作特性曲线(ROC)分析表明,相比于CPT方法,基于 V_s 测试方法计算的安全系数 F_s 能够更好地区分砂土液化与非液化。

在核电站等较为复杂的高风险项目中,往往在同一位置用CPT或CPTU与 V_s 测试方法,以便相互验证,也可采用地震波CPT(SCPT)或地震波CPTU(SCPTU)的形式进行一次测试。通常都是2种测试手段对应2种方法分别进行液化评价,在一种方法中使用两者的组合数据仍受到一定的限制,相关研究也较少^[10]。

回顾了采用CPT或CPTU与 V_s 联合测试技术进行液化评估的方法,并在此基础上通过编译数据库,基于逻辑回归(logistic)算法给出了CPT与 V_s 联合测试方法(CPT- V_s 联合方法)。以唐山地震液化SCPTU数据为基础,对不同方法进行比较,分析并验证CPT或CPTU与 V_s 联合测试技术在地震液化判别中的有效性。

1 应力框架下CPT法和 V_s 法液化评估

国际上普遍采用Seed等^[12]提出的应力简化法,即将地震振动产生的剪应力与液化发生所需的剪应力进行比较。前者采用周期应力比(S),后者采用周期阻力比(R),因此安全系数可定义为 $F_s=R/S$ 。若 $F_s>1$,则将土体判别为不液化;反之,则判别为液化。

1.1 周期应力比

周期应力比是基于场地地震设计参数计算的,

$$R = \exp \left(\frac{(0.0073V_{s1})^{2.8011} - 2.6168 \ln M_w - 0.0099 \ln \sigma'_{v0} + 0.0028F_c - 0.4809\Phi^{-1}(P_L)}{1.946} \right) \quad (5)$$

式中: F_c 为细粒含量; P_L 为液化概率; Φ 为标准正态累积分布函数。Kayen等^[14]认为,液化概率 $P_L=50\%$ 时,所对应的 $F_s=1$,因此可得到 $P_L=50\%$ 时对应的 R 值。

Seed等^[12]首次提出简化法,而后被国际地震工程研究中心(NCEER)研讨会采纳^[13],成为最常用的简化法。考虑地震震级的影响,将 S 转换为震级 $M_w=7.5$ 时的等效 $S_{7.5}$,表达式如下所示:

$$S_{7.5} = 0.65 \frac{\sigma'_{v0}}{\sigma'_{v0}} \frac{a_{\max}}{g} \frac{r_d}{M} \quad (1)$$

式中: σ'_{v0} 为土体计算深度处竖向总应力,kPa; σ'_{v0} 为土体计算深度处竖向有效应力,kPa; a_{\max} 为地震动峰值加速度, $m \cdot s^{-2}$; g 为重力加速度, $m \cdot s^{-2}$; r_d 为应力折减系数; M 为震级比例系数。

1.2 CPT法计算 R

周期阻力比是衡量土体抗液化性能的指标,Robertson等^[4]提出了基于CPT计算等效周期阻力比($R_{7.5}$)的方法,成为国际上CPT液化判别通用法, $R_{7.5}$ 的表达式如下所示:

$$R_{7.5} = \begin{cases} 93 \left(\frac{q_{c1N,cs}}{1000} \right)^3 + 0.08, & 50 < q_{c1N,cs} \leq 160 \\ 0.833 \left(\frac{q_{c1N,cs}}{1000} \right) + 0.05, & q_{c1N,cs} \leq 50 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $q_{c1N,cs}$ 为等效归一化锥尖阻力。 $q_{c1N,cs}$ 由归一化锥尖阻力 q_{c1N} 与细粒含量校正因子 k_c 得到,计算式如下所示:

$$q_{c1N,cs} = k_c q_{c1N} \quad (3)$$

1.3 V_s 法计算 R

Andrus等^[8]基于归一化剪切波速 V_{s1} 提出了 $R_{7.5}$ 的计算式,如下所示:

$$R_{7.5} = 0.022 \left(\frac{V_{s1,cs}}{100} \right)^2 + 2.8 \left(\frac{1}{215 - V_{s1,cs}} - \frac{1}{215} \right) \quad (4)$$

$$V_{s1,cs} = K_{fc} V_{s1} = K_{fc} V_s (P_a / \sigma'_{v0})^{0.25}$$

式中: $V_{s1,cs}$ 为等效纯净砂归一化剪切波速; K_{fc} 为细粒含量校正因子; P_a 为标准大气压力。

Kayen等^[14]基于贝叶斯分析提出了剪切波速概率方法,如下所示:

2 CPT与 V_s 联合测试下液化判别法

2.1 CPT- V_s 相关性液化判别法

Robertson^[7]将当时最新的基于 V_s 和CPT的液化判别方法进行比较,不仅可以实现基于CPT的方

法中相关“细粒”校正的独立评估,还给出了同时使用CPT和 V_s 测试(SCPT或SCPTU)对砂土液化进行评估的优势。

Robertson^[15]提出了主要针对全新世土、无胶结土的归一化剪切波速 V_{sl} 与归一化锥尖阻力 q_{c1N} 的相关关系,如下所示:

$$V_{sl} = (\alpha_{vs} q_{c1N})^{0.5} \quad (6)$$

$$\alpha_{vs} = 10^{(0.55I_c + 1.68)}$$

式中: I_c 为土分类指数。 V_{sl} 的单位为 $m \cdot s^{-1}$ 。

根据式(3)将 q_{c1N} 转换为 $q_{c1N,cs}$,可得到

$$V_{sl} = \left(\frac{\alpha_{vs} q_{c1N,cs}}{k_c} \right)^{0.5} \quad (7)$$

在基于CPT的液化判别的液化阻力比 R 求解公式中,对于 $50 < q_{c1N,cs} \leq 160$ 情况,可将式(2)中的 $q_{c1N,cs}$ 换成 V_{sl} ,即可得到

$$R_{7.5} = 93 \left(\frac{k_{cl}}{\alpha_{vs}} \frac{V_{sl}^2}{1000} \right)^3 + 0.08 \quad (8)$$

式中: k_{cl} 为 k_c 的修正形式。由于在高细粒含量下,基于CPT的液化判别法所估计的 R 低于Kayen提出的基于 V_{sl} 计算的 R 值,在高 V_{sl} 下更为明显^[7]。相比Kayen等^[14]提出的 V_s 的相关关系式,由Robertson等^[4]提出的基于土分类指数(I_c)的校正因子较为保守。因此,Robertson^[7]提出了以下校正因子的修正形式:

$$k_{cl} = 1.779 3 I_c^3 - 8.430 1 I_c^2 + 14.386 I_c - 7.728 2 \quad (9)$$

式(9)适用范围为 $1.60 < I_c < 2.60$;当 $I_c \leq 1.60$ 时, $k_{cl} = 1.0$ 。虽然CPT与 V_s 的相关性有一定的不确定性,但是当土体具有相似地质成因及年代时这种不确定性会降低。实际上,对于Robertson^[7]所提的相关关系式,平均相对标准误差仅为10%左右。因此,Robertson^[7]提出的CPT- V_s 相关性方法可用于液化评估,弥补单纯采用CPT判别液化的不足,将该方法称为方法一。

2.2 CPT与 G_0 联合液化判别法

Roy^[16]指出,无论锥尖阻力 q_c 还是剪切波速 V_s ,与液化阻力比 R 的相关性并不良好,而 q_c/G_0 与 R 表现出较强的相关性,其中 G_0 为小应变剪切刚度。这主要是由于 q_c/G_0 依赖于塑性剪切强度参数摩擦角和剪胀角,而摩擦角和剪胀角与液化阻力密切相关^[16]。基于室内和现场24个场地的试验数据,Roy^[16]提出了 q_c/G_0 与 $R_{7.5}$ 的非线性相关关系,称为地质年代法。 $R_{7.5}$ 计算式如下所示:

$$R_{7.5} = \left(a + b \frac{q_c}{G_0} \right)^{-\frac{1}{c}} \quad (10)$$

式中: a 、 b 、 c 为相关参数。全新世土所对应的相关参数 a 、 b 、 c 分别为74.957 4、-303.427 0、1.580 1;更新世土所对应的相关参数 a 、 b 、 c 分别为9.903 6、-63.679 5、1.541 6。 $G_0 = \rho V_s^2$,其中 ρ 为土体密度。该方法称为方法二。

2.3 CPT与 V_s 联合液化判别法

CPT贯入过程是大应变响应过程, V_s 测试属于小应变范畴。将CPT和 V_s 测试联合起来,能够相互补充,以此来表征不同应变水平下的土体颗粒系统行为。Bán等^[10]联合CPT和 V_s 测试技术提出了液化评估方法。该方法分别基于CPT数据库和 V_s 数据库给出,数据库主要是指Moss等^[5]的CPT数据库和Kayen等^[14]的 V_s 数据库以及其他数据,但并未对数据质量可靠性等级进行筛选。另外,该方法采用的是基于Seed和Idriss应力法框架下Boulanger等^[17]提出的CPT液化判别法,而工程实践中应用Robertson等^[4]提出的CPT液化判别法。

本研究中采用Ku等^[18]整理的CPT数据库,该数据库共有165个CPT案例记录(125个液化案例,40个非液化案例),源于16次大地震,其中152个案例来自于文献[19],其余13个案例来自于文献[20]中更新的中国唐山地震案例。需要说明的是,上述数据库中不存在被认为“不可靠的C类数据”^[21]。Robertson^[7]指出,基于式(6)所得到的CPT- V_s 相关关系, V_s 的计算误差很小。因此,采用Robertson^[7]提出的CPT- V_s 相关关系(见式6),在Ku等^[18]整理的CPT数据库(165个案例)中增加剪切波速数据列,然后基于逻辑回归方法构建模型,建立CPT- V_s 联合方法。

在逻辑回归方法中,液化概率可表示为^[21]

$$P_L(X) = \frac{1}{1 + \exp(-(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \cdots + \beta_n x_n))} \quad (11)$$

式中: x_1, x_2, \cdots, x_n 为液化影响因素; $\beta_0, \beta_1, \cdots, \beta_n$ 为回归系数; $0 \leq P_L(X) \leq 1$ 。由最大概率原则确定回归系数,然后建立似然函数,如下所示:

$$L(X; B) = \prod_{j=1}^m (P_L(X))^{y_j} (1 - P_L(X))^{(1-y_j)} \quad (12)$$

式中: y_j 为指示指标,当液化发生时, $y_j = 1$,当为非液化时, $y_j = 0$; m 为数据组数。一般 β 的最优解可通过液化概率的极值点求得。当 $L(X; B)$ 取最大值时,得到的 $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \cdots, \hat{\beta}_n$ 将是 $\beta_0, \beta_1, \cdots, \beta_n$ 的最佳估计。取 $P_L(X)$ 对 $\beta_0, \beta_1, \cdots, \beta_n$ 求偏导数,可建立似然函数

方程组。为了求解方便,采用 $\ln L(X; B)$ 进行分析,对于 $\ln L(X; B)$ 的极值存在

$$\frac{\partial \ln L(X; B)}{\partial \beta_i} = 0, i = 0, 1, 2, \dots, 5 \quad (13)$$

$$P_L = \frac{1}{1 + \exp(0.066q_{c1N} + 0.054V_{s1} - 1.055M_w - 0.018\sigma'_{v0} - 6.818 \ln S - 18.955)} \quad (14)$$

采用极限状态原理,在给定 P_L 下,周期阻力比 R 可表示为

$$R = \exp\left(\frac{0.066q_{c1N} + 0.054V_{s1} - 1.055M_w - 0.018\sigma'_{v0} - 18.955 - \ln(1/P_L - 1)}{6.818}\right) \quad (15)$$

液化判别结果的准确率可以直接反映模型评价结果的合理性,即反映实测值与预测值之间的吻合程度。表1给出了通过式(15)计算得到的预测值、场地实际液化观测值的对比情况以及每种情况下预测准确率。在模型回归过程中,当预测的液化概率大于0.5(50%)时,模型系统就认为液化,反之,则认为非液化。从表1可看出,39个非液化场地中有29个判别为非液化,预测准确率为74.4%;123个液化场地中有116个判别为液化,预测准确率高达94.3%。对于所有案例,液化预测准确率为89.5%,说明该模型整体预测效果较好。

表1 逻辑回归模型预测结果

Tab. 1 Prediction results of logistic regression model

观察值	预测值		预测准确率/%
	非液化	液化	
非液化	29	10	74.4
液化	7	116	94.3
整体预测准确率			89.5

图1给出了液化概率 $P_L=50\%$ 时的 $S_{7.5}$ 曲面。值得注意的是,该液化曲面是在 $M_w=7.5$, $\sigma'_{v0}=100$ kPa下得出的。CPT- V_s 联合方法受到联合CPT/CPTU液化贯入阻力参数 q_{c1N} 、 V_{s1} 、 M_w 和 σ'_{v0} 参数的影响。如图1所示,50%的液化概率边界曲线具有一定的保守性,可将其作为确定性边界面。该模型称为方法三。

需要说明的是,上述方法一、方法二和方法三都与CPT和 V_s 原位测试相关。方法一主要是CPT单一测试,通过式(8)得到基于CPT的剪切波速液化判别结果,可减少单纯使用基于CPT的判别方法时需根据土壤细粒含量信息进行锥尖阻力的修正;方法二是由 q_c 和 G_0 给出的, G_0 需要 V_s 才能得到,因此方法二是联合CPT与 V_s 2种原位测试给出的间接方法;方法三是CPT与 V_s 测试同时进行,结合两者的优势给出的方法(见式(14)或式(15))。

以Ku等^[18]整理的数据库为样本,将解释变量 q_{c1N} 、 V_{s1} 、 M_w 、 σ'_{v0} 和 S 代入式(13),通过计算求得 β_0 , β_1, \dots, β_5 ,分别为-18.955、0.066、0.054、-1.055、-0.018、-6.818。因此,液化概率 P_L 计算式为

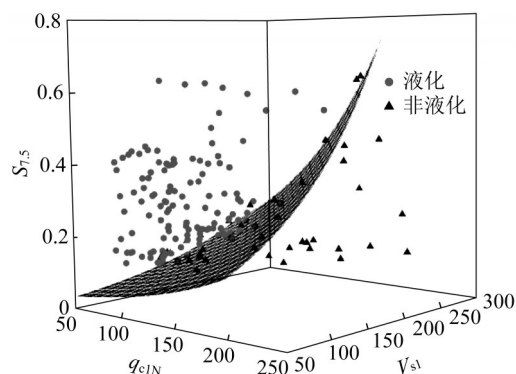


图1 当 $P_L=50\%$ 时液化阻力比曲面

Fig. 1 Curved surface of liquefaction resistance ratio when $P_L=50\%$

3 试验研究

3.1 试验场地

1976年唐山7.8级大地震所引发的砂土液化是造成灾害的主要原因之一,震后国内外专家通过各种原位测试手段对砂土液化原因进行了调查。30年后,中美联合专家组采用多功能CPTU原位测试技术对唐山场地进行了再调查,从现场取样并进行了室内试验,对场地的液化进行了再评价。

受地震影响的地区位于山前地区。液化主要发生在松散至中密的粉细砂或细砂到中粗纯净砂,而非液化部分主要在密实纯净砂沉积物下部。针对该液化场地,中美联合专家组在27个试验点进行了CPTU现场原位测试,其中16个试验点为确定的液化或非液化场地^[20],具体各CPTU钻孔的基本信息如表2所示。大部分试验点位于近代沉积的滦河新冲积扇、近海的海陆交互相沉积和海积平原以及陡河等河流的河漫滩、一级阶地等场地。以T7场地(唐山东大夫坨)为例进行液化分析,由于唐山地区沉积土属于全新世地质年代,因此采用Roy^[16]提出的方法进行液化阻力比 R 的估计。

表 2 SCPTU试验统计数据					
Tab. 2 Statistical data of SCPTU tests					
SCPTU 孔号	场地位置	深度/m	地下水 位/m	$a_{\max}/$ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	液化 与否
T1	唐山陡河桥	7.25	3.70	0.64	是
T2	唐山洼里	8.55	1.25	0.53	是
T3	丰南县胥各庄	7.95	1.50	0.64	否
T4	丰南县高庄子	7.00	1.10	0.64	否
T5	唐山粮种厂	4.60	3.00	0.64	否
T6	唐山西大夫坨	7.00	1.50	0.64	是
T7	唐山东大夫坨	8.70	3.00	0.64	是
T8	唐山老边庄	11.50	2.20	0.64	是
T9	丰南县稻地	7.00	1.10	0.64	否
T10	丰南县	8.00	1.45	0.64	是
T11	丰南县范庄	4.85	0.85	0.61	是
T12	丰南县宣庄	13.70	1.55	0.58	是
T13	丰南县草各庄	16.00	1.05	0.58	是
T14	丰南县阎家庄	3.40	1.25	0.54	是
T15	滦县余庄	7.00	1.00	0.27	是
T16	滦县东坨子头	16.00	3.50	0.26	否

3.2 试验方法及设备

试验设备采用东南大学岩土工程研究所引进的美国 Vertek-Hogentogler 多功能数字式车载 CPTU 系统。该系统配备了具有最新功能的测试探头,由钻探卡车、CPT 系统两部分组成。探头规格符合国际标准,孔压透水元件厚度为 5 mm,位于锥肩位置,探头的有效面积比 a 为 0.8。贯入速率为 $2\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$,沿深度每隔 5 cm 采集一组常规 CPTU 参数,每隔 1 m 暂停贯入,随后开始地震波测试并采集数据,测试

原理如图 2 所示。值得注意的是,所测试的剪切波速与 CPTU 参数相互独立^[6]。

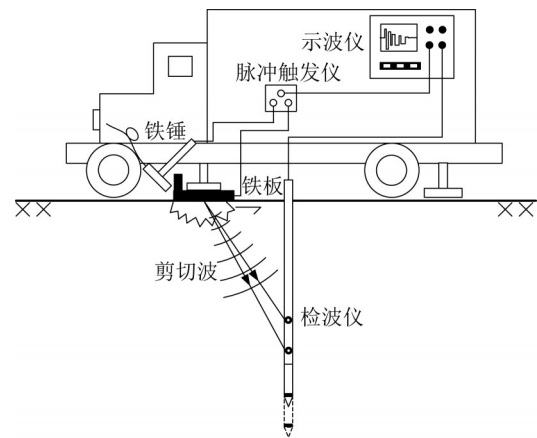


图 2 SCPTU原理示意图
Fig. 2 Schematic diagram of of SCPTU principle

3.3 试验结果

图3给出了典型的SCPTU剖面图。图3中, q_c 、 f_s 、 R_f 、 u_2 、 V_s 分别表示锥尖阻力、侧壁摩阻力、摩阻比、孔隙水压力、剪切波速。由图3可知,土体依次为填土、粉质黏土、粉质砂土、粉质黏土、细砂、粉质黏土、粉细砂、粉质黏土、砂。深度 6 m 到 10 m 土层为细砂,是液化关键层。可以看出,孔隙水压力 u_2 小于或等于静水压力 u_0 的深度区域,土体存在潜在剪胀行为。

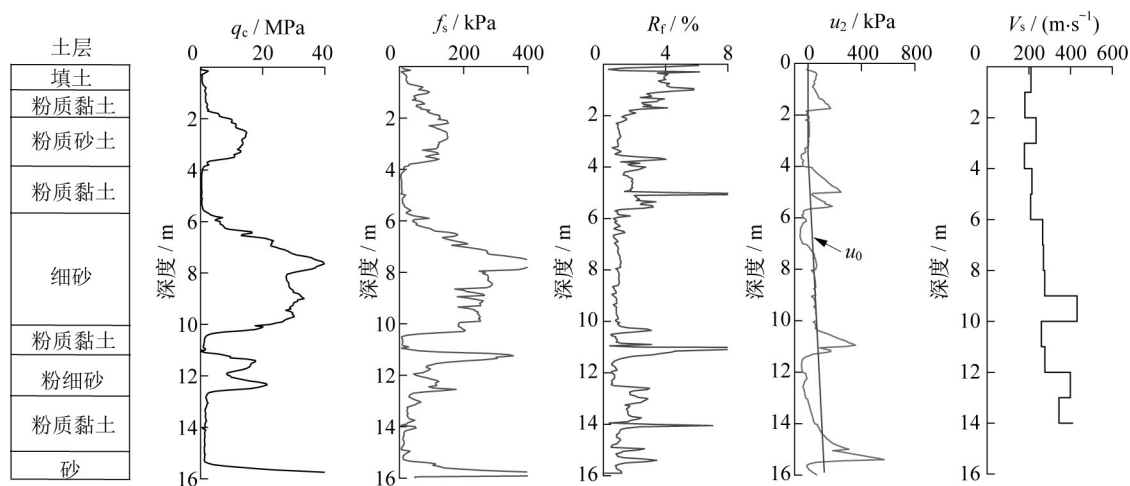


图 3 典型 SCPTU 剖面图(T16)
Fig. 3 Typical SCPTU profile(T16)

4 液化评价结果及对比

值得注意的是,当前 SCPTU 与 1978 年唐山地震发生时隔 40 年之久,地震后测试的 V_s 可能略有所

增加,但这种增加很难与当前 SCPTU 结果区分开来。就土层随时间的变化而言,地表以下土层变化不大,相比于地质年代引起的土层变化,40 年时要小的多,因此可忽略间隔时间的影响。唐山地震场

地属于全新世沉积土,因此采用相应的 q_c/G_0 方法进行分析。

以T7场地为例,该场地峰值水平地面加速度为 $0.64g$ 。图4给出了3种试验方法对比结果。结合图4a和文献[20]可知,T7场地液化关键层在 $3.0\sim 4.0$ m之间,地下水位约3 m。图4b分别给出了基于常规方法(CPT法、 V_s 法)、CPT- V_s 相关性方法、 q_c/G_0 方法及CPT- V_s 联合方法对T7测点的液化判别结果。通过对比分析可以看出,基于CPT与 V_s 的常规方法得到了相同的液化判别结果,相比而言,基于 V_s 的方法较基于CPT的方法更为保守。

对于方法一、二、三,整体而言,3种方法都对T7场地的液化给出了较为准确的评估。值得一提的是,基于CPT法能够给出土层的连续剖面信息,进而可进行土层剖面连续的液化判别。在4.5 m到

6.3 m之间存在断点,这是由于 q_c 非常大,土体密度也很大,为非液化区。CPT法中 $q_{c1N,cs} \leq 160$,当 $q_{c1N,cs} > 160$ 时,并未给出相关计算式,此时认为土体非常硬、密实,不易被液化。方法二和方法三的公式中并未给出相对应的 q_c 范围。方法二在6 m附近的判别结果与其他方法不一致,可能原因是方法二具有较强的保守性,另一方面方法二中所采用的数据库并未涉及到全球范围,数据库中 S 的室内结果与现场结果不能很好地吻合,并且其中一些 q_c 数据是基于标准贯入试验(SPT)推测得到的,原始测试参数的不确定也会影响评价结果。综上所述,T7测点的液化区域为 $3.0\sim 4.5$ m及 $6.2\sim 8.5$ m,6 m附近为不液化区域。因此,采用CPT- V_s 联合方法可对高风险及重要工程进行液化评价,SCPTU成为该类工程的首选原位测试技术。

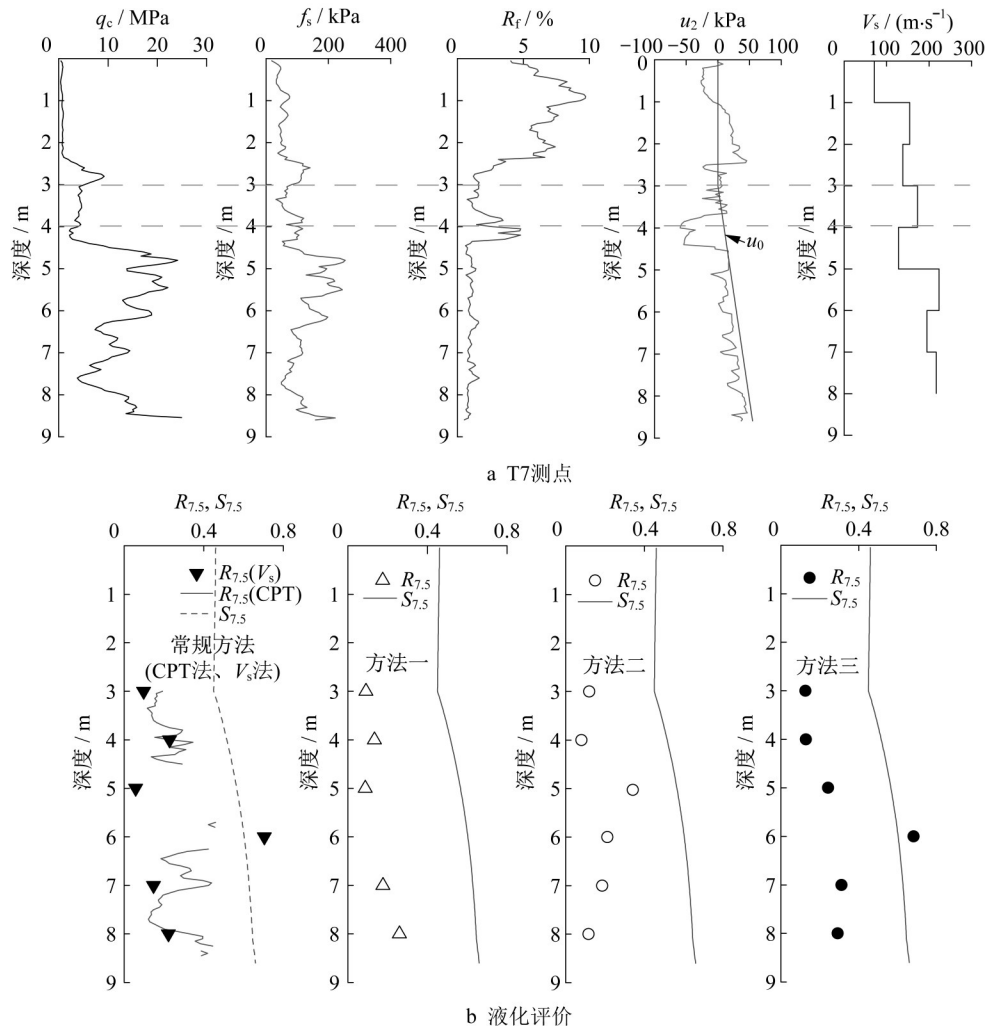


图4 T7场地液化评价结果

Fig. 4 Liquefaction potential evaluation results of T7 site

假定每个测试场地都位于水位以上,通过各测试关键层内的CPTU参数及 V_s 测试参数,基于上述3种方法分别评价唐山地震场地的液化情况,如表3所示。由表3可知,方法一的液化案例中仅有1个误判,非液化区有1个实际液化观测点,4个非液化案例(T3、T4、T9和T16)由于锥尖阻力超出范围,无法给出准确的判别结果。方法二中液化区仅有2个误判为非液化点,而非液化点仅有1个正确判别。方法三中的液化案例全部判别正确,非液化区仅有2个误判为液化点。上述方法存在不同的保守性及不确定性,但从整体上看,方法一和方法三都能够较为准确地对液化与非液化场地进行判别。从液化危害的角度看,液化场地的判别至关重要,因此方法三相比于方法一较优,而方法二的保守性过高,导致非液化区判别失真。需要说明的是,方法一仅适用于 $50 < q_{c1N,cs} \leq 160$ 内的工况,超过该范围的在表3中进行了标注。国际通用CPT法(Robertson法)未给出 $q_{c1N,cs} > 160$ 时的表达式,当 $q_{c1N,cs} > 160$ 时,贯入阻力较大,一般认为是不液化的,由于 $q_{c1N,cs} > 160$ 的液化案例数据点较少,无法给出准确的表述。

表 3 基于不同方法的液化评价结果

Tab. 3 Evaluation results of liquefaction potential based on different methods

场地序号	液化评估结果(是否液化)			
	现场观测	方法一	方法二	方法三
T1	是	否	是	是
T2	是	是	是	是
T3	否	否(>160)	是	否
T4	否	否(>160)	是	否
T5	否	否	否	否
T6	是	是	否	是
T7	是	是	是	是
T8	是	是	否	是
T9	否	否(>160)	是	是
T10	否	是	是	是
T11	是	是	是	是
T12	是	是	是	是
T13	是	是	是	是
T14	否	否	是	否
T15	否	否	是	否
T16	否	否(>160)	是	否

表4汇总了3个方法的液化预测性能。方法一、二、三的场地液化预测准确率分别为89%、78%、100%,相应的整体液化判别准确率分别为94%、50%、94%。方法一中通过CPT与 V_s 的转换,基于CPT从 V_s 角度进行液化判别,避开了基于CPT法中通过细粒含量对 q_c 进行的修正,判别率较高。方法二的数据库中部分 q_c 值来自标准贯入试验SPT的

转换,并且没有结合绝大多数的地震液化历史案例,方法保守性过强,造成非液化区判别误差较大。方法三中综合了CPT与 V_s 测试2种原位测试方法,对于适用范围没有参数限制,将液化案例全部判断正确。方法三对于高风险项目评价是较好的方法,但需要同时进行CPT和 V_s 测试,因此SCPTU成为液化判别最优的原位测试技术。

表 4 3种方法液化预测性能

Tab. 4 Liquefaction prediction performance of three methods

方法类型	液化分类	案例数	准确预测数	准确率/%
方法一	液化	9	8	89
	非液化	7	7	100
	整体	16	15	94
方法二	液化	9	7	78
	非液化	7	1	14
	整体	16	8	50
方法三	液化	9	9	100
	非液化	7	6	86
	整体	16	15	94

5 结论

(1) 基于CPT的液化判别方法需要根据土体特性如细粒含量进行修正,而基于 V_s 测试的液化判别方法基本独立于土体特性,无法获取详细的地层信息。因此,将CPT与 V_s 测试结合能够充分发挥两者的优势,给出较为准确的液化判别结果。

(2) CPT- V_s 相关性方法、 q_c/G_0 方法及CPT- V_s 联合方法对于液化区的判别准确率相对较高,分别为89%、78%、100%,但 q_c/G_0 方法偏于保守,导致非液化区的判别失真。结果表明,SCPTU可被视为提供数据的有力工具,是现场液化的多重评估或高风险项目液化评价的首选原位测试。

(3) 采用CPT- V_s 联合方法进行液化判别,将小应变特性与大应变测量联系起来,可综合表征土体抗液化强度的能力,并且没有参数范围的适用性限制。

(4) 结合 q_{c1N} 、 V_{s1} 和 $S_{7.5}$ 提出了液化概率判别公式,该公式初步尝试采用2个土性参数代替1个土性参数来评估液化的可能性。

致谢 唐山地震液化场地调查SCPTU是与美国加州理工州立大学及中国地震局工程力学研究所合作完成,对 Moss 教

授团队、袁晓铭研究员团队成员的辛勤工作表示衷心感谢!

作者贡献声明:

段 伟:撰写全文。

赵泽宁:试验结果分析。

蔡国军:数据收集,论文思路提出及论文修改。

刘松玉:现场测试及论文审阅。

董晓强:论文审阅。

陈瑞锋:图表绘制。

参考文献:

- [1] 蔡国军,刘松玉,童立元,等. 基于静力触探测试的国内外砂土液化判别方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(5): 1019.
CAI Guojun, LIU Songyu, TONG Liyuan, *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.
- [2] 张继红,顾国荣. 双桥静力触探法判别上海薄夹层黏土地基液化研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(10): 131.
ZHANG Jihong, GU Guorong. Study of CPT for liquefaction estimation of sands with thin clay interlayer in Shanghai area [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(10): 131.
- [3] 李兆焱,孙锐,曹振中,等. 静力触探法对巴楚地震液化判别的适用性[J]. 岩土力学, 2010, 31(12): 3907.
LI Zhaoyan, SUN Rui, CAO Zhenzhong, *et al.* Feasibility of cone penetration test to evaluating Bachu earthquake liquefaction [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(12): 3907.
- [4] ROBERTSON P K, WRIDE C E. Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(3): 442.
- [5] MOSS R E, SEED R, KAYEN R, *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.
- [6] CAI G J, LIU S Y, PUPPALA A J. Liquefaction assessment using seismic piezocone penetration (SCPTU) test investigations in Tangshan region in China [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2012, 41: 141.
- [7] ROBERTSON P K. Comparing CPT and V_s liquefaction triggering methods [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2015, 141(9): 4015037.
- [8] 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.
- [9] 周燕国,陈云敏,柯瀚. 砂土液化势剪切波速简化判别法的改进[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(13): 2369.
ZHOU Yanguo, CHEN Yunmin, KE Han. Improvement of simplified procedure for liquefaction potential evaluation of sands by shear wave velocity [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(13): 2369.
- [10] BÁN Z, MAHLER A, KATONA T J, *et al.* Liquefaction assessment based on combined use of CPT and shear wave velocity measurement [C]//Proceeding of 5th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization. Gold Coast: Australian Geomechanics Society, 2016: 597-602.
- [11] GREEN R A, UPADHYAYA S, WOOD C M, *et al.* Relative efficacy of CPT- versus V_s -based simplified liquefaction evaluation procedures [C]//Proceeding of 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Seoul: Korean Geotechnical Society, 2017: 1521-1524.
- [12] SEED H B, IDRISS I M. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential [J]. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1971, 97(SM9): 1249.
- [13] 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(4): 297.
- [14] KAYEN R, MOSS R, 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.
- [15] ROBERTSON P K. Interpretation of cone penetration tests: a unified approach [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, 46(11): 1337.
- [16] ROY D. Coupled use of cone tip resistance and small strain shear modulus to assess liquefaction potential [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008, 134(4): 519.
- [17] BOULANGER R W, IDRISS I M. CPT-based liquefaction triggering procedure [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2016, 142(2): 4015065.
- [18] KU C, JUANG C H, CHANG C, *et al.* Probabilistic version of the Robertson and Wride method for liquefaction evaluation: development and application [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2012, 49(1): 27.
- [19] ROBERTSON P K. Performance based earthquake design using the CPT [C]//International Conference on Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering. Tokyo: CRC Press, 2009: 3-20.
- [20] MOSS R, KAYEN R E, TONG L, *et al.* Retesting of liquefaction and nonliquefaction case histories from the 1976 Tangshan earthquake [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011, 137(4): 334.
- [21] LIAO S S C, VENEZIANO D, WHITMAN R V. Regression models for evaluating liquefaction probability [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1988, 114(4): 389.