

DOI: 10.11779/CJGE20240107

中国规范 CPT 砂土液化判别模型的改进与概率形式

赵泽宁^{1,2}, 段伟³, 蔡国军^{2,4}, 武猛^{5,2}, 刘松玉²

(1. 香港科技大学土木与环境工程系, 香港; 2. 东南大学岩土工程研究所, 江苏 南京 211189; 3. 太原理工大学土木工程学院, 山西 太原 030024;

4. 安徽建筑大学土木工程学院, 安徽 合肥 230601; 5. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 静力触探 (CPT) 因其高效可靠等优点被广泛用于评估砂土液化势。目前中国常用的《岩土工程勘察规范》中典型 CPT 方法 (岩规法) 在涉及细粒和深层土的液化判别结果方面存在不合理性, 并且结果难以整合到概率风险评估中。本研究考虑细粒含量、不确定性和采样偏差的影响, 基于贝叶斯加权最大似然估计法, 建立 CPT 双曲线概率模型以改进岩规法, 并推荐采用液化概率 (P_L) = 15% 所对应的临界锥尖阻力表达式作为确定性方法。最后用实际案例验证所提模型的可靠性。结果表明: CPT 双曲线模型中的临界锥尖阻力随深度增加逐渐增大并稳定, 更能反映土体的动力特性。模型适用范围更广, 可用于深层土和细粒含量较高的土, 准确性高于岩规法和国际通用的 Robertson 和 Wride 方法。在不确定性较高的场地, 概率模型在一定程度上可以作为确定性模型的替代或补充。

关键词: 砂土液化; 静力触探; 双曲线模型; 概率; 细粒含量

中图分类号: TU413

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2025)04-0869-08

作者简介: 赵泽宁 (1998—), 男, 博士研究生, 主要从事现代原位测试技术与可靠度理论等方面研究。E-mail: zzhaocef@connect.ust.hk。

Improvement and probabilistic form of CPT-based liquefaction evaluation model in Chinese code

ZHAO Zening^{1,2}, DUAN Wei³, CAI Guojun^{2,4}, WU Meng^{5,2}, LIU Songyu²

(1. Department of Civil and Environmental Engineering, The Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong, China;

2. Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China; 3. College of Civil Engineering, Taiyuan University

of Technology, Taiyuan 030024, China; 4. School of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China; 5. School of Earth

Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The cone penetration test (CPT) is commonly used to evaluate sand liquefaction potential due to its efficiency and reliability. The typical CPT method (Chinese code method) shows unreasonable results in fine-grained and deep soils, and the results are difficult to be integrated into probabilistic risk assessments. In this study, a novel CPT hyperbolic probabilistic model is proposed to improve the Chinese code method based on the Bayesian weighted maximum likelihood estimation by considering the effects of fines content, the uncertainties and sampling bias. The critical cone tip resistance corresponding to a liquefaction probability (P_L) of 15% is recommended as the deterministic method. Case studies demonstrate the reliability of the proposed method. The results show that the critical cone tip resistance of the CPT hyperbolic model increases with the depth, and gradually stabilizes, which can better reflect the dynamic properties of soils. The model can be applied to deep and high-fines-content soils, and the performance is better than the Chinese code method and widely-used Robertson and Wride's method. For sites with high uncertainties, the probabilistic models can be used as an alternative or supplement to deterministic ones.

Key words: sand liquefaction; cone penetration test; hyperbolic model; probability; fines content

0 引言

地震引起的砂土液化会对地基及相应基础设施造成严重破坏, 因此, 如何有效地进行土体液化评价是液化震害防治的首要任务^[1-2]。静力触探试验 (CPT) 能够获取现场土层的相对连续的工程特性指标、划分

土层, 具有快速、廉价且可靠等优点, 被广泛用于液

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目 (4225206); 国家自然科学基金项目 (52108332, 42472349)

收稿日期: 2024-02-02

*通信作者 (E-mail: focuscai@163.com)

化势评价^[3-4]。

中国目前广泛采用的 CPT 液化评价法之一为《岩土工程勘察规范》(GB50021—2001)(2009 版)法^[5]: 实测锥尖阻力与锥尖阻力临界值的对比。然而, 该方法仍存在问题: 首先, 岩规法主要基于中国少量地震(如 1966 年邢台地震, 1975 年海城地震和 1976 年唐山地震)液化案例建立起来。数据量较少, 代表性较差, 模型适用于与原始资料相近的场地。

其次, CPT 液化判别方法在细粒土和深层土液化预测方面的可靠性存疑。由于原始资料中细粒土和深层土的案例较少, 该方法在这些情况下的准确性和可靠性有待进一步验证。岩规法中 CPT 锥尖阻力临界值随深度的增加而减小, 然而理论而言液化临界曲线与砂层埋深呈非线性递增关系相悖, 存在不一致性^[6-8]。对于含细粒砂土, Juang 等^[9]和 Robertson 等^[10]指出, 在同等锥尖阻力下, 细粒含量(FC)越大, 土体的抗液化能力越强^[9]。而岩规法中对液化判别锥尖阻力基准值并未修正, 影响判别结果的可靠性^[4, 6]。因此, 有必要对锥尖阻力的临界值或基准值进行相应修正。

最后, 很多模型在建立过程未考虑各类误差和不确定性的影响^[11-12]。岩规法和 Robertson 等^[10]方法(RW 法)对液化势的评价均属于确定性评价, 当实测锥尖阻力小于锥尖阻力临界值时(即安全系数 $F_s < 1$), 应判别为液化土; 否则砂土不液化(即安全系数 $F_s > 1$)。然而, 由于岩土参数的固有变异性, CPT 测试误差, CPT 判别模型不确定性的存在, 岩规法和 RW 法会对一些案例误判^[13]。目前在工程实践中, 往往通过选取较大的安全系数来避免上述问题, 而这又会导致液化判别结果偏于保守, 增大抗液化处理的成本, 未能体现灾害风险意义和决策要求。相比之下, 液化概率判别可以考虑不确定性的影响, 使决策者能够更好地理解和比较不同情况下的液化风险^[14]。截止至目前, 我国岩规法仍缺少相应的概率判别式。因此, 有必要考虑不确定性以改进中国岩规法。

为了解决上述问题, 本文考虑细粒含量、不确定性和采样偏差的影响, 基于融合贝叶斯更新技术的加权最大似然估计, 建立了 CPT 双曲线模型, 该模型包含确定性与概率形式。另外, 将提出的 CPT 双曲线模型与岩规法和 RW 法对比, 以验证所提模型优势。最后用实际案例进一步说明 CPT 双曲线模型的应用流程以及可靠性。

1 基本框架

1.1 细粒含量修正

CPT 在含细粒砂土中的贯入阻力相较于洁净砂更

低, 而细粒的存在会提升砂土的抗液化性能。因此, 忽略细粒的影响会低估其抗液化性能。为此, 本文采用国际广泛采用的 RW 法考虑细粒含量对液化评价的影响: 首先考虑覆土应力的影响, 将实测锥尖阻力 q_c 转换为归一化锥尖阻力值 q_{c1N} , 然后考虑 FC 的影响, 将标准化的 q_{c1N} 等效为洁净砂归一化锥尖阻力 q_{c1Ncs} , 最后以 q_{c1Ncs} 为实测锥尖阻力的修正值。修正后的锥尖阻力可以考虑细粒含量的影响, 进而可用于含细粒砂土的液化判别^[15]。

1.2 模型基本形式

本文采用双曲模型来进行液化判别。双曲模型是土动力学中常见模型^[7, 16-17]。考虑到砂土层埋深与地下水位埋深对砂土液化特性的共同影响, 本文所构建砂土液化双曲判别模型表达式为

$$q_{cr} = q' \cdot (1 - k_3 d_w) \left(k_2 + \frac{d_s}{d_s + k_1} \right) \quad (1)$$

式中: q_{cr} 为锥尖阻力临界值; q' 为临界锥尖阻力基准值; d_s 为土层埋深 (m); d_w 为土层埋深 (m); k_1 , k_2 , k_3 为待定系数。根据各参数的物理意义, 待定系数 k_1 , k_2 , k_3 的取值范围如下:

(1) k_1 的取值范围为 $0 < k_1 \leq 20$ 。这是因为在 d_w 不变时, q_{cr} 应随 d_s 增加而递增, 因此 k_1 应为正数; 同时由于液化层一般在 20 m 以内, k_1 的取值需小于 20 以防止 d_s 影响权重过小。

(2) k_2 的取值范围为 $0 < k_2 < 1$ 。这是因为在 d_w 和 d_s 均为 0 m 时, q_{cr} 初值为 $q'k_2$, 因此 $k_2 < 1$ 。

(3) k_3 的取值范围为 $0 < k_3 \leq 0.05$ 。这是因为需保证水位埋深修正项 $(1 - k_3 d_w) > 0$, 鉴于 d_w 通常小于 20 m, 带入水位埋深修正项中, 可知 $k_3 \leq 0.05$ 。

相较于岩规法中先后采用的线性模式、分段式线性模式和对数模式, 双曲模型能够考虑临界修正锥尖阻力在浅层和深层土的变化规律, 同时模型数学形式简单, 参数有较为明确的土力学含义^[7, 15-17]。

目前多数研究是通过历史案例回归得到式 (1) 中的待定系数^[6-7, 16]。然而, 由于模型为实际液化现象的数学简化描述, 即模型是“非完美的”, 式 (1) 存在一定的模型不确定性^[11, 14]。另一方面, 由于参数不确定性和测试误差的存在, 历史案例数据也是非完美的^[11]。为解决上述问题, 本文考虑多种不确定性的影响, 基于贝叶斯似然估计得到待定系数。该方法涉及参数范围确定, 临界锥尖阻力基准值确定, 误差传递表征, 贝叶斯似然估计等流程。

2 CPT 双曲线概率模型的建立

2.1 CPT 数据库

本文采用 Boulange 等^[18]编译的数据集 (简称 BI

表 1 综合数据库组成
Table 1 Composition of compiled databases

地表峰值加速度 a_{\max}/g	烈度	BI 数据库			Ku 数据库		
		液化	非液化	总数	液化	非液化	总数
$a_{\max} < 0.09$	—	0	0	0	0	0	0
$0.09 \leq a_{\max} < 0.19$	VII	26	24	50	17	13	30
$0.19 \leq a_{\max} < 0.38$	VIII	97	34	131	51	16	67
$0.38 \leq a_{\max} < 0.75$	IX	55	13	68	56	11	67
$a_{\max} \geq 0.75$	—	2	0	2	1	0	1
总数		180	71	251	125	40	165

数据库)建立基于 CPT 的双曲线模型。该数据库记录了全球范围内不同地区的 CPT 试验结果,具有场地类型丰富、测点分布广泛等特点。已成为全球范围内广泛认可与采纳的 CPT 数据库。另外,该数据库包含了高细粒含量的唐山与 Chi-Chi 地震数据。该数据库总共包括 253 个案例,其中液化案例、非液化案例、边缘液化案例分别为 180, 71, 2 个。另一广泛认可的数据库为 Ku 等^[14]编译的数据库(记作 Ku 数据库),同样涵盖了全球范围内的多次地震的液化案例。该数据库总共包括 165 个案例(液化案例和非液化案例分别为 125, 40 个)。

采用国际广泛使用的 BI 数据库建立模型,采用 BI 数据库和 Ku 数据库中Ⅶ度-Ⅸ度案例进行模型验证与对比分析。这可以保证模型在更广范围地震烈度下的适用性。两数据库的统计结果如表 1 所示。交叉采用两种数据库可以保证双曲线模型对不同数据库的判别稳定性,同时也能够证明该模型对不同地区液化判别的适用性。

2.2 锥尖阻力基准值

岩规法中基准值采用分段函数的形式表示,这导致基准值在不同地震烈度下不连续。同时,同一地震烈度下的样本案例的实测锥尖阻力差异较大,因此需要对锥尖阻力基准值修正。本文采用较为精确且连续的地震水平峰值加速度 a_{\max} 确定基准值,以此来解决上述问题。参考谢君斐^[19]确定各烈度区临界标贯击数基准值的方法,通过 a_{\max} 和 q_{c1Ncs} 的分布关系来确定液化区域和非液化区域的分界线,并以此作为 q' 的基准线。结果如图 1 所示。

依据 q_{c1Ncs} 在 a_{\max} 较小时,随 a_{\max} 的增加而快速增加,而当 a_{\max} 较大时, q_{c1Ncs} 随 a_{\max} 的增大而增速放缓的特点,选取双曲线模型作为基准函数。临界锥尖阻力基准线表达式为

$$q' = \frac{180a_{\max}}{0.5a_{\max} + 0.38} \quad (2)$$

由图 1 可以看出,所得到的临界锥尖阻力基准线可以良好的区分液化和非液化案例,且取值具有连续性,覆盖了常见地震烈度。式(2)在 a_{\max} 为(0.1~

0.3) g 时误差略高,这是由表达式的“不完美”导致的。鉴于临界锥尖阻力基准线只用来初步的液化/非液化划分,式(2)作为基准线是合理的。

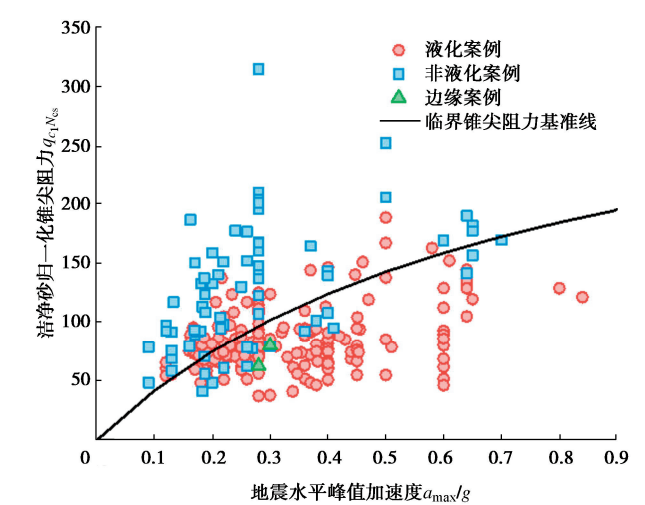


图 1 水平峰值加速度和标准化修正后的锥尖阻力的关系
Fig. 1 Statistical relationship between peak ground acceleration and normalized cone tip resistance

2.3 概率表征框架

由于模型不确定性的存在,需要对双曲模型基本形式进行修正^[11,20]。本文基于贝叶斯加权最大似然估计计算未知模型参数与模型不确定性^[21],基本形式可表示为

$$f(\Theta) = kL(\Theta)p(\Theta) \quad (3)$$

式中: $p(\Theta)$ 为先验概率分布; $L(\Theta)$ 为似然函数; k 为归一化因子; $f(\Theta)$ 为后验分布。

本文将通过构建的极限状态方程来代表液化与非液化案例的边界线^[22]。表达式为

$$\begin{aligned} g(\mathbf{x}, \mathbf{K}, \varepsilon) &= \ln(q_{c1Ncs}) - \ln(q_{cr}) + \varepsilon \\ &= \ln(q_{c1Ncs}) - \ln \left[q' \cdot (1 - k_3 d_w) \left(k_2 + \frac{d_s}{d_s + k_1} \right) \right] + \varepsilon \\ &= \ln(q_{c1Ncs}) - \ln(q') - \ln(1 - k_3 d_w) - \ln \left(k_2 + \frac{d_s}{d_s + k_1} \right) + \varepsilon \end{aligned} \quad (4)$$

式中: \mathbf{x} , \mathbf{K} 分别为输入变量向量和待定系数向量; ε 为总不确定性,通常假定为服从均值为 0 标准差为 σ_ε 正态分布变量。

考虑到误差项由输入参数误差和模型不确定性所致^[18], 同时, 为便于描述定义符号 $Q = q'$, $W = 1 - k_3 d_w$, $S = k_2 + \frac{d_s}{d_s + k_1}$, 因此极限状态方程的均值 μ_g 和标准差 σ_g 为

$$\mu_g = \ln(\hat{q}_{c1Ncs}) - \ln(\hat{Q}) - \ln(\hat{W}) - \ln(\hat{S}), \quad (5)$$

$$\sigma_g = \sqrt{\sigma_\varepsilon^2 + \sigma_m^2}. \quad (6)$$

式中: σ_m 为总参数误差。假定各参数在统计上相互独立, 总参数误差为

$$\sigma_m = \sqrt{\sigma_{\ln(q_{c1Ncs})}^2 + \sigma_{\ln Q}^2 + \sigma_{\ln W}^2 + \sigma_{\ln S}^2}. \quad (7)$$

令 \mathbf{x}_i 表示数据库中第 i 个案例的输入变量向量。对于第 i 个案例, 若液化发生, 则 $g(\mathbf{x}_i, \mathbf{K}, \varepsilon) \leq 0$, 反之亦然。当参数 $\{\mathbf{K}, \sigma_\varepsilon\}$ 的值已知时, 第 i 个案例液化和非液化的概率分别为

$$P[g(\mathbf{x}_i, \mathbf{K}, \varepsilon) \leq 0] = 1 - \Phi(\mu_{gi}/\sigma_g), \quad (8)$$

$$P[g(\mathbf{x}_i, \mathbf{K}, \varepsilon) > 0] = \Phi(\mu_{gi}/\sigma_g). \quad (9)$$

式中: Φ 为标准正态累积概率分布函数。考虑到液化与非液化案例数的不均等性 (即采样偏差), 需要通过加权系数来修正^[18]。似然函数表达式为

$$L(\mathbf{K}, \varepsilon) = \prod_{\text{液化}} P[g(\mathbf{x}_i, \mathbf{K}, \varepsilon) \leq 0]^{w_L} \cdot \prod_{\text{非液化}} P[g(\mathbf{x}_i, \mathbf{K}, \varepsilon) > 0]^{w_{NL}} \\ = \prod_{\text{液化}} [1 - \Phi(\mu_{gi}/\sigma_g)]^{w_L} \cdot \prod_{\text{非液化}} \Phi(\mu_{gi}/\sigma_g)^{w_{NL}}. \quad (10)$$

式中: w_L , w_{NL} 分别为极限状态方程中液化与非液化项的加权因子。加权因子 w_L 和 w_{NL} 取值会对参数估计的精度造成一定的影响, 根据 Boulanger 等^[18]的研究, 采用的加权因子比为 $w_{NL}/w_L = 1.5$, 其中 $w_L = 0.8$, $w_{NL} = 1.2$ 。通过将式 (10) 最大化, 即可得到对于待定系数的最优估计。

2.4 误差表征

由式 (7) 可知, 对于本研究的极限状态方程, 总参数误差由各参数 q_{c1Ncs} , Q , W , S 的误差所致。根据链式法则, 各参数误差可表示为

$$\sigma_{\ln(q_{c1Ncs})} \approx \sqrt{\sigma_{q_{c1Ncs}}^2 \left[\frac{\partial \ln(q_{c1Ncs})}{\partial \hat{q}_{c1Ncs}} \right]^2} = \frac{\sigma_{q_{c1Ncs}}}{\hat{q}_{c1Ncs}} = \text{COV}(q_{c1Ncs}), \quad (11)$$

$$\sigma_{\ln Q} \approx \sqrt{\sigma_{a_{\max}}^2 \left[\frac{\partial \ln Q}{\partial \hat{a}_{\max}} \right]^2} = \sqrt{\sigma_{a_{\max}}^2 \left[\frac{\partial \ln Q}{\partial Q} \frac{\partial Q}{\partial \hat{a}_{\max}} \right]^2} \\ = \sqrt{\sigma_{a_{\max}}^2 \left[\left(\frac{1}{\hat{a}_{\max}} \right) \left(\frac{0.38}{0.5\hat{a}_{\max} + 0.38} \right) \right]^2}, \quad (12)$$

$$\sigma_{\ln W} \approx \sqrt{\sigma_{d_w}^2 \left[\frac{\partial \ln W}{\partial \hat{d}_w} \right]^2} = \sqrt{\sigma_{d_w}^2 \left(\frac{k_3}{1 - k_3 \hat{d}_w} \right)^2}, \quad (13)$$

$$\sigma_{\ln S} \approx \sqrt{\sigma_{d_s}^2 \left[\frac{\partial \ln(S)}{\partial \hat{d}_s} \right]^2} \\ = \sqrt{\sigma_{d_s}^2 \left\{ \frac{k_1}{(\hat{d}_s + k_1)[(k_2 + 1)\hat{d}_s + k_1 k_2]} \right\}^2}. \quad (14)$$

式中: COV 为随机变量的变异系数, 可反映岩土参数具有固有不确定性。

通常采用均值和 COV 描述上述随机变量的变异性。假定数据库中的给定案例的值为其最佳估计值, 则只需确定每个案例的 COV 值^[22]。由于数据库中每个案例的 COV 值未知, 因此需要进行假定。基于参考文献^[11, 18, 21]的研究结果, 可假定 q_{c1Ncs} , a_{\max} , d_w 和 d_s 的 COV 均取值为 0.1。

3 CPT 双曲线模型性能评价

3.1 模型表达式

通过贝叶斯加权最大似然估计可得待定系数 (k_1 , k_2 和 k_3) 和模型误差项 σ_ε , 进而可得双曲线模型的表达式:

$$P_L = 1 - \Phi \left\{ \left[\ln(q_{c1Ncs}) - \ln \left[\frac{180a_{\max}}{0.5a_{\max} + 0.38} (1 - 0.039d_w) \cdot \left(0.75 + \frac{d_s}{d_s + 7} \right) \right] \right] / 0.217 \right\}. \quad (15)$$

该双曲线模型所对应的要求液化概率下临界锥尖阻力 q_{cr} 表达式为

$$q_{cr} = \frac{\frac{180a_{\max}}{0.5a_{\max} + 0.38} (1 - 0.039d_w) \left(0.75 + \frac{d_s}{d_s + 7} \right)}{\exp[0.217\Phi^{-1}(P_L)]}. \quad (16)$$

式中: Φ^{-1} 为标准正态累积概率分布函数的逆函数。

为了探究本文模型所得 q_{cr} 随深度的变化概率是否合理。图 2 比较了在 M_w 为 7.5, d_w 为 2 m, a_{\max} 分别为 0.1g, 0.2g, 0.3g, 0.4g 时 CPT 双曲线模型的临界锥尖阻力 q_{cr} 随深度的变化。图 2 同时绘制了经典的 RW 法中临界锥尖阻力与深度的关系。

可看出在不同场地烈度下, CPT 双曲线模型均满足临界锥尖阻力随深度增加而逐渐增大并稳定的特征。而 RW 法中临界锥尖阻力随深度的变化关系是异常的。具体表现为在 $d_s > 10$ m 时, 临界锥尖阻力随深度的增加而递减, 即预测结果会随深度增加逐渐偏于危险。这种现象在峰值水平加速度 a_{\max} 较大时更为明显。

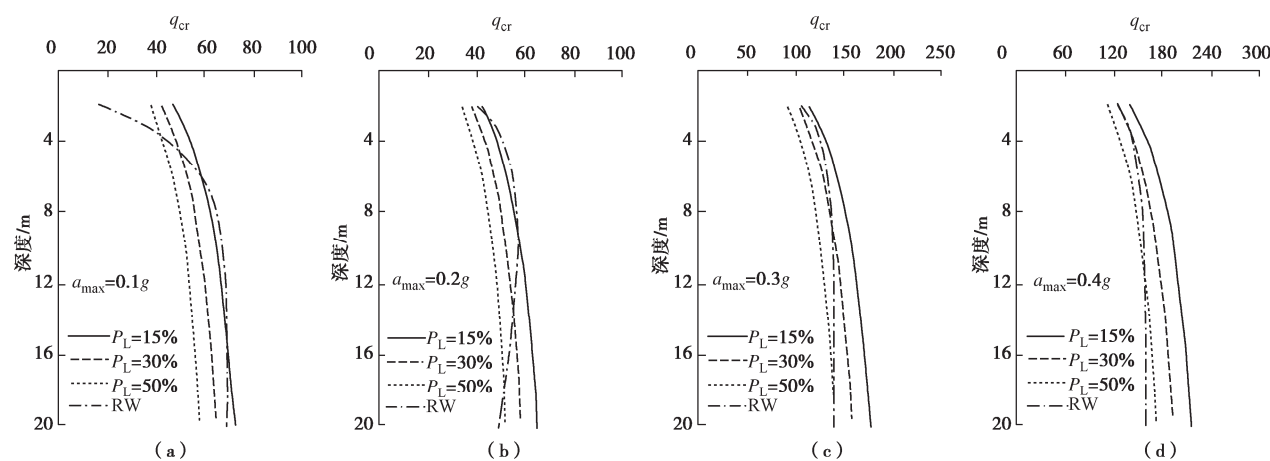


图 2 临界锥尖阻力与深度在 $M_w=7.5$, $d_w=2$ m 时的关系
Fig. 2 Relationship between q_{cr} and d_s when $M_w=7.5$, $d_w=2$ m

表 2 液化判别正确率(%)对比

		Table 2 Comparison of accuracies among proposed method, Chinese code method and RW method(%)					
烈度	场地情况	BI 数据库			Ku 数据库		
		CPT 双曲模型	岩规模型	RW 模型	CPT 双曲模型	岩规模型	RW 模型
Ⅶ	液化	76.9	61.5	46.2	94.1	17.60	88.2
	非液化	70.8	83.3	79.2	53.8	100.00	69.2
	总体	74.0	72.0	62.0	76.7	53.30	80.0
Ⅷ	液化	92.8	64.9	84.5	98.0	29.40	84.3
	非液化	73.5	61.8	76.5	75.0	100.00	81.3
	总体	87.8	64.1	82.4	92.5	46.30	83.6
Ⅸ	液化	96.4	87.3	85.5	100.0	80.40	100.0
	非液化	15.4	76.9	76.9	9.1	90.91	54.5
	总体	80.9	85.3	83.8	85.1	82.10	92.5
全部样本	液化	91.6	71.3	79.2	97.6	50.40	91.2
	非液化	62.0	71.8	63.4	50.0	97.50	70.0
	总体	83.1	71.5	74.7	87.3	61.80	86.1

另外,国际上目前通常采用 $P_L=15\%$ 时的曲线为液化确定性模型^[21-22]。在 $P_L=15\%$ 时,本文 CPT 双曲线模型的确定性形式为

$$q_{cr} = \frac{225.4a_{max}}{0.5a_{max} + 0.38} (1 - 0.039d_w) \left(0.75 + \frac{d_s}{d_s + 7} \right) \quad (17)$$

当 $q_{cl, Ncs} < q_{cr}$ 时,判定为场地发生液化,反之则认为场地没有发生液化。

3.2 CPT 双曲线模型评价与对比

为了验证CPT双曲线模型的确定性判别效果,将BI数据代入CPT双曲线模型来计算其回判准确率,并与岩规法和国际RW法的回判准确率进行比较,对比结果如表2所示。可以看出,CPT双曲线模型回判准确率最高,且和RW模型对原始样本的回判结果都优于岩规法。CPT双曲线模型对液化案例的判别正确率高于非液化案例,在Ⅸ度场地更为明显,这主要是因为CPT双曲线模型边界对应于15%的液化概率,使得液化判别结果略显保守,更适用于安全等级要求较高的场地。而传统岩规法对非液化案例判别正确率更高,模型判别结果偏于危险。

针对Ku数据库,采用本文CPT双曲线模型、RW

模型及岩规法进行新数据验证,得到的检验结果如表2所示。可以看出CPT双曲线模型精度最高,且判别正确率与岩规法相比有了大幅度的提高。同样,由于本文采用 $P_L=15\%$ 时的液化判别曲线,模型判别结果相对保守,尤其在Ⅸ度场地。而岩规法对液化案例判别准确性很差,尤其在Ⅶ场地,这使得采用岩规法判别砂土液化势具有较高的风险。

值得指出的是,虽然本文建议的CPT双曲线确定性模型较为保守,但可根据场地抗震要求,调整设计液化概率,进而依据式(16)得到对应的CPT双曲线确定性模型,这也成为本文模型的一大优势。总体而言,CPT双曲线模型显著提高了传统岩规法的液化判别准确率。

3.3 含细粒砂土中模型表现

为了分析CPT双曲线模型中含细粒砂土中的液化评估效果,将CPT双曲线模型与岩规法代入至细粒含量较高($FC \geq 15\%$)的历史案例中进行判别分析。鉴于Ku数据库中细粒含量高的样本较少,本文采用BI数据库进行验证,结果分别如图3(a), (b)所示。

由图3可知,CPT双曲线模型对于砂质土、高细粒

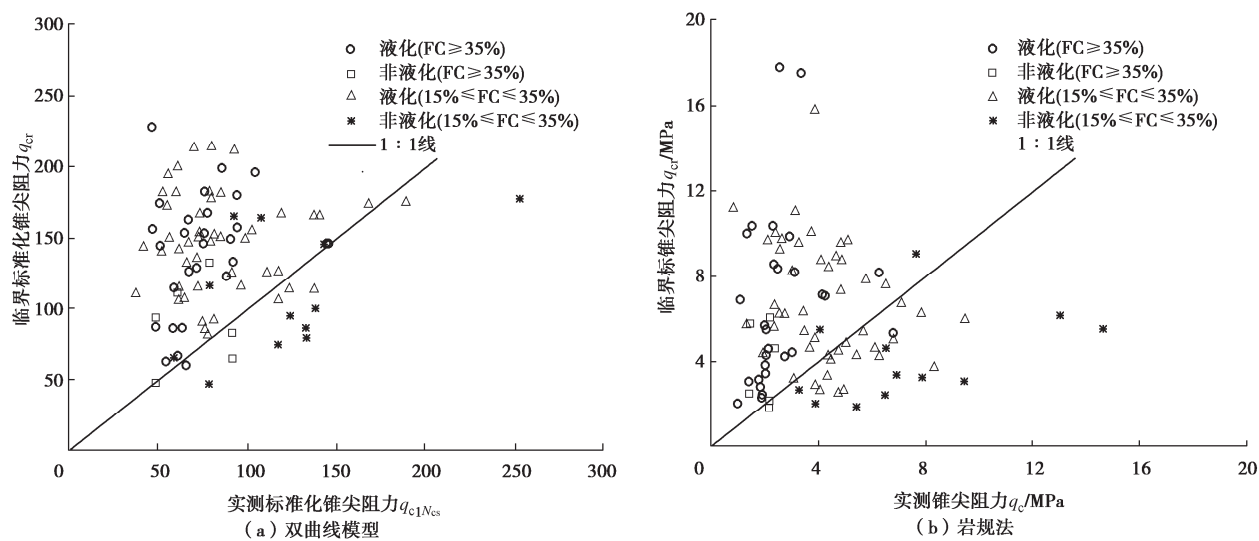


图 3 高细粒含量下判别结果
Fig. 3 Classification results in soils with high FC: (a) hyperbolic model; (b) standard method

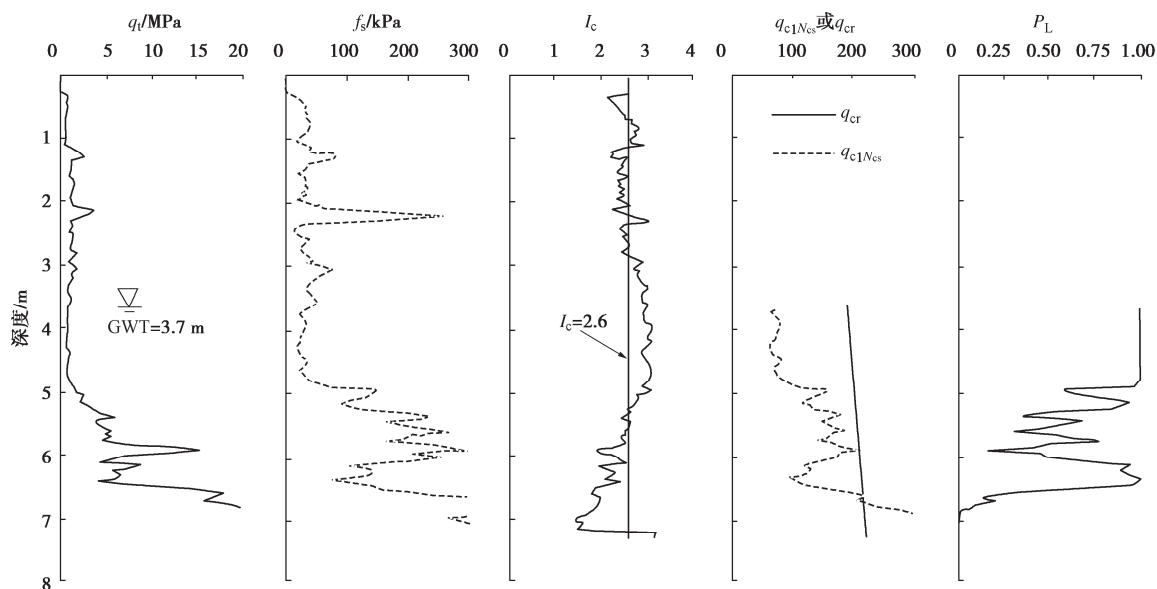


图 4 唐山地震液化案例 T1 分析
Fig. 4 Illustration of T1 site during Tangshan earthquake

含量的粉质土的辨识度和灵敏度高，能够对砂质土和粉质土进行全面液化评价，形成统一的液化判别模型。对于 $FC \geq 35\%$ 的高细粒含量土，CPT 双曲线模型易将非液化案例误判为液化案例，具有一定的保守性。相比而言，岩规法对含细粒土的判别精度明显较差，且更易将液化案例误判为非液化案例，风险性较高，这说明岩规法高估了细粒土的抗液化阻力。

4 案例验证

本节通过两个案例进行验证。第一个案例用来说明 CPT 双曲线模型的应用流程以及在细粒土中的可靠性。该案例来自唐山地震液化案例数据点 T1，根据

Cai 等^[23]研究结果，该点现场观察为液化点，地震动荷参数为 $M_w = 7.6$ ， $a_{max} = 0.64g$ ，该点地下水位位于 3.7 m 处。CPT 测试结果如图 4 所示。

Cai 等^[23]指出，该地附近发现了许多粉砂喷口，这表明粉质土发生了液化。通过 Robertso 等^[10]提出的方法计算土分类指数 I_c ，发现 3.7~5.4 m 这一土层 $I_c > 2.6$ ，具有较高的细粒含量，为粉质土。现场观测结果表明这一范围内粉质土可能发生液化，并流到地表^[23]。

对于地下水位 3.7 m 深度以下的土层，采用式 (17) 确定液化概率水平为 15% 的临界标准化锥尖阻力值 q_{cr} ，将 q_{c1Ncs} 与 q_{cr} 比较，可以看出在该层土中，

$q_{cl/Ncs} < q_{cr}$, 说明该点粉砂会发生液化。采用式 (15) 评估土体的液化概率, 可以看出该层土液化概率普遍在 65% 以上, 表明该土层很可能发生液化。综上所述, 基于 CPT 双曲线模型液化判别结果与现场观测结果一致, 能够判别砂质土和粉质土的液化势, 验证了本文方法的可靠性。

值得指出的是, 对于 3.7~5.4 m 这一区域, 土分类指数 $I_c > 2.6$, 传统 RW 方法使用受限, 需要结合其他标准进行验证。相比而言, 本文给出的 CPT 双曲线模型能够适用于粉质土, 适用范围更广。

第二个案例用来验证概率模型的可靠性与必要性。该案例源自 Ku 数据库, 选自 1989 年 Loma Prieta 地震中的 Sandhold Rd. UC-4 测点, 该点现场观察为液化点, 地震动荷参数为 $M_w = 7.0$, $a_{max} = 0.25g$, 地下水位埋深 $d_w = 2.7$ m, 在埋深 $d_s = 3.5$ m 处, $\sigma'_{vo} = 48.6$ kPa, $\sigma_{vo} = 56.4$ kPa, CPT 现场测试锥尖阻力 $q_c = 11.7$ MPa, 侧壁摩阻力 $f_s = 51.3$ kPa。基于这些参数, 岩规法与 RW 法所得安全系数均大于 1, 将该案例误判为非液化, 与现场观察结果相反。而基于上述参数, 采用 CPT 双曲线模型的概率形式可得液化概率超过 50%。此时仍具有较高的液化可能性, 因此从液化概率视角可以解释“现场观测为液化”这一现象。对于 CPT 双曲线模型确定性形式误判的测点, 概率形式实现了更可靠的预测, 在工程设计中可作为确定性判别的补充。

5 结 论

本文改进中国规范法中的 CPT 液化判别模型, 建立了基于 CPT 的双曲线概率模型, 得到 4 点结论。

(1) 基于贝叶斯加权最大似然估计建立了 CPT 双曲线模型, 模型可以考虑细粒含量、多种不确定性和采样偏差的影响, 结果可以更好地融入至风险评估框架中。

(2) 双曲模型可考虑 a_{max} , d_w 和 d_s 的影响。计算得到的临界锥尖阻力 q_{cr} 随深度增加逐渐增大并稳定, 更能反映土体的动力学特征。

(3) 采用等效洁净砂锥尖阻力考虑细粒含量对 CPT 锥尖阻力的影响, 提升了在细粒土中的适用性。CPT 双曲线模型液化判别的适用范围更广, 判别结果也更加稳定, 评判精度显著高于岩规法, 并在一定程度上优于国际广泛使用的 RW 法。

(4) 推荐采用 $P_L = 15\%$ 所对应的临界锥尖阻力表达式作为确定性方法。概率模型在一定程度上可以作为确定性模型的替代或补充。

参考文献:

- [1] YOU D T L, IDRIS 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.
- [2] CHEN G X, WU Q, ZHOU Z L, et al. Undrained anisotropy and cyclic resistance of saturated silt subjected to various patterns of principal stress rotation[J]. Géotechnique, 2020, 70(4): 317-331.
- [3] ZHAO Z N, DUAN W, CAI G J, et al. CPT-based fully probabilistic seismic liquefaction potential assessment to reduce uncertainty: integrating XGBoost algorithm with Bayesian theorem[J]. Computers and Geotechnics, 2022, 149: 104868.
- [4] 张思宇, 李兆焱, 袁晓铭. 国内外静力触探液化判别方法对比检验[J]. 岩土力学, 2024, 45(5): 1517-1526, 1539. (ZHANG Siyu, LI Zhaoyan, YUAN Xiaoming. Comparison and validation of cone penetration test-based liquefaction evaluation methods[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(5): 1517-1526, 1539. (in Chinese))
- [5] 岩土工程勘察规范: GB 50021—2001[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004. (Code for Investigation of Geotechnical Engineering: GB 50021—2001[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004. (in Chinese))
- [6] 张思宇, 李兆焱, 袁晓铭. 基于静力触探试验的液化判别新方法[J]. 岩土力学, 2022, 43(6): 1596-1606. (ZHANG Siyu, LI Zhaoyan, YUAN Xiaoming. A new method for evaluating liquefaction based on cone penetration test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(6): 1596-1606. (in Chinese))
- [7] YANG Y, CHEN L W, SUN R, et al. A depth-consistent SPT-based empirical equation for evaluating sand liquefaction[J]. Engineering Geology, 2017, 221: 41-49.
- [8] 孙 锐, 袁晓铭. 适于不同深度土层液化的剪切波速判别公式[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(3): 439-447. (SUN Rui, YUAN Xiaoming. Depth-consistent vs-based approach for soil liquefaction evaluation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(3): 439-447. (in Chinese))
- [9] JUANG C H, CHING J, KU C S, et al. Unified CPTu-based probabilistic model for assessing probability of liquefaction of sand and clay[J]. Géotechnique, 2012, 62(10): 877-892.

- [10] ROBERTSON P K, WRIDE C F. Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, **35**(3): 442-459.
- [11] ZHAO Z N, DUAN W, CAI G J, et al. Probabilistic capacity energy-based machine learning models for soil liquefaction reliability analysis[J]. Engineering Geology, 2024, **338**: 107613.
- [12] DUAN W, ZHAO Z N, CAI G J, et al. Evaluating model uncertainty of an in situ state parameter-based simplified method for reliability analysis of liquefaction potential[J]. Computers and Geotechnics, 2022, **151**: 104957.
- [13] JUANG C H, ZHANG J, SHEN M F, et al. Probabilistic methods for unified treatment of geotechnical and geological uncertainties in a geotechnical analysis[J]. Engineering Geology, 2019, **249**: 148-161.
- [14] KU C S, JUANG C H, CHANG C W, et al. Probabilistic version of the Robertson and Wride method for liquefaction evaluation: development and application[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2012, **49**(1): 27-44.
- [15] ZHANG X L, LI X Y, XU C S. Study on the corrected hyperbolic model of liquefaction evaluation for fine-grained sand[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, **139**: 106424.
- [16] 张小玲, 李秀瑜, 杜修力. 考虑细粒含量的砂土液化判别双曲线模型研究[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(3): 448-455. (ZHANG Xiaoling, LI Xiuyu, DU Xiuli. Hyperbolic model for estimating liquefaction potential of sand considering the influences of fine grains[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(3): 448-455. (in Chinese))
- [17] 贾端阳, 陈龙伟, 谢旺青, 等. 基于标准贯入试验的土壤液化判别公式锤击数基准值研究[J]. 岩土力学, 2023, **44**(10): 3031-3038. (JIA Duanyang, CHEN Longwei, XIE Wangqing, et al. Reference blow counts of standard penetration tests used in soil liquefaction evaluation formulae[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, **44**(10): 3031-3038. (in Chinese))
- [18] BOULANGER R W, IDRIS I M. CPT-based liquefaction triggering procedure[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2016, **142**(2): 04015065.
- [19] 谢君斐. 关于修改抗震规范砂土液化判别式的几点意见[J]. 地震工程与工程振动, 1984, **4**(2): 95-126. (XIE Junfei. Some comments on the formula estimating the liquefaction of sand in revised aseismic design code[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1984, **4**(2): 95-126. (in Chinese))
- [20] HU J L. A new approach for constructing two Bayesian network models for predicting the liquefaction of gravelly soil[J]. Computers and Geotechnics, 2021, **137**: 104304.
- [21] 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.
- [22] ZHANG J, WANG T P, XIAO S H, et al. Chinese code methods for liquefaction potential assessment based on standard penetration test: an extension[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021, **144**: 106697.
- [23] 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.