

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230311001

基于标贯试验的含细粒砂土液化概率判别 新模型

李萍萍, 赵少飞, 鲍俊文, 刘子源

(华北科技学院, 北京 101601)

摘要: 含细粒砂土在自然界中普遍存在, 在应用标准贯入试验判别砂土液化时, 通过对标贯击数进行修正反映砂土中细粒含量的影响。以国内外 25 次大地震收集整理 230 组实测数据为基础, 利用 Idriss 和 Boulanger、Cetin 等和 NCEER 分别提出的三种标贯击数修正公式, 通过逻辑回归建立三个液化概率计算模型, 对比三个模型, Cetin 等修正公式相应的液化概率计算模型拟合优度和预测准确性最好。根据中国《岩土工程勘察规范》(GB 50021-2001) 和美国《标准贯入测试和对开管取样的标准试验方法》(ASTM D1586-11) 的标贯击数转换关系, 推导出适合于中国规范的含细粒砂土液化概率判别新模型。回判分析表明, 新模型对基于美标的实测液化数据具备良好的判别性能。利用台湾集集地震实测 288 组数据, 比较了新模型与建筑抗震设计规范 (GB 50011—2010) (以下简称“建规法”) 判别方法。结果表明, 新模型的总体判别成功率 94.1% 高于建规法 77.4%, 其中液化场地判别成功率 93.9% 略低于建规法的 99.4%, 但非液化场地成功率 86.3% 远远高于建规法判别成功率 48.4%。

关键词: 液化判别; 标准贯入试验; 细粒含量; 逻辑回归

中图分类号: TU435 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)05-1133-07

A New SPT-Based Model for Liquefaction Probability Discrimination of Fine-Grained Sandy Soil

LI Pingping, ZHAO Shaofei, BAO Junwen, LIU Ziyuan

(North China University of Science and Technology, Beijing 101601)

Abstract: Fine-grained sandy soil is widespread in nature. When the standard penetration test (SPT) is used for liquefaction discrimination of sandy soil, the influence of fine grain content in sandy soil is reflected by modifying the standard penetration blow count. Based on 230 sets of measured data collected and collated from 25 major earthquakes worldwide, using three correction formulas for SPT blow counts proposed by Idriss and Boulanger, Cetin et al. and NCEER, this study established three liquefaction probability calculation models using logistic regression. A comparison of the three models showed that the one based on correction formula proposed by Cetin et al. demonstrated the best goodness-of-fit and prediction accuracy. According to the conversion relationship between blow counts in the *Chinese Code for Investigation of Geotechnical Engineering* (GB 50021—2001) and *Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils* (ASTM

* 收稿日期: 2023-03-11; 修回日期: 2023-04-06

作者简介: 李萍萍 (1996—), 女, 硕士研究生。研究方向为岩土工程防灾减灾。E-mail: 2530675796@qq.com

通信作者: 赵少飞 (1965—), 男, 教授, 博士。主要从事岩土工程稳定性分析。E-mail: 200600778zsf@ncist.edu.cn

D1586-11), a new model for liquefaction probability discrimination of fine-grained sandy soil suitable for the Chinese Code was derived. Back-analysis indicated that the new model performed well in discriminating liquefaction data measured using the American Standard. Using 288 sets of data from the Chi-Chi earthquake in Taiwan, the new model was compared with the discrimination method from the Code for Seismic Design of Buildings (GB 50011-2010) (hereinafter referred to as "Building Code method"). The results showed that the overall discrimination success rate of the new model (94.1%) exceeded that of the Building Code method (77.4%), with a success rate of liquefaction sites of 93.9%, slightly lower than that of the Building Code method (99.4%), but the success rate of non-liquefaction sites (86.3%) was significantly higher than that of the Building Code method (48.4%).

Keywords: liquefaction discrimination; standard penetration test; fine grain content; logistic regression

0 引言

地震引起的场地液化往往会伴随着喷砂冒水、震陷、滑坡等一系列地表破坏。在1994年美国加州、1999年台湾集集、2010到2011年新西兰以及2011年日本东北地区太平洋近海等多次地震中,均有含细粒的砂土液化发生^[1]。因此,研究含细粒砂土液化判别方法对抗震减灾至关重要。

目前,砂土液化判别方法已经有很大进展,主要是基于现场试验或者室内试验建立的,包括标准贯入试验SPT、静力触探试验CPT、剪切波速法 V_s 和室内动三轴试验等,其中SPT应用历史较长,实测数据资料比较丰富。以SPT为基础的液化判别确定性方法主要是国内《建筑抗震设计规范》^[2](以下简称“建规法”)和国外H.B.Seed等^[3]提出的“简化方法”。砂土液化的影响因素较多,而且这些因素具有不确定性。为此,学者们开展了系统的液化概率判别方法研究,分别采用径向基函数^[4-5]、人工神经网络^[6-7]、贝叶斯理论^[8-9]、逻辑回归^[10-15]和双曲线^[16]等方法建立了液化概率判别模型。肖诗豪等^[17]对多种广义线性的概率液化判别模型进行了对比。目前,在液化概率判别的逻辑回归模型中,主要存在两个方面不足:一是缺乏比较不同细粒含量标贯击数修正方法对液化概率的影响。二是国际上标准贯入试验SPT规范彼此不尽相同,妨碍了液化实测数据的挖掘和利用。

对于上述两方面的不足,本文以I.M.Idriss等^[18]收集整理的SPT数据为基础,分别运用标贯击数的三个主要修正方法:I.M.Idriss等修正公式^[18]、K.O.Cetin等修正公式^[19]和NCEER修正公式^[20],通过逻辑回归方法,分别建立三个液化概率计算模型,并

进行了对比评价。进而,采用葛一荀等提出的中国《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001)^[21](以下简称“国标”)和美国《标准贯入测试和对开管取样的标准试验方法》(ASTM D1586-11)^[22](以下简称“美标”)的标贯击数转换关系^[23],推导出适用于国标的液化概率判别新模型。最后,利用台湾集集地震288组数据^[24],比较了新模型与国内建筑抗震规范方法判别性能。

1 含细粒砂土液化概率计算模型建立

1.1 逻辑回归模型及自变量的选择

在许多领域中,常会遇到二分类问题。对于这些问题,通常采用逻辑回归分析方法^[25]。采用逻辑回归方法分析砂土地液化时,液化概率 P_L 可以表示为:

$$\ln\left(\frac{P_L}{1-P_L}\right) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n \quad (1)$$

式中, x_1, x_2, \dots, x_n 为自变量,表示影响砂土液化的因素; $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_n$ 为待估计的系数。

进行含细粒砂土液化判别需要考虑很多参数。这些参数主要包括土层方面的砂层埋深 d_s 、地下水位 d_w 、实测的标贯锤击数 N 、修正后纯净砂土的标贯锤击数(N_1)_{60cs};地震作用方面的峰值加速度 a_{max} 、地震烈度 I 、震级 M 和循环应力比 CSR 。

运用随机森林方法,评价这些参数对液化影响的重要性^[26]。在随机树林方法中,计算各参数的均方误差增量,结果见表1。当参数的均方误差增量越大,表明该参数越重要。

在逻辑回归分析中,要求自变量彼此独立。根据表1和已有的研究成果^[17, 27],选取两个最重要的

表1 参数的重要性评价

Table 1 Evaluation of parameter importance

参数	均方误差增量
a_{max}	0.026 6
d_s	0.007 0
d_w	0.004 1
I	0.006 9
$(N_1)_{60cs}$	0.151 3
M	0.023 8
N	0.075 3
CSR	0.054 0
$\ln(CSR)$	0.058 8

自变量:修正标贯击数 $(N_1)_{60cs}$ 和循环应力比对数 $\ln(CSR)$,相应的含细粒砂土液化概率计算模型为:

$$\ln\left(\frac{P_L}{1-P_L}\right) = \beta_0 + \beta_1(N_1)_{60cs} + \beta_2 \ln(CSR) \quad (2)$$

式中,CSR表达为:^[28]

$$CSR = 0.65 \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \left(\frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \right) r_d \quad (3)$$

式中, σ_v 、 σ'_v 分别为土层深度 z 处的总上覆压应力和有效上覆压应力; r_d 为土层剪应力折减系数。

1.2 细粒含量的标贯击数修正公式

细粒含量是指粒径小于0.075 mm的颗粒质量占总质量的百分比。在“简化方法”中,需要将含细粒砂土标贯击数 $(N_1)_{60}$ 修正为纯净砂土的标贯击数 $(N_1)_{60cs}$,主要的修正方法如下。

I.M.Idriss等修正公式^[18]:

$$(N_1)_{60cs} = (N_1)_{60} + \Delta(N_1)_{60} \quad (4)$$

$$\Delta(N_1)_{60} = \exp\left[1.63 + \frac{9.7}{FC + 0.01} - \left(\frac{15.7}{FC + 0.01}\right)^2\right] \quad (5)$$

式中,FC为细粒含量,取值范围为 $5\% \leq FC \leq 35\%$,若FC小于5%时取零,若FC大于35%时取35%; $(N_1)_{60}$ 为考虑覆盖层、能量、设备和程序因素校正后的标贯击数; $\Delta(N_1)_{60}$ 为考虑FC影响的 $(N_1)_{60}$ 调整值。

K.O.Cetin等修正公式^[19]:

$$(N_1)_{60cs} = (N_1)_{60} C_{FINES} \quad (6)$$

$$C_{FINES} = 1 + 0.004FC + 0.05 \left(\frac{FC}{(N_1)_{60}} \right) \quad (7)$$

式中, C_{FINES} 为细粒含量修正系数;FC取值范围与I.M.Idriss等^[18]公式相同。

NCEER修正公式^[20]:

$$(N_1)_{60cs} = \alpha + \beta (N_1)_{60} \quad (8)$$

式中,参数 α 和 β 随FC变化,当 $FC \leq 5\%$ 时, $\alpha=0, \beta=1.0$;当 $5\% < FC < 35\%$ 时:

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \exp\left(1.76 - \frac{190}{FC^2}\right) \\ \beta &= 0.99 + \frac{FC^{1.5}}{1000} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

当 $35\% \leq FC$ 时, $\alpha=5, \beta=1.2$ 。

在式(4)、(6)、(8)中 $(N_1)_{60}$ 为^[18-20]:

$$(N_1)_{60} = C_N C_E C_R C_B C_S N_m \quad (10)$$

式中, N_m 为实测的标贯锤击数; C_N 为将实际标贯击数 N 转化成上覆有效应力100 kPa的校正系数; C_E 、 C_R 分别为标贯试验能量比、探杆长校正系数; C_B 为钻孔直径校正系数; C_S 为非标准取样器配置的校正系数。

式(4)~式(9)表明,I.M.Idriss等^[18]建议的 $\Delta(N_1)_{60}$ 仅与细粒含量FC相关,而与 $(N_1)_{60}$ 值无关;但K.O.Cetin等、NCEER提出的 $\Delta(N_1)_{60}$ 与FC和 $(N_1)_{60}$ 都相关。

1.3 逻辑回归模型系数确定

在I.M.Idriss等^[18]收集整理的SPT数据库中,包括115个液化实例、112个非液化实例和3个边缘液化实例,共230个实例。本文将3个边缘液化实例视为液化实例,数据中细粒含量的分布如图1所示。

基于这些实测数据,分别采用I.M.Idriss等、K.O.Cetin等、NCEER提出的标贯击数修正公式^[18-20],由最大似然估计法确定逻辑回归模型的系数。似然函数L为^[29]:

$$L = \prod_{i=1}^n p_i^{y_i} (1-p_i)^{1-y_i} \quad (11)$$

式中, n 为实测数据个数; y_i 为实际的反应变量,液化时 $y_i=1$,非液化时 $y_i=0$; p_i 为自变量 x_i 相应的液化概率。为简化计算,用 $\ln(L)$ 代替L,当 $\ln(L)$ 对每个系数的一阶导数为0时,得到相应系数的最优解。

对于I.M.Idriss等、K.O.Cetin等、NCEER三个修正公式^[18-20],分别得到相应的逻辑回归模型为:

$$\ln\left(\frac{P_L}{1-P_L}\right) = 25.315 - 0.674(N_1)_{60cs} + 9.129 \ln(CSR) \quad (12)$$

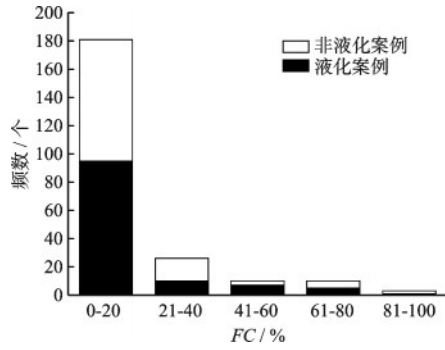


图1 细粒含量案例分布

Fig.1 Distribution of cases by fine grain content (FC)

$$\ln\left(\frac{P_L}{1-P_L}\right) = 24.697 - 0.652(N_1)_{60cs} + 9.353\ln(CSR) \quad (13)$$

$$\ln\left(\frac{P_L}{1-P_L}\right) = 22.746 - 0.595(N_1)_{60cs} + 8.219\ln(CSR) \quad (14)$$

2 液化概率计算模型评价

对于上述三个液化概率计算模型,需要进行拟合优度和预测准确性评价。拟合优度评价采用赤池信息量准则和 Hosmer-Lemeshow 检验,预测准确性评价指标采用 Cox-Snell 确定系数 R_{CS}^2 和 Nagelkerke 确定系数 R_N^2 。

赤池信息量准则由 H.Akaile^[30]在解决时间序列定阶问题时提出,其指标 AIC 为:

$$AIC = 2k - 2\ln(L) \quad (15)$$

式中, k 是参数的数量。回归模型的 AIC 值越小,说明模型的拟合优度越好。Hosmer-Lemeshow 检验的优度指标 HL ^[31] 定义为:

$$HL = \sum_{g=1}^G \frac{(y_g - n_g \hat{p}_g)^2}{n_g \hat{p}_g (1 - \hat{p}_g)} \quad (16)$$

式中, G 代表分组数, $G \leq 10$; n_g 、 y_g 和 \hat{p}_g 分别为第 g 组中的案例数、观测数量及预测事件概率。 HL 值越接近 1.0, 预测值与真实值之间的差异越小, 模型的拟合优度越好。

确定系数 R_{CS}^2 和 R_N^2 为反映预测值对真实值的拟合优劣程度, R_{CS}^2 计算公式^[29]为:

$$R_{CS}^2 = 1 - \left(\frac{L(0)}{L(\hat{\beta})} \right)^2 \quad (17)$$

式中, $L(0)$ 和 $L(\hat{\beta})$ 分别表示初始模型、当前模型的

似然函数值。 R_N^2 为 R_{CS}^2 与其最大值 R_{CSmax}^2 之比^[29]:

$$R_N^2 = R_{CS}^2 / R_{CSmax}^2 \quad (18)$$

式中, $R_{CSmax}^2 = 1 - [L(0)]^2$ 。

三个液化概率计算模型的拟合优度 AIC 值和 HL 值、预测准确性确定系数 R_{CS}^2 和 R_N^2 值, 见表 2。表 2 结果表明, 在三个液化概率计算模型中, 式 (12b) 表现最好, 即采用 Cetin 等标贯击数修正公式所得的液化概率计算模型能较好地反映液化实测数据。

表 2 三个模型的评价

Table 2 Evaluation of three models

模型	拟合优度		预测准确性	
	AIC	HL	R_{CS}^2	R_N^2
式(12)	116.22	0.805	0.600	0.800
式(13)	108.15	0.896	0.602	0.803
式(14)	121.43	0.696	0.582	0.776

为了与建规法液化判别方法进行对应, 将循环应力比 CSR 式(3)转换为^[12]:

$$CSR = 0.65a_{max}(1 - 0.008d_s) \left[\frac{\gamma_s d_s}{\gamma_s d_s - \gamma_w (d_s - d_w)} \right] \quad (19)$$

式中, d_w 、 d_s 分别为地下水位深度和标贯试验点的土层深度; γ_s 为砂土重度; γ_w 为水重度。将式(17)代入式(13)可得:

$$\ln\left(\frac{P_L}{1-P_L}\right) = 24.697 - 0.652(N_1)_{60cs} + 9.353\ln(a_{max}) + 9.353\ln(0.65 - 0.005d_s) + 9.353\ln\left(\frac{19d_s}{9d_s + 10d_w}\right) \quad (20)$$

由式(20)可得, 在给定的液化概率 P_L , 推导出相应的修正的标贯击数临界值 $[(N_1)_{60cs}]_{cr}$ 为:

$$[(N_1)_{60cs}]_{cr} = \frac{1}{0.652} \left\{ \begin{aligned} &24.697 + 9.353\ln(a_{max}) + \\ &9.353\ln(0.65 - 0.005d_s) + \\ &9.353\ln\left(\frac{19d_s}{9d_s + 10d_w}\right) - \\ &\ln\left(\frac{P_L}{1-P_L}\right) \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

式(21)为适用于美标的液化概率判别模型。为适用于国标, 采用葛一荀等^[23]提出的标贯击数转换关系:

$$(N_1)_{60} = 1.326N \quad (22)$$

式中, N 为由国标得到未经修正的标贯击数。将式(6)、式(7)和式(22)代入式(21)可得:

$N_{cr} =$

$$\frac{1}{0.865 + 0.003FC} \left\{ \begin{array}{l} 24.697 + 9.353 \ln(a_{\max}) + \\ 9.353 \ln(0.65 - 0.005d_s) + \\ 9.353 \ln\left(\frac{19d_s}{9d_s + 10d_w}\right) - \\ \ln\left(\frac{P_L}{1 - P_L}\right) - 0.033FC \end{array} \right\} \quad (23)$$

式中, N_{cr} 为适用于国标的标贯击数临界值。

式(23)为基于美标的 SPT 实测液化数据, 通过建立逻辑回归模型, 推导出的适用于国标的含细粒砂土液化概率判别新模型。对于给定液化概率水平, 当标贯击数 $N \leq N_{cr}$ 时, 判定为液化, 否则为不液化。

3 回判和预判分析

3.1 不同液化概率水平下的回判成功率

为检验适用于美标和国标的液化概率判别新模型, 在同液化概率水平下由式(21)和式(23)计算相应的判别成功率, 结果如图 2 所示。从图 2 可以看出, 在不同液化概率水平下, 式(21)和式(23)对液化场地和非液化场地的回判成功率几乎相同。随着液化概率 P_L 增大, 液化场地的判别成功率逐渐减小, 而非液化场地的判别成功率逐渐增大。当液化概率 P_L 取 10%、20% 时, 液化场地的判别成功率分别与非液化场地 P_L 为 90%、80% 判别成功率基本持平。当液化概率 P_L 为 50% 时, 两个模型对液化场

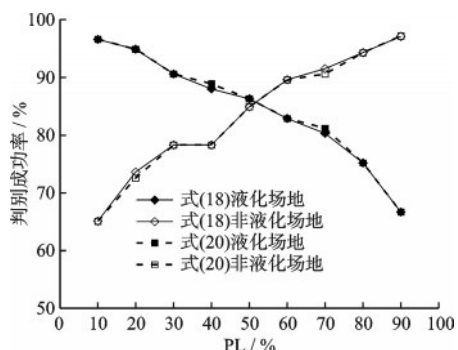


图 2 式(21)与式(23)判别成功率

Fig. 2 Discrimination success rates by formula (21) and formula (23)

地和非液化场地的判别成功率都近似相等。回判结果表明, 逻辑回归新模型式(21)和式(23)具备良好的判别性能。

3.2 与建规法的预判对比分析

对于 1999 年集集地震的 288 组数据, 分别采用新模型和建规法进行预判, 比较两种方法的判别性能。由于数据中标贯击数依据的是美标, 在预判前需要将其转换为国标相应的标贯击数。

建规法^[2]砂土液化判别公式为:

$$N_{cr} = N_0 \beta \left[\ln(0.6d_s + 1.5) - 0.1d_w \right] \sqrt{3/\rho_c} \quad (24)$$

式中, N_0 为标贯击数的基准值, 根据设计基本地震加速度确定; β 为调整系数, 根据地震分组确定为 0.95; ρ_c 为黏粒含量百分率, 由于集集地震案例库中缺少部分黏粒含量信息, 且黏粒含量较低, 取 $\rho_c = 3$ ^[13]。

由于建规法对应的液化概率为 32%, 因此在液化概率 32% 水平下对比新模型和建规法预判结果见表 3。在总体判别成功率方面, 新模型为 94.1% 明显高于建规法的 77.4%。而液化与非液化场地的判别成功率, 新模型分别是 93.9% 和 86.3%, 而建规法分别为 99.4% 和 48.4%。两种方法的液化场地判别成功率均高于非液化场地, 这是由于液化概率为 32%。虽然两种方法对液化场地的判别成功率基本相当, 但是新模型对于非液化场的判别成功率比建规法高出 37.9%。这表明, 建规法很可能将非液化场地判定为液化场地, 偏于保守。而新模型在保证液化场地判别成功率的前提下, 显著提高了非液化场地的判别成功率。

表 3 新模型与建规法预判结果

Table 3 Comparison of predictive results between the new model and the Building Code method

	判别成功率		
	液化	非液化	总体
新模型	93.9%	86.3%	94.1%
建规法	99.4%	48.4%	77.4%

4 结论

(1) 针对细粒含量对砂土标贯击数影响的三个修正公式, 采用逻辑回归方法分别建立了相应的液化概率计算模型, 对比分析表明, 由 K.O.Cetin 等提出的修正公式得到的液化概率计算模型, 在拟合优

度和预测准确性方面都高于其它两个概率模型。

(2) 基于美标的标贯击数实测结果,建立了液化概率判别模型。为了解决国标与美标的差异,利用两种规范的标贯击数转换关系,推导出适用于国标的液化概率判别模型。回判结果表明,新建模型具备良好的判别性能。

(3) 采用新模型与建规法分别对台湾集集地震的液化数据进行了判别,结果表明在液化概率32%条件下,新模型的总体判别成功率明显高于建规法,其中液化场地判别成功率93.9%略低于建规法的99.4%,但是非液化场地的判别成功率86.3%,远远高于建规法判别成功率48.4%。

参考文献:

[1] 吴琪,徐雨,陈国兴.我国近20年11次地震的土壤液化灾害回顾[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(5): 961-975.
Wu Q, Xu Y, Chen G X. Review of soil liquefaction disasters caused by 11 earthquakes in China in the past 20 years[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(5): 961-975. (in Chinese)

[2] 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.

[3] Seed H B, Idriss I M. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1971, 97 (9) : 1249-1273.

[4] 陈国兴,李方明.基于径向基函数神经网络模型的砂土液化概率判别方法[J]. 岩土工程学报, 2006, 28 (3): 301-305.
Chen G X, Li F M. Probabilistic estimation of sand liquefaction based on neural network model of radial basis function[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(3): 301-305. (in Chinese)

[5] 符圣聪,江静贝.简化的液化判别概率法[J]. 工程抗震与加固改造, 2008, 30(3): 93-98.
Fu S C, Jiang J B. A simplified probabilistic method for liquefaction evaluation[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2008, 30(3): 93-98. (in Chinese)

[6] Juang C H, Chen C J, Jiang T. Risk-based liquefaction potential evaluation using standard penetration tests[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, 37 (6) : 1195-1208.

[7] Zhang Y F, Wang R, Zhang J M, et al. A constrained

neural network model for soil liquefaction assessment with global applicability[J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2020, 14(5): 1066-1082.

[8] 胡记磊,唐小微,裘江南.基于贝叶斯网络的地震液化概率预测分析[J]. 岩土力学, 2016, 37 (6) : 1745-1752.
Hu J L, Tang X W, Qiu J N. Prediction of probability of seismic-induced liquefaction based on Bayesian network[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37 (6) : 1745-1752. (in Chinese)

[9] Zhang J, Juang C H, Martin J R, et al. Inter-region variability of Robertson and Wride method for liquefaction hazard analysis[J]. Engineering Geology, 2016, 203: 191-203.

[10] Liao S C, Veneziano D, Whitman R V. Regression models for evaluating liquefaction probability[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1988, 114 (4) : 389-411.

[11] Juang C H, Jiang T, Andrus R D. Assessing probability-based methods for liquefaction potential evaluation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(7): 580-589.

[12] 袁晓铭,曹振中.基于土层常规参数的液化发生概率计算模型及其可靠性研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(4): 99-108.
Yuan X M, Cao Z Z. Conventional soils parameters based liquefaction probabilistic evaluation formula and its reliability analysis[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(4): 99-108. (in Chinese)

[13] 王亮.基于逻辑回归的砂土液化判别研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2017.
Wang L. Research on discrimination of sand liquefaction based on logistic regression[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2017. (in Chinese)

[14] 谢永宁.基于Logistic回归的砂土地震液化评价[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(6): 32-35.
Xie Y N. Seismic liquefaction evaluation of sandy soil based on logistic regression[J]. Journal of Hydraulic Engineering and Civil Engineering, 2018, 16(6): 32-35. (in Chinese)

[15] 袁近远,李天宁,王兰民,等.砂土液化概率计算新方法[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(3): 541-549.
Yuan J Y, Li T N, Wang L M, et al. A new method for calculating liquefaction probability of sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44 (3): 541-549. (in Chinese)

[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 X L, Li X Y, Du X L. Study on discriminant hyperbolic model of sand liquefaction considering fine particle content[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(3): 448-455. (in Chinese)
- [17] 肖诗豪, 程小久, 汪华安, 等. 基于标贯试验的砂土液化概率判别法[J]. 土木与环境工程学报, 2022, 44(5): 87-97.
- Xiao S H, Cheng X J, Wang H A, et al. Probability discrimination method of sand liquefaction based on standard penetration test[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44(5): 87-97. (in Chinese)
- [18] Idriss I M, Boulanger R W. SPT-based liquefaction triggering procedures[R]. Davis: University of California, 2010.
- [19] Cetin K O, Seed R B, Kiureghian A D, 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.
- [20] Youd T L, Idriss I M, Andrus R D, 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.
- [21] 岩土工程勘察规范:GB 50021—2001[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [22] Standard test method for penetration test (SPT) and split-barrel sampling of soils (D1586-11) [S]. West Conshohocken: ASTM International, 2011.
- [23] 葛一荀, 张洁, 祝刘文, 等. 砂土地地国标与美标贯入试验能量分析及击数转换关系研究[J]. 工程地质学报, 2022, 30(2): 507-519.
- Ge Y X, Zhang J, Zhu L W, et al. Study on energy analysis and blow count conversion relationship of national and American standard penetration tests for sandy soil sites[J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 30(2): 507-519. (in Chinese)
- [24] Hwang J, Yang C. Verification of critical cyclic strength curve by Taiwan Chi-Chi earthquake data[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2001, 21(3): 237-257.
- [25] 吴骏. SPSS 统计分析从零开始学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2014.
- [26] 郭远智, 李许红. 基于随机森林模型的黄河流域城市建设用地结构时空演化及其驱动机制研究[J]. 地理科学进展, 2023, 42(1): 12-26.
- Guo Y Z, Li X H. Spatiotemporal change of urban construction land structure and driving mechanism in the Yellow River Basin based on random forest model[J]. Progress in Geography, 2023, 42(1): 12-26. (in Chinese)
- [27] 潘建平, 孔宪京, 邹德高. 基于 Logistic 回归模型的砂土液化概率评价[J]. 岩土力学, 2008(9): 2567-2571.
- Pan J P, Kong X J, Zou D G. Probabilistic evaluation of sand liquefaction based on logistic regression model [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008(9): 2567-2571. (in Chinese)
- [28] Cetin K O, Seed R B. Nonlinear shear mass participation factor (γ_d) for cyclic shear stress ratio evaluation [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2004, 24(2): 103-113.
- [29] 汪冬华. 多元统计分析与 SPSS 应用[M]. 上海: 华东理工大学出版社, 2010.
- [30] Akaike H. A new look at the statistical model identification [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1974, 19(16): 716-723.
- [31] 王济川, 郭志刚. Logistic 回归模型: 方法与应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.

(本文编辑: 苏泽云)