

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.048



开放科学(资源服务)标识码(OSID):



基于标贯试验的砂土液化概率判别法

肖诗豪¹,程小久²,汪华安²,张洁¹

(1. 同济大学 地下建筑与工程系;岩土及地下工程教育部重点实验室,上海 200092;

2. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院,广州 510663)

摘要:合理地对建设场地进行液化判别是降低液化灾害的基础。中国规范通过比较临界标贯击数与实测标贯击数的相对大小来判别砂土液化,但由于建立经验判别准则的过程中存在大量的不确定性因素,故这种确定性方法不是衡量砂土液化的准确指标。针对这个问题,基于中国标贯试验的液化案例库,利用极大似然法对4种广义线性模型进行参数标定,建立适用于中国的液化概率判别模型。结果表明:当液化概率较小时,4种广义线性模型差异显著;当液化概率在30%~70%之间时,4种模型的预测结果相近。模型比较表明,Log-log模型对案例库的拟合效果最好,给出了基于Log-log模型的液化概率计算公式及指定液化概率下的标贯击数临界值计算公式。回判分析表明,提出的液化概率判别模型的总体回判成功率高于现行建筑抗震设计规范。

关键词:标贯试验;砂土液化;概率判别;广义线性模型;极大似然法

中图分类号:TU435 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2022)05-0087-11

Probabilistic evaluation of sand liquefaction potential based on standard penetration test

XIAO Shihao¹, CHENG Xiaojiu², WANG Huaan², ZHANG Jie¹

(1. Department of Geotechnical Engineering; Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China; 2. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, P. R. China)

Abstract: Reasonable liquefaction assessment of construction sites is the basis of mitigating liquefaction hazards. The current Chinese seismic design code evaluates the liquefaction potential by comparing the critical value of standard penetration test blow count with the measured value. However, due to the significant uncertainties associated with the process of establishing empirical liquefaction criteria, the deterministic method is not an accurate measurement for evaluating the liquefaction potential. To solve this

收稿日期:2021-01-08

基金项目:国家自然科学基金(41672276);科技部创新人才推进计划重点领域创新团队项目(2016RA4059);上海市教育发展基金会和上海市教育委员会曙光计划(19SG19)

作者简介:肖诗豪(1997-),男,主要从事岩土工程可靠度与风险分析研究,E-mail: xiaoshihao@tongji.edu.cn.

张洁(通信作者),男,教授,博士生导师,E-mail: cezhangjie@tongji.edu.cn.

Received:2021-01-08

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 41672276); The Key Innovation Team Program of MOST of China (No. 2016RA4059); Shuguang Program of Shanghai Education Development Foundation and Shanghai Municipal Education Commission (No. 19SG19)

Author brief: XIAO Shihao (1997-), main research interests: reliability and risk analysis in geotechnical engineering, E-mail: xiaoshihao@tongji.edu.cn.

ZHANG Jie (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: cezhangjie@tongji.edu.cn.

problem, the maximum likelihood method is used to calibrate the parameters of four generalized linear models based on the liquefaction case base of Chinese standard penetration test, and four probabilistic evaluation models applied to China are established. The results show that the four generalized linear models differ significantly when the liquefaction probability is small, and the prediction results of the four models are similar when the liquefaction probability is between 30% and 70%. Comparison of the models shows that the Log-log model fits the database best. The formulas for calculating the liquefaction probability and the critical value of standard penetration test blow count under specified liquefaction probability based on the Log-log model are provided. The results of verification analysis show that the overall judgment success ratio of the proposed probabilistic evaluation model of liquefaction is higher than the current Chinese seismic design code.

Keywords: standard penetration test; sand liquefaction; probabilistic evaluation; generalized linear models; maximum likelihood method

砂土液化是一种由地震诱发的常见自然灾害,可能会导致砂沸、建筑物地基承载力下降、地表侧移和沉降,进而造成结构破坏和生命财产损失^[1-2]。在工程实践中,基于标准贯入试验、静力触探试验和剪切波速试验等原位测试的经验方法在砂土液化判别中获得了广泛的应用。

在中国,基于标贯试验的经验液化判别准则使用最为广泛,如《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)(2016 年版)^[3],以下简称建规法。该方法采用临界标贯击数来衡量地震诱发液化的荷载,采用实测标贯击数来衡量土体抵抗地震液化的能力。当实测标贯击数小于临界标贯击数时,土体发生液化;否则土体不发生液化。建立该方法的关键是提出合理的临界标贯击数计算公式。目前,该公式多通过对中国以往地震震后调查中获得的液化案例库进行分析来获得,因此临界标贯击数计算公式应尽可能区分液化案例库中的液化案例和非液化案例。

Seed 等^[4]提出的经验判别方法通过不断修正与更新,获得了长足的发展^[5-8]。这些简化方法多采用循环应力比(Cyclic Stress Ratio, CSR)来衡量作用在土体上的荷载,采用循环抗力比(Cyclic Resistance Ratio, CRR)来衡量土体抵抗液化的强度。其中,CRR 可采用不同的原位测试指标来估算。从理论上讲,CSR > CRR 表示土体会发生液化,反之,则不会发生液化。在给定 CSR 计算方法的条件,建立经验法的关键是选择合适的 CRR 计算方法,使得 CRR 临界曲线尽可能区分案例库中的液化案例和非液化案例。

在建立经验判别准则的过程中存在大量的不确定性因素,导致经验法很难完全区分液化和非液化

案例。因此,基于经验法的液化判别结果存在不可忽视的不确定性。液化概率可用于衡量液化发生的可能性^[9],为考虑液化判别结果的不确定性,基于概率的液化判别准则受到了重视。判别分析方法^[10-11]、逻辑回归模型^[12-17]、神经网络^[18-21]、结构可靠性方法^[22]、贝叶斯方法^[7-8,15,23-24]等被广泛用于建立液化势评估的概率模型。Juang 等^[25]和陈国兴等^[26]对土体液化概率判别模型的发展进行了全面的回顾。

由于原理简单、使用方便,逻辑回归方法在建立土体液化概率预测模型中获得了广泛的应用。砂土液化判别的结果可看作是一个二分类问题,只有液化和不液化两种情况。在统计学中,广义线性模型被广泛应用于二分类问题的预测,逻辑回归(Logistic)模型就属于广义线性模型中的一种,除逻辑回归模型外,还有大量其他广义线性模型^[27]。已有研究表明,最优液化模型与案例库有关,逻辑回归模型未必是土体液化判别的最优模型^[28-29]。

笔者基于中国标贯试验的液化案例库,利用广义线性模型建立适用于土体液化概率判别的最优经验模型。首先介绍液化案例库和建立液化概率判别模型的方法;然后对建立的 4 种广义线性模型进行对比分析,给出最优模型;接着分析本文模型在不同烈度区、不同概率水平和不同埋深条件下的回判成功率;最后给出本文模型在预判分析中的应用实例。

1 液化案例库

文献^[30]给出了中国基于标贯试验的 159 个震后调查案例,包含 98 个液化案例和 61 个非液化案例。该案例库是建立中国现行建规法的基础数据。

表 1 给出了上述 159 个震后调查案例的来源。每个案例包含面波震级 M_s 、烈度 I 、标贯击数 N 、埋深 d_s 和地下水位 d_w 等 5 个常规参数。表 2 给出了案例库中这些参数的分布范围。

表 1 液化案例库的基本信息

Table 1 Basic information of the liquefaction database

地震	时间	震级	液化案例数	非液化案例数
河源	1962	6.4	0	1
邢台	1966	6.7	3	3
邢台	1966	7.2	7	0
河间	1967	6.3	2	0
渤海	1969	7.4	3	0
阳江	1969	6.4	3	1
通海	1970	7.8	18	14
海城	1975	7.3	7	5
唐山	1976	7.8	55	37
合计			98	61

表 2 液化案例库中参数的分布范围

Table 2 Distribution range of the parameters in the liquefaction database

震级 M_s	烈度 I	标贯击数 N	埋深 d_s/m	地下水位 d_w/m
6.3~7.8	6~10	1~73	0.5~20	0~5.9

图 1 为案例库中案例数随烈度的频数分布图。由图 1 可知,案例库包含的场地烈度范围为 VI~X 度,在各个烈度区内,液化案例数均大于非液化案例数,且绝大部分案例处于 VII、VIII、IX 烈度区。图 2 为案例库中案例数随埋深的频数分布图。由图 2 可知,案例库中仅有 15 个案例的埋深大于 10 m,绝大部分案例的埋深处于 0~15 m 范围内;液化案例的埋深均处于 0~11 m 范围内,相对于非液化案例分布得更集中。

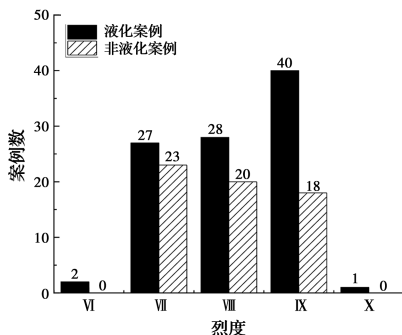


图 1 案例随烈度的频数分布图

Fig. 1 The frequency distribution diagram of cases with intensity

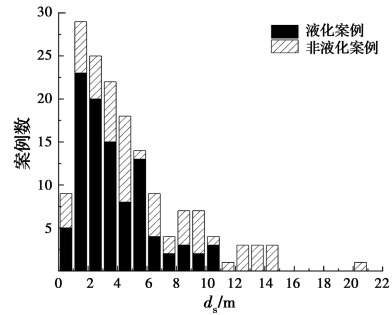


图 2 案例随埋深的频数分布图

Fig. 2 The frequency distribution diagram of cases with soil depth

由于不同国家和地区进行标贯试验的仪器设备和操作方法有所差别,若要将其他地区的液化调查资料用于分析中国液化判别准则,需考虑不同地区标贯试验结果的相关性,将不同来源的试验结果进行转换^[30-31]。但由于相关转换关系的缺失,笔者未引入中国以外的场地液化案例。

2 建立液化概率判别模型的方法

2.1 广义线性模型

令 $\mathbf{X}=[x_1, x_2 \cdots x_n]$, 表示土体液化势判别中的自变量。令 P_L 代表液化概率, 令 $f(P_L)$ 表示液化概率 P_L 的函数。假定 $f(P_L)$ 与自变量 \mathbf{X} 之间存在式(1)所示关系^[12]。

$$f(P_L) = \theta_0 + \theta_1 x_1 + \theta_2 x_2 + \cdots + \theta_n x_n \quad (1)$$

式中: $\theta=[\theta_1, \theta_2 \cdots \theta_n]$ 为待标定的模型参数。液化概率 P_L 的取值在 0~1 之间, 式(1)等号右端的取值范围为 $-\infty \sim +\infty$ 。为使式(1)左侧取值也位于 $-\infty \sim +\infty$ 之间, $f(P_L)$ 可取不同的函数形式, 表 3 给出了 $f(P_L)$ 常用的 4 种函数形式^[28], 式中 Φ 为标准正态分布的累积分布函数。按照上述规则建立的数学模型常被称为广义线性模型, 可用于二元事件的概率预测。

在土体液化势分析中, 标准贯入击数 N 可用来衡量土体抵抗液化的能力, 循环应力比 CSR 可用来衡量地震荷载。令 $CSR_{7.5}$ 代表规范化为矩震级 $M_w=7.5$ 的修正循环应力比。受已有文献的启发, 笔者采用 N 和 $\ln(CSR_{7.5})$ 作为自变量。 $CSR_{7.5}$ 的计算公式为^[6]

$$CSR_{7.5} = 0.65 a_{\max} \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} r_d \frac{1}{MSF} \quad (2)$$

式中: a_{\max} 为水平向地表峰值加速度, g ; σ'_v 为测试点处的总上覆应力, 可按式(3)估算。

$$\sigma_v = \gamma_s d_s \quad (3)$$

表3 广义线性模型
Table 3 General linear models

模型名称	$f(P_L)$ 的表达式	P_L 的计算公式
Logistic	$f(P_L) = \ln\left(\frac{P_L}{1-P_L}\right)$	$P_L = \frac{1}{1 + \exp\{-(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n)\}}$
Probit	$f(P_L) = \Phi^{-1}(P_L)$	$P_L = \Phi(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n)$
Log-log	$f(P_L) = -\ln[-\ln(P_L)]$	$P_L = \exp\{-\exp[-(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n)]\}$
C-log-log	$f(P_L) = \ln[-\ln(1-P_L)]$	$P_L = 1 - \exp[-\exp(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n)]$

式中： γ_s 为砂土重度。Seed等^[32]和 Idriss等^[33]的案例库中案例的平均土体重度约为18.3 kN/m³^[33]。文献[17]在采用文献[30]中的案例库进行液化分析时，假定案例的土体重度为19 kN/m³。本文采用的液化案例库也取自文献[30]，为与上述研究保持一致， γ_s 也取为19 kN/m³。 σ'_v 为测试点处的上覆有效应力，可按式(4)估算。

$$\sigma'_v = \gamma_s d_s - \gamma_w (d_s - d_w) \quad (4)$$

式中： γ_w 为水重度； r_d 为剪应力折减系数，在工程实践中可按式(5)估算^[34]。

$$r_d = \begin{cases} 1 - 0.00765d_s & (d_s \leq 9.15 \text{ m}) \\ 1.174 - 0.0267d_s & (9.15 \text{ m} < d_s \leq 23 \text{ m}) \end{cases} \quad (5)$$

由于案例库中案例的埋深大部分处于9.15 m内，为了简化计算， r_d 按式(6)估算。

$$r_d = 1 - 0.008d_s \quad (6)$$

MSF为震级修正系数，按式(7)计算^[6]。

$$\text{MSF} = \left(\frac{M_w}{7.5}\right)^{-2.56} \quad (7)$$

式中： M_w 为矩震级。试验表明，砂土抗液化能力与地震动持续时间(即振动次数)有关。地震动持续时间与震级密切相关。一般而言，震级越大，地震动持续时间越长，液化越容易发生^[30]。因此，式(7)可基于地震震级来考虑地震持续时间对土体液化能力的影响。需要指出，表1给出的震级均为面波震级 M_s ，并非式(7)中的矩震级 M_w 。Youd等^[6]指出，当 M_s 处于6~8范围内时，可取 $M_s \approx M_w$ ，故取 $M_w \approx M_s$ 。

将式(3)、式(4)、式(6)、式(7)带入式(2)， $\text{CSR}_{7.5}$ 可按式(8)计算。

$$\text{CSR}_{7.5} = 0.65a_{\max} \frac{19d_s}{9d_s + 10d_w} \cdot (1 - 0.008d_s) \left(\frac{M_w}{7.5}\right)^{2.56} \quad (8)$$

采用式(8)计算 $\text{CSR}_{7.5}$ 需要地表水平峰值加速度 a_{\max} 。由于中国液化案例库中只有烈度数据，缺乏 a_{\max} 记录，因此，需要根据烈度信息来推断水平峰值加速度 a_{\max} 。根据以往经验，液化案例库中Ⅶ、Ⅷ、Ⅸ度区的 a_{\max} 分别取为0.1g、0.2g和0.4g^[35-36]。参照《中国地震烈度表》(GB/T 17742—2008)^[37]，Ⅶ和Ⅸ度区对应的 a_{\max} 分别取0.05g和0.8g。由图1可知，表1中液化案例主要位于Ⅶ、Ⅷ、Ⅸ度区，而位于Ⅵ和Ⅹ度区的案例数分别为2和1。

2.2 模型标定方法

令 \mathbf{D} 代表用于模型标定的案例库，令 n_L 、 n_{NL} 分别代表案例库中的液化案例数和非液化案例数。实际上，由于震后调查中通常更重视收集液化案例，导致案例库中液化案例的比例可能高于真实世界^[38]。为考虑上述抽样偏差的影响，可采用加权极大似然法对模型参数进行标定。令 Q_S 和 Q_P 分别代表案例库和真实世界中液化案例的比例。考虑抽样偏差后，案例库的加权似然函数对数可按式(9)计算^[7]。

$$\ln[L(\boldsymbol{\theta} | \mathbf{D})] = \omega_L \sum_{i=1}^{n_L} \ln P_{Li} + \omega_{NL} \sum_{i=1}^{n_{NL}} \ln(1 - P_{Li}) \quad (9)$$

式中： P_{Li} 为第*i*个案例的液化概率值； ω_L 和 ω_{NL} 分别为液化案例和非液化案例的权重因子，可按式(10)计算。

$$\omega_L = \frac{Q_P}{Q_S} \quad (10a)$$

$$\omega_{NL} = \frac{1 - Q_P}{1 - Q_S} \quad (10b)$$

式中： Q_P 可取为0.456^[28]。将表3中的广义线性模型带入式(9)，即可获得相应模型的似然性函数。根据最大似然性原理，将其似然性函数进行最大化，即可获得模型的最优参数 $\boldsymbol{\theta}^*$ 。

2.3 模型比较方法

对于同一个案例库，利用不同的广义线性模型

可以建立不同的液化概率预测模型。由于不同模型对数据的拟合效果不同,不同模型为最优模型的概率也有所不同。贝叶斯信息准则 (Bayesian Information Criterion, BIC)能同时考虑模型对案例库的拟合效果和模型复杂程度,常用于对不同模型的优劣进行排序。令 M_i 代表第 i 个模型,其贝叶斯信息准则的表达式为^[39]

$$BIC_i = -2\ln[L(\theta^* | M_i, \mathbf{D})] + k_i \ln(n) \quad (11)$$

式中: $L(\theta^* | M_i, \mathbf{D})$ 为 M_i 的似然函数极大值; k_i 为 M_i 中参数的个数; n 为案例库中的案例数。在给定数据库 D 的情况下,模型 M_i 的模型概率可以由式 (12) 计算^[38]。

$$P(M_i | \mathbf{D}) = \frac{\exp\left[-\frac{\Delta_i(\text{BIC})}{2}\right]}{\sum_{j=1}^r \exp\left[-\frac{\Delta_j(\text{BIC})}{2}\right]} \quad (12)$$

式中: r 为模型总数; $\Delta_i(\text{BIC})$ 可由式 (13) 计算^[38]。

$$\Delta_i(\text{BIC}) = \text{BIC}_i - \min_{j=1,2,\dots,r} (\text{BIC}_j) \quad (13)$$

根据式 (12) 计算出不同模型的模型概率后,即可通过模型概率对模型进行比较。模型概率越高,表明模型受数据支持的程度越高。

3 模型标定和比较

表 4 给出了根据式 (9) 和极大似然法获得的不同广义线性模型的模型标定结果。图 3 给出了 4 种

模型在 6 种液化概率 (1%、10%、30%、50%、70% 和 90%) 下的液化概率等势线。图 3 中,横坐标为标贯击数 N ,纵坐标为修正循环应力比 $CSR_{7.5}$,实心圆点代表液化案例,空心圆点代表非液化案例。在给定概率水准的条件下,等势线上方的案例点判别为液化,下方的案例点判别为不液化。从图 3 可以看出:

1) 随着液化概率的增大,4 种模型的等势线有向左上方移动的趋势,表明越来越多的液化点判别为不液化,判别结果也越来越保守。

2) 当液化概率较小 ($P_L = 1\%$) 时,4 种广义线性模型之间的差异较大;其中,C-log-log 模型获得的等势线位于最右侧,表明对于相同的 $CSR_{7.5}$ 值,C-log-log 模型需要更大的 N 值才能满足与其他模型相同的液化概率,因而其液化判别结果最为保守。

3) 当液化概率为 10% 时,Logistic、Probit、Log-log 模型的预测结果类似,而 C-Log-log 模型获得的等势线位于最右侧,表明 C-log-log 模型较其他模型更为保守。

4) 当液化概率在 30%~70% 之间时,4 种模型的临界线位置比较接近,液化判别结果相差不大。

5) 当液化概率为 90% 时,Logistic、Probit 以及 C-Log-log 模型预测结果类似,而 Log-log 模型获得的等势线位于最左侧,表明其预测结果最不保守。

表 4 模型标定及比较

Table 4 Calibration and comparison of models

模型名称	P_L 的计算公式	BIC	最优模型概率/%
Logistic	$P_L = \frac{1}{1 + \exp\{- (9.2 - 0.46N + 2.24\ln(CSR_{7.5}))\}}$	126.93	33.9
Probit	$P_L = \Phi(5.18 - 0.26N + 1.27\ln(CSR_{7.5}))$	127.35	27.4
Log-log	$P_L = \exp\{-\exp[-(6.46 - 0.3N + 1.41\ln(CSR_{7.5}))]\}$	126.87	35.0
C-log-log	$P_L = 1 - \exp[-\exp(5.12 - 0.27N + 1.45\ln(CSR_{7.5}))]$	131.38	3.7

由上述分析可知,不同模型在不同液化概率下的临界线位置不同,液化判别结果也有所不同。由于很难通过岩土力学知识对不同模型的优劣进行直接比较,本文采用统计学中“模型概率”这一指标对不同模型与数据的符合程度进行排序。表 4 给出了 4 种模型的最优模型概率。从表 4 可以看出,Log-log 模型

的最优模型概率最高,为 35%,说明 Log-log 模型与案例库的符合程度最高,为 4 个模型中的最优模型。相比而言,文献中常用的 Logistic 模型也有较高的模型概率,说明该模型也有一定的合理性。

为便于使用,将式 (8) 代入表 4 中的 Log-log 模型,可得土体液化概率计算公式

$$P_L = \exp\left\{-\exp\left[-\left(2.73 + 1.41\ln(a_{\max}) - 1.41\ln\left(9 + 10\frac{d_w}{d_s}\right) + 1.41\ln(1 - 0.008d_s) + 3.61\ln(M_w) - 0.3N\right)\right]\right\} \quad (14)$$

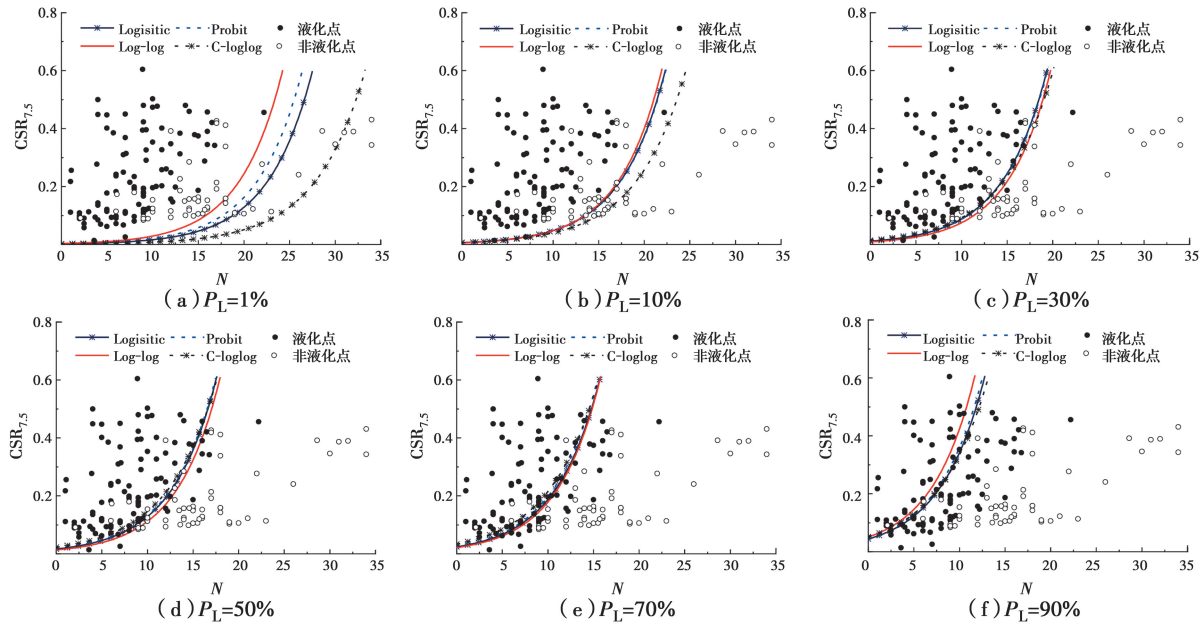


图 3 不同液化概率水平下模型的比较

Fig. 3 Comparison of models under different liquefaction probabilities

由式(14)可知,在给定地震动参数(a_{\max} , M_w)和土层信息(d_s , d_w)的条件下,土体液化概率 P_L 由该处土体对应的标贯锤击数 N 唯一确定。该锤击数可视为液化概率水平为 P_L 条件下的临界锤击数 N_{cr} 。当实测锤击数大于 N_{cr} 时,土体的液化概率小于 P_L ; 当实测锤击数小于 N_{cr} 时,土体液化概率大于 P_L 。基于式(14),给定液化概率 P_L 下的临界标贯击数 N_{cr} 可按式(15)计算。

$$N_{cr} = \frac{1}{0.3} \left\{ 2.73 + 1.41 \ln(a_{\max}) - 1.41 \ln \left(9 + 10 \frac{d_w}{d_s} \right) + 1.41 \ln(1 - 0.008 d_s) + 3.61 \ln(M_w) + \ln[-\ln(P_L)] \right\} \quad (15)$$

由于液化案例库中土类大部分为细砂、粉砂和粉细砂^[30,40],因此式(15)适用于饱和砂土和饱和粉土的液化判别。需要指出,在2008年四川省汶川地震中发现了砂砾土液化的现象^[41],式(15)不适用于砂砾土的液化判别。以中国西南板块活跃地区为例,式(15)可用于该区域内饱和砂土和饱和粉土的液化判别,但对该区域内的砂砾土地不适用。

4 回判分析

4.1 与建规法的对比

建规法中标贯击数临界值的计算公式为

$$N_{cr} = N_0 \beta [\ln(0.6 d_s + 1.5) - 0.1 d_w] \sqrt{3/\rho_c} \quad (16)$$

式中: ρ_c 为黏粒含量百分率,当小于3或为砂土时,应取3^[3]。利用建规法进行回判分析时需要案例的 ρ_c 值。液化案例库取自文献^[30],案例缺少黏粒含量信息。文献^[30]案例库中案例的土类大部分为细砂、粉砂和粉细砂等砂土^[30,40]。文献^[40,42]在对文献^[30]案例库进行液化判别时,所有案例的 ρ_c 值均取3。为与上述研究保持一致,本文利用建规法进行回判分析时 ρ_c 也取为3。 N_0 为标贯击数基准值。利用建规法进行回判分析时需要案例的 N_0 值,可根据案例的实际烈度对应的峰值加速度获得相应的标贯击数基准值; β 为调整系数,可根据实际震级 M 按式(17)计算。

$$\beta = 0.25M - 0.89 \quad (17)$$

利用式(16)和式(17)计算得到的标贯击数临界值 N_{cr} 对应的液化概率水平为32%;用于建立式(16)的数据来源与本案例库基本相同^[43]。为便于与建规法进行比较,本文将 $P_L = 32\%$ 带入式(15),由此获得的临界标贯击数与式(16)中标贯击数临界值进行比较。表5给出了式(16)和本文方法计算获得的锤击数临界值在不同烈度下的回判成功率。由表5可知,式(16)和本文方法对液化案例的总体回判成功率均高于非液化案例,这与这两种判别方法对应的液化概率为32%,偏于保守有关。表5还表明,在Ⅶ度区内,本文方法对液化案例的回判成功率高于式(16),对非液化案例的回判成功率略低于式(16);在Ⅷ和Ⅸ

度区内,本文方法对液化案例的回判成功率高于式(16),对非液化案例的回判成功率与式(16)相当;从

全部案例的回判成功率来看,本文方法的回判成功率在不同烈度区内均高于式(16)。

表 5 32%概率下的 Log-log 模型与建规法公式在不同烈度下的回判成功率

Table 5 The verification success ratio of the Chinese seismic design code and the Log-log model with 32% of liquefaction probability under a different intensities

场地烈度	式(16)(建规法)			式(15)($P_L = 32\%$)(本文方法)		
	全部案例	液化案例	非液化案例	全部案例	液化案例	非液化案例
Ⅶ	80.0	77.8	82.6	84.0	100.0	65.2
Ⅷ	83.3	89.3	75.0	89.6	100.0	75.0
Ⅸ	82.8	90.0	66.7	89.7	95.0	77.8
总体(Ⅶ~Ⅸ)	80.5	83.7	75.4	86.8	95.9	72.1

4.2 不同液化概率水平下的回判成功率

图 4 给出了式(15)在不同液化概率下的回判成功率。从图 4 中可以看出,当 $P_L = 10\%$ 时,式(15)对液化案例的判别成功率接近 100%,而对非液化案例的判别成功率约为 50%,判别结果显著偏于保守。随着液化概率的增大,式(15)对液化案例的回判成功率越来越低,对非液化案例的回判成功率越来越高,而总体回判成功率则整体呈先略增大后减小的趋势,在液化概率为 30%和 50%时取得最大值。因此,随着液化概率的增大,液化案例被判别为不液化的比例持续增加,式(15)越来越偏于不保守;与此同时,式(15)计算得到的临界标贯击数减小,表明土体抵抗地震荷载所需的标贯击数降低,故在工程实践中将更为经济。为达到安全性与经济性的平衡,采用的设计安全系数值对应的液化概率水平一般为 15%~35%^[9,15]。

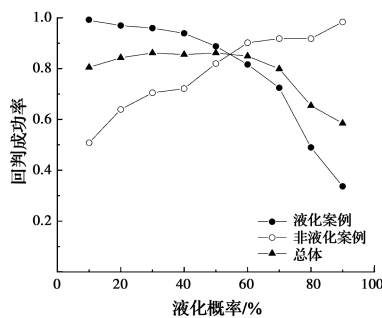


图 4 Log-log 模型在不同液化概率水平下的回判成功率

Fig. 4 The verification success ratio of Log-log model under different liquefaction probabilities

4.3 不同埋深的回判成功率

案例库 159 个案例中埋深大于 11 m 的案例仅有 11 例,且均为非液化案例;埋深大于 15 m 的案例

仅有 1 例。为了简化计算,式(8)中 r_d 近似取 $d_s \leq 9.15$ m 时的表达式代入。表 6 给出了 32%液化概率下式(15)在不同埋深条件下的回判成功率。从表 6 可以看出,32%液化概率下的式(15)对于埋深小于 9.15 m 和埋深大于 9.15 m 案例的总回判成功率均在 80%以上,在一定程度上说明了式(15)的可靠性。不过,由于本案例库的局限性,式(15)在埋深大于 15 m 时的判别精度还需进一步研究,在未来的震后场地调查中尤其需注重深埋条件下案例的收集和分析。

表 6 32%概率下的 Log-log 模型在不同埋深下的回判成功率

Table 6 The verification success ratio of the Log-log model with 32% of liquefaction probability under different soil depth ranges

d_s	全部案例	液化案例	非液化案例
$d_s \leq 9.15$ m	86.2	95.7	66.7
$d_s \geq 9.15$ m	90.5	100	87.5
总体	86.8	95.9	72.1

5 液化判别及实例分析

应用式(15)进行液化判别时,需要的地震动参数包括设计地震在本场地的地表峰值加速度 a_{max} 及地震震级 M_w 。中国抗震设计规范提供了不同地区的设计基本地震加速度值及设计地震分组,但没有提供设计地震的震级。不过,建规法给出了不同设计地震分组条件下的调整系数值。如式(17)所示,各设计地震分组对应的调整系数 β 值主要由震级 M 确定。表 7 给出了建规法中不同设计分组对应的调

整系数,将这些调整系数带入式(17),即可获得不同设计地震分组对应的震级。

表 7 设计地震分组与矩震级的对应关系

Table 7 The relationship between the designed seismic grouping and M_w

设计地震分组	β	M_w
第 1 组	0.80	6.76
第 2 组	0.95	7.36
第 3 组	1.05	7.76

5.1 实例一

图 5 给出了 1975 年海城地震中盘锦化肥厂场地的标贯试验数据^[33,44]。该场地在海城地震中观察到了土体液化现象。场地地下水位为 1.5 m,地表以下 2.6 m 为黏土;2.6~20.0 m 为粉土和细砂。

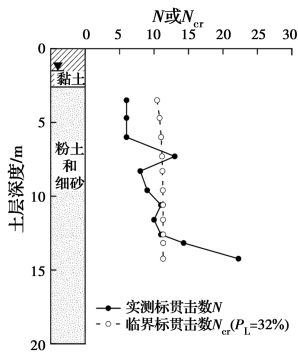


图 5 海城地震中盘锦化肥厂场地的 N 和 N_{cr} 随土层深度的变化

Fig. 5 Variation of N and N_{cr} with soil depth at the Panjin Chemical Fertilizer Plant site during the 1975 Haicheng earthquake

根据现行建规法中附录 A 可查得盘锦市的设计基本地震加速度值 $a_{max}=0.10g$,设计地震分组属于第 2 组。由表 7 可知,设计地震分组第 2 组对应的矩震级 $M_w=7.36$ 。为与建规法对应的概率水准一致,本算例取 $P_L=32\%$ 。将 a_{max} 、 d_s 、 d_w 、 M_w 和 P_L 等 5 个参数代入式(15),即可求得各测试点的标贯击数临界值 N_{cr} 。为方便比较,表 8 和图 5 中分别给出了各点处土体的标贯击数临界值。在图 5 中,当标贯击数临界值位于实测值右侧时,表明土体受到的地震荷载大于土体的抗液化强度,即土体会发生液化。由图 5 可知,地表以下 3~13 m 范围内土层发生液化的可能性较大。

表 8 海城地震中盘锦化肥厂场地的液化判别结果

Table 8 Liquefaction evaluation results for the Panjin Chemical Fertilizer Plant site during the 1975 Haicheng earthquake

埋深/m	N	N_{cr}	$P_L/\%$	液化情况
3.5	6	10.4	74.0	液化
4.7	6	10.8	76.3	液化
6.0	6	11.0	77.7	液化
7.3	13	11.2	13.8	不液化
8.3	8	11.2	64.8	液化
9.6	9	11.3	56.2	液化
10.6	11	11.3	35.3	液化
11.6	10	11.3	46.4	液化
12.6	11	11.3	35.5	液化
13.2	14	11.3	6.2	不液化
14.2	22	11.3	0.0	不液化

该方法还可直接用于计算土体的液化概率。事实上,取 $a_{max}=0.10g$ 、 $M_w=7.36$,将各点测得的 d_s 、 d_w 和 N 代入式(14),即可求得各测试点的液化概率值 P_L 。表 8 中也给出了各点的液化概率计算结果。由表 8 可知,地表以下 3~13 m 范围内土体液化概率较大,与图 5 中观测结果一致。

5.2 实例二

唐山地震中,在位于河北省乐亭县的某场地^[44]观察到了液化现象,图 6 给出了该场地的土层信息和标贯试验结果。场地地下水位为 1.6 m,地表以下 1.8 m 为黏土,1.8~15.0 m 为细砂。

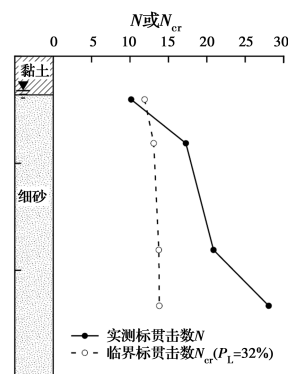


图 6 唐山地震中乐亭县某场地的 N 和 N_{cr} 随土层深度的变化

Fig. 6 Variation of N and N_{cr} with soil depth at a site in Leting during the 1976 Tangshan earthquake

根据现行建规法中附录 A 可查得乐亭县的设计基本地震加速度值 $a_{max}=0.15g$,设计地震分组属于第 3 组。由表 7 可知,设计地震分组第 3 组对应

的矩震级 $M_w = 7.76$ 。将 a_{\max} 、 d_s 、 d_w 、 M_w 和 P_L ($P_L = 32\%$) 等 5 个参数代入式(15)。图 6 给出了各测试点的标贯击数临界值 N_{cr} , 由图 6 可知, 该场地地表以下 2~3 m 范围内土体发生液化的可能性较大。

6 结论

利用广义线性模型, 基于中国液化案例库建立了 4 种液化概率判别模型, 并对模型进行了比较, 获得以下主要结论:

1) 当液化概率小于 10% 时, 4 种模型之间的差异明显, 其中 C-log-log 模型的预测结果最为保守; 当液化概率在 30%~70% 之间时, 4 种模型预测结果类似。当液化概率等于 90% 时, Log-log 模型的预测结果最不保守。

2) 贝叶斯模型比较表明, Log-log 模型为最优模型的概率最高, 说明 Log-log 模型与案例库中数据的符合程度最高, 为最优模型。基于 Log-log 模型, 提出了适用于中国的液化概率计算公式, 并给出了指定液化概率条件下标贯击数临界值的计算公式。

3) 回判分析表明, 提出的 Log-log 模型在不同烈度区内的回判成功率高于现行建筑抗震设计规范。

参考文献:

- [1] RAUCH A F. EPOLLS: An empirical method for predicting surface displacements due to liquefaction-induced lateral spreading in earthquakes [D]. Blacksburg, VA: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1997.
- [2] 陈龙伟, 袁晓铭, 孙锐. 2011 年新西兰 $M_w 6.3$ 地震液化及岩土震害述评[J]. 世界地震工程, 2013, 29(3): 1-9.
CHEN L W, YUAN X M, SUN R. Review of liquefaction phenomena and geotechnical damage in the 2011 New Zealand $M_w 6.3$ earthquake [J]. World Earthquake Engineering, 2013, 29(3): 1-9. (in Chinese)
- [3] 建筑抗震设计规范(2016 年版): GB 50011—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
Code for Seismic Design of Buildings (2016): GB 50011-2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016. (in Chinese)
- [4] SEED H B, IDRIS I M. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1971, 97(9): 1249-1273.
- [5] SEED H B, TOKIMATSU K, HARDER L F, et al. Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(12): 1425-1445.
- [6] 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.
- [7] CETIN K O, KIUREGHIAN A D, SEED R B. Probabilistic models for the initiation of seismic soil liquefaction [J]. Structural Safety, 2002, 24(1): 67-82.
- [8] BOULANGER R W, IDRIS I M. Probabilistic standard penetration test-based liquefaction-triggering procedure [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, 138(10): 1185-1195.
- [9] CHEN C J, JUANG C H. Calibration of SPT-and CPT-based liquefaction evaluation methods [C]//Geo-Denver 2000. August 5-8, 2000, Denver, Colorado, USA. Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2000: 49-64.
- [10] CHRISTIAN J T, SWIGER W F. Statistics of liquefaction and SPT results [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1975, 101(11): 1135-1150.
- [11] LAI S Y, HSU S C, HSIEH M J. Discriminant model for evaluating soil liquefaction potential using cone penetration test data [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(12): 1271-1282.
- [12] LIAO S S C, VENEZIANO D, WHITMAN R V. Regression models for evaluating liquefaction probability [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1988, 114(4): 389-411.
- [13] YOU D T L, NOBLE S K. Liquefaction criteria based statistical and probabilistic analysis: Tech. Rep. No. NCEER-97-0022 [R]. Buffalo, N. Y.: State University of New York at Buffalo, 1997: 201-216.
- [14] TOPRAK S, HOLZER T L, BENNETT M J, et al. CPT-and SPT-based probabilistic assessment of liquefaction [C]//Proc., 7th US-Japan Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and

- Countermeasures against Liquefaction. Buffalo, NY: Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, 1999: 69-86.
- [15] 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.
- [16] 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, 29 (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, 29(9): 2567-2571. (in Chinese)
- [17] 袁晓铭, 曹振中. 基于土层常规参数的液化发生概率计算公式及其可靠性研究[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)
- [18] GOH A T C. Seismic liquefaction potential assessed by neural networks [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1994, 120(9): 1467-1480.
- [19] JUANG C H, CHEN C J, JIANG T, et al. Risk-based liquefaction potential evaluation using standard penetration tests [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2000, 37(6): 1195-1208.
- [20] 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)
- [21] 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.
- [22] HALDAR A, TANG W H. Probabilistic evaluation of liquefaction potential [J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1979, 105(2): 145-163.
- [23] 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.
- [24] 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)
- [25] JUANG C H, ZHANG J, KHOSHNEVISAN S, et al. Probabilistic methods for assessing soil liquefaction potential and effect [C]//Geo-Risk 2017. June 4-7, 2017, Denver, Colorado. Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2017: 122-145.
- [26] 陈国兴, 吴琪, 孙苏豫, 等. 土壤地震液化评价方法研究进展[J/OL]. *防灾减灾工程学报*. <https://doi.org/10.13409/j.cnki.jdpme.2021.04.001>.
CHEN G X, WU Q, SUN S Y, et al. Advances in the development of soil liquefaction triggering procedures during earthquakes: Retrospect and prospect [J/OL]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*. <https://doi.org/10.13409/j.cnki.jdpme.2021.04.001>.
- [27] HOFFMANN J P. Generalized linear models: An applied approach [M]. Pearson, Boston, 2004.
- [28] ZHANG J, ZHANG L M, HUANG H W. Evaluation of generalized linear models for soil liquefaction probability prediction [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 68(7): 1925-1933.
- [29] SHEN M F, CHEN Q S, ZHANG J, et al. Predicting liquefaction probability based on shear wave velocity: An update [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2016, 75(3): 1199-1214.
- [30] 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 J F. Some comments on the formula for estimating the liquefaction of sand in revised aseismic design code [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 1984, 4(2): 95-126. (in Chinese)
- [31] 廖先斌, 郭晓勇, 杜宇. 英标和国标贯设备试验结果相关性分析[J]. *岩土力学*, 2013, 34(1): 143-147.
LIAO X B, GUO X Y, DU Y. Correlation analysis of standard penetration test results on British and Chinese standard equipments [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(1): 143-147. (in Chinese)
- [32] SEED H B, TOKIMATSU K, HARDER L F, et al. The influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations: Report No. UCB/EERC-84/15

- [R]. Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1984.
- [33] IDRIS I M, BOULANGER R W. SPT-based liquefaction triggering procedures; Report No. UCD/CGM-10 [R]. Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, CA, 2010.
- [34] LIAO S S C, WHITMAN R V. Catalogue of liquefaction and non-liquefaction occurrences during earthquakes [R]. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass, 1986.
- [35] SHIBATA T, TEPARAKSA W. Evaluation of liquefaction potentials of soils using cone penetration tests [J]. Soils and Foundations, 1988, 28(2): 49-60.
- [36] 李兆焱, 袁晓铭, 曹振中, 等. 基于新疆巴楚地震调查的砂土液化判别新公式[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(3): 483-489.
- LI Z Y, YUAN X M, CAO Z Z, et al. New evaluation formula for sand liquefaction based on survey of Bachu Earthquake in Xinjiang [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(3): 483-489. (in Chinese)
- [37] 中国地震烈度表: GB/T 17742—2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- The Chinese seismic intensity scale: GB/T 17742-2008 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2009. (in Chinese)
- [38] JUANG C H, KHOSHNEVISAN S, ZHANG J. Maximum likelihood principle and its application in soil liquefaction assessment [M]. New York: CRC Press, 2015.
- [39] SCHWARZ G. Estimating the dimension of a model [J]. The Annals of Statistics, 1978, 6(2): 461-464.
- [40] 赵倩玉. 我国规范标贯液化判别方法的改进研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2013.
- ZHAO Q Y. Improvement of liquefaction discrimination method based on surveys of the standard penetration test data in Chinese code [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, CEA, 2013. (in Chinese)
- [41] 袁晓铭, 曹振中, 孙锐, 等. 汶川 8.0 级地震液化特征初步研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1288-1296.
- YUAN X M, CAO Z Z, SUN R, et al. Preliminary research on liquefaction characteristics of Wenchuan 8.0 Earthquake [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(6): 1288-1296. (in Chinese)
- [42] 杨洋. 基于我国规范参数的土层液化可能性评价方法研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2019.
- YANG Y. Research on the evaluation method of soil liquefaction possibility based on Chinese code parameters [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, CEA, 2019. (in Chinese)
- [43] 符圣聪, 江静贝. 关于改进中国规范中土液化判别准则的建议[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(1): 112-116.
- FU S C, JIANG J B. Suggestions for improving criteria of soil liquefaction in China's code [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(1): 112-116. (in Chinese)
- [44] FU S C, TATSUOKA F. Soil liquefaction during Haicheng and Tangshan earthquake in China: A review [J]. Soils and Foundations, 1984, 24(4): 11-29.

(编辑 黄廷)