

文章编号: 1000-7598-(2008) 09-2567-05

基于 Logistic 回归模型的砂土液化概率评价

潘建平^{1,2}, 孔宪京¹, 邹德高¹

(1. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 大连 116024; 2. 江西理工大学 建筑与测绘工程学院, 江西 赣州 341000)

摘 要: 以国内外 23 次地震中 200 组场地液化实测数据为基础, 通过 Logistic 回归分析, 建立关联修正标准贯入击数 N_{160cs} 与循环应力比 CSR 的液化概率模型。以 50 % 液化概率水平为液化与非液化的临界点, 建立了指数形式的抗液化应力比 CRR 计算式, 新建概率模型预测饱和砂土液化与非液化的成功率分别为 85.71 % 和 76.14 %, 具有较高的可靠性。与已有模型比较, 使用了新的数据和修正系数, 消除了一些不合理的偏差, 总体判别结果偏于安全。为了将确定性分析方法与概率分析方法联系起来, 建立了抗液化安全系数 F_s 与液化概率 P_L 的关系式。算例结果表明, 新建概率模型简单、实用、可靠。

关 键 词: 液化评价; 回归模型; 标准贯入; 砂土; 地震

中图分类号: TU441

文献标识码: A

Probabilistic evaluation of sand liquefaction based on Logistic regression model

PAN Jian-ping^{1,2}, KONG Xian-jing¹, ZOU De-gao¹

(1 State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2 School of Architectural and Surveying Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstract: A simple model for evaluating liquefaction probability using standard penetration test (SPT) data is developed based on logistic regression analysis of 200 sets case histories of 23 earthquakes. The proposed model uses corrected blow count (N_{160cs}) and cyclic stress ratio (CSR) as input parameters. When liquefaction probability level is equal to 50 % as a limit state, the formulation of cyclic resistance ratio (CRR) was proposed with an exponent and the proposed model's reliability for liquefaction and non-liquefaction estimation of saturated sands is 85.71 % and 76.14 %, respectively. Comparisons of the proposed probability model with previously proposed deterministic and probabilistic approaches are performed to demonstrate the slightly conservation, because the new test data and modified coefficients are used in this analysis, so some sources of uncertainty and variance are eliminated. In order to correlate deterministic approach and probability approach, the relationship between the factor of safety against liquefaction and liquefaction probability is proposed. Five case records are further analyzed to demonstrate the feasibility and reliability of the proposed method.

Key words: liquefaction evaluation; regression model; standard penetration test; sand; earthquake

1 引 言

地震使建筑物地基或土工结构中饱和砂土体的液化, 可能使上部构筑物产生严重破坏。因此, 饱和砂土体的液化评价是建筑物地基和土工构筑物抗震设计的重要内容。砂土液化评价方法主要有试验分析法、经验法等^[1]。由于试验场地条件、经费、设备等因素的限制, 试验分析法并不能得到很好的普及; 经验法是以地震现场液化调查资料为基础给出液化与非液化的条件或界限, 这类方法属确定性

分析法。对于确定性液化评价法, 一般根据安全系数 F_s 判断是否液化。当 $F_s \leq 1.0$ 时, 认为液化发生; 当 $F_s > 1.0$ 时, 认为没有发生液化。从安全的角度考虑, 工程设计时一般根据经验和规范要求给出较大的安全系数, 并没有提供相应的液化概率, 判别的结果往往是偏于保守。随着科学技术的发展, 越来越多的场地液化实测数据被收集整理, 这为砂土液化的概率分析提供了可能。汪明武等^[2]探讨了可靠性分析在砂土液化势评价中的应用。余跃心等^[3-5]基于神经网络和概率理论建立了液化势评价

收稿日期: 2006-12-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 50578029); 教育部创新团队发展计划 (No. IRT0518)。

作者简介: 潘建平, 男, 1978 年生, 博士研究生, 主要从事岩土工程方面的教学科研工作。E-mail: pjp4057@sohu.com

的模型,并将其与规范方法进行了对比。陈国兴等^[6]用径向神经网络对砂土液化概率判别方法进行了研究。Liao 等^[7]基于 Logistic 回归分析液化和未液化的 SPT 数据,建立了液化概率模型,但收集的数据差异较大,没有进行统一标准修正。他试图考虑细粒含量 FC 的影响并未成功,只简单按细粒含量大于 12 %与细粒含量小于等于 12 %进行分类。Youd^[8]和 Juang^[9]用 Logistic 回归模型和 Bayesian 谱函数方法建立了液化概率分析模型,但这些研究成果存在主要问题是:有的概率模型仅适用于砂土和黏土混合物;没有进行上覆有效应力等参数的修正;原始数据中高应力比较少。

本文对文献[10]中具有较高质量的 200 组国内外地震 SPT 实测数据进行了 Logistic 回归分析,建立了新的液化概率评价模型,并与已有概率模型进行了比较分析,在此基础上建立了基于指数形式的抗液化应力比计算式。为了将确定性液化判别与概率分析联系起来,确定了 F_S 与 P_L 的关系式,并进行了实例应用。

2 液化概率分析的 Logistic 回归方法

2.1 Logistic 回归模型及参数的确定方法

在 Logistic 回归模型中,液化概率 P_L 写成影响液化发生变量的函数。液化概率函数 $P_L(X)$ 根据液化和非液化实例数据,由二进制回归分析确定相关系数, $P_L(X)$ 定义为^[7,11]

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

式中: $P_L(X)$ 为液化概率函数, $0 \leq P_L(X) \leq 1$; $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$, 为自变量数组; $\beta = [\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_n]$, 为模型回归系数数组。为了满足 $0 \leq P_L(X) \leq 1$, $P_L(X)$ 被转化为 $Q_L(X)$, $Q_L(X)$ 在 $(-\infty, +\infty)$ 单调变化。

$$Q_L(X) = \ln \left[\frac{P_L(X)}{1 - P_L(X)} \right] = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \cdots + \beta_n x_n \quad (2)$$

由最大概率原则确定回归模型系数 β , 关联 X 和 β 的概率函数为

$$L(X; \beta) = \prod_{j=1}^m [P_L(X)]^{y_j} [1 - P_L(X)]^{(1-y_j)} \quad (3)$$

式中: $L(X; \beta)$ 为 X 和 β 的概率函数; y_j 为指示器, 液化时, $y_j = 1$, 非液化时, $y_j = 0$; m 为分析数据组数; 理论上, β 的最优解存在于概率函数的极值点处, 即概率函数对每个系数的一阶导数为 0。为了简化计算, 用 $\ln[L(X; \beta)]$ 的一阶导数代替 $L(X; \beta)$ 的一阶导数。关联 X 和 β 概率函数的对数表示为

$$\ln[L(X; \beta)] = - \sum_{j=1}^m \ln \left\{ 1 + \exp \left[- \left(\beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i (x_i)_j \right) \right] \right\} - \sum_{j=1}^{nm} \left[\beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i (x_i)_j \right] \quad (4)$$

式中: nm 为非液化组数; $(x_i)_j$ 为第 i 个自变量对应第 j 组数据值。 $\ln[L(X; \beta)]$ 的极值存在于:

$$\frac{\partial \ln[L(X; \beta)]}{\partial \beta_i} = 0 \quad (5)$$

修正概率比指数 ρ^2 被用来分析解的优越性, ρ^2 为^[12]

$$\rho^2 = 1 - \frac{\ln[L(\hat{\beta})] - (n+1)/2}{\ln[L(0)]} \quad (6)$$

式中: $\ln[L(\hat{\beta})]$ 为对数概率函数的最大值; $\ln[L(0)]$ 为 $\beta=0$ 时对数概率函数值。理论上, 修正概率比指数 ρ^2 在 0~1 之间, 当 $\rho^2 > 0.4$, 可认为解 β 能较好地满足回归模型^[7]。

2.2 模型变量的选择及其确定方法

基于不同的确定性分析方法和回归分析方法, 几个指标已经被选用, 如修正标准贯入击数 N_{160cs} 、加速度 a_{max} 、震级 M_W 、细粒含量 FC 等。一般将指标分为两类: (1) 土的抗液化强度, 表示为抗液化应力比 CRR ; (2) 地震荷载作用的结果, 表示为循环应力比 CSR 。Logistic 回归模型要求自变量指标相互独立, 根据经验, N_{160cs} 和 $\ln CSR$ 为 Logistic 回归模型的自变量。由式 (2) 得液化概率方程为

$$\ln \left[\frac{P_L(X)}{1 - P_L(X)} \right] = \beta_0 + \beta_1 N_{160cs} + \beta_2 \ln CSR \quad (7)$$

饱和砂土的 N_{160cs} 为^[10,13]

$$N_{160cs} = N_m C_N C_E C_B C_R C_S C_{FINES} \quad (8)$$

式中: N_m 为测试的标贯击数; C_N 为将标贯击数 N_m 转化成上覆有效应力 100 kPa 情况的修正系数; C_E 为贯入能量比修正系数; C_B 为钻孔半径修正系数; C_R 为钻杆长度修正系数; C_S 为取样器是否有衬垫层的修正系数; C_{FINES} 为细粒含量修正系数, $C_{FINES} = (1 + 0.004FC) + 0.05(FC/N_{1,60})$, FC 为细粒含量, 取百分数 (如 27 % 表示为 $FC=27$), 细粒含量小于 5 % 时, $FC = 0$; 细粒含量大于 35 % 时, $FC = 35$ 。

地震在饱和砂土中引起的等效循环应力比按 Seed^[14] 公式计算, 并进行震级和上覆有效应力修正:

$$CSR = 0.65 \frac{a_{max}}{g} \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} r_d MSF^{-1} K_\sigma^{-1} \quad (9)$$

式中: $a_{\max}$ 为水平向地表加速度; g 为重力加速度; σ_v , σ'_v 分别为竖向总应力和有效应力; r_d 为应力折减系数; K_σ 为上覆有效应力修正系数, 当 $\sigma'_v \leq 100$ kPa, $K_\sigma=1$; $\sigma'_v > 100$ kPa, $K_\sigma=(\sigma'_v)^{-0.3}$. MSF 为震级修正系数, NCEER 推荐值^[13]如图 1 所示, 这里取其中间值, $MSF=(M_w/7.5)^{-2.95}$.

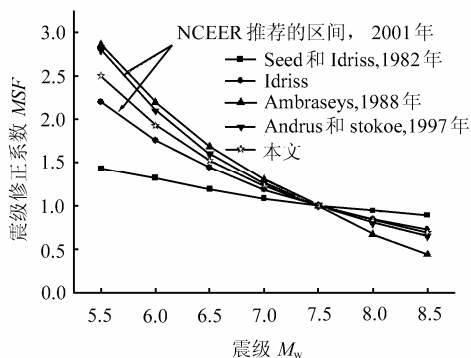


图 1 震级修正系数
Fig.1 Magnitude scaling factors

2.3 模型参数值的确定及结果对比分析

选取国内外 23 次地震震级在 5.6~8.0 之间、较新且较高质量的 200 组 SPT 实测数据为 Logistic 回归分析的原始数据, 其中液化 112 组, 非液化 88 组^[10]. 按式 (3)~(5) 进行回归分析, 建立液化概率模型为

$$\ln \left[\frac{P_L(X)}{1-P_L(X)} \right] = 14.5416 - 0.3282 N_{160cs} + 4.7839 \ln CSR \quad (10)$$

修正概率比指数 $\rho^2=0.4968$, 说明求出的参数 β 能满足要求。

在不同液化概率情况下, 计算式 (10) 中 CSR 和 N_{160cs} 之间的关系如图 2、图 3 所示。在图 2 中纵坐标和横坐标分别是 $\ln CSR$ 和 N_{160cs} , 显示出两者之间线性关系。图 3 纵坐标改变为 CSR , 横坐标仍为 N_{160cs} , 可以看出, 两者之间呈非线性关系。如果以 50% 概率水平为液化与非液化的临界点, 式 (10)

预测液化和非液化的成功率分别为 85.71% 和 76.14%, 说明有较高的可靠性。

图 4 是本文概率曲线与已有概率曲线的比较。图 4(a) 中 Seed^[13] 临界曲线 ($FC=5$) 落在 50%~70% 概率之间, 图 4(b) 比较了 Juang^[9] 的结果, 总体上本文结果偏安全, 主要是由于分析实例数据及参数修正都得到了更新, 消除了一些不合理偏差。图 4(c) 是本文结果与陈国兴^[6] 神经网络方法结果的比较, 看出在低振次时, 本文结果偏危险, 在较高振次时偏安全, 但在 $N_{160cs} > 27$ 时又转为偏危险; 同时在低液化概率情况下两者相近, 但随着液化概率的增大, 两者差别增大。

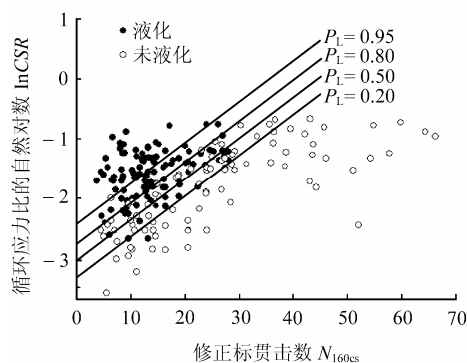


图 2 不同概率水平 $\ln CSR$ 与 N_{160cs} 的关系
Fig.2 Relation of $\ln CSR$ and N_{160cs} with different probabilities

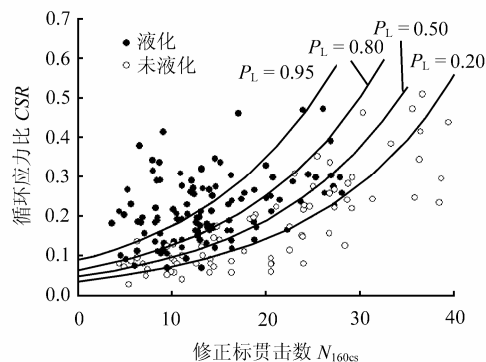


图 3 不同概率水平 CSR 与 N_{160cs} 的关系
Fig.3 Relation of CSR 与 N_{160cs} with different probabilities

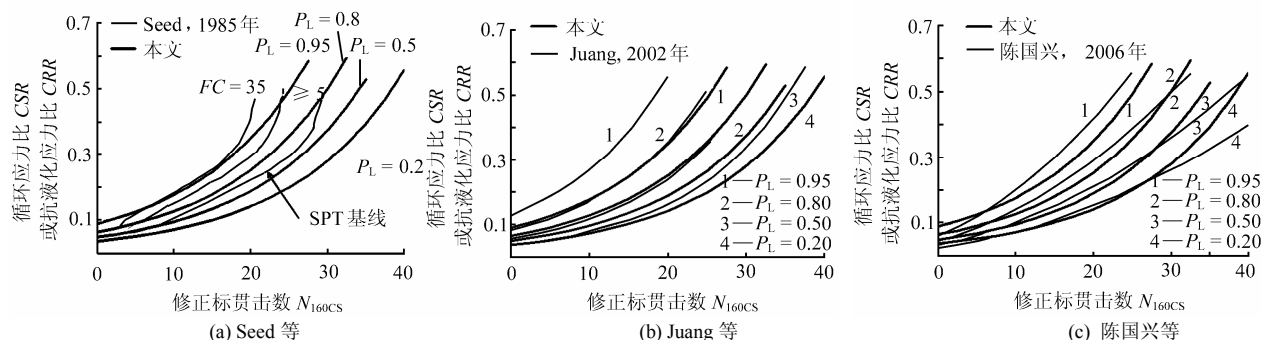


图 4 本文概率模型与其他模型的比较
Fig.4 Comparison between the available models

$P_L = 0.5$ 的 Logistic 回归曲线被用来区分液化与非液化区类似于 Seed 等提出的确定性简化分析方法中的临界抗液化应力比曲线, 即 $F_S = 1.0$ 的情况。因此, 图 3 中 $P_L = 0.5$ 时 CSR 与 N_{160cs} 的关系曲线等效于 CRR 与 N_{160cs} 的关系曲线。当 $P_L = 0.5$ 时, 转换式 (10) 得抗液化应力比经验式为

$$CRR = \exp(-14.5416 + 0.3282N_{160cs})/4.7839 \quad (11)$$

图 5 将上式与其他主要经验关系式进行了对比分析。可以看出, 当 $N_{160cs} < 6$ 时, 本文结果与 NCEER 和 Thomas 方法基本一致, 比陈国兴结果稍危险; $6 \leq N_{160cs} \leq 27$, 本文结果比 Thomas 和陈国兴结果稍安全, 约在 $N_{160cs} > 27$ 时, 本文结果相比 Thomas 和陈国兴结果又转成稍危险。一般认为, 当 $N_{160cs} > 30$ 时, 饱和砂土不会发生液化。从以上比较结果可知, 式 (11) 计算的 CRR 是可靠的。

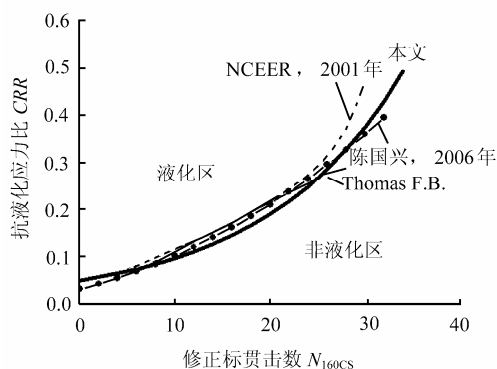


图 5 砂土液化判别方法的比较
Fig.5 Comparison of different cyclic resistance ratio CRR for liquefaction evaluation

3 安全系数与液化概率的关系

抗液化安全系数定义为

$$F_S = CRR/CSR \quad (12)$$

对于具体的场地, 饱和砂土的 CRR 可按式 (11) 或其他公式计算; CSR 可按式 (9) 计算。然后用式 (10) 和式 (12) 分别计算场地的液化概率 P_L 和抗液化安全系数 F_S , 两者之间的关系如图 6 所示, 拟合关系式为

$$P_L = 1/(1 + F_S^{4.75}) \quad (13)$$

从图 6 看出, $0.5 \leq F_S \leq 1.5$ 时, P_L 随 F_S 急剧变化; 当 $F_S < 0.5$ 时, 几乎肯定发生液化; 当 $F_S > 1.5$ 时, 发生液化的可能性很小。确定性分析方法规定 $F_S \leq 1.0$, 就认为发生液化, 并没有给出具体的液化概率, 显然欠合理。实际操作时, 直接由式 (10) 计

算液化概率, 或者用经验关系式 (13) 计算液化概率。

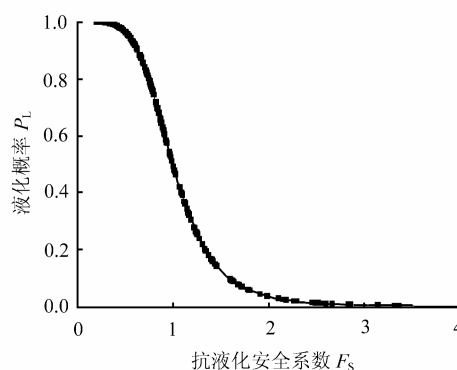


图 6 $F_S - P_L$ 的关系曲线
Fig.6 Relation curve of F_S and P_L

4 算例

从文献 [15] 获取 5 个现场测试点, 用本文概率模型进行液化分析, 结果见表 1。可以看出, 本文结果与现场基本一致, 在得出抗液化安全系数 F_S 的同时, 还给出相应的液化概率 P_L 。有时安全系数小于 1.0, 并不意味着液化发生, 如表 1 中第 2 测点。

表 1 部分测点地震数据及本文分析结果
Table 1 Partial boring seismic data and Analysis results of the text

震级	标贯击数	地表加速度	循环应力比	细粒含量	现场情况	本文 F_S	本文 P_L
M_W	N_{160cs}	度 a_{max}/g	比 CSR	$FC/\%$			
7.9	2	0.20	0.19	14	液化	0.3	1.0
7.3	29	0.35	0.37	2	非液化	0.9	0.6
8.3	11	0.16	0.26	10	液化	0.4	1.0
6.1	6	0.10	0.06	13	非液化	1.2	0.3
6.1	6	0.10	0.06	27	非液化	1.1	0.4

5 结 语

基于 Logistic 回归方法通过分析新的实测标贯数据, 建立了液化概率评价模型。通过与已有液化概率曲线对比分析, 可认为本文结果总体上偏安全; 以 $P_L = 0.5$ 的概率曲线为极限状态曲线, 建立了计算砂土抗液化应力比的经验公式, 由比较分析可知, 本文经验公式可行; 基于 200 个实测数据分析, 建立了液化概率和抗液化安全系数的对应关系式, 将确定性分析方法与概率分析方法联系起来; 算例结果表明, 本文建议的液化概率评价模型相比传统的确定性分析方法, 不仅能判定液化的发生与否, 还能给出液化的概率。随着液化场地实测数据的增加, 液化概率评价方法不断地得到完善, 确定性分析方法与概率分析方法相结合的砂土液化评价将会得到越来越多的重视。

参 考 文 献

- [1] 张克绪, 谢君斐. 土动力学[M]. 北京: 地震出版社, 1989: 164—167.
- [2] 汪明武, 罗国煜. 可靠性分析在砂土液化势评价中的应用[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(5): 542—544.
WANG Ming-wu, LUO Guo-yu. Application of reliability analysis to assessment of sand liquefaction potential[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2000, 22(5): 542—544.
- [3] 余跃心, 刘汉龙, 高玉峰. 场地液化势评价概率模型[J]. 工程勘察, 2002, 34(5): 4—7.
SHE Yue-xin, LIU Han-long, GAO Yu-feng. Probabilistic model for evaluation of site liquefaction potential[J]. **Geotechnical Investigation & Surveying**, 2002, 34(5): 4—7.
- [4] 余跃心. 砂土液化判别方法可靠性评价[J]. 岩土力学, 2004, 25(5): 803—807.
SHE Yue-xin. Probability evaluation of liquefaction distinguishing method of sands[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(5): 803—807.
- [5] 余跃心. 二维场地液化势预测的神经网络方法[J]. 岩土力学, 2004, 25(10): 1 569—1 574.
SHE Yue-xin. Neural network approach for prediction of liquefaction potential of two-dimensional site[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(10): 1 569—1 574.
- [6] 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 Guo-xing, LI Fang-ming. 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.
- [7] 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.
- [8] YOUNG T L, NOBLE S K. Liquefaction criteria based statistical and probabilistic analysis[C]// Proceedings of NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soil, Technical report No: NCEER-97-0022, New York: State University of New York at Buffalo, 1997: 201—216.
- [9] 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.
- [10] 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): 1 314—1 340.
- [11] LAI S Y, CHANG W J, Lin P S. Logistic regression model for evaluating soil liquefaction probability using CPT data [J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2006, 132(6): 694—704.
- [12] HOROWITZ J L. Evaluation of usefulness of two standard goodness-of-fit indicators for comparing non-nested random utility models[R]. Washington D C: Advances in Trip Generation, Transportation Research Record 874, Transportation Research Board, National Research Council, 1982: 19—25.
- [13] YORD T L, IDRIS I M. Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCCER and 1998 NCCER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2001, 127(4): 297—313.
- [14] SEED H B, IDRIS I M. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential[J]. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE**, 1971, 97(9): 1 249—1 273.
- [15] ANTHONY T C. Seismic liquefaction potential assessed by neural networks[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1994, 120(9): 1 467—1 480.