

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.04.002

基于剪切波速的土体液化概率判别法*

肖诗豪¹, 张洁¹, 葛一荀¹, 孔明²

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510230)

摘要: 采用极大似然法对确定性剪切波速液化判别模型进行了标定, 在此基础上提出了基于剪切波速的土体液化概率判别模型。结果表明, 由对数正态分布、正态分布、最小耿贝尔分布以及最大耿贝尔分布获得的液化判别曲线在液化概率为5%和15%时有一定差异, 在液化概率为35%时区别不大。根据贝叶斯信息准则, 由最小耿贝尔模型标定的模型修正系数与液化案例数据库符合程度最好。Andrus和Stokoe液化模型修正系数的均值为0.879, 说明该模型获得的安全系数从平均意义上小于真实安全系数; 变异系数为0.387, 表明该模型具有一定程度的模型不确定性。本文所建立概率模型的液化判别曲线与文献中基于贝叶斯映射函数获得的液化判别曲线较为一致, 与文献基于逻辑回归方法获得的液化判别曲线在高循环应力比区域有较大差异。

关键词: 剪切波速; 土体液化判别; 极大似然法; 概率模型

中图分类号: P642.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)04-0490-08

Probabilistic Evaluation of Soil Liquefaction Potential based on Shear Wave Velocity

XIAO Shihao¹, ZHANG Jie¹, GE Yixun¹, KONG Ming²

(1. Tongji University, College of Civil Engineering, Shanghai 200092, China;

2. Fourth Harbour Engineering Investigation and Design Institute Co., Ltd., China Communications Construction Company, Guangzhou 510230, China)

Abstract: Soil liquefaction is a common natural disaster during earthquakes. In recent years, the evaluation of soil liquefaction potential based on shear wave velocity has received increasing attention. In this paper, the maximum likelihood method is used to calibrate the worldwide used deterministic liquefaction evaluation model based on shear wave velocity proposed by Andrus and Stokoe. On this basis, a probabilistic evaluation model of soil liquefaction potential based on shear wave velocity is proposed. The results show that the liquefaction evaluation curves obtained from lognormal distribution, normal distribution, minimum Gumbel distribution and maximum Gumbel distribution have some differences when the liquefaction probability is 5% and 15%, and little difference when the liquefaction probability is 35%. The model correction coefficient calibrated by the minimum Gumbel model is mostly supported by the liquefaction case database according to the Bayesian information criterion. The mean value of the model correction coefficient is 0.879, indicating that the factor of safety obtained by the mod-

* 收稿日期: 2019-07-01; 修回日期: 2019-09-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(41672276)资助

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

通讯作者: 张洁(1980-), 男, 教授, 博士。主要从事岩土工程可靠度与风险分析。Email: cezhangjie@tongji.edu.cn

el proposed by Andrus and Stokoe is smaller than the true factor of safety in the average sense. The coefficient of variation is 0.387, indicating that the model error involves some uncertainties. The liquefaction evaluation curve of the probability model established in this paper is consistent with that obtained by Bayesian mapping function in the literature, and is quite different from that obtained based on logistic regression method in the high cyclic stress ratio range in the literature.

Keywords: shear wave velocity; soil liquefaction evaluation; maximum likelihood method; probability model

引言

土体液化是地震过程中常见的一种自然灾害。例如,在1964年日本新泻地震中,大面积的土体液化造成了新泻地区约10亿美元的损失^[1];在2011年新西兰 Christchurch 地震中,大面积的砂土液化导致了约15 000栋居民住宅、1 000栋商业用房及桥梁、堤坝、地下生命线设施的严重破坏^[2]。土体在地震作用下液化的可能性可用液化势来衡量。在工程实践中,基于标准贯入试验^[3-4]、静力触探试验^[5]和剪切波速(V_s)测试^[6-7]等原位试验的半经验方法在土体液化势评估中获得了广泛的应用。其中,剪切波速是一个与土体小应变剪切模量直接相关的土性参数。相比于标准贯入试验和静力触探试验,剪切波速测试更不易受细粒土含量的影响,且能在砂砾场地获得较可靠的测试结果^[8-9]。此外,对于不允许钻孔的场地,剪切波速还可以利用表面波谱分析技术获得^[10]。近年来,剪切波速在土体液化判别方面日益受到重视。

目前,由美国学者 R.D.Andrus 等^[11]提出的简化模型是国际上应用最广的剪切波速液化判别方法。在该方法中,液化势由安全系数 F_s 来衡量。从理论上讲, $F_s < 1$ 表示土体会发生液化,反之土体不会发生液化。然而,由于模型误差等因素的存在,工程实践中常发现土体在 $F_s > 1$ 的条件下也可能发生液化,在 $F_s < 1$ 的条件下也可能不发生液化,因此 F_s 并非土体液化势的准确衡量指标。近些年,一些学者对基于剪切波速的液化概率判别方法进行了研究。C.H.Juang 等^[12]利用逻辑回归法和贝叶斯映射函数法建立了液化概率判别方法;R.Kayan 等^[8]采用贝叶斯回归与结构可靠性方法建立了液化概率判别方法;孔梦云等^[13]针对核电厂不同的抗震要求分别建议了不同液化概率的液化判别曲线;M.F.Shen 等^[14]利用三种模型评估标准选出最优的广

义线性模型建立液化概率判别方法;杨洋等^[15]利用逻辑回归模型基于四个土层常规参数提出了液化概率计算公式。我国《建筑抗震设计规范》^[16]对基于概率的土体液化判别方法进行了充分肯定。

如前所述,文献[11]中提出的土体液化判别方法在工程中受到了广泛的关注和应用。如能基于文献[11]中模型建立土体液化的概率判别方法,将对土体概率判别在实际工程中的推广和应用起到重要作用。本文的目的即是基于文献[11]中的确定性液化判别模型提出基于剪切波速的土体液化概率判别模型,在此基础上建立基于剪切波速的土体液化概率判别方法,并与已有概率模型作比较。研究成果对在实际工程中推广土体液化概率判别方法的应用具有重要意义。

1 基于剪切波速的液化判别模型

文献[11]中液化判别模型采用循环应力比 CSR 表征作用在土体上的地震荷载,利用循环抗力比 CRR 表征土体抵抗液化的强度。土体抵抗液化的安全系数 F_s 为:

$$F_s = \frac{CRR}{CSR} \quad (1)$$

其中,循环应力比 CSR 的表达式为:

$$CSR = 0.65 \left(\frac{a_{\max}}{g} \right) \left(\frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \right) r_d \quad (2)$$

式中, a_{\max} 为地表峰值加速度; g 为重力加速度; σ_v 为总上覆土压力; σ'_v 为有效上覆土压力; r_d 为剪应力折减系数^[17]。

循环抗力比 CRR 的表达式为:

$$CRR = \left[0.022 \left(\frac{K_c V_{s1}}{100} \right)^2 + 2.8 \left(\frac{1}{V_{s1}^* - K_c V_{s1}} - \frac{1}{V_{s1}^*} \right) \right] MSF \quad (3)$$

式中, V_{s1} 为修正的剪切波速; V_{s1}^* 为循环液化发生

的 V_{s1} 上限值,当细粒土含量 $FC \leq 5\%$ 时, $V_{s1}^* = 215 \text{ m/s}$; $5\% < FC \leq 35\%$ 时, $V_{s1}^* = 215 - 0.5(FC - 5) \text{ m/s}$; $FC > 35\%$ 时, $V_{s1}^* = 200 \text{ m/s}$; K_c 为考虑土体胶结老化引起 V_{s1} 值偏高的修正系数; MSF 为震级修正系数,其表达式为:

$$MSF = \left(\frac{M_w}{7.5} \right)^{-2.56} \quad (4)$$

式中, M_w 为矩震级。

上述半经验性模型在模型建立中不可避免地引入了一些简化和假设(如 r_d 、MSF 的计算等),导致由式(1)获得的安全系数未必是土体真实的安全系数。因此,即便计算安全系数大于1,土体仍存在液化的可能性,反之亦然。此时,可通过对计算安全系数与土体是否液化的案例进行比较,对该模型的误差进行标定,由此获得计算安全系数与真实安全系数之间的关系,建立土体液化概率判别模型。

2 土体液化数据库

文献[18]包含了26次地震的105个液化案例和120个非液化案例,共计225个案例。根据文献[11],对于修正剪切波速值 V_{s1} 大于 V_{s1}^* 的案例,可直接判定为不液化,不能采用式(1)计算其安全系数。文献[18]中共有8个 $V_{s1} > V_{s1}^*$ 的案例。排除上述8个案例后,共剩下105个液化案例和112个非液化案例,共计217个案例。本文将利用上述217个案例对文献[11]中的液化判别模型进行标定。表1给出了这217个案例的基本信息。

3 模型误差标定方法

3.1 模型修正系数

如前所述,由于模型误差的存在,文献[11]中计算获得的安全系数并非土体真实的安全系数。令 z 为一表征模型误差的模型修正系数,计算安全系数 F_s 与真实安全系数 F_{sa} 之间的关系可以表示为^[19]:

$$F_{sa} = \frac{F_s}{z} \quad (5)$$

由于模型修正系数难以准确确定,因此 z 可模拟为一随机变量。令 μ 和 δ 代表模型修正系数 z 的均值和变异系数。如 μ 小于1,表示式(1)平均意义

表1 液化数据库的基本信息

Table 1 Basic information of the liquefaction database

序号	地震名称	年份	震级	液化案例数	非液化案例数
1	San Francisco	1906	7.7	8	4
2	Daly City	1957	5.3	0	5
3	Niigata	1964	7.5	3	1
4	Haicheng	1975	7.3	5	1
5	Imperial Valley	1979	6.5	4	7
6	Mid-Chiba	1980	5.9	0	2
7	Westmorland	1981	5.9	6	5
8	Borah Peak	1983	6.9	15	0
9	Chiba-Ibaragi	1985	6	0	2
10	Taiwan (event LSST2)	1985	5.3	0	4
11	Taiwan (event LSST3)	1985	5.5	0	4
12	Taiwan (event LSST4)	1986	6.6	0	4
13	Taiwan (event LSST6)	1986	5.4	0	4
14	Taiwan (event LSST7)	1986	6.6	0	4
15	Taiwan (event LSST8)	1986	6.2	0	4
16	Taiwan (event LSST12)	1986	6.2	0	4
17	Taiwan (event LSST13)	1986	6.2	0	4
18	Taiwan (event LSST16)	1986	7.6	0	4
19	Chiba-Toho-Oki	1987	6.5	0	1
20	Elmore Ranch	1987	5.9	0	11
21	Superstition Hills	1987	6.5	3	8
22	Loma Prieta	1989	7	42	21
23	Kushiro-Oki	1993	8.3	2	0
24	Hokkaido-Nansei-Oki	1993	8.3	3	1
25	Northridge	1994	6.7	3	0
26	Hyogoken Nanbu	1995	6.9	11	7

上低估了真实安全系数,反之亦然; δ 越大,表示模型误差的不确定性越大。

令 $F(z)$ 代表 z 的累积分布函数,液化概率 P_L 和安全系数 F_s 之间的关系可以表示为^[19]:

$$P_L = P(F_{sa} < 1) = P(z > F_s) = 1 - F(F_s) \quad (6)$$

由上式可以看出,安全系数与液化概率之间的

关系还与 z 的分布类型有关。本文将对对数正态分布、正态分布、最小耿贝尔分布以及最大耿贝尔分布^[20]进行分析和比较,由此获得 P_L-F_s 的最优关系。这四种分布的累积分布函数为:

对数正态分布:

$$F(z) = \Phi \left[\frac{\ln(z) - \ln\left(\frac{\mu}{\sqrt{1+\delta^2}}\right)}{\sqrt{\ln(1+\delta^2)}} \right] \quad (7)$$

正态分布:

$$F(z) = \Phi \left(\frac{z - \mu}{\mu\delta} \right) \quad (8)$$

最小耿贝尔分布:

$$F(z) = 1 - \exp \left\{ - \exp \left[\frac{(z - \mu)(\pi - 0.5772\sqrt{6}\delta)}{\sqrt{6}\mu\delta} \right] \right\} \quad (9)$$

最大耿贝尔分布:

$$F(z) = \exp \left\{ - \exp \left[\frac{-(z - \mu)(\pi - 0.5772\sqrt{6}\delta)}{\sqrt{6}\mu\delta} \right] \right\} \quad (10)$$

式中, Φ 为标准正态分布的累积分布函数。

由式(7)~(10)可以看出,给定分布条件下模型修正系数的累积分布函数由 μ 和 δ 确定。令 $\theta = \{\mu, \delta\}$ 。

3.2 模型标定方法

由于震后调查人员更着重于在液化场地进行现场试验,导致液化数据库中液化案例的比例很可能高于实际上液化案例的真实比例^[19]。为了考虑上述抽样偏差的影响,可采用加权极大似然方法对 θ 进行标定,极大似然函数的对数形式为^[21]:

$$\ln[L(\theta|D)] = \omega_L \sum_{i=1}^{n_L} \ln[1 - F(F_{Si})] + \omega_{NL} \sum_{j=1}^{n_{NL}} \ln F(F_{Sj}) \quad (11)$$

式中, n_L 为液化案例数; n_{NL} 为非液化案例数; ω_L 和 ω_{NL} 分别为液化案例和非液化案例的权重因子; D 为标定数据库。

ω_L 和 ω_{NL} 按下式计算^[22]:

$$\omega_L = \frac{Q_P}{Q_S} \quad (12)$$

$$\omega_{NL} = \frac{1 - Q_P}{1 - Q_S} \quad (13)$$

式中, Q_S 为标定数据库中液化案例的比例; Q_P 为实际中液化案例的真实比例,可取0.456^[23]。

3.3 模型比较方法

式(7)~(10)给出了4种可能的模型修正系数分布模型。贝叶斯信息准则(Bayesian Information Criterion, BIC)能同时考虑模型的拟合效果和复杂程度,经常被用来对模型进行比较和排序。本文将采用贝叶斯信息准则对上述4种分布模型进行比较。贝叶斯信息准则的表达式为^[19]:

$$BIC(M_i) = -2\ln[L(\theta^*|M_i, D)] + k_i \ln(n) \quad (14)$$

式中, M_i 为第 i 个模型; θ^* 为使得似然函数取到最大值的 θ 值; $L(\theta^*|M_i, D)$ 为模型 M_i 在 θ^* 点处的似然函数值; k_i 为模型 M_i 中未知参数的个数; n 为数据库中的案例数;BIC值越小,说明模型与标定数据库的拟合程度越好。

4 模型误差标定与比较

根据式(11)对式(7)~(10)中的4个模型进行标定,表2给出了模型误差标定的结果。图1给出

表2 模型标定及比较

Table 2 Calibration and comparison of models

模型名称	P_L 的计算公式	模型系数		BIC
		μ	δ	
对数正态	$P_L = 1 - \Phi \left[\frac{\ln(F_s) + 0.401}{0.639} \right]$	0.822	0.711	187.066
正态	$P_L = 1 - \Phi \left[\frac{F_s - 0.729}{0.386} \right]$	0.729	0.530	181.752
最小耿贝尔	$P_L = \exp \left[- \exp(3.115 \cdot F_s - 2.738) \right]$	0.879	0.387	181.154
最大耿贝尔	$P_L = 1 - \exp \left[- \exp(-2.773 \cdot F_s + 1.578) \right]$	0.569	0.595	183.734

了4个模型在不同液化概率(5%、15%、35%、50%)下的液化判别曲线,其中横坐标为修正剪切波速 V_{s1} ,纵坐标为标准化为矩震级 $M_w=7.5$ 的修正循环应力比 $CSR_{7.5}$ 。 $CSR_{7.5}$ 可按如下公式计算^[11]:

$$CSR_{7.5} = \frac{CSR}{MSF} \quad (15)$$

图1还给出了液化数据库中的217个案例,由式(3)可知,不同案例的循环抗力比CRR与细粒土含量有关,导致液化判别曲线也与细粒土含量有关。本文基于式(11)进行模型误差标定的过程中考虑了细粒土含量的影响。相比而言,细粒土含量

$FC \leq 5\%$ 对应的液化判别曲线最为保守。为了方便比较,图1中给出细粒土含量 $FC \leq 5\%$ 对应的液化判别曲线。从图中可以看出,基于不同模型获得的液化判别曲线有所区别。当液化概率为5%和15%时,对数正态模型对应的液化判别曲线位于其它模型判别曲线的下方,对液化判别最为保守;当液化概率为35%时,4种模型获得的液化判别曲线位置非常接近;当液化概率为50%时,最小耿贝尔模型对应的液化判别曲线位于其它模型判别曲线的下方,对液化判别最为保守。

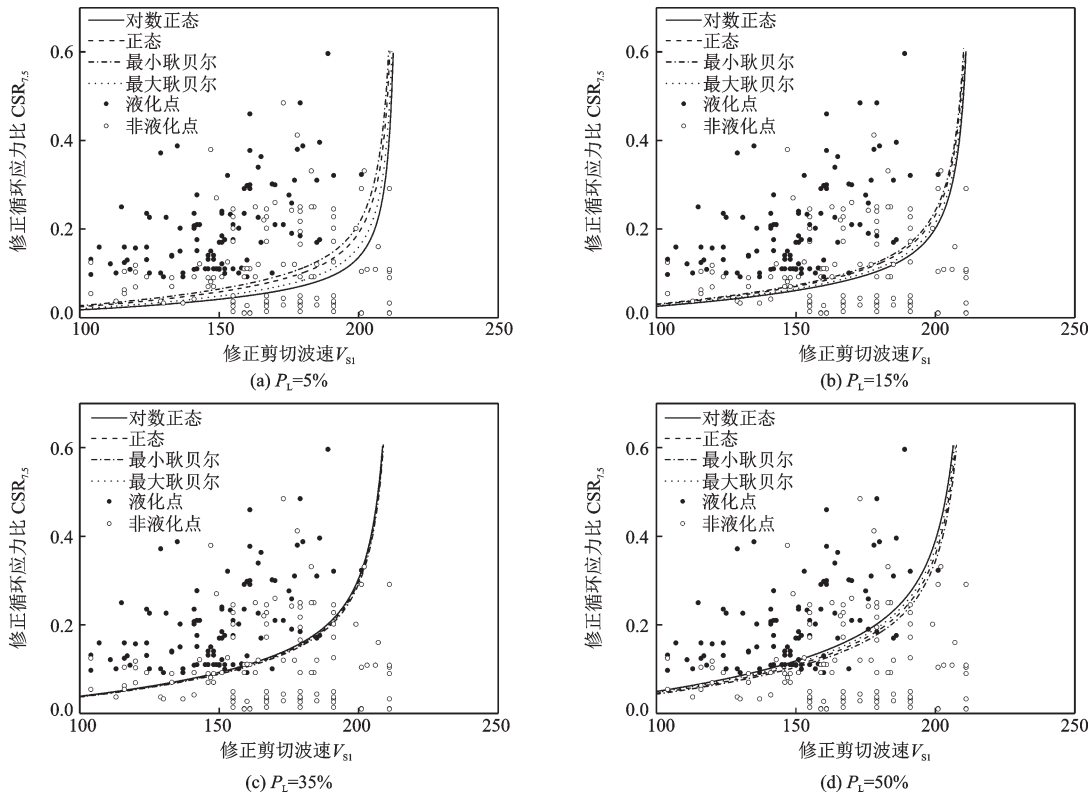


图1 不同概率水平下四种模型曲线的对比

Fig.1 Comparison of four models at different probability levels

图2给出了4个模型的液化概率 P_L 和安全系数 F_s 的关系曲线。图1中各个液化概率水平下的模型预测结果可以在图2中进行验证。从图2可以看出,当 $P_L=5\%$ 和 15% 时,对数正态分布模型对应的 F_s 最大,因而最为保守;当 $P_L=30\%$ 时,4个模型的预测结果几乎没有差别;当 $P_L=50\%$ 时,最小耿贝尔模型对应的安全系数最大,因而最保守。图2中观测到的现象与图1中的现象一致。

由上述分析可知,由不同模型获得的 P_L-F_s 关系有所不同。从表2可以看出,最小耿贝尔模型的BIC值最小,说明式(9)与液化数据库的拟合程度最

好。该模型对应的模型修正系数的均值 μ 为0.879,表明文献[11]中获得的安全系数从平均意义上小于真实安全系数; δ 等于0.387,说明文献[11]中安全系数计算模型存在一定的不确定性。以下将基于最小耿贝尔模型对土体的液化概率进行讨论。

文献[24]将液化可能性按液化概率分为5个等级,见表3。由表3可知,当 $P_L < 15\%$ 时,液化几乎肯定不会发生;当 $15\% < P_L < 35\%$ 时,液化不太可能发生。图3给出了最小耿贝尔模型在液化概率分别为15%、35%的液化判别曲线和液化数据库中案例点的相对位置关系。从图中可以看出,仅有2

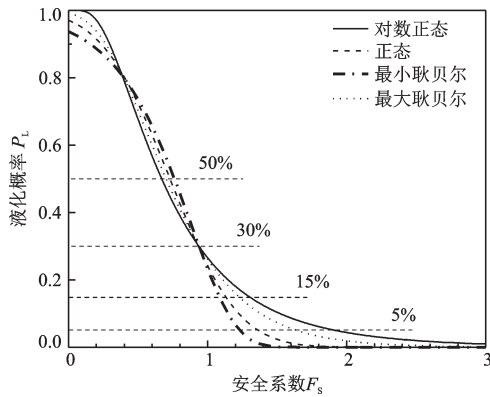


图2 不同模型的 P_L-F_s 关系

Fig.2 P_L-F_s relationships obtained based on different models

个液化案例点在液化概率为35%的曲线右边,而液化概率为15%的曲线能正确判别所有的液化案例。

表3 基于液化概率的液化可能性分类^[24]

Table 3 Classification of liquefaction possibilities based on liquefaction probability^[24]

液化概率	等级	液化可能性
$0.85 \leq P_L$	5	几乎肯定会液化
$0.65 \leq P_L < 0.85$	4	很可能液化
$0.35 \leq P_L < 0.65$	3	液化和不液化等可能
$0.15 \leq P_L < 0.35$	2	不太可能液化
$P_L < 0.15$	1	几乎肯定不会液化

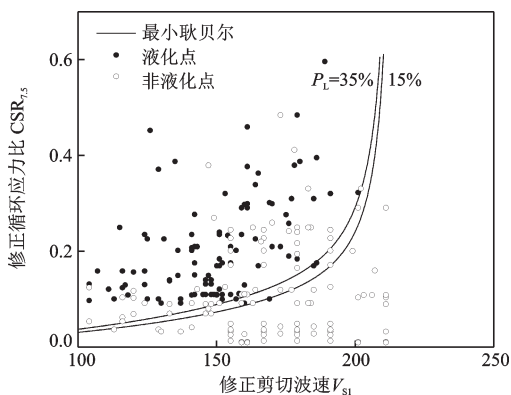


图3 最小耿贝尔模型液化判别曲线与案例的比较

Fig.3 Comparison between equiprobability curves from the minimum Gumbel model and the case histories

5 与已有概率模型比较

文献[12]曾分别基于逻辑回归和贝叶斯映射

函数法提出了两个基于剪切波速的液化概率判别模型。基于逻辑回归的液化概率判别模型为:

$$P_L = \frac{1}{1 + \exp[-14.8967 + 0.0611 \cdot V_{s1} - 2.6418 \cdot \ln(CSR_{7.5})]} \quad (16)$$

基于贝叶斯映射函数建立的液化概率判别模型为:

$$P_L = \frac{1}{1 + \left(\frac{F_s}{0.73}\right)^{3.4}} \quad (17)$$

式中, F_s 为文献[11]中获得的安全系数。

图4给出了本文建立的最小耿贝尔模型与式(16)在液化概率为15%、35%时的液化判别曲线。由图可知,当 V_{s1} 值小于200 m/s时,两个模型的曲线比较接近;当 V_{s1} 值大于200 m/s时,两个模型的液化判别曲线开始偏离,并且随着 V_{s1} 的增大差异越来越大;对于相同的 V_{s1} 值,最小耿贝尔模型获得的 $CSR_{7.5}$ 值大于逻辑回归模型获得的 $CSR_{7.5}$ 。

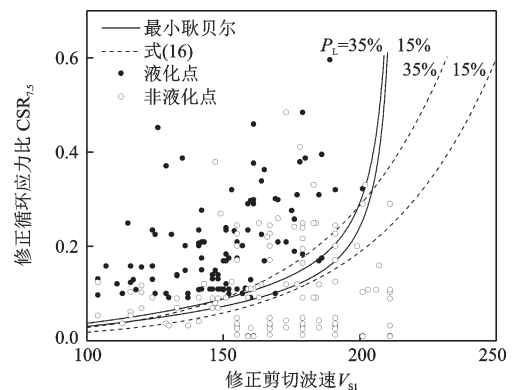


图4 最小耿贝尔模型与逻辑回归模型比较

Fig.4 Comparison between the minimum Gumbel model and the model developed based on logistic regression

图5给出了本文提出的最小耿贝尔模型和式(17)在液化概率为15%、35%时的液化判别曲线。由图可知,当 $P_L=15%$ 时,两个模型液化概率为35%的曲线差异非常小,几乎重合。最小耿贝尔模型液化概率为15%的曲线在贝叶斯模型的左侧。总体而言,本文建立的最小耿贝尔模型的液化判别曲线与贝叶斯映射函数获得的液化判别曲线较为接近。

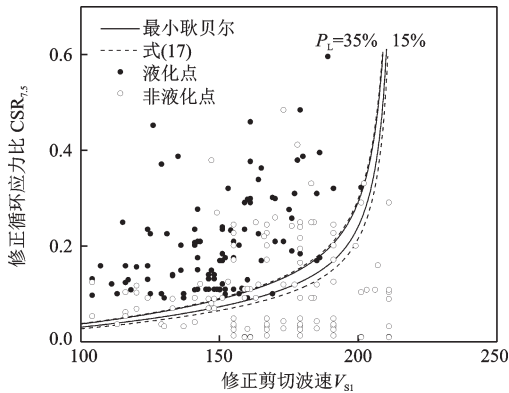


图5 最小耿贝尔模型与贝叶斯映射函数模型比较

Fig.5 Comparison between the minimum Gumbel model and the model developed based on Bayesian mapping function

6 结 语

对国际上广泛采用的剪切波速液化判别模型^[11]进行了误差标定,在此基础上提出了基于剪切波速的土体液化概率判别模型。研究表明,根据贝叶斯信息准则,由最小耿贝尔模型标定的模型修正系数与液化案例数据库符合程度最好;模型修正系数的均值为0.879,表明利用文献[11]中模型获得的安全系数从平均意义上小于真实安全系数,变异系数为0.387,表明模型误差存在一定的不确定性;最小耿贝尔模型的液化判别曲线与文献[12]中基于贝叶斯映射函数获得的液化判别曲线较为一致,与文献[12]中基于逻辑回归获得的液化判别曲线在高 $CSR_{7.5}$ 区域有较大差异。

参考文献:

[1] National Research Council. Liquefaction of soils during earthquakes[M]. Washington D C: National Academy Press, 1985:240.

[2] 陈龙伟,袁晓铭,孙 锐. 2011年新 Zealand MF6.3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 MF6.3 earthquake[J]. World Earthquake Engineering, 2013, 29(3): 1-9. (in Chinese)

[3] 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 Zh Zh. Conventional soils parameters-based liquefaction probabilistic evaluation formula and its reliability analysis[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(4): 99-108. (in Chinese)

[4] 唐小微,白 旭,胡记磊. 基于贝叶斯网络的自由场地震液化沉降评估[J]. 振动与冲击, 2018, 37(18): 177-183.

Tang X W, Bai X, Hu J L. Assessment of seismic liquefaction-induced settlement in free field based on the Bayesian network[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(18): 177-183. (in Chinese)

[5] 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): 1 019-1 027.

Cai G J, Liu S Y, Tong L Y, et al. Evaluation of liquefaction of sandy soils based on cone penetration test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(5): 1 019-1 027. (in Chinese)

[6] 石兆吉,郁寿松,丰万玲. 土壤液化势的剪切波速判别法[J]. 岩土工程学报, 1993, 15(1): 74-80.

Shi Zh J, Yu Sh S, Feng W L. Evaluating soil liquefaction potential by the velocity of shear-waves[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 15(1): 74-80. (in Chinese)

[7] 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): 2 369-2 375.

Zhou Y G, Chen Y M, Ke H. 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): 2 369-2 375. (in Chinese)

[8] Kayen R, Moss R E S, 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): 407-419.

[9] 袁晓铭,孙 锐. 我国规范液化分析方法的发展设想[J]. 岩土力学, 2011, 32(2): 351-358.

Yuan X M, Sun R. Proposals of liquefaction analytical methods in Chinese seismic design provisions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(2): 351-358. (in Chinese)

[10] Brown L T, Boore D M, Stokoe K H. Comparison of shear-wave slowness profiles at 10 strong-motion sites from noninvasive SASW measurements and measurements made in boreholes[J]. Bulletin of the Seismologi-

- cal Society of America, 2002, 92(8):3 116-3 133.
- [11] Andrus R D, Stokoe K H. Liquefaction resistance of soils from shear-wave velocity[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2000, 126(11):1 015-1 025.
- [12] 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.
- [13] 孔梦云, 陈国兴, 李小军, 等. 以剪切波速与地表峰值加速度为依据的地震液化确定性及其概率判别法[J]. 岩土力学, 2015, 36(5): 1 239-1 252.
Kong M Y, Chen G X, Li X J, et al. Shear wave velocity and peak ground acceleration based deterministic and probabilistic assessment of seismic soil liquefaction potential [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36 (5) : 1 239-1 252. (in Chinese)
- [14] 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 & the Environment, 2016, 75(3):1 199-1 214.
- [15] 杨 洋, 孙 锐, 陈卓识, 等. 基于土层常规参数的剪切波速液化概率计算公式[J]. 岩土力学, 2019, 40 (7):1-10.
Yang Y, Sun R, Chen Zh Sh, et al. Calculation formula of shear wave velocity liquefaction probability based on conventional parameters of soil layer [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(7):1-10. (in Chinese)
- [16] 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
Code for seismic design of buildings :GB 50011—2010 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2016. (in Chinese)
- [17] Seed H B, Idriss I M. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential [J]. Journal of Soil Mechanics and Foundations Divisions, ASCE, 1971, 97 (SM9): 1 249-1 273.
- [18] Andrus R D, Stokoe K H II, Chung R M. Draft guidelines for evaluating liquefaction resistance using shear wave velocity measurements and simplified procedures [M]. Maryland: US Department of Commerce, Technology Administration, National Institute of Standards and Technology, 1999.
- [19] Juang C H, Khoshnevisan S, Zhang J. Maximum likelihood principle and its application in soil liquefaction assessment [M]. New York: CRC Press, 2015:181-219.
- [20] 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.
- [21] Manski C F, Lerman S R. The estimation of choice probabilities from choice-based samples [J]. Econometrica, 1977, 45(8):1 977-1 988.
- [22] Cetin K O, Der K A, Seed R B. Probabilistic models for the initiation of seismic soil liquefaction [J]. Structural Safety, 2002, 24(1) : 67-82.
- [23] 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):1 925-1 933.
- [24] Chen C J, Juang C H. Calibration of SPT- and CPT-based liquefaction evaluation methods [M]. [S.l.]: Geotechnical Special Publication, 2000:49-64.
(本文责编:池营营)