

基于未确知均值聚类分析的砂土地震液化评价^{*}

文畅平, 陈宗辉, 孙政, 白银涌, 苏伟

(中南林业科技大学 土木工程与力学学院, 长沙 410018)

摘要:基于未确知测度理论,建立了砂土地震液化判别和液化势分级的未确知均值聚类分析模型和方法。针对砂土地震液化评价中的许多不确定性影响因素,选用地震震级,地面地震加速度幅值,标准贯入击数,比贯入阻力,砂土相对密实度,砂土平均粒径和场地地下水位等7个评价指标作为判别因子;选用17个砂土样本作为训练样本,建立各评价指标的未确知测度函数,以样本中的各评价指标数据的平均值表示其分类中心;利用相似权赋权方法确定评价指标的权重,依据未确知测度距离判别地震液化等级;根据建立的模型对训练样本回判,回判正确率为94.12%。将建立的模型对20个测试样本进行判别,将判别结果与地震液化的实际情况、BP神经网络和SOFM神经网络等方法的评价结果进行了对比。研究表明,该模型的评价结果与实测结果,以及BP神经网络、SOFM神经网络等方法的评判结果一致性较高。

关键词:砂土地震液化;判别;液化势分类;未确知均值聚类法

中图分类号:TU435

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2017)00-0517-08

Assessment of Sandy Soil Liquefaction Potential Based on Unascertained Average Clustering Method

Wen Changping, Chen Zonghui, Sun Zheng, Bai Yinyong, Su Wei

(School of Civil Engineering and Mechanics, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410018, P.R. China)

Abstract: Based on unascertained measurement theory, a unascertained average clustering model (UACM) was established for the identification and classification of seismic liquefaction of sandy soil. Aiming at unascertained factors in the analysis of sand liquefaction evaluate, earthquake magnitude, peak value of ground surface acceleration, standard penetration number, specific penetration resistance, relative compaction, mean particle diameter and underground water table were selected as discriminant indexes; 17 sets of sand soil were selected as training samples, the unascertained measure functions of the seven indexes were rigorously constructed. The classification center was indicated by using the average of classification of training samples. The indexes weight was determined by similar weight theory, and the identification and classification of sandy soil liquefaction potential were carried out using the unascertained measurement distance. Each of the training samples was back-discriminated according to UACM, and the correctness rate was 94.12%. The other 20 sets of sand soil samples were assessed by UACM. The study shows that the synthetic assessment results obtained through UACM agree well with the actual records and the results obtained by other methods such as BP neural network and SOFM neural network etc. So, the proposed model could be used widely in practical engineering.

Keywords: seismic liquefaction of sandy soil; identification of sandy soil liquefaction; classification of sandy soil liquefaction potential; unascertained average clustering method

^{*} 收稿日期:2016-08-15(修改稿)

作者简介:文畅平(1965-),男,湖南邵阳人,博士,教授,主要从事土木工程的教学和科研工作。

E-mail:wenchangping@163.com

基金项目:湖南省重点学科建设项目(2013ZDXK006);中南林业科技大学引进高层次人才科研启动基金(104-0094)

0 引言

地震液化是土动力学与岩土地震工程的重要研究课题之一,岩土工程界已提出了一系列砂土地震液化评估的方法,归纳起来有以下几种:

(1)间接法和直接法。如我国规范^[1-3]所推荐的标准贯入试验法、剪切波速法、静力触探法等,则为间接法,也是下文所述的经验法和确定性方法。文献[4]提到的振动孔压触探法,则是目前国外提出的直接法。

(2)经验法和试验-理论分析法。如 Seed 和 Idriss 简化法^[5]。通过振动台模拟试验或离心机试验、结合数值分析方法是目前研究场地地震液化的有效手段。

(3)确定性和非确定性方法。基于概率理论的可靠性分析法^[6-8]则是用于砂土液化势评价的不确定性分析方法。

(4)单因素或少因素法和多指标综合评判法。在工程实践中广泛应用的一些方法,如 Seed 和 Idriss 简化法、我国规范法等,则属于单因素或少因素砂土地震液化的判别方法。学术界提出的灰色理论法^[9-10]、模糊数学理论法^[11-12]、神经网络法^[13-15]、支持向量机法^[16-18]以及判别分析方法^[19-21]等,可考虑多个因素进行综合判别,则属于砂土地震液化判别的多指标综合评判法。

由于地震作用的随机性、土性参数的复杂多样性,以及人类认识的局限性,任何一种砂土地震液化判别法都有其一定的局限性。因此,在砂土地震液化判别及液化势分级中,采用多方法进行评价是必要的^[22]。

此外,由于场地地震动参数、土性参数等与砂土地震液化评价结论之间往往呈现高度非线性关系,建立多参数综合判别模型对砂土液化势进行综合评价具有重要意义,但其难点在于这些参数的不确定性,未确知数学理论^[23]为这种不确定性分析提供了一种比较好的方法和途径。笔者将未确知数学理论运用到砂土地震液化评价中,建立砂土地震液化评价或预测以及地震液化势分级的未确知均值聚类分析模型,为砂土液化综合评价提供新的方法和途径,供工程实践参考。

1 未确知均值聚类分析法

1.1 基本思想

未确知均值聚类分析的基本思想是^[24]:以未确知测度表示各分类的中心,根据综合未确知测度

与各分类中心的未确知测度距离,确定待预测对象所属的级别或类别。

设 X 为某评价对象 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 的集合,称为评价对象空间, x_i 有 m 个评价指标 $I_j (j=1, 2, \dots, m)$, 对于 x_i 的第 j 个指标 I_j 的测量值为 t_{ij} , 有 p 个评价等级 $C_k (k=1, 2, \dots, p)$, 由 C_k 组成分类空间 F , 其中每一种情况称为一个分类集。若已知样本集 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 中各元素的分类及各指标的测量值, 如第 i 个样本 x_i 的分类为 C_k , 即 $x_i \in C_k$ (表示 x_i 属于 C_k 类), 以其 $x_i \in C_k$ 中各评判指标测量值的平均值 \bar{t}_{ij} 为分类中心, 并确定 p 个分类模式 C_k 的未确知测度 μ_k [分别确定为 $\mu_1 = (1, 0, \dots, 0), \mu_2 = (0, 1, \dots, 0), \dots, \mu_p = (0, 0, \dots, 1)$], 对于新的研究对象 x_{n+1} , 根据其各个评价指标的测量值 $t_{n+1,j}$, 计算综合未确知测度 μ_{ik} , 以及与 μ_k 的未确知测度距离, 然后确定或预测 x_{n+1} 所属的级别或类别。

未确知均值聚类分析包括:单指标未确知测度分析,多指标综合未确知测度分析,计算未确知测度距离和聚类分析等。

1.2 单指标未确知测度分析

令 $\mu_{ijk} = \mu(x_{ij} \in C_k)$, 表示 x_i 的第 j 个指标 I_j 的测量值 t_{ij} 属于第 k 个评价等级 C_k 的程度, 称 μ_{ijk} 为单指标未确知测度, 要求满足: $0 \leq \mu(t_{ij} \in C_k) \leq 1$, $\mu(t_{ij} \in F) = 1, \mu(t_{ij} \in \bigcup_{l=1}^k C_l) = \sum_{l=1}^k \mu(t_{ij} \in C_l)$ 。于是称矩阵

$$(\mu_{ijk})_{m \times p} = \begin{pmatrix} \mu_{i11} & \mu_{i12} & \cdots & \mu_{i1p} \\ \mu_{i21} & \mu_{i22} & \cdots & \mu_{i2p} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \mu_{im1} & \mu_{im2} & \cdots & \mu_{imp} \end{pmatrix} \quad (1)$$

为 x_i 的单指标未确知测度评价矩阵^[25], 第 j 个行向量 $(\mu_{ij1}, \mu_{ij2}, \dots, \mu_{ijp})$ 为 x_i 的单指标评价向量。式中: $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m; k=1, 2, \dots, p$ 。

1.3 多指标未确知综合测度分析

令 $\mu_{ik} = \mu(x_i \in C_k)$, 表示 x_i 属于 C_k 的程度, 称 μ_{ik} 为多指标未确知综合测度, 根据下式确定 μ_{ik}

$$\mu_{ik} = \sum_{j=1}^m w_j \mu_{ijk} \quad (2)$$

式中, w_j 为 x_i 的第 j 个指标 I_j 的权重, 满足: $w_j \geq 0$,

$\sum_{j=1}^m w_j = 1$ 。显然, $0 \leq \mu_{ik} \leq 1$, 且 $\sum_{k=1}^p \mu_{ik} = \sum_{k=1}^p \sum_{j=1}^m w_j$

$\mu_{ijk} = \sum_{j=1}^m \left(\sum_{k=1}^p \mu_{ijk} \right) w_j = \sum_{j=1}^m w_j = 1$ 。于是称

$$(\mu_{ik})_{n \times p} = \begin{pmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \cdots & \mu_{1p} \\ \mu_{21} & \mu_{22} & \cdots & \mu_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu_{n1} & \mu_{n2} & \cdots & \mu_{np} \end{pmatrix} \quad (3)$$

为多指标未确知综合测度评价矩阵^[25],称第*i*个行向量 $(\mu_{i1}, \mu_{i2}, \cdots, \mu_{ip})$ 为 x_i 的未确知综合测度评价向量。

1.4 评价指标的权重

本文采用相似权^[26]作为评价指标的权重,相似权的确定方法及步骤如下:

1.4.1 确定未确知测度评价矩阵 $(\mu_{ik})_{n \times p}$

根据式(1)确定单指标未确知测度,计算等权重的综合测度 $\mu_{ik} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \mu_{ijk}$,组成未确知测度评价矩阵 $(\mu_{ik})_{n \times p}$ 。

1.4.2 计算相似系数 r_j

$$r_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\mu_{ij1}, \mu_{ij2}, \cdots, \mu_{ijp}) \cdot (\mu_{i1}, \mu_{i2}, \cdots, \mu_{ip})^T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^p \mu_{ijk} \cdot \mu_{ik} \quad (4)$$

1.4.3 计算相似权 w_j

$$w_j = \frac{r_j}{\sum_{j=1}^m r_j} \quad (5)$$

1.5 未确知测度距离及聚类分析

设 d_k 为样本未确知综合测度 μ_{ik} 与 μ_k 的距离,称为未确知测度距离。 d_k 由式(6)确定:

$$d_k = \sqrt{(\mu_{i1} - 0)^2 + (\mu_{i2} - 0)^2 + \cdots + \sqrt{(\mu_{ik} - 1)^2 + \cdots + (\mu_{ip} - 0)^2}} \quad (6)$$

式中: $i=1, 2, \cdots, n; k=1, 2, \cdots, p$ 。

比较各个未确知测度距离 d_k 的大小,若

$$d_{k_0} = \min(d_1, d_2, \cdots, d_p) \quad (7)$$

则认为待预测事物与分类模式最接近,即属于模式 C_{k_0} 。

3 砂土地震液化未确知均值聚类分析模型

3.1 评价指标

有研究认为,砂土体的物理属性和环境条件决定,在很大程度上决定饱和砂土是否液化和液化程度^[27]。影响砂土液化的因素主要有:①地震。如震级、加速度幅值等;②场地土性。如土类、粒径及级配、相对密实度等;③场地。如砂土层埋深、地下

水位等。
本文参考现有研究成果^[13-15],选择震级 $M(I_1)$,地面加速度最大值 $a_{\max}(I_2)$,标准贯入击数 $N_{63.5}(I_3)$,比贯入阻力 $P_s(I_4)$,相对密实度 $D_r(I_5)$,平均粒径 $D_{50}(I_6)$ 和地下水位 $d_w(I_7)$ 等7个指标作为判别因子。此外还参考文献[2]和[11],将砂土地震液化势分为:严重液化(C_1);中等液化(C_2);轻微液化(C_3);未液化(C_4)等4个等级,这样在工程实践中,选择抗液化处理措施的时候就能根据液化势等级分别对待。

3.2 训练样本及分类

本文训练样本来自文献[13]中的17个样本。根据这17个样本中各评价指标的平均值确定样本集的分类中心,计算结果如表1。

表1 训练样本的分类数据

Table 1 Classification data of training samples

评价指标测量值的均值	分类中心			
	C_1	C_2	C_3	C_4
$\overline{t_{11}}$	6.060	6.300	4.380	5.167
$\overline{t_{12}}$	0.210	0.188	0.120	0.167
$\overline{t_{13}}$	8.6	15.0	18.6	36.0
$\overline{t_{14}}$	2.266	6.433	10.104	16.583
$\overline{t_{15}}$	0.280	0.333	0.500	0.750
$\overline{t_{16}}$	0.150	0.118	0.144	0.143
$\overline{t_{17}}$	1.100	1.525	1.860	2.633

3.3 未确知测度曲线和未确知测度函数

根据表1的数据,分别确定7个评价指标的未确知测度曲线,如图1~7。

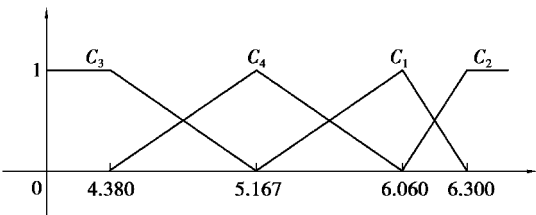


图1 震级*M*的未确知测度曲线
Fig.1 Unascertained measurement curves of *M*

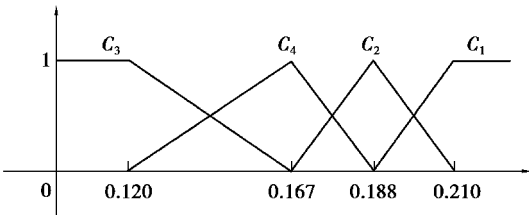


图2 地面加速度最大值 a_{\max} 的未确知测度曲线
Fig.2 Unascertained measurement curves of a_{\max}

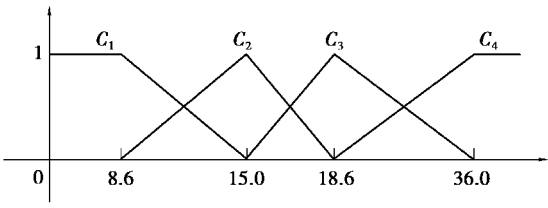


图 3 标准贯入击数 $N_{63.5}$ 的未确知测度曲线
Fig.3 Unascertained measurement curves of $N_{63.5}$

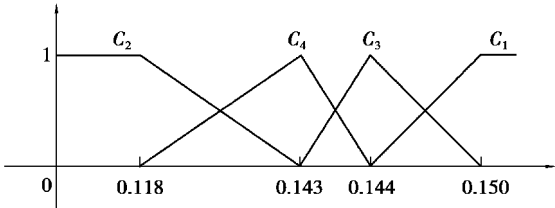


图 6 平均粒径 D_{50} 的未确知测度曲线
Fig.6 Unascertained measurement curves of D_{50}

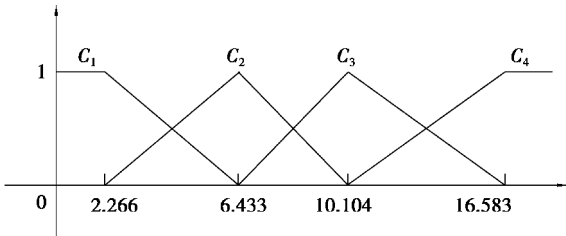


图 4 比贯入阻力 P_s 的未确知测度曲线
Fig.4 Unascertained measurement curves of P_s

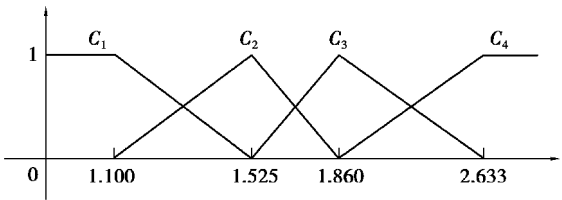


图 7 地下水位 d_w 的未确知测度曲线
Fig.7 Unascertained measurement curves of d_w

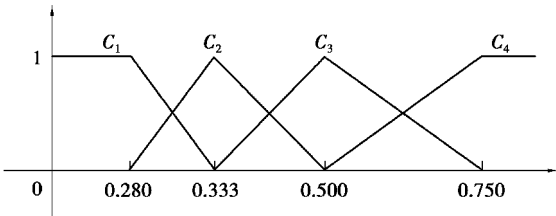


图 5 相对密度 D_r 的未确知测度曲线
Fig.5 Unascertained measurement curves of D_r

3.4 模型优良性评价

以本文建立的未确知测度聚类分析模型对训练样本进行回判,根据回判正确率评价该模型的优良性。回判结果如表 3。以 1#训练样本,具体说明回判方法。

(1)根据 1#训练样本的测量值(表 2)和图 1~7 的未确知测度函数,计算单指标未确知测度和等权重综合测度,如表 2。

表 2 1#训练样本未确知测度计算结果

Table 2 Unascertained measurement results of sample 1

评价指标	测量值	单指标未确知测度			
		C_1	C_2	C_3	C_4
I_1 (震级)	6.1	0.833 3	0.166 7	0	0
I_2 (地面加速度最大值)	0.20	0.545 5	0.454 5	0	0
I_3 (标准贯入击数)	8	1	0	0	0
I_4 (比贯入阻力)	1.20	1	0	0	0
I_5 (相对密度)	0.25	1	0	0	0
I_6 (平均粒径)	0.22	1	0	0	0
I_7 (地下水位)	1.0	1	0	0	0
等权重综合测度 ($\mu_{ik} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \mu_{ijk} = \frac{1}{7} \sum_{j=1}^m \mu_{ijk}$)		0.9113	0.0887	0	0

(2)同样,可得到其他样本的等权重测度,组成未确知测度评价矩阵 $(\mu_{ik})_{n \times p}$,根据式(4)和式

$$\begin{aligned} r_j &= (7.848\ 4 \quad 6.694\ 9 \quad 8.560\ 2 \quad 8.853\ 2 \quad 7.688\ 5 \quad 6.268\ 6 \quad 6.927\ 4) \\ w_j &= (0.148\ 5 \quad 0.126\ 7 \quad 0.162\ 0 \quad 0.167\ 5 \quad 0.145\ 5 \quad 0.118\ 6 \quad 0.131\ 1) \end{aligned}$$

(5)分别计算计算相似系数 r_j 和相似权 w_j ,计算结果为:

(3) 根据式(2) 计算未知综合测度 μ_{ik} =

(4) 根据式(6) 计算未知测度距离, 结果为:

(0.917 7 0.082 3 0 0)。

$$d_1 = \sqrt{(0.9177 - 1)^2 + (0.0823 - 0)^2 + (0 - 0)^2 + (0 - 0)^2} = 0.1165,$$

$$d_2 = \sqrt{(0.9177 - 0)^2 + (0.0823 - 1)^2 + (0 - 0)^2 + (0 - 0)^2} = 1.2978,$$

$$d_3 = \sqrt{(0.9177 - 0)^2 + (0.0823 - 0)^2 + (0 - 1)^2 + (0 - 0)^2} = 1.3597,$$

$$d_4 = \sqrt{(0.9177 - 0)^2 + (0.0823 - 0)^2 + (0 - 0)^2 + (0 - 1)^2} = 1.3597。$$

(5) 根据式(7) 进行聚类分析。由于 d_{k_0} =

的等级为 C_1 级。同样, 可得到其他样本的回判结

$\min(d_1, d_2, \cdots, d_p) = 0.116 5 = d_1$, 因而确定 1#样本

果, 如表 3。

表 3 训练样本的回判结果

Table 3 Back-discriminant results of training samples

序号	未知综合测度				未知测度距离					回判 结果	实际 液化势
	C_1	C_2	C_3	C_4	d_1	d_2	d_3	d_4	d_{\min}		
1	0.917 7	0.082 3	0	0	0.116 5	1.297 8	1.359 7	1.359 7	0.116 5	I	I
2	0.715 9	0.240 8	0	0.043 3	0.374 9	1.044 4	1.254 0	1.219 0	0.374 9	I	I
3	0.606 1	0.118 6	0.134 0	0.141 3	0.455 1	1.087 3	1.073 1	1.066 2	0.455 1	I	I
4	0.724 6	0.260 6	0.014 8	0	0.379 5	1.035 3	1.250 4	1.262 2	0.379 5	I	I
5	0.590 2	0.352 9	0	0.056 9	0.543 8	0.877 7	1.214 9	1.167 1	0.543 8	I	I
6*	0.209 2	0.316 3	0.334 7	0.138 5	0.925 5	0.801 5	0.778 3	0.999 0	0.778 3	III	II
7*	0.358 5	0.314 8	0.045 8	0.280 8	0.769 1	0.824 0	1.103 2	0.864 2	0.769 1	I	II
8	0.086 3	0.683 2	0.226 8	0.003 7	1.163 2	0.399 1	1.035 4	1.232 2	0.399 1	II	II
9	0.257 8	0.611 9	0.120 8	0.009 5	0.969 5	0.481 4	1.101 9	1.198 6	0.481 4	II	II
10	0.209 2	0.360 8	0.430 0	0	0.969 7	0.798 2	0.706 3	1.165 7	0.706 3	III	III
11	0.069 4	0.294 5	0.623 6	0.012 6	1.158 3	0.944 3	0.483 1	1.206 4	0.483 1	III	III
12	0	0.118 6	0.501 8	0.379 5	1.187 4	1.082 9	0.637 4	0.806 8	0.637 4	III	III
13	0.187 7	0.302 5	0.349 6	0.160 2	0.948 2	0.818 3	0.758 6	0.976 8	0.758 6	III	III
14	0.131 1	0.131 6	0.646 3	0.091 0	1.094 7	1.094 2	0.409 8	1.130 7	0.409 8	III	III
15	0.069 1	0.324 7	0.022 6	0.583 6	1.145 9	0.895 4	1.185 8	0.533 1	0.533 1	IV	IV
16	0.129 6	0.187 7	0.039 5	0.643 1	1.099 1	1.044 9	1.178 2	0.425 4	0.425 4	IV	IV
17*	0.118 6	0	0.450 8	0.430 6	1.079 5	1.184 3	0.707 9	0.735 9	0.707 9	III	IV

注: * 为误判的样本。

根据回判结果, 6#样本低判一级, 7#和 17#样本都高判一级, 误判率为 17.65%。如果考虑液化势等级分界带有一定的模糊性, 从而可以忽略高判的误差, 则误判率为 5.88%, 判别准确率为 94.12%, 这证明该模型是合理和可靠的。

4 砂土地震液化评判实例

从文献[14]中收集到另外 20 个样本作为测试样本, 以进一步考察砂土地震液化势未知测度聚类分析模型的有效性和正确性。样本数据见文

献[14],砂土液化势判别结果如表4。

为了便于比较,表4同时列出了样本的实测结果^[13-15],以及BP神经网络^[14]、SOFM^[14]神经网络和Bayes判别分析法(另文阐述)的评判结果,所得

到的结果一致性较高。所以,将未确知测度聚类分析方法应用于砂土地震液化的预测和液化势的分级是完全可行和可靠的。

表 4 测试样本及地震液化势评判结果

Table 4 Evaluation results of testing samples and liquefaction potential

序号	实测液化等级	评判结果			
		本文方法	BP 神经网络	SOFM 神经网络	Bayes 判别结果
18	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
19	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ
20	Ⅱ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ
21	Ⅲ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ
22	Ⅱ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅰ
23	Ⅳ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ
24	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ
25	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
26	Ⅰ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅰ	Ⅰ
27	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ
28	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅱ
29	Ⅱ	Ⅰ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅰ
30	Ⅱ	Ⅰ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅱ
31	Ⅳ	Ⅰ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅲ
32	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ
33	Ⅲ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
34	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅲ
35	Ⅳ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅳ
36	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅰ
37	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅳ

5 结论

(1)结合现有研究成果,并考虑与现行规范衔接,从地震、土性以及场地特性等3方面选用砂土

地震液化综合评价的指标体系。

(2)本模型及方法对砂土样本的评价结果,与现场实测结果、BP神经网络和SOFM神经网络等方法的评价结果一致,为工程实践中砂土地震液化

预测以及液化势分级提供了一条新的途径和方法。

(3) 由于影响砂土地震液化的因素的多样性和复杂性,目前还无法准确、全面地认识砂土在地震作用下的性状,对砂土地震液化预测和评价的各种方法还远未达到完全可靠的程度。本文所确定的模型具有计算简便、易于掌握等优点,可与其他方法配合使用,以进一步提高砂土地震液化评价的可靠性和准确性。

参考文献(References)

- [1] 岩土工程勘察规范(GB50021—2001)[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.(Code for investigation of geotechnical engineering (GB50021—2001) [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2002.(in Chinese))
- [2] 建筑抗震设计规范(GB50011—2001)[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2001.(Code for seismic design of buildings (GB50011—2001) [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2001.(in Chinese))
- [3] 公路工程抗震设计规范(JTJ004—89)[S]. 北京:人民交通出版社,1990.(Code for seismic design of highway engineering(JTJ004—89)[S]. Beijing: China Communication Press, 1990.(in Chinese))
- [4] 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):1019-1027.(Cai Guojun, Liu Songyu, Tong Liyuan, et al. Evaluation of liquefaction of sandy soils based on cone penetration test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(5): 1019-1027.(in Chinese))
- [5] Seed H B, Idriss I M. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1971, 97(9):1249-1273.
- [6] 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 Mingwu, Luo Guoyu. Application of reliability analysis to assessment of sand liquefaction potential [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(5): 542-544.(in Chinese))
- [7] 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 Yuexin. Probability evaluation of liquefaction distinguishing method of sands[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(5): 803-807.(in Chinese))
- [8] 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 Guoxing, Li Fangming. 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))
- [9] 陈新民,罗国煜. 地震砂土液化可能性的非确定性灰色预测法[J]. 桂林工学院学报,1997,17(2):106-109.(Chen Xinmin, Luo Guoyu. Indeterminate gray prediction method of possibility of sand liquefaction during earthquake [J]. Journal of Guilin Institute of Technology, 1997, 17(2): 106-109.(in Chinese))
- [10] 赵艳林,杨绿峰,吴敏哲. 砂土液化的灰色综合评判[J]. 自然灾害学报,2000,9(1):72-79.(Zhao Yanlin, Yang Lufeng, Wu Minzhe. Grey synthetical evaluation of liquefaction of sands [J]. Journal of Natural Disaster, 2000, 9(1): 72-79.(in Chinese))
- [11] 王家鼎. 砂土震动液化势评定中的模糊数学方法[J]. 西北地震学报,1985,7(3):35-48.(Wang Jiading. Fuzzy mathematical method in evaluation of sand and soil vibrating liquefaction potential [J]. Northwestern Seismological Journal, 1985, 7(3): 35-48.(in Chinese))
- [12] 薛新华,张我华,刘红军. 砂土地震液化的模糊综合评判法[J]. 重庆建筑大学学报,2006,28(1):55-58.(Xue Xinhua, Zhang Wohua, Liu Hongjun. Comprehensive fuzzy evaluation method for sand liquefaction [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2006, 28(1): 55-58.(in Chinese))
- [13] 刘勇健,刘义健. 人工神经网络在砂土液化评价中的应用[J]. 勘察科学技术,1999(1):3-5, 41.(Liu Yongjian, Liu Yijian. Application of artificial neural network to the assessment of sand liquefaction [J]. Site Investigation Science and Technology, 1999(1): 3-5, 41.(in Chinese))
- [14] 赵胜利,赵红英,刘燕. 基于SOFM神经网络的砂土液化评价[J]. 华中科技大学学报(城市科学版),2005,22(2):23-26.(Zhao Shengli, Zhao Hongying, Liu Yan. Evaluation of sand liquefaction potential based on sofm neural network [J]. Jurnal if Huanzhong University of Science and Technology (Urban Science

- Edition), 2005, 22(2): 23-26. (in Chinese))
- [15] 董贤哲, 张军平. 补偿模糊神经网络在砂土液化势评价中的应用[J]. 地球科学与环境学报, 2008, 30(1): 64-68. (Dong Xianzhe, Zhang Junping. Application of compensative fuzzy neural network in assessment of sand liquefaction potential[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2008, 30(1): 64-68. (in Chinese))
- [16] 李志雄. 基于最小二乘支持向量机的砂土液化预测方法[J]. 西北地震学报, 2007, 29(2): 133-136. (Li Zhixiong. Prediction method of sand liquefaction based on least square support vector machine [J]. Northwestern Seismological Journal, 2007, 29(2): 133-136. (in Chinese))
- [17] 刘勇健. 基于聚类—二叉树支持向量机的砂土液化预测模型[J]. 岩土力学, 2008, 29(10): 2764-2768. (Liu Yongjian. Support vector machine model for predicting sand liquefaction based on clustering binary tree algorithm[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(10): 2764-2768. (in Chinese))
- [18] Su Y H, Ma N, Hu J, et al. Estimation of sand liquefaction based on support vector machines[J]. Journal of Central South University, 2008, 15(2): 15-20.
- [19] 阳吉宝. 浅议多元统计分析判别砂土液化[J]. 华北地震科学, 1994, 12(4): 34-41. (Yang Jibao. Preliminary discussion of estimating the liquefaction of sand with statistical analysis method [J]. North China Earthquake Sciences, 1994, 12(4): 34-41. (in Chinese))
- [20] 朱淑莲. 地震时砂土液化的数理统计预测[J]. 地震地质, 1981, 3(2): 71-82. (Zhu Shulian. Mathematico-statistical prediction of liquefaction of soil during an earthquake[J]. Seismology and Geology, 1981, 3(2): 71-82. (in Chinese))
- [21] 金志仁. 基于距离判别分析法的砂土液化预测模型及应用[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(5): 776-780. (Jin Zhiren. Prediction of sand liquefaction based on distance discriminant analysis and its application [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(5): 776-780. (in Chinese))
- [22] 陈国兴, 谢君斐, 张克绪. 砂性土液化势的评估方法[J]. 地震学刊, 1996(3): 11-22. (Chen Guoxing, Xie Junfei, Zhang Kexu. Assessment method of sand soil liquefaction potential [J]. Journal of Seismology, 1996, (3): 11-22. (in Chinese))
- [23] 王光远. 论未确知信息及其数学处理[J]. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1990, 23(4): 1-8. (Wang Guangyuan. Unascertained information and its mathematical treatment [J]. Journal of Harbin Architecture and Engineering Institute, 1990, 23(4): 1-9. (in Chinese))
- [24] 万玉成. 基于未确知性的预测与决策方法及其应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2004. (Wan Yucheng. Research on the methods and applications of forecasting and decision making based on unascertainty [D]. Nanjing: Southeast University, 2004. (in Chinese))
- [25] 刘开第, 庞彦军, 孙光勇, 等. 城市环境质量的未确知侧度评价[J]. 系统工程理论与实践, 1999, 19(12): 52-58. (Liu Kaidi, Pang Yanjun, Sun Guangyong, et al. The unascertained measurement evaluation on a city's environmental quality[J]. Systems Engineering Theory & Practice, 1999, 19(12): 52-58. (in Chinese))
- [26] 程乾生. 属性集和属性综合评价系统[J]. 系统工程理论与实践, 1997, 17(9): 1-8. (Chen Qiansheng. Attribute sets and attribute synthetic assessment system[J]. Systems Engineering Theory & Practice, 1997, 17(9): 1-8. (in Chinese))
- [27] 陈文化, 孙巨平, 徐兵. 砂土地震液化的研究现状及发展趋势[J]. 世界地震工程, 1999, 15(1): 16-24. (Chen Wenhua, Sun Juping, Xu Bing. Recent development and trend in seismic liquefaction study [J]. World Information on Earthquake Engineering, 1999, 15(1): 16-24. (in Chinese))