

文章编号: 1000-7598-(2008) 04-876-05

砂土地震液化的模糊概率评判方法

刘章军^{1,2}, 叶燎原³, 彭 刚¹

(1. 三峡大学 土木水电学院, 宜昌 443002; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 3. 云南大学, 昆明 650091)

摘 要: 利用模糊数学中的模糊概率理论, 建立了砂土地震液化的模糊概率综合评判模型。在此模型中, 提出了模糊权重的概念, 可充分考虑权重的模糊性, 从而避免权重取值带来的不确定性。结合砂土地震液化特点, 选取地震烈度、标准贯入击数、平均粒径和上覆有效压力作为主要评价影响因子, 同时将液化程度划分为不液化、轻微液化、中等液化和严重液化 4 个等级, 进而使其评判结果更为精细化。通过算例分析, 表明文中方法对砂土液化评判的合理性与有效性。

关 键 词: 砂土液化; 地震; 模糊概率; 模糊权重; 综合评判

中图分类号: TU435; O 159

文献标识码: A

Fuzzy probability comprehensive evaluation method for sand liquefaction during earthquake

LIU Zhang-jun^{1,2}, YE Liao-yuan³, PENG Gang¹

(1. College of Civil & Hydropower Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Yunnan University, Kunming 650091, China)

Abstract: According to the fuzzy probability theory in fuzzy mathematics, a comprehensive fuzzy probability evaluation model of sand soil liquefaction is presented. In order to consider the fuzziness of weight factor, the fuzzy weighted value is suggested to avoid the uncertainties while determining the weight factor. The following factors such as earthquake intensity, standard penetration number, mean diameter and effective over burden pressure are selected as the evaluating indices; and liquefaction grades are classified as the non-liquefaction, slight liquefaction, medium liquefaction and serious liquefaction in the evaluating model; so the evaluation results can be more precise. The theoretical model is successful applied to evaluating liquefaction of sand soils in practical engineering; and the rationality and effectiveness of the method proposed is demonstrated through 22 examples.

Key words: sand liquefaction; earthquake; fuzzy probability; fuzzy weighted values; comprehensive evaluation

1 引 言

在 20 世纪 60 年代、70 年代的几次大地震如日本的新潟大地震、美国的阿拉斯加大地震与中国的唐山大地震中, 均因液化导致堤防和其它建筑物大规模破坏, 从而引起了人们对砂性土地震液化问题的普遍关注。砂土地震液化是指饱和松散砂土或黏聚力较弱的轻亚黏土在地震作用下产生急剧的状态改变和强度丧失, 表现出类似液体性状的现象; 其产生是孔隙水压力不断升高, 土骨架承受的有效应力不断降低, 土体由固体向液体转化的结果^[1]。砂

土液化具有很大的危害性, 常表现为喷水冒砂、地面沉陷、诱发高速滑坡或地基失稳等现象。因此, 砂土地震液化评判一直是地震工程、岩土工程以及自然灾害防治工程的一项重要基础性研究工作。

几十年来, 国内外研究者在砂土液化判别方面作了大量的研究工作^[2-4], 已提出多种砂土液化判别方法。由于砂土液化是多因素综合作用的结果, 从任何单方面因素预估液化的可能性都是不可靠的, 而应提倡多种方法综合判定和预测^[5]。目前, 所用的多指标方法主要有神经网络预测方法^[1,6]、灰色综合评判法^[5,7]、模糊综合评判法^[8]等。人工神经网络

收稿日期: 2006-03-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 59869002), 湖北省教育厅自然科学基金资助项目 (No. D200513004)。

作者简介: 刘章军, 男, 1973 年生, 副教授, 博士后, 主要从事地震地质灾害预测与控制方面的研究。E-mail: liuzhangjun73@yahoo.com.cn

方法存在收敛速度慢等弱点^[5];灰色理论,当原始数据序列波动较大且信息过于分散时,预测精度将会降低^[1];模糊综合评判法常要对各指标赋予不同的权重,而权重的确定不可避免地会带有一定的主观性和随意性,特别是当选取的指标过多时,因各指标权重值分配过小,在合成运算时不一定能得到充分反映,导致结果可能失真^[1,5]。鉴于影响地震砂土液化因素的复杂性和不确定性,这种不确定性,有的属于概率范畴,有的属于模糊范畴。正是由于在液化预测中,包含着众多的模糊性和随机性,借助模糊数学中的模糊概率理论来处理这个问题,是十分必要且更为合理。本文尝试将模糊概率理论应用于砂土地震液化的评判中,建立砂土地震液化的模糊概率综合评判模型,并提出模糊权重的概念,避免权重取值带来的不确定性。

2 模糊概率理论及其评判模型

2.1 模糊概率理论^[9]

模糊与概率的关系有3类^[9]:第1类是事件本身是模糊的,而概率值是普通数值,称为模糊事件的概率;第2类是事件本身明确,但概率是模糊的,称为事件的模糊概率;第3类则是事件和概率都是模糊的,称为模糊事件的模糊概率。

对于明确事件的模糊概率,不能像经典概率用 $[0, 1]$ 中的数来表示,而是用语言来描述,即将普通概率模糊化,用模糊语言来表示。所以,模糊事件的模糊概率又称模糊语言概率,简称为语言概率。

因概率 $p \in [0, 1]$,故语言概率是以 $[0, 1]$ 为论域的模糊子集,其值域称为语言概率的值空间,记为 ε 。语言概率的值空间须满足两个条件:(1)它具有一定的语言特点;(2)它能适应概率运算的要求。总之, ε 是一个模糊语言系统,在这个系统中应包含若干原始单词,对模糊算子的运算封闭,即在系统中的任一概率语言值,经逻辑运算和模糊算子作用后仍在这个系统中——仍是概率语言值。

为了使概率语言值的支集限制在 $[0, 1]$ 内,概率语言值的运算法则可定义为:设 $\pi_i \in \varepsilon$, $a_i \in [0, 1]$, $i=1, 2, \dots, n$;则 $\{\pi_i\}$ 的线性组合被定义为一个模糊语言值,即:

$$(a_1\pi_1 + a_2\pi_2 + \dots + a_n\pi_n)(P) \triangleq \bigvee_{\substack{a_1p_1 + \dots + a_np_n = p \\ p_1 + \dots + p_n = 1}} (\pi_1(p_1) \wedge \dots \wedge \pi_n(p_n)) \quad (1)$$

则 $\pi_1, \dots, \pi_n$ 的线性组合仍将支集限制在 $[0, 1]$ 内,即概率语言值对于所规定的运算是封闭的,在此基础

上可以定义模糊事件的语言概率。

对于模糊事件的语言概率,是在模糊事件的概率基础上,将普通概率 p_i 换成语言概率 π_i ,则可得模糊事件的模糊概率。即设 $\underline{A}$ 是模糊事件, $p(u_i) = \pi_i$, 则定义:

$$P(\underline{A}) = \underline{A}(u_1)\pi_1 + \underline{A}(u_2)\pi_2 + \dots + \underline{A}(u_n)\pi_n \quad (2)$$

为模糊事件的模糊概率。

在公式(1)中的算子“ $\vee$ ”表示“加”的运算,算子“ $\wedge$ ”表示“取小”。此外,也可以根据实际问题,用其它算子来取代“ $\wedge$ ”算子,如在液化评判中采用“平均”来取代算子“ $\wedge$ ”,则更符合实际。

2.2 砂土液化评判模型

根据模糊概率理论,可给出砂土液化评判的主要步骤如下:

①确定砂土地震液化的主要影响因子 u_i , 其中 $i=1, 2, \dots, n$, 建立评判影响因子集 U , 即:

$$U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\} \quad (3)$$

②根据主要影响因子 u_i 与液化等级 $\underline{A}_j$ 的模糊关系,确定或选择其隶属函数 $\underline{A}_j(u_i)$,即确定了 $\underline{A}_j$ 是论域 U 上的一个模糊子集:

$$\underline{A}_j = \frac{\underline{A}_j(u_1)}{u_1} + \frac{\underline{A}_j(u_2)}{u_2} + \dots + \frac{\underline{A}_j(u_n)}{u_n} \quad (4)$$

③确定主要影响因子 u_i 的模糊权重(模糊数) π_i ($i=1, 2, \dots, n$),即把权重看成为模糊数:

$$\pi_i = \frac{\beta_{i1}}{\lambda_{i1}} + \dots + \frac{\beta_{im}}{\lambda_{im}} + \frac{1}{\lambda_{i0}} + \frac{\beta_{i,m+1}}{\lambda_{i,m+1}} + \dots + \frac{\beta_{i,2m}}{\lambda_{i,2m}} \quad (5)$$

式中: λ_{i0} 应满足 $\sum \lambda_{i0} = 1$;系数 β_{ij} ($i=1, 2, \dots, n$, $j=1, 2, \dots, 2m$)可根据实际情况来选择,可取为0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9中的某个数; λ_{ij} ($j=1, 2, \dots, 2m$)的值可由 λ_{i0} 值来合理确定。

事实上,式(5)中的模糊权重 π_i 应看作是论域 $\{\lambda_{i1}, \dots, \lambda_{im}, \lambda_{i0}, \lambda_{i,m+1}, \dots, \lambda_{i,2m}\}$ 上的一个模糊子集,而 β_{ij} ($j=1, 2, \dots, 2m$)及1分别为相应的隶属度。

④利用模糊事件的语言概率公式(1), (2), 可求出各液化等级 $\underline{A}_j$ 的模糊概率 $P(\underline{A}_j)$ 。

需要指出的是,公式(1), (2)中的 π_i 即为第 i 个液化影响因子的模糊权重,即公式(5), p_i 为相应论域 $\{\lambda_{i1}, \dots, \lambda_{im}, \lambda_{i0}, \lambda_{i,m+1}, \dots, \lambda_{i,2m}\}$ 中的任意取值, a_i 为任意液化等级的第 i 个隶属度,对于第 j 个液化等级而言,则 a_i 即为 $\underline{A}_j(u_i)$ 。

⑤由信息集中原则, 即可获得液化评判结果。

信息集中原则: 若记第 j 个液化等级 $\underline{A}_j$ 的模糊概率 $P(\underline{A}_j)$ 为

$$P(\underline{A}_j) = \frac{\alpha_{j1}}{x_{j1}} + \frac{\alpha_{j2}}{x_{j2}} + \cdots + \frac{\alpha_{jk}}{x_{jk}} \quad (6)$$

$$\sigma_j = \sum_{i=1}^k \alpha_{ji} x_{ji} \quad (7)$$

式中 α_{ji} 为 x_{ji} 的隶属度 ($i=1, 2, \dots, k$)。

对式 (7) 进行归一化处理, 即:

$$\bar{\sigma}_j = \frac{\sigma_j}{\sum_{i=1}^m \sigma_i} \quad (8)$$

式中 m 为所划分的液化等级数, 一般为 4 级。根据信息集中最大原则:

$$\bar{\sigma}_N = \max_j [\bar{\sigma}_j] \quad (9)$$

则液化程度为 $\underline{A}_N$ 。

上述运算过程, 可方便地用 Matlab 语言编程来实现, 从而获得液化预测结果。

3 砂土地震液化的模糊概率评判法

3.1 砂土地震液化的主要影响因子

影响砂土液化的因素很多, 归结起来, 大体可分为 3 类^[7]: 第 1 类是砂土层自身因素, 如土的种类、颗粒组成、密实度等; 第 2 类是土层埋深、地下水位; 第 3 类为地震条件, 如地震烈度、持续时间等。此外, 场地地形、地貌特征以及历史地震背景等对砂土液化也有一定的影响。

文献[8]根据国内外 19 个地区 34 例液化现场调查资料分析, 取砂土的平均粒径、相对密度、标准贯入击数和上覆有效压力作为砂土液化的主要评判因素, 并给出了在不同地震烈度下砂土地震液化的模糊综合评判式; 文献[1, 5]均在文献[8]的基础上选取了平均粒径、相对密度、标准贯入击数和上覆有效压力、地震烈度 5 个主要影响因素。

考虑到砂土液化最基本的制约因素是砂土自身特性及指标选取的简单性、容易性和代表性, 同时地震烈度作为引起砂土液化的主要综合外因。本文选取文献[7]所给定的 4 个主要影响因子, 即:

- u_1 : 地震烈度 I , 单位为度;
- u_2 : 标准贯入击数 $N_{63.5}$, 单位为击;
- u_3 : 平均粒径 d_{50} , 单位为 mm;
- u_4 : 上覆有效压力 σ_v , 单位为 kPa。

从而, 可建立砂土地震液化的评判影响因子集

$$U = \{u_1, u_2, u_3, u_4\}。$$

3.2 隶属函数的确定

在砂土液化评判中, 液化程度通常是用语言来描述, 一般可分为不液化($\underline{A}_1$)、轻微液化($\underline{A}_2$)、中等液化($\underline{A}_3$)和严重液化($\underline{A}_4$) 4 个等级, 其分级标准的宏观描述如表 1。从而, 可建立的砂土液化等级集合 $\underline{A} = \{\underline{A}_1, \underline{A}_2, \underline{A}_3, \underline{A}_4\}$ 。

表 1 砂土液化分级标准
Table 1 Grading standard of sand liquefaction

液化等级	喷水冒砂情况	建筑物震害情况
不液化($\underline{A}_1$)	即无喷水, 又无冒砂。	没有沉陷和破坏。
轻微液化($\underline{A}_2$)	几乎不喷水冒砂, 或有零星喷冒。	没有沉陷、液化危害小。
中等液化($\underline{A}_3$)	发生中等程度的喷水冒砂、持续时间短、喷发量小、范围小。	地面沉陷量小于砂层厚度 2%, 建筑物出现破坏。
严重液化($\underline{A}_4$)	发生严重的喷水冒砂现象、持续时间长、喷发量大、范围广。	地面开裂、下沉, 沉降量大于砂层厚度 2%, 建筑物破坏严重。

在确立了主要评判影响因子集 U 与液化等级集合 $\underline{A}$ 的基础上, 可建立主要影响因子 u_i ($i=1, 2, 3, 4$) 与液化等级 $\underline{A}_j$ ($j=1, 2, 3, 4$) 之间的模糊关系, 即可建立模糊等级 $\underline{A}_j$ 是论域 U 上的一个模糊子集。而隶属函数则是建立这两者之间模糊关系的纽带。常见的隶属函数主要有线性型(如三角形分布、梯形分布)和非线性型(如正态分布、岭形分布)等类型。考虑到实际运算的简单性并结合砂土地震液化的工程背景, 选用梯形隶属函数是比较合理的。一般地, 可将影响因子划分为递减型与递增型两类; 对于递减型的影响因子, 即影响因子的指标值越大, 对液化程度的影响越小, 其隶属函数的具体表达式如下:

$$\underline{A}_1(u_k) = \begin{cases} 0 & u_k \leq 0.382a_{k6} \\ \frac{u_k - 0.382a_{k6}}{a_{k6} - 0.382a_{k6}} & 0.382a_{k6} < u_k \leq a_{k6} \\ 1 & u_k > a_{k6} \end{cases} \quad (10)$$

$$\underline{A}_2(u_k) = \begin{cases} 0 & u_k \leq 0.382a_{k4} \\ \frac{u_k - 0.382a_{k4}}{a_{k4} - 0.382a_{k4}} & 0.382a_{k4} < u_k \leq a_{k4} \\ 1 & a_{k4} < u_k \leq a_{k5} \\ \frac{1.618a_{k5} - u_k}{1.618a_{k5} - a_{k5}} & a_{k5} < u_k \leq 1.618a_{k5} \\ 0 & u_k > 1.618a_{k5} \end{cases} \quad (11)$$

$$\underline{A}_3(u_k) = \begin{cases} 0 & u_k \leq 0.382a_{k2} \\ \frac{u_k - 0.382a_{k2}}{a_{k2} - 0.382a_{k2}} & 0.382a_{k2} < u_k \leq a_{k2} \\ 1 & a_{k2} < u_k \leq a_{k3} \\ \frac{1.618a_{k3} - u_k}{1.618a_{k3} - a_{k3}} & a_{k3} < u_k \leq 1.618a_{k3} \\ 0 & u_k > 1.618a_{k3} \end{cases} \quad (12)$$

$$\underline{A}_4(u_k) = \begin{cases} 1 & u_k \leq a_{k1} \\ \frac{1.618a_{k1} - u_k}{1.618a_{k1} - a_{k1}} & a_{k1} < u_k \leq 1.618a_{k1} \\ 0 & u_k > 1.618a_{k1} \end{cases} \quad (13)$$

式中 a_{kl} 为相应影响因子的指标值 ($k=2,3,4$; $l=1,2,\dots,6$), 具体取值如表 2。

对于递增型的影响因子 u_1 , 其隶属函数可仿照式 (10) ~ (13) 进行倒推, 这里不再赘述了。

表 2 主要影响因子的指标值

Table 2 Index values of main influence factors

影响因子 u_k 的指标值	a_{k1}	a_{k2}	a_{k3}	a_{k4}	a_{k5}	a_{k6}
地震烈度 u_1 /度	6	7	8	9	10	11
标准贯入 击数 u_2 / 击	9	14	18	22	26	30
平均粒径 u_3 / mm	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35
上覆有效 压力 u_4 / kPa	38	61	83	110	133	156

3.3 模糊权重的确定

考虑到地震烈度是引起砂土液化的主要综合外因, 其权重相对较大。同时, 参考文献[8]对标准贯入击数、平均粒径、上覆有效压力这 3 个影响因子的权重取值, 本文采用如下的模糊权重:

$$\pi_1 = \text{“接近于 0.3”} = \frac{\beta_{11}}{0.2} + \frac{1}{0.3} + \frac{\beta_{12}}{0.4} \quad (14)$$

$$\pi_2 = \text{“接近于 0.3”} = \frac{\beta_{21}}{0.2} + \frac{1}{0.3} + \frac{\beta_{22}}{0.4} \quad (15)$$

$$\pi_3 = \text{“接近于 0.2”} = \frac{\beta_{31}}{0.1} + \frac{1}{0.2} + \frac{\beta_{32}}{0.3} \quad (16)$$

$$\pi_4 = \text{“接近于 0.2”} = \frac{\beta_{41}}{0.1} + \frac{1}{0.2} + \frac{\beta_{42}}{0.3} \quad (17)$$

式中: 系数 β_{ij} ($i=2,3,4; j=1,2$) 可建议均取为 0.7, 这主要是为了反映影响因子 u_i ($i=2,3,4$) 权重的模糊性; 由于不同地震烈度对液化影响程度较大, 因此其权重也应有所不同, 为了反映地震烈度权重的

模糊性与动态性, 其系数取值如表 3。

表 3 系数 β_{ij} 的取值

Table 3 Values of coefficient β_{ij}

地震烈度	VI	VII	VIII	IX	X	XI
β_{11}	0.9	0.8	0.8	0.7	0.6	0.5
β_{12}	0.5	0.6	0.7	0.8	0.8	0.9

以上分析表明, 液化影响因子的权重具有双重性, 即模糊性与动态性, 用模糊概率理论可以很合理地对待权重进行处理, 从而避免了在模糊综合评判法中权重取值所带来的不确定性。

4 砂土液化评判实例

为验证本文方法的合理性与可靠性, 从砂土地震液化资料中随机抽取了 22 组实例^[8]进行模糊概率综合评判分析, 其评判结果与现场液化情况进行了对比, 具体情况如表 4。

下面, 以表 4 中的第 1 组实例来给出其具体的评判过程。

首先, 由隶属函数公式(10)至(13)计算主要影响因子对于各液化等级的隶属度, 结果如下:

$$\begin{aligned} \underline{A}_1(u_1) &= 0.461, \underline{A}_1(u_2) = 0, \underline{A}_1(u_3) = 0.006, \underline{A}_1(u_4) = 0.523; \\ \underline{A}_2(u_1) &= 1.0, \underline{A}_2(u_2) = 0.117, \underline{A}_2(u_3) = 0.256, \underline{A}_2(u_4) = 1.0; \\ \underline{A}_3(u_1) &= 0.820, \underline{A}_3(u_2) = 0.538, \underline{A}_3(u_3) = 0.838, \underline{A}_3(u_4) = 0.474; \\ \underline{A}_4(u_1) &= 0.559, \underline{A}_4(u_2) = 0.820, \underline{A}_4(u_3) = 0.434, \underline{A}_4(u_4) = 0 \end{aligned}$$

由模糊权重公式 (14) 至 (17), 可得到各影响因子的模糊权重:

$$\pi_1 = \text{“接近于 0.3”} = \frac{0.8}{0.2} + \frac{1}{0.3} + \frac{0.7}{0.4}$$

$$\pi_2 = \text{“接近于 0.3”} = \frac{0.7}{0.2} + \frac{1}{0.3} + \frac{0.7}{0.4}$$

$$\pi_3 = \text{“接近于 0.2”} = \frac{0.7}{0.1} + \frac{1}{0.2} + \frac{0.7}{0.3}$$

$$\pi_4 = \text{“接近于 0.2”} = \frac{0.7}{0.1} + \frac{1}{0.2} + \frac{0.7}{0.3}$$

再由模糊事件的语言概率公式 (1), (2), 可求出各液化等级 $\underline{A}_j$ 的模糊概率 $P(\underline{A}_j)$, 进一步可得到归一化的信息集中值:

$\bar{\sigma}_1 = 0.12$, $\bar{\sigma}_2 = 0.29$, $\bar{\sigma}_3 = 0.34$, $\bar{\sigma}_4 = 0.25$ 最后由信息集中最大原则可知: 评判结果为 $\underline{A}_3$, 即中等液化, 同时偏向于轻微液化 $\underline{A}_2$, 这与现场情况 (液化) 是一致的, 但本文给出的结果更为精细化。

上述计算过程可方便地由计算机编程来实现。

表 4 砂土地震液化评判实例
Table 4 Examples of evaluation for seismic sand liquefaction

序号	实例	主要影响因子				现场液化情况	模糊概率综合评判法	
		$I/(^{\circ})$	$N_{63.5}/\text{击}$	d_{50}/mm	σ_v/kPa		归一化的信息集中值 $\bar{\sigma}_i$	评判结果
1	海城南河 1 [#] 例	8	10	0.135	110	液 化	(0.12, 0.29, <u>0.34</u> , 0.25)	A_3
2	沿排灌站 2 [#] 例	8	13	0.135	150	液 化	(0.18, 0.31, <u>0.34</u> , 0.17)	A_3
3	胜利塘 1 [#] 例	7	11	0.090	60	液 化	(0.12, 0.23, <u>0.36</u> , 0.29)	A_3
4	排灌站 2 [#] 例	7	43	0.180	130	未液化	(<u>0.38</u> , 0.33, 0.22, 0.07)	A_1
5	3 [#] 例	7	43	0.180	210	未液化	(<u>0.45</u> , 0.25, 0.23, 0.07)	A_1
6	双台子闸 1 [#] 例	7	15	0.107	70	未液化	(0.15, 0.28, <u>0.41</u> , 0.16)	A_3
7	2 [#] 例	7	20	0.107	100	未液化	(0.21, <u>0.34</u> , 0.31, 0.14)	A_2
8	万金滩闸 1 [#] 例	7	6	0.065	20	液 化	(0.14, 0.19, 0.15, <u>0.52</u>)	A_4
9	2 [#] 例	7	6	0.065	100	液 化	(0.17, 0.27, 0.21, <u>0.35</u>)	A_4
10	唐山钱 1 [#] 例	10	15	0.150	100	普遍液化	(0.08, 0.29, <u>0.48</u> , 0.15)	A_3
11	家管区 2 [#] 例	10	20	0.180	100	普遍液化	(0.12, 0.34, <u>0.42</u> , 0.12)	A_3
12	3 [#] 例	10	20	0.280	100	普遍液化	(0.22, <u>0.37</u> , 0.29, 0.12)	A_2
13	滦南县某地 1 [#] 例	9	20	0.140	100	普遍液化	(0.13, 0.34, <u>0.40</u> , 0.13)	A_3
14	2 [#] 例	9	25	0.330	100	普遍液化	(0.24, <u>0.41</u> , 0.25, 0.10)	A_2
15	乐亭县某地 1 [#] 例	8	20	0.130	50	普遍液化	(0.13, 0.30, <u>0.39</u> , 0.18)	A_3
16	2 [#] 例	8	25	0.180	50	普遍液化	(0.19, <u>0.35</u> , 0.33, 0.13)	A_2
17	唐山市区 1 [#] 例	10~11	25	0.260	150	零星液化	(0.25, <u>0.39</u> , 0.24, 0.12)	A_2
							(0.25, <u>0.37</u> , 0.23, 0.15)	
18	2 [#] 例	10~11	30	0.550	200	零星液化	(<u>0.41</u> , 0.26, 0.18, 0.15)	A_1
							(<u>0.42</u> , 0.23, 0.16, 0.19)	
19	丰润县某地 1 [#] 例	8	40	0.180	200	未液化	(<u>0.38</u> , 0.27, 0.25, 0.10)	A_1
20	2 [#] 例	8	>40	0.230	200	未液化	(<u>0.40</u> , 0.28, 0.22, 0.10)	A_1
							(0.24, <u>0.32</u> , 0.31, 0.13)	
21	滨海县某地 1 [#] 例	7~8	15	0.120	150	零星液化	(0.19, 0.32, <u>0.34</u> , 0.15)	$A_2 \sim A_3$
							(0.29, <u>0.39</u> , 0.26, 0.06)	
22	2 [#] 例	7~8	15	0.290	150	零星液化	(0.26, <u>0.40</u> , 0.27, 0.07)	A_2

从表 4 可以看出, 除 6 号评判结果与实际液化情况相差较大外, 其余评判结果与实际液化情况完全符合或相差甚小。同时, 本文还可以给出各液化等级出现的偏向程度, 这一点在以往的评判方法中很少给出, 这对于了解实际工程液化程度是有益的。

5 结 语

如何合理地确定权重是模糊综合评判法所难以解决的问题, 本文提出的模糊概率综合评判法, 可充分考虑权重的模糊性与动态性, 较好地处理了权重这个重要而难于确定的值。在砂土地震液化的模糊概率综合评判法中, 取地震烈度、标准贯入击数、平均粒径和上覆有效压力作为主要评价影响因子, 同时将液化程度划分为不液化、轻微液化、中等液化和严重液化 4 个等级, 从而使其评判结果更加精细化。此外, 如何更合理地确定主要影响因子的指标值, 是一个重要的问题, 它不仅需要一定的数学手段, 而且还依赖于地震液化资料占有的多少, 值得进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 陈奎, 刘兴昌. 砂土地震液化的神经网络预测[J]. 西北地震学报, 2000, 22 (2): 167—171.
CHEN Kui, LIU Xing-chang. Prediction of sand soil liquefaction during earthquakes by the BP neural network[J]. *Northwestern Seismological Journal*, 2000, 22(2): 167—171.
- [2] SEED H B, IDRISS I M. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1971, 97(9): 1 249—1 273.
- [3] DAVIS R O, BERRILL J B. Energy dissipation and seismic liquefaction in sands[J]. *Earthquake Engineering and Structure Dynamics*, 1982, 10(1): 68—70.
- [4] IWASAKI T. Soil liquefaction studies in Japan: state-of-the-art [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1986, 5(1): 2—68.
- [5] 陈新民, 罗国煜. 地震砂土液化可能性的非确定性灰色预测方法[J]. 桂林工学院学报, 1997, 17(2): 106—109.
CHEN Xin-min, LUO Guo-yu. Indeterminate gray prediction method of possibility of sand liquefaction during earthquake [J]. *Journal of Guilin Institute of Technology*, 1997, 17(2): 106—109.
- [6] 刘红军, 薛新华. 砂土地震液化预测的人工神经网络模型[J]. 岩土力学, 2004, 25(12): 1 942—1 946.
LIU Hong-jun, XUE Xin-hua. Artificial neural network model for prediction of seismic liquefaction of sand soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(12): 1942—1946.
- [7] 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.
- [8] 翁焕学. 砂土地震液化模糊综合评判实用方法[J]. 岩土工程学报, 1993, 15(2): 74—79.
- [9] 杨纶标, 高英仪. 模糊数学原理及应用 (第三版) [M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2001.