

砂土地震液化的模糊综合评判法*

薛新华^{1,2}, 张我华¹, 刘红军²

(1. 浙江大学 岩土工程研究所, 杭州 310027; 2. 中国海洋大学 环境科学与工程学院, 青岛 266003)

摘要:根据砂土液化问题具有的模糊性和不确定性,建立了一种判别砂土液化发生可能性的模糊综合评判模型。在提出的砂土液化模糊综合评判模型中,通过综合地震烈度、标贯击数、地下水位和平均粒径等影响砂土地震液化的因素,采用梯形隶属函数并分别给出各因素隶属函数的表达式。通过工程实例计算验证了该模型的可行性,计算过程简单明了,有一定的实用价值。

关键词:砂土地震液化; 液化判别; 综合评判; 隶属函数; 权值

中图分类号: TU435 文献标识码: A 文章编号: 1006-7329(2006)01-0055-04

Comprehensive Fuzzy Evaluation Method for Sand Liquefaction

XUE Xin-hua^{1,2}, ZHANG Wo-hua¹, LIU Hong-jun²

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, P. R. China; 2. Dept. of Geo-Environmental Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266003, P. R. China)

Abstract: According to the fuzzy and uncertainty characteristics of soil liquefaction, a comprehensive fuzzy evaluation model of soil liquefaction is presented. In the comprehensive fuzzy evaluation model of soil liquefaction, the following factors, such as earthquake intensity, SPT counts, groundwater level and mean diameter of sand soil particle which affect the liquefaction of sand soil were considered, and the sketch map of trapezoid subordinate function was adopted and the subordinate function expression of each factor was given. The results show that the comprehensive fuzzy evaluation model of soil liquefaction is feasible and valuable.

Keywords: seismic liquefaction of sands; liquefaction prediction; integrative evaluation; subordinate function; weighted values

1964年日本新潟地震、美国阿拉斯加地震和1976年中国唐山地震时砂性土层液化引起的灾难破坏,促使人们对砂性土地震液化问题进行深入的研究^[1]。砂土液化指饱和和松散砂土或粘聚力较弱的轻亚粘土在地震作用下产生急剧的状态改变和强度丧失,表现出类似液体形状的现象。然而场地液化是以场地喷水冒砂或震陷或土体滑移等宏观震害现象确定的,场地液化本身在概念上并没有明确的内涵和外延,同时影响地震液化有关因素的信息,又多具有相当的模糊性和不确定性,对于这类具有模糊性的事件可以采用模糊数学方法来进行研究。Fuzzy综合评判法^[2-4]是从多目标决策中分划出来的一门新的数学方法,当影响事物的因素较多又具有很强的模糊性时,尤其具有明显的优势。但目前在判别场地地震液化的方法中,很少考虑液化问题的模糊性。基于以上考虑,提出了一种

砂土液化的模糊综合评判模型。

1 模糊集基本理论^[2,5]

模糊综合评价是应用模糊变换原理和最大隶属度原则,综合考虑被评事物或属性的相关因素,进而进行等级或类别评价。先确定两个模糊子集,一个是模糊总和评价等级集合 V :

$$V = \{V_1, V_2, \dots, V_n\} \quad (1)$$

式中:下标 n 为评价等级数;另一个是评价对象的关联因素集 U :

$$U = \{U_1, U_2, \dots, U_m\} \quad (2)$$

式中:下标 m 为关联因素个数。

u_i 的单因素评价子集为:

$$r_i = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{in}) \quad (3)$$

m 个关联因素的评价子集的集合构成总的评价矩阵

* 收稿日期:2005-07-15

基金项目:国家自然科学基金项目(50379046);教育部博士点特别研究基金项目(A5022)

作者简介:薛新华(1977-),男,山东惠民人,博士生,主要从事岩土工程力学、土动力学及人工智能在岩土工程中的应用等方面的研究。

R:

$$\tilde{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

由(U,V,R)构成了一个综合评价模型,或称为综合评价空间。

各关联因素对于所评价的事物或其属性具有不同的重要程度,可用模糊子集A表示:

$$\tilde{A} = (a_1, a_2, \dots, a_n) \quad 0 \leq a_i \leq 1, i = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

式中: a_i 为 u_i 对 \tilde{A} 的隶属度,是单因素 u_i 在总评价中影响程度的度量,作为权系数,需满足 $\sum_{i=1}^m a_i = 1$ 。

于是,可进行模糊综合评价B:

$$\tilde{B} = \tilde{A} \circ \tilde{R} \quad (6)$$

记 $B = (b_1, b_2, \dots, b_m)$,它是V上的一个模糊子集,式中, \circ 为广义模糊运算。根据 $\tilde{A} \circ \tilde{R}$ 取不同的运算,即构成不同的计算模型。目前常用的模型主要有主因素决定型 $M(\wedge, V)$ 、主因素突出型 $M(\cdot, V)$ 及加权平均型 $M(\cdot, +)$ 等三种形式,式中 \wedge 和 V 分别表示取最小值和最大值。

2 隶属函数的建立和评价指标权重的确定

2.1 隶属函数的建立

隶属函数是建立模糊集的基础,它在模糊数学中占有突出的地位。常见的隶属函数主要有三角形、正态型、梯形、岭形等几种形式,它们在形状、主值区间及对称性等方面均存在着差异。所谓主值区间指的是使隶属度等于1的论域区间。在这几种常见的隶属函数中,三角形、正态型隶属函数的主值区间是一个点,而梯形、岭形等隶属函数的主值区间为论域上的一个值区间。如果认为论域中的某一个元素比其它元素更有资格隶属于所讨论的模糊集合,且该特征显著,就使用三角形或正态型隶属函数表达,并以该突出元素为主值点;如果经过分析,不能肯定某一点突出,只能确定某一范围内的论域元素比其它元素更优越的隶属于所讨论的模糊集合时,就选择梯形或岭形隶属函数分布。

岩土工程中,根据试验结果获得土体参数较高和较低的专家知识是可能的^[6]。基于以上信息,砂土液化各影响因素的隶属函数可以构造成线性或非线形式。遵循文献[2]和[4]给出的确定隶属函数的原则,即根据实际工程背景所蕴涵的知识,从一系列隶属函数分布中选择一种最能表现模糊集特性的隶属函数作为最终分布的原则,考虑到实际运算的简易性并结合

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。下面分别给出地震烈度、标贯击数、地下水位和平均粒径的隶属函数表达式。

对地震烈度而言,其隶属函数如下:

$$\mu_{v_1}(x) = \begin{cases} 1 & x \leq 6.5 \\ 7.5 - x & 6.5 < x \leq 7.5 \\ 0 & x > 7.5 \end{cases}$$

$$\mu_{v_2}(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 6.5 \\ x - 6.5 & 6.5 < x \leq 7.5 \\ 1 & 7.5 < x \leq 7.9 \\ \frac{8.1 - x}{8.1 - 7.9} & 7.9 < x \leq 8.1 \\ 0 & x > 8.1 \end{cases}$$

$$\mu_{v_3}(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 7.9 \\ \frac{x - 7.9}{8.1 - 7.9} & 7.9 < x \leq 8.1 \\ 1 & 8.1 < x \leq 8.6 \\ \frac{9.3 - x}{9.3 - 8.6} & 8.6 < x \leq 9.3 \\ 0 & x > 9.3 \end{cases}$$

$$\mu_{v_4}(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 8.6 \\ \frac{x - 8.6}{9.3 - 8.6} & 8.6 < x \leq 9.3 \\ 1 & x > 9.3 \end{cases}$$

对标贯击数而言,其隶属函数为:

$$\mu_{v_1} = \begin{cases} 0 & x \leq 9 \\ \frac{x - 9}{11 - 9} & 9 < x \leq 11 \\ 1 & x > 11 \end{cases}$$

$$\mu_{v_2} = \begin{cases} 0 & x \leq 6.5 \\ \frac{x - 6.5}{7 - 6.5} & 6.5 < x \leq 7.5 \\ 1 & 7.5 < x \leq 9 \\ \frac{11 - x}{11 - 9} & 9 < x \leq 11 \\ 0 & x > 11 \end{cases}$$

$$\mu_{v_3} = \begin{cases} 0 & x \leq 1 \\ \frac{x - 1}{3 - 1} & 1 < x \leq 3 \\ 1 & 3 < x \leq 6.5 \\ \frac{7.5 - x}{7.5 - 6.5} & 6.5 < x \leq 7.5 \\ 0 & x > 7.5 \end{cases}$$

$$\mu_{v_4} = \begin{cases} 1 & 0 < x \leq 1 \\ \frac{x - 1}{3 - 1} & 1 < x \leq 3 \\ 0 & x > 3 \end{cases}$$

对地下水位而言,其隶属函数为:

$$\mu_{v_1}(x) = \begin{cases} 1 & 0 < x \leq 0.2 \\ \frac{0.25 - x}{0.25 - 0.2} & 0.2 < x \leq 0.25 \\ 0 & x > 0.25 \end{cases}$$

$$\mu_{v_2}(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 0.2 \\ \frac{x - 0.2}{0.25 - 0.2} & 0.2 < x \leq 0.25 \\ 1 & 0.25 < x \leq 0.65 \\ \frac{0.75 - x}{0.75 - 0.65} & 0.65 < x \leq 0.75 \\ 0 & x > 0.75 \end{cases}$$

$$\mu_{v_3}(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 0.65 \\ \frac{x - 0.65}{0.75 - 0.65} & 0.65 < x \leq 0.75 \\ 1 & 0.75 < x \leq 1.4 \\ \frac{1.4 - x}{1.6 - 1.4} & 1.4 < x \leq 1.6 \\ 0 & x > 1.6 \end{cases}$$

$$\mu_{v_4}(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 1.4 \\ \frac{x - 1.4}{1.6 - 1.4} & 1.4 < x \leq 1.6 \\ 1 & x > 1.6 \end{cases}$$

对平均粒径而言,其隶属函数为:

$$\mu_{v_1}(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 0.25 \\ \frac{0.31 - x}{0.31 - 0.25} & 0.25 < x \leq 0.31 \\ 1 & x > 0.31 \end{cases}$$

$$\mu_{v_2}(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 0.18 \\ \frac{x - 0.18}{0.22 - 0.18} & 0.18 < x \leq 0.22 \\ 1 & 0.22 < x \leq 0.25 \\ \frac{0.31 - x}{0.31 - 0.25} & 0.25 < x \leq 0.31 \\ 0 & x > 0.31 \end{cases}$$

$$\mu_{v_3}(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 0.1 \\ \frac{x - 0.1}{0.15 - 0.1} & 0.1 < x \leq 0.15 \\ 1 & 0.15 < x \leq 0.18 \\ \frac{0.22 - x}{0.22 - 0.18} & 0.18 < x \leq 0.22 \\ 0 & x > 0.22 \end{cases}$$

$$\mu_{v_4}(x) = \begin{cases} 1 & x \leq 0.1 \\ \frac{0.15 - x}{0.15 - 0.1} & 0.1 < x \leq 0.15 \\ 0 & x > 0.15 \end{cases}$$

2.2 评价指标权重的确定

根据专家估测法(又名德尔菲法)来确定权重值。专家估测法是依据若干专家的知识、智慧、经验、信息和价值观,对已拟出的评价指标进行分析、判断、权衡并赋予相应权值的一种调查法。一般需经过多轮匿名调查,在专家意见比较一致的基础上,经组织对专家意见进行数据处理,检验专家意见的集中程度、离散程度和协调程度,达到要求之后,得到各评价指标的初始权重向量, $w^* = \{w_i^*\}_{1,n}$, 再对初始权重向量做出归一化处理,获得各评价指标的权重向量:

$$w^* = \left\{ \frac{w_1^*}{\sum_{i=1}^n w_i^*}, \frac{w_2^*}{\sum_{i=1}^n w_i^*}, \dots, \frac{w_n^*}{\sum_{i=1}^n w_i^*} \right\} \\ = \{w_1^*, w_2^*, \dots, w_n^*\} \quad (7)$$

鉴于在砂土液化评判中,标贯击数对液化影响较大,平均粒径本身及其对标贯击数的影响也都比较明显,故最后拟定权重值为 $A = \{a_1, a_2, a_3, a_4\} = \{0.15, 0.4, 0.2, 0.25\}$ 。

3 砂土液化势的模糊综合评判模型

3.1 基本论域的选择

影响砂土液化势的因素通常可以分为两大类:主要因素和次要因素。主要因素包括地震动的参数、场地砂土的环境条件以及砂土的物理力学性质等。次要因素亦不少,如地震振动的频率、砂土中的水温等,可见影响液化势的因素很多,再加上地质条件的复杂性,因而液化问题可视为一个庞大的系统。根据模糊数学中的不相容原理^[7]“当一个系统的复杂性增大时,使其精确化的能力即将减少,在达到一定的阈值之上时,复杂性与精确性互斥”,对砂土液化而言,可以根据这条不相容原理及具有代表性、易测试的原则选取场地液化势的影响因素。已有的研究表明,烈度 I 、标贯击数 N 及地下水位 d_w 对判别的结果影响较大,应作为影响因子考虑。此外,平均粒径 d_{50} 也应作为影响因子考虑,因为平均粒径 d_{50} 是划分砂土类别的主要依据之一,在某种程度上反映了土的颗粒级配情况,从而间接的反映了土体的抗剪强度,并且粒径大小与排水条件有关,粒径越大越不易液化,粒径越小越易液化,故应作为主要影响因子考虑。

综上所述,选取烈度 I 、标贯击数 N 、地下水位 d_w 和平均粒径 d_{50} 作为 4 个基本影响因素。

3.2 模糊关系矩阵的建立

利用中国建筑科学研究院《抗震验算与构造措施(86 设计规范背景资料、条文、解说汇编)》提供的数据,从中选择 25 组作为研究实例,如表 1 所示。砂土液化可分为不液化、轻微液化、中等液化和严重液化四

种情况,其分级标准如表2所示。

综合评判步骤如下:

1)根据上述及4个影响砂土液化的主要因素,构建评价液化的关联因素集U和等级评价集合V。

$U = \{u_1, u_2, u_3, u_4\} = \{\text{烈度 } I, \text{标贯击数 } N, \text{地下水位 } d_w, \text{平均粒径 } d_{50}\}$

$V = \{v_1, v_2, v_3, v_4\} = \{\text{不液化,轻微液化,中等液化,严重液化}\}$

表1 试验数据

序号	烈度 I/°	标贯击数 N/击	地下水位 d _w /m	平均粒径 d ₅₀ /mm	实测结果
1	7	8	1.2	0.187	液化
2	7	3	0.5	0.166	液化
3	7	6	0.8	0.111	液化
4	7	9	1.1	0.14	液化
5	7	1	0.7	0.07	液化
6	7	5	1.09	0.41	液化
7	7	2	0.6	0.22	液化
8	7	2	0.85	0.145	液化
9	7	5	0.76	0.09	液化
10	7	2	1.4	0.19	液化
11	7	8	1.6	0.19	液化
12	8	12	1.12	0.105	液化
13	8	8	3.20	0.134	液化
14	8	15	3.10	0.25	不液化
15	8	5	3.30	0.17	液化
16	8	9	3.00	0.2	液化
17	8	8	2.00	0.31	不液化
18	9	61	4.9	0.16	不液化
19	9	22	4.5	0.16	不液化
20	9	64	5.00	0.13	不液化
21	7	9	1.40	0.14	液化
22	7	9	1.40	0.14	液化
23	8	8	1.6	0.2	液化
24	9	31	3.5	0.21	不液化
25	7	6	1.2	0.16	液化

表2 砂土液化分级标准

液化等级	喷水冒砂情况	结构破坏情况
严重液化	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3%,结构严重破坏
中等液化	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3%,结构出现破坏
轻微液化	零星喷冒	没有沉陷、液化危害小
不液化	无喷冒、地基稳定	无沉陷、地基及上部结构稳定

2)单因素评判

设评价对象集为: $X = \{x_1, x_2, \dots, x_k\} \quad k = 1, 2, \dots, 25$,对应于不同的对象 x_k ,相应有不同的因素集,即: $x_k = \{u_{1k}, u_{2k}, u_{3k}, u_{4k}\} = \{\text{烈度 } I, \text{标贯数 } N, \text{地下水位 } d_w, \text{平均粒径 } d_{50}\}$,每组数据都可根据上文建立的隶属函数求得对应评价等级的隶属度,构成模糊评价矩阵式(4),然后据式(6)进行评价。

如计算表1中的第二组数据, $x = \{7^\circ, 3 \text{ 击}, 0.5$

$m, 0.166 \text{ mm}\}$,可以求得对应的评判矩阵为 $\tilde{R} =$

$$\begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \text{权重 } \tilde{A} = \{0.15, 0.4, 0.2, 0.25\},$$

则可得评价矩阵为 $B = A \circ \tilde{R} = \{0.075, 0.275, 0.65, 0\}$,可以看出,该判别结果为中等液化,而实测结果为液化,可见两种结果一致。依次类推,可得出总的评价结果,如表3所示。

表3 砂土液化模糊综合评判结果

序号	等级隶属度				实测结果	评判结果
	v ₁	v ₂	v ₃	v ₄		
1	0.075	0.51875	0.40625	0	液化	液化
2	0.075	0.275	0.65	0	液化	液化
3	0.075	0.075	0.655	0.195	液化	液化
4	0.075	0.475	0.4	0.05	液化	液化
5	0.075	0.175	0.1	0.65	液化	液化
6	0.325	0.075	0.6	0	液化	液化
7	0.075	0.525	0.2	0.2	液化	液化
8	0.075	0.075	0.625	0.225	液化	液化
9	0.075	0.075	0.6	0.25	液化	液化
10	0.075	0.1375	0.5875	0.2	液化	液化
11	0.075	0.5375	0.1875	0.2	液化	液化
12	0.4	0.075	0.3	0.225	液化	不液化
13	0	0.475	0.245	0.28	液化	液化
14	0.4	0.325	0.075	0.2	不液化	不液化
15	0	0.075	0.725	0.2	液化	液化
16	0	0.6	0.2	0.2	液化	液化
17	0.25	0.475	0.075	0.2	不液化	液化
18	0.4	0	0.325	0.275	不液化	不液化
19	0.4	0	0.325	0.275	不液化	不液化
20	0.4	0	0.225	0.375	不液化	不液化
21	0.075	0.475	0.4	0.05	液化	液化
22	0.075	0.075	0.6625	0.1875	液化	液化
23	0	0.6	0.2	0.2	液化	液化
24	0	0.1875	0.1375	0.675	不液化	液化
25	0.075	0.075	0.85	0	液化	液化

由表3可以看出,试验数据共有25组,液化错判3例,判别成功率为88%,对于工程而言是完全可以接受的。

4 结语

砂土地震液化现象的发生涉及到许多的因素,存在许多的确定性和模糊性。笔者尝试了利用模糊综合评判法对砂土液化进行判别,其判别结果与现场实测的数据相比,液化判别准确率为88%,在实际工程中是完全可以接受的。该模糊综合评判法考虑了影响砂土液化的四个主要因素,如地震烈度、标贯击数、地下水位及平均粒径等,避免了依靠单因素指标判别因偶然性而造成的误差,因而是比较客观和有效的。但也应注意到,模糊综合评判法的优劣与评判矩阵的建立

(下转第79页)

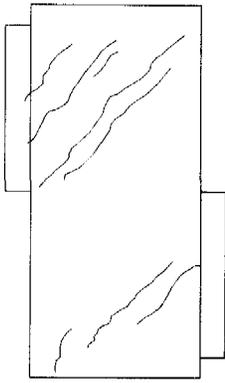


图 3 破坏时节点区裂缝图

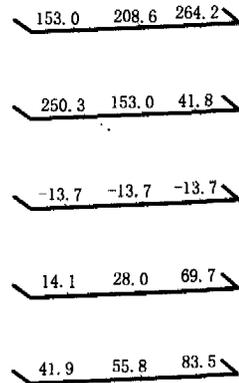


图 4 后期箍筋应力图

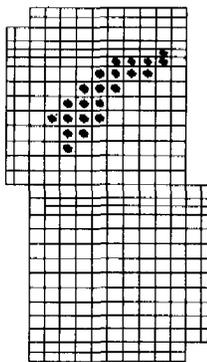


图 5 破坏时节点区混凝土压溃图

6 对本次非线性有限元分析的评价

在研究错层节点的过程中,由于试件数量的限制,对错层节点的深入研究受到了一定程度的制约。我们在参考试验结果的基础上,采用非线性有限元软件 ANSYS 初步成功实现了错层节点的非线性有限元分析,模拟了钢筋和混凝土之间的粘结滑移和错层节点的受力破坏过程,从而可以以此手段对各种条件下的错层节点的传力机理作进一步的了解,并较为准确地得出在各种影响因素作用下,不同受力阶段的错层节点传力特征和规律。

参考文献:

- [1] 陈曦. 钢筋混凝土框架全错开节点拟静力试验与错层节点非线性有限元分析[D]. 重庆:重庆大学,2002.
- [2] 徐有邻,沈文都,汪洪. 钢筋混凝土粘结锚固性能的试验研究[J]. 建筑结构学报,1994,15(3):26-37.
- [3] 吕西林,金国芳,吴晓涵. 钢筋混凝土结构非线性有限元理论与应用[M]. 上海:同济大学出版社,1997.
- [4] 焦心亮. 钢筋混凝土框架顶层中节点的非线性有限元分析[J]. 建筑结构学报,1995,16(5):40-47.
- [5] ANSYS, ANSYS User's Manual Revision 5.7[Z], ANSYS, Inc., 1998.
- [6] Section 14.39 of the ANSYS Theory Reference[Z].

(上接第 58 页)

及权重的拟定,尤其是选取的隶属函数是否正确、合理有直接的关系,这需要进一步对地震液化资料进行大量统计分析。结果表明,本文提出的模糊综合评判法对判别砂土液化而言是有一定参考价值的。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 张跃,邹寿平,宿芬. 模糊数学方法及其应用[M]. 北京:煤炭工业出版社,1992.
- [3] 王元汉,李卧东,李启光,等. 岩爆预测的模糊数学综合评

判方法[J]. 岩石力学与工程学报,1998,17(5):493-501.

- [4] 李彰明. 模糊分析在边坡稳定性评价中的应用[J]. 岩石力学与工程学报,1997,16(5):490-495.
- [5] 肖位枢. 模糊数学基础应用[M]. 北京:航空工业出版社,1992.
- [6] Valliappan S, Pham T D. Fuzzy finite element analysis of a foundation on an elastic soil medium[J]. International journal for numerical and analytic methods in geomechanics, 1993,(17):771-789.
- [7] 贺仲雄. 模糊数学及其应用[M]. 天津:天津科学技术出版社,1983.