

模糊数学在西北地区场 地震害预测中的应用

王家鼎

(国家地震局兰州地震研究所)

摘 要

本文收集了西北地区大量的震害资料及实验室试验结果,利用信息分配,模糊综合评判及信息集中等原理建立了一套适用于西北地区的场地地震害的预测方法。文中将场地分为三类:稳定区、基本稳定区和不稳定区。以地形地貌、土的液化、土的震陷、人工填土的厚度、软土(厚度大于0.3米)的埋深以及边坡稳定性等六个因素作为评价的指标。用这套方法对宝鸡、西安两市的一些场地地震害进行了评价计算,其结果与宏观分析的结果一致。

一、引言

城市地震小区划是在地震区内进行城市总体规划的一个组成部分,其目的是在所研究的城市范围内划分出有利建筑区或不利建筑区,并估计各区可能遭到的地震破坏作用,为城市规划,抗震设计,震害预测和制定抗震加固措施提供基本资料。目前国内外已经大规模地开展了地震小区划工作,然而,其原则和方法并没有统一的规范和模式。但将场地震害和地震动分别来考虑的原则已为国内外地震工程界所普遍接受。工程地震学的发展也证明了这个原则的正确性,同时考虑的问题也越来越广。

场地震害预测是地震小区划的一个主要部分。关于预测的方法,国内外学者也开展了多方面的探讨^[1, 2],但基本是宏观定性的分析,虽然其中有些小节已有定量的方法,但还不能定量地过渡到场地震害预测中。场地震害是众多因素综合影响的一种效应,在分析中,必须考虑到本区所有影响场地震害的因素,尽量做到定量分析。本文通过分析认为场地震害的划分是一模糊分类,故采用模糊数学中的原理对其进行分析和评定。

二、场地震害的分区及影响因素

关于场地震害分区的问题,国内外的学者都有研究²⁾,分区的级别及标准皆不尽相

1) 孙崇绍等,西安市地震小区划,1986

2) 方鸿琪等,唐山强震区地震工程地质研究,1981

同。笔者根据西北地区的震害经验资料以及地质特征, 将场地分为如下几类:

场地震害分区表

表 1

分区	符号	分区特征	震害效应	建筑条件	抗震措施
稳定区	I	完整的河流阶地, 老洪积扇地区, 地形平坦、开阔, 地层单一, 物质稳定, 力学性质良好, 潜水埋深多在10米以上, 无人工填土或人工填土很薄的地区。	无震害	很适宜建筑	可根据现行设计规范要求进行设计。
基本稳定区	II	河漫滩, 新洪积扇地区, 黄土原边, 基岩山区, 地形较平坦, 人工填土分布, 古滑坡区, 地层新近堆积, 岩性较复杂、多变, 潜水埋深在0—5米。	地震时, 有轻度的液化, 震陷或有滑坡的趋势。	经处理后基本适宜建筑	除一般性(按规范Ⅲ点)建筑物按现行抗震设计规范要求设计外, 对I、II类建筑需考虑轻度的液化, 震陷或滑坡的趋势。
不稳定区	III	黄土孤立山包或山梁, 高陡边坡及地形破碎区, 地形复杂, 地裂缝发育等, 地层、岩性十分复杂、多变、土的结构松散。	地震时, 产生中等或严重的液化, 震陷或大规模的滑坡, 地裂缝在地震时加剧。	不宜建筑	除按“基本稳定区(II)”采取措施外, 尚需考虑大面积场地失稳或场地整体滑动, 地裂缝加剧活动可能产生的地震效应。

对于场地震害的影响因素, 我们设六个论域包括他们, 即:

G——地形地貌; L——土的液化; C——土的震陷; T——人工填土的厚度; H——软土(厚度大于0.3米)的埋深; F——边坡稳定性。

同时我们也设有另一场地震害论域

$$U_{\Delta} \{u_1, u_2, u_3\}$$

(1)

其中, u_1 、 u_2 、 u_3 分别代表场地震害的三个分级(I、II、III, 见如表1)。

由于各个城市的潜在震源特性, 介质的情况以及场地特征都有较大的区别, 所以影响场地震害的因素也不尽一致。有的因素有些城市存在, 而有些因素则不存在。如西安市存在地裂缝和地面沉降而不存在滑坡的问题, 宝鸡市存在滑坡却不存在地裂缝和地面沉降, 上海市则存在较为严重的地面沉降问题。所以, 在进行一个城市的地震区小划的研究时, 必须尽可能研究该城市的影响因素。评定场地震害的影响因素对各个城市来说都不一样。本文考虑西北地区大部分城市的特点选定了以上参数。

三、各种因素与场地震害之间的模糊关系

1. 地形地貌

地形地貌对场地震害的影响很大, 但却难以定量衡量。以前人们总是采用地质分析的手法来研究其对场地的影响^[3]。我们要定量地研究它也还是较困难的。为此, 根据专家经验建立地形地貌和场地震害分级的模糊关系(如表2)。

2. 土的液化

表 2

场地震害分级 震原度 μ 地形地貌	I	II	III
山前平原、河谷 平原、河谷阶地	1	0.6	0.2
黄土原边、基岩山区	0.6	1	0.6
黄土孤立山包 山梁黄土塬等	0.2	0.6	1

笔者在文献〔4〕、〔5〕中根据应力比

$(\frac{\tau_d}{\sigma'_0})$ 和调整标贯击数两个指标用模糊数学

方法对土的液化进行评定,效果很好。这种方法将液化分为四级:未液化、临界情况,中等液化和严重液化,计算的结果为液化可能性的大小,用隶属度表示(0—1)。现在我们将它与场地震害建立模糊关系。

我们收集了国内外(海城、唐山、通海、新泻、浓尾、智利、危地马拉等)很典型的50组震区的液化资料,用文献〔5〕的方法求得了液化可能性大小,其结果与实际情况是完全一致的。

根据信息分配原理〔9〕计算土的液化与场地震害的模糊关系。

考虑两个论域:液化势论域L和场地震害论域U

$L \triangleq \{l_1, l_2, \dots, l_5\} = \{0.150, 0.355, 0.505, 0.680, 0.880\}$

$U \triangleq \{u_1, u_2, u_3\} = \{I, II, III\}$

以元素 l_i, u_j 作为行列构成信息矩阵Q(5×3)。

设有震区资料 (l, u_j) ,其中 $l_i \leq l \leq l_{i+1}$,

$l \in L, (l, u_j)$ 分配给 Q_{ij} 的信息为:

$$Q_{ij} = 1 - \frac{|l - l_i|}{\Delta_i} \quad \Delta_i = l_i - l_{i-1} \quad (2)$$

将50组震区资料按(2)式进行模糊信息处理后,把矩阵Q上各点所获取的信息迭加起来,即得信息分布图如表3。

对于表中的场地震害分级作正规化处理(即用每列的最大值遍除该列各行的值),便可得L、U的模糊关系矩阵如下:

表 3

L \ U	$u_1(I)$	$u_2(II)$	$u_3(III)$
(0.150 — 0.300)	9.741	0	0
(0.310 — 0.400)	1.259	3.833	0
(0.410 — 0.600)	0	10.430	0
(0.610 — 0.750)	0	5.725	10.385
(0.760 — 1.00)	0	0	8.615

表 4

	u_1	u_2	u_3
$l_1(0.150)$	1	0	0
$l_2(0.355)$	0.129	0.372	0
$l_3(0.505)$	0	1	0
$l_4(0.680)$	0	0.549	1
$l_5(0.880)$	0	0	0.830

3. 土的震陷

文献〔3〕、〔4〕根据黄土的动力学实验,求得了西安,宝鸡两市的39组土样的地震动剪应力与临界剪应力,两者对比后可评价黄土的震陷。笔者将地震动剪应力与临界剪应力之比作为

* 注: l_i 取不等间距效果好,根据大量试算取上述间隔

3) 张振中等,西安黄土的动力特性试验结果及其评价,1986,

4) 段汝文等,宝鸡市黄土动力试验研究,1986,

震陷指标。用在西安, 宝鸡所做的39组土样的震陷可能性与场地震害建立模糊关系。然而, 西安、宝鸡并非震区, 所取土样的场地我们并不知道是属于稳定区, 还是不稳定区。对这个问题我们将震区的某些场地(如海原、古浪等)的震陷与西安、宝鸡的一些场地的震陷试验所得的结果进行了类比, 求得了西安, 宝鸡所取土样场地的震害分区。这样建立两者的模糊关系就有了可能。

考虑两个论域: 土的震陷评价指标论域 C ($C = \frac{\tau_{震}}{\tau_{临}}$) 和场地震害论域 U

$$C \triangleq \{C_1, C_2, \dots, C_5\} = \{0.450, 1.005, 1.155, 1.605, 3.505, 7.505\}$$

$$U \triangleq \{u_1, u_2, u_3\} = \{I, II, III\}$$

采用与上面相同的信息分配方法, 将西安、宝鸡的39组土样所做试验结果的数据信息分配于信息矩阵中, 再做正规化处理得 C 与 U 的模糊关系如下:

表 5

	u_1	u_2	u_3
$C_1(0.450)$	0.387	0	0
$C_2(1.005)$	1	0.401	0
$C_3(1.155)$	0	1	0.035
$C_4(1.605)$	0	0.348	0.708
$C_5(3.505)$	0	0	1
$C_6(7.505)$	0	0	0.132

4. 人工填土的厚度

人工填土分布在地表, 其厚度对地基失效的影响很大。由于一般民用建筑物的基础埋深在2米左右, 4米以内的填土容易处理挖除, 所以将填土厚度大于4米的地区作为不利场地因素划出。人工填土的厚度一般不超过10米。据此我们可得人工填土对场地震害的隶属函数如下:

$$\mu_I = \begin{cases} 1 - 0.025d & d \leq 4 \\ 1.5 - 0.15d & 4 < d \leq 10 \\ 0 & d > 10 \end{cases} \quad (3)$$

$$\mu_{II} = \begin{cases} 0.8 - 0.025d & d \leq 4 \\ 1.13 - 0.08d & 4 < d \leq 10 \\ 0.3 & d > 10 \end{cases} \quad (4)$$

$$\mu_{III} = \begin{cases} 0.025d & d \leq 4 \\ 0.15d - 0.5 & 4 < d \leq 10 \\ 1 & d > 10 \end{cases} \quad (5)$$

5. 软土(厚度 >0.3 米)的埋深

土动力学试验和理论计算都表明, 土的动力性质和静态指标有一定的关系。静力状态下承载能力弱的土类, 地震时也容易发生附加下沉。软土层大多分布于距地表10米以内。有的也可能有多层。为此, 我们将软土的埋深当作预测场地震害的一个指标。其厚度不能小于0.3米, 否则影响不大, 如有多层, 按最深层计算, 这样便得出隶属函数

$$\mu_I = \begin{cases} 1-0.04H & H \leq 5 \\ 1.6-0.16H & 5 < H \leq 10 \\ 0 & H > 10 \end{cases} \quad (6)$$

$$\mu_{II} = \begin{cases} 0.8-0.1H & H \leq 5 \\ 1.3-0.1H & 5 < H \leq 10 \\ 0.3 & H > 10 \end{cases} \quad (7)$$

$$\mu_{III} = \begin{cases} 0.04H & H \leq 5 \\ 0.16H-0.6 & 5 < H \leq 10 \\ 1 & H > 10 \end{cases} \quad (8)$$

6. 边坡稳定性

震区实例说明,在Ⅶ度或更高的烈度区里,不是到处是滑坡和崩塌。而是有的地方密集,有的地方稀疏。而且就是密集的地方,在滑坡附近,紧挨着是稳定的斜坡。这种显著的差异是由斜坡的岩性,结构类型,斜坡的坡度、地形、地下水等多种因素决定的。文献〔7〕在调查了大量的滑坡实例之后认为只考虑坡度、岩性和地下水等三种主要因素就可以判断边坡稳定性。评价因素和指标如表6所示。

表6

指标 因素 等级	土质边坡		基岩边坡		地下水埋深 (米) dw
	坡度 (α)	土质	坡度 (α)	岩性	
最不稳定的	$>25^\circ$	松散砂土,淤泥质,粘土,冲填土	$>50^\circ$	断层破碎带,岩石强烈风化,节理裂隙发育,充填粘土矿物	0~8
不稳定的	$10^\circ \sim 25^\circ$	黄土类土,粘性土新的重力堆积	$30^\circ \sim 50^\circ$	中等风化的岩石,裂隙间距20~50cm,裂缝中有少量矿物	3~10
相对稳定的	$5^\circ \sim 10^\circ$	粗砂、砾石层,卵石土,密实的粘土,老的重力堆积	$20^\circ \sim 30^\circ$	坚硬完整的岩石,风化微弱,节理裂隙较少	>10

我们由海原、兰州、天水、东乡、庆阳、唐山等地区的实际滑坡资料建立了边坡稳定性与场地震害的模糊关系如下:

土质边坡

表7

基岩边坡

表8

	u_1	u_2	u_3
$f_1 (5^\circ \leq \alpha < 10^\circ)$ $(dw \geq 10)$	1	0.211	0
$f_2 (10^\circ \leq \alpha < 25^\circ)$ $(8 \leq dw < 10)$	0	1	0.025
$f_3 (\alpha > 25^\circ)$ $(0 \leq dw < 8)$	0	0.09	1

	u_1	u_2	u_3
$f_1 (20^\circ \leq \alpha < 30^\circ)$ $(dw \geq 10)$	1	0.083	0
$f_2 (30^\circ \leq \alpha < 50^\circ)$ $(3 \leq dw < 10)$	0	1	0.261
$f_3 (\alpha > 50^\circ)$ $(0 \leq dw < 3)$	0	0.047	1

四、场地震害预测的计算

1. 模糊近似推论

我们从第三个问题中可以得到单因素评价场地的隶属度。

对地形地貌因素, 我们可直接从表2中查出场地震害的各级隶属度, 对于人工填土的厚度和软土埋深两个因素对场地震害的单因素评价可根据公式(3)——(8)求出。

对于土的液化势, 土的震陷、边坡稳定等三个因素对场地震害的单因素评价, 我们要采用模糊近似推论公式:

$$B = A \circ R \quad (9)$$

求得, 其中B是预测的场地震害分级的各级隶属度的数组; R是模糊关系(表4、5、7、8); A是预测形式, 取如下形式〔5〕

$$A = \max \left(0, \frac{\Delta_{ki} - |v_k - v_{ki}|}{\Delta_{ki}} \right) \quad (10)$$

其中, V_k 为各因素的原始值; v_{ki} 为各因素的基础变量(表4、5、7、8); $\Delta_{ki} = v_{k(i+1)} - v_{ki}$; “ $\circ$ ”表示组合运算, 经大量试算取模型 $M(\cdot \oplus)$ (本文为普通乘)为好, 不丢失信息。

2. 模糊综合评判

上面是单因子求取场地震害的隶属度。为了综合各种因素的影响, 我们就需要将各种单因子评价的结果再进行模糊综合评价, 采用公式:

$$Y = X \circ R \quad (11)$$

其中, Y是场地震害预测的多因子评价的结果; X是六个因子的权重大小, 具体城市应选择适当的权。R是六个因子评价结果的组合矩阵, “ $\circ$ ”是组合运算, 仍取普通乘较合适。

3. 信息集中

文献〔5〕、〔8〕、〔9〕, 皆介绍了信息集中的原理, 它是将多值化为单值。在此我们先设场地震害的一个模糊子集S, $S \in U$

$$\mu(s)_{\text{场地震害很重}} = 0.1/\text{I} + 0.5/\text{II} + 0.9/\text{III} \quad (12)$$

式(12)是场地震害的一种表示。

信息集中公式

$$S = \sum_{i=1}^n y_i^k \mu(S_i) / \sum_{i=1}^n y_i^k \quad i = 1, 2, 3 \quad (13)$$

其中, S是预测的场地震害可能性大小。 y_i 是从公式(11)中求出的场地震害的各级隶属度, $\mu(S_i)$ 是公式(12)中I、II、III的隶属度。K为常数, 视情况而定, 本文经试算后取2合适。

五、实用算例

我们将这套方法应用于西安、宝鸡两市的某些场地的震害预测中来检验该方法的可靠性。

举一宝鸡市相家庄一带场地震害预测的实例。该场地的各因子如下表:

表9

因素	地形地貌	液化势	震陷	人工填土厚度 (米)	软土埋深(米)	边坡稳定性
指标	黄土原边	$\mu_1 = 0.635$	$C_{震}/C_{临} = 3.714$	2.2	6.7	无滑坡

注: 表9中的液化势的结果是由文献〔5〕求出的, 震陷是根据黄土动力试验而得的。

这些因素的单因素评定的结果是根据上面的方法和公式求得的。将六个因子评价的结果组合起来得多因子评价的模糊关系（即式（11）中的R）如下

$$R = \begin{pmatrix} 0.6 & 1 & 0.6 \\ 0 & 0.618 & 0.846 \\ 0 & 0 & 0.132 \\ 0.945 & 0.745 & 0.055 \\ 0.528 & 0.630 & 0.472 \end{pmatrix}$$

由于边坡稳定因素在该场地不存在，所以R中未包含边坡稳定性的评价结果。笔者征求了几位专家的意见，认为在该场地上取式（11）中的X为

$X = [0.17 \quad 0.28 \quad 0.26 \quad 0.15 \quad 0.13]$ 较合适。

对于其它场地的X取法，要视情况而定。

按公式（11）

$Y = X \cdot R$ 得

$$Y = [0.17, 0.28, 0.26, 0.15, 0.13] \begin{pmatrix} 0.6 & 1 & 0.6 \\ 0 & 0.618 & 0.846 \\ 0 & 0 & 0.132 \\ 0.945 & 0.745 & 0.055 \\ 0.528 & 0.630 & 0.472 \end{pmatrix}$$

$$= [0.312 \quad 0.537 \quad 0.443]$$

按公式（13）得

$$S = \frac{0.312^2 \times 0.1 + 0.537^2 \times 0.5 + 0.443^2 \times 0.9}{0.312^2 + 0.537^2 + 0.443^2} = 0.568$$

属Ⅱ（ $\mu(Ⅱ) = 0.5$ ），即相家庄一带属基本稳定区。

此结果与宝鸡市地震小区划宏观分析的结果一致。仿此例，笔者还对宝鸡市和西安市的几个场地地震害进行了计算，结果皆与宏观分析吻合得相当好。

六、结 论

1. 本文是为场地震害预测提供定量方法的一种尝试。

2. 本文综合了地形地貌、液化势、震陷、填土厚度、软土埋深和边坡稳定等多种因素评价场地震害或地基失效的可能性，这样尽量全面地反映客观事物的本质。

3. 从宝鸡、西安两市的几处场地震害计算结果来看，与现行的宏观分析结果符合较好，从而说明该方法是合理的，而且本方法能够提出定量结果，可直接应用于地震小区划中。

本方法拟用于天水、西宁地震小区划中，对西北其它城市的地震小区划也可参考应用。

本文是在孙崇绍副研究员和陈丙午研究员的指导下完成的，谢君斐研究员、林学文、查小刚副研究员在某些问题上也给予有益的指导，刘贞荣先生在模糊数学的问题上给予了有益的指导，在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- [1] U, Chiocchini and C. Cherubini, Seismic microzoning of the Lioni Village destroyed by the November 23rd 1970 earthquake, proceedings of the International Symposium on Eng.

- Geology Problems in Seismic Areas, Vol. 3, pp. 341—361, Bari, Italy, 13—19 April, 1986.
- [2] 胡聿贤等, 场地条件对震害和地震动的影响, 地震工程与工程振动, No. 1 (试刊), 1980.
- [3] 国家地震局兰州地震研究所、宁夏回族自治区地震队, 一九二〇年海原大地震, 地震出版社, 1980.
- [4] 王家鼎, 砂土震动液化势评定中的模糊数学方法, 西北地震学报, Vol. 7, No. 3, 1985.
- [5] Wang Jiading, Further study on Fuzzy mathematical method in evaluation of seismic liquefaction potential, Proceedings of the International Symposium on Eng. Geology Problems in Seismic Areas, Vol. 2, pp. 47—56, Bari, Italy, 13—19 April, 1986.
- [6] Asuri Sridharan, Savaram Narasimha, New approach to multistage triaxial test, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 98, No. SM11, 1972.
- [7] 靳泽光等, 模糊数学方法在边坡稳定性评价中的应用, 水文地质工程地质, No. 6, 1987.
- [8] 王光远, 地震烈度的模糊综合评定及其在抗震结构设计中的应用, 地震工程与工程振动, Vol. 2, No. 4, 1982.
- [9] Huang Chongfu and Liu Zhenrong, Isoseismal area estimation of Yunnan Province by fuzzy mathematical method, Fuzzy Math. in Earthquake Reseaches, Seismological Press, 1985.

APPLICATION OF FUZZY MATHEMATICS IN PREDICTION OF NORTHWESTERN SITES DAMAGE

Wang Jiading

(*Seismological Institute of Lanzhou, State Seismological Bureau*)

Abstract

In this paper, we are rolling in damage data and the results of a laboratory tests. A set of predictable method that is satisfactory to China's Northwestern sites damage are established with the principles of information distribution, fuzzy multifactorial evaluation and information concentration. Site is classified into three sorts: stable region, stable region in the main and non-stable region. Evaluated paramenters are geography and geomorphology, soil liquefaction potential, loess settlement, the thickness of artificial filled soil, the depth of soft soil and slope stability. The damages of a few sites of Xian and Baoji Cities are evaluated by this method. And its results are in keeping with those of macroscopic analysis. This paper provide the prediction of China's Northwestern sites damage with a kind of quantitive reseach method. At same time, it is of importance to reseach of seismic microzonation.