

地震砂土液化可能性的非确定性灰色预测方法

陈新民 罗国煜

(南京大学地球科学系 210093)

摘 要 地震作用下的饱水砂土体系是一内部信息部分已知、部分未知的灰色系统,反映其液化可能性的指标值实际上是一些灰数。取平均粒径、相对密度、标准贯入击数和上覆有效压力作为评价砂土液化可能性的指标,以它们在各级烈度下液化现场资料的统计均值作为参考数列,将已知烈度区内待预测砂土的指标实测值作为被比较数列,计算它们之间的关联度。若最大关联度值所对应的参考数列烈度大于待预测区,则判为液化;反之,则判为不液化;若相等,则再据次最大关联度依上述同样原则作进一步判定。

关键词 砂土液化;地震;灰色系统;预测;液化临界烈度

分类号 TU435

地震作用下的砂土液化可能性估计是地震区岩土工程勘察和设计中的一项重要基础性工作。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^[1]。目前所用的多指标方法主要有数理统计判别^[2]、模糊综合评判^[3]和人工神经网络预测^[4]等。但数理统计方法需要大量的统计样本;模糊综合评判法常要对各指标赋予不同的权值,而权值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,因各指标权值分配过小,在合成运算时不一定得到充分反映,导致结果有失真的现象^[5];人工神经网络方法则自身存在收敛速度慢等弱点。鉴于影响地震砂土液化因素的复杂性和多样性以及人类认识问题的局限性,目前还无法准确、全面地认识砂土在地震作用下的性状。现提出了一种地震砂土液化可能性估计的灰色关联度非确定性分析方法。

1 灰色关联分析的基本原理

灰色关联分析是灰色系统理论的重要内容之一^[6],是对一个系统发展变化态势进行定量描述和比较的方法。其目的是寻求各因素间的主要关系,找出影响目标值的重要因素,从而掌握事物的主要特征。灰色关联分析的基本思想是通过曲线间几何形状的分析比较对因素进行比较,即认为几何形状越接近,则发展变化态势越接近,关联程度越大。

1.1 关联系数与关联度

关联分析先要指定参考数列。参考数据列常记为 x_0 , x_0 可以是时间序列、指标序列和空间序列。本文数据列为指标序列,第 k 个指标序号的值记为 $x_0(k)$,于是参考数列可表示为 $x_0 = \{x_0(k) | k=1, 2, \dots, n\}$, n 为指标个数。关联分析中的被比较数列

1996年11月13日收稿,1997年1月17日改回。

作者简介:陈新民,男,1962年出生,博士,工程地质专业。

第94期 80 Cited by Scisearch, Scisearch, Scisearch Publishing House. All rights reserved. <http://www>

记为 x_1, x_2, \cdots, x_m, m 为被比较数列的个数。

由于关联性实质是曲线间几何形状的差别，因此以曲线间差值的大小作为关联程度的衡量尺度。于是可用下式表示各比较曲线与参考曲线在各点的关联系数：

$$\xi_i(k) = \frac{\min_k \min_i |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_k \max_i |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_k \max_i |x_0(k) - x_i(k)|}$$

式中： ρ 为分辨系数，其作用是提高关联系数之间的差异显著性， $\rho \in (0, 1)$ 。从差异显著性和计算方便两方面考虑，通常取 $\rho=0.5$ 。

关联系数的个数较多，信息过于分散，不便于比较，为此可用求平均值的方法将各指标序号的关联系数集为一个值，于是有：

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k)$$

式中： r_i 是子数列 x_i 对母数列 x_0 的关联度。

1. 2 最大关联度识别原则

最大关联度识别原则有两条^[7]，据本文研究问题的特点，使用最大关联度识别原则 II，即当给定标准参考数列 $x_{0i} = \{x_{0i}(k) | k=1, 2, \cdots, n\}$ ， $i=1, 2, \cdots, m$ 及一考察对象 $x = \{x(k) | k=1, 2, \cdots, n\}$ 时，则以 x 为参考数列，以 x_{0i} 为比较数列，求出 x_{0i} 对 x 的关联度 r_{0i} ，则 x 应优先划归使 $\max r_{0i}$ 成立的 x_{0i} 中。

2 应用实例

2. 1 因素的确定和量值化

考虑到砂土地震液化最基本的制约因素是其自身的特性以及指标测试的简单性和难易性。文献 [3] 选用砂土的平均粒径 (d_{50})、相对密度 (Dr)、标准贯入击数 ($N_{63.5}$) 和上覆有效压力 (σ_v) 作为评判因素，并通过国内外 19 个地区的 34 例液化现场调查资料分析发现，砂土的上述特性指标越大，经受地震作用的能力越强，且这种制约关系基本呈线性关系^[3]。由于这些指标的试验值具有一定的不确定性，作者用其均值作为最优参数值 (表 1)。

2. 2 关联度计算

取文献 [3] 中已进行模糊综合评判的前 20 组实例参加计算，其各项指标的实测值见表 2。

由于表 1 和表 2 中各因素的物理意义不同，数据的量纲也不一样，为保证各因素具有等效性和同序性，需对原始数据进行处理。常用的数据处理方法有初值化、均值化、区间相对值化和归一化等。本例非时间序列，故采用归一化方法，

将表 1 和表 2 中平均粒径 (d_{50}) 项乘以 10，相对密度 (Dr) 和标贯击数 ($N_{63.5}$) 项除以 10，有效压力 (σ_v) 项除以 100。以表 2 的 20 个实例作为参考数列，以各级烈度作为比较数列，用处理后的数据按前述方法进行关联度计算，并将其结果写成矩阵形式有：

表 1 各级烈度下 4 项指标的均值

Table 1 Statistically mean values of the four indices

烈 度	6	7	8	9	10	11
d_{50}/mm	0.06	0.18	0.30	0.43	0.54	0.67
$Dr/\%$	61	67	73	78	84	90
$N_{63.5}/\text{击}$	9	14	18	22	26	30
σ_v/kPa	38	61	83	110	133	156

序 号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	烈 度
	0.864	0.838	0.825	0.613	0.579	0.813	0.769	0.952	0.923	0.819	0.722	0.580	0.753	0.573	0.793	0.698	0.544	0.463	0.543	0.584	6
	0.868	0.887	0.814	0.748	0.677	0.872	0.816	0.804	0.806	0.941	0.889	0.699	0.852	0.678	0.858	0.825	0.645	0.539	0.660	0.698	7
	0.761	0.769	0.745	0.733	0.688	0.839	0.836	0.705	0.735	0.869	0.856	0.849	0.872	0.865	0.840	0.777	0.729	0.608	0.663	0.723	8
	0.706	0.703	0.698	0.712	0.659	0.779	0.839	0.630	0.680	0.776	0.784	0.827	0.865	0.889	0.846	0.778	0.730	0.707	0.618	0.687	9
	0.629	0.655	0.685	0.679	0.618	0.739	0.789	0.573	0.617	0.686	0.681	0.775	0.765	0.774	0.755	0.743	0.775	0.803	0.657	0.738	10
	0.566	0.621	0.659	0.628	0.606	0.653	0.695	0.525	0.564	0.612	0.602	0.677	0.663	0.638	0.653	0.643	0.779	0.880	0.723	0.776	11

2 3 结果分析和应用

通过前述计算，不难找出各砂土与各烈度之间最大关联度的对应关系。应该指出，与某一砂土关联度最大的烈度是该砂土发生液化所需的最小烈度，可称之为液化临界烈度，即若与某一砂土关联度最大的烈度为 7 度，则当实际烈度> 7 度时，该砂土液化；而当实际烈度< 7 度时，该砂土不液化。现在有这样一个问题，那就是当与某一砂土关联度最大的烈度为 7 度，而实际烈度也为 7 度时，究竟是液化还是不液化？这可通过次最大关联度进一步判定，即看与关联度次最大值相对应的烈度是 6 度还是 8 度，若是 6 度则可判为不液化；若是 8 度则可判为液化。实际上，表 3 中的 4、6 和 14 号 3 个砂土的判别结果即是通过这种方法确定的。

表 2 地震液化实例及指标实测值							
Table 2 Measured index values for the field sand							
地 点	地震 烈度	序 号	砂土指标				现场液 化实况
			d_{50}/mm	$Dr/\%$	$N_{63.5}/\text{击}$	σ_v/kPa	
海城南河	Ⅷ	1	0.135	64	10	110	液化
沿排灌站		2	0.135	64	13	150	液化
胜利塘	Ⅶ	3	0.090	88	11	60	液化
排灌站		4	0.180	75	43	130	未液化
		5	0.180	75	43	210	未液化
双台子闸	Ⅶ	6	0.107	82	15	70	未液化
		7	0.107	82	20	100	未液化
万金滩闸	Ⅶ	8	0.065	58	6	20	液化
		9	0.065	58	6	100	液化
唐山钱	Ⅹ	10	0.150	70	15	100	普遍液化
家管区		11	0.180	70	20	100	普遍液化
		12	0.280	80	20	150	普遍液化
滦南县	Ⅸ	13	0.140	77	20	100	普遍液化
某地		14	0.330	77	25	100	普遍液化
乐亭县	Ⅷ	15	0.130	80	20	50	普遍液化
某地		16	0.180	80	25	50	普遍液化
唐山市区	Ⅹ~Ⅺ	17	0.260	90	25	150	零星液化
		18	0.550	90	30	200	
丰润县	Ⅷ	19	0.180	90	40	200	未液化
某地		20	0.230	95	> 40	200	未液化

表 3 液化临界烈度及液化可能性预测结果和现场液化实况					
Table 3 The comparison of the gray correlation analysis results with the field situations					
序 号	液化临 界烈度	实际 烈度	灰色预 测结果	模糊综合 评判结果	现场液 化实况
1	7	Ⅷ	液化	液化	液化
2	7		液化	液化	液化
3	6	Ⅶ	液化	液化	液化
4	7		不液化	不液化	未液化
5	8		不液化	不液化	未液化
6	7	Ⅶ	不液化	不液化	未液化
7	9		不液化	不液化	未液化
8	6	Ⅶ	液化	液化	液化
9	6		液化	液化	液化
10	7	Ⅹ	液化	液化	普遍液化
11	7		液化	液化	普遍液化
12	8	Ⅸ	液化	液化	普遍液化
13	8		液化	液化	普遍液化
14	9	Ⅷ	液化	液化	普遍液化
15	7		液化	液化	普遍液化
16	7	Ⅹ~Ⅺ	—	液化	零星液化
17	11		—	不液化	
18	11	Ⅷ	不液化	不液化	未液化
19	11		不液化	不液化	未液化
20	11				

对于 17 和 18 号砂土, 其液化临界烈度为 11 度, 而实际烈度为 10~11 度。因为表 1 中的烈度只取到 11 度, 无法判断它们与次最大关联度相对应的烈度是 10 度还是 12 度, 因此也就无法最后确定它们是液化还是不液化。

各砂土在给定烈度条件下发生液化的可能性预测结果(表 3), 用本文方法所得结论与现场液化实况完全一致, 与模糊综合评判法所得结果也完全吻合。

3 结 语

本文给出的地震砂土液化可能性灰色预测方法, 其最大的特点是计算简单和结果客观可靠, 它不象模糊综合评判方法那样, 要人为地对各因素赋予不同的权重, 而是对各因素做等权处理, 因此避免了主观因素的导入。

在当前地震砂土液化可能性尚无完全可靠评价方法的情况下, 本方法除具有计算简便快捷和结果客观可靠等优点外, 它还可与其他方法配合使用, 以进一步提高地震砂土液化可能性估计的可靠性和准确性。

参 考 文 献

- 1 《岩土工程手册》编写委员会. 岩土工程手册. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994. 779~805
- 2 刘 颖, 谢君斐. 砂土震动液化. 北京: 地震出版社, 1984. 105~129
- 3 翁焕学. 砂土地震液化模糊综合评判实用方法. 岩土工程学报, 1993. 15 (2): 74~79
- 4 蔡煜东, 官家文, 姚林声. 砂土液化预测的人工神经网络模型. 岩土工程学报, 1993. 15 (5): 53~55
- 5 秦四清, 张倬元, 王士天等. 非线性工程地质学导引. 成都: 西南交通大学出版社, 1993. 34~37
- 6 邓聚龙. 灰色系统基本方法. 武汉: 华中工学院出版社, 1987. 1~37
- 7 傅 立. 灰色系统理论及其应用. 北京: 科学技术文献出版社, 1992. 262~263

INDETERMINATE GRAY PREDICTION METHOD OF POSSIBILITY OF SAND LIQUEFACTION DURING EARTHQUAKE

Chen Xinmin Luo Guoyu

(Dept. of Earth Sciences, Nanjing University)

Abstract The saturated sand body subjected to earthquake is regarded as a gray system with partially known and partially unknown information. The mean diameter, relative density, standard penetration number and effective overburden pressure are selected as the indices indicating the possibility of sand liquefaction, which values are gray numbers. With the statistically mean values obtained through field studies of various intensities as reference series, the measured values of the sand to be predicted with known intensity as the compared series, the correlation degree between them can be calculated. If the intensity corresponding to the maximum correlation degree is greater than that of the predicted area, the sand may liquefy; if less than, the sand will not liquefy; if both are equal, the decision can be made using the second maximum correlation degree according to the same rule.

Key words earthquake; sand liquefaction; gray system; prediction; critical liquefaction intensity