

# 砂土震动液化势评定中的模糊数学方法

王家鼎\*

(国家地震局兰州地震研究所)

## 摘 要

本文利用二维信息分配概念及模糊近似推论公式对砂土震动液化势进行了定量研究。文中利用日本学者时松孝次收集的世界各地100个地点的砂土震动液化势资料建立了应力比( $\frac{\tau_d}{\sigma'_0}$ )、修正标准贯入击数( $N_1$ )和砂土震动液化势之间的模糊关系(R),并结合作者收集的45个地点的砂土震动液化势资料对该方法进行了验证,其成功率达82%达到了令人满意的程度。

## 前 言

现有的砂土震动液化势的评定方法大致可分为两类:一类以现场震害经验和勘测资料为基础,简称为“经验评定法”;另一类以室内液化试验研究和地震剪应力分析为基础,简称为“分析评定法”。本文讨论的方法是这两者的综合。

关于砂土震动液化势的评定问题,国内外学者发表了很多文章〔1〕—〔6〕,但他们在用现场资料建立经验判别准则时,一般仅将地震现场情况分为液化和未液化两种,未区分液化的严重程度,因而确定液化与未液化的界限时遇到了一些困难。日本学者时松孝次根据地震现场的迹象将液化势分为严重液化、中等液化、临界情况和未液化四类〔7〕。每一类都具有具体的精确的规定,这无疑是前进了一步。但是我们认真地分析一下砂土震动液化势的本质,就不难发现它带有“界限不分明”的、“亦此亦彼”的模糊性。时松孝次虽然将前人评价砂土震动液化势的二值逻辑扩大了,但还没有把砂土震动液化势引入到连续逻辑上来,也就是说没有对这个模糊概念作模糊处理。为此,本文拟利用模糊数学对砂土震动液化势进行评价,以解决上述问题的不足之处。

\* 为本所八三级研究生。

## 一、时松孝次的工作简介

### 1. 关于细颗粒含量的说明

1975年海城地震中,发现含有一定数量颗粒的轻亚粘土也能发生液化。此后不久,国外开始研究“含细颗粒的砂性土”。时松孝次将粒径小于0.074mm的颗粒称为细颗粒,用它作为判别液化的指标。小于0.074mm的颗粒包含粘土颗粒、粉土颗粒和一部分粉砂颗粒。

### 2. 现场砂土震动液化势分级

时松孝次将现场砂土震动液化势分为四类,如表1。

表 1

液 化 势	现 场 迹 象	表 示 符 号
严重液化	除喷砂以外,地面沉陷大于砂层厚度的2%,或者重型结构沉陷超过20厘米	●
中等液化	除喷砂以外,地面沉陷小于砂层厚度的2%,或者重型结构沉陷小于20厘米	■
临界情况	液化区和未液化区的边缘地带	△
未液化	既无喷砂,又未发现沉陷	○

### 3. 关于震级的影响的考虑

时松孝次用应力比表示地震强度和土层理深的影响,由下式估计地震产生的剪应力

$$\frac{\tau_d}{\sigma_0^i} = 0.1(M-1) \frac{\alpha_{max}}{g} \cdot \frac{\sigma_0}{\sigma_0^i} (1 - 0.015Z) \quad (1)$$

式中,  $\tau_d$  为地震产生的等效剪应力;  $M$  为震级;  $\alpha_{max}$  为地面运动加速度;  $g$  为重力加速度;  $\sigma_0$  为竖向总压力( $\text{kg}/\text{cm}^2$ );  $\sigma_0^i$  为竖向有效压力( $\text{kg}/\text{cm}^2$ );  $Z$  为临界深度。

(1)式中的  $\sigma_0$  和  $\sigma_0^i$  可用下式计算

$$\sigma_0 = Z \cdot \gamma \quad (2)$$

$$\sigma_0^i = (Z-h) \gamma' + h\gamma \quad (3)$$

其中,  $\gamma$  为地下水位以上土的天然容量(取  $1.9\text{T}/\text{m}^3$ );  $\gamma'$  为地下水位以下土的浮容重(取  $0.9\text{T}/\text{m}^3$ );  $h$  为地下水位深度。

时松孝次将不同震级的地震作用,用均匀的正弦波代替,正弦波的震动次数为15次,振幅为  $\gamma n \alpha_{max}$ 。根据对实际地震的分析,可得  $\gamma n = 0.1(M-1)$ 。所用的修正标准贯入击数的关系为

$$N_1 = C_N N = \frac{1.7}{\sigma_0^i + 0.7} N \quad (4)$$

$$\text{其中, } C_N = \frac{1.7}{\sigma_0^i + 0.7}。$$

### 4. 室内试验结果

用  $\tau_d/\sigma_0^i - N_1$  关系建立经验判别标准时,经常遇到的困难是高烈度地区的资料少,深层液化的资料少或不可靠。因此,在图上的分界线(特别是上部)就难以确定。克服这一困难的方法是进行室内模拟试验。时松孝次用现场冻结方法取得了可靠的结果。

5. 关于经验判别式

时松孝次提供的液化资料和分界线已经绘出判别图。分界线方程为

$$\frac{\tau_d}{\sigma'_0} = a Cr \left[ -\frac{16\sqrt{Na}}{100} + \left( \frac{16\sqrt{Na}}{Cs} \right)^2 \right] \quad (5)$$

式中  $a=0.45$ ;  $Cr=0.57$ ;  $n=14$ ;  $Cs$  取决于剪应变, 其值列于表 2;  $Na$  为调整的标准贯入击数值,  $Na = N_1 + \Delta N_f$ 。  $\Delta N_f$  随细颗粒含量而变化, 如表 3 所示。

Cs 值		表 2	ΔNf 值		表 3
剪应变 (%)		Cs	细颗粒含量 (FC) %		ΔNf
2		88	0—5		0
5		81	5—10		直线内插
10		75	10—		0.1Fc + 4
25		60			

注: Fc—Fine Content

## 二、本文所用方法的原理

许多砂土震动液化的实例说明, 细颗粒含量对液化势有一定的影响。但由于国内检验样本大都缺乏细粒部分的粒度分析指标, 而且我国的筛分标准和某些国家不尽相同 (我国不采用 0.074mm 孔径的筛子)。所以, 本文不用粒径这一指标。而仅采用时松孝次所提出应力比 ( $\frac{\tau_d}{\sigma'_0}$ ) 和修正的标准贯入击数 ( $N_1$ ) 公式 (1) 和 (4) 所计算出的  $\frac{\tau_d}{\sigma'_0}$  和  $N_1$  来建立他们和液化势之间的模糊关系。用此模糊关系可以预测未来地区在震后的砂土液化势。

考虑应力比 ( $\frac{\tau_d}{\sigma'_0}$ )、修正标准贯入击数 ( $N_1$ ) 及砂土震动液化势之间的关系, 一共有三个论域

$$\begin{aligned} U &\triangleq \{u_1, u_2, \dots, u_8\}; \\ V &\triangleq \{v_1, v_2, \dots, v_5\}; \\ W &\triangleq \{w_1, w_2, w_3, w_4\}. \end{aligned}$$

U——应力比 ( $\frac{\tau_d}{\sigma'_0}$ ) 论域, 取其常见值 (0.051—0.450), 将其分为 8 档, 步距为 0.05;

V——修正标准贯入击数 ( $N_1$ ) 论域, 取其常见值 (1—45), 将其分为 5 档, 步距为 9;

W——砂土震动液化势论域,  $w_1, w_2, w_3$  和  $w_4$  依次代表未液化 (○)、临界情况 (Δ)、中等液化 (■) 和严重液化 (●)。排列的方式见表 4。

现在的问题就是如何根据砂土震动液化势的历史资料来建立  $u, v, w$  三者之间的模糊关系。

这里, 我们对任一液化势等级的  $u, v$  两指标采用下述的分配方法

$$\Delta_1 = \overline{u}_{i+1} - \overline{u}_i; \quad \Delta_2 = \overline{v}_{j+1} - \overline{v}_j;$$

式中,  $\overline{u}_i, \overline{v}_j$  分别为  $u_i, v_j$  的平均值。

$$Q_{i,j}^{(wx)} = \left(1 - \frac{|u - \bar{u}_i|}{\Delta_1}\right) \cdot \left(1 - \frac{|v - \bar{v}_j|}{\Delta_2}\right) \quad (6)$$

i) 当  $u < \bar{u}_i, v < \bar{v}_j$  时,

$$Q_{i-1,j}^{(wx)} = Q_{i,j-1}^{(wx)} = \frac{\bar{u}_i - u}{\Delta_1} \cdot \frac{\bar{v}_j - v}{\Delta_2} \quad (7)$$

ii) 当  $u < \bar{u}_i, v > \bar{v}_j$  时,

$$Q_{i-1,j}^{(wx)} = Q_{i,j+1}^{(wx)} = \frac{\bar{u}_i - u}{\Delta_1} \cdot \frac{v - \bar{v}_j}{\Delta_2} \quad (8)$$

iii) 当  $u > \bar{u}_i, v < \bar{v}_j$  时,

$$Q_{i,j-1}^{(wx)} = Q_{i+1,j}^{(wx)} = \frac{u - \bar{u}_i}{\Delta_1} \cdot \frac{\bar{v}_j - v}{\Delta_2} \quad (9)$$

iv) 当  $u > \bar{u}_i, v > \bar{v}_j$  时,

$$Q_{i,j+1}^{(wx)} = Q_{i+1,j}^{(wx)} = \frac{u - \bar{u}_i}{\Delta_1} \cdot \frac{v - \bar{v}_j}{\Delta_2} \quad (10)$$

式中,  $(W_x)$  代表任一液化等级。

以上原始信息  $Q^{(wx)}$  展布的位置, 我们可用一张图来示意 (见图 1)。

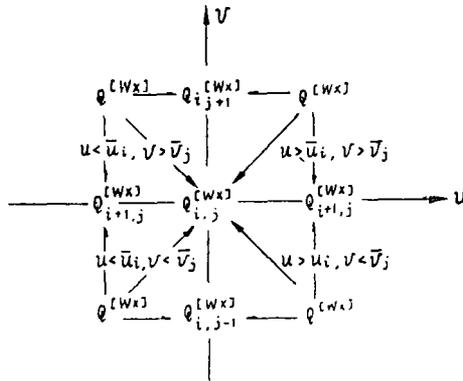


图 1 信息  $Q^{(wx)}$  的展布位置图

向着箭头的元素为接收信息元素, 背着箭头的元素

Fig. 1 The distributions of information  $Q^{(wx)}$

该方法表明: 任一液化势等级下的原始信息  $u, v$  是否属于某个基础变量  $u_i \in U, v_j \in V$ 。如果  $u, v$  分别等于  $\bar{u}_i, \bar{v}_j$ , 那就是说该  $u, v$  是基础变量  $u_i, v_j$  的正式成员, 否则, 就不完全是  $u_i, v_j$  的正式成员, 这就带上了模糊性。

如果  $u, v$  隶属于  $u_i, v_j$  (即在  $u_i, v_j$  的范围内), 但还偏离其平均值  $\bar{u}, \bar{v}$ , 那么它们不但在矩阵元素  $Q_{ij}$  里提供它存在的信息, 而且在相邻元素  $Q_{i,j-1}, Q_{i,j+1}, Q_{i-1,j}$  和  $Q_{i+1,j}$  里的任二个也能分配到一部分信息, 具体到相邻元素 (上、下、左、右) 哪两个能分配到一部分信息, 关键是根据  $u, v$  和  $\bar{u}_i, \bar{v}_j$  的大小来决定 (如公式 (7) — (10) 及图 1)。

下面举例说明。

假设有一个原始数据  $\frac{\tau_d}{\sigma_1} = 0.202$ ,  $N_1 = 11.4$ , 液化势为临界情况 ( $\Delta$ ), 现在把它如何分配到Q矩阵上去呢?

现已知  $u = 0.022$ ,  $u = 11.4$ , 查表4知,  $u$  隶属于基础变量  $u_4$  (0.2010—0.2500),  $v$  隶属于基础变量  $v_2$  (9.1—18.0)。

应用公式(6)得

$$Q_{4;2}^{[w_2]} = \left( \frac{1 - |0.202 - 0.2255|}{0.05} \right) \cdot \left( \frac{|11.4 - 13.55|}{9.0} \right) = 0.403$$

又因为  $u < \bar{u}_4$ ,  $v < \bar{v}_2$ ,

所以应用公式(7)得:

$$Q_{3;2}^{[w_2]} = Q_{4;1}^{[w_2]} = \frac{0.2255 - 0.202}{0.05} \cdot \frac{13.55 - 11.4}{9.0} \approx 0.112.$$

仿照上例将时松孝次收集的100个原始数据分配到矩阵Q上去。

对于矩阵Q的边际分布可能有一部分信息损失掉(如图2)。对此,我们要作收边处理,将越出边界的信息收回。即把越出边界的信息加到边界内与其最近的一个元素上。

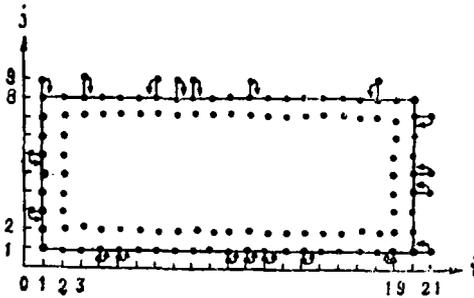


图2 收边示意图

Fig. 2 The sketch map of taking back informations

采用下列公式:

i) 对左边际:

$$Q_{1;j}^{[w_1]^*} = Q_{1;j}^{[w_1]} + Q_{0;j}^{[w_1]} \quad (j = 1, \dots, 8) \quad (11)$$

ii) 对右边际:

$$Q_{20;j}^{[w_4]^*} = Q_{20;j}^{[w_4]} \times Q_{21;j}^{[w_4]} \quad (j = 1, \dots, 8) \quad (12)$$

iii) 对上边际:

$$Q_{i;8}^{[wx]^*} = Q_{i;8}^{[wx]} + Q_{i;9}^{[wx]} \quad (i = 1, \dots, 20) \quad (13)$$

iv) 对下边际:



$$Q_{i;j}^{[wx]^*} = Q_{i;j}^{[wx]} + Q_{i;0}^{[wx]} \quad (i = 1, \dots, 20) \quad (14)$$

$Q_{i;j}^{[wx]^*}$  为收边后的Q矩阵的边际分布元素。

将整个矩阵Q进行收边处理后就得到总的信息分布图(表4)。再沿纵、横方向分别作正规化处理(即用每行、列最大值遍除该行、列的元素值)。对行、列正规化后所得的两个矩阵再作对应元素的取小运算,最后得正规化后的矩阵R(如表5)。

然后按模糊近似推断公式  $W = A \circ R$  (15) 来验证45个历史液化资料。

(15)式中符号“ $\circ$ ”为组合运算,采取模型 $M(\Lambda, V)$ ;  $W$ ——被判定的液化势;  $R$ 为模糊关系(表5);  $A$ 为判定形式,由于 $u, v$ 都是确切的数值,所以我们建议 $A$ 取如下形式:

$$A = \dots + \frac{0}{u_{i-1}} + \frac{1}{u_i} + \frac{0}{u_{i+1}} + \dots$$

爱尔森特罗的索法塔河1940年的7级地震时,出现了砂土液化现象。按公式(1)、

(4)计算的  $\frac{\tau_d}{\sigma'_0} = 0.226, N_1 = 1.2$ , 对此我们来验证该地点的液化情况。

因为 $u = 0.226$ , 查表4知 $u$ 在 $u_4$ 档里, 所以,  $A = [0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0]$ 。利用表5作为 $R$ , 由于 $R$ 太繁琐, 在此将 $R$ 简写, 按公式(15)得:

$$W = [0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0] \circ \begin{pmatrix} r_{1.1}, r_{1.2}, \dots, r_{1.20} \\ r_{2.1}, r_{2.2}, \dots, r_{2.20} \\ \dots \\ r_{8.1}, r_{8.2}, \dots, r_{8.20} \end{pmatrix}$$

$$= [ \underbrace{b_1, \dots, b_5}_{W_1}, \underbrace{b_6, \dots, b_{10}}_{W_2}, \underbrace{b_{11}, \dots, b_{15}}_{W_3}, \underbrace{b_{16}, \dots, b_{20}}_{W_4} ]$$

因为 $N_1 = 1.2, N_1 \in v_1$ 档里  
只取效元素  $\rightarrow [b_1, b_6, b_{11}, b_{16}] = [0, 0.069, 0.140, 1.000]$

归一化  $\rightarrow [0, 0.057, 0.116, 0.827] \rightarrow \frac{0}{\text{未液化}} + \frac{0.057}{\text{临界情况}} + \frac{0.116}{\text{中等液化}} + \frac{0.827}{\text{严重液化}}$

由此结果可以看到:未液化的可能性为0(根本不会不液化);临界情况的可能性为0.057(该情况几乎不会有);中等液化的可能性为0.116(该情况发生的可能性甚小);严重液化的可能性为0.827(发生严重液化的可能性极大)。

此结果和实际情况相符,预测成功。

按上例的预测方法对45个历史液化资料(附表2)进行了验证,结果成功率达82%,令人满意。

### 三、结论与建议

1. 本文所提方法的优点是将砂土震动液化势引入到连续逻辑上来,同时吸收了“经验评定法”和“分析评定法”两方面的优点。

2. 从45个历史液化资料的验证结果来看, 成功率达82%, 这对于非母体样本判别来说, 能达到如此的程度, 是相当理想的。实用时, 可直接利用表5的模糊关系R。这就为预测未来砂土震动液化势提供了一种手段。

3. 本文所引用的应力比 ( $\frac{\tau_d}{\sigma'_v}$ ) 和修正标贯击数  $N_{1s}$ , 事实上考虑到了几乎所有影响饱和砂土液化的因素: 如砂土本身的动强度、埋深、地下水位和地震强度等, 特别是考虑了震级。因为砂土的液化与否和振动次数关系极大, 而振动次数又和震级直接有关。所以从液化机制本身来说, 本文提供的方法也尽量考虑到了影响液化的各主要因素。

4. 本文提供的方法应用比较方便。采用的预测形式, 实质上是查表5, 再归一化, 从而得到每个液化等级的可能性大小。建议在修改未来规范时, 能参考这种方法。

本文是在孙崇绍导师的热情指导下完成的, 阮爱国同学作了制附表工作, 在此一并表示衷心感谢。

(本文1985年1月10日收到)

### 参 考 文 献

- [ 1 ] H.B.Seed, I. Arango and C.K. Chan, Evaluation of soil liquefaction potential during Earthquake, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkaly Report No. EERC75—28, 1975.
- [ 2 ] J.T.Christian and W.F.Swiger, Statistics of liquefaction and SPT results, Journal of the Geotechnical Engineerig Division, ASCE, Vol. 101, No.GT 11, 1975.
- [ 3 ] 谷本喜一, Prediction of liqefaction occurrence of sandy deposits during earthquakes by a statistical method, Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers, No.256, 1976.
- [ 3 ] 郁寿松、石兆吉, 水平土层液化势的判别分析, 地震工程与工程振动, 试刊 1 期, 1980。
- [ 5 ] 石兆吉, 郁寿松, 轻亚粘土液化特性及现场判别, 水文地质工程地质, №3, 1982.
- [ 6 ] 顾卫华、王余庆, 用逐步判别建立二次型非线性地震液化势公式的探讨, 水文地质工程地质, №3, 1982.
- [ 7 ] 时松孝次, Empirical correlation of soil liquefaction based on SPT N-Value and fines content, Soils and Foundation, Vol.23, №.4, 1983.
- [ 8 ] 刘贞荣、黄崇福, 关于《震中烈度与震级关系的模糊识别》一文的讨论, 地震工程与工程振动№2, 1984.

### 附 录

- 1. 时松孝次收集的100个历史地震液化势资料(见附表1)。
- 2. 本文作者收集的45个历史地震液化势资料(见附表2)。

附表1

序号	地震	震级 M	调查地点	日期	地下水位 (m)	临界深度 (m)	竖向总 压力 $\sigma_0$ (kgf/ cm <sup>2</sup> )	竖向有 效压力 $\sigma'_{10}$	标贯击数 N	修正 标贯击 数 $N_1$	最大速 度面 amax /g	应力比		现场 液化等 级
												$\frac{\tau_d}{\sigma'_{10}}$	$\frac{\tau_d}{\sigma'_{10}}$	
1	浓尾	7.9	Ogaki	(10/28/1891)	0.8	10	1.90	0.95	20	20.2	0.32	0.366	●	
2	浓尾	7.9	Ginan	(10/28/1891)	2.0	7	1.33	0.83	10	11.1	0.32	0.317	●	
8	浓尾	7.9	Unuma	(10/28/1891)	1.9	6	1.14	0.73	17	20.2	0.28	0.275	●	
4	浓尾	7.9	Ogase	(10/28/1891)	2.4	5	0.95	0.69	13	15.9	0.28	0.246	●	
5	关东	7.9	Arakawa 7	(09/01/1923)	4	7	1.25	0.95	10	10.3	0.20	0.163	■	
6	关东	7.9	Arakawa 7	(09/01/1923)	4	8	1.44	1.04	1	1.0	0.20	0.168	■	
7	关东	7.9	Arakawa 12	(09/01/1923)	4	4.3	0.73	0.71	2.2	2.7	0.20	0.130	■	
8	关东	7.9	Arakawa 21	(09/01/1923)	1	8	1.52	0.82	16.5	18.5	0.20	0.225	●	
9	关东	7.9	Arakawa 30	(09/01/1923)	1	5	0.95	0.65	11.9	15.0	0.20	0.180	●	
10	关东	7.9	Arakawa 49	(09/01/1923)	3	5	0.95	0.75	5.7	6.7	0.20	0.162	△	
11	关东	7.9	Arakawa 49	(09/01/1920)	3	8	1.52	1.02	2.0	2.0	0.20	0.181	△	
12	东南海	8.0	Knmei	(12/07/1944)	2.0	5	0.91	0.61	8	10.4	0.20	0.193	●	
13	东南海	8.0	Meiko	(12/07/1944)	0.5	3.5	0.66	0.36	1	1.6	0.20	0.243	●	
14	东南海	8.0	Ienaga	(12/07/1944)	2.5	3	0.51	0.46	2	2.9	0.20	0.148	●	
15	东南海	8.0	Ginan	(12/07/1944)	2.0	7	1.33	0.83	10	11.1	0.16	0.161	●	
16	福井	7.3	Takaya 2	(06/28/1948)	0.8	4	0.68	0.36	7	11.2	0.35	0.392	○	
17	福井	7.3	Takaya 2	(06/28/1948)	0.8	8	1.44	0.72	29	34.7	0.35	0.388	○	
18	福井	7.3	Takaya 45	(06/28/1948)	3.7	7	1.26	0.93	19	19.8	0.35	0.267	●	
19	福井	7.3	Shonenji	(06/28/1948)	1.2	4	0.76	0.48	8	11.5	0.40	0.375	●	
20	福井	7.3	Agri union	(06/28/1948)	0.9	6	1.02	0.52	8	11.1	0.40	0.450	△	
21	福井	7.3	Agri union	(06/28/1948)	0.9	7.5	1.31	0.65	20	25.2	0.40	0.451	△	
22	新潟	7.3	Niigata	(06/16/1964)	1.0	7	1.33	0.73	8	9.8	0.16	0.170	●	
23	新潟	7.5		(06/16/1964)	1.0	7	1.33	0.73	12	14.2	0.16	0.170	△	
24	新潟	7.5		(06/16/1964)	2.0	7	1.91	0.81	18	20.3	0.16	0.151	○	
25	新潟	7.5		(06/16/1964)	1.0	10	1.90	1.00	10	10.0	0.16	0.168	●	
26	新潟	7.5		(06/16/1964)	1.0	10	1.90	1.00	16	16.0	0.16	0.168	△	
27	新潟	7.5		(06/16/1964)	2.0	10	1.88	1.08	20	19.1	0.16	0.154	○	
28	新潟	7.5	showaBr 2	(06/16/1964)	0.0	4.3	9.82	0.39	4	6.2	0.16	0.205	●	
29	新潟	7.5	showaBr 4	(06/16/1964)	1.3	6	1.14	0.67	27	33.5	0.16	0.161	○	
30	新潟	7.5	Road site	(06/16/1964)	2.5	6	0.95	0.70	12	14.6	0.16	0.128	○	
31	新潟	7.5	River site	(06/16/1964)	0.6	4.5	0.86	0.47	6	8.7	0.16	0.177	●	

续表 1

序号	地震	震级 M	调查地点	日期	地下水位 (m)	临界深度 (m)	竖向总压力 $\sigma_0$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	竖向有效压力 $\sigma_1^0$	标贯击数 N	修正标贯 N <sub>1</sub>	最大加速度 地面 $a_{max}$ /g	应力比 $\frac{rd}{\sigma_1^0}$	现场液化等级
32	十胜近海	7.9	Nanaehama	05/16/1968	1.0	4	0.76	0.46	5	7.5	0.20	0.214	●
33	十胜近海	7.9	Hachinobe2	05/16/1968	2.0	6	1.14	0.74	28	33.1	0.23	0.222	○
34	十胜近海	7.9	Hachinobe3	05/16/1968	0.6	4	0.76	0.42	6	9.1	0.23	0.270	●
35	十胜近海	7.9	Hachinobe4	05/16/1968	1.0	4	0.76	0.46	16	23.4	0.23	0.266	○
36	宫城	6.7	Arahama	02/20/1978	1.0	6.3	1.21	0.68	10	12.3	0.10	0.092	○
37	宫城	6.7	Nakamura4	02/20/1978	0.5	3.3	0.63	0.35	5	8.3	0.12	0.117	■
38	宫城	6.7	Nakamura5	02/20/1978	1.3	3.3	0.63	0.42	7	10.6	0.12	0.098	○
39	宫城	6.7	Yuriageka 1	02/20/1978	1.8	5.3	0.95	0.60	2	2.6	0.12	0.100	○
40	宫城	6.7	Yuriageka 2	02/20/1978	0.9	4.3	0.82	0.48	11	15.3	0.12	0.109	○
41	宫城	6.7	YuriogeBr 1	02/20/1978	1.7	4.3	0.82	0.56	4	5.4	0.12	0.094	○
42	宫城	6.7	YuriogeBr 2	02/20/1978	1.3	3.3	0.63	0.42	13	19.7	0.12	0.098	○
43	宫城	6.7	YuriogeBr 3	02/20/1978	0.3	4.3	0.82	0.42	9	15.7	0.12	0.125	○
44	宫城	6.7	Oiiri 1	02/20/1978	4.3	6.3	1.05	0.85	9	9.9	0.14	0.089	○
45	宫城	6.7	Oiiri 2	02/20/1978	2.4	6.3	1.11	0.72	8	9.6	0.14	0.112	○
46	宫城	6.7	kicawabu 2	02/20/1978	3.0	3.3	0.61	0.58	11	14.6	0.14	0.080	○
47	宫城	6.7	Shiomi6	02/20/1978	2.5	4	0.76	0.61	6	7.3	0.14	0.093	○
48	宫城	6.7	Hiyori18	02/20/1978	2.5	5	0.95	0.70	9	10.3	0.14	0.100	○
49	宫城	6.7	Nakajima18	02/20/1978	2.5	6	1.14	0.79	12	13.7	0.14	0.105	○
50	宫城	6.7	Ishiomaki12	02/20/1978	1.4	4	0.76	0.50	4	5.7	0.12	0.098	○
51	宫城	7.4	Arahama	06/12/1978	1.0	6.3	1.21	0.68	10	12.3	0.20	0.206	●
52	宫城	7.4	Nakamuara 1	06/12/1978	0.9	3.3	0.63	0.39	19	29.6	0.32	0.314	○
53	宫城	7.4	Nakamuara 4	06/12/1978	0.5	3.3	0.63	0.35	5	8.1	0.32	0.350	●
54	宫城	7.4	Nakamuara 5	06/12/1978	1.3	3.3	0.63	0.42	7	10.6	0.32	0.292	■
55	宫城	7.4	YuriageBr 1	06/12/1978	1.8	5.3	0.95	0.60	2	2.9	0.24	0.224	●
56	宫城	7.4	Yuriageka 2	06/12/1978	0.9	4.3	0.82	0.80	11	25.3	0.24	0.245	■
57	宫城	7.4	Yuriageka 3	06/12/1978	2.2	5.3	0.99	0.68	20	24.6	0.24	0.206	○
58	宫城	7.4	Yuriageka 1	06/12/1978	1.7	4.3	0.82	0.56	4	5.4	0.24	0.210	■
59	宫城	7.4	YuriageBr 2	06/12/1978	1.3	3.3	0.63	0.42	13	19.7	0.24	0.219	●
60	宫城	7.4	YuriageBr 3	06/12/1978	0.3	4.3	0.82	0.42	8	12.1	0.24	0.281	■
61	宫城	7.4	YuriageBr 5	06/12/1978	1.3	7.3	1.39	0.79	17	19.1	0.24	0.241	○
62	宫城	7.4	oiiri 1	06/12/1978	4.3	6.3	1.05	0.85	9	9.9	0.24	0.172	■



续表 1

序号	地震	震级 M	调查地点	日期	地下水位 (m)	临界深度 (m)	竖向总压力 $\sigma_0$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	竖向有效压力 $\sigma_0^1$	标贯击数 N	修正标贯标数 N <sup>1</sup>	最大加速度 $\alpha_{max}$ /g	应力比 $\frac{\tau_d}{\sigma_0^1}$	现场液化等级
94	唐山	7.8	Lutai51	(07/28/1976)	0.5	11	2.2	1.3		7	0.20	0.192	■
95	唐山	7.8	Lutai52	(07/28/1976)	0.5	11	2.2	1.3		8	0.20	0.192	△
96	英皮里厄耳谷	6.6	HoberRd 1	(10/15/1979)	1.8	4	0.74	0.52	32	43.2	0.60	0.449	○
97	英皮里厄耳谷	6.6	HoberRd 4	(10/15/1979)	1.8	4	0.74	0.52	4	5.6	0.60	0.449	●
98	英皮里厄耳谷	6.6	HoberRd 7	(10/15/1979)	1.8	4	0.74	0.52	11	15.3	0.60	0.499	■
99	英皮里厄耳谷	6.6	River Park 6	(10/15/1979)	0.2	2	0.38	0.20	8	5.7	0.20	0.206	●
100	英皮里厄耳谷	9.6	River park 6	(10/15/1979)	0.2	5	0.95	0.47	7	10.1	0.20	0.209	■

注：○—未液化；△—临界情况；■—中等液化；●—严重液化

附表 2

序号	地震	调查地点	日期	震级	震中距 (km)	地下水位 (m)	临界深度 (m)	标贯击数 N	修正标贯标数 N <sup>1</sup>	最大加速度 $\alpha_{max}$ /g	竖向总压力 $\sigma_0$	竖向有效压力 $\sigma_0^1$	应力比 $\frac{\tau_d}{\sigma_0^1}$	现场液化与否
1	新潟	新潟	1820	6.6	39	1	6	6	7.6	0.12	1.14	0.64	0.109	未液化
2	新潟	新潟	1820	6.6	39	1	6	12	15.2	0.12	1.14	0.64	0.109	未液化
3	新潟	新潟	1887	6.1	47	1	6	6	7.6	0.08	1.14	0.64	0.066	未液化
4	新潟	新潟	1887	6.1	47	1	6	12	15.2	0.08	1.14	0.64	0.066	未液化
5	浓尾	鹤沼	1891	8.4	32	2	7.5	19	20.4	0.35	1.43	0.88	0.374	未液化
6	福井	高野	1948	7.2	6	1	7	28	33.3	0.30	1.33	0.73	0.303	未液化
7	智利	蒙得港	1960	8.4	113	3.5	6	18	19.2	0.15	1.14	0.89	0.129	未液化
8	智利	考生波	1960	8.4	113	3.5	7	10	10.1	0.15	1.33	0.98	0.135	未液化
9	智利	胡捷帕托	1960	8.4	113	3.5	8	35	33.6	0.15	1.52	1.07	0.139	未液化
10	阿拉斯加	石英河	1964	7.5	113	0	7.5	35	43.1	0.12	1.43	0.68	0.163	未液化
11	十胜近海	八户	1968	7.8	173	1	3.5	14	21.3	0.21	0.67	0.42	0.216	未液化
12	十胜近海	八户	1968	7.8	172	1.5	8	15	22.8	0.21	0.57	0.42	0.185	未液化
13	十胜近海	八户	1968	7.8	172	1.5	3.5	18	26.2	0.21	0.67	0.47	0.193	未液化
14	智利	胡捷帕托	1960	8.4		3.0	9	35	32.9	0.25	1.71	1.11	0.247	未液化
15	智利	胡捷帕托	1960	8.4		3.0	22.5	35	19.6	0.25	4.28	2.33	0.225	未液化
16	海城	双台河拦河闸	1975	7.3		1	8	15	16.8	0.075	1.52	0.82	0.077	未液化
71	海城	双台河拦河闸	1975	7.3		1	12	20	18.1	0.075	2.28	1.28	0.075	未液化
18	海城	双台河二道桥闸	1975	7.3		2	6	9.5	11.2	0.075	1.14	0.74	0.066	未液化

续表 2

序号	地震	调查地点	日期	震级	震中距 (km)	地下水位 (m)	临界深度 (m)	标贯击数 N	修正击数 $N_1$	最大面加速度 $\alpha_{max}/g$	竖向总压 $\sigma_0$	竖向有效压力 $\sigma_0^1$	应力比 $\frac{\tau_d}{\sigma_0^1}$	现场液化与否
19	海城	双台河二道桥闸	1975	7.3		2	12	15.5	13.3	0.075	2.28	1.28	0.069	未液化
20	海城	胜利塔	1975	7.3		2	13	14.5	11.9	0.075	2.47	1.37	0.069	未液化
21	浓尾	大小恒	1891	8.4	32	1	5	4	5.44	0.35	0.95	0.55	0.414	液化
22	浓尾	金安西	1891	8.4	32	2	9	10	9.94	0.35	1.71	1.01	0.379	液化
23	浓尾	奥顿斯湖	1891	8.4	32	2.5	4	10	13.0	0.35	0.76	0.61	0.303	液化
24	圣巴巴拉	谢菲尔德坝	1925	6.3	32	4.5	7.5	3	2.9	0.20	1.43	1.13	0.119	液化
25	爱尔森特罗	布劳利	1940	7.0	8	4.5	4.5	9	9.8	0.25	0.86	0.86	0.140	液化
26	爱尔森特罗	金美运河	1940	7.0	8	6	7.5	4	7.7	0.25	1.43	1.28	0.149	液化
27	爱尔森特罗	索法塔拉运河	1940	7.0	8	1.5	6	1	1.2	0.25	1.14	0.69	0.226	液化
28	福井	高野	1948	7.2	6	3.5	4	12	14.4	0.30	0.76	0.71	0.187	液化
29	福井	索奈吉期	1948	7.2	6	1	3	3	4.8	0.30	0.57	0.37	0.274	液化
30	福井	农业协会	1948	7.2	6	1	6	5	6.3	0.30	1.14	0.64	0.301	液化
31	智利	蒙德港	1960	8.4	113	3.5	4.5	6	6.9	0.15	0.86	0.76	0.117	液化
32	智利	蒙德港	1960	8.4	113	3.5	4.5	8	9.3	0.15	0.86	0.76	0.177	液化
33	新泻	新泻	1964	7.5	52	1	6.0	6	7.6	0.16	1.14	0.64	0.169	液化
34	新泻	新泻	1964	7.5	52	1	7.5	8.0	9.2	0.16	1.43	0.78	0.169	液化
35	新泻	新泻	1964	7.5	52	1	6.0	7	8.9	0.16	1.14	0.64	0.169	液化
36	阿拉斯加	雪河	1964	8.3	97	0	6	5	6.3	0.15	1.14	0.54	0.210	液化
37	十胜近海	八户	1968	7.8	172	1	3.5	6	9.7	0.21	0.67	0.42	0.216	液化
38	十胜近海	函馆	1968	7.8	283	1	4.5	6	8.4	0.18	0.86	0.51	0.192	液化
39	加拉加斯	卡拉巴利达	1967	6.3	56	1	1	3	5.7	0.13	0.19	0.19	0.068	液化
40	圣费尔南多	SFO少年宫	1971	6.6	8	4.7	6.1	2	1.8	0.40	1.16	1.02	0.231	液化
41	圣费尔南多	詹森电厂	1971	6.6	8	16.8	16.8	24	10.5	0.35	3.19	3.19	0.147	液化
42	十胜近海	八户	1968	7.8	172	1.5	3.5	6	8.7	0.21	0.67	0.47	0.193	液化
43	唐山	吕家坨矿	1976	7.8	25	1	7.0	4	4.8	0.30	1.33	0.73	0.333	液液
44	海城	水源公社	1975	7.3		2.0	10.0	9	8.5	0.15	1.90	1.10	0.193	液化
45	海城	营口大闸	1975	7.3		2.0	10.3	9	8.4	0.15	1.96	1.13	0.139	液化

注： $\sigma_0$ 、 $\sigma_0^1$ 、 $N_1$ 和 $\tau_d/\sigma_0^1$ 都是按时松孝次的公式计算的。

FUZZY MATHEMATICAL METHOD IN EVALUATION OF SAND AND SOIL  
VIBRATING LIQUEFACTION POTENTIAL

Wang Jiading

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

Abstract

In this paper, the quantitative research of sand and soil vibrating liquefaction potential is made with 2-dimensional information distribution concept and the formula of fuzzy approximate inference. Based on the data of sand and soil vibrating liquefaction potential collected by Japanese scholars, Kohji Tokimasu and Yoshiaki Yoshimi, at one hundred places all over the world, fuzzy relation (R) has been established among stress ratio ( $\frac{\tau_d}{\sigma'_0}$ ), normalized standard penetration test ( $N_1$ ) and sand and soil vibrating liquefaction potential. The data the author collected on 45 historical liquefaction spots are verified with this method and the results show that the rate of success accounts for 82 per cent of the total.