

砂土地震液化模糊综合评判实用方法

翁焕学

(江苏省水利勘测设计院勘测总队, 扬州225002)

一、前言

饱和砂土地震液化判别是工程地质勘察的重要内容之一。现有评判方法很多, 其中多数是应用砂土的一、二项特征值来进行评判的^[1,2]。然而, 影响砂土地震液化的因素不仅很多, 不少因素及其互相作用关系是部份或大部份不清晰的, 或不确定的, 也就是说存在着模糊性。模糊事件宜用模糊数学来描述。因此, 本文在分析国内外数十例地震液化实例基础上, 应用模糊数学方法, 并从工程实用出发, 推得了以地震烈度定义的砂土抗液化强度等级实用计算式, 即可直接求出砂土的抗液临界烈度。依此可直观进行液化判别, 且评判精度高。

二、模糊综合评判数学模型

(一)建因素集

考虑到砂土地震液化最基本的制约因素是土的本身特性, 故根据国内外19个地区34例液化现场调查资料, 分别编绘了砂土的平均粒径(d_{50})、相对密度(D_r)、标准贯入击数($N_{63.5}$)和上覆有效压力(σ_v)的液化点例图, 如图1所示。图1中可见如下规律: f 线为液化点上限包络线, 它并非由定量统计获得, 但展示了土的特性指标愈大, 经受地震作用的能力愈强的制约关系, 且这种关系基本呈线性。为此, 选择上述特性指标为评判因素(u_i)。

设 U 为评判因素 u_i 所组成的集合, 则因素集有:

$$U = \{u_i\} = \{u_d \quad u_D \quad u_N \quad u_\sigma\} \quad (1)$$

式中 i 为参加评判的因素: $d = d_{50}$, $D = D_r$, $N = N_{63.5}$, $\sigma = \sigma_v$, (下同)。应用这些特性指标作为评判因素的另一个原因是它们可由常规测试和试验方法获得, 便于应用。

(二)做评价集

评价集 S 由各级地震烈度时的评价数量语言值 F_j 和参评地震烈度 K_j 合成获得。其中 F_j 取“液化”、“不液化”语句值; K_j 从工程意义出发取用6~11度。则有

$$S = \{S_j\} = \{F_j\} \{K_j\} \quad (j=6, 7, \dots, 11) \quad (2)$$

由于评价语言并非定量, 而地震烈度有文献[4]指出其划界也不全是清晰的, 故这是一个模

糊集。为便于作出明确判别, 定义

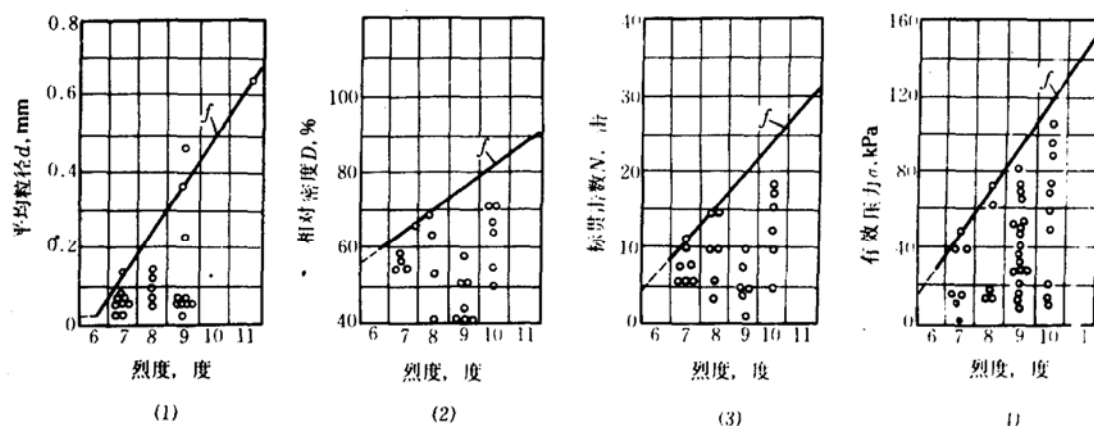


图1 砂土液化实例资料图

$$\left. \begin{array}{l} S_j \geq K \text{ (不液化)} \\ S_j < K \text{ (液化)} \end{array} \right\} \quad (3)$$

式中 K 为场地烈度; S_j 为砂土的抗液化能力等级, 由表1定名。表中取用地震烈度来定名是为了便于建立砂土抗液化能力与液化烈度之间直接关系。经上述处理, 则 $\underline{S}$ 可表示为

$$\underline{S} = \{S_j\} = \{S_6, S_7, \dots, S_{11}\} \quad (4)$$

表1

砂土抗液化等级及名称

等 级	S_6	S_7	S_8	S_9	S_{10}	S_{11}
名 称	抗6度砂 (6°砂)	抗7度砂 (7°砂)	抗8度砂 (8°砂)	抗9度砂 (9°砂)	抗10度砂 (10°砂)	抗11度砂 (11°砂)
定 义	$K \leq 6$ 度时 不液化	$K \leq 7$ 度时 不液化	$K \leq 8$ 度时 不液化	$K \leq 9$ 度时 不液化	$K \leq 10$ 度时 不液化	$K \leq 11$ 度时 不液化

(三) 建单因素评价矩阵

若设 R 为因素 u_i 对应于某一地震烈度时的液化可能性程度 r_{ij} , 则

$$\begin{aligned} & \text{(等级)} \quad "6" \quad "7" \quad \dots \quad "11" \\ R = \{r_{ij}\} &= \begin{pmatrix} r_{d6} & r_{d7} & \dots & r_{d11} \\ r_{D6} & r_{D7} & \dots & r_{D11} \\ r_{N6} & r_{N7} & \dots & r_{N11} \\ r_{\sigma 6} & r_{\sigma 7} & \dots & r_{\sigma 11} \end{pmatrix} = \sum (r_{i6} \quad r_{i7} \quad r_{i8} \quad \dots \quad r_{i11}) \end{aligned} \quad (5)$$

式中 r_{ij} 为隶属程度, 其值在 $[0, 1]$ 闭区间内。根据对液化实例资料拟合可知, 它为一正态型隶属函数, 即

$$r_{ij} = e^{-\frac{(u_i - a_{ij})^2}{b_{ij}^2}} \quad (i = d, D, N, \sigma; j = 6^\circ \sim 11^\circ) \quad (6)$$

式中 a_{ij} 和 b_{ij} 分别为因素 u_i 的均值和标准离差, 其值已列于表2。显然, R 和 r_{ij} 均为模糊集。当 r_{ij} 已定, 代入式(5)计算, 并按照最大隶属原则, 即可进行单因素评判。

表2 a_{ij} 和 b_{ij} 取值表

烈度 因素		6°	7°	8°	9°	10°	11°
平均粒径 (mm)	a	0.06	0.18	0.30	0.43	0.54	0.67
	b	0.12					
相对密度 (%)	a	61	67	73	78	84	90
	b	5.67					
标贯击数 (击)	a	9	14	18	22	26	30
	b	4.30					
有效压力 (kPa)	a	38	61	83	110	133	156
	b	23					

(四) 选权重分配集

由于各因素对液化的影响程度不同, 故设权重分配集

$$A=[a_i]=[a_d \ a_D \ a_N \ a_\sigma] \quad (7)$$

式中 a_i 为因素 u_i 的权数。为取得较高的评判精度, 本文进行了多种权重方案比选, 试算表明由各因素在单因素评判中获得的对应率(经归一化处理)作为权数, 效果较好。故选作权重分配集, 其值列于表3。由此得

表3 实例单因素评判对应率及权重

项目 \ 因素	平均粒径 (d)	相对密度 (D)	标贯击数 (N)	有效压力 (σ)
参加评判总样(个)	34	34	34	34
与实际对应数(个)	20	18	30	20
对应率(%)	58.8	52.9	88.2	58.9
权重(归一化后)	0.23	0.20	0.34	0.23

$$A=[a_i]=[0.23/d \ 0.20/D \ 0.34/N \ 0.23/\sigma] \quad (8)$$

其中, $\sum(a_i)=1$ 。

(五) 模糊综合评判

给定了 R 和 A , 则综合评判 B 为:

$$B=A \cdot R=[a_i] \cdot \{r_{ij}\} \quad (9)$$

式中 符号“ $\cdot$ ”表示某种运算关系。通常有三种方法, 经反复试算, 选用普通矩阵运算规则。因为, 这种运算方法可较多地保留主要信息, 有利于提高评判精度。由式(9)取

$$B=A \cdot R=[a_i] \cdot \{r_{ij}\} \quad (10)$$

$$= [a_d \ a_D \ a_N \ a_\sigma] \cdot \begin{pmatrix} r_{d6} & r_{d7} & \cdots & r_{d11} \\ r_{D6} & r_{D7} & \cdots & r_{D11} \\ r_{N6} & r_{N7} & \cdots & r_{N11} \\ r_{\sigma 6} & r_{\sigma 7} & \cdots & r_{\sigma 11} \end{pmatrix} = \sum (a_i \cdot r_{ij})$$

(等级) “6” “7” “11”

式(10)是砂土地震液化模糊综合评判式。计算结果按最大隶属原则,可确定砂土抗液化能力等级(即抗液化临界烈度,部份算例列于表4),并对照表1和式(3)即可进行液化判别。

三、实用方法推导及实例验证

为便于应用,在上述评判模型基础上进行化简。利用图1中 f 线的对应规律,取“降半梯形分布^[3]”隶属函数来代替式(6),则隶属函数图形如图2所示。相应的计算式为

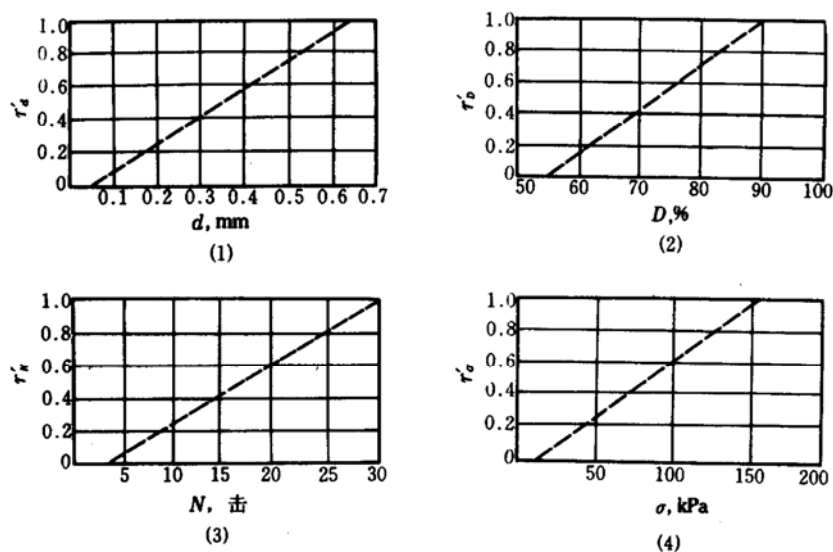


图2 隶属函数图形

$$\left. \begin{aligned}
 r'_d &= \begin{cases} 0 & (d \leq 0.05) \\ \frac{d-0.05}{0.65-0.05} & (0.05 < d \leq 0.65) \\ 0 & (d > 0.65) \end{cases} \\
 r'_b &= \begin{cases} 0 & (D \leq 55) \\ \frac{D-55}{90-55} & (55 < D \leq 90) \\ 1 & (D > 90) \end{cases} \\
 r'_N &= \begin{cases} 0 & (N \leq 3) \\ \frac{N-3}{30-3} & (3 < N \leq 30) \\ 1 & (N > 30) \end{cases} \\
 r'_\sigma &= \begin{cases} 0 & (\sigma \leq 10) \\ \frac{\sigma-10}{154-10} & (10 < \sigma \leq 154) \\ 1 & (\sigma > 154) \end{cases}
 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式(11)以 $\{r'_i\}$ 形式取代式(10)中的 $\{r_{ij}\}$ 。应说明的是,由于包络线 f 的划分界限并不完全确定,只在某一程度上体现隶属关系,故 $\{r'_i\}$ 也是一个模糊集。得

$$B = [a_i] \cdot \{r'_i\} = [a_d \quad a_D \quad a_N \quad a_\sigma] \cdot \begin{pmatrix} r'_d \\ r'_D \\ r'_N \\ r'_\sigma \end{pmatrix} \\ = \sum (a_i \cdot r'_i) \quad (12)$$

式(12)与式(10)有相同的评判效果,但较简便。

现再按式(12),绘制液化可能性综合隶属度与抗液化能力等级关系图(图3)。不难证明,图3中直线的方程为

$$S_k = S_m + B(S_n - S_m) \quad (13)$$

式中 S_m 为评价起始等级(以烈度表示,下同),取 $S_m=5$ 度; S_n 为最高评价等级,取 $S_n=11$ 度; B 由式(12)确定。均代入式(13)得

$$S_k = 5 + [\sum (a_i r'_i)] \cdot (11 - 5) \\ = 5 + 6(a_d r'_d + a_D r'_D + a_N r'_N + a_\sigma r'_\sigma) \quad (14)$$

又因为 a_i 有式(8), r'_i 有式(11),并当考虑 $\{r'_i\} \rightarrow [0]$ 和 $[1]$ 时,式(14)就有

$$S_k = 5 + 6 \left[\frac{0.23(d-0.05)}{0.65-0.05} + \frac{0.20(D-55)}{90-55} + \frac{0.34(N-3)}{30-3} + \frac{0.23(\sigma-10)}{154-10} \right] \quad (15)$$

经整理得

$$S_k = 2.66 + \frac{1}{100}(228d + 3D + 8N + \sigma) \quad (16)$$

式中计算单位采用 d mm, $D\%$, N 击(不经深度校正), σ kPa。式(16)为砂土抗液化等级多因素综合评判实用计算式,求得 S_k 值则为不液化临界烈度,并可按表1定名。

为检验本实用方法的正确性和可靠性,随机抽样26组实例进行评判验证,其结果及其与现场液化情况对比均列于表4,可见评判的准确性是较高的。

四、结 语

1. 本文提出的砂土地震液化综合评判实用方法直观明瞭,具有一定的实用性,其评判正确性和可靠性是令人满意的。

2. 由于本法包含较多的评判信息量,能避免偶然性引起的误差,故在地基条件比较复杂或单因素评判难以判断时,应用本法将能获得更为明显的实用效果。

3. 本文首次提出砂土不液化临界烈度的直接计算方法,揭示了砂土地震液化的某种真实性态,对进一步研究砂土抗液化特性无疑是一种新的尝试。随着研究深入,有可能发展成为一种液化场地判别和地基加固设计的工程实用方法。

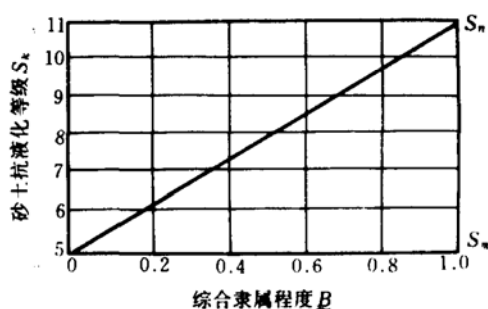


图3 砂土抗液化等级图

表4

地震液化实例与模糊综合评判结果对比

序号	实例	地震 烈度	砂土指标				现场液 化实况	评判结果		对应 情况	按式 (10) 评判
			d_{10} (mm)	D_r (%)	$N_{60.5}$ (击)	σ_v (kPa)		S_L	结论		
1	海城南河 1*例	Ⅷ	0.135	64	10	110	液化	6.80	液化	对应	[7]
	沿排灌站 2*例		0.135	64	13	150	液化	7.45	液化	对应	
2	胜利塘 1*例	Ⅵ	0.090	88	11	60	液化	6.98	液化	对应	[6 ⁺]
	排灌站 2*例		0.180	75	43	130	未液化	10.06	不液化	对应	[11]
	3*例		0.180	75	43	210	未液化	10.86	不液化	对应	
3	双台子闸 1*例	Ⅵ	0.107	82	15	70	未液化	7.26	不液化	对应	[7]
	2*例		0.107	82	20	100	未液化	7.96	不液化	对应	
4	万金滩闸 1*例	Ⅵ	0.065	58	6	20	液化	5.22	液化	对应	[6]
	2*例		0.065	58	6	100	液化	6.03	液化	对应	
5	唐山钱 1*例	Ⅹ	0.150	70	15	100	普遍液化	7.30	液化	对应	[8 ⁺]
	家管区 2*例		0.180	70	20	100	普遍液化	7.77	液化	对应	
	3*例		0.280	80	20	150	普遍液化	8.80	液化	对应	
6	滦南县某地 1*例	Ⅸ	0.140	77	20	100	普遍液化	7.89	液化	对应	[9 ⁻]
	2*例		0.330	77	25	100	普遍液化	8.72	液化	对应	
7	乐亭县某地 1*例	Ⅷ	0.130	80	20	50	普遍液化	7.46	液化	对应	[8 ⁻]
	2*例		0.180	80	25	50	普遍液化	7.97	液化	对应	
8	唐山市区 1*例	Ⅹ~Ⅺ	0.260	90	25	150	零星液化	9.45	液化	对应	[11 ⁻]
	2*例		0.550	90	30	200		11.01	不液化		
9	丰润县某地 1*例	Ⅷ	0.180	90	40	200	未液化	10.97	不液化	对应	[11]
	2*例		0.230	95	>40	200	未液化	11.23	不液化	对应	
10	滨海县某地 1*例	Ⅶ~Ⅷ	0.12	75	15	150	零星液化	7.88	液化	对应	
	2*例		0.29	75	15	150		8.27	不液化		
11	扬州市区 1*例	Ⅵ	0.106	75	17	88	(无液化 记载)	7.39	不液化	对应	
	某工程 2*例		0.094	70	15	132		7.49	不液化	对应	
12	泰州引江 1*例	Ⅵ	0.092	70	12	114	(无液化 记载)	7.10	不液化	对应	
	河某工程 2*例		0.105	60	14	175		7.57	不液化	对应	

参 考 文 献

- [1] 《工程地质手册》编写组.工程地质手册, 第二版.北京: 中国建筑工业出版社, 1987: 749~763.
- [2] 水利电力部水利水电规划设计院主编.水利水电工程地质手册.北京: 水利电力出版社, 1985: 305~312.
- [3] 贺仲雄编.模糊数学及其应用.天津科学技术出版社, 1983: 68, 18~204.
- [4] 宋允柏, 邓民宪, 江铁鹰.地震烈度模糊综合评判的实用计算方法.地震学刊, 1987(2): 14~24.