

模糊数学在软土划定和分类中的应用

胡唐伯, 宋意勤

(江苏省工程勘测研究院, 江苏 扬州 225002)

摘要:应用模糊数学中隶属度概念对软土划分作了探讨性论述, 通过把液性指数及孔隙比两项土性指标作为两个自变数建立了隶属函数方程, 提出软土定义的具体方法。

关键词:软土; 淤泥; 孔隙比; 液性指数; 模糊数学

中图分类号: P642.13+3

文献标识码: A

文章编号: 1006-7647(2001)07-0011-02

目前, 国内外对软土尚无统一、明确的定义。一般把软土视为整个软弱土质的简称, 指含水率和孔隙比较大、压缩性高、强度较低、渗透性弱的粘性土, 往往不包括性能差的特殊土和含水率小的疏松土以及虽有高孔隙比却状态较硬的有机土。常用的“软弱土”概念范围似乎要广些, 带有包含上述土的意思。尽管有大致统一的认识, “软土”这一术语在概念上仍带有比较性和模糊性。

对我国土分类影响较大、较早的当数原苏联 HNTY127-55《房屋和工业结构物天然地基设计标准及技术规范》, 它明确规定, 含水率(含水量)大于液限, 而天然孔隙比大于 1.0 的砂质粘土(壤土)、粘质砂土(砂壤土)称为淤泥, 并在成因上作了描述。HNTY127-55 规范指出, 软土指粘性土形成初期有微生物作用在水中形成的一种构造物沉积。数十年以来, 我国土木工程各行业技术部门在此基础上对软土的定义都不尽相同, 比较权威的如建设部 GB50021-94《岩土工程勘察规范》对软土的定义为: 天然孔隙比 $e \geq 1.0$, 且天然含水率大于液限的细粒土, 包括淤泥、淤泥质土、泥炭质土等, 其压缩系数 $a_{0.1-0.2}$ 宜大于 0.5 MPa^{-1} , 不排水剪强度 c 宜小于 30 kPa ; 水利部 SL265-2001《水闸设计规范》对土质地基划分软土特性指标分类如表 1 所示。

表 1 软土特性指标分类

软土类别	标准贯入击数 N /击	孔隙比 e	含水率 W /%
软弱粘性土	2~4	0.75~1.00	$\geq W_L$
淤泥质土	1~2	1.00~1.50	$> W_L$
淤泥	≤ 1	≥ 1.50	$> W_L$

注: W_L 为液限含水率, %。

鉴于“软土”带有比较性和模糊性的特点, 本文

尝试引入模糊数学的基本概念, 对其加以讨论并进行划定和分类。

1 论域和集合

设论域 U 为讨论具有各种不同物理力学性质指标的土, A, B 为 U 的两个集, 集合 A 为 $I_L > 1$ 的土, 集合 B 为 $e > 1$ 的土, 则 GB50021-94 关于软土(指淤泥质土和淤泥)的规定实际上是 A 和 B 的交集(图 1), 数学表达式为

$$A \cap B = \{x | x \in A \text{ 且 } x \in B\}$$

即

$$A \cap B = \{x | I_L > 1 \text{ 且 } e > 1 \text{ 的土}\}$$

如果 $I_L > 1$ 与 $e > 1$ 满足一项即可, 则实际上是集合 A 和集合 B 之并集(图 2), 即

$$A \cup B = \{x | x \in A \text{ 或 } x \in B\}$$

亦即

$$A \cup B = \{x | I_L > 1 \text{ 或 } e > 1 \text{ 的土}\}$$

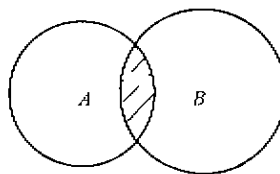


图 1 A 和 B 的交集

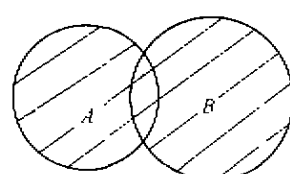


图 2 A 和 B 的并集

如按 GB50021-94 规范划分, 除 $I_L > 1, e > 1$ 外, 尚有条件 $a_{0.1-0.2} > 0.5 \text{ MPa}$, $c_u < 30 \text{ kPa}$ 。设集合 $A = \{I_L > 1 \text{ 的土}\}$, $B = \{e > 1 \text{ 的土}\}$, $C = \{a_{0.1-0.2} > 0.5 \text{ MPa 的土}\}$, $D = \{c_u < 30 \text{ kPa 的土}\}$, 那么, 如果软土必须同时满足上述 4 个条件, 它必属于 A, B, C, D 的交集; 如果满足其中之一条件即可, 则它属于 A, B, C, D 的并集。

从目前实际应用情况和合理性来看, 采用交集似乎控制得太死, 采用并集似乎太宽。下面我们试图

有意识地将它们统一为一个函数来评价,这样定名可以消除人为误差,并且比较合理。

2 引用隶属度划分软土

这里我们仍按通常情况选用 I_L 和 e 这两个土的物理性指标作为评定软土的标准。由于有两个因素,需要找出包括两个自变数的隶属函数的数学模型。隶属度是以从 0 到 1 来表示事物属性从弱到强的程度。找出的数学表达式必须满足:① 隶属函数的值域在 0 到 1 之间;② 当 I_L 或 e 小到某一数时,隶属度为 0(即完全不属软土);③ 当 $I_L = 1, e = 1$ 时(即规范规定淤泥质粘土起始值下界)使隶属度控制在某一恰当数值,如 0.6 左右,容易使人们理解到较强的软土属性;④ 当 $I_L = 1, e = 1.5$ 时(即淤泥土起始值下界)我们使隶属度控制在另一恰当数值,如 0.8 左右,易使人们理解具有很强的软土属性;⑤ 使 I_L 和 e 值在相同情况下基本等权,两者如一项超过界限另一项在界限以下,根据以往多数习惯,超过的一项指标要超过较多时才能划入淤泥质土或淤泥。

按上述要求,我们找出了以下的隶属函数数学表达式:

$$f(x, y) = \{ \arctan k[(x - a) + (y - b)] \} \frac{2}{\pi} \quad (1)$$

令 $x = I_L, y = e$, 为了满足上述④⑤两点要求,令 $k = 3$, 即

$$f(I_L, e) = \arctan 3 \{ (I_L - a) + (e - b) \} \frac{2}{\pi} \quad (2)$$

定 $a = 0.75, b = 0.75$ 。因为 $I_L \leq 0.75$ 起码属可塑状态,认为完全属软土;实际上 $e \leq 0.75$ 的软土并不存在,同时两者取用相同值,可以使得表达式取到等效,即

$$f(I_L, e) = \arctan 3 \{ (I_L - 0.75) + (e - 0.75) \} \frac{2}{\pi} \quad (3)$$

根据上述要求,并规定:① 当 $(I_L - 0.75), (e - 0.75)$ 两项,只要有一项小于或等于零,即隶属度为零;② 当 $I_L > 1$ 时, I_L 项用 $[(I_L - 1)/2] + 1$ 取代;③ 当 $I_L \leq 1$ 并 $1 < e < 1.5$ 或 $I_L < 1$ 并 $e \geq 1.5$, e 项用 $[(e - 1)/2] + 1$ 取代;④ 当 $I_L \geq 1$ 并 $e \geq 1.5$ 时, e 项用 $[(e - 1.5)/2] + 1.5$ 取代。则 $f(I_L, e)$ 可归纳为如下表达式:

$$f(I_L, e) = 0 \quad I_L \leq 0.75 \text{ 或 } e \leq 0.75 \quad (4a)$$

$$f(I_L, e) = (2/\pi) \arctan 3 \{ (I_L - 0.75) + (e - 0.75) \} \quad I_L \leq 1, e \leq 1 \quad (4b)$$

$$f(I_L, e) = (2/\pi) \arctan 3 \{ (I_L - 0.75) + ((e - 1)/2) + 0.25 \} \quad I_L \leq 1, 1 < e < 1.5 \text{ 或 } I_L < 1, e \geq 1.5 \quad (4c)$$

$$f(I_L, e) = (2/\pi) \arctan 3 \{ ((I_L - 1)/2 + 0.25) + (e - 0.75) \} \quad I_L > 1, e < 1.5 \quad (4d)$$

$$f(I_L, e) = (2/\pi) \arctan 3 \{ ((I_L - 1)/2 + 0.25) + ((e - 1.5)/2 + 0.75) \} \quad I_L > 1, e \geq 1.5 \quad (4e)$$

式(4) $f(I_L, e)$ 值域为 $(0, 1)$; 当 $I_L = 1, e = 1$ 时,按式(4b)求得隶属度 $f(I_L, e) = 0.626$; 当 $I_L = 1, e = 1.5$ 时,按式(4e)求得隶属度 $f(I_L, e) = 0.795$ 。

我们把隶属度 0.626, 0.795 分别定为淤泥质土和淤泥起始值下界。软土的划定和分类规定为:① 当隶属度 $f(I_L, e) > 0.626$ 时,属软土;② $0.795 \geq f(I_L, e) > 0.626$ 时,为淤泥质土,如淤泥质粘土、淤泥质壤土、淤泥质砂壤土;③ $f(I_L, e) > 0.795$ 时为淤泥。

3 隶属度计算和软土分类

现将液性指数 I_L 取 0.75 ~ 1.5, 孔隙比 e 取 0.75 ~ 2.0, 均以 0.1 为间隔, (下转第 22 页)

表 2 隶属度 $f(I_L, e)$ 值

$I_L \backslash e$	≤ 0.75	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0
≤ 0.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.8	0	0.186	0.334	0.467	0.516	0.558	0.594	0.626	0.653	0.677	0.698	0.717	0.734	0.749
0.9	0	0.344	0.467	0.558	0.594	0.626	0.653	0.677	0.698	0.717	0.734	0.749	0.762	0.774
1.0	0	0.467	0.558	0.626	0.653	0.677	0.698	0.717	0.795	0.804	0.813	0.820	0.828	0.834
1.1	0	0.516	0.594	0.653	0.698	0.734	0.762	0.785	0.804	0.813	0.820	0.828	0.834	0.840
1.2	0	0.558	0.626	0.677	0.717	0.749	0.774	0.795	0.813	0.820	0.828	0.834	0.840	0.846
1.3	0	0.594	0.653	0.698	0.734	0.762	0.785	0.804	0.820	0.828	0.834	0.840	0.846	0.851
1.4	0	0.626	0.677	0.717	0.749	0.774	0.795	0.813	0.828	0.834	0.840	0.846	0.851	0.856
1.5	0	0.653	0.698	0.734	0.762	0.785	0.804	0.820	0.834	0.840	0.846	0.851	0.856	0.861

仪、共振三轴仪、大型电液伺服粗粒土三轴试验机。基本动力特性试验包括：各种土的动应力比值及与破坏振次 N 的关系；动强度指标；阻尼比 λ 、模量 G 与动剪应变 γ 的关系。夹砂层和砂砾石试样的干容重分别为 16.2 kN/m^3 和 18.41 kN/m^3 ，试验成果如表 6 和表 7 所示。

表 6 各种土破坏标准为 2.5%, 5% 的动应力比值

土的类别	固结比 K_c	固结压力 δ_c	应力比值 ($N_L = 30$ 次)	
			2.5%	5%
夹砂层	1	1	0.305	0.303
	1	2	0.258	0.256
	1.5	1	0.388	0.398
	1.5	2	0.335	0.352
	2	1	0.437	0.479
	2	2	0.370	0.420
砂砾石	1	6	0.210	0.218
	1.5	8	0.298	0.320
	2.0	12	0.458	0.480

表 7 各种土的动剪、总剪强度指标

土层名称	初始剪应力比 a	总剪强度指标, 30 次				动剪强度指标, 30 次			
		2.5%		5%		2.5%		5%	
		c_d	φ_d	c_d	φ_d	c_d	φ_d	c_d	φ_d
夹砂层	0	0.04	7.10	0.04	7.0	0.04	7.1	0.04	7.0
	0.188	0.10	20.9	0.09	21.8	0.16	8.5	0.12	10.9
	0.347	0.14	27.7	0.104	30.0	0.2	8.6	0.19	11.0
砂砾石	0	0	6.5	0	6.7	0	6.5	0	6.7
	0.184	0	22.1	0	22.5	0	12.5	0	12.9
	0.338	0	32.7	0	33.3	0	16.8	0	17.6

由表可见，动应力比值和动剪强度随固结比增加而增大，是符合一般规律的；砂卵石的动应力比值最小，其原因是试验固结压力较大，且含砂量高达

47%。

c. 动力有限元分析。先后共进行了多次动力有限元分析，包括总应力法和有效应力法，大部分采用二维平面分析，最终选用了由世行咨询专家审查的黄委会水科院计算的有效应力地震反应分析，计算中考虑了孔隙水压力的消散和重分布。主要地震参数采用 10^{-4} 超越概率作为坝址地震危险性评定准则，确立了坝址场地地面峰值加速度为 $0.215 \times 9.81 \text{ m/s}^2$ ，设计中采用了远震、近震和近坝的水库诱发地震，主要参数为：①远震，震级 $M = 8.0$ ，震源距 $\Delta = 90 \text{ km}$ ，基岩加速度峰值 $\alpha_{\max} = 0.16 \times 9.81 \text{ m/s}^2$ ；②近震，震级 $M = 7.0$ ，震源距 $\Delta = 29 \text{ km}$ ，基岩加速度峰值 $\alpha_{\max} = 0.25 \times 9.81 \text{ m/s}^2$ ；③诱发地震，震级 $M = 6.25$ ，震源距 $\Delta = 10 \text{ km}$ ，基岩加速度峰值 $\alpha_{\max} = 0.5 \times 9.81 \text{ m/s}^2$ 。

4 结 语

河床覆盖层中表层堆积的粉细砂、壤土及砂砾石层顶部的一部分，为第四纪全新统沉积物，密实度低，属于液化土。Q₃ 砂卵石层的含砂率一般小于 30%，相对密度大于 0.65，地震时不易产生液化。局部含砂率大于 30%，但分布范围小，不会对坝体造成危害。小浪底夹砂层的 $N_{63.5}$ 均大于 N_{cr} ，由此认为夹砂层为非液化土。动力计算分析表明，在上、下游坝角附近及以外，当含砂量较高时，坝基砂卵石层有不同程度的液化现象，但不影响坝的安全。

(收稿日期: 2001-08-14 编辑: 马敏峰)

(上接第 12 页) 分别代入式 (4) 计算得到隶属度 $f(I_L, e)$ 值如表 2 所列。表中粗线表示分类界线，左上方为一般土 (非软土)，右下方为淤泥，中间为淤泥质土等软土。根据土试样的 I_L 和 e 值代入式 (4) 计算得到隶属度 $f(I_L, e)$ 值，然后对照分类规定或直接查表 2 即可得到相应的土类。

实际上，还可以用压缩系数、抗剪强度、比贯入阻力、无侧限抗压强度等指标通过隶属度计算分析得到软土分类，这些常受到勘察手段等因素限制。

4 结 语

采用模糊数学中隶属概念来划分软土，可以将两个以上的土性指标归纳到隶属度中去，这样比较合理、统一，实际应用中容易掌握。同时，由于隶属度本身反映了土的软弱强度，故隶属度亦可作为衡量软土的软弱程度的指标。划分界限的确定应考虑到

传统习惯。

参考文献:

[1] 何广纳. 土工的若干新理论研究与应用 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1994.

(收稿日期: 2001-08-22 编辑: 马敏峰)

