

加筋土陡边坡状态评定的模糊聚类分析^{*}

Investigation and analysis of performance of reinforced steep slope using fuzzy cluster

徐林荣 华祖焜

(长沙铁道学院土木建筑学院, 长沙, 410075)

杨灿文

(铁道部科学研究院铁道建筑研究所, 北京, 100081)

文 摘 以正交表 $L_9(3^4)$ 设计 9 组试验, 进行了 27 次(每组 3 次重复试验)为探讨加筋土陡边坡可能的状态和其相关因素的相关关系室内模型试验, 并以所得的数据为依据, 进行方差分析、误差分析, 确定各影响因素对边坡状态影响程度的排序, 再结合层次分析原理(AHP 法)得出各影响因素的权重, 进而应用模糊聚类方法对模型试验的边坡进行状态评定分析, 并将所得结论和试验结果对比, 成功地找到了加筋土陡边坡状态评定的量化指标。对加筋土边坡的破坏模式划分和应用的合理性进行了讨论, 并提出了相应的建议。

关键词 状态评定, 量化指标, 破坏模式, 模糊聚类, 权重

中图法分类号 TU 472

作者简介 徐林荣, 男, 35 岁, 副教授。1986 年西南交大工程地质和水文地质学士, 1993 年长沙铁道学院岩土工程硕士, 现为桥梁和隧道工程博士研究生, 主要从事工程地质和岩土工程中土工合成材料的应用及地基加固处理方面的教学、研究工作, 发表文章 10 余篇。

Xu Linrong Hua Zukun

(Civil and architecture college, ChangSha Railway University, Changsha 410075)

Yang Canwen

(China Academy of Railway Sciences, Beijing, 100081)

Abstract Twenty-seven model tests designed through orthogonal principle have been performed to search for the relationship between the performance of geogrid reinforced steep slope and its affecting factors. Based on the test data, the affecting factors have been put in order according to their contribution to the performance of reinforced steep slope by error analysis and variance analysis, meanwhile the factor's weight has been obtained by the aid of AHP(Analytical Hierarchy Process) method, succeeding in finding out the measurement index to evaluate the performance of reinforced steep slope by applying the method of fuzzy cluster. The rationality of the classification and utilization of the failure mode has been discussed and some suggestions have been presented.

Key words performance evaluate, measurement index, failure mode, fuzzy cluster, weight

1 前 言^{*}

加筋土陡边坡技术应用中发现, 有些试验工程理论上认为在某一情况下会破坏实际却是稳定的, 相反那些失败的工程在设计时都认为能正常使用。这是一个边坡状态的正确评定问题, 包括边坡破坏模式的合理划分和确定, 边坡稳定性分析两方面的内容。对于破坏模式, 有专门研究拉力破坏^[1]; 有认为^[2,3]在地基稳固的前提下, 其可能的破坏模式可分为筋材拉断、筋材拔出、侧向过量变形 3 种形式。对破坏模式预测工作, 因尚难以找到切实反映复杂的筋土界面实际工作状态的本构关系而存在一定的困难。边坡稳定性研究的成果可分为两大类, 一类认为边坡失稳与否的界限是突变的^[3]。另一类则认为边坡是否失稳的界限是渐变的^[4]或模糊的^[5]。毫无疑问, 在前者的基础上发展起来的后者较为可靠, 更符合实际情况。当然, 基于破坏模式为基础的稳定性分析研究工作至少面临和破坏模式同样的难题。即使用有限元法或测试办法能获取准确的内部信息(如筋带应力-应变变化规律, 应力、位

移场等), 至今尚无一套得到认同的利用应力场和位移场来定量评价加筋土边坡状态的方法^[6]。看来基于确定性数学为基础的该方面研究碰到了极大的障碍, 为此, 本文拟用模糊聚类分析方法, 对加筋土陡边坡的状态评定进行探讨。

本文试图以工程设计阶段可获取的、确定的内部信息(如设计参数等)与边坡工作状态中易获取的、且能体现边坡内部状况(即内部信息)的外部信息(如边坡侧向位移等)相结合的方法开展对边坡状态评定的研究, 寻找边坡状态评定量化指标, 建立边坡状态评定方法。故将与加筋土陡边坡状态评定关系最为密切的、模型试验中可获取的断筋率(内部信息)和边坡侧向位移、边坡的极限承载(外部信息)3 参数视为边坡状态评定的候选量化指标, 以模型试验的数据为依据, 模糊聚类分析方法为手段, 对加筋土陡边坡状态评定进行深入探讨。

^{*} 铁道部专项基金项目, 编号 J98Z106
到稿日期: 1998

2 模型试验

2.1 试验安排和材料特性

注意到加筋土陡边坡状态评定是一个与设计、施工、场地条件等众多影响因素有关的十分复杂的系统。而系统的复杂性增大时,其精确化的能力即将减少,在达到一定的阈值之上时,复杂性和精确性互斥^[7]。因而,本文不考虑地基因素,就陡边坡加筋率 L_j 、加筋材料的极限抗拉强度和其相应应变之比值 E_j 、层间距 H_j 、边坡坡角 α 因素分3个水平(见表1),利用正交设计表 $L_9(3^4)$ 安排模型试验(分9组,每组重复3次,共27次)。试验所用填料为中砂,比重2.66,有效粒径0.266 mm,含水量约0.56%,不均匀系数1.65,最大孔隙比0.92,最小孔隙比0.73,相对密度为0.61。加筋材料为3种材质相同、厚度不同、表面经过不同处理的纸(代替土工格栅),其有关性质如表2,拉拔试验曲线如图1,试验筋材宽度为20 cm。

表1 模型试验4因素及其不同水平

Table 1 Four factors with different grade in model tests			
$L_j/\%$	E_j/kPa	H_j/m	α/rad
0.066	934.30	0.10	0.785
0.137	1569.60	0.12	1.047
0.204	2029.65	0.15	1.309

表2 筋材性质

Table 2 The properties of reinforcements			
	筋B	筋C	筋D
断裂强度/ $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	1.96	3.92	5.89
应变值/%	2.10	2.50	2.90
摩擦系数	0.18	0.30	0.42
厚度/mm	0.14	0.27	0.41

表3 加筋边坡侧向位移、极限承载、断筋率和破坏模式的模型试验结果

Table 3 Lateral displacement, bearing capacity, failure ratio of reinforcements and failure mode of reinforced slope in model tests										
试验 序号	边坡的侧向位移/cm			边坡极限承载或超载/kPa			边坡的断筋率/%			破坏模式*
	①	②	③	①	②	③	①	②	③	
1	1.95	2.10	1.85	12.54	11.09	10.36	0.00	0.00	0.00	* B
2	1.95	1.90	2.05	6.38	6.49	6.40	0.80	0.70	0.70	* Z
3	1.49	1.45	1.44	9.75	9.18	9.46	0.80	0.75	0.78	* Z
4	1.85	1.73	1.66	12.19	11.78	12.33	1.00	0.85	0.90	* Z
5	2.16	2.31	2.28	6.52	6.23	6.78	1.00	1.00	1.00	* P
6	1.93	1.83	1.85	18.92	19.90	18.78	0.40	0.30	0.30	* Z
7	1.67	1.58	1.54	8.90	9.87	9.86	0.60	0.50	0.50	* Z
8	1.87	1.79	1.77	7.49	9.31	7.71	0.40	0.00	0.03	* Z
9	1.88	1.78	1.85	17.88	16.68	16.96	0.04	0.00	0.00	* B

注: 1. ①②③分别代表同种组合的3组平行(重复)试验,破坏模式为同种组合的3种重复试验结果的综合评估结论;

2. * B 代表拔出破坏为主;

3. * P 代表拉断破坏为主;

4. * Z 代表介于前两者之间的中间型情况。

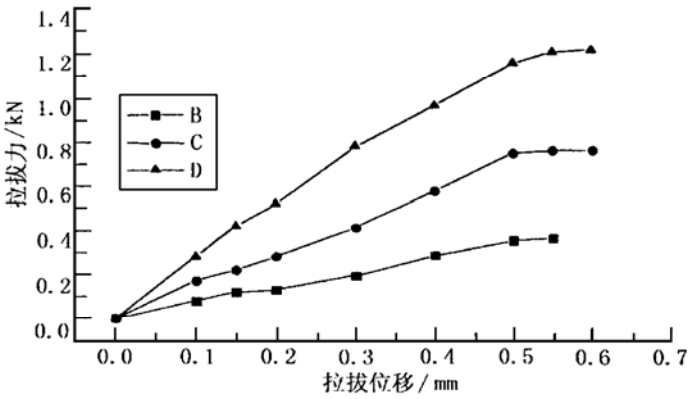


图1 3种纸质筋材的拉拔试验曲线

Fig. 1 Pull-out curves for three kinds of reinforcements

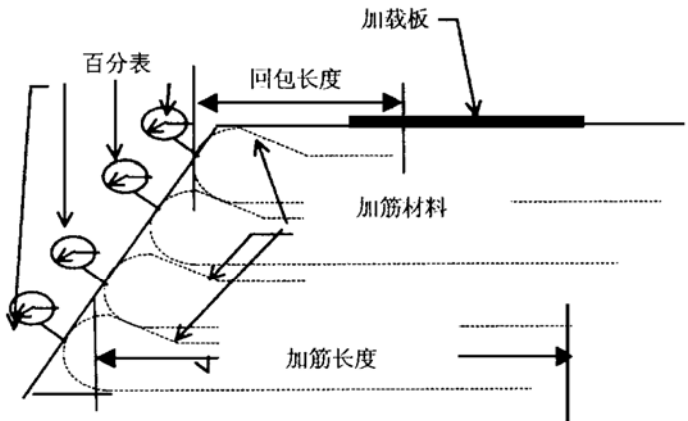


图2 模型试验示意图

Fig. 2 Schematic diagram of model tests

2.2 试验安排和结果

模型试验示意如图2,模型槽长120 cm,宽80 cm,高80 cm。模型槽结构、试验设计详见文献^[8],为能减少模型试验随机误差,每种组合进行了3次重复试验,对重复试验数据按一定方法^[9]进行分析。荷载等级分

别为 8.63 kPa(初期)及 4.31 kPa(接近破坏阶段),加载速度控制在每分钟 0.35 kPa 左右,每级荷载稳定时间为 10 min,并规定:当加载到应变仪上读数开始下降并不再上升时的前一级荷载为极限承载或超载的值,同时量测边坡的侧向位移,筋带的破坏情况用断筋率度量。每次试验记录边坡侧向位移、极限承载和断筋率。试验结果汇总于表 3。

3 模糊聚类分析

3.1 影响因素的权重确定

对于加筋土陡边坡状态评定的模糊聚类分析探讨,需要构造出符合加筋土陡边坡状态评定为目的、能体现加筋土结构体系的内在联系、合理可行的递阶层次评价指标体系集。同时,考虑到各影响因素对边坡状态的影响程度不一,影响程度需要量化。为此,先用误差分析和方差分析确定影响边坡状态主要影响因素及其排序如表 4,再用层次分析法(AHP),构造判断矩阵^[10]。用方根法经归一化处理后得出各因素相应的权重,同时对判断矩阵进行一致性检验(包括计算判断矩阵最大特征根 $\lambda_{\max}$,计算一致性指标 CI,计算随机一致性比率 CR,作出检验判断)以确保所得权重值的可靠性和合理性,检验后的权重值结果汇总如表 5。

表 4 候选量化指标的影响因素排序*

Table 4 The order of affecting factors for measurement index		
候选量化指标	主要影响因素及其排序	
边坡侧向位移值	$q > E_j > L_j > H_j$	注:符号意义
极限承载或超载	$E_j > H_j > L_j > q$	同前或见
边坡断筋率	$E_j > q > L_j > H_j$	表 5 备注

为更加直观、有效地体现各影响因素与边坡状态的相关关系,模糊聚类分析时拟将筋材的长度和厚度(代替加筋率 L_j)、筋材的极限抗拉强度及其应变值(代替极限抗拉强度及其应变值的比值 E_j)直接作为边坡状态评定的影响因素。对 3 组候选量化指标各考虑两组权重。这样对筋材的长度和厚度、极限抗拉强度及其对应的应变值考虑适当的组合,再用 AHP 法(且通过一致性检验),最后定出 6 组权重(见如表 6)。

表 6 加筋土陡边坡边坡状态评定各影响因素的权重

Table 6 The weights of affecting factors for evaluating the performance of reinforced steep slope

候选量化指标		抗拉强度	极限应变	层间距	边坡坡角	筋材长度	筋材厚度	权重序号
边坡侧向位移值	①	0.132	0.132	0.055	0.564	0.088	0.029	W1
	②	0.198	0.066	0.055	0.564	0.088	0.029	W2
极限承载或超载	①	0.282	0.282	0.264	0.055	0.088	0.029	W3
	②	0.423	0.141	0.264	0.055	0.088	0.029	W4
边坡断筋率	①	0.282	0.282	0.055	0.264	0.088	0.029	W5
	②	0.423	0.141	0.055	0.264	0.088	0.029	W6

表 5 检验后的影响因素的权重值

Table 5 The weights of affecting factors after examination

量化指标	L_j	E_j	H_j	q	CR
边坡位移值	0.118	0.263	0.055	0.564	0.067 < 0.1
极限承载	0.118	0.564	0.264	0.055	0.067 < 0.1
边坡断筋率	0.118	0.564	0.055	0.264	0.067 < 0.1

注:1. L_j 加筋率;

2. H_j 层间距;

3. E_j 筋材的极限抗拉强度与其相应应变之比值;

4. q 边坡坡角;

5. CR 为一致性指标与平均随机一致性指标的比值,并规定 $CR < 0.1$ 判断矩阵具有满意的一致性。

3.2 影响因素的归一化权重处理及模糊聚类分析

边坡评定的影响因素及其组合情况如表 7。影响因素的归一化权重处理用式(1),即对第 i 个样本的第 j 个影响因素的归一化权重处理。

$$x_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{j\min}}{x_{j\max} - x_{j\min}} \cdot W_j \quad (1)$$

$$i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, s$$

$$x_{j\max} = \text{MAX}(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{nj})$$

$$x_{j\min} = \text{MIN}(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{nj})$$

式中的 $x_{j\max}$, $x_{j\min}$ 分别为第 j 个因素的上、下确界, W_j 是权重,要求每种组合各因素的权重之和等于 1.0。这样便可求得经归一化权重处理的影响因素的矩阵。这些矩阵可用于计算样本的模糊关系及其相应模糊关系矩阵 $R^{[7]}$ 。而样本的模糊关系表达式一般可简写如式(2),其中 y_{ij} 表示模糊关系程度,可通过相关系数 y_{ij} 计算式(如式(3))计算求得。

$$R = (y_{ij})_{mn} \quad y_{ij} = \mu_R(x_i, y_j) \quad (2)$$

$$y_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^s |x_{ik} - x_i| \cdot |x_{jk} - x_j|}{\sqrt{\sum_{k=1}^s (x_{ik} - x_i)^2} \sqrt{\sum_{k=1}^s (x_{jk} - x_j)^2}} \quad (3)$$

$$x_l = \frac{1}{S} \sum_{k=1}^s x_{ilk} \quad l = i, j; i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$$

这样求得的矩阵为模糊关系矩阵 R ,再通过矩阵相乘的方法^[7]。可将模糊关系矩阵 R 改造成模糊等

价关系矩阵 R^* 方可用于模糊聚类分析。基于此, 可求得 6 个对应的模糊等价关系矩阵 R^* (见表 8-1、表 8-2、表 8-3, 其余 3 个矩阵不一列出) 可用于模糊聚类分析。则根据模糊聚类分析阈值 λ ($\lambda \in [0, 1]$) 选取原则^[7], 对 6 个模糊等价关系矩阵 R^* 进行模糊聚类分析, 得出 6 种分类方案汇总于表 9。

表 7 影响因素及其不同水平

Table 7 Affecting factors with different grade					
筋材长度 /m	筋材厚度 /mm	抗拉强度 /(kN·m ⁻¹)	筋材应变值 /%	筋材层间距 /m	边坡坡角 /rad
0.40	0.27	3.92	0.025	0.10	0.79
0.40	0.13	1.96	0.021	0.12	1.05
0.40	0.41	5.89	0.029	0.15	10.31
0.50	0.27	3.92	0.025	0.12	1.31
0.50	0.13	1.96	0.021	0.15	0.79
0.50	0.41	5.89	0.029	0.10	1.05
0.60	0.27	3.92	0.025	0.15	1.05
0.60	0.13	1.96	0.021	0.10	1.31
0.60	0.41	5.89	0.029	0.12	0.79

4 理论分析结论和试验结果的对比

如表 3, 试验结果综合分析得出试验序号为 1, 9

对应试验的破坏模式以筋材拔出破坏为主, 试验序号为 5 的以筋材拉断破坏为主, 其余的属介于此二者之间的中间型破坏。

关于加筋土陡边坡状态评定的量化指标探讨, 本文利用与边坡状态评定关系密切的 3 种候选量化指标 (即极限承载、边坡侧向位移和断筋率) 的模型试验结果, 结合理论分析发现, 以极限承载或超载作为边坡状态评定量化指标的模糊聚类分析结论 (见表 9 权重序号为 W3, W4) 和试验结果 (见表 3) 不吻合, 说明极限承载或超载不能作为加筋土陡边坡状态评定的量化指标。而以侧向位移、断筋率分别作量化指标 (对应的权重分别为表 9 中权重序号 W2 和权重序号 W6 的那两组) 的模糊聚类分析结论均与模型试验结果 (如表 3) 吻合良好。即表 9 中权重序号为 W2 和 W6 的那两组的共同结论为: 模型试验的破坏模式, 按阈值从大到小的次序, 且相同数量级, 可分为 3 大类, 即拔出破坏为主的 (试验序号 1, 9)、中间型破坏的 (试验序号 2, 3, 4, 6, 7, 8)、拉断破坏为主的 (试验序号 5), 这和模型试验的结果 (表 3) 吻合良好。这说明, 断筋率和边坡侧向位移均可作为加筋土陡边坡状态评定的量化指标。同时注意到, 分别给予适当权重的断筋率 (内部信息) 和

表 8-1 模糊等价关系矩阵 R^*

Table 8-1 Fuzzy equivalent matrix

量化指标为边坡侧向位移					权重序号为表 6 中 W2			
1.0000	.8338	.8338	.8338	.8320	.8338	.8338	.8338	.9661
.8338	1.0000	.9837	.9837	.8320	.9251	.9741	.9817	.8338
.8338	.9837	1.0000	.9881	.8320	.9251	.9741	.9817	.8338
.8338	.9837	.9881	1.000	.8320	.9251	.9741	.9817	.8338
.8320	.8320	.8320	.8320	1.0000	.8320	.8320	.8320	.8320
.8338	.9251	.9251	.9251	.8320	1.0000	.9251	.9251	.8338
.8338	.9741	.9741	.9741	.8320	.9251	1.0000	.9741	.8338
.8338	.9817	.9817	.9817	.8320	.9251	.9741	1.0000	.8338
.9661	.8338	.8338	.8338	.8320	.8338	.8338	.8338	1.0000

表 8-2 模糊等价关系矩阵 R^*

Table 8-2 Fuzzy equivalent matrix

量化指标为极限承载或超载					权重序号为表 6 中 W4			
1.0000	.8185	.9654	.9595	.8185	.9941	.8185	.7996	.9570
.8185	1.0000	.8185	.8185	.9656	.8185	.9099	.7996	.8185
.9654	.8185	1.0000	.9595	.8185	.9654	.8185	.7996	.9570
.9595	.8185	.9595	1.0000	.8185	.9595	.8185	.7996	.9570
.8185	.9656	.8185	.8185	1.000	.8185	.9099	.7996	.8185
.9941	.8185	.9654	.9595	.8185	1.0000	.8182	.7996	.9570
.8185	.9099	.8185	.8185	.9099	.8185	1.0000	.7996	.8185
.7996	.7996	.7996	.7996	.7996	.7996	.7996	1.0000	.7996
.9570	.8185	.9570	.9570	.8185	.9570	.8185	.7996	1.000

表 8-3 模糊等价关系矩阵 R^*

Table 8-3 Fuzzy equivalent matrix

量化指标为断筋率				权重序号为表 6 中 W6				
1. 0000	. 8675	. 9654	. 8675	. 8223	. 9540	. 9468	. 8675	. 9781
. 8675	1. 0000	. 8675	. 9335	. 8223	. 8675	. 8675	. 9704	. 8675
. 9654	. 8675	1. 0000	. 8675	. 8223	. 9540	. 9468	. 8675	. 9654
. 8675	. 9335	. 8675	1. 0000	. 8223	. 8675	. 8675	. 9335	. 8675
. 8223	. 8223	. 8223	. 8223	1. 0000	. 8223	. 8223	. 8223	. 8223
. 9540	. 8675	. 9540	. 8675	. 8223	1. 0000	. 9468	. 8675	. 9540
. 9468	. 8675	. 9468	. 8675	. 8223	. 9468	1. 0000	. 8675	. 9468
. 8675	. 9740	. 8675	. 9335	. 8223	. 8675	. 8675	1. 0000	. 8675
. 9781	. 8675	. 9654	. 8675	. 8223	. 9540	. 9468	. 8675	1. 0000

表 9 加筋土陡边坡状态评定模糊聚类分析结果汇总

Table 9 The results of evaluating the performance of reinforced steep slope using fuzzy cluster

权重 序号	分类结果				候选量化指标
	①	②	③	④	
W1	(0. 96: 1 [*] , 9 [*]), (0. 840; 5 [*]),		(0. 82; 2 [*] , 3 [*] , 4 [*] , 6 [*] , 7 [*] , 8 [*])		边坡侧向位移值
W2	(0. 95: 1 [*] , 9 [*]), (0. 833; 2 [*] , 3 [*] , 4 [*] , 6 [*] , 7 [*] , 8 [*]), (0. 832; 5 [*])				
W3	(0. 99: 1 [*] , 6 [*]), (0. 94; 3 [*] , 4 [*]),		(0. 93; 8 [*] , 9 [*]), (0. 76, 2 [*] , 5 [*] , 7 [*])		极限承载或超载
W4	(0. 99: 1 [*] , 6 [*]), (0. 95; 3 [*] , 4 [*] , 9 [*]),		(0. 80; 2 [*] , 5 [*] , 7 [*]), (0. 79; 8 [*])		
W5	(0. 96: 1 [*] , 9 [*]), (0. 93; 3 [*] , 6 [*]),		(0. 90; 5 [*]), (0. 89; 7 [*]), (0. 83; 2 [*] , 4 [*] , 8 [*])		断筋率
W6	(0. 97: 1 [*] , 9 [*]), (0. 85; 2 [*] , 3 [*] , 4 [*] , 6 [*] , 7 [*] , 8 [*]), (0. 80; 5 [*])				

注: ①②③④为破坏模式分类序号, 表中括号内带小数点的数为阈值 λ , 其后的自然数为可分为同类的试验序号, 形式为: (阈值 λ ; 可分为同类的试验序号)。

边坡侧向位移(外部信息), 能从两个不同侧面对同一问题(加筋土边坡状态评定)得出共同结论, 说明施工过程中或竣工后可量测到的边坡侧向位移(外部信息)实质上是实际工程工作状态中用数值计算方法难以预测的、只有到边坡失稳后方可量测的边坡断筋率(内部信息)的外部体现。因此, 可以说它们俩在边坡状态评定中能起到等同作用, 即边坡的侧向位移(外部信息)可看作是边坡的断筋率(内部信息)的综合体现, 这充分说明了本质的内在的东西(如断筋率等内部信息)可通过一定的现象(如侧向位移等外部信息)体现。考虑到实际工程中断筋率几乎不可能获取, 而侧向位移在实际工作中可随时精确量测, 所以, 将边坡侧向位移视为边坡状态评定的量化指标是合理可行的。但必须说明的是, 这并不意味着侧向位移大的边坡就一定比侧向位移小的易失稳, 即不能单纯以边坡位移值的大小来比较两个不同边坡的稳定性。用侧向位移作为量化指标对加筋土边坡进行状态评定需考虑筋材布置、筋材性质、坡率等综合影响来确定侧向位移的允许值, 具体可根据工程实际情况、利用本文提供的方法结合工程经验确定。

关于破坏模式, 本文的模型试验结果(表 3)和理论分析结论(表 9)共同表明, 加筋土陡边坡失稳往往不是单一的破坏模式, 常常是 3 种破坏模式兼而有之, 并以某一种破坏模式为主。因此, 常规将加筋土陡边坡失稳认为是某一破坏模式是不够合理的。因为对边坡中某一具体的加筋层而言, 由于土工参数的变异性, 究竟会发生何种破坏形式(拔出、拉断、过量位移), 带有随机的不确定性, 也有可能受到众多影响因素共同作用的模糊控制而具有模糊性; 即便某一具体加筋层的破坏模式能确定下来, 整个加筋土边坡不同位置的加筋层的破坏模式也不太可能是统一的。因此, 不能简单认为边坡仅以某一种破坏模式而失稳。总而言之, 加筋土陡边坡破坏模式问题的讨论必须注意到是一个要打破排中律才能解决的问题, 并非非此即彼。

必须注意各影响因素权重的合理选取, 因为同样以边坡侧向位移和断筋率作为候选量化指标, 用同一试验数据, 采用相同理论分析方法, 只是权重值不同(表 6), 其中权重选取序号为 W1 和 W5(见表 6)的模糊聚类分析结论和模型试验结果(见表 3)不吻合, 而权重选取序号为 W2 和 W6 的那 2 组吻合良好。因

此,权重的准确选取是非常重要的。本文基于正交设计表安排的模型试验的结果和模糊聚类分析的结论吻合良好的事实说明:利用模型试验结果,结合方差、误差分析和 AHP 分析原理求得权重方法是可行的。

关于模糊聚类分析的阈值赋予物理意义问题,从表 9 的模糊聚类分析结论和模型试验结果(表 3)对比分析不难发现:阈值大时边坡失稳以筋带拔出为主,阈值小时边坡失稳以筋带拉断为主,阈值介于两者之间的破坏模式属于中间型破坏,此处的阈值大小代表边坡的不同破坏模式。因此,阈值在工程应用中可赋予一定的物理意义。

5 结 论

本文将模糊聚类分析方法首次用于加筋土陡边坡状态评定,理论分析和模型试验结果吻合良好表明,本方法能揭示加筋土陡边坡状态受众多影响因素的模糊控制这个本质性的问题,鉴于目前筋土之间本构关系的局限性的限制使得有限元应用到加筋土体的结构计算要达到精确尚有一个过程,本方法为解决此类问题提供了一条新的途径。并得出如下结论:

(1)侧向位移可作为加筋土边坡状态评定的量化指标,不同类型边坡的侧向位移允许控制值可根据具体工程情况,仿效此方法,结合工程经验确定。

(2)对加筋土陡边坡的破坏模式划分和应用的合理性进行了讨论,并指出,加筋土陡边坡失稳往往不是单一的破坏模式,常常是 3 种破坏模式兼而有之,并以

某一种破坏模式为主,因此破坏模式确定问题的是一个要打破排中律才能解决的问题,并非非此即彼。

(3)权重的正确确定对模糊聚类分析的结论有重要影响,本文给出了一种权重确定实用方法。

(4)模糊聚类分析中的阈值在对加筋土边坡状态评定分析中被赋予一定的物理意义。

参 考 文 献

- 1 梁 波等. 加筋土模型试验的拉力破坏研究. 岩土工程学报, 1995, 17(2): 83~ 87
- 2 Wong K S, et al. Failure modes at model tests of a geotextile reinforced wall. Geotextiles and Geomembranes. 1994, (13): 475~ 493
- 3 徐林荣. 加筋土陡边坡的应力、位移和稳定性:[硕士学位论文]. 长沙:长沙铁道学院, 1993. 40~ 48
- 4 王家臣. 边坡工程随机分析原理. 北京:煤炭工业出版社, 1996. 181~ 214
- 5 何广讷等. 海堤地震稳定性的模糊概率分析. 土木工程学报, 1995, 28(2): 29~ 35
- 6 刘宗耀, 杨灿文, 王正宏等. 土工合成材料工程应用手册. 北京:中国建筑工业出版社, 1994. 165~ 221
- 7 Wang L X. A course in fuzzy systems and control. Prentice hall PTR, 1997. 192~ 203
- 8 徐林荣. 加筋土陡边坡承载力和位移模型试验及其结果分析. 铁道学报, 1999, 21(1): 72~ 76
- 9 徐林荣等. 土工格栅加筋土陡边坡破裂面位置和形态试验研究. 长沙:长沙铁道学院学报, 1998, (3): 6~ 10
- 10 胡树华. 技术经济原理和方法. 武汉:武汉测绘科技大学出版社, 1993. 19~ 30