

文章编号:1000-582X(2011)09-109-08

深基坑支护结构选型决策的 Fisher 判别分析模型

李必红,周 健,史秀志

(中南大学 资源与安全工程学院,湖南 长沙 410083)

摘要:针对传统的深基坑结构选型评价方法存在的问题,应用统计学理论并遵循“安全、经济、合理”的原则,选取了10个实测指标作为影响深基坑支护方案选型的判别因子,建立深基坑支护结构选型的 Fisher 判别分析模型(FDA)。利用国内64组深基坑支护实例作为学习样本进行训练和检验,对水泥土重力式、土钉墙、桩锚、桩撑、地下连续墙等5种深基坑支护方案进行优选,并利用回代估计法对FDA模型进行检验。经过训练后的模型回判估计的误判率为14.1%。对另外10组待判样本进行测试,正确率100%。此外利用该模型对某市新世界中心工程深基坑支护结构选型进行决策,结果与实际情况符合较好,说明该模型在研究深基坑支护结构选型中具有良好的实用性和有效性,可为解决深基坑支护结构型式的优化选择提供一种新思路。

关键词:深基坑;支护结构;选型决策;Fisher 判别分析;分类

中图分类号:TU473

文献标志码:A

Fisher discriminant analysis model for selecting the retaining structure type of deep foundation pit

LI Bi-hong, ZHOU Jian, SHI Xiu-zhi

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, P. R. China)

Abstract: Aiming at the problem of traditional evaluation methods of deep foundation pit for selecting the retaining structure type, based on the statistical theory and following the principle of security, economic and reasonable, a Fisher discriminant analysis(FDA) model for selecting the retaining structure type for deep foundation pit is established. 10 selected indicators which influence selection of deep excavation program are taken into account as discriminant factors, and the supporting schemes for deep foundation pit are classified into 5 groups, viz. gravity of the cement-soil type, soil nailing wall, pile anchors, pile supports and underground continuous wall. After training and testing 64 sets of measured data, the discriminant functions of FDA are solved, the re-substitution method is introduced to verify the stability of FDA model and the ratio of mis-discrimination is 14.1%. Another 10 groups of measured data are tested as forecast samples by the proposed model, and the correct rate is equal to 100%. Therefore, the feasibility of the proposed model is validated. Moreover, the proposed model is adopted for the New World Center Project in China, and the prediction results are in line with the artificial neural network(ANN) and the actual situation. The result shows that the deep foundation pit supporting structure lectotype decision of FDA model has excellent discriminant performance and the resubstitution error rate is low. It is easy and

收稿日期:2011-04-10

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAB02A02);中南大学学位论文创新资助项目(2009ssxt230);湖南省博士生科研创新项目(CX2011B119)

作者简介:李必红(1975-),男,中南大学博士研究生,主要从事岩土工程教学研究工作,(E-mail) cslbihong@126.com。

efficient to make discriminant analysis using this model and it provides efficient method to select deep excavation retaining structure and a practical new approach to choose the structural type of deep foundation pit optimization.

Key words: deep foundation pit; supporting structure; lectotype decision; Fisher discriminant analysis; classification

随着地下空间的开发和利用,大量的深基坑工程应运而生,深基坑工程的重要性和复杂性也日益显露出来,成为工程界的一个热点和难点。特别是深基坑支护结构,它虽然属于临时性建筑,但它直接关系到整个工程的安全、工期和费用^[1-7]。因此,深基坑工程的发展对支护结构方案的合理选择和优化设计提出了更高的要求。对于提高施工的预见性和科学性,减少经济损失和人员伤亡具有深远的意义^[8-10]。

理论发展及工程实践推进了深基坑支护方案的发展,传统的人工选型方法存在的弊端显而易见。近年来随着计算机辅助技术、神经网络理论和决策支持系统理论蓬勃发展,呈现出一些新的选型方法或选型辅助方法^[10-19]。如人工神经网络^[10]、层次分析法^[11]、FEM 模型^[12]、模糊优化方法^[13]、灰色系统理论^[14]、物元分析方法^[15]、距离判别法^[16]、遗传算法^[17]、推理机制^[18]、模糊随机可靠度^[19]等。上述方法有其自身的特点,在辅助选型和决策时具有较高的智能化水平和工程可靠性,能有效解决深基坑支护结构选型决策问题。同时也存在一定的局限性,如有的评价方法过于简单,难以全面地反映不同深基坑支护方案的优劣;有的在选择权重时,采用专家打分法时,人为干扰较多;有的过于繁杂,无可比性,且计算过程复杂,难于掌握,数据处理量大,可操作性不强,设计人员在工程实践中不能自觉地采用而放弃了最优方案的寻找^[10]。因此要正确决策深基坑支护方案,需采用综合性强、适用面广、操作简单、人为干扰少的评价方法。

Fisher 判别分析法是根据已有观测样本的若干数量特征(判别因子)对新获得的样本进行识别,判断其属性的预测预报分析方法^[20-23]。由于该判别法对总体的分布类型没有要求,因此非常适合事先不知道样本分布的情况,且可以全面考虑影响决策的各种因素。鉴于此,笔者借鉴 Fisher 判别分析理论,建立了深基坑支护结构选型决策的 FDA 模型,并将该方法应用到实际工程中,试验结果验证了所提出的理论与方法的有效性与实用性。

1 Fisher 判别分析计算理论

1.1 FDA 模型的基本思想

Fisher 判别的基本思想是投影^[20-23],即将 K 组 p 维数据投影到某一个方向,使得组与组间的距离最大,然后借助一元方差分析的思想构造一个线性判别函数,其系数确定的原则是根据类间距离最大、类内离散性最小的原则确定线性判别函数,再根据建立的线性判别方程并结合合适的判别规则来判断待判样品的类别。经判别方程划分后,同类样品在空间上的分布集中,而不同类间距离较远,差别明显。

1.2 构造线性判别函数

设有 k 个 n 维深基坑支护结构选型类别 G_1, G_2, \dots, G_k , 其均值向量为 $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_k$, 协方差为 $\Sigma_1, \Sigma_2, \dots, \Sigma_k$ 。对水泥土重力式、土钉墙、桩锚、桩撑、地下连续墙等 5 种深基坑支护方案进行优选,因此 $k = 5$ 。对任意给定一样本 x , 考虑其线性判别函数: $y(x) = a^T x$, 则当 $x \in G_i$ 时, $y(x)$ 的均值和方差为

$$e_i = E\{y(x) | x \in G_i\} = a^T \mu_i, i = 1, 2, \dots, k, \quad (1)$$

$$\sigma_i^2 = D\{y(x) | x \in G_i\} = a^T \Sigma_i a, i = 1, 2, \dots, k. \quad (2)$$

$$\text{令 } B_0 = \sum_{i=1}^k \left(e_i - \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k e_i \right)^2 \text{ (组间差)}, \quad (3)$$

$$E_0 = \sum_{i=1}^k \sigma_i^2 = \sum_{i=1}^k a^T \Sigma_i a \text{ (组类差)}. \quad (4)$$

运用方差分析思想选择系数(权) a 使得判别效率 $\Delta(a) = B_0/E_0$ 达到最大。令 $\mu^T = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_k)_{n \times k}$, $B = \mu^T (I_k - J_k/k) \mu$, $E = \sum_{i=1}^k \Sigma_i$, 其中 μ_i 是 n 维向量, I_k 为 k 阶单位阵, J_k 表示元素全为 1 的 k 阶方阵, 则有

$$\Delta(a) = B_0/E_0 = a^T B a / a^T E a, \quad (5)$$

式中, B, E 为非负阵。

为确保解的唯一性,不妨设 $u^T E u = 1$, 考虑目标函数

$$\varphi(u) = u^T B u - \lambda(u^T E u - 1). \quad (6)$$

对式(6)求导得

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{u}} = 2(\mathbf{B} - \lambda \mathbf{E})\mathbf{u} = 0; \frac{\partial \varphi}{\partial \lambda} = \mathbf{u}^T \mathbf{E} \mathbf{u} - 1 = 0. \quad (7)$$

经整理得

$$(\mathbf{E}^T \mathbf{B} - \lambda \mathbf{I})\mathbf{u} = 0, \quad (8)$$

式中: \mathbf{u} 为最大特征值 λ 对应的特征向量, 由此可以求出判别函数的系数, \mathbf{I} 为组内离差平方和与组间离差平方和的比值, 解方程分别可求得 $\gamma-2$ 个判别函数 ($\gamma = \text{Min}[(G-1), k]$, 本文 $\gamma=4$), 每个判别函数都有一个衡量其判别能力的指标——贡献率^[20], 在实际运用中, 当累计贡献率 $P > 0.85$ 即可。

1.3 FDA 模型判别规则

对任意样本 x , 求判别函数为 $y_i = \mathbf{a}_i^T x$, 计算它与各支护类别的马氏 (Mahalanobis) 距离^[24] $\mathbf{D}_{Mi}^2 = \mathbf{D}_M(x, G_i) = (\mathbf{a}_i^T x - \mathbf{a}_i^T \boldsymbol{\mu}_i)^T (\mathbf{a}_i^T \sum_i \mathbf{a}_i)^{-1} (\mathbf{a}_i^T x - \mathbf{a}_i^T \boldsymbol{\mu}_i)$, $i=1, 2, \dots, k$ 。

判别规则为 $\mathbf{D}_i^2 = \max_{1 \leq i \leq k} \mathbf{D}_i^2$, 则 $x \in G_i$ 。 (9)

1.4 FDA 模型判别流程

应用 Fisher 判别分析法时, 首先选取训练样本, 通过一系列运算使其在一定的空间上投影, 要求投影尽可能分开, 然后对待测点进行诊断。诊断的第一步也是对待测点进行投影, 然后计算其投影与各样本投影的马氏距离, 通过比较各马氏距离的大小来判断待测样本的归类, 具体过程见图 1, 以下用这种方法对 5 种深基坑支护方案进行合理优选决策。

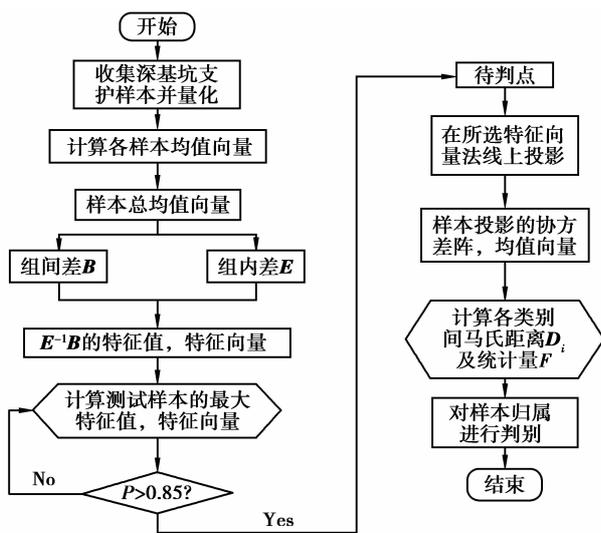


图 1 Fisher 判别分析流程图

1.5 判别准则的评价

判别方法的有效性表现在 2 个方面^[24]: 1) 是对

已知分类的样本的回代判别正确率高; 2) 是对于新样品的分类具有很高的判断正确率。为考察上述判别准则的优良性, 采用回代估计法来计算误判率^[20, 24]。以两总体 G_1, G_2 为例, 其中 $x_1^1, x_2^1, \dots, x_{n_1}^1$ 与 $x_1^2, x_2^2, \dots, x_{n_2}^2$ 是分别来自总体 G_1 和 G_2 的训练样本, 其容量分别为 n_1, n_2 ; 以全体训练样本作为 $n_1 + n_2$ 个新样本, 逐个代入已建立的判别准则中判别其归属, 并将误判个数对全体训练样本个数的比值作为误判率 η_r 的回代估计, 其回判结果见表 1。

表 1 回判结果示表

实际归类	G_1	G_2
G_1	n_{11}	n_{12}
G_2	n_{21}	n_{22}

其中 n_{12} 是将属于总体 G_1 的样本误判为总体 G_2 的个数; n_{21} 为将属于总体 G_2 的样本误判为总体 G_1 的个数; 总的误判个数为 $n_{12} + n_{21}$, 而两总体训练样本的总数是 $n_1 + n_2$, 则误判率 η_r 的回代估计为:

$$\eta_r = (n_{12} + n_{21}) / (n_1 + n_2). \quad (10)$$

2 深基坑支护结构选型的 Fisher 决策模型及应用

2.1 深基坑支护结构选型评价指标体系

评价指标的确定是深基坑支护结构选型评价的基础和关键, 直接影响到评价结果。确定的评价指标太多, 会增加指标体系的复杂程度和评价的难度, 甚至会掩盖关键因素; 指标太少, 评价简单易行, 但又难以全面反映深基坑支护工程的特点。参考有关深基坑结构选型指标体系研究^[10-19] 兼顾这 2 方面选取具有代表性 10 个因素进行分析, 即以基坑开挖深度、基坑平面尺寸、主导土层类别、土层数、土的平均重度、土的平均粘聚力、土的平均摩擦角、含水情况、变形要求及经济性要求等 10 项因素 (分别用 $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8, X_9, X_{10}$ 表示) 作为深基坑结构选型的决策指标, 其中对基坑平面尺寸、主导土层类别、含水情况、变形要求及经济性要求用半定量化的方法进行取值, 根据专家群的经验 and 计算机获得量化值, 其赋值情况详见表 2-4^[10]; 而基坑开挖深度、土层数、土的平均重度、土的平均粘聚力、土的平均摩擦角为定量指标, 可用实测值进行评价, 将深基坑支护结构选型情况分为水泥土重力式支护结构 G_1 、土钉墙支护结构 G_2 、桩锚支护结构 G_3 、桩撑

支护结构 G_4 、地下连续墙 G_5 等 5 个类别,并将这 5 种支护方式作为 FDA 模型的输出参数。

表 2 基坑平面尺寸、含水情况及变形要求评判标准

赋值	影响因素		
	基坑平面尺寸	含水情况	变形要求
0.20	小	较少	较低
0.40	中	一般	一般
0.60	大	较多	严格
0.80	特大	丰富	很严

表 3 主导土层评判标准

赋值	0.20	0.35	0.50	0.65	0.80
主导土层类别	淤泥	砂土	填土	粉土	黏土

表 4 经济性要求评判标准

赋值	0.20	0.50	0.80
经济性要求	较低	一般	高

2.2 FDA 决策模型的建立

以文献[10]所提供的 74 组深基坑支护工程实例数据作为总体样本,选取其中 64 组样本作为学习样本进行训练,剩余 10 组样本数据作为待判样本进行检验。(限于篇幅,每个类别只列出前 5 个样本数据,具体可参见文献 10),如表 7 所示。根据 Fisher 判别分析计算理论,建立 FDA 模型,设置模型输入层节点数为 10, $X=[X_1, X_2, \dots, X_{10}]$ 对应深基坑结构选型的决策指标,输出层节点数为 5, $G=[G_1, G_2, \dots, G_5]$, 分别对应于 5 种支护方式,根据式(1)-(9)求得相应判别系数,进而得到 Fisher 判别函数为

$$y_1(x) = -4.896 + 0.053X_1 + 1.927X_2 + 6.561X_3 + 0.1X_4 + 0.073X_5 - 0.019X_6 + 0.027X_7 - 5.692X_8 + 0.874X_9, \quad (11)$$

$$y_2(x) = -8.496 + 0.074X_1 + 1.489X_2 - 1.382X_3 - 0.042X_4 + 0.061X_5 - 0.007X_6 - 0.014X_7 + 0.931X_8 + 10.481X_9, \quad (12)$$

$$y_3(x) = 1.697 - 0.002X_1 + 4.105X_2 + 2.860X_3 + 0.452X_4 - 0.448X_5 - 0.048X_6 + 0.057X_7 + 4.300X_8 - 3.220X_9, \quad (13)$$

$$y_4(x) = 5.392 + 0.056X_1 - 3.544X_2 + 3.279X_3 - 0.162X_4 - 0.441X_5 + 0.041X_6 - 0.007X_7 + 2.968X_8 + 0.918X_9. \quad (14)$$

由于判别因子经济性要求(X_{10})对判别结果影响较小,而不影响判别结果,所以在判别函数中没有显示。为了反映诸多指标的判别能力大小,可采用统计值 F 进行识别^[20, 24]。统计值 F 是指组间变异与组内变异均方差的比值,正好反映了不同指标的判别能力,即 F 越大识别能力越强。经计算得参与判别的各指标 F 值依次为 0.057 7、0.062 4、0.326 2、0.023 5、0.053 4、0.026 7、0.037 6、0.191 8、0.220 7。由此可见,主导土层类别及变形要求判别能力最强,其后依次为含水情况、基坑平面尺寸、基坑开挖深度、土的平均重度、土的平均摩擦角、土的平均粘聚力、土层数,可以为同类深基坑支护结构选型评价中在选取评价因子方面提供有益参考。

Fisher 判别分析中,判别方程的解释量可以用其方差所占的比例来解释,从表 5、6 可知,4 个判别函数判别能力是显著的。第 1 判别函数对应特征值为 6.226,方差贡献率(判别效率)为 66.0%,即可解释样本大部分信息,且正则相关系数很高,为 0.928; λ 值非常小,为 0.020, P 值 $0.000 \ll 0.05$,通过显著性检验,判别函数能很好地区分各类别;第 2 判别函数对应特征值为 2.205,方差贡献率(判别效率)为 23.4%,累计方差贡献率为 $66.0\% + 23.4\% = 89.4\% > 85\%$,即可解释样本绝大部分信息;然仅利用此函数还不能完成全部样品的判别,而当联合运用 4 个判别函数来判别样本时,则可解释所有样本 100%的信息,即当利用式(11)无法对样本属类做出明确判断时,可结合式(12)甚至式(13)、(14)来实现完全判断。

表 5 Fisher 判别函数附加特征值

函数	特征值	方差的%	累积%	正则相关性
1	6.226	66.0	66.0	0.928
2	2.205	23.4	89.4	0.829
3	0.844	8.9	98.3	0.676
4	0.159	1.7	100.0	0.370

表 6 Fisher 判别函数维尔克斯 λ 统计量

函数检验	Wilks 的 Lambda	卡方	自由度 df	双侧检验 Sig.
1 到 4	0.020	218.500	36	0
2 到 4	0.146	107.748	24	0
3 到 4	0.468	42.522	14	0
4	0.863	8.263	6	0.219

2.3 FDA 决策模型的检验

为了考察深基坑支护结构选型的 FDA 模型的有效性和准确性,用建立的模型对 64 组训练样本数据逐一回判,并与实际情况比较,将检验结果列入表 8。为了进一步描述该模型的预测效果,图 1 表示出了模型第一、第二判别函数分组的检验及预测情况。根据式(10)可得回判估计误判率 η_r 为 14.1%,正确率高;由图 2 可见,五类别分类预测性能良好,组内离散性小,组间距离大,证明所建立的 FDA 模型是稳定而且可靠的。然后用该模型对剩下 10 组样本进行决策,准确率 100%(见表 8)。由此可见,FDA 模型用于深基坑支护结构选型决策是高效并稳健可靠,可投入实际使用。

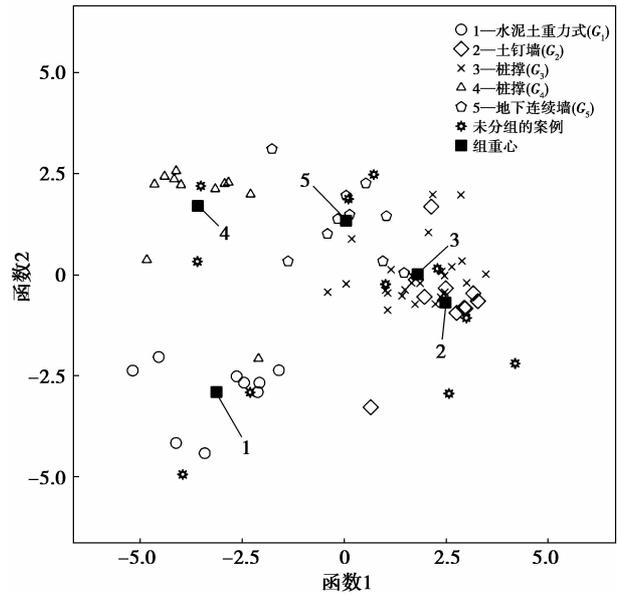


图 2 第一、第二判别函数分组简图

表 7 国内若干工程深基坑支护结构选型分析初始数据资料

编号	工程名称	判别因子										支护结构形式
		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	
1	泉州远太大厦	7.00	小	淤泥	4	16.2	10.3	17.1	丰富	一般	较低	水泥土重力式
2	泉州富豪大厦	6.20	小	淤泥	6	18.3	7.1	18.9	较多	不要求	较低	水泥土重力式
3	华虹 NEC 辅助厂房	6.70	中	淤泥	7	18.4	23.2	19.3	丰富	一般	较低	水泥土重力式
4	上海某高层	6.60	中	砂土	5	18.0	12.0	5.5	丰富	不要求	较低	水泥土重力式
5	福源花园(深圳)	9.30	中	填土	6	17.8	25.0	15.0	较多	一般	较低	水泥土重力式
6	东莞市时代广场	10.50	大	黏土	2	20.0	30.0	24.0	一般	严格	较低	土钉墙
7	深圳民航大厦	13.50	中	黏土	5	18.1	20.0	22.0	一般	严格	较低	土钉墙
8	广州华晖广场	11.20	中	黏土	4	20.5	15.0	15.0	较少	严格	较低	土钉墙
9	大连市中银大厦	13.30	小	黏土	4	20.0	12.8	17.1	一般	一般	较低	土钉墙
10	吴县市吴中大厦	5.90	中	黏土	4	19.0	30.0	12.0	较少	严格	较低	土钉墙
11	天津邮电通讯中心大厦	11.50	大	黏土	8	19.0	28.2	17.3	一般	严格	一般	桩锚
12	厦门体育东村八组团	9.80	中	填土	5	16.5	10.0	6.0	一般	严格	一般	桩锚
13	厦门邮电大厦	18.30	特大	填土	6	18.4	15.3	20.0	较多	严格	一般	桩锚
14	厦门华能大厦	5.30	中	黏土	6	17.8	14.5	17.3	一般	很严	一般	桩锚
15	厦门普达广场	14.50	大	黏土	6	20.6	15.0	30.0	较多	很严	一般	桩锚
16	厦门铁道大厦	10.50	中	砂土	5	20.0	23.0	27.0	较多	一般	高	桩撑
17	泉州建设银行大厦	10.50	中	淤泥	5	18.0	16.0	20.0	较多	很严	高	桩撑
18	上海远东大厦	11.00	中	淤泥	6	18.0	10.5	14.8	较多	很严	高	桩撑
19	福州吉翔双子星大厦	9.00	中	淤泥	4	16.0	10.0	9.0	一般	很严	高	桩撑
20	上海万宝花园	9.50	中	淤泥	5	17.0	10.4	8.0	丰富	很严	高	桩撑
21	上海国际贸易中心大厦	10.30	大	黏土	5	17.6	14.0	12.5	丰富	很严	高	地下连续墙
22	福州新世纪大厦	25.20	小	黏土	10	18.8	14.8	11.7	丰富	很严	高	地下连续墙
23	南京“状元楼二期工程”	6.40	中	黏土	4	16.4	15.0	22.4	较多	很严	高	地下连续墙
24	上海证券大厦	9.50	小	黏土	6	18	13.7	25.1	丰富	严格	高	地下连续墙
25	漳州市闹市区某工程	12.00	大	淤泥	6	17.8	12.8	18.7	一般	很严	高	地下连续墙
1*	上海市申航大楼	5.50	小	填土	4	17.5	19.7	15.0	较多	一般	较低	水泥土重力式
2*	(南京)某工程	5.00	小	砂土	6	17.7	11.8	30.0	较多	严格	较低	水泥土重力式
3*	文锦渡商检大厦	9.60	中	黏土	5	18.3	21.4	21.0	很少	严格	较低	土钉墙
4*	陕西省人民医院门急诊	10.50	中	黏土	4	18.4	18.2	14.7	很少	一般	较低	土钉墙
5*	中国工行总行办公楼	15.00	特大	黏土	4	19.8	20.0	31.5	很少	严格	一般	桩锚

续表 7

编号	工程名称	判别因子										支护结构形式
		X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	
6*	北方方圆大厦	15.27	特大	黏土	6	19.0	16.0	30.0	一般	严格	一般	桩锚
7*	杭州市德雅花园	7.10	中	淤泥	4	18.0	18.0	13.0	丰富	严格	高	桩撑
8*	厦门茶叶进出口综合楼	10.00	中	淤泥	4	17.8	17.5	10.5	丰富	严格	高	桩撑
9*	广东省工商银行大楼	20.30	中	粉土	6	20.3	18.1	20.5	丰富	很严	高	地下连续墙
10*	上海淮海中路某商办楼	14.20	中	黏土	5	18.0	14.0	20.0	较多	严格	高	地下连续墙

表 8 FDA 模型预测结果和期望输出

编号	判别因子										判别结果	
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	期望输出	实际输出
1	7.0	0.2	0.20	4	16.2	10.3	17.1	0.8	0.4	0.2	G_1	G_1
2	6.2	0.4	0.20	6	18.3	7.1	18.9	0.6	0.2	0.2	G_1	G_1
3	6.7	0.4	0.20	7	18.4	23.2	19.3	0.8	0.4	0.2	G_1	G_1
4	6.6	0.4	0.35	5	18.0	12.0	5.5	0.8	0.2	0.2	G_1	G_1
5	9.3	0.4	0.50	6	17.8	25.0	15.0	0.6	0.4	0.2	G_1	G_1
6	10.5	0.6	0.80	2	20.0	30.0	24.0	0.2	0.6	0.2	G_2	G_2
7#	13.5	0.6	0.80	5	18.1	20.0	22.0	0.4	0.6	0.2	G_2	G_3
8	11.2	0.4	0.80	4	20.5	15.0	15.0	0.4	0.6	0.2	G_2	G_2
9	13.3	0.4	0.80	4	20.0	12.8	17.1	0.2	0.6	0.2	G_2	G_2
10	5.9	0.2	0.80	4	19.0	30.0	12.0	0.4	0.4	0.2	G_2	G_2
11	11.5	0.6	0.80	8	19.0	28.2	17.3	0.4	0.6	0.5	G_3	G_3
12#	9.8	0.4	0.50	5	16.5	10.0	6.0	0.6	0.6	0.5	G_3	G_5
13#	18.3	0.8	0.50	6	18.4	15.3	20.0	0.4	0.8	0.5	G_3	G_5
14	5.3	0.4	0.80	6	17.8	14.5	17.3	0.6	0.8	0.5	G_3	G_3
15	14.5	0.6	0.80	6	20.6	15.0	30.0	0.4	0.6	0.5	G_3	G_3
16#	10.5	0.4	0.35	5	20.0	23.0	27.0	0.6	0.4	0.8	G_4	G_1
17	10.5	0.4	0.20	5	18.0	16.0	20.0	0.6	0.8	0.8	G_4	G_4
18	11.0	0.4	0.20	6	18.0	10.5	14.8	0.6	0.8	0.8	G_4	G_4
19	9.0	0.4	0.20	4	16.0	10.0	9.0	0.4	0.8	0.8	G_4	G_4
20	9.5	0.4	0.20	5	17.0	10.4	8.0	0.8	0.8	0.8	G_4	G_4
21	10.3	0.6	0.80	5	17.6	14.0	12.5	0.8	0.8	0.8	G_5	G_5
22	25.2	0.2	0.80	10	18.8	14.8	11.7	0.8	0.8	0.8	G_5	G_5
23	6.4	0.4	0.65	4	16.4	15.0	22.4	0.6	0.8	0.8	G_5	G_5
24	9.5	0.2	0.80	6	18.0	13.7	25.1	0.8	0.8	0.8	G_5	G_5
25#	12.0	0.6	0.20	6	17.8	12.8	18.7	0.4	0.6	0.8	G_5	G_4
1*	5.5	0.2	0.50	4	17.5	19.7	15.0	0.6	0.4	0.2	G_1	G_1
2*	5.0	0.2	0.35	6	17.7	11.8	30.0	0.8	0.2	0.2	G_1	G_1
3*	9.6	0.4	0.80	5	18.3	21.4	21.0	0.2	0.6	0.2	G_2	G_2
4*	10.5	0.4	0.80	4	18.4	18.2	14.7	0.2	0.4	0.2	G_2	G_2
5*	15.0	0.8	0.80	4	19.8	20.0	31.5	0.2	0.4	0.5	G_3	G_3
6*	15.27	0.8	0.80	6	19.0	16.0	30.0	0.6	0.6	0.5	G_3	G_3
7*	7.1	0.4	0.20	4	18.0	18.0	13.0	0.6	0.8	0.8	G_4	G_4
8*	10.0	0.4	0.20	4	17.8	17.5	10.5	0.6	0.6	0.8	G_4	G_4
9*	20.3	0.4	0.65	6	20.3	18.1	20.5	0.6	0.8	0.8	G_5	G_5
10*	14.2	0.4	0.80	5	18.0	14.0	20.0	0.8	0.8	0.8	G_5	G_5

说明: # 为回代估计误判样本; * 为待判样本

3 工程实例

新世界中心工程^[10]由深圳市新世界地产投资建设的一座以办公为主要功能的综合性大楼,它位

于深圳市福田区中心区,占地面积为 5 578.19 m²,拟建地面以上 56 层,设 3 层地下室,总建筑高度为 220 m,基坑开挖深度为 12.0~15.4 m,开挖平面形状呈一多边形近似方形,基坑周长为 300 m。该工程

位于新城市建设中心区,周围环境比较复杂;场地土层以黏土为主。场地地下水含水量丰富,勘察期间测得的稳定地下水埋深为 7.2~8.8 m。该工程实

测输入数据见表 9^[10]。利用学习好的 FDA 模型对该工程的支护结构选型进行决策。

表 9 新世界中心工程评价结果对比表

判别因子										判别结果		
X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	实际类别	ANN	FDA
15.05	0.4	0.80	4	19.0	20.0	22.0	0.6	0.6	0.5	G_3	G_3	G_3

根据 Fisher 判别准则,FDA 模型输出为 G_3 ,即最佳支护方案为桩锚支护结构,见表 7。在实际工程中,新世界中心工程采用的支护结构是人工挖孔桩加预应力锚索的联合支护结构。选型结果与工程实际是吻合的,说明了该模型的工程应用具有适用性和可靠性;并和人工神经网络(ANN)法的预测结果一致^[10],可见 2 种方法所得结果较为一致,说明所建议的决策方法是高效可靠的。与人工神经网络方法相比,FDA 优点在于判别模型的结构固定,不会因为样本数量的变化改变网络结构,并且学习效率高,不需要经过很长时间的训练。在实际工程应用中,可根据具体情况,广泛收集工程实例资料,建立相应的样本数据库,增强模型的识别能力。使得深基坑支护结构选型决策的 FDA 模型进一步完善,预测结果更加符合实际。

4 结 语

1)将 FDA 应用到深基坑支护结构选型决策问题中,选用基坑开挖深度、基坑平面尺寸、主导土层类别、土层数、土的平均重度、土的平均黏聚力、土的平均摩擦角、含水情况、变形要求、经济性要求等 10 个实测指标作为判别因子,通过对 64 组工程实例样本的学习,建立了优选方案的 FDA 模型。并利用回代估计法进行检验,误判率很低。利用经过训练后的判别模型对预测样本和工程实例进行判别,预测结果与实测结果完全一致。

2)由各判别因子的统计量 F 值可得,主导土层类别及变形要求判别能力最强,其后依次为含水情况、基坑平面尺寸、基坑开挖深度、土的平均重度、土的平均摩擦角、土的平均粘聚力、土层数,可以为同类深基坑支护结构选型评价中在选取评价因子方面提供相应参考。

3)基于 Fisher 判别分析理论的深基坑支护结构选型决策模型,解决深基坑支护结构型式的优化选择问题,使深基坑支护结构选型决策在科学化、结构化、智能化方面向前迈进一步,同时,为实际工程

的应用和其他智能决策系统的研究提供有益的借鉴。

参考文献:

- [1] 肖武权,冷伍明. 深基坑支护结构设计的优化方法[J]. 岩土力学,2007,28(6):1201-1211.
XIAO WU-QUAN, LENG WU-MING. Optimization methods of retaining structure in deep foundation pit[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(6): 1201-1211.
- [2] LUO Z J, ZHANG Y Y, WU Y X. Finite element numerical simulation of three-dimensional seepage control for deep foundation pit dewatering[J]. Journal of Hydrodynamics,2008,20(5):596-602.
- [3] JURAN I. Kinematical limit analysis of earth support system [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1981(12):47-60.
- [4] TEEHEBOTORRIOFF G P. Foundations, Retaining and Earth Structures [M]. NewYork: McGraw Hill Book Company,1973.
- [5] SARLBAS A, ERBATUR F. Optimization and sensitivity of retaining structures [J]. Journal of Geotechnical Engineering,1996,122(8):649-656.
- [6] 严薇,曾友谊,王维说. 深基坑桩锚支护结构变形和内力分析方法探讨[J]. 重庆大学学报,2008,31(3): 344-348.
YAN WEI, ZENG YOU-YI, WANG WEI-SHUO. Analytic method discussion on deformation and inner force of the pile-anchor structure of deep excavation under construction [J]. Journal of Chongqing University,2008,31(3):344-348.
- [7] 徐杨青. 深基坑工程设计方案优化决策与评价模型研究[J]. 岩土工程学报,2005,27(7):844-848.
XU YANG-QING. Study on the optimum decision-making and evaluation model for the design of deep excavations [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2005,27(7):844-848.
- [8] WHITTLE A J, HASHASH Y M A, WHITMAN R V. Analysis of deep excavation in boston[J]. Journal of

- Geotechnical Engineering, 1993, 119(1): 69-90.
- [9] MICHAEL L. Database for retaining wall and ground movements due to deep excavations [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 27(15): 203-224.
- [10] 范迎春. 深基坑支护结构选型决策方法的研究与应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2005.
- [11] 王永祥, 陈进, 黄滢. 层次分析法在深基坑支护方案优选中的应用[J]. 华东交通大学学报, 2004, 21(2): 31-34.
WANG YONG-XIANG, CHEN JIN, HUANG YING. Application of analytical hierarchy process to the selection of foundation pit retaining programmers [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2004, 21(2): 31-34.
- [12] YAO A G, SMINTH I M, TANG F L, A Comprehensive method for designing support structure of excavation [C] // The International Conference on Geotechnical and Geological Engineering, November 19-24, 2000, Melbourne, Australia. [S. l.]: CRC, [2000]: 11.
- [13] 曹文贵, 张永杰, 赵明华. 基坑支护方案确定的区间关联模糊优化方法研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(1): 66-71.
CAO WEN-GUI, ZHANG YONG-JIE, ZHAO MING-HUA. Study on interval relative fuzzy optimization method to determining support schemes for foundation pits [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(1): 66-71.
- [14] 阮永芬, 叶燎原. 用灰色系统理论与方法确定深基坑支护方案[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7): 1203-1206.
RUAN YONG-FEN, YE LIAO-YUAN. Determination of deep foundation pit supporting scheme by using the gray system theory and method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(7): 1203-1206.
- [15] 冯玉国, 王渭明. 深基坑支护方案灰色物元分析优化模型及其应用[J]. 岩土力学, 2009, 30(8): 2467-2470.
FENG YU-GUO, WANG WEI-MING. An optimization model of grey matter element analysis of supporting schemes for deep foundation pit and its application [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(8): 2467-2470.
- [16] 金志仁, 何继善. 基于距离判别分析方法的深基坑支护方案优选研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(8): 2423-2430.
JIN ZHI-REN, HE JI-SHAN. Optimization of supporting plan for deep foundation pit based on distance discriminant analysis method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(8): 2423-2430.
- [17] 周海清, 陈正汉, 朱元青. 遗传算法在深基坑支护结构选型中的应用[J]. 岩土力学, 2004, 25(12): 2023-2027.
ZHOU HAI-QING, CHEN ZHENG-HAN, ZHU YUAN-QING. Application of genetic algorithm to selecting the retaining structure type for deep foundation pit [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(12): 2023-2027.
- [18] 张信贵, 吴恒, 易念平, 等. 深基坑支护工程方案推理机制与优化设计[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(5): 871-876.
ZHANG XIN-GUI, WU HENG, YI NIAN-PING, et al. Inference mechanism and optimum design of retaining structure for deep foundation pit [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(5): 871-876.
- [19] 段绍伟, 沈蒲生, 蒋建国. 深基坑支护结构选型的模糊随机可靠度研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2001, 28(6): 97-100.
DUAN SHAO-WEI, SHEN PU-SHENG, JIANG JIAN-GUO. Fuzzy random reliability research for selection of deep-excavation braced structures [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences Edition, 2001, 28(6): 97-100.
- [20] 邵淑彩, 孙韞玉, 何娟娟. 应用数理统计[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2005: 105-132.
- [21] MAX WELLING. Fisher linear discriminant analysis [EB/OL]. (2008-12)[2011-05-18]. http://www.ics.uci.edu/~welling/classnotes/papers_class/Fisher-LDA.pdf.
- [22] ZHOU J, SHI X Z, DONG L, et al. Fisher discriminant analysis model and its application for prediction of classification of rockburst in deep-buried long tunnel [J]. Journal of Coal Science and Engineering, 2010, 16(2): 144-149.
- [23] 董隴军, 李夕兵, 白云飞. 急倾斜煤层顶煤可放性分类预测的 Fisher 判别分析模型及应用[J]. 煤炭学报, 2009, 34(1): 58-63.
DONG LONG-JUN, LI XI-BING, BAI YUN-FEI. A Fisher discriminant analysis model for classifying of roof coal cavability of steep seam [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(1): 58-63.
- [24] 周健, 史秀志, 王怀勇. 矿井突水水源识别的距离判别分析模型[J]. 煤炭学报, 2010, 35(2): 278-282.
ZHOU JIAN, SHI XIU-ZHI, WANG HUAI-YONG. Water-bursting source determination of mine based on distance discriminant analysis model [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(2): 278-282.