

集成回填材料的土水特征曲线测定

陈巧红¹, 易发成¹, 张 涛²

(1. 西南科技大学核废物与环境安全国防重点学科实验室, 绵阳 621010;

2. 江西省地质环境监测总站, 南昌 330095)

摘要: 以膨润土为基材, 添加沸石、黄铁矿制备高压实集成回填材料, 采用渗析法和汽相法分别测得其在不同温度及自由、侧限条件下的土水特征曲线(SWCC), 并采用 SWCC 模型对实验数据进行拟合。结果表明: 低吸力范围内, 施加相同的初始吸力, 最终测得 50℃ 试样含水率 > 20℃ 对应含水率, 原因是温度影响渗析法所测吸力值及试样饱和后的微观结构; 高吸力范围内, 同一吸力值 80℃ 对应的含水率最小, 土水特征曲线斜率随温度升高而增大。应力状态对土水特征曲线的影响, 在低吸力范围内显著, 而高吸力范围内则影响不大。这与材料的微观结构有关。Van Genuchten 模型对实测数据的拟合效果最佳。

关键词: 集成回填材料; 土水特征曲线(SWCC); 温度; 应力状态; Van Genuchten 模型

中图分类号: U214.9+2

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2012)03-0124-05

高放废物深地质处置库采用多重工程屏障系统^[1], 其中回填材料是最后一道工程屏障。根据深地质处置库对回填材料性能的要求, 高压实膨润土被认为是最适合的材料。然而, 纯膨润土的导热性能低、塑性高, 不利于核素衰变热量的散发及回填材料制样^[2], 因此, 以膨润土为基材, 在不降低其性能的前提下, 添加其他材料制成集成回填材料, 来改善导热性、化学稳定性等, 能更大程度地满足处置库的安全性能要求。

处置库中的回填材料受地下水、应力及核废料放热产生的温度等因素影响, 在热-力-水多场耦合分析中, 回填材料的土水特性发挥着重要的作用^[3], 同时, 土水特征曲线能预测非饱和渗透系数^[4], 与饱和土的强度参数相结合来计算非饱和土抗剪强度^[5]。

目前, 关于缓冲回填材料土水特性的温度效应及应力状态影响的研究, 国内外已取得了一定成果。叶为民等^[6]研究了高压实高庙子膨润土在不同温度下的土水特征曲线。Villar 和 Lloret^[7]研究了温度、侧限和无侧限条件对 FEBEX 膨润土土水特征曲线的影响。然而, 对混合材料土水特征曲线研究甚少, 尤其是较大

吸力范围内温度的影响效应。

本文采用渗析法和饱和盐溶液法, 在较宽的吸力范围内测定集成回填材料吸湿过程的土水特征曲线(SWCC), 试图分析温度和应力状态对土水特征曲线的影响, 并选用 Van Genuchten 模型、Fredlund and Xing⁴ 参数模型和 Brooks Corey 模型, 采用 Origin8.0 进行实测数据拟合, 加深理解土水特征曲线变化规律。

1 实验材料及方法

1.1 实验材料

新疆阿尔泰膨润土矿床位于新疆塔城地区和布克赛尔县境内, 其主要矿物为 Na-蒙脱石, 含量约 65%, 另有少量 α -石英, 阳离子交换容量 1.02mmol/g, 比重 2.49, 液限 102.7%, 塑限 36.4%。新疆沸石为板状、片状、针状, 其主要矿物组成为丝光沸石、斜发沸石、叶沸石、石英, 另有少量蒙脱石、长石、水云母, 阳离子交换容量 0.867mmol/g, 比重 2.52, 液限 71%, 塑限 41.7%。黄铁矿的主要矿物成分为 FeS_2 及少量石英、白云石, 比重 4.15。

根据回填材料的性能要求, 本次实验选取以膨润土为主体, 并加沸石、黄铁矿等集成^[8]制备试样, 其基本性质见表 1。其中, 膨润土各项性能俱佳, 被用作集成回填材料的基材; 沸石对放射性核素具有优异的吸附性能^[9], 通过添加它来改善吸附及工程性能; 选择黄铁矿提供还原环境^[10], 进而提高化学稳定性及导热性。

1.2 试样制备

收稿日期: 2011-08-25; **修订日期:** 2011-10-27

基金项目: 国防科研项目(A3120080126); 四川省科技厅应用基础研究项目(2010Jy0164); 四川省教育厅重点项目(川教函[2009]749)

作者简介: 陈巧红(1988-), 女, 硕士, 地质工程专业, 主要从事环境地质研究。

E-mail: happyrunning@yeah.net

根据实验所需试样的质量,取 108℃ 下烘干,过 200 目筛的集成材料适量,按初始含水率 15%,计算所加水量;用喷雾法加水,充分搅拌均匀后,装入密封袋内润湿 60h 备用;根据体积及初始干密度 $1.7\text{g}/\text{cm}^3$,计算制样所需的湿土量。采用静压法制样,将集成回填材料加工成 $\varphi 20\text{mm} \times 10\text{mm}$ 的饼状。

表 1 集成回填材料基本性质

Table1 Basic properties of integrated backfill material	
性质	参数
比重	2.51
液限(%)	85.2
塑限(%)	40.5
吸蓝量(mmol/g)	0.797
阳离子交换容量(mmol/g)	0.877

1.3 吸力量测方法

本次实验分为低、高吸力段,进行多组试样平行测试,其吸力控制顺序均为吸湿过程。

1.3.1 渗析法

低吸力段量测采用渗析法(图 1)。

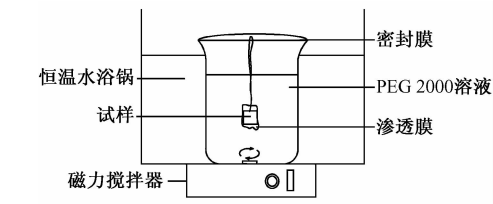


图 1 渗析法装置示意图
Fig.1 Apparatus of the osmotic technique

本次实验采用 PEG2000 溶液,实验过程中采用磁力搅拌器搅拌溶液以保持其浓度均匀,同时使用折射计测定并调整其浓度,溶液浓度用 Brix 指数表示,不同吸力对应的 Brix 指数见表 2。对一组试样进行含水量随时间变化关系的测试,发现试样与溶液中的吸力达到平衡所需时间为 15d 左右。

表 2 不同吸力对应的 Brix 指数

Table 2 Corresponding suction of the Brix index					
吸力(MPa)	0.01	0.05	0.1	0.5	1
Brix 指数(%)	2.6	5.68	7.8	15.82	20.85

侧限条件是指集成回填材料的体积受限无法自由膨胀。先将半透膜放于试样两侧,然后拧紧模具螺丝,使试样通过模具盖上的小孔与 PEG 溶液进行吸力平衡。

1.3.2 汽相法

汽相法(图 2)将一定湿度的空气强加于试样以控

制其吸力^[6],其量测吸力的范围取决于所选盐溶液的类型及实验温度。

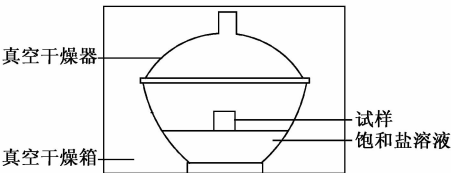


图 2 汽相法装置示意图
Fig.2 Apparatus Setup of the vapor phase technique

为了研究温度对材料土水特性的影响,选用不同盐溶液,其对应吸力见表 3。

表 3 不同温度下饱和盐溶液对应的吸力值

盐溶液	温度(℃)		
	20 ^[11]	50	80
K ₂ SO ₄	4.2	7.6	8.2
ZnSO ₄	12.6	—	—
(NH ₄) ₂ SO ₄	24.9	—	—
KCl	—	31.4	—
NaCl	38.0	46.0	48.0
Mg(NO ₃) ₂	82.0	128.0	—
K ₂ CO ₃	113.0	—	165.0
MgCl ₂	—	180.0	216.0
LiCl	309.0	329.0	357.0

注:—表示未选取吸力;吸力值单位:MPa。

实验过程中,每隔 3 天取出试样称重,连续 3 次质量不发生变化时,即认为吸力达到平衡。

2 结果与讨论

2.1 温度的影响

本次实验温度由恒温水浴锅(20℃)和真空干燥箱(50℃、80℃)来控制,高吸力范围共进行 3 组平行测试,取其平均重力含水率作为最终含水率值,绘制不同温度下吸力-含水率关系曲线(图 3)。由图 3 可知,温度对集成回填材料高吸力范围内土水特征曲线的影响表现为:随着温度升高,相同吸力对应的含水率减小;温度越高,吸力对含水率的变化表现得越敏感,土水特征曲线下降的速度越快。

文献[6~7]认为,高吸力范围内温度对试样微观结构、微孔水及表面张力的影响,是引起土水特征曲线不同的主要原因。具体来说,集合体内水因结合紧密具有很高的密度,高温产生的热量可以使该类水转化为低密度的集合体间水,集合体间水将占据更大的孔

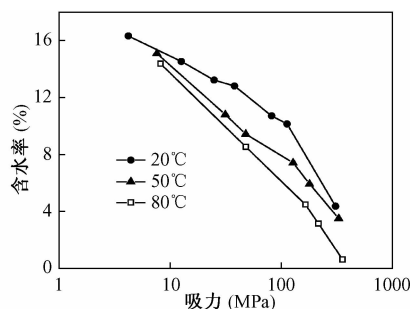


图3 温度对高吸力范围内土水特征曲线的影响
Fig.3 Effect of temperature on SWCC at high suctions

容并产生较高的饱和度,然而,吸力一定时,大孔隙的饱和度不变,大量的水要从大孔隙中流出。因此,同一个吸力值,80℃时对应的含水率最小。

对2组试样施加相同的初始吸力(表2),即初始条件下,PEG溶液的浓度相同。在不同温度(20℃和50℃)状态下通过渗析达到吸力平衡,测得的最终含水率见表4。

表4 不同温度下吸力平衡时试样的含水率

Table 4 Corresponding water content of the samples achieving suction equilibration at different temperatures

温度(℃)	含水率(%)				
20	65.38	54.61	50.15	41.21	35.81
50	73.02	63.78	59.11	51.10	44.51

从表4可以看出,20℃时试样与PEG溶液吸力达到平衡后,其含水率明显低于50℃时含水率。究其原因,本文认为:常温下,渗析技术所测吸力值由PEG溶液浓度控制,而在高温条件下,尽管施加的初始吸力不受温度影响,但渗析过程在温度的作用下,最终测得的吸力值不等于初始吸力值。另外,在低吸力范围内,采用渗析法进行土水曲线测定实验,是一个试样吸水饱和的过程,试样在不同温度下达到饱和时所对应的含水率也不相同。Romero等人^[12]对压实OPHELIE在不同温度下饱和后的孔隙分布进行研究,发现温度升高引起水化力和扩散双电层的改变将影响集合体内孔隙分布情况,高温饱和试样中出现的新孔,其密度远远高于低温饱和试样中的同类孔。因此,对于一特定吸力,50℃对应的含水率要高于20℃时的含水率。

综上所述,本次实验未能给出温度对低吸力范围内土水特征曲线的影响规律,但实验结果对选择吸力量测技术,尤其是考虑温度影响,具有重要的参考价值。同时,对今后研究回填材料在不同温度下饱和后

的微观结构有一定指导意义。

2.2 应力状态的影响

本次实验在20℃下测得了自由与侧限条件下集成回填材料的土水特征曲线,如图4所示。

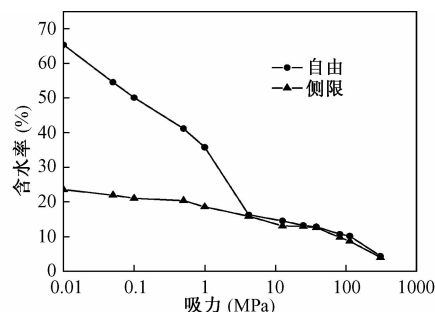


图4 应力状态对土水特征曲线的影响
Fig.4 Effect of the stress state on SWCC

由图4可知,不同应力状态对集成回填材料土水特征曲线的影响,也可以从低吸力和高吸力两个方面分析。在高吸力范围内,应力状态对土水特征曲线的影响不明显,相同吸力对应的含水率相差约1%。在低吸力范围内,自由膨胀条件下的SWCC位于侧限条件SWCC之上,且自由条件下含水率从35.81%(1MPa)迅速增加到65.38%(0.01MPa),而侧限条件下,相应含水率仅增加了4.95%,即水只能填充有限的孔隙。这与叶为民等^[11]对高庙子膨润土的研究结论一致,而两者在数值上相差甚远。尤其当吸力为0.01MPa时,高庙子膨润土的含水量(164%)远大于本文所用集成回填材料的含水量(65%),主要原因是二者塑性指数不同。

由于本实验材料的特殊性,对其微观结构的研究实验尚不多,因此,未能给出具体的孔隙分布数据。

2.3 土水特征曲线的拟合

常用土水特征曲线模型有:Van Genuchten模型、Fredlund and Xing⁴参数模型和Brooks Corey模型。Van Genuchten模型^[13]为:

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{[1 + (a\psi)^n]^{(1-\frac{1}{n})}} \quad (1)$$

Fredlund and Xing⁴参数模型^[14]为:

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{\{\ln[e + (\psi/a)^n]\}^{(1-\frac{1}{n})}} \quad (2)$$

Brooks Corey模型^[15]为:

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{a}{\psi} \right)^n \quad (3)$$

式中: θ ——体积含水率(%);

θ_s ——饱和体积含水率(%);

θ_r ——残余含水率(%)；

ψ ——基质吸力(MPa)；

a 和 n ——拟合参数。

本文采用以上3种模型,通过最小二乘法对20℃自由膨胀条件下的实测土水特征曲线进行拟合,采用的拟合软件是 Origin8.0。拟合结果见图5。实验测得的含水率为重力含水率 ω ,其与体积含水率的关系为:

$$\theta = \frac{\omega G_s}{1 + e} \quad (4)$$

式中: G_s ——材料比重;

e ——孔隙比。

其中,试样的孔隙比可通过测定其体积计算出干密度来得出。

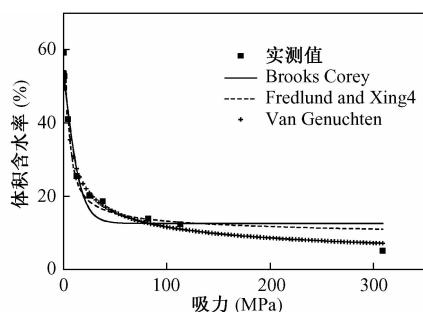


图5 实测曲线与拟合曲线比较

Fig.5 Comparison of the measured and fitted SWCC

从拟合结果可以看出, Van Genuchten 模型对实测土水特征曲线的拟合效果最佳; Fredlund and Xing4 参数模型拟合得到的土水特征曲线与实测曲线形状更为接近,但在接近 309MPa 的吸力段产生了较大偏差; Brooks Corey 模型的拟合效果最差。通过3种不同模型得到3种不同拟合效果,不仅可以加深理解土水特征曲线的变化规律,同时,也能说明不同模型只适用于不同条件下、不同种类的非饱和土。

3 结论

(1) 低吸力范围内,试样处于相同初始吸力环境,最终测得50℃试样含水率>20℃对应含水率,可能与温度对渗析法所测吸力值及试样饱和后微观结构的影响有关。而高吸力范围内,同一吸力值80℃对应的含水率最小,土水特征曲线斜率随温度升高而增大。

(2) 应力状态对集成回填材料土水特征曲线的影响在高吸力范围内不明显。在低吸力范围内,自由状态下,含水量随吸力下降迅速增加,而侧限状态下,含水量随吸力下降增加缓慢。

(3) Van Genuchten 模型能更好地拟合集成回填

材料实测土水特征曲线。

参考文献:

- [1] 崔素丽,张虎元,梁健,等. 膨润土-砂的膨胀特性与蒙脱石质量比率[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(4): 95-99. [CUI S L, ZHANG H Y, L J, et al. Swelling of bentonite - sand mixture as backfill/buffer material and montmorillonite quality ratio [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009, 36(4): 95-99. (in Chinese)]
- [2] 顾凯,施斌,唐朝生. 下蜀土-膨润土混合土的膨胀性试验及机理研究[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(4): 125-129. [GU K, SHI B, TANG C S. Experimental study and mechanisms of swelling properties of Xiashu - bentonite mixture [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, 38(4): 125-129. (in Chinese)]
- [3] 张虎元,张明,崔素丽,等. 混合型缓冲回填材料土水特征曲线测试与修正[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(2): 382-389. [ZHANG H Y, ZHANG M, CUI S L, et al. Determination and modification of soil water characteristic curves of bentonite - sand mixtures as high - level waste backfill/buffer material[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(2): 382-389. (in Chinese)]
- [4] 牛文杰,叶为民,陈宝,等. 高庙子膨润土的土水特征曲线与渗透系数[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(5): 952-955. [NIU W J, YE W M, CHEN B, et al. SWCC and Permeability of Unsaturated Gaomiaozi Bentonite in Free Swelling Condition [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(5): 952-955. (in Chinese)]
- [5] 周葆春,孔令伟,陈伟,等. 荆门膨胀土土水特征曲线特征参数分析与非饱和抗剪强度预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(5): 1052-1059. [ZHOU B C, KONG L W, CHEN W, Analysis of Characteristic Parameters of Soil Water Characteristic Curve (SWCC) and Unsaturated Shear Strength Prediction of JingMen Expansive Soil [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(5): 1052-1059. (in Chinese)]
- [6] YE Weimin, WAN Min, CHEN Bao, et al. Effect of temperature on soil - water characteristics and hysteresis of compacted Gaomiaozi bentonite [J]. J Cent South Univ Technol, 2009, 16: 821-826.
- [7] Villar M V, Lloret A. Influence of temperature on the

- hydro - mechanical behaviour of a compacted bentonite[J]. *Applied Clay Science*, 2004, 26(1/4): 337 - 350.
- [8] 范香. 回填材料的工程性能研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2010. [FAN X. The Engineering Properties of Backfill Materials [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)]
- [9] 李虎杰, 易发成, 侯兰杰, 等. 几种非金属矿缓冲回填材料性能研究[J]. *中国矿业*, 2006, 15(10): 101 - 104. [LI H J, YI F C, HOU L J, *et al.* Properties of non - metallic minerals for buffer - backfill materials [J]. *China Mining Magazine*, 2006, 15(10): 101 - 104. (in Chinese)]
- [10] 陈涛, 田文宇, 黎春, 等. 黄铁矿在维持高放废物处置库近场还原性环境中的作用[J]. *物理化学学报*, 2010, 26(9): 2489 - 2493. [CHEN T, TIAN W Y, LI C, *et al.* Role of Pyrite in Maintaining the Reductive Environment of the Near Field for a High - Level Radioactive Waste Repository [J]. *Acta Physico - Chimica Sinica*, 2010, 26(9): 2489 - 2493. (in Chinese)]
- [11] 叶为民, 钱丽鑫, 陈宝, 等. 高压实高庙子膨润土的微观结构特征[J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2009, 37(1): 31 - 35. [YE W M, QIAN L X, CHEN B, *et al.* Characteristics of Microstructure of Densely Compacted Gaomiaozi Bentonite [J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2009, 37(1): 31 - 35. (in Chinese)]
- [12] Romero E, Li X L. Thermo hydro mechanical tests using vapor and liquid transfer on a clay based mixture [C] // Tarantino A, Romero E, Cui Y J. *Advance Experimental Unsaturated Soil Mechanics*. London: Taylor and Francis Group, 2005: 483 - 488.
- [13] Van Genuchten M TH. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity for unsaturated soils [J]. *Soil Science Society of America*, 1980 (44): 892 - 898.
- [14] Fredlund D G, Xing A Q. Equations for soil water characteristic curve [J]. *Canadian Geo - technical Journal*, 1994, 31: 521 - 532.
- [15] Brooks R H, Corey A T. Hydraulic properties of porous media [D]. Fort Collins: Colorado State University, 1964.

Experiment for the characteristic curve of soil water of integrated backfill material

CHEN Qiao-hong¹, YI Fa-cheng¹, ZHANG Tao²

(1. *Key Lab of Nuclear Waste and Environmental Security, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China*; 2. *Jiangxi Institute of Geo - environment Monitoring, Nanchang 330095, China*)

Abstract: The highly compacted integrated backfill material is prepared by using bentonite mixed with zeolite and pyrite. The soil - water characteristic curve (SWCC) at different temperatures was obtained under different stress state by using osmotic and vapor phase technique. SWCC equations were used to fit the experiment data. The results show that water content reached at 50°C is greater than that at 20°C at low suctions, when the same initial suction is imposed, which is caused by the effect of temperature on suction measured by osmotic technique and micro - structure of saturated sample. At a specific high suction, water content at 80°C is the greatest, and the slope of curve increases with increasing temperature. In the range of low suctions, stress state has significant effect on SWCC, but has little effect at high suctions, which is related to the micro - structure of material. Results with the Van Genuchten model has a good fit for SWCC.

Key words: integrated backfill material; soil water characteristic curve; temperature; stress state; Van Genuchten model

责任编辑: 汪美华

砂土液化预测的 Fisher 判别分析模型及应用

赵小敏^{1,2}, 曹丽文¹

(1. 中国矿业大学资源与地球科学学院, 徐州 221008;

2. 淮北师范大学物理与电子信息学院, 淮北 235000)

摘要: 针对砂土地震液化预测问题, 基于 Fisher 判别分析原理(FDA), 选用平均粒径、不均匀系数、标贯击数、地下水水位、砂层埋深、剪应力与有效土覆应力比、地震烈度、震中距等8个实测指标为判别因子, 建立 Fisher 线性判别函数模型, 对砂土液化进行预测。研究表明, Fisher 判别分析结果与神经网络输出结果一致, 优于规范法和 Seed 法判别结果, 验证了该模型的合理性和可靠性。运用该模型进行判别分析, 简易方便, 分类效率高, 对砂土液化判别快速、有效, 模型适用性强, 具有一定的工程应用前景。

关键词: 砂土液化; 地震; Fisher 判别分析

中图分类号: P642. 27

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2012)03-0129-05

土体液化是指饱和状态砂土或粉土在一定强度的动荷载作用下表现出的类似液体的性质, 完全丧失强度和刚度的现象^[1]。地震、波浪、车辆、机器振动、打桩及爆破等都有可能引起饱和砂土或粉土的液化, 其中又以地震引起的大面积甚至深层的土体液化的危害性最大, 它具有面广、危害重等特点, 常能造成场地的整体性失稳^[1]。因此, 近年来引起国内外工程界的普遍重视, 成为工程抗震设计的重要内容之一。

传统的砂土液化预测方法是根据经验或规范得到某个单一指标, 与标准值进行比较, 以此作为液化的判别标准, 如剪切波速法、标准贯入法及静力触探法等^[2], 这类方法由于存在试验误差和不能考虑上覆土层厚度等不足, 容易出现判别误差或失误^[3]。随着现代数学和计算机的发展, 砂土液化预测模型中出现了模糊综合评判^[4]、灰色理论^[5]、神经网络^[6~8]、支持向量机^[9]、距离判别法^[10]等方法, 但这方法都有其优缺点。例如人工神经网络方法存在收敛速度慢等弱点; 当原始数据序列波动较大且信息过于分散时, 灰色理论预测精度将会降低; 模糊综合评判法常要对各指标赋予不同的权重, 而权重的确定不可避免地带有主观性和随意性。

Fisher 判别分析方法是根据已有的观测样本的若

干数量特征对新获得的样本进行识别、预测, 判断其所属类型的一种统计分析方法。由于该判别法对原始数据分布并无特殊要求, 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判别的各种因素。该方法已经在社会科学和自然科学的诸多领域得到应用, 如岩土工程及采矿工程等领域^[10~12]。本文基于 Fisher 判别理论, 建立了砂土震害液化的 FDA 模型, 并应用到实际工程评价中, 取得了较好的效果。

1 两总体 Fisher 判别原理

1.1 Fisher 判别思想及求解过程

Fisher 判别的思想是将高维空间中的点投影到一条直线 y 上, 使得由总体 π_1 和 π_2 产生的 y 尽可能分开, 然后再利用距离判别法建立判别准则。投影的原则是将总体与总体之间尽可能地分开, 然后根据类间距离最大、类内距离最小的原则确定判别分析函数, 进而将新的样本进行分类判别^[13]。

设在 p 维情况下, x 的线性组合为:

$$y = a^T x \quad (1)$$

式中: a —— p 维实向量;

x —— p 维随机向量。

设 π_1 和 π_2 的均值分别为 μ_1 和 μ_2 , 它们有共同的方差-协方差矩阵 Σ , 则线性组合 $y = a^T x$ 的均值为:

$$\mu_{1y} = E(y | x \in \pi_1) = a^T \mu_1 \quad (2)$$

$$\mu_{2y} = E(y | x \in \pi_2) = a^T \mu_2 \quad (3)$$

方差为:

$$\text{var}(y) = \text{var}(a^T x) = a^T \Sigma a \quad (4)$$

收稿日期: 2011-11-07; 修订日期: 2012-02-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(41072236)

作者简介: 赵小敏(1980-), 女, 在职博士研究生, 讲师, 主要研究方向为工程地质、环境工程地质。

E-mail: xmzhao1201@126.com