

# 基于 ANN 算法与分形理论的沥青混合料蠕变预测

李 军<sup>1</sup>, 王凤池<sup>2</sup>, 吴凤元<sup>1</sup>, 张逸超<sup>1</sup>

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 沈阳建筑大学交通工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

**摘 要** 目的 研究 AC-10、AC-13 和 AC-6 沥青混合料的分形维数、级配等物理力学参数, 及其对蠕变变形的影响. 提供一种新的沥青混凝土路面变形预测与控制的研究方法. 方法 针对沥青混合料颗粒级配的自相似与长期稳定变形多因素性的特征, 分别采用级配筛分实验与 CT 扫描数字图像技术对自相似特征进行验证与分形维数的获取, 利用 TAW-2000 岩石三轴实验仪对 AC-10、AC-13 和 AC16 密级配沥青混合料开展三轴压缩实验与蠕变实验, 基于人工神经网络算法(ANN)对实验数据进行驯化, 并对蠕变实验的长期变形量进行预测. 结果 沥青混合料级配具有高度的自相似特征, 分形维数在 2.45~2.50. 结论 人工神经网络建立的长期变形预测模型, 可以较好地对一定应力水平下的长期蠕变变形进行预测.

**关键词** 沥青混合料; 蠕变变形; ANN 算法; 分形维数; 数字图像

中图分类号 TU52

文献标志码 A

## Prediction of Creep Deformation of Asphalt Concrete Based on Ann Algorithm and Fractal Theory

LI Jun<sup>1</sup>, WANG Fengchi<sup>2</sup>, WU Fengyuan<sup>1</sup>, ZHANG Yichao<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. School of Traffic Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** To provide a new research method of deformation prediction and control of asphalt concrete pavement, the physical and mechanical parameters of AC-10, AC-13 and ac-6 asphalt mixtures, such as fractal dimension and gradation, and their influence on creep deformation are studied. According to the characteristics of self similarity and long-term stable deformation of asphalt mixture particle gradation, gradation screening experiment and CT scanning digital image are used to verification of the self similar characteristics and obtain of the fractal dimension. Triaxial compression experiment and creep experiment are carried out on AC-10, AC-13 and ac16 dense

收稿日期: 2019-12-08

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51774163); 辽宁省教育厅基金项目(Lnqn201904)

作者简介: 李军(1989—), 男, 博士, 主要从事岩土加固技术方面研究.

graded asphalt mixture by the TAW-2000 rock triaxial test instrument. The experimental data are domesticated based on the artificial neural network algorithm(ANN), and the long-term deformation of creep experiment is predicted. The gradation of asphalt mixture has a high self similarity. The fractal dimension is 2.45 ~ 2.5. The long-term creep deformation prediction model based on artificial neural network can predict the long-term creep deformation at a certain stress level.

**Key words:** asphalt mixtures; creep deformation; ANN algorithm; fractal dimension; digital image

沥青混合料是一种由集料、沥青胶浆和空隙组成的胶凝材料,常被用作不同等级路面的面层材料,由于其成分的复杂性与集料颗粒级配的离散性,其力学性能与变形规律一直是该领域研究热点与难点。采用常规的研究方法均无法对沥青混凝土的长期稳定变形进行科学准确地预测,主要体现在影响长期变形的因素较多,且彼此间表现出高度的非线性特征。在一定的应力水平下,影响沥青混凝土的变形因素可归纳为集料特征和沥青混合材料的击实特征。S. M. Asgharzadeh 等<sup>[1]</sup>研究了添加废弃轮胎粉末的沥青混凝土路面疲劳特性。A. Chomicz-Kowalska 等<sup>[2]</sup>介绍了对泡沫沥青低温沥青混凝土和按常规热拌沥青技术生产的控制配合比进行一次冻融循环实验和湿敏分析的结果,并将分析扩展到包括低温沥青混合料的压实度评估和空隙率对力学参数的影响。R. A. Tarefde 等<sup>[3]</sup>采用旋转压实机、线性捏合压实机和现场岩心对沥青混凝土压实体的孔隙结构进行了评价。对不同压实成型方法下的孔隙结构进行测定与对比分析。张丽萍等<sup>[4]</sup>采用多层弹性体系理论方法,计算当基层层间应用不同下封层时无机结合料稳定层的层底拉应力和疲劳开裂寿命。孙雅珍等<sup>[5]</sup>采用两种高模量沥青混合料进行实验研究,分析高模量剂对沥青混合料路用性能的影响。于保阳等<sup>[6]</sup>采用一种新的计算方法确定最佳沥青用量,以动抗压强度评价开级配混合料的高温性能,改进了冻融劈裂的实验条件。逯艳华等<sup>[7]</sup>通过室内实验,研究该材料相关试件制备、成型与方法,对其高温性能、低温性能、感温性能、防水性能及力学性能进行测试与分析。周志刚等<sup>[8]</sup>基于沥青混合料的渗透实验和多孔

介质流固耦合理论,对比分析了碗形分布荷载和均布荷载作用下饱水沥青路面结构各力学场量的变化并进行数值模拟分析。杨彦海等<sup>[9]</sup>运用 MATLAB 软件,基于灰色关联分析法,对辽宁省典型乳化沥青厂拌冷再生干线公路的路面使用性能指数 *PQI* 进行相关因素影响分析。张敏江等<sup>[10]</sup>利用 *K*-均值聚类算法对辽宁省进行了路面使用性能气候分区,并依据现行规范中提出的沥青路面低温开裂模型。杨瑞华等<sup>[11]</sup>基于分形理论体系的框架,建立了不同粒径集料级配特征与分形维数内在联系,揭示了集料分形维数对沥青混合料路用性能影响规律。雷俊安等<sup>[12]</sup>通过对不同级配的水泥混凝土开展力学实验测试,建立了无侧限抗压强度与劈裂强度与集料级配分形维数内在联系,并通过灰度理论对影响权重进行分析。王怀亮等<sup>[13]</sup>建立的神经网络模型可以合理地模拟具有复杂非线性关系的混凝土多轴强度模型。负永峰等<sup>[14]</sup>建立了用于位移反分析人工神经网络方法,并应用该方法对某隧道围岩力学参数进行了反演。樊永华等<sup>[15]</sup>利用人工神经网络(ANN)方法建立了沥青路面剩余寿命预测模型,由此程序可以由落锤弯沉仪(FWD)弯沉数据快速预估路面的剩余寿命。但是对沥青混凝土长期变形与集料的级配分形维数和压实参数关系研究并不够透彻。因此,笔者拟采用 CT 观测、数字图像技术和人工神经网络的方法对沥青混凝土的长期稳定变形进行预测。

## 1 沥青混合料试样制备

### 1.1 集料的级配

笔者选用的沥青材料为 90#路用基质沥

青,其针入度为 92 mm,动力黏度 160 Pa·s. 根据《公路工程沥青及沥青混合料实验规程》(JTJ E20—2011)中有关的测试方法对沥青的混合料的相关力学参数进行测试. 选用来自于阜新境内海棠山不同粒径的玄武岩碎石作为粗集料与细集料,采用筛分法对集料的粒径进行测试. 将石灰岩碎屑进一步碾碎,并于温拌沥青混合形成凝胶状沥青胶浆.

按照粒径的大小来划分,沥青混凝土有 3 种,细粒式、中粒式和粗粒式. 按照集料的级配又可以划分为密级配与开级配,其中密级配又可以划分为连续级配与间断级配. 笔者选用 AC-10、AC-13 和 AC-16 连续型级配的沥青混合料,其级配组成如表 1 所示. 3 种集料的级配均位于《公路工程集料实验规程》(JTJ058—94)规定的区间内,满足规程要求.

表 1 沥青混合料集料级配

Table 1 Asphalt mixtures aggregate grading table

%

沥青混合料种类	筛孔直径/mm										
	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
AC-10	100	100	100	96.0	62.8	40.7	31.5	20.1	15.8	10.6	5.8
AC-13	100	100	94.7	76.4	51.8	38.2	24.9	20.3	12.8	11.4	6.3
AC-16	100	97.2	83.9	72.1	46.7	35.6	27.4	19.6	13.3	10.2	5.3

1.2 试件的制作

为了获取密实度较好且成型稳定的沥青混合料试件,采用 MDJ-II 型马歇尔击实仪制备一批沥青混合料试件,Φ = 63.5 mm, h = 101.6 mm. 饱和的温度约为 170 ℃,采用连续击实方法对试样的上下面反复击实,每面击实 50 次,击实次数不少于 12 次. AC-10、AC-13 和 AC-16 每组制备如图 1 所示的 4 个试件,并依次对其进行编号. 各组沥青混合料试件的基本物理力学参数测试结果如表 2 所示.

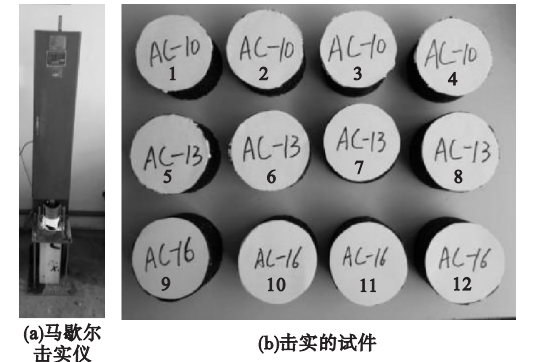


图 1 马歇尔击实仪与制备的试件

Fig. 1 Marshall compactor and the prepared samples

表 2 沥青混合料基本物理力学参数测试结果

Table 2 Test results of basic physical and mechanical parameters of asphalt mixture

沥青混合料种类	试件编号及均值	石油比/%	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	孔隙率/%	矿料间隙率/%	沥青饱和度/%	稳定度/kN	流值/mm	马歇尔模数
AC-10	1	5.8	2.346	5.0	17.8	71.8	12.92	27.30	4.73
	2	5.8	2.347	4.9	17.7	72.1	6.10	28.80	2.12
	3	5.8	2.347	4.9	17.7	72.1	7.51	32.00	2.35
	4	5.8	2.354	4.7	17.5	73.3	6.05	20.20	3.00
	平均值		2.349	4.9	17.7	72.3	8.15	27.08	3.05
	5	5.4	2.390	4.3	16.3	73.6	8.79	33.90	2.59
AC-13	6	5.4	2.372	5.0	17.0	70.6	13.37	20.40	6.55

续表 2

沥青混合料种类	试件编号及均值	石油比/%	密度/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	孔隙率/%	矿料间隙率/%	沥青饱和度/%	稳定度/kN	流值/mm	马歇尔模数
AC-13	7	5.4	2.392	4.2	16.3	74.2	11.70	19.70	5.94
	8	5.4	2.390	4.3	16.3	73.6	11.32	21.40	5.29
	平均值		2.386	4.5	16.5	73.0	11.30	23.85	5.10
	9	4.8	2.394	4.5	15.4	70.6	6.40	26.30	2.43
	10	4.8	2.393	4.6	15.5	70.3	9.22	22.80	4.04
AC-16	11	4.8	2.400	4.3	15.2	71.7	8.73	19.90	4.39
	12	4.8	2.400	4.3	15.2	71.7	8.42	22.50	3.74
	平均值		2.397	4.4	15.3	71.1	8.19	22.90	3.65

1.3 加载测试

笔者采用如图 2 所示的 TAW-2000 型电液伺服岩石三轴仪对制备的沥青混凝土试件进行力学测试,该设备可以获取演示的全过程曲线,并可以实时显示轴向应力与径向应力.笔者测试的项目包括三轴压缩实验和蠕变实验.

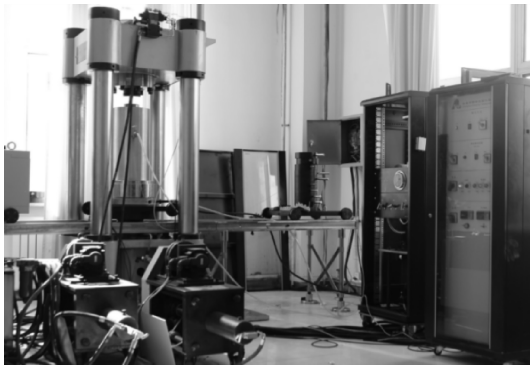


图2 TAW-2000 岩石三轴实验仪  
Fig.2 TAW-2000 rock triaxial tester

(1)三轴压缩实验

为了测试 3 种沥青混凝土的强度,开展围压为的三轴压缩实验.采用应变控制模式,加载的速率设置为 0.01 mm/min,测试温度为 20 ℃. AC-10、AC-13 和 AC-16 沥青混凝土试样在三轴测试过程的应力-应变曲线如图 3 所示.

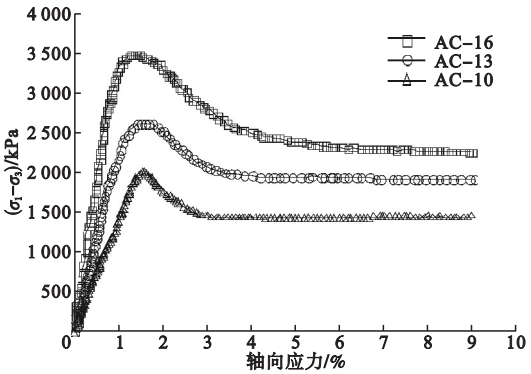


图3 三轴压缩实验曲线  
Fig.3 Triaxial compression test curve

由图 3 可看出,15 ℃条件下的沥青混凝土三轴压缩曲线呈现出应变软化特征,其剪切强度随着粒径公称直径的增加. AC-10、AC-13 和 AC-16 沥青混凝土试样的峰值强度测试结果依次为: 1 995.21 kPa、2 624.71 kPa和 3 477.53 kPa.

(2)蠕变实验

若保持应力水平保持恒定,分析沥青混合料 AC-10、AC-13、AC-16 在室温 20 ℃条件下的蠕变特征,荷载应力分别为 0.3 MPa、0.5 MPa、0.7 MPa. 实验持续时间为 3 600 s. 图 4 为不同荷载应力下沥青混凝土的蠕变曲线.

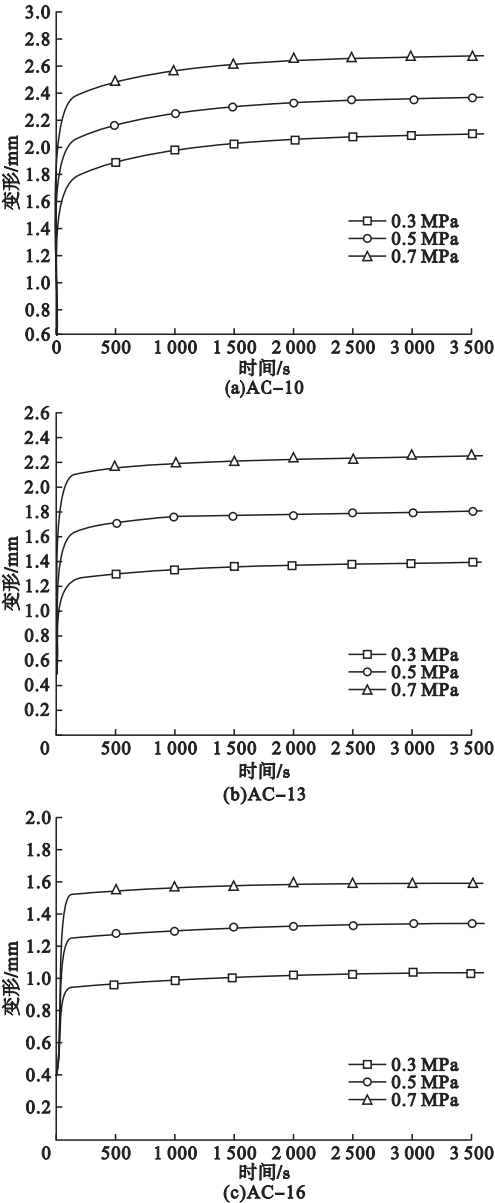


图4 三轴蠕变变形实验曲线

Fig. 4 Triaxial creep deformation test curve

由图4可知,由于应力水平均未超出沥青混凝土的极限荷载,各型号沥青混凝土变形均只出现了蠕变第一、第二阶段,最终趋于稳定变形,未出现蠕变第三阶段加速变形阶段.在保持最大公称粒径恒定不变时,荷载水平越高,最终蠕变达到稳定时的变形量越大.对于相同的荷载水平,公称粒径越大,长期稳定变形量越小,这是因为大颗粒可以形成完整的颗粒骨架,抵抗变形能力较强.3种沥青混凝土试样的最大变形量如表

3所示.

表3 蠕变最大变形量

Table 3 Maximum creep deformation		mm		
沥青混合料种类	满载应力/MPa			
	0.3	0.5	0.7	
AC-10	2.06	2.34	2.63	
AC-13	1.36	1.78	2.21	
AC-16	1.02	1.32	1.56	

2 集料的级配分形特征

集料是形成沥青混凝土强度的骨架,集料的颗粒组成对沥青混凝土承载能力和抵抗变形的能力至关重要.现有的描述级配特征参数包括曲率系数、不均匀系数等,但是均无法反映出颗粒级配复杂的不均匀特征.不同类型的集料,均可以作为多粒径搭配的散体颗粒体系,若不大于粒径  $r$  的颗粒累计含量满足如下关系,则称该组颗粒搭配具有自相似分形特征.

$$N(r) = \left(\frac{r}{r_{\max}}\right)^{3-D} \tag{1}$$

式中: $N(r)$ 为粒径不大于  $r$  的不大于粒径的颗粒累计含量; $D$ 为集料颗粒体系级配的分形维数.

级配也具有自相似特征,并且这种自相似特征可采用分形维数来描述.对式(1)两边取对数,可得:

$$\log(N(r)) = (3 - D)\log(r/r_{\max}) + b. \tag{2}$$

式中: $b$ 为拟合直线的截距.

从另外一个角度进行理解,如果双对数曲线  $\log(r/r_{\max}) \sim \log(N(r))$  具有较好的线形相关性,也可以证明颗粒级配具有良好的分形特征,此时拟合直线的斜率的即为分形维数.

笔者从筛分实验和CT扫描图像数字处理两个角度对颗粒级配的分形特征进行验证.

(1)筛分实验

对于筛分实验,分别将粒料依次通过



19 mm、16 mm、13.2 mm、9.5 mm、4.75 mm、2.36 mm、1.18 mm、0.6 mm、0.3 mm、0.15 mm 和 0.075 mm 孔径的筛子,若颗粒能够通过该筛子说明集料的公称粒径小于该筛子标定粒径,若未能通过说明公称粒径大于筛子标定的粒径. 则实验过程中位于孔径为  $r$  筛子内部集料质量之和为  $N(r)$ ,  $P(r)$  为累计通过质量比例. 根据表 1 所示的筛分结果,AC-10、AC-13 和 AC-16 集料的级配曲线如图 5 所示.

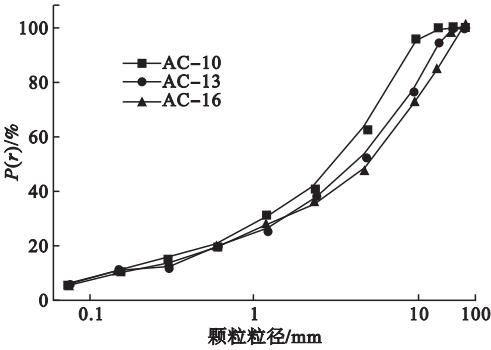


图 5 集料筛分的级配曲线

Fig. 5 Grading curve of aggregate screening

对图 5 中的各点数据分别取对数,可得到如图 6 所示的双对数曲线  $\log(r) \sim \log(N(r))$ .

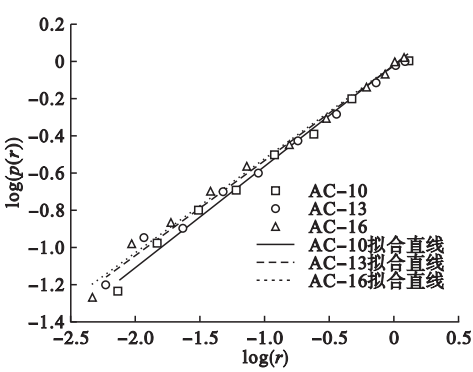


图 6 集料的  $\log(P(r)) \sim \log(r)$  曲线

Fig. 6  $\log(P(r)) \sim \log(r)$  curve of aggregate

由图 6 可看出,曲线的拟和斜率均在 0.99 以上,说明了集料的级配具有高度的自相似特征,AC-10、AC-13 和 AC-16 的分形维数依次为 2.462 6、2.500 8 和 2.498 8,均位于 2.45 ~ 2.50.

(2)CT 扫描法

采用医用 X 射线 CT 对制备好的沥青混凝土试样进行断层 CT 扫描,沥青混凝土的阈值分割效果如图 7 所示. 扫描的结果如图 7(a)所示,采用数字图像处理技术对 CT 断层扫描图像进行特征提取与分析,采用不同介质的 CT 数差异性对沥青混凝土的三项组成进行阈值分割,其骨料、沥青胶浆和孔隙提

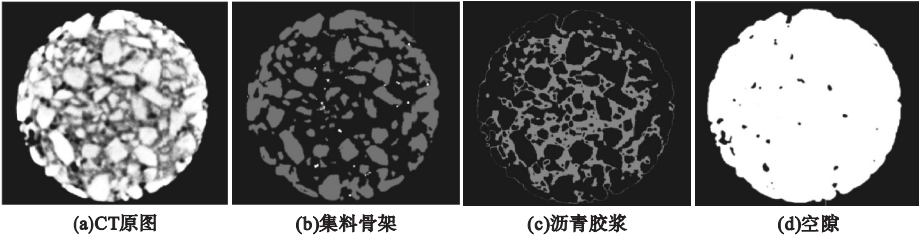


图 7 沥青混凝土的阈值分割效果

Fig. 7 Threshold segmentation effect of asphalt concrete

取效果分别如图 7(b) ~ (d) 所示.

对图 7(b) 所示的集料进行尺寸进行标定,并从小到大进行排列,排列效果如图 8 所示. 由于 CT 断层扫描的图片不再是三维信息,此时的  $N(r)$  不再是质量分数的含义,而应该是颗粒的数目.

通过 CT 观测方法确定的  $\log(P(r)) \sim \log(r)$  双对数曲线及拟合关系如图 9 所示.

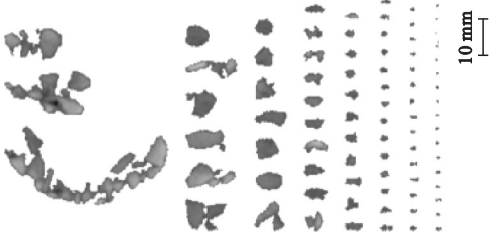


图 8 沥青混凝土集料提取

Fig. 8 Asphalt concrete aggregate extraction

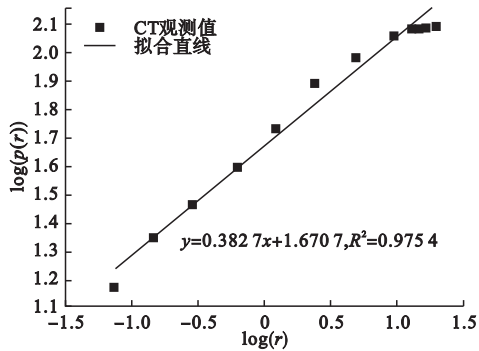


图9  $\log(P(r)) \sim \log(r)$  双对数曲线

Fig.9  $\log(P(r)) \sim \log(r)$  double logarithmic curve

由图9的拟合相关性系数可看出,  $R^2 = 0.9754$ , 分形维数为2.6173, 进一步CT数字图像处理技术角度证明了沥青混合料颗粒级配具有较好的分形特征。

3 BP神经网络蠕变变形预测

沥青混凝土的三轴蠕变长期稳定变形与沥青混合料集料的级配分形维数和马歇尔击实过程所测得的物理力学参数存在密切联系, 并且这种关系表现出高度的非线性特征, 采用传统的任何元件模型与经验模型均无法有效地描述这种非线性关系. 人工神经网络算法(ANN)在处理这种高度复杂的实际问题时显现了其优越性。

笔者拟采用ANN算法对0.3 MPa应力水平下蠕变变形量 $d_c$ 进行预测<sup>[24]</sup>. 采用表2所示的试样作为训练样本, 对神经网络模型进行驯化. 将集料级配分形维数 $D$ 、击实实验

所测的物理力学参数 $\rho$ 、 $P_r$ 、 $A_s$ 、 $S$ 、 $S_v$ 、 $M$ 作为输入层神经元节点, 将蠕变变形 $d_c$ 作为输出层节点神经元. 集料颗粒级配分形维数与蠕变变形量如表5所示。

表5 集料颗粒级配分形维数与蠕变变形量  
Table 5 Fractal dimension of aggregate particle gradation and creep deformation

样本编号	$D$	$d_c/\text{mm}$
1	2.55	2.21
2	2.51	2.42
3	2.52	2.35
4	2.47	2.41
5	2.48	1.38
6	2.62	1.36
7	2.57	1.42
8	2.54	1.51
9	2.62	1.03
10	2.57	1.07
11	2.43	1.05
12	2.51	1.04

3.1 人工神经网络建立

笔者设计7个影响因素: $\rho$ 、 $P_r$ 、 $A_s$ 、 $S$ 、 $S_v$ 、 $M$ 和 $D$ , 输入层节点个数确定为7, 节点编号与之对应. 输出层节点个数为1个, 选取2个隐层的人工神经网络算法, 第一隐层节点神经元个数为7, 第二隐层节点神经元个数为8, 根据节点的个数构造如图10所示的人工神经网络结构。

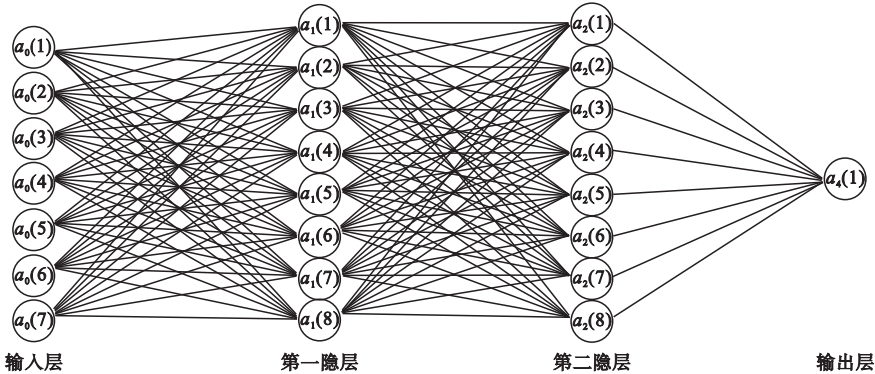


图10 人工神经网络结构

Fig.10 Neural network structure

利用 MATLAB 自动生成从输入层到第一隐层、从第一隐层到第二隐层和从第二隐层到输出层的初始 0 次迭代权重矩阵:  $\mathbf{W}_1^{(0)} = \text{Rand}(8 \times 7)$ 、 $\mathbf{W}_2^{(0)} = \text{Rand}(8 \times 8)$  和  $\mathbf{W}_3^{(0)} = \text{Rand}(1 \times 8)$ . 其中, 上角标表示迭代次数; 下角标表示层间关系, 若下角标为 1 表示从输入层到隐层, 若下角标为 2, 表示从隐层到输出层;  $w(i, j)$  表示输入向量的第  $j$  个分量对输出向量第  $i$  个分量的影响权重.

笔者选用如式(3)所示的函数形式<sup>[16]</sup>作为激活函数:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}. \quad (3)$$

将输入层的样本数据带入式(4), 可得:

$$u_1^{(p)}(i) = \sum_{j=1}^7 w_1^{(p)}(i, j) a_0(j) - \theta_i, \quad (i = 1, 2, \dots, 8). \quad (4)$$

式中:  $\theta_{1i}$  为从输入层到第一隐层的阈值.

则隐层的第  $i$  个值可表示为

$$a_1(i) = f(u_1^{(p)}(i)) = \frac{1}{1 + e^{-u_1^{(p)}(i)}}, \quad (i = 1, 2, \dots, 8). \quad (5)$$

$$u_2^{(p)}(i) = \sum_{j=1}^8 w_2^{(p)}(i, j) a_1(j) - \theta_i, \quad (i = 1, 2, \dots, 8). \quad (6)$$

式中:  $\theta_{2i}$  为从第一隐层到第二隐层的阈值.

则输出层的值可表示为

$$a_2^{(p)}(i) = f(u_2^{(p)}(i)) = \frac{1}{1 + e^{-u_2^{(p)}(i)}}, \quad (7)$$

$$u_3^{(p)} = \sum_{j=1}^8 w_3^{(p)}(1, j) a_2(j) - \theta_3. \quad (8)$$

式中:  $\theta_3$  为从第二隐层到输出层的阈值.

$$a_3^{(p)} = f(u_3^{(p)}) = \frac{1}{1 + e^{-u_3^{(p)}}}. \quad (9)$$

则增量  $\delta_3^{(p)}$ 、 $\delta_2^{(p)}(i)$ 、 $\delta_1^{(p)}(i)$  可表示为

$$\delta_3^{(p)} = [t - a_3^{(p)}] f'(u_3^{(p)}) = [t - a_3^{(p)}] \cdot \frac{e^{-u_3^{(p)}}}{(1 + e^{-u_3^{(p)}})^2}. \quad (10)$$

$$\delta_2^{(p)}(i) = \frac{e^{-u_2^{(p)}(i)}}{(1 + e^{-u_2^{(p)}(i)})^2} \sum_{i=1}^8 [\delta_2^{(p)}(i) w_2^{(p)}(i, j)]. \quad (11)$$

$$\delta_1^{(p)}(i) = \frac{e^{-u_1^{(p)}(i)}}{(1 + e^{-u_1^{(p)}(i)})^2} \sum_{i=1}^7 [\delta_1^{(p)}(i) w_1^{(p)}(i, j)]. \quad (12)$$

式中:  $t(i)$  为实际观测值;  $a_2^{(p)}(i)$  为理论计算值.

则权重矩阵的迭代方式为

$$\mathbf{W}_3^{(p+1)}(1, j) = w_3^{(p)} + \eta \delta_3^{(p+1)} a_2^{(p+1)}(j). \quad (13)$$

$$\mathbf{W}_2^{(p+1)}(i, j) = w_2^{(p)} + \eta \delta_2^{(p+1)}(i) a_1^{(p+1)}(j). \quad (14)$$

$$\mathbf{W}_1^{(p+1)}(i, j) = w_1^{(p)} + \eta \delta_1^{(p+1)}(i) a_0^{(p+1)}(j). \quad (15)$$

### 3.2 样本训练

当权重矩阵波动量较小时方可结束迭代, 本次学习的驯化数据次数为 5 000 次, 网络学习效率为  $\eta = 0.05$ , 目标误差为  $0.65 \times 10^{-3}$ . 可得到人工神经网络预测模型为

$$\begin{pmatrix} u_1(1) \\ u_1(2) \\ u_1(3) \\ u_1(4) \\ u_1(5) \\ u_1(6) \\ u_1(7) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5725 & -1.0448 & -0.2703 & -0.6543 & 0.1999 & 0.3312 & 0.0632 \\ 0.2923 & -0.9709 & -0.9919 & -0.5488 & 0.2003 & -0.3486 & -0.8062 \\ 0.4347 & -0.8390 & 0.2303 & -0.1141 & -0.7368 & -0.4015 & 0.6607 \\ -0.8320 & -1.4651 & -0.3224 & -0.5152 & -0.1068 & -0.1826 & -0.4241 \\ -0.9685 & 0.3683 & -0.5498 & -0.3548 & -0.7747 & 0.9707 & 0.9627 \\ 0.8872 & 0.0204 & -0.8334 & 0.2171 & 0.9508 & -0.4676 & 0.0221 \\ 1.0015 & 0.2095 & -0.9270 & 0.5568 & 0.0402 & -0.2743 & 0.4878 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} a_0(1) \\ a_0(2) \\ a_0(3) \\ a_0(4) \\ a_0(5) \\ a_0(6) \\ a_0(7) \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} -0.7278 \\ -0.3314 \\ 0.5230 \\ 0.6434 \\ 1.4712 \\ 0.1788 \\ 0.2695 \end{pmatrix}. \quad (16)$$



$$\begin{pmatrix} u_2(1) \\ u_2(2) \\ u_2(3) \\ u_2(4) \\ u_2(5) \\ u_2(6) \\ u_2(7) \\ u_2(8) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -1.171\,2 & -0.776\,1 & -1.146\,1 & 1.621\,8 & -2.933\,4 & 0.505\,0 & -0.230\,4 \\ 0.319\,0 & 0.489\,5 & 1.341\,7 & 1.859\,3 & -2.507\,6 & 1.447\,2 & -0.578\,5 \\ 1.534\,8 & 1.074\,5 & 1.894\,8 & -1.639\,3 & 0.390\,6 & -1.971\,7 & -0.634\,8 \\ 0.569\,3 & -0.333\,0 & 2.139\,5 & 0.842\,7 & 1.746\,1 & 1.569\,9 & -1.509\,4 \\ -1.835\,6 & -0.909\,5 & -0.782\,1 & -0.251\,7 & 0.217\,7 & 1.948\,2 & -2.290\,9 \\ -0.863\,1 & -1.567\,4 & -1.089\,0 & -1.190\,8 & 0.901\,8 & -1.675\,8 & -2.121\,0 \\ -0.299\,8 & -2.177\,7 & 1.168\,5 & -1.779\,0 & -1.151\,8 & -0.025\,6 & 1.858\,8 \\ -0.577\,3 & -1.275\,2 & 1.212\,8 & 1.801\,8 & 2.480\,6 & -1.120\,5 & 0.731\,0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} a_1(1) \\ a_1(2) \\ a_1(3) \\ a_1(4) \\ a_1(5) \\ a_1(6) \\ a_1(7) \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 3.518\,9 \\ -2.673\,7 \\ -1.819\,3 \\ -0.518\,8 \\ -0.466\,4 \\ -1.617\,8 \\ -2.697\,8 \\ -3.658\,0 \end{pmatrix} \quad (17)$$

其中,  $a_1(i) = [1 + e^{-u_1(i)}]^{-1}, i = 1, 2, \cdots, 8$ .

$u_3 = -1.351\,8a_2(1) - 0.208\,3a_2(2) - 0.516\,6a_2(3) + 0.089\,6a_2(4) - 0.057\,7a_2(5) - 0.482\,3a_2(6) - 0.077\,6a_2(7) - 0.526\,8a_2(8) - 1.100\,4.$  (18)

其中,  $a_2(i) = [1 + e^{-u_2(i)}]^{-1}, i = 1, 2, \cdots, 8$ .

$$a_3 = f(u_3) = \frac{1}{1 + e^{-u_3}}. \quad (19)$$

通过神经网络学习得到蠕变变形  $d_c$  与实测到的长期变形对比效果如图 11 所示. 由图 11 可看出, 通过人工神经网络预测的长期稳定变形与实测数值结果高度地吻合.

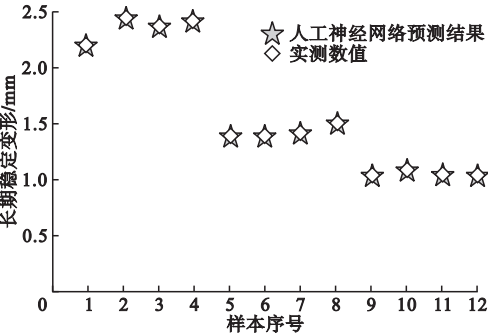


图 11 神经网络学习与实测数据对比图

Fig. 11 Comparison of simulation data by neural network and measured data

在 0.3 MPa 轴压条件下, 通过预测的结果与实测的结果对比如表 6 所示. 采用预测方法揭示了沥青混凝土长期变形与颗粒级配分形维数和马歇尔击实参数间的高度非线性关系. 表明神经网络学习方法在沥

青混凝土长期变形预测领域具有较好的适用性.

表 6 蠕变变形的 ANN 算法预测与实测值对比

Table 6 Comparison between the prediction value of creep deformation by ANN algorithm and the measured value

沥青混合料类型	蠕变变形/mm		相对误差/%
	预测结果	实测值	
AC-10	2.078 4	2.06	0.89
AC-13	1.350 7	1.36	-0.68
AC-16	1.028 4	1.02	0.82

4 结 论

- (1) 沥青混合料颗粒级配均具有良好的分形特征, 分形维数位于 2.45 ~ 2.50.
- (2) 对于相同的荷载水平, 公称粒径越大, 长期稳定变形量越小, 大颗粒可以形成完整的颗粒骨架, 抵抗变形能力增强.
- (3) 采用 4 层的长期变形预测模型, 采用该模型可对 0.3 MPa 的长期变形进行较好地预测, 误差最大值不超过 0.89%, 验证了该模型合理性.

参考文献

[ 1 ] ASGHARZADEH S M, SADEGHI J, PEIVAST P, et al. Fatigue properties of crumb rubber asphalt mixtures used in railways [ J ]. Construction and building materials, 2018, 184 (30) :248-257.

[ 2 ] CHOMICZ-KOWALSKA A, GARDZIEJCZYK

- W, IWAŃSKI M M. Moisture resistance and compactibility of asphalt concrete produced in half-warm mix asphalt technology with foamed bitumen [J]. Construction and building materials, 2016, 126(15): 108-118.
- [3] TAREFDER R A, AHMAD M. Effect of compaction procedure on air void structure of asphalt concrete [J]. Measurement, 2016, 90: 151-157.
- [4] 张丽萍, 吕馥宏, 张敏江, 等. 下封层连接状况对沥青路面疲劳寿命的影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2019, 35(6): 1036-1043.  
(ZHANG Liping, Lü Fuhong, ZHANG Minjiang, et al. Influence of lower seal coat connection effect on fatigue life of asphalt pavement [J]. Journal of Shenyang jianzhu university(nature science), 2019, 35(6): 1036-1043.)
- [5] 孙雅珍, 顾彬诚. 高模量沥青混合料路用性能试验及 AHP 综合性能评价[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2019, 35(4): 684-691.  
(SUN Yazhen, GU Bincheng. Road performance tests and evaluation of comprehensive performance of HMAM based on improved AHP and climate zones [J]. Journal of Shenyang jianzhu university(nature science), 2019, 35(4): 684-691.)
- [6] 于保阳, 高超, 张荣华, 等. 东北季冻区透水性沥青混合料路用性能验证[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2019, 35(3): 479-486.  
(YU Baoyang, GAO Chao, ZHANG Ronghua, et al. Road performance of permeable asphalt mixture in the Northeast seasonal frozen area [J]. Journal of Shenyang jianzhu university(nature science), 2019, 35(3): 479-486.)
- [7] 逯艳华, 武泽锋. 水泥-乳化沥青混凝土的路用性能研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2019, 35(2): 285-293.  
(LU Yanhua, WU Zefeng. Research on road performance of cement-emulsified asphalt concrete [J]. Journal of Shenyang jianzhu university(nature science), 2019, 35(2): 285-293.)
- [8] 周志刚, 李岩, 俞文生, 等. 不同荷载模式作用下饱水沥青路面结构动力响应对比分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2019, 35(2): 263-276.  
(ZHOU Zhigang, LI Yan, YU Wensheng, et al. Contrastive analysis of dynamic response of saturated asphalt pavement structure under different loading modes [J]. Journal of Shenyang jianzhu university(nature science), 2019, 35(2): 263-276.)
- [9] 杨彦海, 张东, 杨野. 基于灰色关联分析法的辽宁省厂拌冷再生路面使用性能指数影响因素[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2019, 35(1): 124-132.  
(YANG Yanhai, ZHANG Dong, YANG Ye. Influencing factors of pavement performance index of central plant cold recycling based on grey correlation analysis in Liaoning province [J]. Journal of Shenyang jianzhu university(nature science), 2019, 35(1): 124-132.)
- [10] 张敏江, 韩梦迪. 辽宁省公路沥青结合料低温性能设计参数研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2018, 34(5): 873-880.  
(ZHANG Minjiang, HAN Mengdi. Study of the design parameters of low temperature performance of highway asphalt in Liaoning province [J]. Journal of Shenyang jianzhu university(nature science), 2018, 34(5): 873-880.)
- [11] 杨瑞华, 许志鸿. 密级配沥青混合料集料分形分维与路用性能的关系[J]. 土木工程学报, 2007, 40(3): 98-103.  
(YANG Ruihua, XU Zhihong. Relationship between fractal dimension and road performance of dense-gradation asphalt mixture [J]. China civil engineering journal, 2007, 40(3): 98-103.)
- [12] 雷俊安, 郑南翔, 纪小平, 等. 级配水泥稳定再生集料强度影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2019, 35(2): 315-323.  
(LEI Junan, ZHENG Nanxiang, JI Xiaoping, et al. Influence of gradation on the strength of cement stabilized recycled aggregate [J]. Journal of Shenyang jianzhu university(nature science), 2019, 35(2): 315-323.)
- [13] 王怀亮, 宋玉普. 神经网络在混凝土多轴强度预测中的应用[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2006(1): 61-64.  
(WANG Huailiang, SONG Yupu. Application of neural network in prediction of multi axial strength of concrete [J]. Journal of Shenyang jianzhu university(nature science), 2006(1): 61-64.)
- [14] 负永峰, 范永慧, 孙扬. 基于 BP 神经网络的隧道围岩力学参数反分析方法[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2011, 27(2): 292-296.  
(YUN Yongfeng, FAN Yonghui, SUN Yang. Back-analysis of mechanical parameters of tunnel surrounding rock by BP neural network method [J]. Journal of Shenyang jianzhu university(nature science), 2011, 27(2): 292-296.)
- [15] 樊永华, 洪秀安. 基于人工神经网络的沥青路面剩余寿命分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2005, 27(3): 234-236.  
(FAN Yonghua, HONG Xiuan. Analysis remaining service life for asphalt pavement Based on artificial neural network [J]. Journal of three gorges university(natural science), 2005, 27(3): 234-236.)
- [16] ANDROJII I, DOLA EK-ALDUK Z. Artificial neural network model for forecasting energy consumption in hot mix asphalt (HMA) production [J]. Construction and building materials, 2018, 170(10): 424-432.  
(责任编辑:徐玉梅 英文审校:唐玉兰)