

玄武岩纤维沥青混凝土优选及疲劳寿命预估

吕耀华

(广东省交通规划设计研究院股份有限公司, 广东 广州 510507)

摘要: 通过熵权法加权的灰靶理论,对6组不同长度、掺量的玄武岩纤维沥青混凝土路用性能进行综合评价分析,得到最优玄武岩纤维长度及掺量;对其最优组进行疲劳试验,以劲度模量及荷载作用次数为参数,建立BP神经网络模型。结果表明:经过玄武岩纤维改性的沥青混凝土其各项路用性能均得到提高,其中掺加0.3%的6 mm玄武岩纤维后,沥青混凝土路用性能综合评价最高;采用BP神经网络模型进行玄武岩纤维沥青混凝土疲劳寿命预测可得到较为准确的结果,最大误差小于1%,相比之下Levenberg-Marquardt训练算法收敛速度较快,泛化能力好,且误差平方和明显低于其他两种算法,最大相对误差为0.064%~0.485%。

关键词: 玄武岩纤维沥青混凝土;熵权法;灰靶理论;BP神经网络;寿命预估

玄武岩纤维由于其高强度、高模量、耐高温、耐老化及良好的稳定性成为沥青混合料优良的外掺材料,目前对于沥青混凝土中掺加玄武岩纤维后的路用及疲劳性能已有大量研究成果。玄武岩纤维应用于沥青混凝土的最初目的是抑制其裂缝的产生及扩展,Sim等在旧路面上应用了玄武岩纤维,发现其对沥青混合料抗裂性能具有良好的改善效果;Lee S J从微观及宏观角度对玄武岩纤维沥青混凝土进行研究,发现玄武岩纤维的加入可以同时提高沥青混凝土的抗裂能力及路用性能;郭寅川、覃潇等发现不同玄武岩纤维类型对沥青的吸附能力有较大的不同,掺入玄武岩纤维后,沥青胶浆的抗裂性能增强显著,其极限拉力可提高4.5倍,高温流变性亦有较大的提高;在路用性能方面,文月皎及徐刚等研究了短切玄武岩纤维对沥青混合料的影响,发现玄武岩纤维的加入明显改善了沥青混合料的高温稳定性、低温抗裂性、水稳定性等路用性能,其对高温稳定性的改善效果最为显著,相比普通沥青混合料可提高40%左右;陈建荣研究发现短切玄武岩纤维可改善沥青混合料的疲劳性能,增加其耐久性;张伟喜研究表明掺加纤维的沥青混合料相比不掺纤维时受外力的影响较小,纤维能够明显改善沥青混合料抵抗外力的能力;周航研究发现玄武岩纤维沥青混合料具有较好的自愈和能力,其自愈和性能相比基质沥青提高了67%,相比SBS改性沥青可提高400%。

总体而言,玄武岩纤维能够明显改善沥青混合料的路用性能及疲劳性能,郭寅川、覃潇及许珊珊等发

现,玄武岩纤维的长度、掺量均对沥青胶浆的黏结性及混合料的路用性能、疲劳性能有较大的影响,然而目前研究多侧重于玄武岩纤维沥青混凝土试验研究和分析变化规律,对材料特征优选的数学分析不深入,同时寿命预估相关研究尚且不足。基于此,该文通过对加入不同长度、掺量玄武岩纤维的沥青混凝土的路用性能进行试验,采用熵权法进行加权,利用灰靶决策理论综合评价分析动稳定度、最大弯拉应变、残留稳定度、冻融劈裂抗拉强度等路用性能指标,优选出基于路用性能的最优玄武岩纤维长度及掺量,并对最优组进行疲劳性能试验,以劲度模量及荷载作用次数为参数,利用BP神经网络模型进行玄武岩纤维沥青混凝土疲劳寿命预估,BP神经网络通过训练能够准确模拟参数指标之间的隐形规律,并依靠遗传迭代,使优化结果更为精确。研究结果可为实际工程的施工及寿命预测提供依据。

1 试验

1.1 原材料

试验选用SBS改性沥青,其各项性能指标如表1所示。粗集料选用玄武岩碎石,细集料选用石灰岩碎石,矿粉选用磨细石灰岩。试验选用SMA-13骨架密实型级配,集料级配如表2所示。玄武岩纤维的各项技术指标如表3所示。

1.2 路用性能试验

试验采用马歇尔设计方法进行配合比设计,确定

表 1 SBS 改性沥青性能指标

指标	单位	试验结果
针入度(25℃)	0.1 mm	44.5
延度(5℃)	cm	31.5
软化点	℃	87.0
密度(25℃)	g/cm ³	1.033
弹性恢复(25℃)	%	85.2
旋转黏度(135℃)	Pa·s	2.4
闪点	℃	315.0
离析,48 h 软化点差	℃	2.2
针入度比(不大于)	%	74
薄膜加热 老化试验 (163℃,5 h)	残留延度 (5℃,5 cm/min)	21
质量损失(不大于)	%	0.5

表 2 集料级配

筛孔尺寸/ mm	通过率/ %	筛孔尺寸/ mm	通过率/ %
16	100	1.18	18.8
13.2	95.3	0.6	14.0
9.5	66.8	0.3	11.2
4.75	28.2	0.15	9.7
2.36	22.7	0.075	7.2

表 3 玄武岩纤维技术指标

指标	单位	试验结果
直径	μm	17
长度	mm	6,9
熔点	℃	1050
弹性模量	GPa	90
断裂伸长率	%	>3.2
抗拉强度	MPa	4 000~4 850

最佳油石比为 5.8%,并对掺加两种长度、3 种掺量玄武岩纤维的 6 组试验组及 1 组无纤维对照组的沥青混凝土进行高温稳定性、低温抗裂性、水稳定性等性能测试。

按照 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》,高温稳定性试验采用轮碾法成型 300 mm×300 mm×50 mm 试件,试验荷载为 0.7 MPa,试验温度为 60℃,试验时车辙板沿成型方向行走。低温抗裂性能试验按照规范成型车辙板试件,并切割成 250 mm×35 mm×30 mm 的小梁试件,利用 MTS 进行试验,加载方式为单点加载,加载速率为 50

mm/min。浸水马歇尔试验与冻融劈裂试验均按照规范要求要求进行。

1.3 疲劳试验

为进一步研究不同应变水平下玄武岩纤维沥青混凝土的疲劳性能,试验基于路用性能利用熵权法加权的灰靶决策选择最优组长度及掺量,并选择 600、800、1 000 μm/m 3 种应变水平,采用 BFA 疲劳试验装置及 UTM 控制采集系统进行应变控制的四点弯曲疲劳试验。试验由轮碾成型 400 mm×300 mm×70 mm 的沥青混凝土面板,并用双面切割锯将其切割成 380.0 mm×63.5 mm×50.0 mm 的小型梁式试件。按照规范要求,试验温度设定为 15℃,采用偏正弦加载方式,加载频率 10 Hz,以 50 次循环加载时的劲度模量作为初始劲度模量计算,并以 30%初始劲度模量值所对应的循环次数作为疲劳寿命的判定值,最大循环次数为 1 000 000 次。试验中每组均进行 3 次试验,取其平均值作为最终试验结果。

2 结果分析

2.1 基于灰靶决策的纤维长度及掺量优选

路用性能试验结果如表 4 所示。

由表 4 可知:掺加玄武岩纤维后,沥青混凝土的路用性能均得到了较大的提高,但对于不同的路用性能指标,玄武岩纤维的长度及掺量的最优选择不同,因此该文采用灰靶理论,以两种长度、3 种掺量组成 6 种模式,利用动稳定度、最大弯拉应变、残留稳定度、冻融劈裂抗拉强度比 4 种评价指标优选 6 种模式中的最优路用性能组。

(1) 确定指标模式序列

令 W_i 为多极性指标序列, $W_i(k)$ 为模式 i 指标 k 的数据, $W(k)$ 为 k 的指标模式序列。

$$\text{则: } W_i = [W_i(1), W_i(2), W_i(3), W_i(4)]$$

$$W_i(k) = [W_1(k), W_2(k), \dots, W_6(k)]$$

$$i = 1, 2, \dots, 6; k = 1, 2, 3, 4.$$

(2) 构建标准模式 W_0

对于沥青混凝土的动稳定度、最大弯拉应变、残留稳定度、冻融劈裂抗拉强度比 4 个指标均用极大值来确定:

$$W_0(k) = \max W_i(k) = \max [W_1(k), W_2(k), \dots, W_6(k)] \quad (1)$$

因此可得标准模式 $W_0 = [W_0(1), W_0(2), W_0(3), W_0(4)] = [9\ 645, 3\ 158, 92.7, 91.4]$ 。

表 4 不同长度、不同掺量下玄武岩纤维沥青混凝土路用性能试验结果

组别	纤维长度/mm	纤维掺量/%	动稳定度/(次·mm ⁻¹)	最大弯拉应变/(m·m ⁻¹)	残留稳定度/%	冻融劈裂抗拉强度比/%
0 [#]	0	0	6 221	2 530	88	80.8
1 [#]		0.2	7 674	2 844	89.8	82.7
2 [#]	6	0.3	8 645	3 158	91.4	88.9
3 [#]		0.4	7 956	3 081	92.6	86.4
4 [#]		0.2	7 079	2 753	90.9	84.5
5 [#]	9	0.3	8 493	2 986	92.7	91.2
6 [#]		0.4	7 808	2 864	94.5	89.4

(3) 灰靶变换

$$x_1(1) = \frac{\min[W_1(1), W_0(1)]}{\max[W_1(1), W_0(1)]} = \frac{\min[7\ 274, 9\ 645]}{\max[7\ 274, 9\ 645]} = 0.754$$

同理可得

$$x_1(2) = 0.901, x_1(3) = 0.980, x_1(4) = 0.960$$

$$x_2(1) = 1.000, x_2(2) = 1.000, x_2(3) = 0.986,$$

$$x_2(4) = 0.984$$

...

$$x_6(1) = 0.781, x_6(2) = 0.907, x_6(3) = 1.000,$$

$$x_6(4) = 1.000$$

因此可得矩阵 X 为:

$$X = \begin{bmatrix} 0.888 & 0.901 & 0.950 & 0.907 \\ 1.000 & 1.000 & 0.967 & 0.975 \\ 0.920 & 0.976 & 0.980 & 0.947 \\ 0.819 & 0.872 & 0.962 & 0.927 \\ 0.982 & 0.946 & 0.981 & 1.000 \\ 0.903 & 0.907 & 1.000 & 0.980 \end{bmatrix}$$

(4) 确定灰色关联差异信息空间

令差异信息集元素为 $\Delta_i(k) = |1 - x_i(k)|$, 因此

可求得差异信息集 Δ 为:

$$\Delta = \begin{bmatrix} 0.112 & 0.099 & 0.050 & 0.093 \\ 0 & 0 & 0.033 & 0.025 \\ 0.080 & 0.024 & 0.020 & 0.053 \\ 0.181 & 0.128 & 0.038 & 0.073 \\ 0.018 & 0.054 & 0.019 & 0 \\ 0.087 & 0.093 & 0 & 0.020 \end{bmatrix}$$

其中, $\max \Delta_i(k) = 0.181, \min \Delta_i(k) = 0$.

(5) 计算靶心系数

$$Y[x_0(k), x_i(k)] = \frac{\min \Delta_i(k) + 0.5 \max \Delta_i(k)}{\Delta_i(k) + 0.5 \max \Delta_i(k)} \quad (2)$$

由此可得出靶心系数组成的矩阵 Y 为:

$$Y = \begin{bmatrix} 0.447 & 0.478 & 0.644 & 0.493 \\ 1.000 & 1.000 & 0.733 & 0.784 \\ 0.531 & 0.790 & 0.819 & 0.631 \\ 0.333 & 0.414 & 0.704 & 0.554 \\ 0.834 & 0.626 & 0.826 & 1.000 \\ 0.510 & 0.493 & 1.000 & 0.819 \end{bmatrix}$$

(6) 熵权法确定权重系数

对各个指标的权重系数采用熵权法进行计算, 计算方法为:

$$f_k(i) = \frac{X_i(k)}{\sum_{i=1}^6 X_i(k)} \quad (3)$$

$$H_k = -\frac{1}{\ln 6} \sum_{i=1}^6 f_k(i) \ln f_k(i) \quad (4)$$

$$\alpha_k = \frac{1 - H_k}{\sum_{k=1}^4 (1 - H_k)} \quad (5)$$

式中: $f_k(i)$ 为专家 i 对指标 k 的打分。

计算所得指标权重为 $\alpha_k = (0.521\ 7, 0.260\ 9, 0.043\ 5, 0.173\ 9)$ 。

(7) 靶心度计算

$$Y(x_0, x_i) = \sum_{k=1}^4 \alpha_k Y[x_0(k), x_i(k)] \quad (6)$$

因此可得:

$$Y(x_0, x_1) = \sum_{k=1}^4 \alpha_k Y[x_0(k), x_1(k)] = 0.471\ 7, \\ Y(x_0, x_2) = 0.950\ 8, Y(x_0, x_3) = 0.628\ 5, Y(x_0, x_4) = 0.408\ 7, \\ Y(x_0, x_5) = 0.808\ 3, Y(x_0, x_6) = 0.580\ 6.$$

由此可知长度为 6 mm、掺量为 0.3% 的 2[#] 组玄武岩纤维沥青混凝土综合路用性能最优。

2.2 疲劳性能

综合路用性能最优组玄武岩纤维沥青混凝土在 3

种应变水平下的劲度模量如表 5 所示,3 种应变水平下的四点弯曲疲劳试验结果如图 1 所示。

表 5 最优组玄武岩纤维沥青混凝土劲度模量

纤维长度/mm	纤维掺量/%	应变水平/ ($\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$)	初始劲度模量/MPa	终止劲度模量/MPa
6	0.3	600	5 973	1 793
		800	5 521	1 654
		1 000	5 016	1 518

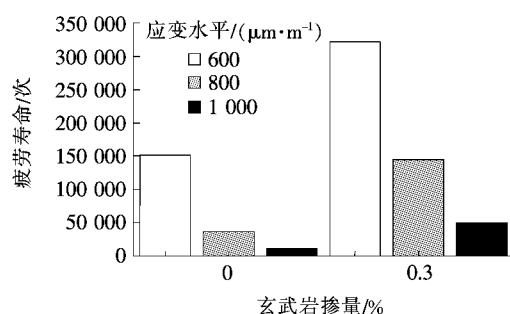


图 1 最优组玄武岩纤维沥青混凝土疲劳寿命

由图 1 可知:长度为 6 mm、掺量为 0.3% 的玄武岩纤维加入后,对于 600、800、1 000 $\mu\text{m}/\text{m}$ 3 种应变水平下沥青混凝土的疲劳性能均得到了显著增强,相对于不掺纤维组分别提升了 113.13%、295.98%、342.12%。

分析原因在于:经过充分拌和,玄武岩纤维能够均匀分散,从而增大纤维与沥青及集料的搭接作用,再加上玄武岩纤维本身对沥青优良的吸附性能,使得沥青膜厚度增加,同时使玄武岩纤维与沥青混合料形成更为坚固的空间网状结构,配合纤维的加筋作用,能够有效提高混合料的整体性,抑制裂缝的扩展,降低由于混合料疲劳损伤而导致的能效损耗,增强其疲劳性能;另一方面,由于玄武岩纤维使沥青混合料的柔性增加,同时纤维分散了部分应力,从而降低了裂缝产生的可能性,增强了混合料的疲劳性能。

3 基于神经网络模型的疲劳寿命预估

3.1 神经网络模型建立

由于在不同应变水平下沥青混凝土疲劳损伤过程差异较大,固定函数模型难以准确预测疲劳寿命,因此该文采用具有高度自学习和自适应能力的 BP 神经网络模型进行疲劳寿命预估,当拥有足够多的隐含层节点,模型可以高精度拟合具有有限间断点的非线性函数(图 2 为具有 1 个隐含层的 3 层 BP 神经网络拓扑

结构图)。图 2 中, T 为输入向量,对应沥青混凝土的劲度模量, P 为输出向量,对应沥青混凝土的疲劳加载次数(该文以劲度模量降低至 30% 时的疲劳次数作为判定标准),由经验公式 $J = \sqrt{m+n} + \alpha$ (α 为 1~10 的常数)对隐含层节点数 J 进行设定,根据模型训练情况在 3~11 之间取值。

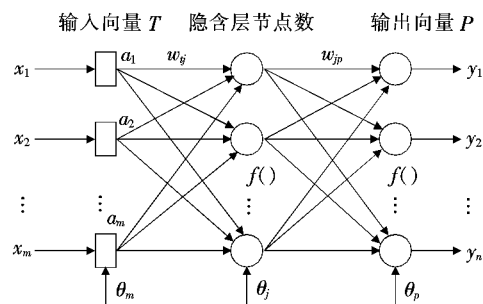


图 2 BP 神经网络拓扑结构图

3.2 疲劳寿命神经网络模型分析

利用 Gradient Descent with Adaptive Learning Rate、Levenberg—Marquardt、Scaled Conjugate Gradient 等 3 种训练算法及迭代次数、最大相对误差、误差平方和作为神经网络模型的预测性能评价指标对其进行优化并提高泛化能力。表 6 为不同训练算法对玄武岩纤维沥青混凝土疲劳寿命的预测结果。由表 6 可知:对于玄武岩纤维沥青混凝土疲劳寿命,3 种训练算法的预测结果具有一定的差异,但 3 种算法的最大误差均小于 1%,因此这 3 种算法对于玄武岩纤维沥青混凝土疲劳寿命的预估均有较为准确的结果,相比之下 Levenberg—Marquardt 训练算法收敛速度最快,泛化能力最好,只需 31~82 次训练便可结束,且其误差平方和相对更低,最大相对误差为 0.064%~0.485%。图 3 为玄武岩纤维沥青混凝土疲劳预估误差分布。由图 3 可知:实际值与预估值的疲劳寿命误差基本服从标准正态分布,正负误差分布相当,且约 87.24% 的疲劳次数预估结果误差集中分布在 -200~200 次,约有 3.19% 的结果误差值大于 600 次,由此可见,此神经网络具有较小的预测误差及较高的预测准确度,利用其预估玄武岩纤维沥青混凝土的疲劳寿命得到的结果较为准确。

4 结论

(1) 通过对两种长度、3 种掺量玄武岩纤维的沥青混凝土路用性能进行试验,得到了动稳定度、最大弯

表 6 不同训练算法神经网络疲劳寿命预测结果

应变水平/ ($\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$)	算法	迭代次 数/次	R^2	最大相对 误差/%	误差平方和	预测疲劳 寿命/次
600	Gradient Descent with Adaptive Learning Rate	3 751	0.999 10	0.075	$8.048\ 5 \times 10^4$	309 564
	Levenberg—Marquardt	82	0.998 75	0.064	$6.059\ 8 \times 10^3$	321 824
	Scaled Conjugate Gradient	127	0.999 21	0.071	$7.685\ 9 \times 10^4$	315 899
800	Gradient Descent with Adaptive Learning Rate	2 712	0.998 97	0.910	$2.012\ 5 \times 10^6$	141 958
	Levenberg—Marquardt	49	0.997 26	0.275	$2.775\ 8 \times 10^4$	144 729
	Scaled Conjugate Gradient	159	0.979 2	0.76	$1.125\ 4 \times 10^6$	144 562
1 000	Gradient Descent with Adaptive Learning Rate	4 095	0.999 51	0.521	$3.190\ 0 \times 10^6$	49 013
	Levenberg—Marquardt	31	0.997 76	0.485	$7.485\ 2 \times 10^4$	49 547
	Scaled Conjugate Gradient	113	0.986 9	0.498	5.27×10^5	49 245

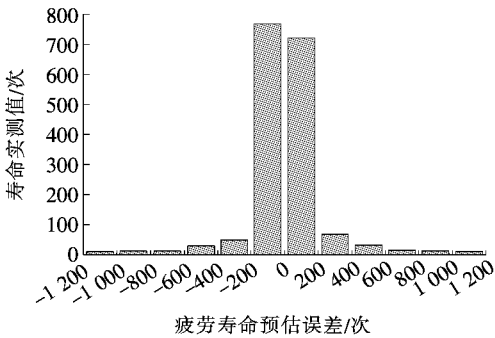


图 3 疲劳寿命预估误差分布

拉应变、残留稳定度、冻融劈裂抗拉强度比 4 种评价指标,通过与基准组对比,结果表明:掺入玄武岩纤维后,沥青混凝土的各项路用性能均得到了较大提高,玄武岩纤维沥青混凝土路用性能良好。

(2) 通过熵权法加权的灰靶理论对 6 组试件的路用性能综合评价计算,表明同等条件下掺加 0.3% 的 6 mm 玄武岩纤维后沥青混凝土的路用性能综合性能最好。

(3) 通过对路用性能最优组及基准组进行四点弯曲疲劳试验,结果表明相对于无纤维组,玄武岩纤维组沥青混凝土的疲劳寿命显著增强,最大可提高 342.12%。

(4) 采用 BP 神经网络模型对玄武岩纤维沥青混凝土疲劳寿命预测可得到较为准确的结果,最大误差小于 1%。相比之下 Levenberg—Marquardt 训练算法收敛速度最快,泛化能力最好,且其误差平方和相对更低,最大相对误差为 0.064%~0.485%。

参考文献:

[1] 韦佑坡,张争奇,司伟,等.玄武岩纤维在沥青混合料中的

作用机理[J].长安大学学报(自然科学版),2012(2).

[2] 张万磊,孙雪伟,唐建亚. SMA 矿物纤维用量比选与评价[J].现代交通技术,2006(1).

[3] Jongsung Sim,Cheolwoo Park,Do Young Moon. Characteristics of Basalt Fiber as a Strengthening Material for Concrete Structures[J]. Composites Part B,2005,36(6).

[4] Lee SJ,Rust J P,Hamouda H,et al. Fatigue Cracking Resistance of Fiber—Reinforced Asphalt Concrete[J]. Textile Res J,2005,75(2):123.

[5] 郭寅川,李震南,申爱琴,等.玄武岩纤维沥青胶浆优化设计及机理分析[J].建筑材料学报,2018(1).

[6] 覃潇,申爱琴,郭寅川.基于关联性的玄武岩纤维沥青胶浆及其混合料性能研究[J].材料导报,2016(12).

[7] 覃潇,申爱琴,郭寅川.玄武岩纤维沥青胶浆性能试验研究[J].建筑材料学报,2016(4).

[8] 文月皎.玄武岩纤维沥青混合料增强机理及路用性能研究[D].吉林大学硕士学位论文,2017.

[9] 徐刚.纤维沥青混合料增强机理及性能研究[D].大连交通大学硕士学位论文,2012.

[10] 陈建荣,叶俊,吴逢春,等.短切玄武岩纤维沥青混合料疲劳性能研究[J].公路,2013(11).

[11] 张伟喜,党曼丽,张江威.纤维增强 AC—16I 型沥青混合料疲劳性能试验研究[J].公路交通科技(应用技术版),2014(8).

[12] 周航.玄武岩纤维沥青混合料疲劳自愈合性能研究[D].内蒙古工业大学硕士学位论文,2018.

[13] 许珊珊.玄武岩纤维沥青胶浆性能及其界面粘结特性研究[D].扬州大学硕士学位论文,2018.

[14] 申爱琴,喻沐阳,周笑寒,等.橡胶沥青混合料疲劳损伤及全周期寿命预估[J].建筑材料学报,2018(4).