

纳米 SiO₂ 改性水泥混凝土优选及疲劳寿命预估

曹竞荣

(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5组不同掺量水平的纳米 SiO₂ 改性混凝土综合路用性能进行评价分析,得到最优纳米 SiO₂ 掺量;选择最优组改性混凝土进行弯曲疲劳试验,以弯拉强度及荷载作用次数为参数,建立 BP 神经网络模型。结果表明:经过纳米 SiO₂ 改性的混凝土其各项路用性能均得到有效提高,其中 1.5% 掺量水平下,纳米 SiO₂ 改性混凝土路用性能综合评价最高;采用 BP 神经网络模型预测 1.5% 掺量水平下纳米 SiO₂ 改性混凝土疲劳寿命可得到较为准确的结果,最大误差小于 1%,Levenberg-Marquardt 训练算法与另外两种算法相比具有最少的迭代次数及最优的收敛速度和泛化能力,且误差平方和相比之下最低,最大相对误差为 0.011%~0.041%。

关键词:纳米 SiO₂ 改性水泥混凝土;灰靶理论;熵权法;神经网络;疲劳寿命预估

纳米 SiO₂ 具有良好的物理填充性、优越的稳定性、补强性及更为彻底的火山灰效应等,是弥补混凝土弯拉强度及刚度缺陷的优良外掺材料。在混凝土中掺入纳米 SiO₂ 后,可使混凝土发生水化反应,并在早期与 Ca(OH)₂ 迅速发生反应进行二次水化,试验表明:纳米 SiO₂ 掺量为 0.25%~3% 时反应速度最快,此过程能够产生更加稳定的 C—S—H 凝胶。Salkhordeh 等及 Hosseini 等均发现 10% 的纳米 SiO₂ 掺入能够引起 64.86% 的混凝土 28 d 抗压强度提升。此外,纳米 SiO₂ 的掺入亦能显著提升混凝土的抗弯拉强度及疲劳寿命。李朋飞等研究表明:掺入 0.75% 纳米 SiO₂ 时,可提升改性混凝土抗弯拉强度 7.4%,同时当应力水平为 0.75、0.80、0.85 时,混凝土疲劳寿命可分别延长 48.4%、48.6%、68.6%。另外,徐晶等通过纳米压痕技术表征纳米 SiO₂ 改性混凝土界面过渡区 ITZ,并对其性能进行建模分析,结果发现 ITZ 的微观结构得到明显改善,主要是由于纳米 SiO₂ 具有良好的物理填充作用及产生的火山灰效应,能够填充混凝土内部微孔,从而提升 ITZ 的力学强度,数据表明其与浆体之间的模量提高了 60%。

综上所述,在混凝土中掺入纳米 SiO₂ 可明显提升其水化性能、力学性能及微观结构,目前研究主要集中在研究纳米 SiO₂ 改性混凝土试验并分析其性能变化规律,然而对于纳米 SiO₂ 材性特征优选的数学分析还不深入,同时疲劳寿命预估相关研究尚且不足。基于

此,该文对不同掺量的纳米 SiO₂ 改性混凝土综合路用性能进行试验研究,借助熵权法加权,利用灰靶决策理论分析抗压强度、抗弯拉强度、断裂韧性、60 次冻融循环后的相对动弹模量等指标,优选出这 4 种性能指标下的最优纳米 SiO₂ 掺量水平。此外,为了预估改性混凝土疲劳寿命,该文对最优组改性混凝土进行三点弯曲疲劳性能试验,以弯拉强度及荷载作用次数为参数,利用 BP 神经网络模型模拟参数指标之间的隐形规律,并依靠遗传迭代,使结果更为精确。研究结果将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

研究选用细度为 390 m²/kg 的 P.O. 42.5 级普通硅酸盐水泥,其安定性为 1.0 mm,初凝、终凝时间分别为 175、248 min,3、28 d 抗折强度分别为 6.9、9.0 MPa,3、28 d 抗压强度分别为 34.5、52.4 MPa;选用表观密度为 2.71 g/cm³ 的反击破花岗岩碎石为粗集料,其粒径为 4.75~9 mm 及 9.5~19 mm;选用含泥量为 0.62% 且细度模数为 2.70 的河砂为细集料;选用含气量为 3.1% 且减水率为 26% 的 JB-ZSC 型聚羧酸高性能减水剂为外加剂;并选用固体粉末状纳米 SiO₂ (NS),其参数指标如表 1 所示。

表 1 纳米 SiO₂ 参数指标

$w_i /$ %	平均粒径/ nm	比表面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	pH 值
99.9	12	5 769	6.0

1.2 配合比设计

研究以水胶比 $W/B=0.31$ 的 C40 混凝土为基准混凝土, 试验中纳米 SiO₂ 掺量(以质量分数记)为胶凝材料的 0.5%(1[#])、1.0%(2[#])、1.5%(3[#])、2.0%(4[#])、2.5%(5[#]), 新拌基准混凝土满足 JTG F30—2003《公路水泥混凝土路面施工技术规范》要求, 其技术性能测试结果如表 2 所示。

表 2 新拌基准混凝土技术性能测试结果

坍落度/ mm	抗弯拉强度/MPa		抗压强度/MPa	
	7 d	28 d	7 d	28 d
32~41	4.72	5.68	43.21	47.09

1.3 试验设计

纳米 SiO₂ 改性混凝土按表 3 所示比例配置, 并成型 400 mm×100 mm×100 mm 的梁形试件, 除抗冻试验外, 均在试件成型脱模并养护至 28 d 后进行。抗压、抗弯拉强度试验参照 GB/T 50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》进行。断裂韧性试验采用 MTS—810 万能试验机进行三点弯曲试验, 并在试件跨中底部预制 1 cm 的裂缝, 缝宽 1~2 mm, 根据式(1)、(2)计算断裂韧度。

表 3 混凝土配合比

编号	混凝土材料组成/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)					
	NS	水泥	水	粗集料	砂	减水剂
0 [#]	0					
1 [#]	2.49					
2 [#]	4.98	498	154	1 033	738	3.87
3 [#]	7.47					
4 [#]	9.96					
5 [#]	12.45					

$$K_{IC} = f\left(\frac{a}{h}\right) \frac{F_{\max} S}{th^{\frac{3}{2}}} \tag{1}$$

$$f\left(\frac{a}{h}\right) = 2.9\left(\frac{a}{h}\right)^{\frac{1}{2}} - 4.6\left(\frac{a}{h}\right)^{\frac{3}{2}} + 21.8\left(\frac{a}{h}\right)^{\frac{5}{2}} - 37.6\left(\frac{a}{h}\right)^{\frac{7}{2}} + 38.7\left(\frac{a}{h}\right)^{\frac{9}{2}} \tag{2}$$

式中: K_{IC} 为断裂韧度($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$); F_{\max} 为试验最大荷载(N); S 为试件的跨度(mm); h 为试件高度(mm); t 为试件宽度(mm); a 为预裂缝深度(mm)。

纳米 SiO₂ 改性混凝土抗冻融试验采用整体受冻方法, 该方法借鉴了美国 ASTM C672—2003 规范中的冻融循环升降温制度(慢冻法)。此外, 根据中国规范 GBJ 82—85《普通混凝土长期性能和耐久性试验方法》, 试件成型并标准养护 28 d 后, 以相对动弹模量评价指标进行测试, 然后对试件进行冻融循环, 以(−17±2.8)℃的低温试验箱内冻结 16~18 h 及常温(23±1.7)℃中融化 6~8 h 为一次循环, 60 次冻融循环后测试试件动弹模量。

同时为进一步研究不同应力水平下纳米 SiO₂ 改性混凝土的疲劳性能, 研究基于混凝土抗压强度、抗弯拉强度、断裂韧性及 60 次冻融后的相对动弹模量利用熵权法加权的灰靶决策选择最优组纳米 SiO₂ 掺量, 选择 50%、65%、80% 共 3 种抗弯拉强度作为不同等级应力水平, 利用 MTS Landmark 万能试验机进行疲劳试验, 以 10 Hz 频率及 0.1 低高应力比进行三分点正弦波加载, 并以试件断裂作为疲劳寿命的判定标准。

试验中均以每组 3 个试件测试平均值作为试验结果。

2 结果与分析

2.1 基于灰靶决策的纳米 SiO₂ 掺量优选

不同掺量下纳米 SiO₂ 改性混凝土各项性能测试结果见表 4。

表 4 不同掺量下纳米 SiO₂ 改性混凝土性能

试件编号	纳米 SiO ₂ 掺量/%	抗压强度/MPa	抗弯拉强度/MPa	断裂韧性/($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)	相对动弹模量/%
0 [#]	0	47.09	5.68	0.75	62.4
1 [#]	0.5	50.78	6.21	0.94	72.8
2 [#]	1.0	50.06	6.49	1.16	76.1
3 [#]	1.5	49.92	6.18	1.42	80.4
4 [#]	2.0	49.87	5.98	1.21	85.7
5 [#]	2.5	47.96	5.76	1.17	81.1

由表 4 可知: 掺加纳米 SiO₂ 后, 水泥混凝土各项性能均得到了明显提高。改性混凝土抗压强度在 0.5% 掺量下提升最大, 较基准混凝土提高 7.84%; 对于抗弯拉强度, 在 1.0% 掺量水平下提高最大, 较基准

混凝土增大 14.26%；对于断裂韧性，在 1.5% 掺量水平下提升最大，较基准混凝土增大 89.33%；对于 60 次冻融循环后的相对动弹模量，在 2.0% 掺量下改善效果最好，较基准混凝土提高 37.34%。

总体来说，由于纳米 SiO₂ 较高的活性，掺入混凝土后，能够在早期迅速与 Ca(OH)₂ 反应，生成大量网状致密的 C—S—H 凝胶，同时纳米 SiO₂ 可以作为内部孔隙结构的填充料，使混凝土结构更加密实，不仅显著增强界面过渡区强度，减少裂纹的产生，提高混凝土的力学强度及断裂韧性，而且能够有效细化孔结构，减少有害孔隙数量，切断外界水分及有害物质进入混凝土内部的通道，从而改善混凝土抗冻性。然而由于不同的性能指标对于纳米 SiO₂ 掺量的最优选择不同，因此该研究采用灰靶理论，利用抗压强度、抗弯拉强度、断裂韧性以及 60 次冻融循环后的相对动弹模量 4 种评价指标对 5 种掺量模式中的最优性能组进行优选。

(1) 确定决策矩阵

令 W_i 为多极性指标序列， $W_i(k)$ 为模式 i 指标 k 的数据，即：

$$W_i(k) = [W_i(1), W_i(2), W_i(3), W_i(4)] \tag{3}$$

其中： $i=1,2,3,4,5; j=1,2,3,4$ 。

对于水泥混凝土的抗压强度、抗弯拉强度、断裂韧性、冻融后相对动弹模量 4 个指标均用极大值来确定。即 $W_0(k) = \max W_i(k) = \max [W_1(k), W_2(k), \dots, W_5(k)]$ 。

因此可得标准模式 $W_0 = [W_0(1), W_0(2), W_0(3), W_0(4)] = (50.78, 6.49, 1.42, 85.7)$ 。

进行灰靶变换得到决策矩阵：

$$x_i(k) = \frac{\min[W_i(k), W_0(i)]}{\max[W_i(k), W_0(i)]} \tag{4}$$

其中： $i=1,2,3,4,5; j=1,2,3,4$ 。

因此可得决策矩阵 X 为：

$$X = \begin{bmatrix} 1.000 & 0.957 & 0.662 & 0.849 \\ 0.986 & 1.000 & 0.817 & 0.888 \\ 0.983 & 0.952 & 1.000 & 0.938 \\ 0.982 & 0.921 & 0.852 & 1.000 \\ 0.944 & 0.888 & 0.824 & 0.946 \end{bmatrix}$$

(2) 计算靶心系数

令差异信息集元素为：

$$\Delta_i(k) = |1 - x_i(k)| \tag{5}$$

靶心系数计算公式为：

$$Y[x_0(k), x_i(k)] = \frac{\min \Delta_i(k) + 0.5 \max \Delta_i(k)}{\Delta_i(k) + 0.5 \max \Delta_i(k)} \tag{6}$$

由此可得出靶心系数组成的矩阵 Y 为：

$$Y = \begin{bmatrix} 1.000 & 0.797 & 0.333 & 0.528 \\ 0.923 & 1.000 & 0.480 & 0.601 \\ 0.909 & 0.779 & 1.000 & 0.732 \\ 0.904 & 0.681 & 0.533 & 1.000 \\ 0.751 & 0.601 & 0.490 & 0.523 \end{bmatrix}$$

(3) 熵权法确定权重系数

研究对各个指标的权重系数采用熵权法进行计算。以式(4)中灰靶变换后所得决策矩阵为风险评价矩阵，对数据进行归一化处理，计算第 i 个模式在第 k 个评价指标上的特征比重 $f_k(i)$ 。

$$f_k(i) = \frac{X_i(k)}{\sum_{i=1}^5 X_i(k)} \tag{7}$$

计算指标 k 的信息熵 H_k ：

$$H_k = -\frac{1}{\ln 5} \sum_{i=1}^5 f_k(i) \ln f_k(i) \tag{8}$$

利用熵计算各指标客观权重 α_k ：

$$\alpha_k = \frac{1 - H_k}{\sum_{k=1}^4 (1 - H_k)} \tag{9}$$

计算所得指标权重为 $\alpha_k = (0.249\ 2, 0.250\ 2, 0.249\ 5, 0.251\ 1)$ 。

(4) 靶心度计算

靶心度计算公式为：

$$Y(x_0, x_i) = \sum_{k=1}^4 \alpha_k Y[x_0(k), x_i(k)] \tag{10}$$

计算结果如表 5 所示。

表 5 不同掺量纳米 SiO₂ 改性混凝土靶心度计算结果

改性混凝土编号	靶心度 Y 值
1 [#]	0.664 3
2 [#]	0.750 9
3 [#]	0.854 7
4 [#]	0.779 7
5 [#]	0.591 1

由表 5 可知：掺量水平为 1.5% 的 3[#] 组纳米 SiO₂ 改性混凝土综合性能最优。

2.2 疲劳性能

综合性能最优组纳米 SiO₂ 改性混凝土在 3 种应力水平下的疲劳寿命如图 1 所示。

由图 1 可知：1.5% 掺量水平下，纳米 SiO₂ 改性混凝土的疲劳寿命在 50%、65%、80% 共 3 种应力水平

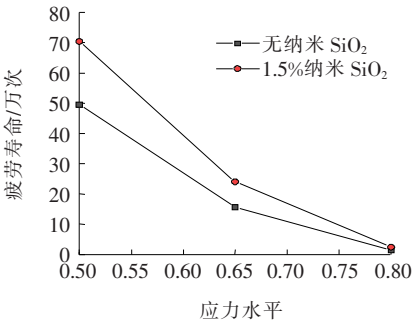


图 1 纳米 SiO₂ 改性混凝土不同应力水平下的疲劳寿命

下均得到了显著提升, 相较无纳米 SiO₂ 组混凝土分别提升了 42.15%、53.36%、65.27%。分析原因在于纳米 SiO₂ 能够有效促进混凝土水化进程, 并在水化早期与 Ca(OH)₂ 迅速进行二次水化生成更为稳定的 C—S—H 凝胶, 从而增强混凝土结构密实性, 填充混凝土内部孔隙, 同时纳米 SiO₂ 自身具有良好的物理填充性及火山灰效应产物能够改善混凝土内部微孔, 从而提升混凝土内部集料与硬化水泥浆界面过渡区的力学强度, 导致抵抗微裂纹能力提高, 降低了裂缝产生的可能性, 进而延长混凝土的疲劳寿命。

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

不同水平应力下纳米 SiO₂ 改性混凝土疲劳损伤过程不确定性较大, 普通固定函数模型难以准确预测疲劳寿命。BP 神经网络模型具有高度自学习与自适应能力的优点(拓扑结构图见图 2), 当其隐含层节点足够多时, 即使是有限间断点的非线性函数也能够高

精度拟合。因此该文利用 BP 神经网络模型对 3 种应力水平下 1.5% 掺量水平纳米 SiO₂ 改性混凝土疲劳寿命进行预估。图 2 中, 输入向量 T 为纳米 SiO₂ 改性混凝土的弯拉强度, 输出向量 P 为纳米 SiO₂ 改性混凝土的疲劳加载次数(该文以混凝土断裂时的加载次数作为疲劳寿命判定标准), 由经验公式 $J = \sqrt{m+n} + \alpha$ (α 为 1~10 的常数)确定隐含层节点数 J , 根据模型训练情况在 3~11 之间取值。

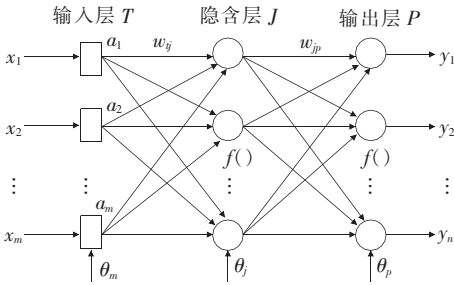


图 2 BP 神经网络拓扑结构图

3.2 疲劳寿命神经网络模型分析

研究选用 3 种神经网络模型(Gradient Descent with Adaptive Learning Rate、Levenberg — Marquardt、Scaled Conjugate Gradient)对 1.5% 掺量水平下纳米 SiO₂ 改性混凝土疲劳寿命进行预测评价, 并将迭代次数、最大相对误差、误差平方和作为优化指标来提高泛化能力。3 种不同模型对纳米 SiO₂ 改性混凝土疲劳寿命的预测结果如表 6 所示。

由表 6 可知: 3 种算法对于纳米 SiO₂ 改性混凝土疲劳寿命的预测结果具有差异, 但 3 种算法的最大相对误差均小于 1%, 因此 3 种算法均能够较为准确地预估 1.5% 掺量水平下纳米 SiO₂ 改性混凝土疲劳寿

表 6 3 种不同训练算法神经网络疲劳寿命预测结果

应力水平	评价指标	单位	Gradient Descent with Adaptive Learning Rate 模型	Levenberg Marquardt 模型	Scaled Conjugate Gradient 模型
0.5	迭代次数	次	3 859	108	265
	R^2		0.998 95	0.999 10	0.999 27
	最大相对误差		0.008	0.011	0.012
	误差平方和		$3.031\ 5\times10^7$	$6.954\ 7\times10^7$	$7.995\ 8\times10^7$
	预测值	次	708 448	708 081	711 785
	迭代次数	次	1 028	89	182
0.65	R^2		0.998 24	0.998 95	0.999 01
	最大相对误差		0.027	0.018	0.030
	误差平方和		$4.385\ 4\times10^7$	$1.869\ 7\times10^7$	$5.198\ 5\times10^7$
	预测值	次	244 528	241 368	243 248

续表 6

应力水平	评价指标	单位	Gradient Descent with Adaptive Learning Rate 模型	Levenberg Marquardt 模型	Scaled Conjugate Gradient 模型
0.8	迭代次数	次	3 015	46	151
	R^2		0.999 09	0.998 91	0.976 82
	最大相对误差		0.084	0.041	0.124
	误差平方和		$4.158\ 6\times10^6$	$9.842\ 5\times10^5$	$9.587\ 1\times10^6$
	预测值	次	254 681	24 562	26 513

命。3 种算法中,Levenberg—Marquardt 具有最少的迭代次数、最低的误差平方和(最大相对误差仅为 0.011%~0.041%)、最高的准确度、最快的收敛速度(训练 46~108 次即结束),拥有最好的泛化能力。对 Levenberg—Marquardt 训练算法误差分布进行作图分析(图 3),由图 3 可知该算法得到的预估值与实际值的误差基本服从标准正态分布,正负误差分布相当,约 89.51%的结果误差集中分布在-2 000~2 000 次之间,约有 2.84%的结果误差值大于 6 000 次,由此可见,利用 Levenberg—Marquardt 神经网络训练算法预估 1.5%掺量水平下纳米 SiO₂ 改性混凝土疲劳寿命具有较小的预测误差及较高的预测准确度。

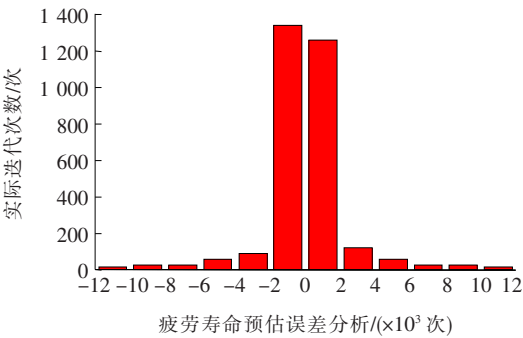


图 3 疲劳寿命预估误差分布

4 结论

(1) 对 5 种掺量水平纳米 SiO₂ 改性混凝土综合性能进行试验,将掺入纳米 SiO₂ 前后的抗压强度、抗弯拉强度、断裂韧度、60 次冻融循环后相对动弹模量 4 个指标进行对比分析,结果表明纳米 SiO₂ 改性混凝土综合性能均得到了明显提高。

(2) 基于熵权法加权的灰靶理论对 5 组不同配比的纳米 SiO₂ 改性混凝土综合性能进行计算,结果表明同等条件下 1.5%掺量水平下纳米 SiO₂ 改性混凝土综合性能最好。

(3) 通过对综合性能最优组及无纳米 SiO₂ 组混凝土进行对比三点弯曲疲劳试验,结果表明纳米 SiO₂ 改性混凝土疲劳寿命显著增强,最高可提升 67.27%。

(4) 采用 BP 神经网络模型对纳米 SiO₂ 改性混凝土疲劳寿命预测较为精确,3 种模型中最大相对误差均小于 1%。其中 Levenberg—Marquardt 训练算法迭代次数最少,收敛速度最快,泛化能力最好,且其误差平方和最低,具有较高的预测精准度。因此,建议选用 Levenberg—Marquardt 神经网络训练算法对 1.5%掺量水平下纳米 SiO₂ 改性混凝土疲劳寿命进行预估,可以得到较高准确度的结果。

参考文献:

[1] 李鹏飞,张擎,李晶晶. 掺加纳米二氧化硅水泥混凝土路用性能[J]. 长安大学学报(自然科学版),2010(3).

[2] 劳有盛,张磊,王雪平,等. 纳米颗粒对水泥基材料性能影响的研究进展[J]. 材料导报,2014(3).

[3] 路阳,卢军太,何小芳,等. 纳米二氧化硅的制备及其对水泥水化影响的研究进展[J]. 硅酸盐通报,2013(7).

[4] 巴恒静,冯奇,杨英姿. 粉煤灰、硅灰及纳米硅与 C₃S 水化反应产物的显微结构研究[J]. 硅酸盐学报,2002(6).

[5] 王茹,张绍康,王高勇. 矿物外加剂对丁苯聚合物/水泥复合胶凝材料凝结硬化过程的影响及机制[J]. 材料导报,2017(24).

[6] Salkhorder S, Golbazi P, Amini H. The Improvement of 28 d Compressive Strength of Self-Compacting Concrete Made by Different Percentages of Recycled Concrete Aggregates Using Nano-Silica[J]. International Journal of Civil and Environmental Engineering. 2011,5(11):529-532.

[7] Hosseini P. Developing Concrete Recycling Strategies by Utilization of Nano-SiO₂ Particles[J]. Waste and Biomass Valorization. 2011,2(3):347-355.

[8] Hosseini P, Booshehrian A, Delkash M, et al. Use of Nanocrystalline SiO₂ to Improve Microstructure and Compressive Strength of Recycled Aggregate Concretes[M]. Nanotechnology in Construction 3,2009.

考虑基质吸力的石灰改良土回弹模量 简化预测模型研究

梅杨

(河南建筑职业技术学院, 河南 郑州 450064)

摘要:针对两种路基石灰改良土,利用滤纸法获取了相应的土水特征曲线,并利用循环荷载三轴试验,测定了改良土在不同含水率、围压、动偏应力下的回弹模量,分析了基质吸力对回弹模量的影响规律,最终在土水特征曲线 SWCC、饱和含水率回弹模量 $M_{R\text{sat}}$ 、最优含水率回弹模量 $M_{R\text{opt}}$ 的基础上,建立了考虑基质吸力影响的回弹模量简化预测模型。研究表明:石灰改良土的回弹模量与含水率、基质吸力、外部应力状态存在明显的非线性关系,简化模型与其他预测模型相比,建模过程更加简化,可在试验数据较少条件下达到类似的预测精度,为定量预测湿度和基质吸力对石灰改良土路基回弹模量的影响提供了更便捷的工具。

关键词:路基;石灰改良土;回弹模量;循环荷载三轴试验;基质吸力;预测模型

1 引言

回弹模量被定义为路基土所受循环偏应力与回弹应变的比值,其不仅影响路面弯沉和疲劳寿命,还与由累积塑性变形引起的路面车辙破坏有关,因为较低的路基刚度造成应力扩散不足而导致更大的应力集中效应,从而产生过大的永久变形和不均匀沉降。因此,回弹模量是路基设计的重要控制参数。

掺石灰是中国软黏土地区常用来改良路基填料的

一种方法,可有效改善填料的工程性能指标,有利于节省土地资源,降低工程成本。建成后的石灰改良土路基处于车辆荷载反复作用下,不同层位路基的应力状况不同,路基土回弹模量表现出高度的应力依赖性;同时,路基在最优含水率条件下进行压实,随后含水率受到周围环境影响而逐渐达到平衡状态,并呈现季节性波动,回弹模量不仅受到应力状态的影响,还受到含水率和基质吸力的制约。目前,国内外学者已将基质吸力纳入回弹模量预测模型中,Khoury 和弋晓明等将基质吸力作为直接影响回弹模量的独立变量;Liang和

- *****
- [9] 肖建庄,陈祥磊,李标,等. 纳米 SiO_2 和粉煤灰复掺对再生混凝土性能的影响[J]. 建筑科学与工程学报,2020(1).
- [10] 徐晶,王先志. 纳米二氧化硅对混凝土界面过渡区的改性机制及其多尺度模型[J]. 硅酸盐学报,2018(8).
- [11] 徐晶,王彬彬,赵思晨. 纳米改性混凝土界面过渡区的多尺度表征[J]. 建筑材料学报,2017(1).
- [12] 李刊,魏智强,乔宏霞,等. 纳米 SiO_2 改性聚合物水泥基复合材料早期微观结构及性能[J/OL]. 复合材料学报: 1-11[2020-03-15]. <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200218.002>.
- [13] 朱靖塞,许金余,白二雷,等. 复合纳米材料对混凝土动态力学性能的影响[J]. 复合材料学报,2016(3).
- [14] SUN J F, XU Z Q, LI W F, et al. Effect of Nano-SiO₂ on the Early Hydration of Alite-Ulphoaluminate Cement[J]. Nanomaterials, 2017,7(5).
- [15] WANG L G, ZHENG D P, ZHANG S P, et al. Effect of Nano-SiO₂ on the Hydration and Microstructure of Portland Cement[J]. Nanomaterials 2016, 6(12).
- [16] ASTM C672-2003 Standard Test Method for Scaling Resistance of Concrete Surfaces Exposed to Deicing Chemicals[S].
- [17] 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).

收稿日期:2019-12-15(修改稿)

基金项目:国家重点研发计划项目(编号:2017YFC0804301)

作者简介:梅杨,男,硕士,副教授. E-mail:337418272@qq.com