

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2020.12.048

# 基于改进的灰关联模型分析特定条件下水泥路面疲劳寿命影响因素

廖方方

(青岛市市政工程设计研究院有限责任公司, 山东 青岛 266000)

**摘要:** 基于一种改进的灰色关联模型,建立了移动荷载作用下的水泥路面板底脱空模型,提出了板底脱空演化作用下水泥路面疲劳寿命的计算方法,分析了水泥路面疲劳寿命影响因素的影响程度。结果表明:面层板厚度的灰色关联度为0.65,动荷载的灰色关联度为0.63,说明动荷载和面层板厚度对动荷载与板底脱空耦合作用下水泥路面疲劳寿命的影响程度较高,而脱空半径、脱空深度、行驶速度和基层动弹性模量对动荷载与板底脱空耦合作用下水泥路面疲劳寿命的影响程度较小;面层动弹性模量的灰色关联度为0.05,说明面层动弹性模量对动荷载与板底脱空耦合作用下水泥路面疲劳寿命基本无影响。

**关键词:** 有限元模型;改进的灰关联模型;水泥路面;疲劳寿命;影响因素

**中图分类号:** U413.216

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-7716(2020)12-0176-04

## 0 引言

在动荷载与水泥路面板底脱空的作用下,水泥路面的疲劳寿命将逐渐减少<sup>[1-3]</sup>,而脱空半径、脱空深度、车辆行驶速度、动荷载、面层厚度、面层动弹性模量和基层动弹性模量均是影响水泥路面疲劳寿命的影响因素,但是每种因素对水泥路面疲劳寿命的影响程度不一。针对动荷载与板底脱空耦合作用下水泥路面疲劳寿命的影响因素,国内外学者做了很多研究。杨斌等<sup>[4]</sup>研究了重载与脱空耦合状态下水泥混凝土路面的应力和疲劳寿命,结果表明在温度、重载及脱空等几种不利因素的共同影响下,路面板受力状况急剧恶化,路面的使用寿命大大缩短,有时甚至可能产生极限破坏。谢远勇<sup>[5]</sup>、邱阳阳<sup>[6]</sup>分别根据试验及有限元计算方法提出了不同的路面疲劳寿命预估方法。叶丛等<sup>[7]</sup>利用层次分析法确定板底脱空状态下影响路面疲劳寿命的各个主影响因素所占权重,结果表明脱空半径对板底脱空状态下的路面疲劳寿命影响最大。程培峰等<sup>[8]</sup>基于正交设计试验方法,利用灰色关联模型分析了温拌橡胶沥青性能的影响因素。Fallah等<sup>[9]</sup>、Omran等<sup>[10]</sup>采用断裂力学模型以及线性疲劳损伤分析确定了沥青路面和温拌沥青混合料的疲劳损伤过程。

然而,目前关于动荷载与水泥路面板底脱空耦合作用下水泥路面的疲劳寿命影响因素研究仍然不多。因此,本文首先建立有限元模型,介绍了疲劳寿命的计算方法,最后利用一种改进的灰色关联模型,分析动荷载与水泥路面板底脱空耦合作用下水泥路面的疲劳寿命影响因素。

## 1 动荷载与板底脱空耦合作用下水泥路面的疲劳寿命计算

### 1.1 模型建立

采用大型有限元计算软件 Ansys 建立动荷载与板底脱空耦合作用下的水泥路面模型,模型面层和基层尺寸采用 5 m × 4 m,土基采用扩大基础,尺寸为 7 m × 6 m。水泥路面结构层参数见表 1。通过设置模型的边界条件,来模拟道路的实际状态。对脱空形状与脱空位置进行正交分析后发现,板底脱空位置分别位于板角、横缝中部和纵缝中部;脱空形状分别为椭球形、椭圆形、圆形、三角形和正方形;脱空形状为椭球形时最接近实际情况。经建模分析得到,脱空位置位于板角为水泥路面受力最不利状态。因此本文选用脱空形状为椭球形、脱空位置位于板角进行建模分析。图 1 为有限元计算模型。

### 1.2 疲劳寿命计算方法

不同失效概率下,混凝土板的疲劳方程为:

$$\lg N_f = \left[ \frac{(-S^{-5.367} \lg(1-P_f))}{0.0032} \right]^{1/4.394} \quad (1)$$

收稿日期: 2019-09-30

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(51408480)

作者简介: 廖方方(1991—),女,硕士,工程师,从事道路交通设计工作。

表1 水泥路面结构层参数表

结构层	厚(深)度/mm	动弹性模量 $E_d$ /MPa	泊松比 $\mu$	密度 $(t \cdot mm^{-3})$	导热系数 $(W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$	线膨胀系数 $/^\circ C^{-1}$
水泥路面板	280	50 000	0.15	$2.8 \times 10^{-9}$	1.5	$1.5 \times 10^{-5}$
脱空部分	10					
基层	200	5 000	0.20	$2.5 \times 10^{-9}$	1.0	$0.5 \times 10^{-5}$
土基	6 000	300	0.40	$1.8 \times 10^{-9}$	1.0	$0.5 \times 10^{-5}$

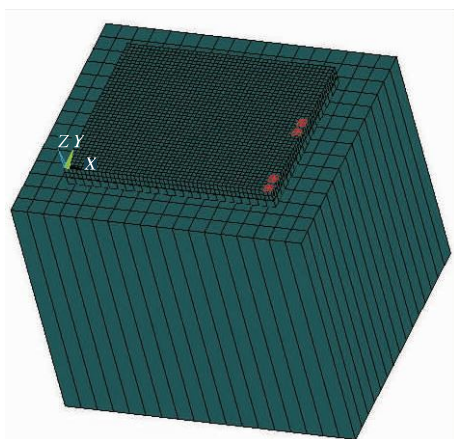


图1 有限元计算模型

式中:  $N_f$  为混凝土路面的疲劳寿命;  $P_f$  为可靠度,  $P_r = 1 - P_f$ , 其中的  $P_f$  为失效概率;  $S$  为荷载应力  $\sigma$  下的应力水平 ( $S = \sigma / f_r$ , 其中的  $f_r$  为混凝土极限弯拉强度)。

当失效概率  $P_f = 50\%$  时, 式(1)可改写为:

$$\lg N_f = 2.813 \left( \frac{1}{S} \right)^{1.22} \quad (2)$$

由此可得:

$$S = \frac{2.334}{(\lg N_f)^{0.82}} \quad (3)$$

将疲劳寿命为  $N_f$  时的累计损伤量  $D$ 、应力水平  $S = \frac{\sigma}{f_r}$  代入推演后的式(3), 并进行公式变形, 则可得动荷载与板底脱空耦合作用下水泥路面疲劳寿命的计算方程:

$$\lg N_f = 2.813 \left( \frac{(1-D)f_r}{\sigma} \right)^{1.22} \quad (4)$$

### 1.3 疲劳寿命计算结果

按 Ansys 有限元软件计算出不同变量组合作

下水泥路面的等效应力  $\sigma$ , 再将  $\sigma$  代入动荷载与板底脱空耦合作用下水泥路面疲劳寿命的计算方程式(4), 即可计算出动荷载与板底脱空耦合作用下水泥混凝土路面的疲劳寿命, 结果见表2。

## 2 改进的灰色关联分析方法介绍

改进的灰色关联分析方法的步骤如下<sup>[11]</sup>:

(1) 序列的基本运算, 参考序列的确定:  $x_0 = \{x_0(k) | k=1, 2, \dots, n\}$ ; 比较序列的确定:  $x_i(k) = \{x_i(k) | k=1, 2, \dots, n\} (i=1, 2, \dots, n)$ 。

(2) 原始数据的初值化:  $x_0^0 = \{x_0(k)/x_0(1) | k=1, 2, \dots, n\}$ ,  $x_i^0 = \{x_i(k)/x_i(1) | k=1, 2, \dots, n\} (i=1, 2, \dots, n)$ 。

(3) 定义差因子:  $\Delta x_i^0 = |x_0^0 - x_i^0|$ 。

(4) 几何相似性灰色关联系数:  $\gamma_1(x_0(k), x_i(k)) = \frac{1}{1 + \Delta x_i^0}$ 。为提高几何相似性灰色关联系数的分辨率, 将  $\gamma_1$  改为指数形式:  $\gamma_1(x_0(k), x_i(k)) = e^{-\Delta x_i^0}$ 。

(5) 定义商因子:  $\Delta x_i = \frac{x_i}{x_0}$ 。

(6) 距离相近性灰色关联系数:  $\gamma_2(x_0(k), x_i(k)) = e^{-|1 - \Delta x_i^0|}$ 。

(7) 计算综合灰色关联系数:

$$\gamma(x_0(k), x_i(k)) = \gamma_1(x_0(k), x_i(k)) \times \gamma_2(x_0(k), x_i(k))^{1/2}$$

(8) 计算改进的灰色关联度:  $\gamma(x_0, x_i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \gamma(x_0(k), x_i(k))$ 。关联度值越大, 该因素的影响程度就越大。

表2 不同变量组合作用下水泥路面的等效应力和疲劳寿命

脱空半径/mm	脱空深度/mm	行驶速度 $(km \cdot h^{-1})$	动荷载/kN	面层厚度/mm	面层动弹性模量/MPa	基层动弹性模量/MPa	等效应力/MPa	疲劳寿命/次
400	5	40	100	160	30 000	2 000	2.64	2 032
600	10	60	120	200	35 000	3 000	2.79	1 236
800	15	80	140	240	40 000	4 000	2.76	1 359
1 000	20	100	160	280	45 000	5 000	2.58	2 523
1 200	25	120	180	320	50 000	6 000	2.81	1 162

### 3 动荷载与板底脱空耦合作用下水泥路面疲劳寿命影响因素分析

#### 3.1 选取参考序列与比较序列指标

脱空半径、脱空深度、车辆行驶速度、动荷载、面层厚度、面层动弹性模量和基层动弹性模量7个因素都会对动荷载作用下水泥路面的疲劳寿命产生影响,而影响程度不尽相同。

因此,本文以脱空半径、脱空深度、车辆行驶速度、动荷载、面层厚度、面层动弹性模量和基层动弹性模量7个因素作为比较序列,动荷载与板底脱空耦合作用下水泥路面的疲劳寿命作为参考序列。

#### 3.2 建立改进的灰色关联模型

假设  $x_0(k)=f(x_i(k))$ ,  $x_0(k)$  为参考序列指标,  $x_i(k)$  为比较序列指标。在动荷载作用下水泥路面疲劳寿命影响因素的分析过程中,水泥路面的疲劳寿命与各影响因素形成改进的灰色关联模型。

#### 3.3 水泥路面疲劳寿命影响因素分析

确定比较序列和参考序列的原始数据,见表3;原始数据的初值化结果见表4;差因子的计算结果见表5;几何相似性灰色关联系数的计算结果见表6;商因子的计算结果见表7;距离相近性灰色关联系数的计算结果见表8;综合灰色关联系数的计算结果见表9;灰色关联度的计算结果见表10。

表4 原始数据的初值化结果

序列号	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_0$
1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2	1.50	2.00	1.50	1.20	1.25	1.17	1.50	0.61
3	2.00	3.00	2.00	1.40	1.50	1.33	2.00	0.67
4	2.50	4.00	2.50	1.60	1.75	1.50	2.50	1.24
5	3.00	5.00	3.00	1.80	2.00	1.67	3.00	0.57

表3 比较序列和参考序列的原始数据

序列号	比较序列							参考序列
	脱空半径 $x_1$ /mm	脱空深度 $x_2$ /mm	行驶速度 $x_3$ /( $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ )	动荷载 $x_4$ /kN	面层厚度 $x_5$ /mm	面层动弹性模量 $x_6$ /MPa	基层动弹性模量 $x_7$ /MPa	疲劳寿命 $x_0$ /次
1	400	5	40	100	160	30 000	2 000	2 032
2	600	10	60	120	200	35 000	3 000	1 236
3	800	15	80	140	240	40 000	4 000	1 359
4	1 000	20	100	160	280	45 000	5 000	2 523
5	1 200	25	120	180	320	50 000	6 000	1 162

表5 差因子的计算结果

序列号	$\Delta x_1^0$	$\Delta x_2^0$	$\Delta x_3^0$	$\Delta x_4^0$	$\Delta x_5^0$	$\Delta x_6^0$	$\Delta x_7^0$
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.89	1.39	0.89	0.59	0.64	0.56	0.89
3	1.33	2.33	1.33	0.73	0.83	0.66	1.33
4	1.26	2.76	1.26	0.36	0.51	0.26	1.26
5	2.43	4.43	2.43	-1.23	-1.43	-1.09	2.43

表6 几何相似性灰色关联系数的计算结果

序列号	$\gamma_1(x_1)$	$\gamma_1(x_2)$	$\gamma_1(x_3)$	$\gamma_1(x_4)$	$\gamma_1(x_5)$	$\gamma_1(x_6)$	$\gamma_1(x_7)$
1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2	0.41	0.25	0.41	0.55	0.53	0.57	0.41
3	0.26	0.10	0.26	0.48	0.44	0.51	0.26
4	0.28	0.06	0.28	0.70	0.60	0.77	0.28
5	0.09	0.01	0.09	3.41	4.17	2.99	0.09

表7 商因子的计算结果

序列号	$\Delta x_1$	$\Delta x_2$	$\Delta x_3$	$\Delta x_4$	$\Delta x_5$	$\Delta x_6$	$\Delta x_7$
1	0.10	0.00	0.01	0.02	0.04	7.14	0.48
2	0.35	0.01	0.05	0.07	0.12	20.47	1.75
3	0.44	0.01	0.05	0.08	0.13	21.85	2.19
4	0.19	0.00	0.02	0.03	0.05	8.66	0.96
5	0.13	0.00	0.01	0.02	0.03	5.27	0.63

表8 距离相近性灰色关联系数计算结果

序列号	$\gamma_2(x_1)$	$\gamma_2(x_2)$	$\gamma_2(x_3)$	$\gamma_2(x_4)$	$\gamma_2(x_5)$	$\gamma_2(x_6)$	$\gamma_2(x_7)$
1	0.40	0.37	0.37	0.38	0.38	0.00	0.59
2	0.52	0.37	0.39	0.39	0.41	0.00	0.47
3	0.57	0.37	0.39	0.40	0.42	0.00	0.31
4	0.45	0.37	0.38	0.38	0.39	0.00	0.96
5	0.42	0.37	0.37	0.37	0.38	0.01	0.69

由文献[12]可知,若灰色关联度  $\gamma \geq 0.6$ ,则影响因素影响程度较高;若  $0.5 \leq \gamma < 0.6$ ,则影响因素影响程度适中;若  $\gamma < 0.5$ ,则影响因素影响程度较低。由表10可知:面层板厚度的灰色关联度为

表9 综合灰色关联系数的计算结果

序列号	$\gamma(x_1)$	$\gamma(x_2)$	$\gamma(x_3)$	$\gamma(x_4)$	$\gamma(x_5)$	$\gamma(x_6)$	$\gamma(x_7)$
1	0.64	0.61	0.61	0.61	0.62	0.05	0.77
2	0.46	0.30	0.40	0.47	0.47	0.00	0.44
3	0.39	0.19	0.32	0.44	0.43	0.00	0.28
4	0.36	0.15	0.33	0.51	0.48	0.02	0.52
5	0.19	0.07	0.18	1.13	1.26	0.20	0.25

表10 灰色关联度计算结果

$\gamma_1$	$\gamma_2$	$\gamma_3$	$\gamma_4$	$\gamma_5$	$\gamma_6$	$\gamma_7$
0.41	0.26	0.37	0.63	0.65	0.05	0.45

0.65, 动荷载的灰色关联度为 0.63, 面层动弹性模量的灰色关联度为 0.05。进而得出结论: 动荷载和面层板厚度对动荷载与板底脱空耦合作用下水泥路面疲劳寿命的影响程度较高, 而脱空半径、脱空深度、行驶速度以及基层动弹性模量对动荷载与板底脱空耦合作用下水泥路面疲劳寿命的影响程度较小, 面层动弹性模量对动荷载与板底脱空耦合作用下水泥路面疲劳寿命基本无影响。

## 4 结 语

(1) 利用 Ansys 有限元软件建立了水泥路面板底脱空模型, 提出了动荷载与板底脱空耦合作用下水泥路面疲劳寿命的计算式:  $\lg N_f = 2.813 \left( \frac{(1-D)f_r}{\sigma} \right)^{1.22}$ 。

(2) 介绍了一种改进的灰色关联模型的建立步骤。

(3) 动荷载和面层板厚度对动荷载与板底脱空耦合作用下水泥路面疲劳寿命的影响程度较高,

而脱空半径、脱空深度、行驶速度和基层动弹性模量对动荷载与板底脱空耦合作用下水泥路面疲劳寿命的影响程度较小, 面层动弹性模量对动荷载与板底脱空耦合作用下水泥路面疲劳寿命基本无影响。

### 参考文献:

- [1] 彭永恒, 李想. 基于板底脱空的水泥混凝土路面动力特性分析[J]. 黑龙江大学自然科学学报, 2016, 33(2): 244-250.
- [2] AMEEN M, RAGHU B K, GOPALAKRISHNAN A R. Modeling of concrete cracking—A hybrid technique of using displacement discontinuity element method and direct boundary element method [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2012, 35 (9): 1054-1059.
- [3] 张国雄. 板底动水压力作用下水泥路面脱空机理及疲劳损伤研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2012.
- [4] 杨斌, 陈拴发, 胡长顺. 重载及脱空耦合状态下混凝土路面疲劳寿命分析[J]. 公路工程, 2005, 30(3): 175-177.
- [5] 谢远勇. 基于有限元法的级配碎石基层沥青路面疲劳寿命预估[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.
- [6] 邱阳阳. 基于弹塑性有限元法的沥青路面局部应变与疲劳寿命预估[D]. 西安: 长安大学, 2013.
- [7] 叶丛, 王乾, 丁亚碧. 脱空耦合下水泥混凝土路面疲劳寿命影响因素分析[J]. 公路, 2018 (7): 100-105.
- [8] 程培峰, 范平. 基于正交灰关联分析法的温拌橡胶沥青性能影响因素研究[J]. 中外公路, 2014, 34(4): 318-323.
- [9] FALLAH S, KHODAII A. Developing a fatigue fracture model for asphalt overlay reinforced with geogrid [J]. Materials and Structures, 2016, 49(5): 1705-1720.
- [10] OMRANI H, TANAKIZADEH A, GHANIZADEH A R, et al. Investigating different approaches for evaluation of fatigue performance of warm mix asphalt mixtures [J]. Materials and Structures, 2017, 50: 1-16.
- [11] 宁小磊, 吴颖霞, 陈战旗. 一种改进的灰色关联模型验证方法研究[J]. 计算机仿真, 2015, 32(7): 259-263.
- [12] 赵大勇. 基于灰色关联分析的沥青混合料紫外线老化影响因素分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.

(上接第 168 页)

较高的抗压强度和回弹模量;

(3) 采用钢渣作为筑路材料, 可以提高工业废渣的综合利用率, 减少废渣堆弃占地, 减少砂石料的开采, 具有良好的经济和环保效益, 应用前景广阔。

### 参考文献:

- [1] 曾梦澜, 阮文, 蒙艺, 等. 二灰钢渣碎石路面基层的设计与使用性能[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2012, 39(10): 1-5.
- [2] 徐方, 陈志超, 朱婧, 等. 钢渣路面基层材料安定性试验[J]. 混凝土, 2012(9): 59-62.
- [3] 李飞, 陈勇鸿, 高伏良, 等. 掺钢渣无机结合料稳定路面基层材料干缩试验研究[J]. 公路, 2012(12): 186-191.

- [4] 黄永强, 李飞, 欧碧峰, 等. 二灰稳定钢渣碎石基层材料沥青路面设计参数研究[J]. 公路工程, 2013, 38(1): 208-212.
- [5] 张智豪, 李波, 李鹏, 等. 改良铁尾矿用于道路基层材料的研究[J]. 中外公路, 2018, 38(6): 274-278.
- [6] 黄伟, 邱鹏, 赵鲁卿, 等. 钢渣-土混拌基层材料试验研究及微观机理分析[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(5): 1-11.
- [7] 申爱琴, 刘波, 郭寅川, 等. 隧道路面钢渣沥青混合料抗滑性能衰减试验研究[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(2): 284-290.
- [8] 刘玉民, 王兰, 王玉. 钢渣混合料用到道路基层材料工程应用[J]. 中外公路, 2018, 38(5): 209-213.
- [9] 黄伟, 邱鹏, 唐刚, 等. 钢渣混合土基层材料制备及性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(10): 3237-3242.