

# 基于灰色理论的水泥稳定碎石冲刷量模型

盛燕萍<sup>1</sup>, 李海滨<sup>2</sup>, 陈拴发<sup>1</sup>, 张登良<sup>3</sup>

(1. 长安大学 交通铺面材料教育部工程研究中心, 陕西 西安 710064;

2. 西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054; 3. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

**摘 要:** 为了有效确定水泥稳定碎石在工程中达到冲刷量设计标准的最佳材料组成, 采用灰色系统理论方法, 选取集料分形维数、水泥 28 d 砂胶强度、水泥剂量、含水量为建模参数, 建立了基于灰色系统理论的水泥稳定碎石 28 d 冲刷量预测模型, 并给出骨架密实和悬浮密实 2 种结构的水泥稳定碎石 28 d 冲刷量预测模型简化式。适用性验证表明: 2 种结构的水泥稳定碎石冲刷量预测值和实测值的相对误差均较小, 说明基于灰色理论的水泥稳定碎石预测模型可以较为准确地预测其 28 d 冲刷量值。

**关键词:** 道路工程; 水泥稳定碎石; 冲刷量; 预测模型; 灰色理论

**中图分类号:** U414. 18

**文献标志码:** A

## Erosion predict model of cement-stabilized macadam based on gray system theory

SHENG Yan-ping<sup>1</sup>, LI Hai-bin<sup>2</sup>, CHEN Shuan-fa<sup>1</sup>, ZHANG Deng-liang<sup>3</sup>

(1. Engineering Research Center for Transportation Materials of the Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. School of Architecture and Civil Engineering,

Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

3. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to determine the optimum material composition to satisfy the design criteria of erosion in the project, gray system theory was applied to predict the value of erosion of cement-stabilized macadam material, the fractal dimension of aggregate, 28 d strength of cement mortar, cement dosage and water dosage were selected as modeling parameter, the erosion predict model of cement-stabilized macadam was established, and the simplified formulae of the 28 d erosion predict model for two different kinds of structure of cement stabilized macadam were proposed, which are suspend-dense structure and framework-dense structure respectively. Applicability tests show that the error of the predict value with measured value is small, that indicates the 28 d erosion predict model of cement stabilized macadam is reasonable. 3 tabs, 6 figs, 10 refs.

**Key words:** road engineering; cement-stabilized macadam; erosion value; predict model; gray system theory

# 0 引 言

半刚性基层材料的抗冲刷能力较差,受侵蚀后引起的唧泥现象是导致水泥混凝土路面板底脱空、错台和断裂的直接原因<sup>[1]</sup>。现行公路水泥混凝土路面设计规范<sup>[2]</sup>虽然对基层提出了抗冲刷能力及刚度要求,但仅局限于定性建议,并没有对材料组成设计提出定量指标。本文对水泥混凝土路面半刚性基层材料组成设计进行研究,提出将水泥稳定碎石 28 d 冲刷量作为评价半刚性基层材料抗冲刷性能的有效指标<sup>[3]</sup>。

水泥稳定碎石是多种材料的复合体,其抗冲刷性能受到多种因素的制约。研究表明,水泥稳定碎石所能达到的强度处于非常复杂的函数关系中,它随着组成材料的类型和数量而发生巨大的变化<sup>[4-7]</sup>。因此,影响其抗冲刷性能的因素也极其复杂。就水泥稳定碎石基层材料的组成设计而言,水泥稳定碎石材料抗冲刷性能与水泥标号、水泥剂量、集料的级配和特性、细集料含量、含水量、龄期等参数存在一定的关系,但这种关系不是十分明确,无法用准确的数学语言来描述,而且它们的值是在一定范围内变化的量,可以看作是灰色量,因此它们构成的系统便是一个灰色系统,可以用灰色理论中的建模及预测方法进行处理。

本文利用灰色系统理论的方法原理,选取集料分形维数、水泥 28 d 砂浆强度、水泥剂量、含水量为建模参数,通过试验建立样本数据库,经过数据检验及预处理、模型型式的选取、模型的参数估计、模型精度检验等过程,建立基于灰色系统理论的水泥稳定碎石 28 d 冲刷量预测模型,最后通过适用性验证该模型的准确性。

## 1 冲刷量模型研究基础

### 1.1 灰色系统的理论模型

灰色系统理论是将数据作累加生成,从而获得光滑离散函数,基于这种函数的收敛性与关联空间的极限概念,以及微分方程背景的平射性和有限与无限的相对性,定义出了指标拓扑空间的灰导数,建立了微分方程的动态模型——灰色动态模型  $GM(n,h)$  模型。由于模型的非唯一性,因此称为灰色模型<sup>[8]</sup>。本文研究的水泥稳定碎石 28 d 冲刷量及其影响因素系统符合灰色系统建模机理。它的值是在一定范围内变化的量,可以看作是灰色量,各种因素对冲刷量的影响也符合一定的规律但不明显,

而且其值构成的数列经初值化和一次累加后符合灰指数律,这使得灰色建模理论应用于水泥稳定碎石冲刷量预测模型成为可能。

### 1.2 冲刷试验

目前,国内外对半刚性基层材料抗冲刷性能试验方法进行了很多研究,但尚未有统一的试验方法及指标。本课题组自行研制设计的抗冲刷试验装置<sup>[9]</sup>如图 1 所示。抗冲刷试验装置主要由底座、冲刷筒(图 2)、冲刷板、筒套、气缸、电磁阀、空气压缩机(下页图 3)、控制器(下页图 4)和压力表 9 部分组成。



图 1 抗冲刷试验装置



图 2 冲刷筒

抗冲刷试验装置的工作原理是利用空气压缩机提供的压力使冲刷板产生上下往复运动,对试件产生冲刷作用,来模拟实际路面板底的冲刷现象。试验过程中,当冲刷板向下的作用力对试件顶面进行冲击的同时,压头底面与试件顶面之间的细泥浆被快速挤出,这种情况相当于在实际中基层发生冲刷



图 3 空气压缩机

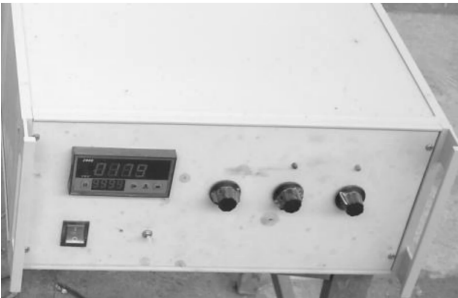


图 4 控制器

时,车轮荷载作用在路面上,路面面层底面与基层顶面间的细泥浆被挤出的情形。当冲刷板快速上升时,在压头底面与试件顶面之间形成负压,这种负压将水迅速吸入压头底面与试件顶面之间的同时,还

会对试件顶面产生“泵吸作用”将试件顶面微结构中的细粒吸出,并将冲击力冲击下来的“碎屑”带起。抗冲刷试验装置模拟了发生冲刷时车轮驶过后路面面层回弹时的情形。

2 冲刷量预测模型的建立

2.1 选取建模参数

本文选取对水泥稳定碎石抗冲刷性能影响最为显著的 4 个因素作为建模参数:集料分形维数  $D$ 、水泥 28 d 砂胶强度  $f_{28d}$ 、水泥剂量  $p$  和含水量  $w$ 。出于精度要求考虑,从原始试验 27 组数据抽出 17 组作为样本数据库,具体数据见表 1。

2.2 冲刷量的建模过程

根据前期的冲刷试验结果<sup>[3]</sup>,悬浮密实结构和骨架密实结构的水泥稳定碎石冲刷量值域有明显区别,悬浮密实结构水泥稳定碎石的冲刷量值域为 20.0~50.0 g,而骨架密实结构水泥稳定碎石的冲刷量值域为 8.0~30.0 g。因此,有必要对 2 种结构分别建立 28 d 冲刷量预测模型,本文以骨架密实结构为例,详细介绍冲刷量模型的建立过程。

2.2.1 数据再生成

对表 1 中的原始数据进行初值化处理,为了更好地揭示灰色系统内灰色变量间包含的某些内在规

表 1 选取的冲刷量样本

实测数据编号	骨架密实					悬浮密实				
	$L/g$	$D$	$f_{28d}/MPa$	$p/\%$	$w/\%$	$L/g$	$D$	$f_{28d}/MPa$	$p/\%$	$w/\%$
1	17.5	2.433 4	43.6	5	5.2	29.8	2.516 5	43.6	6	5.6
2	21.1	2.433 4	43.6	4	5.2	37.4	2.516 5	43.6	5	5.4
3	16.8	2.433 4	38.1	5	5.0	32.7	2.516 5	38.1	6	5.5
4	20.8	2.433 4	38.1	4	5.0	39.6	2.516 5	38.1	5	5.2
5	20.3	2.433 4	34.2	5	5.2	32.4	2.516 5	34.2	6	5.4
6	23.5	2.359 3	43.6	3	5.0	44.8	2.411 9	43.6	4	5.0
7	15.4	2.359 3	43.6	5	5.0	26.4	2.411 9	38.1	6	5.2
8	18.1	2.359 3	38.1	4	4.8	34.8	2.411 9	38.1	5	5.0
9	17.5	2.359 3	34.2	5	5.0	34.5	2.411 9	34.2	6	5.2
10	20.8	2.359 3	34.2	4	5.0	40.2	2.411 9	34.2	5	5.2
11	18.8	2.296 9	38.1	3	5.0	36.4	2.227 4	43.6	4	5.2
12	13.9	2.296 9	38.1	5	5.0	26.8	2.227 4	38.1	6	5.2
13	16.5	2.296 9	34.2	4	4.8	32.1	2.227 4	38.1	5	5.0
14	16.5	2.296 9	34.2	5	4.8	26.5	2.227 4	34.2	6	5.0
15	19.7	2.296 9	34.2	4	4.6	34.5	2.227 4	34.2	5	4.8
16	24.3	2.433 4	34.2	3	5.0	43.5	2.516 5	38.1	4	5.2
17	23.5	2.359 3	43.6	3	4.6	42.4	2.411 9	34.2	4	4.8

注: $L$ 为冲刷量。

律和特征,需要对初值化处理后的数据进行一次累加再生成处理。图5为28 d冲刷量及建模参数的实测数据,图6为经初值化和一次累加生成处理后的数据结果(图中数据只采用数值)。

设  $X^{(0)}$  为初值化数据序列,  $X^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)), n = 17$

按  $x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i) (k = 1, 2, \dots, n)$ , 对初值化的数据  $X_i^{(0)} (i = 1, 2, \dots, 5)$  进行1-AGO处理, 并记结果为  $X_i^{(1)} (i = 1, 2, \dots, 5)$ , 具体数据见图6。

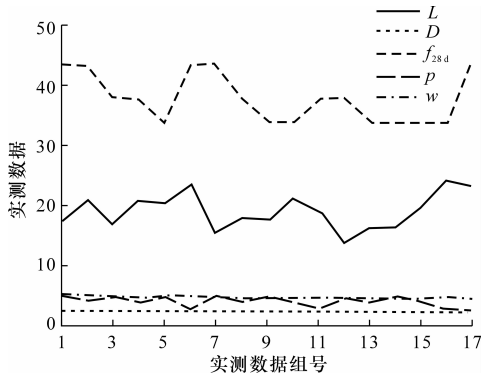


图5 28 d冲刷量及建模参数的实测数据

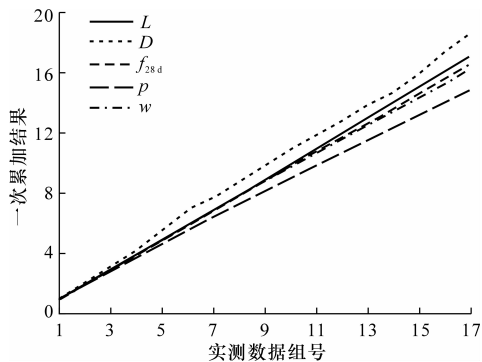


图6 初值化和一次累加生成处理后的结果

由图5可以清楚地看到原始数据无明显规律, 而图6可以看出数据具有明显的规律。

### 2.2.2 灰色建模

(1) 建立数据矩阵  $\mathbf{Y}$ 、 $\mathbf{B}$  ( $\mathbf{B}$  为数据列矩阵,  $\mathbf{Y}$  为数据向量)

由  $z_1^{(1)}(k) = -0.5[x_1^{(1)}(k-1) + x_1^{(1)}(k)] (k = 2, 3, \dots, 17)$ , 求得

$$\begin{aligned} Z_1^{(1)} = & [z_1^{(1)}(2), z_1^{(1)}(3), z_1^{(1)}(4), z_1^{(1)}(5), z_1^{(1)}(6), \\ & z_1^{(1)}(7), z_1^{(1)}(8), z_1^{(1)}(9), z_1^{(1)}(10), z_1^{(1)}(11), \\ & z_1^{(1)}(12), z_1^{(1)}(13), z_1^{(1)}(14), z_1^{(1)}(15), \\ & z_1^{(1)}(16), z_1^{(1)}(17)] = (-1.603, -2.686, \\ & -3.760, -4.934, -6.186, -7.297, \\ & -8.254, -9.271, -10.366, -11.497, \end{aligned}$$

$$-12.431, -13.300, -14.243, -15.277, \\ -16.534, -17.900)$$

$$\text{由 } \mathbf{B} = \begin{bmatrix} z_1^{(1)}(2) & \cdots & z_N^{(1)}(2) \\ \vdots & & \vdots \\ z_1^{(1)}(n) & \cdots & z_N^{(1)}(n) \end{bmatrix}$$

( $N = 5, n = 17$ ), 求得

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} z_1^{(1)}(2) & \cdots & x_5^{(1)}(2) \\ \vdots & & \vdots \\ z_1^{(1)}(17) & \cdots & x_5^{(1)}(17) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1.716 & 2.000 & 2.000 & 2.000 & 1.833 \\ -2.924 & 3.000 & 3.000 & 2.874 & 2.833 \\ -4.024 & 4.000 & 4.000 & 3.748 & 3.667 \\ -5.333 & 5.000 & 5.000 & 4.532 & 4.667 \\ -6.488 & 5.970 & 5.996 & 5.532 & 5.500 \\ -7.658 & 6.939 & 6.992 & 6.532 & 6.167 \\ -8.904 & 7.909 & 7.989 & 7.406 & 7.000 \\ -9.944 & 8.878 & 8.985 & 8.190 & 8.000 \\ -11.064 & 9.848 & 9.981 & 8.975 & 8.833 \\ -12.155 & 10.792 & 10.980 & 9.849 & 9.667 \\ -13.289 & 11.736 & 11.980 & 10.722 & 10.333 \\ -14.424 & 12.679 & 12.979 & 11.507 & 11.333 \\ -15.424 & 13.623 & 13.978 & 12.291 & 12.167 \\ -16.687 & 14.567 & 14.978 & 13.076 & 12.833 \\ -17.944 & 15.567 & 15.978 & 13.860 & 13.500 \\ -19.012 & 16.537 & 16.974 & 14.860 & 14.500 \end{bmatrix}$$

$$\text{由 } \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} x_1^{(0)}(2) \\ x_1^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x_1^{(0)}(n) \end{bmatrix} (n = 17), \text{ 求得}$$

$$\mathbf{Y} = [x_1^{(0)}(2), x_1^{(0)}(3), x_1^{(0)}(4), x_1^{(0)}(5), x_1^{(0)}(6), \\ x_1^{(0)}(7), x_1^{(0)}(8), x_1^{(0)}(9), x_1^{(0)}(10), x_1^{(0)}(11), \\ x_1^{(0)}(12), x_1^{(0)}(13), x_1^{(0)}(14), x_1^{(0)}(15), \\ x_1^{(0)}(16), x_1^{(0)}(17)]^T =$$

$$(1.206, 0.960, 1.189, 1.160, 1.343, \\ 0.880, 1.034, 1.000, 1.189, 1.074, 0.794, \\ 0.943, 0.943, 1.126, 1.389, 1.343)^T$$

(2) 计算矩阵  $\mathbf{B}^T \mathbf{B}$

(3) 求  $(\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1}$

(4) 计算参数列  $\hat{\mathbf{a}}$

$$\hat{\mathbf{a}} = [a, b_2, \dots, b_5]^T = (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{Y} = (1.633, \\ 6.751, 1.546, -0.846, -5.676)^T$$

式中:  $a$  为发展系数, 其值为 1.633;  $b_i (i = 2, 3, \dots, 5)$  为驱动系数。

(5) 求解响应值  $\hat{x}_1^{(1)}$

把  $\hat{a}$  值代入可得 GM(1,5) 模型的微分方程为

$$\frac{dx_1^{(1)}}{dt} + 1.633x_1^{(1)} = 6.751x_2^{(1)} + 1.546x_3^{(1)} - 0.846x_4^{(1)} - 5.676x_5^{(1)}$$

它的近似时间响应式( $k = 1, 2, \dots, 16, 17$ ) 为

$$\begin{aligned} \hat{x}_1^{(1)}(k+1) &= \left( x_1^{(1)}(0) - \frac{1}{a} \sum_{i=2}^N b_i x_i^{(1)}(k+1) \right) e^{-ak} + \\ &\frac{1}{a} \sum_{i=2}^N b_i x_i^{(1)}(k+1) = (1 - 0.612 \sum_{i=2}^5 b_i \cdot \\ &x_i^{(1)}(k+1)) e^{-1.633k} + 0.612 \sum_{i=2}^5 b_i x_i^{(1)}(k+1) \end{aligned} \quad (1)$$

把各个因子数列  $X_2^{(1)} \sim X_5^{(1)}$  值代入式(1), 可得行为主数列各个数据的响应值为:  $\hat{X}_1^{(1)} = (1, 2.028, 3.288, 4.558, 5.461, 6.768, 7.745, 8.958, 9.849, 10.843, 12.039, 12.908, 14.015, 14.934, 16.090, 17.398, 18.764)$

(6) 数据还原

对  $\hat{X}_1^{(1)}$  再分别进行一次累减还原和初值化还原, 可获得行为主数列的原始数据响应值:  $\hat{X}_1^{(0)} = (17.5, 18.0, 18.1, 22.2, 17.8, 22.9, 17.1, 21.2, 15.6, 17.4, 20.9, 15.2, 19.4, 16.1, 20.2, 22.9, 23.9)$

2.2.3 冲刷量模型精度检验

(1) 残差大小检验

已知原始序列为

$$\begin{aligned} X_1^{(0)} &= [x_1^{(0)}(1), x_1^{(0)}(2), \dots, x_1^{(0)}(17)] = \\ &(17.5, 21.1, 16.8, 20.8, 20.3, 23.5, 15.4, \\ &18.1, 17.5, 20.8, 18.8, 13.9, 16.5, 16.5, \\ &19.7, 24.3, 23.5) \end{aligned}$$

相应预测模型模拟序列为

$$\begin{aligned} \hat{X}_1^{(0)} &= [\hat{x}_1^{(0)}(1), \hat{x}_1^{(0)}(2), \dots, \hat{x}_1^{(0)}(17)] = \\ &(17.5, 18.0, 18.1, 22.2, 17.8, 22.9, 17.1, \\ &21.2, 15.6, 17.4, 20.9, 15.2, 19.4, 16.1, \\ &20.2, 22.9, 23.9) \end{aligned}$$

相减, 得残差序列为

$$\begin{aligned} \epsilon^{(0)} &= [\epsilon(1), \epsilon(2), \dots, \epsilon(17)] = \\ &(0, -3.11, 1.30, 1.41, -2.50, -0.63, \\ &1.69, 3.13, -1.91, -3.40, 2.13, 1.32, \\ &2.87, -0.43, 0.53, -1.40, 0.40) \end{aligned}$$

则相对误差序列为

$$\begin{aligned} \Delta &= \left( \left| \frac{\epsilon(1)}{x^{(0)}(1)} \right|, \left| \frac{\epsilon(2)}{x^{(0)}(2)} \right|, \dots, \left| \frac{\epsilon(17)}{x^{(0)}(17)} \right| \right) = \\ &(0, 14.73\%, 7.74\%, 6.78\%, 12.32\%, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &2.67\%, 11.00\%, 17.29\%, 10.91\%, 16.33\%, \\ &11.34\%, 9.46\%, 17.39\%, 2.58\%, 2.67\%, \\ &5.76\%, 1.68\%) \\ &\text{平均相对误差为} \end{aligned}$$

$$\bar{\Delta} = \frac{1}{17} \sum_{k=1}^{17} \Delta_k = 8.86\%$$

由于半刚性基层材料的冲刷试验目前没有统一的标准, 所以本文参照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》中水泥稳定类材料的抗压强度试验允许误差不大于 20% 的规定<sup>[10]</sup>, 设定该冲刷量预测模型的最大允许相对误差为 20%。由计算结果可以看出, 最大相对误差为 17.39%, 平均相对误差为 8.86%, 满足规范要求, 因此可以用此模型进行预测。

2.2.4 后验差检验

(1) 计算均方差比值  $C$

原始序列  $X^{(0)}$  的均值、方差、均方差分别为

$$\bar{x} = \frac{1}{17} \sum_{k=1}^{17} x^{(0)}(k) = 19.68$$

$$S_1^2 = \frac{1}{17} \sum_{k=1}^{17} (x^{(0)}(k) - \bar{x})^2 = 11.09$$

$$S_1 = 3.33$$

残差序列  $\epsilon^{(0)}$  的均值、方差、均方差分别为

$$\bar{\epsilon} = \frac{1}{17} \sum_{k=1}^{17} \epsilon(k) = 19.19$$

$$S_2^2 = \frac{1}{17} \sum_{k=1}^{17} (\epsilon(k) - \bar{\epsilon})^2 = 2.13$$

$$S_2 = 1.16$$

所以均方差比值为

$$C = S_2/S_1 = 0.48 < 0.5$$

由精度检验等级参照表<sup>[3]</sup>可知, 该模型的均方差比值  $C$  精度等级为 2 级(良)。

(2) 计算小误差概率  $P$

$$0.6745S_1 = 2.25$$

因为  $|\epsilon(k) - \bar{\epsilon}|_{\max} = 1.80 < 2.25$ , 故  $P = P(|\epsilon(k) - \bar{\epsilon}| < 0.6745S_1) = 1, P > 0.95$ , 小误差概率  $P$  精度等级为 1 级(优)。

由上述可知, 所建骨架密实结构水泥稳定碎石 28 d 冲刷量模型式(1)精度等级为 2 级(良), 满足要求, 可以用于预测。

### 3 模型简化及适用性验证

#### 3.1 模型简化

3.1.1 冲刷量预测模型(以骨架密实结构为例)

从响应模型式(1)可知, 行为主数列的数据响

应值是由因子数列的数据求得的。当给出 GM(1,5) 模型外的一组水泥稳定碎石材料的 4 个参数值( $D$ 、 $f_{28\text{d}}$ 、 $p$ 、 $w$ ),则 4 个因子数列中均增加一个原始数据,即数据个数变为 $(n+1)$ 个,经初值化处理和一次累加生成后,代入式(1)便可求得新的响应值 $\hat{x}_1^{(1)}(n+1)$ 。再经过一次累减和初值化还原可以得到 $\hat{x}_1^{(0)}(n+1)$ ,这就是待求的冲刷量预测值。

综上,已知材料参数  $D$ 、 $f_{28\text{d}}$ 、 $p$ 、 $w$ (可以有多组),经初值化和一次累加后的值分别为  $x_2^{(1)}(k+1)$ 、 $x_3^{(1)}(k+1)$ 、 $x_4^{(1)}(k+1)$ 、 $x_5^{(1)}(k+1)$ ,则冲刷量  $L$  可以用式(2) 进行预测

$$\left. \begin{aligned} \hat{x}_1^{(1)}(k+1) &= \left(1 - \frac{1}{a} \sum_{i=2}^5 b_i x_i^{(1)}(k+1)\right) \cdot \\ &\quad \mathrm{e}^{-ak} + \frac{1}{a} \sum_{i=2}^5 b_i x_i^{(1)}(k+1) \qquad k \geqslant 10 \\ \hat{x}_1^{(0)}(k+1) &= (\hat{x}_1^{(1)}(k+1) - \hat{x}_1^{(1)}(k)) \times 17.1 \end{aligned} \right\} (2)$$

其中,  $\hat{a} = (a, b_2, \cdots, b_5)^\text{T} = (1.633, 6.751, 1.546, -0.846, -5.676)^\text{T}$

3.1.2 冲刷量模型简化

式(2) 可以同时 对 几 组 参 数 进 行 冲 刷 量 预 测, 如果只对一组参数进行预测,即当  $k=17$  时,模型可以进行简化。

设给定材料参数  $D$ 、 $f_{28\text{d}}$ 、 $p$ 、 $w$ ,在式(1) 中,等号右边前一项为

$$(1 - 0.612 \sum_{i=2}^5 b_i x_i^{(1)}(k+1)) \mathrm{e}^{-1.633 \times 17} \approx 0$$

故式(1) 可简化为

$$\hat{x}_1^{(1)}(17) = 0.612 \sum_{i=2}^5 b_i x_i^{(1)}(17) \qquad (3)$$

其中  $b_i$  为已知,且有

$$\begin{aligned} x_2^{(1)}(17) &= x_2^{(1)}(16) + D/2.4334 = \\ &\quad 16.5368 + D/2.4334 \\ x_3^{(1)}(17) &= x_3^{(1)}(16) + f_{28\text{d}}/43.6 = \\ &\quad 14.8234 + f_{28\text{d}}/43.6 \\ x_4^{(1)}(17) &= x_4^{(1)}(16) + p/6 = 14.2000 + p/5 \\ x_5^{(1)}(17) &= x_5^{(1)}(16) + w/5.4 = \\ &\quad 16.1923 + w/5.2 \end{aligned} \qquad (4)$$

由一次累减和初值化还原公式得

$$\begin{aligned} \hat{x}_1^{(0)}(17) &= (\hat{x}_1^{(1)}(17) - \hat{x}_1^{(1)}(16)) \times 17.1 = \\ &\quad (\hat{x}_1^{(1)}(17) - 19.5673) \times 17.1 \end{aligned} \qquad (5)$$

将  $b_i$  值、式(3) 和(4) 代入式(5),整理得骨架密实结构水泥稳定碎石冲刷量的预测模型简化式为

$$L \approx 22.098D - 0.076f_{28\text{d}} - 6.560p + 2.450w \qquad (6)$$

同理,可得悬浮密实结构水泥稳定碎石冲刷量的预测模型简化式为

$$L \approx 18.782D - 0.554f_{28\text{d}} - 3.554p + 2.362w \qquad (7)$$

3.2 适用性验证

对所建 2 种结构水泥稳定碎石的 28 d 冲刷量预测模型进行适用性验证。分别对 2 种不同结构的水泥稳定碎石取 5 种不同级配进行验证,如表 2 所示。各材料参数值和 28 d 冲刷量实测值见下页表 3。根据简化式(6)、式(7) 分别计算得出悬浮密实和骨架密实 2 种结构水泥稳定碎石的 28 d 冲刷量预测值见下页表 3。

通过表 3 的误差计算结果可以看到,预测值和

表 2 级配筛孔通过率

筛孔尺寸/ mm	通过率/%									
	骨架密实					悬浮密实				
	级配 1	级配 2	级配 3	级配 4	级配 5	级配 6	级配 7	级配 8	级配 9	级配 10
31.5	100	100.0	100	100	100	100	100.0	100	100	100
26.5	100	92.5	85	95	90	100	98.0	96	98	97
19	84	79.0	74	80	70	100	96.0	92	95	91
16	73	66.5	60	58	63	90	86.0	82	93	88
13.2	65	58.5	52	63	50	83	77.5	72	80	71
9.5	55	47.5	40	44	50	75	70.0	65	77	64
4.75	30	27.0	24	25	24	44	38.0	32	30	44
2.36	25	21.5	18	22	20	30	24.0	18	26	20
1.18	20	17.0	14	16	15	20	16.0	12	17	15
0.6	13	11.0	9	14	8	17	12.5	8	10	8
0.3	7	6.0	5	5	6	12	9.0	6	13	10
0.15	4	3.5	3	3	5	8	5.5	3	7	9
0.075	3	1.5	0	1	0	3	1.5	0	5	4

表 3 28 d 冲刷量模型预测、实测结果及相对误差

级配	骨架密实							悬浮密实						
	$D$	$f_{28\text{ d}}/\text{MPa}$	$p/\%$	$w/\%$	实测 $L'/\text{g}$	预测 $L'/\text{g}$	误差/ $\%$	$D$	$f_{28\text{ d}}/\text{MPa}$	$p/\%$	$w/\%$	实测 $L'/\text{g}$	预测 $L'/\text{g}$	误差/ $\%$
级配 1	2.413 4	38.1	4.0	5.4	22.1	22.8	3.0	2.453 7	38.1	4.0	5.4	39.8	38.3	3.7
级配 2	2.358 0	43.6	3.0	5.8	20.5	23.2	13.0	2.365 8	43.6	3.0	5.8	43.4	43.5	0.2
级配 3	2.320 7	39.4	4.0	5.4	18.8	20.3	8.0	2.275 0	39.4	4.0	5.4	32.7	34.3	4.8
级配 4	2.322 3	34.2	4.0	5.2	21.8	22.7	4.3	2.472 2	34.2	4.0	5.2	45.6	38.5	15.5
级配 5	2.349 8	43.6	5.0	5.5	12.9	15.2	17.8	2.457 4	43.6	5.0	5.5	30.2	31.7	4.9
级配 6	2.413 4	38.1	3.5	4.6	19.5	22.6	16.1	2.453 7	38.1	3.5	4.6	44.8	39.6	11.5
级配 7	2.358 0	38.1	3.0	4.6	24.5	23.4	4.6	2.365 8	38.1	3.0	4.6	47.5	41.0	13.7
级配 8	2.320 7	43.6	3.8	5.6	16.7	19.2	14.7	2.275 0	43.6	3.8	5.6	34.8	35.8	2.7
级配 9	2.322 3	39.5	3.8	5.2	18.8	20.5	9.1	2.472 2	39.5	3.8	5.2	37.5	39.4	5.2
级配 10	2.349 8	38.1	4.0	5.0	19.8	20.6	4.1	2.457 4	38.1	4.0	5.0	40.2	37.4	6.9

实测值的相对误差均较小,误差超过 15% 的只有 1~2 组,表明预测值离散性相对较小,与实测值吻合较好。因此,该预测模型可以较为准确地预测其 28 d 冲刷量值。

4 结 语

(1)利用灰色系统理论的方法原理,选取集料分形维数、水泥 28 d 砂胶强度、水泥剂量、含水量为建模参数,建立水泥稳定碎石材料抗冲刷性能与其主要影响因素之间的关系。

(2)通过试验建立样本数据库,经过数据检验及预处理、模型形式的选取、模型的参数估计、模型精度检验等过程,建立了水泥稳定碎石 28 d 冲刷量预测模型,并提出了骨架密实构和悬浮密实 2 种结构的水泥稳定碎石冲刷量预测模型简化式。

(3)适用性验证结果表明,预测值和实测值的相对误差均较小,说明基于灰色理论的水泥稳定碎石预测模型可以较为准确地预测其 28 d 冲刷量值。

参考文献:

References:

[ 1 ] 沙爱民. 半刚性基层的材料特性[J]. 中国公路学报, 2008,21(1):1-5.  
SHA Ai-min. Material characteristics of semi-rigid base[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008,21(1):1-5.  
[ 2 ] JTG D40—2002,公路水泥混凝土路面设计规范[S].  
[ 3 ] 盛燕萍. 基于抗冲刷性能的水泥混凝土半刚性基层材

料组成设计方法研究[D]. 西安:长安大学,2010.  
[ 4 ] 冉 明,张 华. 水泥稳定碎石基层离析原因及防治措施[J]. 筑路机械与施工机械化,2010,27(7):39-40.  
RAN Ming,ZHANG Hua. Causes of segregation and preventative measures for cement stabilized macadam base[J]. Road Machinery & Construction Mechanization,2010,27(7):39-40.  
[ 5 ] 沙爱民,贾 侃,李小刚. 半刚性基层材料的疲劳特性[J]. 交通运输工程学报,2009,9(3):29-33.  
SHA Ai-min,JIA Kan,LI Xiao-gang. Fatigue performances of semi-rigid base course materials[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2009,9(3):29-33.  
[ 6 ] 贾 侃,沙爱民,陆剑卿. 半刚性基层材料的有效模量值[J]. 长安大学学报:自然科学版,2009,29(1):15-19.  
JIA Kan,SHA Ai-min,LU Jian-qing. Effective modulus value of semi-rigid base course materials[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009,29(1):15-19.  
[ 7 ] Guthrie W S,Sebesta S,Scullion T. Design considerations for cement stabilization of aggregate base material[R]. Texas:Texas Transportation Institute,2001.  
[ 8 ] 邓聚龙. 灰理论基础[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2002.  
[ 9 ] 聂午龙. 水泥混凝土路面基层材料抗冲刷性能研究[D]. 西安:长安大学,2009.  
[10] JTG E51—2009,公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S].