

文章编号:1671-6833(2012)03-0019-05

基于抗冲刷性能的半刚性基层材料组成设计方法

盛燕萍^{1,2}, 李海滨³, 陈拴发^{1,2}

(1. 长安大学 材料科学与工程学院, 陕西 西安 710064; 2. 交通铺面材料教育部工程研究中心, 陕西 西安 710064; 3. 西安科技大学 建工学院, 陕西 西安 710064)

摘要: 半刚性基层材料抗冲刷性能差是目前造成水泥混凝土路面板底脱空的主要原因。现行公路水泥混凝土路面设计规范对基层抗冲刷能力仅限于定性建议, 而未提出定量指标。通过试验研究提出了水泥混凝土路面半刚性基层材料的组成设计指标与标准建议值, 利用灰色系统理论的方法原理, 建立水泥稳定碎石 28 d 冲刷量预测模型和 7 d 强度预测模型。最后, 提出基于抗冲刷性能的水泥混凝土路面半刚性基层材料组成设计方法。性能试验结果显示, 运用该方法设计的半刚性基层混合料能够达到其设计标准, 表明该设计方法可行。

关键词: 水泥混凝土路面; 半刚性基层; 抗冲刷性能; 组成设计方法

中图分类号: U414 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2012.03.005

0 引言

半刚性基层材料不耐冲刷造成的面板脱空是造成水泥路面破坏的主要原因, 因此水泥路面半刚性基层材料的设计有别于沥青路面。目前, 国内外对半刚性基层材料组成设计进行了较为深入的研究, 还专门针对基层材料的抗冲刷性能、抗裂性能等提出了相应的材料组成设计方法^[1-5]。但是, 目前的研究仅仅是针对半刚性基层材料本身的特性, 或是针对半刚性基层沥青路面的技术要求进行的, 尚未有专门针对水泥混凝土路面特性的相关研究。

半刚性基层水泥混凝土路面的结构特性决定了其对基层材料的性能要求有一定特殊性, 且与沥青路面对基层材料的性能要求也不完全相同。对水泥混凝土路面来说, 基层的抗冲刷性能是最重要的, 现行公路水泥混凝土路面设计规范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, 材料组成设计中并未提出定量的指标。因此, 有必要针对水泥混凝土路面对基层的性能要求, 研究并提出适宜水泥混凝土路面半刚性基层的材料设计指标及组成设计方法。

1 材料组成设计指标与标准建议值

1.1 抗冲刷性能

现行公路水泥混凝土路面设计规范没有提出对基层抗冲刷性能的定量指标, 因此也没有相对应的抗冲刷性能试验方法。基层材料抗冲刷性能评价指标应该满足两个要求, 一是能够评价不同基层材料的抗冲刷性能, 二是能得出在标准轴载作用下该材料的真实损失量, 以便能够预测路面板底脱空。长安大学张擎^[6]对路面基层进行冲刷分析, 提出用材料的冲刷系数 K_c 作为基层材料抗冲刷评价指标, 如式(1)来表示。

$$K_c = \frac{mg}{\rho A n} \times 10^4. \quad (1)$$

式中: K_c 为基层材料抗冲刷系数, $m^3/m^2 \cdot$ 万次; m 为材料冲刷损失量, kg ; g 为加速度, $10 m/s^2$; ρ 为材料体积, kg/m^3 ; A 为材料试件冲刷面积, m^2 ; n 为材料冲刷次数。

以标准轴载冲刷 50 万次后, 板底脱空半径不大于 0.5 m 为准, 计算得到材料冲刷系数不大于 1.05×10^{-4} 。据此, 他提出以材料冲刷系数 $\leq 1.05 \times 10^{-4}$ 作为基层材料的设计标准。

通过式(1)可以计算得到材料冲刷的损失量

收稿日期: 2011-11-13; 修订日期: 2012-02-05

基金项目: 国家科技基础条件平台建设项目(2005OKA32800); 中央高校基本科研业务费专项基金(CHD2011JC054)

作者简介: 盛燕萍(1981-), 女, 浙江临安人, 长安大学讲师, 博士, 主要从事道路结构与材料方面的研究, E-mail: shengyanping2003@163.com.

m 为

$$m = \frac{K_c \cdot \rho \cdot A \cdot n}{g \times 10^4} \quad (2)$$

根据上述分析,交通等级高的水泥混凝土路面宜采用骨架密实结构半刚性基层,而交通等级低的宜采用悬浮密实结构半刚性基层。若交通等级高的水泥路面以标准轴载冲刷 50 万次后,板底脱空半径不大于 0.5 m 为准,由公式(2)计算得到材料冲刷损失量不大于 23.0 g;若交通等级低的水泥路面以标准轴载冲刷 25 万次后,板底脱空半径不大于 0.5 m 为准,计算得到材料冲刷损失量不大于 40.0 g。

结合已有文献和前期的抗冲刷试验研究^[8],笔者提出 28 d 冲刷量为评价基层材料抗冲刷性能的有效指标。根据前期大量试验结果,对于悬浮密实结构,其冲刷量值域在 20.0 ~ 50.0 g;对于骨架密实结构,其冲刷量值域在 8.0 ~ 30.0 g。综合以上计算分析、已有文献和试验研究,笔者依据《公路水泥混凝土路面设计规范》中的交通分级,提出水泥混凝土路面半刚性基层的冲刷量设计标准建议值如表 1 所示。

表 1 水泥混凝土路面半刚性基层的设计冲刷量建议值

Tab.1 Design erosion value of semi-rigid base for concrete pavement

设计冲刷量	交通等级		
	特重	重	中轻
28 d 冲刷量/g	≥ 10.0	≥ 20.0	≥ 30.0

1.2 力学强度

水泥混凝土路面基层的受力状况不同于沥青路面,因此目前水泥混凝土路面基层的取值方法完全等同于沥青路面是不可取的。水泥混凝土路面结构中,路面层是主要承重层,因此对基层的结构功能要求相对弱些,无论是作为结构设计指标的弯拉强度还是材料设计指标的抗压强度都要低于沥青路面基层的要求。从结构设计考虑,如果弯拉强度过高,会使面板造成温度翘曲应力过大,引起板角断裂并逐步发展为严重断裂和破碎板。从材料设计考虑,如果由于水泥剂量过大产生的抗压强度过高,会使基层造成很大的收缩裂缝,引起面板的反射裂缝并逐步发展成横向裂缝和网裂缝等。

抗压强度是衡量半刚性基层材料路用性能的最基本指标,其试验方法简单易行,并且在我国已使用多年,各地的设计和施工单位已积累了大量

的宝贵经验。我国《公路路面基层施工技术规范》规定水泥稳定集料作为高速公路和一级公路基层时的 7 d 抗压强度不低于 3 ~ 5 MPa,对于二级和二级公路不低于 2.5 ~ 3.0 MPa。我国《公路沥青路面设计规范》规定水泥稳定集料作为特重交通公路基层时的 7 d 抗压强度不低于 4.0 ~ 5.0 MPa,对于重交通、中交通公路基层不低于 3.0 ~ 4.0 MPa,对于轻交通、特轻交通公路基层不低于 2.0 ~ 3.0 MPa。结合以上两者,笔者依据《公路水泥混凝土路面设计规范》中的交通分级,提出水泥混凝土路面半刚性基层的 7 d 抗压强度设计标准建议值如表 2 所示。

表 2 水泥混凝土路面半刚性基层的设计强度建议值

Tab.2 Design strength value of semi-rigid base for concrete pavement

设计强度	交通等级		
	特重	重	中轻
7 d 抗压强度/ MPa	4.0 ~ 5.0	3.0 ~ 4.0	2.0 ~ 3.0

2 半刚性基层设计指标预测模型

水泥稳定碎石是多种材料的复合体,其抗冲刷性能和强度特性会受到多种因素的制约。笔者选取对半刚性基层抗冲刷性能和强度特性影响最为显著的 4 个因素做为建模参数(集料分形维数 D 、水泥 28 d 砂浆强度 f_{28d} 、水泥剂量 p 、含水量 w)。笔者利用灰色系统理论的方法原理,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 冲刷量预测模型和 7 d 强度预测模型,分别提出了预测简化式(式 3 ~ 6),并进行了适用性验证^[7]。

2.1 冲刷量预测模型

出于精度要求考虑,从冲刷量原始试验 27 组数据中抽出 17 组作为样本数据库,具体如表 3 所示。

通过建模计算,分别得出水泥稳定碎石 28 d 冲刷量的预测模型简化式,如式(3)和(4)所示。

悬浮密实:

$$\phi \approx 22.098D - 0.076f_{28d} - 6.560p + 2.450w; \quad (3)$$

骨架密实:

$$\phi \approx 18.782D - 0.554f_{28d} - 3.554p + 2.362w. \quad (4)$$

表 3 选取的冲刷量样本

Tab.3 Sample of erosion

骨架密实					悬浮密实				
ϕ	D	f_{28d}	p	w	ϕ	D	f_{28d}	p	w
17.5	2.433 4	43.6	5	5.2	29.8	2.516 5	43.6	6	5.6
21.1	2.433 4	43.6	4	5.2	37.4	2.516 5	43.6	5	5.4
16.8	2.433 4	38.1	5	5.0	32.7	2.516 5	38.1	6	5.5
20.8	2.433 4	38.1	4	5.0	39.6	2.516 5	38.1	5	5.2
20.3	2.433 4	34.2	5	5.2	32.4	2.516 5	34.2	6	5.4
23.5	2.359 3	43.6	3	5.0	44.8	2.411 9	43.6	4	5.0
15.4	2.359 3	43.6	5	5.0	26.4	2.411 9	38.1	6	5.2
18.1	2.359 3	38.1	4	4.8	34.8	2.411 9	38.1	5	5.0
17.5	2.359 3	34.2	5	5.0	34.5	2.411 9	34.2	6	5.2
20.8	2.359 3	34.2	4	5.0	40.2	2.411 9	34.2	5	5.2
18.8	2.296 9	38.1	3	5.0	36.4	2.227 4	43.6	4	5.2
13.9	2.296 9	38.1	5	5.0	26.8	2.227 4	38.1	6	5.2
16.5	2.296 9	34.2	4	4.8	32.1	2.227 4	38.1	5	5.0
16.5	2.296 9	34.2	5	4.8	26.5	2.227 4	34.2	6	5.0
19.7	2.296 9	34.2	4	4.6	34.5	2.227 4	34.2	5	4.8
24.3	2.433 4	34.2	3	5.0	43.5	2.516 5	38.1	4	5.2
23.5	2.359 3	43.6	3	4.6	42.4	2.411 9	34.2	4	4.8

2.2 强度预测模型

同理,出于精度要求考虑,从强度原始试验 27 组数据^[7]抽出 17 组作为样本数据库,具体如表 4 所示。

同理,得出悬浮密实和骨架密实两种结构水泥稳定碎石 7 d 强度的预测模型简化式,如式(5)和(6)所示。

表 4 选取的强度样本

Tab.4 Sample of strength

骨架密实					悬浮密实				
ϕ	D	f_{28d}	p	w	ϕ	D	f_{28d}	p	w
5.7	2.359 3	43.6	5.2	5.0	5.9	2.516 5	43.6	6	5.6
4.5	2.359 3	43.6	5.2	4.8	4.5	2.516 5	43.6	5	5.4
5.4	2.359 3	38.1	5.0	5.0	4.1	2.516 5	43.6	4	5.2
4.3	2.359 3	38.1	5.0	4.8	5.1	2.516 5	38.1	6	5.5
3.5	2.359 3	38.1	5.2	4.8	3.4	2.516 5	38.1	5	5.2
4.5	2.359 3	34.2	5.0	5.0	5.0	2.411 9	43.6	4	5.0
3.8	2.359 3	34.2	5.0	5.0	6.0	2.411 9	38.1	6	5.2
3.0	2.359 3	34.2	4.8	4.6	4.6	2.411 9	38.1	5	5.0
6.9	2.296 9	43.6	5.0	5.3	2.8	2.411 9	38.1	4	5.0
4.6	2.296 9	43.6	5.0	5.2	4.8	2.411 9	34.2	6	5.2
4.1	2.296 9	43.6	5.0	5.0	4.4	2.227 4	38.1	5	5.0
5.7	2.296 9	38.1	5.0	5.0	3.7	2.227 4	38.1	4	4.8
4.1	2.296 9	38.1	4.8	4.8	5.2	2.227 4	34.2	6	5.0
3.6	2.296 9	38.1	4.8	4.6	4.3	2.227 4	34.2	5	4.8
4.7	2.296 9	34.2	4.6	4.8	3.3	2.227 4	34.2	4	4.6
3.9	2.296 9	34.2	5.0	4.6	4.3	2.516 5	34.2	6	5.4
3.3	2.296 9	34.2	4.6	4.6	4.8	2.227 4	43.6	5	5.2

悬浮密实:

$$R_7 \approx -0.672 D + 0.178 f_{28d} + 1.141 p - 1.775 w; \quad (5)$$

骨架密实:

$$R_7 \approx -0.765 D + 0.175 f_{28d} + 1.124 p - 1.823 w. \quad (6)$$

3 基于抗冲刷性能的材料组成设计

在大量试验的基础上,提出基于抗冲刷性能的半刚性基层材料组成设计方法,该设计方法主要针对悬浮密实和骨架密实结构.具体设计流程如图1所示.

4 性能试验

根据表1选择适宜的结构类型,并根据表2和表3分别选择适宜要求的冲刷量和强度设计值.笔者分别采用骨架密实(1[#],2[#])和悬浮密实(3[#],4[#])两种不同结构类型的水泥稳定碎石进行性能试验,4种级配的筛孔通过率见表5.根据以上材料组成设计步骤,静压成型15 cm×15 cm的圆柱形试件,强度试件标准养生7 d,冲刷量试件标准养生28 d,分别进行性能测试,结果如表6所示.

由表6可以看到,4种配比的7 d强度和28 d冲刷量基本满足设计标准.

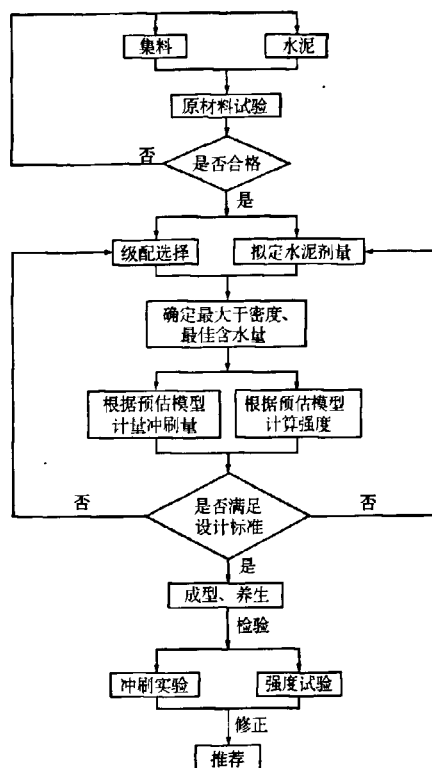


图1 基于抗冲刷性能的水泥混凝土路面半刚性基层组成设计流程图

Fig.1 Mix design of semi-rigid base for concrete pavement based on anti-erosion performance

表5 级配筛孔通过率

Tab.5 Passing rate of aggregate gradation

编号	下列筛孔(mm)的通过率													%
	31.5	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	
1 [#]	100	100	84	73	65	55	30	25	20	13	7	4	3	
2 [#]	100	90	70	63	50	50	24	20	15	8	6	5	0	
3 [#]	100	100	100	90	83	75	44	30	20	17	12	8	3	
4 [#]	100	97	91	88	71	64	44	20	15	8	10	9	4	

表6 7 d强度和28 d冲刷量的实测值和预测值

Tab.6 Measured value and predictive value of 7 d strength and 28 d erosion

编号	28 d 冲刷量/g			7 d 强度/MPa		
	实测值	预测值	标准建议值	实测值	预测值	标准建议值
1 [#]	9.1	7.8	>10.0	4.0	4.2	4.0~5.0
2 [#]	3.9	4.7		4.9	4.7	
3 [#]	18.5	19.7	>20.0	3.5	3.1	3.0~4.0
4 [#]	11.8	12.6		4.2	3.8	

5 结论

(1)结合已有文献和试验研究,提出28 d冲刷量和7 d强度作为水泥混凝土路面半刚性基层材料的组成设计指标,并提出对于特重交通28 d冲刷量不低于10.0 g,重交通28 d冲刷量不低于20.0 g,中轻交通28 d冲刷量不低于30.0 g的技术标准建议值;结合现行设计规范要求,提出对于特重交通、重交通、中轻交通7 d抗压强度值分别

为4.0~5.0 MPa,3.0~4.0 MPa,2.0~3.0 MPa的技术标准建议值。

(2)选择集料分形维数 D 、水泥28 d胶砂强度 f_{28d} 、水泥剂量 p 、含水量 w 作为影响水泥混凝土路面半刚性基层28 d冲刷量和7 d强度特征值的关联因子集。利用灰色系统理论建立其28 d冲刷量和7 d强度的灰色预测模型。

(3)基于28 d冲刷量和7 d强度灰色预测模型,针对水泥混凝土路面对基层的技术要求,提出了基于抗冲刷性能的水泥混凝土路面半刚性基层材料组成设计方法。性能试验表明,运用该方法设计的半刚性基层混合料具有良好的性能。

参考文献:

- [1] 杜天玲,傅智,赵尚传,等.黄土地区半刚性基层材料的抗冲刷性能试验研究[J].公路交通科技:应用技术版,2007(1):36-37.
- [2] 胡力群.半刚性基层材料结构类型与组成设计研究[D].西安:长安大学公路学院,2004.
- [3] 闰卫红,孟枫林,董忠红.移动荷载下半刚性基层沥青路面剪应变研究[J].郑州大学学报:工学版,2010,31(2):47-51.
- [4] CHO Y H, LEE K W, RYU S W. Development of cement-Treated base material for reducing shrinkage cracks[J]. Journal of the Transportation Research Board, 2006, 1952: 134-143.
- [5] 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.
- [6] 张攀.考虑冲刷脱空的水泥混凝土路面设计研究[D].西安:长安大学公路学院,2009.
- [7] 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:长安大学公路学院,2010.

Mix Design of Semi-rigid Base Material Based on Anti-erosion Performance

SHENG Yan-ping^{1,2}, LI Hai-bin³, CHEN Shuan-fa^{1,2}

(1. School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Engineering Research Center of Transportation Materials of Ministry of Education, Xi'an 710064, China; 3. Department of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, 710054, China.)

Abstract: Pavement slab with cavity caused by poor anti-erosion performance of semi-rigid base material is the main cause leading to damage of cement concrete pavement. Although requirements of the anti-erosion performance and stiffness of the base material are put forward in the existing design specification of cement concrete pavement, it is only limited within qualitative requirement level. The design index and standard of semi-rigid base material are put forward according to the experiment results and literature research. Gray system theory is used to establish erosion and strength prediction model of semi-rigid base material, and several prediction formula of erosion and strength are developed. Finally, the material composition design method of semi-rigid base based on anti-erosion properties is proposed. Test results show that the semi-rigid base designed with this design method has good performance.

Key words: cement concrete pavement; semi-rigid base; anti-erosion performance; mix design