

基于集料特性的沥青混合料长期抗滑性能衰减模型

丛林¹, 谭乐^{1,2}, 吴敏³, 陈芳⁴

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 湖州市公路管理局, 浙江 湖州 313000;
3. 广东省机场管理集团有限公司工程建设指挥部, 广东 广州 510470; 4. 招商局重庆交通科研设计院有限公司, 重庆 400067)

摘要: 为预测沥青混合料长期抗滑性能, 采用小型加速加载试验仪对辉绿岩、玄武岩和石灰岩的 3 种 GAC-13C 沥青混合料进行长期抗滑性能衰减试验, 进而对集料特性与长期抗滑性能进行灰关联分析, 建立了基于集料特性的长期抗滑性能衰减模型。试验结果表明, GAC-13C 沥青混合料的长期抗滑性能衰减速率逐渐减小直至趋于稳定; 磨光值是长期抗滑指标的初始值和最终值的主要影响因素, 压碎值是衰减速率的主要影响因素。

关键词: 沥青混合料; 长期抗滑性能; 集料特性; 灰关联分析; 衰减模型

中图分类号: U414

文献标志码: A

Long-Term Anti-Sliding Performance Attenuation Model of Asphalt Mixture Based on Aggregate Characteristics

CONG Lin¹, TAN Le^{1,2}, WU Min³, CHEN Fang⁴

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Huzhou Highway Administration, Huzhou 313000, China; 3. Communications Planning and Design Institute Co. Ltd. of Guangdong Province, Guangzhou 510507, China; 4. China Merchants Chongqing Communication Research and Design Institute Co. Ltd., Chongqing 400067, China)

Abstract: The effect of long-term skid-resistance performance of asphalt mixtures was studied in this paper. To achieve this objective, three GAC-13C asphalt mixtures including diabase, basalt, and limestone were studied using the model mobile load simulator equipment(MMLS3). Then, grey relational analysis between aggregate characteristics and the long-term skid-resistance performance was conducted. After that, a long-term skid-resistance performance prediction model based on aggregate characteristics was developed. The test results show that with the increase of loading repetitions,

the skid-resistance of GAC-13C descended. After a certain amount of loading repetitions, the skid-resistance became stable. A high positive correlation was found between the polished value and the initial value and final value of long-term skid-resistance indexes. The crush value has a significant impact on the attenuation rate.

Key words: asphalt mixture; long-term anti-sliding performance; aggregate characteristics; grey relational analysis; attenuation model

沥青路面的抗滑能力是影响道路安全的重要因素^[1-2]。研究表明^[3-5], 路面抗滑值的提高能显著减小交通事故率; 相反, 抗滑能力不足会导致交通事故上升。因此, 研究者尝试通过多种方法来维持或提高沥青路面的抗滑性能, 如修筑具有良好级配类型的抗滑表层^[6]、选用耐磨耗矿料或硬度差异大的分异型矿料^[7]。目前, 玄武岩广泛应用于我国高等级公路路面的抗滑表层^[8], 但这并非表示玄武岩是唯一抗滑表层集料, 事实上, 凡是符合路用集料各项性能要求的硬质岩石都可用于抗滑表层。

我国公路相关规范主要以磨光值和磨耗值来评价集料的抗滑耐磨性能, 磨光值越大表示抗磨光性能越好, 磨耗值越小表明抵抗磨损、撞击性能越好^[9]。国外评价集料的抗滑耐磨性能方法更趋多元, 如美国材料与试验协会标准采用集料硅含量表征集料的抗滑耐磨性能, 田纳西理工大学尝试用集料燃烧损失法评价集料的抗滑耐磨性能^[10]。近些年, 研究者对集料抗滑耐磨性能研究更多集中于表面构造特征——微观构造和宏观构造, 如 Cafiso 根据集料描述符和功率谱函数探索了路面摩擦力和集料表面微观特性关系^[11]; 钱振东运用三维纹理模型建立了

收稿日期: 2018-06-20

基金项目: 国家自然科学基金(51878499, 51608470); 浙江省公路科技项目(2018H22)

第一作者: 丛林(1974—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为道路工程材料。E-mail: conglin@tongji.edu.cn

通信作者: 谭乐(1986—), 男, 博士生, 工程师, 主要研究方向为道路工程材料。E-mail: tanle0572@163.com

分形维数与抗滑性能指标的关系^[12]。然而,一般新建沥青路面在选用品质良好集料和级配良好抗滑表层后,其抗滑指标都能达到技术要求,但随着时间的推移,抗滑性能逐渐衰减,最终可能无法满足安全行车的要求。因此,路面在长期使用过程中能否保持较好的抗滑性能,也是道路使用者非常关心的问题^[13]。

MMLS3 加速加载仪主要由 Hugo 于 1993 年研发,设备尺寸为 2 400 mm×600 mm×1 150 mm,采用四组充气轮胎,加载轮胎宽 80 mm,最大胎压为 0.8 MPa,可施加 1.9~2.7 kN 的荷载,最大加载频次达 7 200 次·h⁻¹^[14]。加速加载试验不仅能较好模拟路面实际荷载作用,而且能在较短时间内得到路面在长期行车荷载作用下的使用性能衰变情况,相关学者运用 MMLS3 加速加载仪进行沥青混合料路面高温性能、路面结构模型等方面的研究^[14-16],均取得较好效果。

本文运用 MMLS3 对辉绿岩、玄武岩和石灰岩集料的 GAC-13C 沥青混合料进行长期抗滑性能衰减试验研究,建立长期性能衰减预测模型,同时探索集料力学特性与模型参数影响关系。

1 集料特性

集料由自然界硬质岩石加工而成,岩石本身的结构和构造对集料的物理力学特性具有重要影响,而集料的某些特性在很大程度上影响其沥青混合料的抗滑性能。其中,从密度和坚固性可以看出集料的致密程度和抵抗破坏的能力,而压碎值、磨耗值和磨光值可以反映集料潜在的耐磨性能^[17]。

选取石灰岩、玄武岩、辉绿岩 3 种粗集料,按照《公路工程集料试验规程:JTGE 42—2005》测试主要力学性能,结果见表 1。由表可知,除石灰岩的磨光值不能达到技术要求外,其余 2 种集料的各性能都能满足技术要求。另外可以看出,玄武岩和辉绿岩粗集料的各项物理力学性能要优于石灰岩,其中因磨耗值和磨光值较大,压碎值较小,故其耐磨性能要明显优于石灰岩粗集料。

表 1 集料的特性测试结果

集料种类	坚固性/%	压碎值/%	磨耗值/%	磨光值
辉绿岩	0.35	12.0	11.8	50
玄武岩	0.62	10.3	10.0	48
石灰岩	3.90	20.7	25.2	38
技术要求	<12	<26	<28	≥42

2 沥青混合料长期抗滑性能试验

2.1 沥青混合料材料组成

GAC-13C 是一种 AC-13C 改进型的间断级配沥青混合料,其组成结构为骨架密实结构,通过增大公称最大粒径、降低 4.75 mm 筛孔通过率,来提高混合料的高温稳定性和抗滑性能,并成功应用于广东省高速公路抗滑表层^[18]。本文按照马歇尔试验方法进行不同集料组成 GAC-13C 沥青混合料配合比设计,相关测试结果如表 2 所示。

表 2 不同集料组成的 GAC-13C 技术指标测试结果

Tab.2 Test results of GAC-13C technical index of different aggregate types

级配类型	集料种类	沥青种类	沥青含量/%	孔隙率/%
GAC-13C	辉绿岩	SBS 改性沥青	4.8	4.8
GAC-13C	玄武岩	SBS 改性沥青	4.7	4.7
GAC-13C	石灰岩	SBS 改性沥青	4.6	4.4

2.2 试验参数及方案

我国沥青路面设计方法中,采用双轮组单轴 100 kN 作为标准轴载,每个轮胎荷载为 25 kN。因此,根据相似原理和模型设计理论,对 MMLS3 加速加载下的路面结构模型进行设计验证;MMLS3 加速加载设备轮胎尺寸相对于标准轮胎相似常数为 1/3,而轮载的相似常数为轮胎尺寸相似常数的平方为 1/9,对轮胎荷载进行相似缩放后为 2.7 kN,因此, MMLS3 加速加载仪可以满足荷载要求^[19]。另外, MMLS3 加速加载仪模拟试验中,加载方式为单向循环,而非直道试验和车辙试验等双向反复,这与路面上实际情况相符。

本次试验 MMLS3 加速加载仪每次对 3 个平行试件进行测试。在最佳沥青用量下制备 300 mm×300 mm×50 mm 的标准车辙板试件,每种类型成型 2 块做平行试验。MMLS3 加速加载仪加载胎压采用 0.7 MPa,加载转速采用 6 000 r·h⁻¹,试验温度控制在 20℃左右。

试验时,将车辙板固定在 MMLS3 轮底下,并设置好试验参数,待试轮转动至设定次数即停止。取出试件,分别用摆式仪测轮迹带上的摆值(BPN),手工铺砂法测构造深度(MTD),测试后放置按原摆放位置继续加载试验,如此循环。需要注意的是,试验前期试件表面抗滑性能衰减较快,后期较慢,因而试验时前期加载时间应较短,后期宜较长。

2.3 试验结果分析

试验测得的 3 种 GAC-13C 沥青混合料的摆值

和构造深度衰减结果分别见图 1 和图 2. 由图可知, 3 种不同集料的 GAC-13C 沥青混合料的摆值和构造深度都经历前期衰减较快, 然后逐渐减缓, 最后趋于稳定的过程. 依照非线性指数函数形式建立抗滑衰减模型, 见式(1), 方程示意图见图 3.

$$y = Ae^{-tx} + B \quad (1)$$

式中: y 表征摆值或构造深度; x 为 MMLS3 轴载作用次数; t 为衰减速率; A 为摆值或构造深度的衰减幅度; $A+B$ 的值表示摆值或构造深度的初始值 B_{PNO} 或 M_{TDO} ; B 为摆值或构造深度稳定最终值 B_{PNF} 或 M_{TDF} .

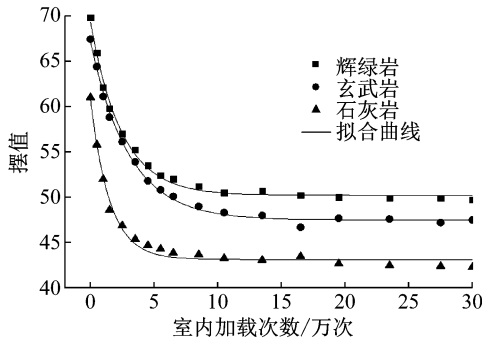


图 1 摆值拟合曲线

Fig.1 Fitting curve of BPN

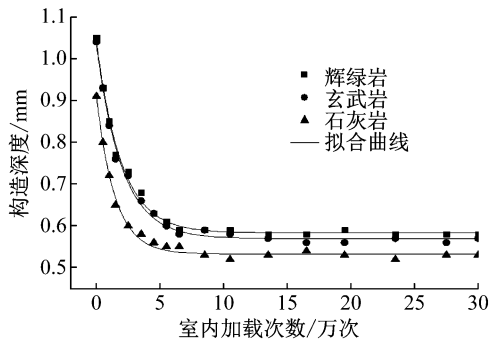


图 2 构造深度拟合曲线

Fig.2 Fitting curve of MTD

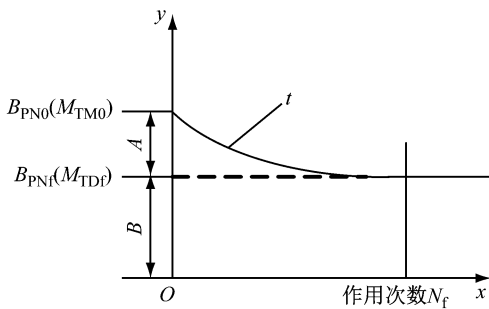


图 3 抗滑性能衰减方程示意图

Fig.3 Diagram of anti-sliding performance attenuation equation

采用抗滑衰减模型对摆值和构造深度的衰减曲

线进行拟合, 置信水平为 0.95, 结果见表 3 和表 4、图 1 和图 2. 由图表可知, 所建立的抗滑衰减模型对 3 种 GAC-13C 混合料的摆值和构造深度衰减曲线拟合较好, 决定系数 R^2 均大于 0.98.

表 3 摆值衰减方程及衰减参数

Tab.3 Attenuation equation and parameters of B_{PN}				
集料种类	A_1	B_1	t_1	R^2
辉绿岩	19.048	50.222	0.411	0.995
玄武岩	19.590	47.503	0.331	0.996
石灰岩	17.563	43.156	0.663	0.987

表 4 构造深度衰减方程及衰减参数

Tab.4 Attenuation equation and parameters of M_{TD}				
集料种类	A_2	B_2	t_2	R^2
辉绿岩	0.455	0.583	0.510	0.995
玄武岩	0.461	0.570	0.499	0.994
石灰岩	0.374	0.533	0.689	0.993

3 集料特性与沥青混合料长期抗滑性能的灰关联分析

灰色关联分析是一种用灰色关联度顺序来描述影响因素关系强弱的方法^[20]. 通过灰色关联度来分析确定影响因素的主次关系, 在参数优化、方案优选等问题的解决上具有优越性^[21]. 其基本思想是以因素的数据序列为依据, 用数学方法研究因素间的几何对应关系, 几何形状越接近, 则它们之间的灰关联度越大, 反之越小^[22]. 灰色关联分析用灰色关联度描述了各因素对目标因素的影响程度, 关联度越大, 影响程度越大^[23]. 为了研究不同集料特性对沥青混合料长期抗滑性能影响, 本文通过灰色关联分析建立不同集料特性指标与抗滑性能的灰色关联度排序, 从而得出集料特性指标对抗滑性能的影响程度.

3.1 集料特性与摆值的灰关联分析

3.1.1 集料特性与摆值初始值 $A_1 + B_1$ 的灰关联分析

摆值衰减模型中, $A+B$ 表示的物理意义为摆值初始值, 将表 3 中 $A_1 + B_1$ 值, 与表 1 中 3 种集料特性指标进行灰关联分析, 得到相关度从大到小依次为: 磨光值 (0.979 6)、压碎值 (0.728 8)、磨耗值 (0.665 1)、坚固性 (0.471 2). 表明集料磨光值对沥青混合料初始摆值影响程度最大. 集料磨光值越大, 表面越粗糙, 摆式仪的橡胶与路面接触时阻力就越大, 因而初始摆值就越大. 将初始摆值 $A_1 + B_1$ 与集料磨光值 (P_{SV}) 进行线性回归, 得到如下回归方程:

$$A_1 + B_1 = 0.679 8P_{SV} + 34.808, \quad R^2 = 0.986 \quad (2)$$

3.1.2 集料特性与摆值终值 B_1 的灰关联分析

摆值衰减模型中, B 表示的物理意义是摆值终值. 将表3中 B_1 与集料特性指标进行灰关联分析, 得到相关度从大到小依次为: 磨光值(0.9705)、压碎值(0.7168)、磨耗值(0.6545)、坚固性(0.4650). 说明集料磨光值对沥青混合料摆值终值影响程度最大. 集料抗磨光作用决定了沥青路面摩擦系数, 磨光值较大的集料组成的混合料, 因集料表面粗糙且有足够硬度而不容易被磨光, 从而使混合料具有相对较高摆值终值. 建立摆值终值 B_1 与集料磨光值的线性回归方程如下:

$$B_1 = 0.5305P_{SV} + 22.86, R^2 = 0.9338 \quad (3)$$

将式(3)代入式(2), 得到 A_1 与集料磨光值的关系

$$A_1 = 0.1493P_{SV} + 11.948 \quad (4)$$

3.1.3 集料特性与摆值衰减速率 t_1 的灰关联分析

将表3中摆值衰减速率 t_1 与集料特性指标进行灰关联分析, 得到相关度从大到小依次为: 压碎值(0.9709)、磨耗值(0.8170)、磨光值(0.5903)、坚固性(0.4651). 可以认为, 集料压碎值是影响沥青混合料摆值衰减速率的主要因素. 这是由于压碎值大的集料形成的混合料, 在行车荷载作用下集料更容易被磨耗导致微观构造减小. 建立摆值衰减速率 t_1 与集料压碎值(C_V)的线性回归方程如下:

$$t_1 = 0.0309C_V + 0.025, R^2 = 0.9938 \quad (5)$$

将式(3)、(4)和(5)代入式(1), 得到关于集料特性指标的摆值衰减方程

$$B_{PNr} = (0.1493P_{SV} + 11.948)e^{-(0.0309C_V + 0.025)x} + 0.531P_{SV} + 22.86 \quad (6)$$

3.2 集料特性与构造深度的灰关联分析

3.2.1 集料特性与构造深度初始值 $A_2 + B_2$ 的灰关联分析

构造深度衰减模型中, $A+B$ 表示的物理意义为构造深度初始值, 将表4中 $A_2 + B_2$ 值与表1中3种集料特性指标进行灰关联分析, 得到相关度从大到小依次为: 磨光值(0.9660)、压碎值(0.7105)、磨耗值(0.6488)、坚固性(0.4602). 说明集料磨光值对沥青混合料初始构造深度影响程度最大. 建立初始构造深度 $A_2 + B_2$ 与集料磨光值的线性回归方程如下:

$$A_2 + B_2 = 0.0113P_{SV} + 0.4792, R^2 = 0.9942 \quad (7)$$

3.2.2 集料特性与构造深度终值 B_2 的灰关联分析

构造深度衰减模型中, B 表示的物理意义是构

造深度终值. 将表4中 B_2 与集料特性指标进行灰关联分析, 得到相关度从大到小依次为: 磨光值(0.9696)、压碎值(0.7437)、磨耗值(0.6771)、坚固性(0.4761). 表明集料磨光值对沥青混合料构造深度终值影响程度最大. 建立构造深度终值 B_2 与集料磨光值线性回归方程如下:

$$B_2 = 0.004P_{SV} + 0.381, R^2 = 0.9824 \quad (8)$$

将式(8)代入式(7), 得到 A_2 与集料磨光值的关系

$$A_2 = 0.0073P_{SV} + 0.0982 \quad (9)$$

3.2.3 集料特性与构造深度衰减速率 t_2 灰关联分析

将表4构造深度衰减速率 t_2 与集料特性指标进行灰关联分析, 得到相关度从大到小依次为: 压碎值(0.8903)、磨光值(0.7839)、磨耗值(0.7800)、坚固性(0.4948). 可以认为, 压碎值是影响构造深度衰减速率的主要因素. 建立构造深度衰减速率 t_2 与集料压碎值的线性回归方程如下:

$$t_2 = 0.019C_V + 0.293, R^2 = 0.9901 \quad (10)$$

将式(8)、(9)和(10)代入式(1), 得到关于集料特性的构造深度衰减方程

$$M_{TDr} = (0.0073P_{SV} + 0.0982)e^{-(0.019C_V + 0.293)x} + 0.004P_{SV} + 0.381 \quad (11)$$

应该说明的是, 本文岩石样本选取了石灰岩、玄武岩和辉绿岩, 虽然具有一定代表性, 但尚需其他岩石样本进行补充研究, 同时, 研究长期抗滑性能衰减规律的沥青混合料级配类型为 GAC-13C 沥青混合料, 不针对其他级配类型沥青混合料.

4 结论

(1) 采用 MMLS3 加速加载试验模拟了沥青混合料在车辆荷载作用下抗滑性能的变化, 结果表明, 沥青混合料长期抗滑性能衰减速率逐渐减小, 最后趋于稳定. 依照非线性指数函数形式建立的抗滑衰减模型, 符合沥青混合料长期抗滑衰减规律.

(2) 借助灰色关联分析法建立了集料特性指标与沥青混合料抗滑性能之间的关联度排序, 建立了集料特性指标与抗滑性能的函数关系. 集料磨光值是影响沥青混合料抗滑性能初始值和最终稳定值的主要因素, 压碎值是影响沥青混合料抗滑性能衰减速率的主要因素.

(3) 本文尚未研究其他级配类型沥青混合料长期抗滑性能衰减规律, 得到的抗滑衰减模型限于

GAC-13C 沥青混合料,在以后的工作中将进一步扩充和完善,以提高该抗滑衰减模型的普适性和准确性。

参考文献:

- [1] MATAEI B, ZAKERI H, ZAHEDI M, *et al.* Pavement friction and skid resistance measurement methods: a literature review [J]. *Open J Civ Eng*, 2016, 6(4): 537.
- [2] USMAN T L, FU L P, MIRANDA-MORENO L F. Quantifying safety benefit of winter road maintenance: accident frequency modeling[J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2010, 42(6): 1878.
- [3] MAYORA J M P. An assessment of the skid resistance effect on traffic safety under wet-pavement conditions [J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2009, 41: 881.
- [4] AL-MANSOUR A. Effects of pavement skid resistance on traffic accidents [J]. *The Journal of Engineering Research*, 2006, 3(1): 75.
- [5] CHEN Y, WANG K J, ZHOU W F. Evaluation of surface textures and skid resistance of pervious concrete pavement [J]. *Journal of Central South University*, 2013, 20(2): 520.
- [6] ONGEL O, LU Q, HARVEY J. Frictional properties of asphalt concrete mixes [J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Transport*, 2009, 162(1): 19.
- [7] 王元元,何亮,孙璐.矿料分异处理对沥青混合料抗滑性能的影响[J].*东南大学学报(自然科学版)*, 2017, 47(6): 1216.
WANG Yuanyuan, HE Liang, SUN Lu. Effect of differentiation processing of mineral aggregate on asphalt pavement sliding resistance[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2017, 47(6): 1216.
- [8] 王丹. 石灰岩与玄武岩混合集料沥青路面表层抗滑性能研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2015.
WANG Dan. Asphalt pavement skid resistance of the surface mixed limestone and basalt aggregate [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2015.
- [9] 赵战利. 沥青路面抗滑表层研究[D]. 西安: 长安大学, 2002.
ZHAO Zhanli. Research of asphalt mixture of anti-slide pavement [D]. Xi'an: Chang'an University, 2002.
- [10] SAUTER H J. Identification of aggregates for tennessee bituminous surface courses [D]. Cookeville: Tennessee Technological University, 2001.
- [11] CAFISO S, TAORMINA S. Texture analysis of aggregates for wearing courses in asphalt pavements[J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2007(8): 45.
- [12] 钱振东,薛永超,张令刚. 沥青路面三维纹理分形维数及其抗滑性能[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2016, 47(10): 3590.
QIAN Zhendong, XUE Yongchao, ZHANG Linggang. 3-D textural fractal dimension and skid resistance of asphalt pavement [J]. *Journal of Central South University (Natural Science Edition)*, 2016, 47(10): 3590.
- [13] 张小瑞. 基于集料性质的沥青混合料磨光特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
ZHANG Xiaorui. Research on the polishing characteristics of the asphalt mixture based on aggregate properties [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [14] 李淑明, 吴小虎, 苏志翔. 基于 MMLS3 的沥青路面结构模型的尺寸研究[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(10): 1503.
LI Shuming, WU Xiaohu, SU Zhixiang. Size of pavement structure model with on-third scaled model mobile load simulator [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2015, 43(10): 1503.
- [15] 路贺伟, 张宏超, 王健, 等. 基于 MMLS3 的沥青混合料高温稳定性研究[J]. *建筑材料学报*, 2011, 14(5): 624.
LU Hewei, ZHANG Hongchao, WANG Jian, *et al.* Research on asphalt mixtures' stability at high temperatures applying MMLS [J]. *Journal of Building Materials*, 2011, 14(5): 624.
- [16] 申爱琴, 郭寅川, 车飞, 等. 基于 MMLS3 试验的混合料离析对沥青路面长期高温性能的影响[J]. *中国公路学报*, 2012, 25(3): 80.
SHEN Ai-qin, GUO Yin-chuan, CHE Fei, *et al.* Influence of asphalt mixture segregation on long-term high temperature performance of asphalt pavement based on MMLS3 test [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2012, 25(3): 80.
- [17] 李立寒, 张南鹭. 道路建筑材料[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
LI Lihan, ZHANG Nanlu. Road constructional materials[M]. Beijing: China Communications Press, 2003.
- [18] 张永升. 广东武深高速公路沥青路面结构设计研究[D]. 北京: 交通运输部公路科学研究院, 2015.
ZHANG Yongsheng. Research on asphalt pavement structure design of Wushen expressway in Guangdong Province [D]. Beijing: Research Institute of Highway Ministry of Transport, 2015.
- [19] 苏志翔, 李淑明, 吴小虎. MMLS3 加速加载试验模型路面结构相似性设计[J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2014(1): 16.
SU Zhixiang, LI Shuming, WU Xiaohu. Design of model pavement structure under the MMLS3 load by similarity theory [J]. *Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science)*, 2014(1): 16.
- [20] 刘思峰. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
LIU Sifeng. Grey system theory and application[M]. Beijing: Science Press, 1999.
- [21] 彭余华, 胡佳寅, 胡顺峰. AC-25 粒度分布对级配离析的影响[J]. *交通运输工程学报*, 2014, 14(5): 1.
PENG Yuhua, HU Jiayin, HU Shunfeng. Influence of AC-25 particle size distribution on gradations segregation [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2014, 14(5): 1.
- [22] 曹明霞. 灰色关联分析模型及其应用的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
CAO Mingxia. Research on grey incidence analysis model and its application[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007.
- [23] 周兴林, 刘万康, 肖旺新, 等. 沥青混合料体积指标对沥青路面抗滑性能的影响[J]. *交通运输工程学报*, 2017, 17(6): 1.
ZHOU Xinglin, LIU Wankang, XIAO Wangxin, *et al.* Influence of asphalt mixture volume indexes on asphalt pavement skid resistance performance [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2017, 17(6): 1.