

文章编号: 10020268 (2008) 09000006

AASHTO 2002 沥青路面永久 变形叠加方法验证

曹丽萍¹, 孙立军², 董泽蛟¹

(11 哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090;

21 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 沥青路面的永久变形叠加问题是永久变形研究中的难点。首先对现有的用于沥青路面中的叠加方法进行了分析, 指出其不适合于永久变形叠加问题; 而后对 AASHTO 2002 柔性路面设计指南中的永久变形叠加方法进行了简要介绍, 并采用两种 APA 试验方法对 AASHTO 叠加方法进行了验证。验证结果表明, AASHTO 方法并不能准确预估永久变形; 应力历史对永久变形叠加结果有很大影响, 而以应变硬化原理为基础的 AASHTO 叠加方法不能体现应力历史的影响。因此, AASHTO 2002 的叠加方法还存在着一些局限, 需要进行修订。

关键词: 道路工程; AASHTO 2002; APA 试验验证; 永久变形叠加方法; 应力历史

中图分类号: U416.1217

文献标识码: A

Validation of Superposition Method of Permanent Deformation of Asphalt Pavement in AASHTO 2002 Flexible Pavement Design Guide

CAO LiPing¹, SUN LiJun², DONG ZeJiao¹

(11 School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin Heilongjiang 150090, China;

21 Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education,

Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Superposition method of permanent deformation is a difficulty in research on permanent deformation of asphalt pavement for a long time. First, superposition methods used in asphalt pavement at present were introduced briefly and analyzed, and those methods unfit for permanent deformation were indicated. Second, superposition method of permanent deformation for asphalt pavement in AASHTO 2002 flexible pavement design guide was introduced briefly. At last, superposition method in AASHTO 2002 design guide was validated using two kinds of APA tests. The first validation indicates that AASHTO method cannot estimate permanent deformation exactly. The second validation implies that stress history has important influence on the superposition result of permanent deformation, and the AASHTO method, which based on the principle of strain hardening, cannot reflect the influence of stress history. As a result, it is very necessary to do some modification for the superposition method in AASHTO 2002 design guide.

Key words: road engineering; AASHTO 2002; APA test validation; superposition method of permanent deformation; history of stress

收稿日期: 20070606

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(新教师基金)资助项目(20070213014); 哈尔滨工业大学优秀青年教师培养计划资助项目(HITQJNS2008047)

作者简介: 曹丽萍(1979-), 女, 黑龙江阿城人, 博士, 讲师, 研究方向为道路材料和道路工程经济 1 (caoliping79@163.com)

0 引言

沥青路面的永久变形问题一直以来都倍受关注,研究者们从不同角度对其进行了研究^[1~4]。而永久变形的叠加则是永久变形研究中的难点。沥青路面永久变形的叠加可以分为以下几个方面:

(1) 温度的叠加: 不同路面温度下的永久变形需要进行叠加;

(2) 荷载的叠加: 不同形式、不同大小、不同频率的荷载需要叠加;

(3) 沿路面深度的叠加: 路面各个结构层的永久变形需要叠加;

(4) 轴载作用次数的叠加: 随着荷载作用次数的增加, 永久变形也进行累加。

这里主要研究的是不同路面温度下的永久变形叠加。目前用于沥青路面中的叠加方法, 主要是从其他学科引入的, 有 Boltzmann 线性叠加原理和时温等效原理^[5~7]。虽然这些方法在沥青路面中都有应用, 但是都还没有直接用于永久变形的叠加问题。

Boltzmann 叠加原理指出现在的应力、应变状态只与以前的履历有关, 而与以后的输入无关; 过去各时刻的应力、应变对现在时刻的影响可以简单叠加。该原理是以简单的受力状态推导得出的, 而且主要考虑的是不同应力水平之间的叠加, 而主要关注的是不同温度之间永久变形的叠加^[8,9]。

时温等效原理适用于简单的受力状态, 如正弦荷载、恒定荷载或者冲击荷载等单一的受力状态; 而且主要用于获得粘弹性参数 (如复数模量、蠕变柔量和粘度等) 以描述粘弹性材料的力学行为, 并建立上述参数与时间和温度之间的转换关系。

在 NCHRP 10B7 中推出的 AASHTO 2002 力学经验法设计指南当中采用了一种有别于上面两种的叠加方法, 而且 AASHTO 2002 中的永久变形预估是基于该方法建立的。

1 AASHTO 2002 永久变形叠加方法介绍

AASHTO 2002 经过几次修改, 最终以 NCHRP 10B7 的形式给出。之前也给出了几个不同的版本, 但是关于永久变形叠加方法的完整叙述却是在 NCHRP 10B7 的最后版本给出的^[10]。之前的几个版本不是没有对此进行介绍, 就是介绍的很少。即使是最后一个版本, 对叠加方法的阐述也很少。该方法中以 1 个月为一个分析期, 对于发生冻融循环的地区将分析期缩短为半个月; 然后将每个分析期分为 5 个子季节, 按照

正态分布的方法计算与标准差 0.1281 6、- 0.01524 4、0、0.01524 4、0.1281 6 对应的路面温度, 得到每个子季节的代表温度。

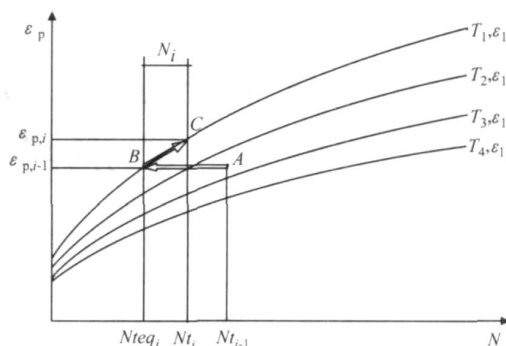


图1 AASHTO 2002 永久变形叠加方法^[6]

Fig1 Superposition method of permanent deformation in AASHTO 2002 design guide

首先, 假设子季节 $i-1$ 末对应于图 1 中 A 点, 则该子季节 $i-1$ 末的总塑性应变为 $E_{p,i-1}$, 交通荷载重复作用次数为 $N_{teq,i-1}$ 。下一个子季节为 i , 该季节的起点对应于图 1 中 B 点, 路面结构层的温度为 T_1 , i 季节的荷载和材料状况下对应的回弹应变为 $E_{r,i}$ 。根据应变硬化的方法, 认为子季节 i 开始时的塑性应变与子季节 $i-1$ 末的塑性应变是相等的, 均为 $E_{p,i-1}$, 但是, 其对应的等效交通荷载重复作用次数为 $N_{teq,i}$, 且处于一个新的子季节 ($T_1, E_{r,i}$) 的环境下。接下来在子季节下又作用了 $N_{teq,i} - N_{ti}$ 次荷载, 那么在图中表现为从 B 点沿着最上边一条曲线过渡到 C 点, C 点对应于 i 季节末, 重复荷载作用次数为 N_{ti} , 塑性应变为 $E_{p,i}$ 。按照这种方法进行类推, 就可以求出每个子季节末的塑性应变, 从而得到每个月或半月的塑性应变, 将其与该亚层的厚度相乘即可以得到该层的永久变形。

该方法是基于应变硬化原理理论的, 其实质是等应变原理, 认为可以将两个不同温度和作用次数下的状态通过应变来进行等效。与前面介绍的几种方法相比, 该方法更加合理, 与其他永久变形预估中的等效路面温度或者代表温度相比, 该方法也是一个很大的飞跃。但是该方法是否与路面的实际情况相符? 是否存在着一些需要改进的地方? 尚没有人进行过系统的研究。为此, 从两个方面对 AASHTO 2002 设计指南中的永久变形叠加方法进行验证。另外需要说明的是, 由于沥青路面的永久变形是各个结构层永久变形的总和, 而基层的永久变形产生量比较小, 本研究主要针对面层, 尤其是对上面层的永久变形进行试验模

拟。

2 试验材料及级配

为了使验证的结果更为有效, 本次研究共采用了 3 种混合料, 级配情况如表 1 所示。混合料 1 的粗集料为灰绿岩, 细集料为花岗岩, 油石比为 412%, 空隙率为 510%; 混合料 2 采用的是石灰岩, 油石比为 410%, 空隙率为 415%; 混合料 3 采用的是灰绿岩, 油石比为 414%, 空隙率为 615%。

表 1 级配

Tabl 1 Gradation

级配类型	通过下列筛孔(mm)的质量百分率(%)									
	16	1312	915	4175	2136	1118	016	013	0115	01075
混合料 1	100	95	70	4115	30	2215	1615	1215	815	6
混合料 2	100	95	70	48	36	24	18	12	8	4
混合料 3	100	96	84	60	45	30	1915	1315	8	5

采用沥青路面分析仪 APA 对 3 种混合料实测不同温度下的永久变形。APA 的试验条件是轮载为 100 lbs (45 kg), 充气软管的气压为 100 psi (0169 MPa)^[11]。

3 AASHTO 叠加方法验证 1^[12]

本次验证的思路是: 将 AASHTO 2002 叠加方法得到的不同温度下的永久变形与 APA 试验实测得到的永久变形进行对比, 以验证 AASHTO 方法的合理性。

针对混合料 1 进行了 3 种条件下的叠加验证,

(1) 假设两个温度下的参数除了温度和作用次数外, 其他因素均相同。首先在 60 e 下作用 4000 次, 然后降温至 50 e 并且保温 5 h 后作用 4 000 次。试验结果以及叠加结果如图 2 所示, 图 2 中给出的是永久变形, 而 AASHTO 2002 中给出的是竖向塑性应变, 两者的实质其实是相同的。AASHTO 中不同层永久变形的总和是将各层的塑性应变与该层的厚度相乘后相加得到的, 这里为了更加直观, 没有采用塑性应变的概念, 而是直接采用了永久变形的方

另外, 所有的模拟试验中, 从一个温度变换到另一个温度都进行了 5 h 的保温, 一方面确保试件能够达到预定的温度, 另一方面给试件一个延迟弹性变形回复的时间。此外, 模拟试验中, 均考虑了延迟弹性变形的影响, 并在总变形中予以考虑, 具体的方法见参考文献 [7]。

图 2 中左边一条为实测的结果, 右边为按照 AASHTO 方法叠加的结果。从图 2 可以看出, 如果按

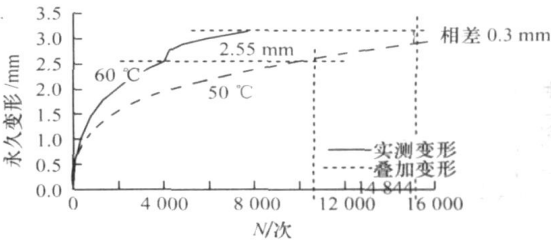


图 2 叠加变形与实测变形对比图

Figl 2 Comparison of superposition deformation and measured deformation

照 AASHTO 的方法以等应变的方式进行叠加, 则 60 e 作用 4 000 次以后的变形量为 2155 mm, 相当于 50 e 作用 10 844 次。接着在 50 e 下再作用 4 000 次则最终相当于在 50 e 作用 14 844 次, 对应的总变形为 2183 mm, 而实测的结果为 3113 mm, 两者相差 013 mm。

(2) 假设其他条件都相同, 60 e 作用 3 000 次, 然后再降温至 50 e 保温 5 h 后作用 3 000 次。试验结果如图 3 所示。

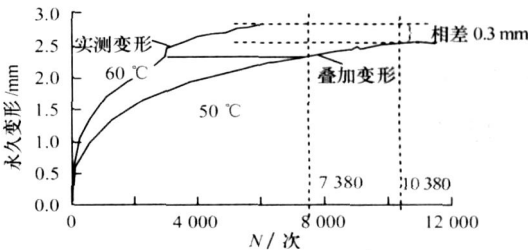


图 3 叠加变形与实测变形对比图

Figl 3 Comparison of superposition deformation and measured deformation

图 3 中左边曲线代表实测结果, 右边曲线代表叠加结果。从图 3 可以看出, 如果按照 AASHTO 2002 的方法以等应变的方式进行叠加, 那么 60 e 作用 3 000 次以后的变形量为 2132 mm, 相当于 50 e 作用 7 380 次; 接着在 50 e 条件下进行保温, 再作用 3 000 次, 则最终相当于在 50 e 作用 10 380 次, 对应的总变形为 2152 mm, 而实测的结果为 2181 mm, 两者相差接近 013 mm。

(3) 前边采用的是降温方式, 这里采用升温方式进行验证。假设其他条件都相同, 50 e 作用 3 000 次, 然后再升温至 60 e, 保温 5 h 后作用 3 000 次。试验结果如图 4 所示。

图 4 中虚线代表叠加的结果, 实线代表实测的结果。从图 4 可以看出, 如果按照 AASHTO 的方法以等应变的方式进行叠加, 则 50 e 作用 3 000 次以后的变形量为 1175 mm, 相当于 60 e 作用 1 445 次; 接着在

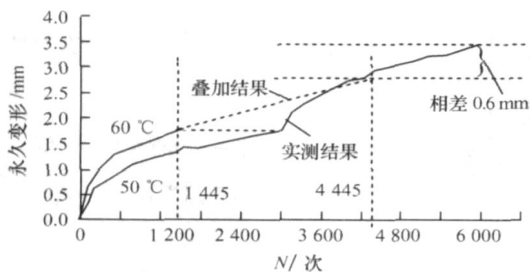


图4 叠加变形与实测变形对比图

Fig4 Comparison of superposition deformation and measured deformation

60 e 条件下进行保温,再作用 3 000 次最终相当于在 60 e 作用 4 445 次,对应的总变形为 2182 mm,而实测的结果为 3143 mm,两者相差接近 016 mm。

由上面的分析可以看出,采用 APA 试验实测的结果要比 AASHTO 2002 叠加方法得到的永久变形大,这说明 AASHTO 方法并不能准确预估永久变形。事实上,这里只是一次叠加的结果,当在整个分析期内进行不同温度的大量叠加时,这种差异将会更大,必将导致预测的结果更加不准确。

4 AASHTO 叠加方法验证 2

通过前面的介绍可以发现,AASHTO 2002 中永久变形叠加方法的实质是永久变形只与当前的应变有关。用变形代替应变时,则只与变形有关。也就是说不管路面材料前面经受了怎样的应力历史而到达了当前的状态,如果后面的温度状况、荷载作用次数以及荷载等因素均相同时,则后边的变形发展情况是相同的。举例说明,如图 5 所示。

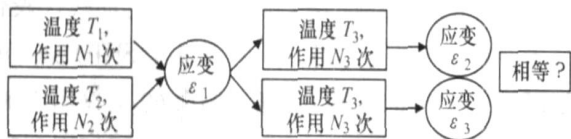


图5 AASHTO 永久变形叠加方法验证示意图

Fig5 Schematic diagram of validation of superposition method of permanent deformation in AASHTO 2002 design guide

这里假设有两种情况:

情况 1: 材料在温度为 T_1 时,经过了轮载 N_1 次的作用而达到了应变 ϵ_1 ,然后温度变为 T_3 ,经过了轮载 N_3 次作用,达到应变 ϵ_2 。

情况 2: 材料在温度为 T_2 时,经过了轮载 N_2 次的作用也达到了应变 ϵ_1 ,然后温度变为 T_3 ,经过了轮载 N_3 次作用,达到应变 ϵ_3 。

按照 AASHTO 的方法,最终两种情况得到的应变应该是相同的,文中对此进行了验证。

(1) 针对混合料 2,进行下面 3 种情况的试验

情况 1: 材料在温度 40 e 时,经过了轮载 5 000 次作用而达到了变形 1167 mm,然后升温至 50 e 并保温 5 h,荷载作用 5 000 次。

情况 2: 材料在温度 50 e 时,经过了轮载 3 600 次作用也达到了变形 1167 mm,然后 50 e 保温 5 h,荷载作用 5 000 次。

情况 3: 材料在温度 60 e 时,经过了轮载 1 700 次作用也达到了变形 1167 mm,然后降温至 50 e 并保温 5 h,荷载作用 5 000 次。

将叠加后的曲线绘制在同一个图形中,如图 6 所示;为了进一步分析将第 2 个温度下的永久变形曲线,绘制成图,如图 7 所示。

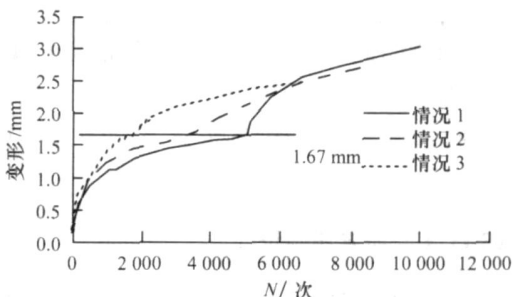


图6 叠加结果汇总

Fig6 Superposition result of permanent deformation

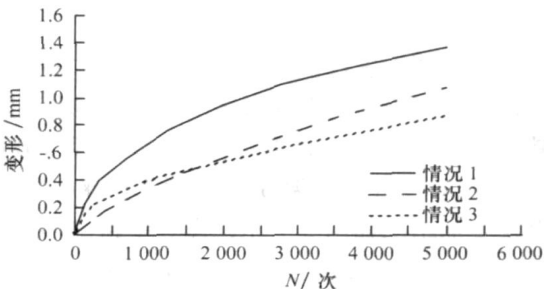


图7 第2阶段叠加结果

Fig7 Superposition result of permanent deformation at 2nd stage

情况 1 的总变形为 3104 mm,第 2 阶段 50 e 作用 5 000 次的变形为 1136 mm;情况 2 的总变形为 2175 mm,第 2 阶段 50 e 作用 5 000 次的变形为 1107 mm;情况 3 的总变形为 2154 mm,第 2 阶段 50 e 作用 5 000 次的变形为 0186 mm。

从图 6 和图 7 可以看出,3 种情况下叠加后的第 2 阶段变形并不相同,而是 40 e (情况 1) 最大,60 e (情况 3) 最小。说明不同温度下永久变形的叠加

并不只与应变有关, 与前面的应力历史也有关。因此, AASHTO 2002 中以等应变的方法进行叠加是不准确的。

(2) 针对混合料 3, 进行下面 3 种情况的试验

情况 1: 材料在温度 40 e 时, 经过了轮载 8 000 次作用而达到了变形 2126 mm, 然后升温至 50 e 并保温 5 h, 荷载作用 5 000 次。

情况 2: 材料在温度 50 e 时, 经过了轮载 5 050 次作用也达到了变形 2126 mm, 然后 50 e 保温 5 h, 荷载作用 5 000 次。

情况 3: 材料在温度 60 e 时, 经过了轮载 2 700 次作用也达到了变形 2126 mm, 然后降温至 50 e 并保温 5 h, 荷载作用 5 000 次。

情况 1 的总变形为 3146 mm, 第 2 阶段 50 e 作用 5 000 次的变形为 1119 mm。情况 2 的总变形为 2181 mm, 第 2 阶段 50 e 作用 5 000 次的变形为 1107 mm。情况 3 的总变形为 2160 mm, 第 2 阶段 50 e 作用 5 000 次的变形为 0168 mm。

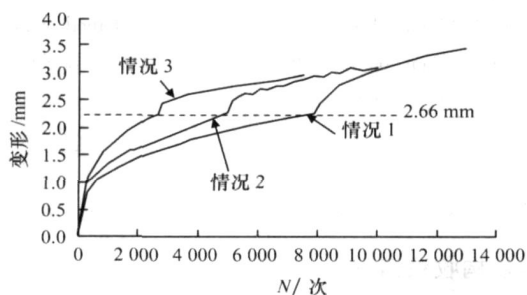


图 8 3 种情况叠加后的汇总

Fig 8 Superposition result of permanent deformation

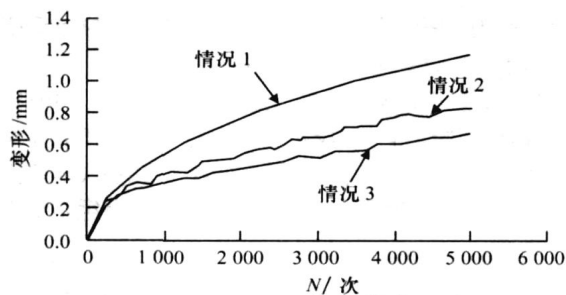


图 9 第 2 阶段叠加情况汇总

Fig 9 Superposition result of permanent deformation at 2nd stage

混合料 3 的试验结果与混合料 2 的相似, 即 3 种情况的第 2 阶段变形并不相同, 而是 40 e (情况 1) 最大, 60 e (情况 3) 最小。这说明不同温度下的永久变形叠加并不只是与当前的应变有关, 与前面的应力历史也有关系。进一步验证了 AASHTO 2002 中以

等应变进行叠加的方法是不准确的。

经过前面两种混合料的反复验证, 发现无论是单纯地采用 AASHTO 2002 的方法进行不同温度下的永久变形叠加, 还是在采用不同的方式达到一定的变形后, 进行相同条件的试验, 都表明了 AASHTO 2002 中关于不同温度下的永久变形叠加的描述是存在缺陷的, 不够准确, 还需要进行进一步的修正, 具体的修正方法作者将在其他文章中介绍。

5 结论

沥青路面的永久变形叠加问题是永久变形问题的难点。本文首先对 AASHTO 2002 的永久变形叠加方法进行了简要介绍; 而后采用两种试验方法对 AASHTO 2002 的叠加方法进行了详细验证。方法 1 中将 AASHTO 2002 叠加方法得到的不同温度下的永久变形与采用 APA 试验实测得到的永久变形进行对比, 结果表明实测结果大于叠加结果, 这说明 AASHTO 方法并不能准确预估永久变形; 方法 2 中验证了应力历史对永久变形叠加结果的影响, 结果表明应力历史对永久变形叠加结果有很大影响, 而以应变硬化原理为基础的 AASHTO 2002 永久变形叠加方法则不能体现应力历史的影响。综上所述, AASHTO 2002 的叠加方法还存在着一些局限, 不能直接用于永久变形的叠加。

参考文献:

References:

- [1] 侯相深, 马松林, 王彩霞 1 基于行车安全的沥青路面车辙测量与评价指标的研究 [J] 1 公路交通科技, 2006, 23 (8): 14- 171
HOU XiangShen, MA SongLin, WANG CaDial Research on Measurement and Evaluation of Asphalt Pavement Rutting Based on Traffic Safety [J] 1 Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23 (8): 14- 171
- [2] 梅廷义, 刘斌 1 AC 型沥青混合料车辙变形机理分析 [J] 1 公路交通科技, 2007, 24 (2): 18- 211
MEI TingYi, LIU Bin Mechanism Analysis on AC Asphalt Mix2 ture Rut Deformation [J] 1 Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24 (2): 18- 211
- [3] 黄晓明, 范要武, 赵永利, 等 1 高速公路沥青路面高温车辙的调查与试验分析 [J] 1 公路交通科技, 2007, 24 (5): 16- 201
HUANG XiaoMing, FAN YaoWu, ZHAO YongQi, et all Investigation and Test of Expressway Asphalt Pavement High Temperature Performance [J] 1 Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24 (5): 16- 201

- [4] 张久鹏, 黄晓明, 王晓磊 1 基于粘弹塑性理论的沥青路面车辙分析 [J] 1 公路交通科技, 2007, 24 (10): 20- 24
ZHANG JiuOpeng, HUANG XiaoOming, WANG XiaoOleil Analysis of Asphalt Pavement Rut Based on ElasticOvis2coplastic Theory [J] 1 Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24 (10): 20- 24
- [5] 周光泉, 刘孝敏 1 粘弹性理论 [M] 1 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1996
ZHOU GuangOquan, LIU XiaoOminl Theory of Viscoelasticity [M] 1 Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1996
- [6] 阿克洛尼斯 J J, 麦克奈特 W J 1 聚合物粘弹性引论 [M] 1 吴立衡, 译 1 北京: 科学出版社, 1986: 62 - 92
AKLONIS J J, MACKNIGHT W J 1 Introduction to Polymer Vis2coelasticity [M] 1 Translated by WU LiOhengl Beijing: Science Press, 1986l 62- 92
- [7] 张肖宁 1 实验粘弹原理 [M] 1 哈尔滨: 哈尔滨船舶工程学院出版社, 1990: 48- 72
ZHANG XiaoQingl Theory of Viscoelasticity in Experiment [M] 1 Harbin: Harbin Engineering University Press, 1990: 48- 72
- [8] 齐忠华, 智莹 1 关于 Miner 疲劳损伤累积假说的思考 [J] 1 鞍山师范学院学报 (综合版), 1998, 19 (4): 22 - 24
QI ZhongOhua, ZHI Yingl Thinking about Miner Fatigue Cu2mulative Damage Theory [J] 1 Journal of Anshan Nomal Co2llege (Synthetic), 1998, 19 (4): 22- 24
- [9] 顾国芳, 浦鸿汀 1 聚合物流变学基础 [M] 1 上海: 同济大学出版社, 2000
GU GuOfang, PU HongQingl Polymer Rheology Elements [M] 1 Shanghai: Tongji University Press, 2000
- [10] AASHTO 1 Guide for MechanisticOEmpirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures Final Report [R] 1 Washington D C: National Cooperative Highway Research Program, 2004
- [11] 曹丽萍, 孙立军, 董泽蛟 1 沥青混凝土路面分析仪 APA 的发展与应用 [J] 1 公路, 2007 (3): 1- 6
CAO LiPing, DONG ZeQiao, Development and Application of Asphalt Pavement Analyzer [J] 1 Highway, 2007 (3): 1 - 6
- [12] 曹丽萍 1 沥青路面永久变形叠加方法研究 [D] 1 上海: 同济大学, 2007
CAO LiPingl Research on Superposition Method of Permanent Defomation of Asphalt Pavement [D] 1 Shanghai: Tongji U2niversity, 2007

5 公路交通科技6 被国际检索机构收录情况

日前, 5 公路交通科技6 被波兰 5 哥白尼索引6、美国 5 乌利希国际期刊指南6 收录。

波兰 5 哥白尼索引6 (Index Copernicus) 简称 IC, 是由 Medical Science Intemational (国际医学) 创办的医药学、生物学国际检索系统, 是一个新的通向科学信息的世界性的门户; 它有益地补充了美国 5 医学索引6 (Medline) 和美国科学信息研究所 (ISI) 的内容。如今, 该数据库已经对其他科学领域的期刊开放, 如数学、物理、化学、工程等。

5 乌利希国际期刊指南6 简称 Ulrich, 是世界上著名的国际在版期刊指南, 由美国鲍克公司出版。Ulrich 创刊于 1932 年, 其收录的刊物范围极广泛, 内容包括数百个学科领域。该指南的正文按学科分类编排, 每类按刊名字顺排列, 指明了某刊为哪些索引和文摘收录。著录项目包括杜威十进分类法的分类号、国别代号、国际标准期刊编号 (ISSN)、刊名 (非英文期刊有英文译名)、文种、创刊年代、定价、出版者名称和地址、编者等。书后有刊名索引、期刊停刊索引和国际组织机构出版物索引。