

重载作用下典型沥青路面结构疲劳寿命分析

徐希忠^{1,2}, 张新³, 张晓萌^{1,2}, 季正军^{1,2}, 符东绪^{1,2}

¹山东省交通科学研究院, 山东 济南

²高速公路养护技术交通行业重点实验室(济南), 山东 济南

³山东高速股份有限公司, 山东 济南

Email: 846954711@qq.com

收稿日期: 2021年2月1日; 录用日期: 2021年2月22日; 发布日期: 2021年3月22日

摘要

为分析比较半刚性基层、组合式基层和倒装式基层3种典型路面结构在重载作用下的疲劳寿命, 本文基于ABAQUS有限元程序, 建立了三种典型路面结构模型, 计算了典型路面结构在重载作用下的力学响应, 评价了三种路面结构的疲劳性能和疲劳寿命, 同时根据各路面结构基层层厚对路面结构疲劳寿命的影响, 得出了级配碎石和大粒径透水材料(LSPM)的合理厚度。结果表明级配碎石基层和大孔径透水材料(LSPM)基层比传统半刚性基层拥有更好的抗疲劳开裂性能。级配碎石基层的合理厚度为15~18 cm, LSPM的厚度不应超过15 cm。

关键词

典型路面结构, 半刚性基层, 疲劳寿命, 数值模拟, 合理厚度

Fatigue Life Analysis of Typical Asphalt Pavement Structure under Heavy Load

Xizhong Xu^{1,2}, Xin Zhang³, Xiaomeng Zhang^{1,2}, Zhenjun Ji^{1,2}, Dongxu Fu^{1,2}

¹Shandong Transportation Research Institute, Jinan Shandong

²Key Laboratory of Expressway Maintenance Technology Transportation Industry, Jinan Shandong

³Shandong High Speed Co., Ltd., Jinan Shandong

Email: 846954711@qq.com

Received: Feb. 1st, 2021; accepted: Feb. 22nd, 2021; published: Mar. 22nd, 2021

Abstract

In order to analyze and compare the fatigue life of three typical pavement structures under heavy

load, which are semi-rigid base, combined base and inverted base, three typical pavement structure models are established based on ABAQUS finite element program, and the mechanical response of typical pavement structure under heavy load is calculated. The fatigue performance and fatigue life of three kinds of pavement structures are evaluated, and the reasonable thickness of graded crushed stone and large particle size permeable material (LSPM) is obtained according to the influence of the base layer thickness of each pavement structure on the fatigue life of pavement structure. The results show that graded crushed stone base and LSPM base have better anti fatigue cracking performance than traditional semi-rigid base. The reasonable thickness of graded crushed stone base is 15~18 cm, and the thickness of LSPM should not exceed 15 cm.

Keywords

Typical Pavement Structure, Semi-rigid Base, Fatigue Life, Numerical Simulation, Reasonable Thickness

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

半刚性基层沥青路面是我国高等级公路普遍采用的结构形式,这种路面结构具有板体性好,承载能力高的优点,但易出现反射裂缝和水损坏[1]-[6]。探索多样化沥青路面结构形式迫在眉睫。经过近十年的尝试,我国高等级沥青路面结构逐渐形成了以江苏为代表的软土地基处理后的半刚性沥青路面、以山东为代表的半刚性基层上加铺沥青混凝土的组合式基层沥青路面、以附件为代表的半刚性基层是那个加铺级配碎石的沥青路面[6]-[12]。总体来看,对于沥青路面结构形式的研究,大多只是针对一种路面结构组合,对于新涌现的组合式基层、倒装式基层结构关注较少。不同沥青路面结构形式在重载作用下的疲劳寿命分析和比较有待于丰富。

本文基于我国高等级公路三种典型沥青路面结构形式,建立了有限元模型,分析了重载作用下不同路面结构的力学响应,并采用 FE-SAFE 程序进行了疲劳寿命技术,评价了基层厚度对路面疲劳寿命的影响,提出了基层合理厚度范围。

2. 典型路面结构及模型概况

2.1. 典型路面结构

我国当前高等级公路典型路面结构形式如表 1 所示。结构 1 代表江苏省采用稳定材料的半刚性基层路面结构。结构 2 代表福建省采用集约化基础的路面结构。结构 3 代表山东省采用 LSPM 层的路面结构。

2.2. 模型概况

三种路面结构有限元模型边界条件设定为:模型底部仅可发生垂直方向位移,模型两侧被约束,不发生位移。ABAQUS 模型中定义的轮胎与路面接触形状为矩形,每个矩形尺寸为 20 m*16 cm,考虑到我国轴载不断增大的现状,加载力大小为每轴 180 kN,路面结构模型及网格划分见图 1。

Table 1. Typical Pavement Structure
表 1. 典型路面结构

结构一(江苏)	结构二(福建)	结构三(山东)
4 cm SMA-13/AC-13	4 cm AC-13	4 cm SMA-13/AC-13
6 cm AC-20	6 cm AC-20	6 cm AC-20
8 cm AC-25	15 cm 沥青处置碎石	8 cm AC-25
36 cm 水稳基层	15cm 级配碎石	10~12cm LSPM
20 cm 石灰改善土	30 cm 水稳基层	18 cm 水稳基层
		20 cm 石灰改善土

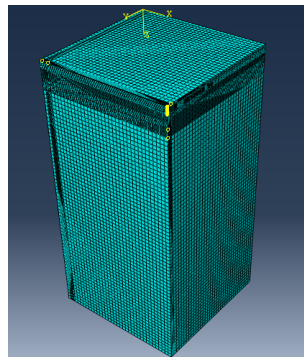


Figure 1. Finite element mesh model
图 1. 有限元网格模型

在建立的有限元模型中计算重载作用下各结构力学响应，将计算结果导入 FE-SAFE 程序进行疲劳寿命计算，分析各结构不同层位的疲劳寿命以及对路面结构疲劳寿命的贡献程度，分析基层厚度变化对路面结构疲劳寿命的影响。

3. 计算结果分析

3.1. 三种路面结构疲劳寿命分析

结构一疲劳寿命计算结果如图 2 所示。

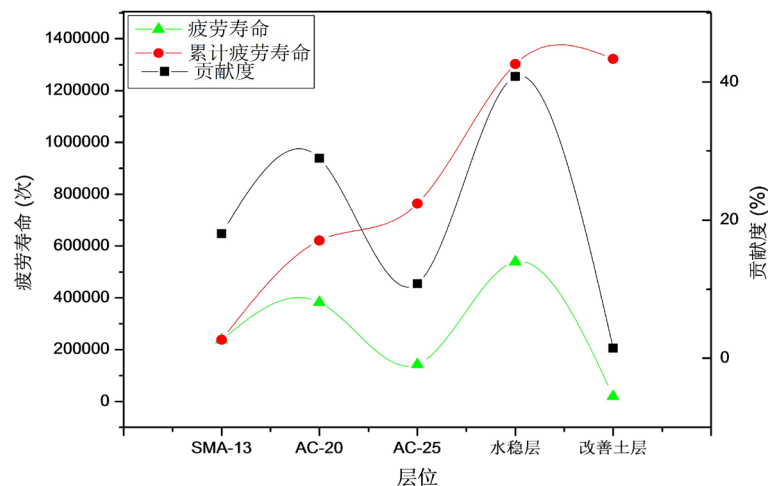


Figure 2. Fatigue life calculation results of structure I
图 2. 结构一疲劳寿命计算结果

FESAFE 模型的疲劳寿命结果见图 2、图 3 和图 4。

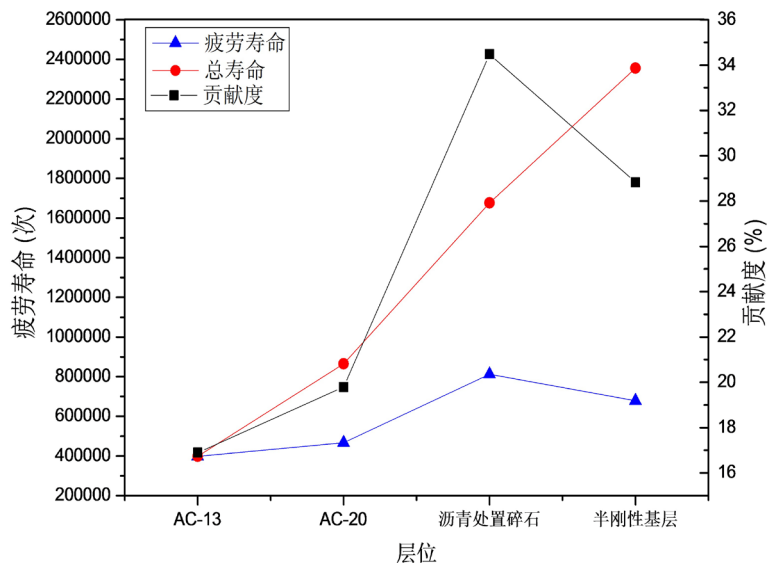


Figure 3. Fatigue life calculation results of structure II
图 3. 结构二疲劳寿命计算结果

图 2、图 3 和图 4 的数据表明，使用稳定材料(CTB、LAA 或 LAS)的半刚性基层对典型路面结构的疲劳寿命贡献最大(42.23%)，其次是结构 3 (30.2%)和结构 2 (28.83%)。路面沥青层由于具有防止反射裂缝发展的能力，可以在路面结构中承担更多的疲劳寿命，从而延长疲劳寿命。考虑到表层沥青层对结构疲劳寿命的贡献最小(57.77%)，而结构 3 (69.8%)和结构 2 (71.77%)对结构的疲劳寿命贡献最小，可以推断沥青层的抗裂性能在结构 1 中最不发达。

图 3 表明，GM 层的存在改变了各层对结构疲劳寿命的贡献分布，尽管 GM 层本身对疲劳寿命没有任何贡献。同时，ATB 在结构的疲劳寿命中占 34.48%。这是因为 ATB 层与其下方的 GM 层相结合，有利于抵抗路面结构的反射裂缝。此外，数据还表明，反射裂纹的传播速度随反射裂纹从基层向表层的增长而减慢。这是因为各层材料应力的降低和抗疲劳性能的提高。

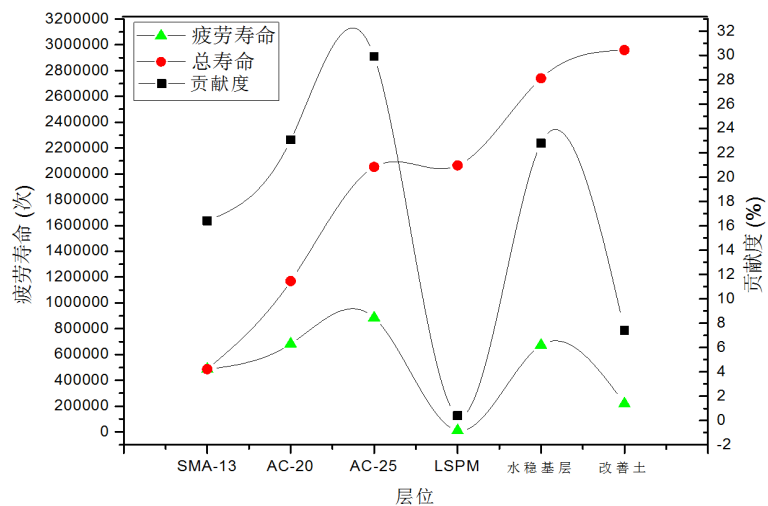


Figure 4. Fatigue life calculation results of structure III
图 4. 结构三疲劳寿命计算结果

由图4可以看出, 尽管LSPM层只占结构3疲劳寿命的0.4%, 但与结构2(36.69%)相比, 表面沥青层(SMA13、AC20和AC25)的疲劳寿命增加(69.39%)。在结构3中, 当反射裂纹穿过LSPM层时, 结构3顶部的压缩应力和底部的拉应力减小。

图2、图3和图4的表明, 结构1的厚度最大(74 cm), 疲劳寿命最短(1322034), 而结构3的厚度最小(68 cm), 疲劳寿命最长(2958627)。结果表明, 复合结构(结构2)和LSPM(结构3)比传统的稳定材料半刚性基层(结构1)具有更好的抗反射开裂性能。如果能谨慎地确定这些层的厚度, 则聚集基或LSPM等不同层的组合在延长疲劳寿命方面可能会有更好的效果。

3.2. 结构层厚度对三种路面结构疲劳寿命的影响分析

面层厚度和基层厚度对结构一疲劳寿命的影响分别如图5和图6所示。

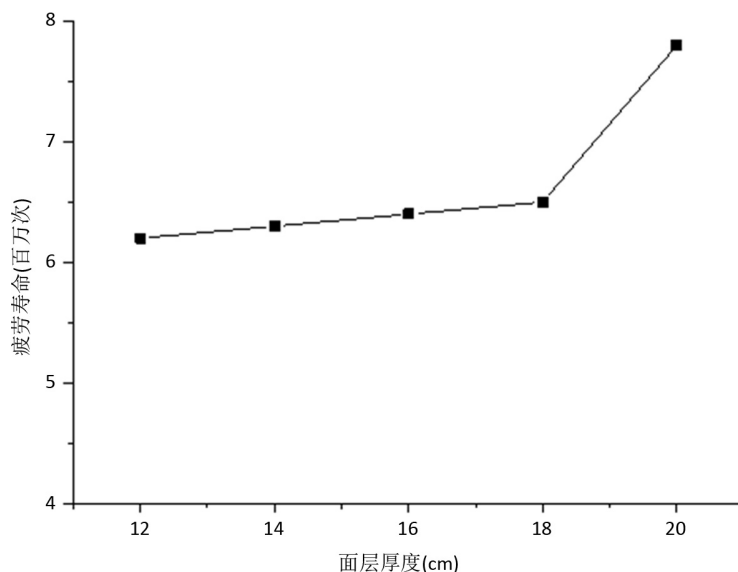


Figure 5. Relationship between surface thickness and fatigue life

图5. 面层厚度与疲劳寿命的关系

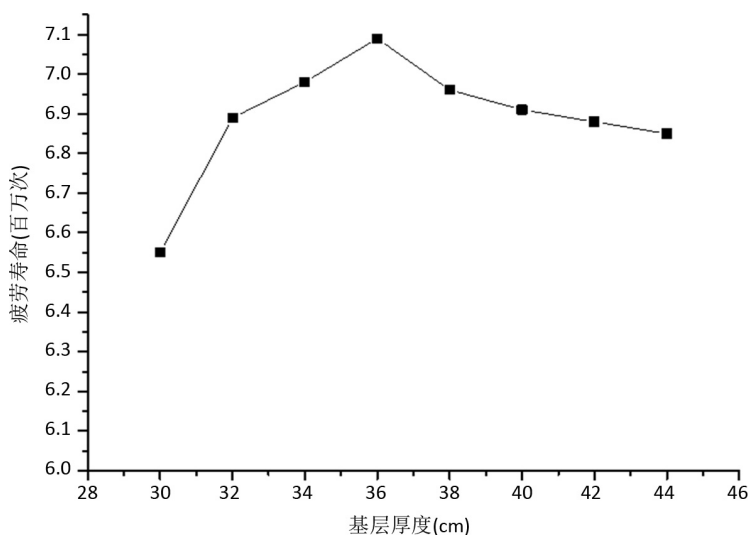


Figure 6. Relationship between base course and fatigue life

图6. 基层与疲劳寿命关系

图 5~6 表明, 结构 1 的疲劳寿命随半刚性基层厚度的增加而增加。当厚度达到 36~38 cm 时, 随着厚度的增加, 疲劳寿命略有下降。这意味着增加半刚性基层厚度并不能保证结构疲劳寿命的提高。同时, 随着沥青表层厚度的增加, 疲劳寿命逐渐提高。通过增加沥青表面层厚度, 延长了产生反射裂缝的途径。表面层具有良好的抗裂性能。

ATB 和 GM 层厚度对结构 2 疲劳寿命的影响分别见图 7~8。

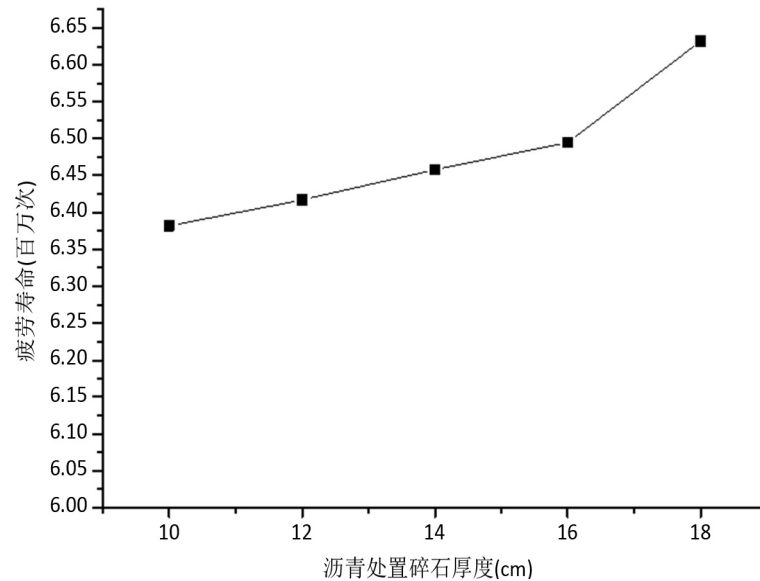


Figure 7. Relationship between ATB thickness and fatigue life

图 7. ATB 厚度与疲劳寿命的关系

图 8 清楚地表明, 当使用更厚的 ATB 层时, 疲劳寿命增加。研究还表明, 当 GM 层厚度小于 15 cm 时, 结构 2 的疲劳寿命显著增加。当厚度达到 15~18 cm 时, 疲劳寿命增加缓慢。GM 层是结构中的关键部分。虽然它对疲劳没有贡献, 但它对从下到上快速发展的反射裂缝有间接影响。它能有效地传播来自路面结构表面的交通荷载引起的应力。然而, 尽管增加 GM 层厚度可以提高结构的疲劳寿命, 但由于 GM 层模数相对较小, 也会导致 ATB 层的疲劳应变较大。这就是当 GM 厚度为 15~18 cm 时, 结构 2 的疲劳寿命停止增长的原因。因此, 建议 GM 层的适宜厚度为 15~18 cm。

图 9 显示了 LSPM 层厚度对结构疲劳寿命的影响。

在图 9 中示出了当使用较厚的 LSPM 层时结构 3 的疲劳寿命增加。这与结构 2 中的 GM 的趋势相似。然而, 当 LSPM 的厚度达到 15 cm 时, 结构 3 的疲劳寿命的增加会减慢。LSPM 层是结构 3 中的“应力吸收层”。其相对较低的模量导致与 LSPM 层接触的其他层中的疲劳寿命的升高。尽管 LSPM 层本身在结构 3 的疲劳寿命中的贡献很小(0.4%), 但与结构 1 (分别为 57.75% 和 1.46%) 相比, 结构 3 中表面沥青层(69.39%)和底基层(LAS) (7.41%) 的疲劳寿命的比例显著增加。这种现象可以解释如下: 从整个路面结构的预期来看, 与在表面沥青层和半刚性基层中使用的材料相比, LSPM 层具有较小的模量。从顶部到底部的压缩应力和从底部到顶部的拉伸应力可在穿过 LSPM 层时被传播, 就像 GM 层所做的一样。从应力集中的角度看, 当反射裂缝通过 LSPM 层显影时, 裂纹边缘处的应力集中的不一致会导致反射裂缝传播的更多时间和路径。这可以间接延长结构 3 的疲劳寿命。

在确定合适的 LSPM 厚度范围时仍未确定。虽然 LSPM 层厚度的增加有利于抗反射裂缝的产生, 但也可能导致路面结构抗车辙性能的退化。从图 7 中可以看出, LSPM 在结构中的厚度不应大于 15 cm。

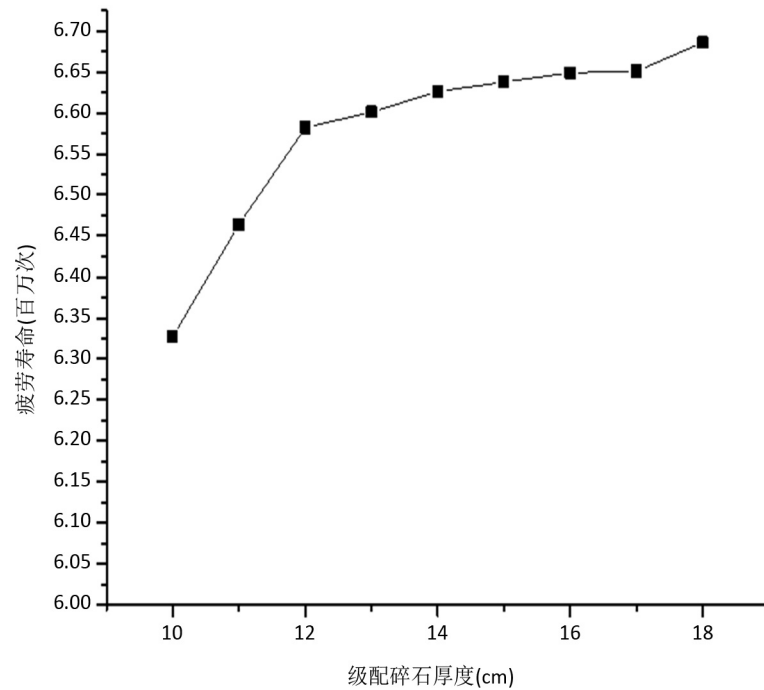


Figure 8. Relationship between graded crushed stone and fatigue life

图 8. 级配碎石与疲劳寿命关系

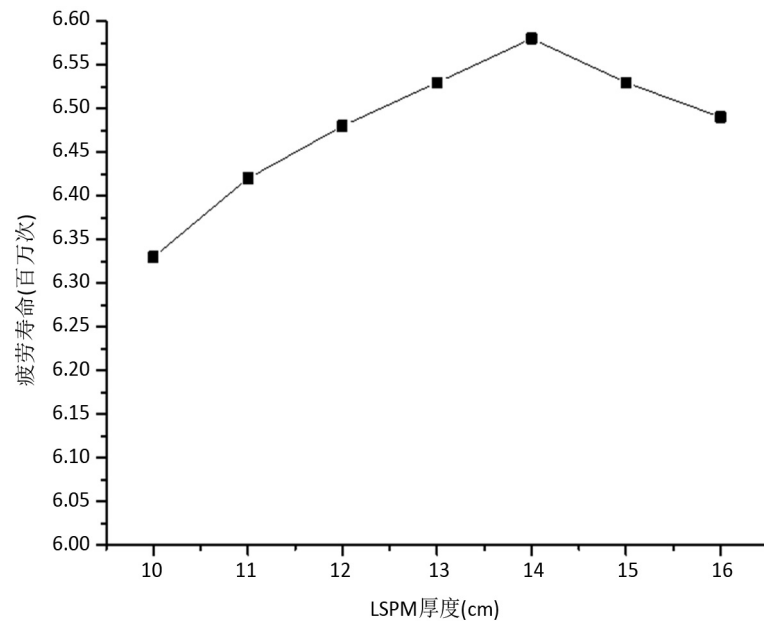


Figure 9. Relationship between LSPM thickness and fatigue life

图 9. LSPM 厚度与疲劳寿命关系

4. 结论

1) 建立了三种典型路面结构的 ABAQUS 有限元模型和有限元安全疲劳模型。通过计算三种路面结构的疲劳响应和层厚与疲劳寿命的关系, 比较了三种路面结构的疲劳寿命。

2) 三种典型路面结构的疲劳寿命比较表明, 集料基层和 LSPM 基层在抗反射裂缝方面比普通半刚性

基层更有利。同时,在路面结构中设置合适的层位比单纯增加层厚更能有效地提高路面的抗裂性能。

3) GM层和材料层对结构2疲劳寿命的影响表明,GM层的合适厚度范围为15~18 cm。LSPM层对结构3疲劳寿命的影响表明,增加LSPM的厚度对于抗反射裂缝具有有效的作用,LSPM层厚度不大于15 cm。

基金项目

本文受到国家重点研发计划(2018YFB1600100)、山东省自然科学基金 ZR2020QE271 山东省重点研发计划(2019GSF109020, 019GGX101042)资助。

参考文献

- [1] Kim, Y.R., Baek, C., Underwood, B.S., Subramanian, V., Guddati, M.N. and Lee, K. (2008) Application of Viscoelastic Continuum Damage Model Based Finite Element Analysis to Predict the Fatigue Performance of Asphalt Pavements. *KSCE Journal of Civil Engineering*, **12**, 109-120. <https://doi.org/10.1007/s12205-008-0109-x>
- [2] Baek, J. and Al-Qadi, I.L. (2008) Finite Element Modeling of Reflective Cracking under Moving Vehicular Loading: Investigation of the Mechanism of Reflective Cracking in Hot-Mix Asphalt Overlays Reinforced with Interlayer Systems. *Airfield and Highway Pavements 2008*, Washington, 15-18 October 2008. [https://doi.org/10.1061/41005\(329\)7](https://doi.org/10.1061/41005(329)7)
- [3] Huang, X.M. and Wang, S.J. (2013) Analysis Theory and Practice of Modern Asphalt Pavement Structure. Science Press, Beijing
- [4] 陈忠达, 武建民, 张小荣, 徐强. 干线公路沥青路面典型结构的研究[J]. 公路交通科技, 2001, 18(2): 9-12.
- [5] 蒋育红, 黄晓明, 廖公云. 级配碎石夹层路面结构的断裂力学分析[J]. 合肥工业大学学报, 2009, 32(4): 511-514.
- [6] 王艳, 倪富健, 李再新. 水泥稳定碎石基层温缩性能试验及预估控制[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2008, 38(2): 260-264.
- [7] 王龙, 冯德成. 提高级配碎石基层使用性能的方法[J]. 中国公路学报, 2006, 19(4): 40-45.
- [8] Loria, L., Hajj, E.Y. and Sebaaly, P.E. (2011) Assessment of Reflective Cracking Models for Asphalt Pavements. Road Pavement and Material Characterization, Modeling, and Maintenance. *GeoHunan International Conference 2011*, Hunan, 9-11 June 2011, 72-79. [https://doi.org/10.1061/47624\(403\)10](https://doi.org/10.1061/47624(403)10)
- [9] Moes, N., Dolbow, J. and Belytschko, T. (1996) A Finite Element Method for Crack Growth without Remeshing. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, **46**, 131-150. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0207\(19990910\)46:1<131::AID-NME726>3.0.CO;2-J](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0207(19990910)46:1<131::AID-NME726>3.0.CO;2-J)
- [10] 张永德. 广西地区全厚式沥青路面材料与力学性能研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2008.
- [11] 姚祖康. 沥青路面结构设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [12] Li, P., Zheng, M.L., Wang, F., et al. (2017) Laboratory Performance Evaluation of High Modulus Asphalt Concrete Modified with Different Additives. *Advances in Materials Science and Engineering*, **2017**, 1-14. <https://doi.org/10.1155/2017/7236153>