

Life Cycle Cost Analysis Based on Performance Prediction of Asphalt Pavement

Xiaoyan Wang¹, Na Wang²

¹Shandong Transportation Research Institute, Key Laboratory of Highway Maintain Technology Ministry of Communication (Jinan), Jinan Shandong

²Shandong Hi-Speed Company Limited, Jinan Shandong

Email: sonorra@163.com

Received: Feb. 6th, 2020; accepted: Feb. 20th, 2020; published: Feb. 27th, 2020

Abstract

In this paper, five kinds of asphalt pavement structures are economically evaluated through the full life cycle cost analysis method. Through analysis, it is found that from the initial construction cost, the flexible pavement structure and the combined base asphalt pavement structure are higher than the semi-rigid base asphalt pavement structure commonly used in China. The initial construction cost of the flexible pavement structure is the common semi-rigid base asphalt pavement structure in China. The ratio of the combined base asphalt pavement structure is about 1.5 times. From the perspective of the entire management department, the cost of the semi-rigid base pavement structure management department is higher than that of the flexible pavement structure and the combined asphalt pavement structure. The cost of the semi-rigid base pavement structure management department is about 20% - 40% higher than that of the flexible pavement structure and the combined base asphalt pavement structure. The research results show that the cost and total cost of the combined base asphalt pavement structure management department are optimal based on the pavement performance and the whole life cycle.

Keywords

Life Cycle Cost Analysis, Flexible Pavement Structure, Combined Base Asphalt Pavement Structure, Semi-Rigid Base Asphalt Pavement Structure

基于沥青路面使用性能预估的全寿命周期内费用分析

王晓燕¹, 王娜²

¹山东省交通科学研究院, 高速养护技术行业重点实验室, 山东 济南

²山东高速股份有限公司, 山东 济南

Email: sonorra@163.com

收稿日期: 2020年2月6日; 录用日期: 2020年2月20日; 发布日期: 2020年2月27日

摘要

本文通过全寿命周期费用分析法, 对五种沥青路面结构进行经济评价。通过分析发现: 从初始修建费来看, 柔性路面结构和组合式基层沥青路面结构高于国内常用的半刚性基层沥青路面结构, 柔性路面结构初始修建费是国内常见半刚性基层沥青路面结构的2倍左右, 组合式基层沥青路面结构是其1.5倍左右; 从整个管理部门费用来看, 半刚性基层路面结构管理部门费用高于柔性路面结构和组合式沥青路面结构, 比柔性路面结构和组合式基层沥青路面结构高约20%~40%。研究表明, 基于路面使用性能和全寿命周期内, 组合式基层沥青路面结构管理部门费用和总费用均最优。

关键词

全寿命周期费用分析, 柔性路面结构, 组合式沥青路面结构, 半刚性沥青路面结构

Copyright © 2020 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

公路工程作为国家基础设施投资项目, 最显著的特点是周期长, 造价高, 从公路工程管理者角度来看, 在公路建设完成和投入运营后, 还要经历很多次的维修、罩面或改建, 其公路工程的造价的费用是相对比较高的。从社会效益来看, 公路工程建设以及维修时, 会带来一系列的用户费用(车辆运行费用、延误费、行程时间费和交通事故费等) [1], 因此在选定路面结构方案时, 应充分考虑全寿命阶段公路工程的总费用, 而不是仅仅看公路工程建设初期费用的高低, 最终确定公路工程费用最优的结构方案。本文以寿命周期费用分析为基础, 以沥青路面使用性能预估寿命, 计算分析和比较不同类型路面结构寿命周期内各项费用。

2. 沥青路面结构方案

本文选用五种沥青路面结构形式, 其中包括三种柔性路面结构、组合式基层沥青路面结构和典型的半刚性基层沥青路面结构。其结构形式见图1所示。

3. 路面使用性能预估

养护和改建策略的时机或预期寿命, 与使用性能控制标准的选择有很大关系。在路面的使用过程中, 在交通荷载和气候条件的联合作用下, 公路工程的使用性能将逐渐衰退, 最终达不到满足使用要求的状态, 从而影响汽车的行驶速度, 安全等方面, 增加道路运输的费用, 然而, 如果公路工程路面使用性能好, 使用期长, 维修次数少, 那么在全寿命周期内, 养护费用和用户费就相对比较少, 从而导致总费用比较少[2]。

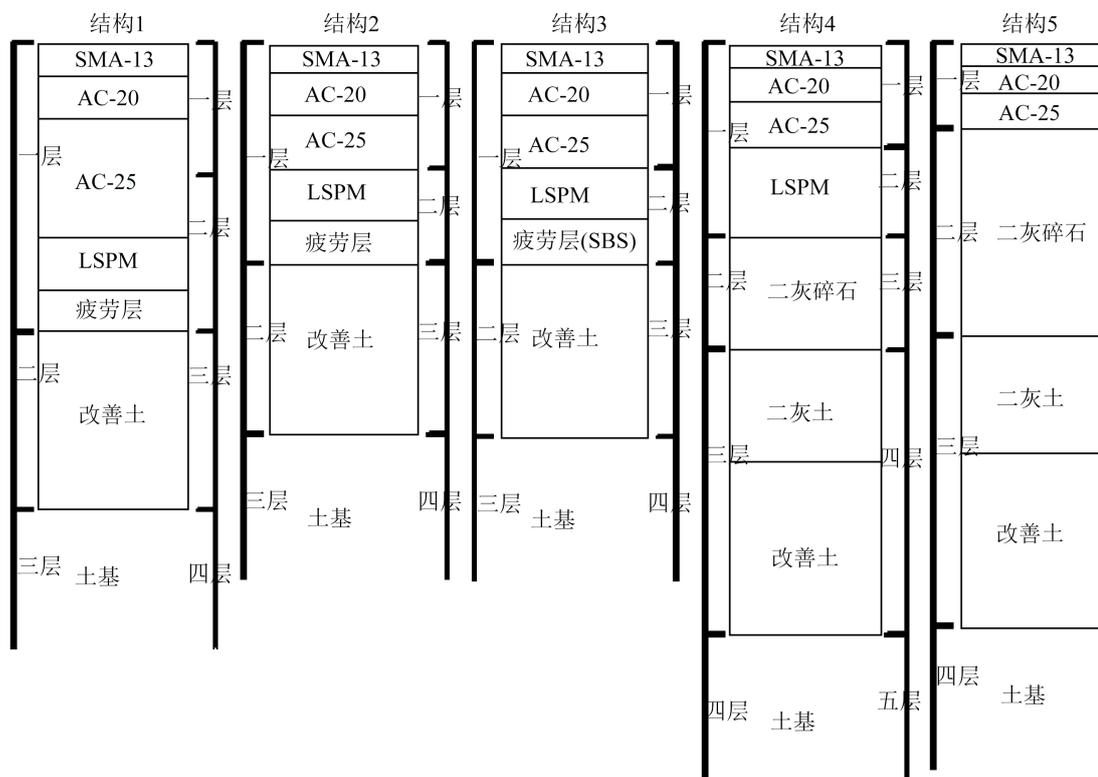


Figure 1. Structural form of asphalt pavement

图 1. 沥青路面结构形式图

路面的养护维修分为功能性维修和结构性维修两方面，功能性养护维修主要与 AC 磨耗层有关。国外通过对不同厚度沥青路面损坏状况调查发现，80%以上的损坏类型为裂缝类损坏和车辙，并且当沥青层厚度大于 16 cm 和 18 cm 时，裂缝损坏同表面层抗裂性能有关，一般路表会先发生开裂，裂缝深度不超过 10 cm，此时并不表示道路的整体结构不足，进一步罩面设计能保证路面结构性能良好，因此，沥青路面的养护模式主要与表面层沥青混合料的性能衰减相关[3] [4]。

从欧洲各国及美国各州的规范中可以看出，新建磨耗层为可修复性的，磨耗层的设计使用寿命低于结构层的设计寿命，这一点在各国、州规范中都有体现，具体规定[5] [6]如表 1 所示。

Table 1. European and U.S. states' regulations on the service life and cover period of the wear layer

表 1. 欧洲及美国各州规范对磨耗层使用年限及罩面周期的规定

| | 英国 | 法国 | 华盛顿 | 加州 | 科罗拉多州 | 日本 |
|----------|-----|------------|-------|-----|-----------------------------------|-----|
| 磨耗层年限(年) | 10 | 9 | 15 | 12 | 10 | >15 |
| 罩面周期(年) | 10 | 9, 8, 5 | 10~15 | 12 | 10 | >15 |
| 备注 | 未铣刨 | 全厚式 未铣刨 | 未铣刨 | 未铣刨 | 罩面厚度为 50 mm, 第 20 年、 30 年可铣刨罩面 | — |

材料类型的选择对磨耗层的使用寿命影响很大，在欧洲，大部分国家采用耐久性好的 SMA 沥青混合料，使用寿命可达到 15~20 年，而一般非 SMA 沥青混合料寿命只有 8~14 年，在不考虑结构设计、材料设计及养护措施对改善路面寿命影响的情况下，美国各州对磨耗层的使用寿命做统计调查[7]，结果见表 2:

Table 2. Survey of actual service life of asphalt abrasion layers in various U.S. states
表 2. 美国各州沥青磨耗层实际使用寿命调查情况

| | LTPP | 华盛顿 | 明尼苏达州 | 堪萨斯州 | 安大略州 | 俄亥俄州 | 佛罗里达州 | 威斯康星州 |
|----------|------|-------------------------|-------|------|------|------|-------|-------|
| 新建磨耗层 | | 12.5 | 15.5 | 10* | 19** | 17 | 14** | 18** |
| 第一次加铺磨耗层 | 15 | 11.5 | 15 | 17 | 12** | 13 | 14** | — |
| 备注 | | *计划分期施工; **路面类型选择用的性能时间 | | | | | | |

基于路面使用性能预估及欧美各国对磨耗层使用年限和罩面周期情况的调查[5] [6] [7], 进行经济效益分析时, 采用如表 3 拟定的本文研究的五种沥青路面养护(维修)周期计算。为恢复路面的功能性使用要求, 参考沥青路面常见的养护措施, 采用先对局部破损进行小修, 再加铺超薄磨耗层的养护维修方案。

Table 3. Five types of asphalt pavement structure maintenance (maintenance) cycles
表 3. 五种沥青路面结构养护(维修)周期

| 罩面 | 结构 | S1 (年) | S2 (年) | S3 (年) | S4 (年) | S5 (年) |
|----------|----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 结构大修 | — | — | — | — | — | 7 |
| 第一次加铺磨耗层 | — | 15 | 14 | 12 | 15 | — |
| 第二次加铺磨耗层 | — | 12 | 12 | 10 | 12 | — |
| 第三次加铺磨耗层 | — | 10 | 10 | 10 | 10 | — |

4. 全寿命周期内费用计算及分析

路面从设计开始到分析期末, 可能包含的费用有设计费、初期修建费、养护费、改建费、残值等管理部门费用和车辆运营费、延误费、行程时间费、事故费等用户费用[1]。考虑到路面设计系统所关注的是由于路面使用性能的差异所带来的费用和效益上的差别[8], 所以费用分析时应着重考虑受使用性能影响的那些费用组成。本研究考虑的费用组成见图 2 (带*号的为与使用性能指标直接相关的费用)。修建费和改建费按照现行部颁定额和当地材料价格估算[9], 其他几项费用需按有关模型计算。

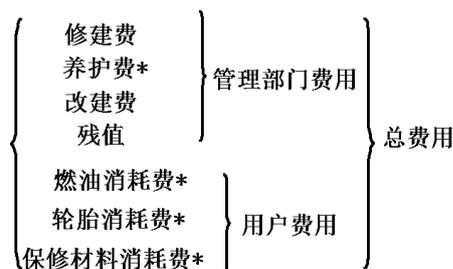


Figure 2. Cost composition of asphalt pavement
图 2. 沥青路面费用组成

沥青路面费用组成统一采用费用现值法(PVC) [10] [11]对沥青路面进行寿命周期费用分析, 即把分析期内发生在不同时间的费用和效益按某一预定的贴现率转换为现在的费用和效益, 以便于在共同的基础上进行比较。并假定路面在不发生结构破坏的情况下, 分析期内的各性能周期及性能变化相同, 日常养护费不计。

4.1. 管理部门费用

4.1.1. 修建费

考虑到在相同分析期限内, 文化、环境及经济因素对各结构方案的影响权重相近, 因此材料单价统一取现行部颁定额单价和当地材料价格(即不考虑经济波动对材料及施工成本的影响)。本文研究的五种典型的沥青路面结构初期修建费见表 4 所示。

Table 4. Initial construction costs
表 4. 初期修建费用

| 路面结构 | 结构层 | 厚度(cm) | 每层单价 | 总造价(元/m ²) |
|------|------------|--------|---------|------------------------|
| 结构 1 | SMA-13 | 5 | 41.569 | 395.95 |
| | SUP-19 | 7.5 | 68.346 | |
| | SUP-25 | 21 | 155.096 | |
| | LSM-25 | 9 | 60.486 | |
| | Fatigue-13 | 7.5 | 70.450 | |
| 结构 2 | SMA-13 | 5 | 41.569 | 307.35 |
| | SUP-19 | 7.5 | 68.346 | |
| | SUP-25 | 9 | 66.502 | |
| | LSM-25 | 9 | 60.483 | |
| | Fatigue-13 | 7.5 | 70.45 | |
| 结构 3 | SMA-13 | 5 | 41.569 | 324.69 |
| | SUP-19 | 7.5 | 68.346 | |
| | SUP-25 | 9 | 66.502 | |
| | LSM-25 | 9 | 60.486 | |
| | Fatigue-13 | 7.5 | 87.790 | |
| 结构 4 | SMA-13 | 4 | 33.26 | 289.84 |
| | SUP-19 | 6 | 54.68 | |
| | SUP-25 | 8 | 59.004 | |
| | LSM-25 | 15 | 100.862 | |
| | 二灰碎石 | 20 | 27.09 | |
| 结构 5 | 二灰土 | 20 | 14.946 | 185.18 |
| | SMA-13 | 4 | 33.26 | |
| | AC-20 | 5 | 45.57 | |
| | AC-25 | 6 | 44.33 | |
| | 二灰碎石 | 36 | 48.76 | |
| | 二灰土 | 20 | 14.946 | |

4.1.2. 养护费与残值

根据沥青路面使用性能预估分析, 按照表 3 拟定的养护周期, 对局部破损进行维修后, 采取加铺 2 cm 磨耗层维修方案, 在分析期内, 各路面结构的养护费和残值如表 5 所示。

Table 5. Maintenance costs and residual values (ten thousand yuan/km)

表 5. 养护费与残值(万元/km)

| 结构类型 | 分析期为 30 年 | | 分析期为 40 年 | |
|------|-----------|-------|-----------|-------|
| | 初始修建费 | 养护费残值 | 初始修建费 | 养护费残值 |
| S1 | 18.30 | 3.825 | 21.69 | 3.256 |
| S2 | 19.40 | 3.400 | 23.00 | 1.709 |
| S3 | 22.692 | 1.02 | 27.232 | 0.57 |
| S4 | 18.302 | 3.825 | 21.694 | 1.994 |
| S5 | 797.238* | 58.62 | 846.83* | 6.546 |

注: *为路面铣刨后重建费。

4.1.3. 管理部门的总费用

包括初始修建费、养护费、改建费和残值,不同的分析期(30年和40年)管理部门费用计算五种沥青路面结构的管理部门的总费用如表6和图3、图4所示:

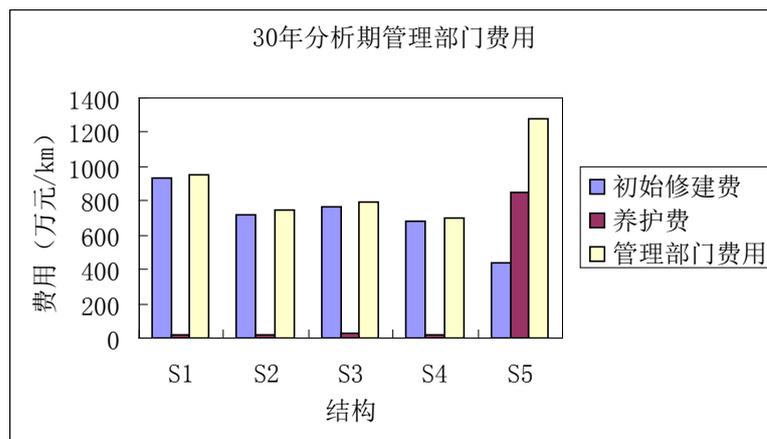


Figure 3. Management department expenses in the 30-year analysis period

图 3. 30年分析期管理部门费用

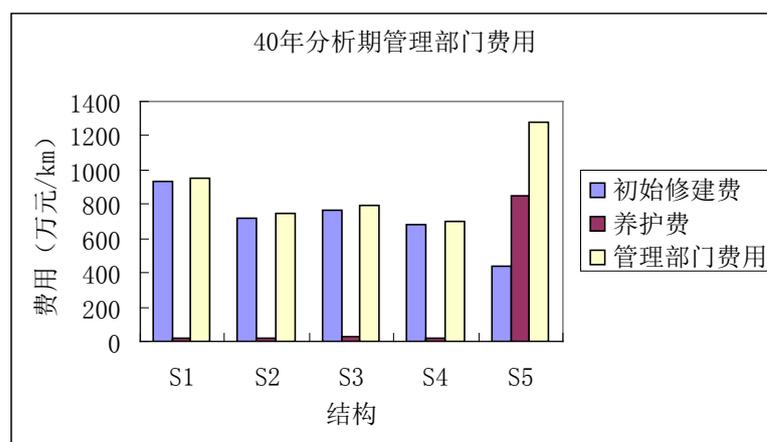


Figure 4. Management department expenses in the 40-year analysis period

图 4. 40年分析期管理部门费用

Table 6. Management department expenses (ten thousand yuan/km)

表 6. 管理部门费用(万元/km)

| | 分析期为 30 年 | | 分析期为 40 年 | |
|----|-----------|---------|-----------|---------|
| | 初始修建费总投资 | | 初始修建费总投资 | |
| S1 | 930.474 | 944.951 | 930.474 | 948.912 |
| S2 | 722.203 | 738.203 | 722.203 | 743.49 |
| S3 | 762.953 | 784.625 | 762.953 | 789.615 |
| S4 | 681.177 | 695.654 | 681.177 | 700.877 |
| S5 | 439.129 | 1177.75 | 439.129 | 1279.41 |

4.2. 用户费用

用户费是指用户在使用道路时所支出的费用, 包括车辆运营费、延误费、行程时间费和事故费等, 是寿命周期费用中最大的一个组成部分。有关文献表明[10], 当交通量较大时, 它在总费用中所占的比例可高达 90%以上; 养护或重建过程中, 由于建设活动造成的道路堵塞和低速引起的延误费、增加的行程时间费, 以及由道路使用者和在工作区的道路建设人员引发的较高的交通事故率而引起事故费等费用, 是其初期建设费用的 2~5 倍。此次仅考虑车辆运营费, 即燃油消耗费、轮胎消耗费和保修材料消耗费, 不考虑延误费、行程时间费和事故费等用户费用。

通过计算, 得出五种沥青路面结构在分析期 30 年和 40 年的用户费用见表 7 所示。

Table 7. User fees (ten thousand yuan/km)

表 7. 用户费用(万元/km)

| | 分析期为 30 年 | | | | 分析期为 40 年 | | | |
|----|-------------|-------|-------|--------|-------------|-------|--------|--------|
| | 油耗费轮耗费材料费合计 | | | | 油耗费轮耗费材料费合计 | | | |
| S1 | 1547 | 131.2 | 968.8 | 2647 | 1877 | 159.2 | 1175.1 | 3211.3 |
| S2 | 1547.5 | 131.2 | 969.1 | 2647.8 | 1877.5 | 159.2 | 1175.6 | 3212.3 |
| S3 | 1547.8 | 131.3 | 969.5 | 2648.6 | 1878.1 | 159.3 | 1176.3 | 3213.7 |
| S4 | 1547.4 | 131.2 | 969.0 | 2647.6 | 1877.2 | 159.2 | 1175.3 | 3211.7 |
| S5 | 1556.8 | 132.3 | 979.7 | 2668.8 | 1889.7 | 160.5 | 1189.5 | 3239.7 |

4.3. 全寿命周期内总费用

在全寿命周期内, 五种沥青路面结构的总费用见表 8 所示, 以及分析期为 30 年和 40 年各结构类型的初始修建费、养护费、管理部门费用、用户费以及总费用的变化趋势见图 5 和图 6 所示。

Table 8. Summary of total costs (ten thousand yuan/km)

表 8. 总费用汇总表(万元/km)

| 结构类型 | 分析期为 30 年 | | 分析期为 40 年 | |
|------|-----------|---------|-----------|---------|
| | 不考虑用户费 | 考虑用户费 | 不考虑用户费 | 考虑用户费 |
| S1 | 944.951 | 3591.95 | 948.912 | 4160.21 |
| S2 | 738.203 | 3386.0 | 743.49 | 3955.79 |
| S3 | 784.625 | 3433.23 | 789.615 | 4003.32 |
| S4 | 695.654 | 3343.25 | 700.877 | 3912.58 |
| S5 | 1177.75 | 3846.55 | 1279.41 | 4519.11 |

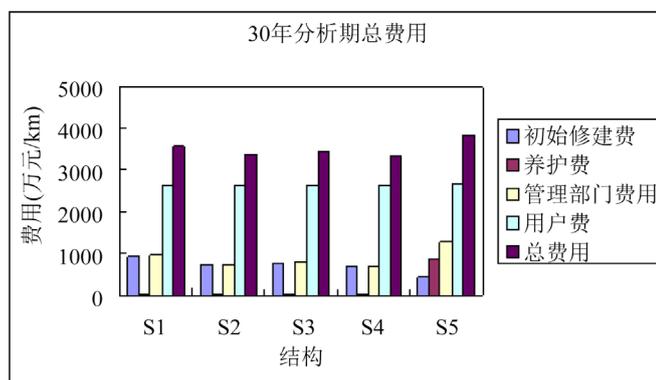


Figure 5. Total cost during the 30-year analysis period

图 5. 30 年分析期总费用

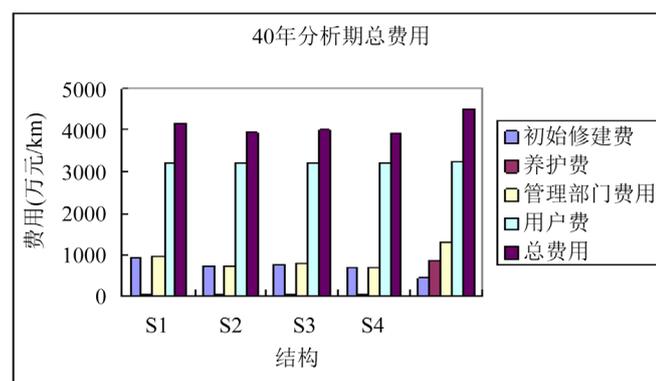


Figure 6. Total cost during the 40-year analysis period

图 6. 40 年分析期总费用

从表 8 和图 5 可以看出, 在 30 年使用寿命分析期内, 与国内常见半刚性基层沥青路面结构(S5)相比, 从总费用(管理部门费用和用户费用)角度比较, 柔性路面结构(S1、S2、S3)分别节省资金 254.6 万元/km、413.32 万元/km、460.55 万元/km, 约节省 6.6%~12%的费用, 组合式基层沥青路面结构(S4)节省资金 503.3 万元/km, 约节省 13%的费用。

从表 8 和图 6 可以得出, 在 40 年使用寿命周期内, 柔性路面结构(S1、S2、S3)分别节省资金 358.9 万元/km、563.32 万元/km、515.80 万元/km, 约节省 8.0%~12.5%的费用, 组合式基层沥青路面结构(S4)节省资金 606.53 万元/km, 约节省 13.4%的费用。

5. 结论

通过以上对五种沥青路面结构在全寿命周期内费用的计算和分析, 得出以下结论:

1) 分析期对寿命周期费用具有一定的影响, 分析期延长时, 随着轴载作用次数的增大, 管理部门费用和用户费用都随之增大, 半刚性基层沥青路面结构(结构 S5)表现尤为明显; 分析期对用户费用影响较管理部门费用部分大, 这跟交通量的增长有很大关系;

2) 柔性路面结构(S1~S3)和组合式基层沥青路面结构(S4)的经济性要好于半刚性基层沥青路面结构, 从工程经济的角度讲, 结构 S4 > 结构 S2 > 结构 S3 > 结构 S1 > 结构 S5;

3) 从初始修建费来看, 柔性路面结构和组合式基层沥青路面结构高于国内常用的半刚性基层沥青路面结构, 柔性路面结构初始修建费是国内常见半刚性基层沥青路面结构的 2 倍左右, 组合式基层沥青路

面结构是其 1.5 倍左右; 从整个管理部门费用(初期修建费、养护费、改建费和残值之和)来看, 半刚性基层路面结构管理部门费用高于柔性路面结构和组合式沥青路面结构, 比柔性路面结构和组合式基层沥青路面结构高约 20%~40%, 在使用寿命期内组合式基层沥青路面结构管理部门费用和总费用均最优。

4) 从养护费来看: 半刚性基层沥青路面结构 S5 养护费远远高于柔性路面结构和组合式基层路面结构养护费, 30 年分析周期的养护费是其初始修建费的 1.8 倍, 40 年分析周期的养护费是其初始修建费的 1.9 倍之多。柔性路面结构和组合式基层沥青路面结构养护费基本相同, 占其初始修建费的 2%~3%。

基金项目

交通运输部济青科技示范项目, 项目编号: 2018BZ3。

参考文献

- [1] 姚祖康. 路面管理系统[M]. 北京: 人民交通出版社, 1993.
- [2] 刘黎萍, 孙立军. 沥青路面结构设计中的寿命周期费用分析[J]. 山东交通学院学报, 2002(2): 53-58.
- [3] 孙立军, 刘喜平. 路面使用性能的标准衰变方程[J]. 同济大学学报, 2003(5): 512-518.
- [4] 许志军. 沥青路面结构性能模拟[D]: [硕士学位论文]. 上海: 同济大学道路与交通工程系, 1994.
- [5] Peterson, D.E. (1985) Life-Cycle Cost Analysis of Pavements. NCHRP Synthesis of Highway Practice, 122, Washington DC, TRB.
- [6] Harrison, R., Waalkes, S. and Wilde, W.J. (1999) A Life Cycle Cost Analysis of Rigid Pavements. Project 0-1739 Summary Report.
- [7] FHWA (1998) Life-Cycle Cost Analysis in Pavement Design. In Search of Better Investment Decisions, Pavement Division Interim Technical Bulletin, Publication No. FHWA-SA-98-079, FHWA, Washington DC.
- [8] 姚祖康, 等. 沥青路面使用性能评价[J]. 土木工程学报, 1989, 22(3): 13-22.
- [9] 仁杰. 道路工程造价手册[J]. 中国科学技术出版社, 2003(8): 248-251.
- [10] 周伟, 王选仓, 焦方群. 道路经济与管理[J]. 人民交通出版社, 1998(1): 16-19, 74-91.
- [11] 王志军, 李福普, 严二虎, 李健. 浦南高速公路柔性基层沥青路面全寿命经济效益分析[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2011(12): 210-213.