

文章编号:1671-8879(2013)04-0007-05

# 长大纵坡路段沥青路面动力响应试验

董忠红,吕彭民,刘 学

(长安大学 道路施工与装备教育部重点实验室,陕西 西安 710064)

**摘 要:**为深入研究实际交通荷载下长大纵坡路段路面结构的动态力学行为,开发了三维动应变传感器。选择青岛—兰州高速公路陕西段工程段作为试验路,施工中在 5 个断面的沥青面层底部布置了开发的传感器,采用典型重型运输车辆作为加载装置,检测不同坡道位置沥青路面的动力响应,分析了坡道位置和轴重对路面动力响应的影响。研究表明:随着坡长的增加和轴重的增大,面层底部的垂向、横向和纵向动应变增加;面层底部垂向压应变受坡长和轴重的影响严重,而面层底部纵向和横向应变主要受坡长影响;目前国际上提出的长寿命路面设计控制指标,不适合于半刚性基层路面结构。

**关键词:**道路工程;长大纵坡;动力响应;三维传感器

**中图分类号:**U416.217 **文献标志码:**A

## Test on dynamic response of asphalt pavement at large longitudinal slope section

DONG Zhong-hong, LU Peng-min, LIU Xue

(Key Laboratory for Highway Construction Technology and Equipment of the Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** To study the dynamic mechanical behavior of asphalt pavement at sections of large longitudinal slope under actual traffic load, a three-dimensional dynamic strain sensor was developed. The sensors were buried at the bottom of the asphalt layer of 5 selected sections during of Qingdao—Lanzhou expressway during the construction. Using typical heavy transport vehicles as loading devices, the asphalt pavement dynamic responses of different slope locations were detected. The influences of slope location and axle load on the dynamic response were analyzed. The results show that the vertical strain, the lateral strain and the longitudinal strain at the bottom of the asphalt layer are all increased with the increase of slope length and axle load. The vehicle strain is greatly affected by the slope length and axle load, and the lateral strain and the longitudinal strain are more affected by the slope length. The international long-life pavement design control targets are not suitable for semi-rigid base pavement structure. 8 figs, 10 refs.

**Key words:** road engineering; large longitudinal slope; dynamic response; three-dimensional sensor

收稿日期:2012-07-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51008030);中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD2010JC063, CHD2011ZD001, CHD2011JC100)

作者简介:董忠红(1975-),男,河南开封人,副教授,工学博士,E-mail:dzhong@chd.edu.cn。

## 0 引言

采用置入式传感器研究实际车辆荷载下沥青路面动力响应已成为目前道路界研究的热点,是评价路面使用性能和改进现有路面设计体系的基础性研究。国外研究机构修筑了试验路和足尺试验场,在路面施工过程中埋入传感器,长期跟踪监测路面力学行为,比较著名的项目有 NCAT 环道、MnRoad、WesTrack、Virginia 试验路等<sup>[1-4]</sup>。中国也作了大量类似工作<sup>[5-8]</sup>。总体而言,目前采用的检测路面动力响应的传感器均为一维传感器,不同学者采用不同的布置方法,检测沿车辆行驶方向和垂直车辆行驶方向的平面内应变。而实际车辆荷载下,路面结构内部呈现复杂的三维应变状态。进行长寿命路面设计时,以沥青面层底部的弯拉应变和路基或基层表面垂向压应变作为设计控制指标,缺乏能够同时检测纵向、横向和垂向应变的多维传感器是现有试验研究方法的一个技术瓶颈。另外,现有相关工作主要在平整路段进行,未发现长大纵坡路段的相关研究报道。长大纵坡路段不仅承受垂向车辆荷载作用,还承受坡道方向作用,小半径弯道位置还承受侧向荷载作用,承受的荷载较平整路段复杂。而且,目前长大纵坡路段出现了严重的早期破坏现象。因此,研究实际车辆荷载下长大纵坡路段沥青路面的动态力学行为,显得尤为必要。为此,本文在分析长大纵坡路段力学特点和施工工艺基础上,开发多维动应变传感器,提出合理的检测方法。选择试验段,研究典型重型运输车辆荷载下长大纵坡路段的动力响应,分析该路段的动态力学特征。

## 1 传感器开发

综合考虑路面施工过程中、力学性能和路面结构几何尺寸,开发三维动应变传感器,能够同时检测路面结构内部的纵向、横向和垂向动应变。图 1 为所开发的传感器(该传感器已获得国家发明专利,专利号为 201010579231.4)。

通过实际工程应用,该传感器的主要特点有:①垂向结构尺寸较小,适合于检测沥青面层的中面层和下面层底部动应变;②灵敏度较高,抗干扰能力强,能够满足应变值大于  $10 \times 10^{-6}$  的动力响应检测要求;③弹性元件的弹性模量与沥青混合料的接近,

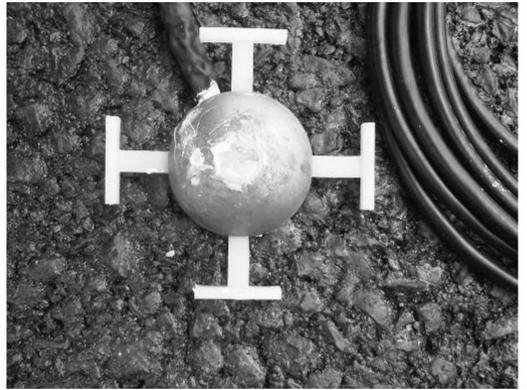


图 1 三维传感器

Fig. 1 Three-dimensional sensor

满足协调变形要求;④成活率高,在对导线适当保护条件下,成活率达到 80% 以上,能够承受施工过程中的挤压和剪切破坏作用。

## 2 动力响应试验方案

为了研究实际车辆荷载下长大纵坡路段沥青路面动态力学行为,笔者选择青(岛)兰(州)高速公路陕西段 K78+800~K79+580 工程段作为试验路,如图 2 所示。该试验段总体可分为 3 段,第 1 段坡度为 0.9%,可近似为平整路段;第 2 段坡度为 3.8%,坡长 800 m,为本文的主要研究对象;第 3 段坡度为 1.4%,为山区连续上坡路段的过渡段。选择图中所示 5 个位置作为检测断面,埋入所开发的传感器。

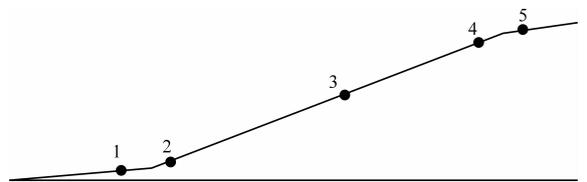


图 2 试验路段

Fig. 2 Test section

沥青路面为 4+6+12 结构,上面层为 4 cm 厚的 AC-13C,中面层为 6 cm 厚的 AC-20C,下面层为 12 cm 厚的 ATB-30,基层为 54 cm 厚的水泥稳定碎石。

为了提高传感器与周围沥青混合料之间的粘结性能,保障二者之间的变形协调性,在路面施工过程中埋入传感器。摊铺机到来之前,将传感器布置在相应位置上,不对传感器作特殊保护(需要对导线采取一定的保护措施)。限于篇幅,传感器布置方法不再详述,可参阅笔者做过的平整路段试验的相关

文献<sup>[9-10]</sup>。

试验中,选择常用的1+2型、1+2+5型和1+2+8型等3种常用的中型和重型运输车辆作为加载装置。为节约篇幅,这里以1+2+5型车辆荷载下的试验结果为例,研究长大纵坡路段沥青路面动力响应规律。该车型如图3所示,试验中采用了3辆该型车辆,分别控制双联轴轴重为130、180和230 kN,代表实际交通中该类轴型的典型荷载。车箱内均匀装载石子,采用地磅监控装载过程中的双联轴轴重,控制轴重误差小于100 kg。3辆试验车的牵引车前桥和后桥实际轴重分别为2 360、2 840、3 480和3 480、5 240、5 340 kg。

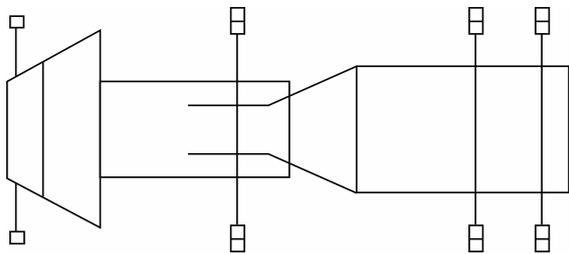


图3 1+2+5车型示意

Fig.3 Schematic of 1+2+5 truck

为了研究车辆速度对路面动力响应的影响,试验中设置2个速度等级,分别称为高速状态和低速状态。考虑到车辆上坡过程中速度不断下降,为一变速过程,试验中控制入坡速度。高速状态入坡速度为60 km/h,低速状态入坡速度为40 km/h。试验中,在图2中的2、3、4位置(即坡底、坡中和坡顶位置),采用雷达测速仪检测不同坡道位置的实际车辆速度。

考虑到轮迹相对传感器的位置对测试结果具有严重影响,试验中,每个工况至少重复3次。同时,检测轮迹相对传感器的位置,如果偏差较大,则重复进行试验。同一个工况下,采用检测得到的最大动应变评价路面动力响应。

整个试验持续时间为2 d,试验时为阴天,大气温度约15℃,试验结果可以反映常温状态下沥青路面的动态力学性能。

### 3 测试结果分析

#### 3.1 不同坡道位置路面动力响应

图4、图5分别为双联轴轴重为180 kN的标准轴载下,坡底和坡顶位置沥青面层底部的动力响应。

该车位于坡底时,车速为55 km/h,到达坡顶时,车速为38 km/h,车速下降了30.9%。

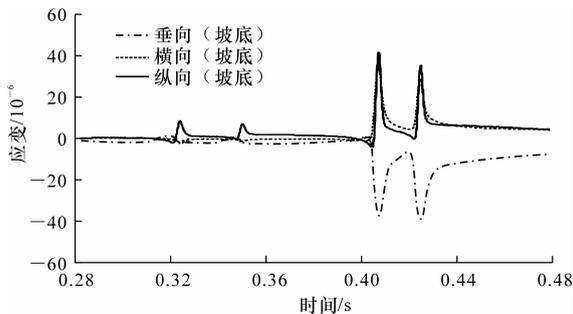


图4 坡底位置沥青路面动力响应

Fig.4 Dynamic responses of asphalt pavement at slope bottom

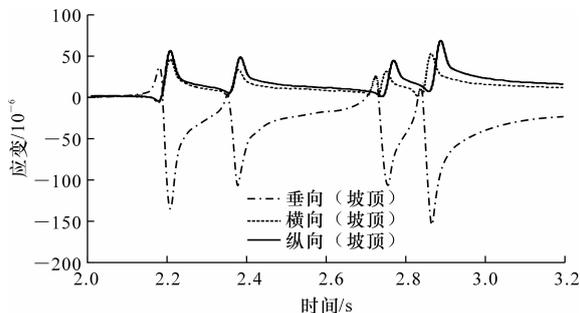


图5 坡顶位置沥青路面动力响应

Fig.5 Dynamic responses of asphalt pavement at slope top

由图4、图5可得出如下结论。

(1)坡底位置牵引车前后桥作用下动力响应较弱,主要原因在于该试验段坡底位置是一段平曲线半径为700 m的弯道,难以保证各个车轮均压在传感器正上方,这也正说明了车轮相对传感器的位置对测试结果具有严重的影响。

(2)不管是坡底位置还是坡顶位置,3个方向动力响应时间历程相近。垂向应变主要表现为压应变,横向和纵向应变主要表现为拉应变。牵引车的前后桥以及挂车的双联轴之间存在明显的干涉现象,车速较低的坡顶位置较坡底位置干涉更加严重。

(3)3个方向的动力响应,坡顶位置均较坡底位置大。坡顶的垂向应变、纵向应变和横向应变分别为坡底的3.95倍、1.63倍和1.49倍,也就是说,同一辆车,自坡底运行到坡顶,路面产生的3个方向应变分别增加了295%、63%和49%,这正是长大纵坡路段坡顶位置更容易出现早期破坏的原因。也说明了车速下降对沥青路面动力响应的重要影响。

### 3.2 不同轴重下的路面动力响应

图6~图8为3种轴重的拖挂车作用下,坡顶位置面层底部动应变时间历程曲线。所选取的测试结果,3辆车到达坡顶测试位置的车速分别为40、38、42 km/h,可以近似认为车速相同。

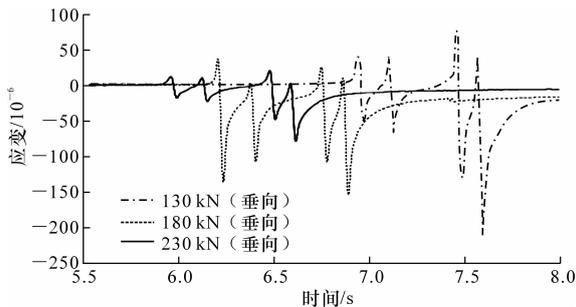


图6 不同轴重下垂直向动力响应

Fig. 6 Dynamic responses at vertical direction under different axle loads

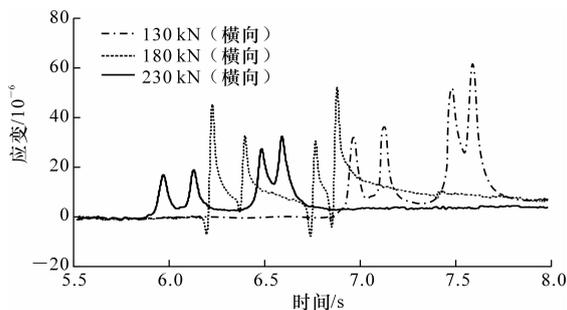


图7 不同轴重下横向动力响应

Fig. 7 Dynamic responses at lateral direction under different axle loads

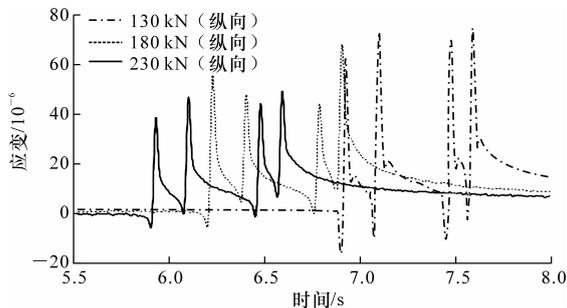


图8 不同轴重下纵向动力响应

Fig. 8 Dynamic responses at longitudinal direction under different axle loads

由图6~图8可得出如下结论。

(1)随着轴重的增加,3个方向的动力响应均增加,但不同参数受轴重影响不同。双联轴轴重从130 kN增加到180 kN,增加了50 kN,最大垂向、横向和纵向应变分别增加了 $77.6 \times 10^{-6}$ 、 $19.8 \times 10^{-6}$

和 $18.7 \times 10^{-6}$ ,分别增加了100.3%、60.6%和37.8%。从180 kN增加到230 kN,增加了50 kN,最大垂向、横向和纵向应变分别增加了 $52.7 \times 10^{-6}$ 、 $9.2 \times 10^{-6}$ 和 $6.5 \times 10^{-6}$ ,分别增加了34%、17.5%和9.5%。荷载较小时,随着轴重的增加,3个动力响应参数均显著增加,而轴重超过180 kN的双联轴标准轴载时,3个参数对轴重变化的灵敏性显著减小。因此,常温状态下,长大纵坡路段沥青路面的动力响应与轴重之间呈非线性关系,这与笔者进行的平整路段的试验规律一致。

(2)各个轴重等级下,3个动力响应参数的时间历程曲线均呈现一定的干涉现象,尤其是轴距相对较小的双联轴荷载作用下,干涉作用尤为严重。不同轴之间的干涉效应对沥青路面动力响应数值大小有着显著影响,主要原因在于沥青混合料属于粘弹性材料,阻尼的存在使得材料动态力学性能表现出一定的滞后性。因此,采用理论方法研究长大纵坡路段力学性能时,应考虑阻尼的影响。

(3)对于目前广泛研究的长寿命路面(或称永久路面),目前认可度较高的设计控制指标是沥青层底水平拉应变小于 $70 \times 10^{-6}$ ,路基或基层表面垂直向压应变小于 $200 \times 10^{-6}$ 。然而,由本文研究可以发现,即使对于坡度3.8%、坡长800 m的长大纵坡路段,在双联轴轴重达到180 kN的拖挂车作用下,坡顶位置面层底部的最大水平拉应变仅 $68.2 \times 10^{-6}$ (图8中的最大纵向应变),最大垂直向压应变仅为 $155 \times 10^{-6}$ (图6中的最大垂直向应变),其力学性能满足长寿命路面设计要求。但是,中国的长大纵坡路段,尤其是坡顶位置,出现了严重的早期破坏,远达不到长寿命路段使用性能要求。因此,对于中国采用的半刚性沥青路面结构,还应进行深入研究,提出合理的长寿命路面设计控制指标。

## 4 结 语

(1)开发的三维传感器能够同时检测沥青面层底部的垂向、横向和纵向动应变,成活率高,抗干扰能力强。

(2)坡顶位置各个方向动应变均大于坡底位置,这是引起坡顶位置容易出现早期破坏的根本原因。进行路面结构设计时,应以坡顶位置的力学性能作

为设计控制指标。

(3)国际上提出的长寿命路面设计控制指标,不适宜于中国广泛使用的半刚性基层路面结构。

(4)随着坡长和轴重的增加,坡顶位置动力响应增加,而不同参数受坡长和轴重的影响不同。对于垂向压应变,受坡长和轴重的影响较大;而对于横向与纵向拉应变,受坡长的影响相对轴重的影响大得多。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] Willis J R, Timm D H. Development of stochastic perpetual pavement design criteria[J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 2010, 79(1):561-595.
- [2] Worel B J, Clyne T R. Low-volume road performance related to traffic loadings at Minnesota road research project[J]. Transportation Research Record, 2007, 1989(2):300-305.
- [3] Ullidtz P, Harvey J T, Tsai B W, et al. Calibration of mechanistic-empirical models for flexible pavements using California heavy vehicle simulators[J]. Journal of the Transportation Research Board, 2008(2087):20-28.
- [4] Al-Qadi I L, Loulizi A, Elseifi M, et al. The virginia smart road: the impact of pavement instrumentation on understanding pavement performance[J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 2004, 73(3):427-465.
- [5] 董忠红,徐全亮,吕彭民.基于加速加载试验的半刚性基层沥青路面动力响应[J].中国公路学报,2011,24(2):1-6.  
DONG Zhong-hong, XU Quan-liang, LU Peng-min. Dynamic response of semi-rigid base asphalt pavement based on accelerated pavement test[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(2):1-6. (in Chinese)
- [6] 杨永顺,王林,韦金城,等.重载作用下典型路面结构动态响应数据采集与分析[J].公路交通科技,2010,27(5):11-16.  
YANG Yong-shun, WANG Lin, WEI Jin-cheng, et al. Typical pavement structure dynamic response data collection and analysis under heavy vehicle loading [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(5):11-16. (in Chinese)
- [7] 管志光,状传仪,林明星.足尺沥青混凝土路面加速加载动力响应[J].交通运输工程学报,2012,12(2):24-31.  
GUAN Zhi-guan, ZHUANG Chuan-yi, LIN Ming-xing. Accelerated loading dynamic response of full-scale asphalt concrete pavement[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(2):24-31. (in Chinese)
- [8] 董忠红,吕彭民.沥青路面动力响应检测传感器的设计及应用[J].筑路机械与施工机械化,2008,25(10):78-80.  
DONG Zhong-hong, LU Peng-min. Design and application of sensor for detection of dynamic response of asphalt pavement[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2008, 25(10):78-80. (in Chinese)
- [9] 董忠红,郑仲浪,吕彭民.车辆速度对沥青路面动力响应影响试验研究[J].郑州大学学报:工学版,2008,29(2):123-126.  
DONG Zhong-hong, ZHENG Zhong-lang, LU Peng-min. Experiment study on the influence of the vehicle velocity on the asphalt pavement dynamic response [J]. Journal of Zhengzhou University: Engineering Science, 2008, 29(2):123-126. (in Chinese)
- [10] 吕彭民,董忠红.车辆-沥青路面系统力学分析[M].北京:人民交通出版社,2010.  
LU Peng-min, DONG Zhong-hong. Mechanical analysis of vehicle-asphalt pavement system[M]. Beijing: China Communications Press, 2010. (in Chinese)