**文章编号:** 1000-8608(2018)05-0500-05

# 重载交通下 CTCP-CRCP 复合路面振动试验研究

郭超1,陆征然\*2,侯世伟1,于红梅1

(1. 沈阳建筑大学 土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168;2. 沈阳建筑大学 管理学院, 辽宁 沈阳 110168)

**摘要:**对由斜向交叉缓黏结预应力混凝土上面板(CTCP)、沥青砂应力吸收层、连续配筋混 凝土下面板(CRCP)组成的"三明治"式复合路面结构在不同重载车辆冲击下的加速度反应 进行试验研究.首先,利用埋设的加速度计,分别测试了在轴载为100、200、300 kN的重载车 辆冲击下 CTCP 和 CRCP 的加速度反应谱,并采用 CTCP 和 CRCP 加速度比值的统计均值 作为沥青砂应力吸收层的应力吸收因数.然后,对上述3组加速度反应谱进行傅里叶变换,获 得频率谱.试验结果表明:在上述3组重载车辆冲击作用下,CTCP 加速度最大峰值分别为 0.022、0.039、0.059 m·s<sup>-2</sup>,CRCP 加速度最大峰值分别为 0.010、0.015、0.025 m·s<sup>-2</sup>,沥 青砂应力吸收层应力吸收因数分别为3.15、3.38、3.46.该结果表明"三明治"式复合路面结 构中沥青砂应力吸收层能有效缓解重载车辆对路面的冲击,适合在重载交通中应用.

#### 0 引 言

国内外众多学者都将路面简化为作用在基层 上的弹性地基梁,基于质点系统动力学微分方程, 建立车辆-路面-路基振动体系平衡方程[1-3].然 后,通过微分变换求解车辆荷载作用下路面随机 动力响应及其可靠性[4],并在此过程中利用数值 模拟仿真技术补充上述理论计算中的不足[5].在 理论分析的基础上,为了实现对水泥路面服役状 态快速无损的检测评价分析[6],应用车辆的悬挂 系统对路面不同平整度的动力反应[7],间接实现 测试路面振动响应的试验研究[8].同时,还利用原 位振动监测技术[9]、微地震技术[10],监测车辆荷 载作用下路面体系中弹性波的传播特性[11-12],进 而获得路面动力响应特性[13].此外,通过测试随 机车辆荷载激励下的路面加速度幅值,以达到预 测车辆荷载等级的目的[14-15].然而,对于复合路面 结构在不同重载车辆作用下的加速度反应现场测 试并不多见.

本文针对不同重载尤其是严重超载车辆冲击

作用下,"三明治"式复合路面结构中各层路面板 的加速度反应进行现场测试,并对沥青砂应力吸 收层的应力吸收能力进行探讨,以期为复合路面 在重载交通尤其是严重超载路段中的结构设计提 供参考.

#### 1 试验路面工程概况

为了准确获得复合路面各结构层振动特性, 本次研究选择在辽宁省营口市岫水线路面大修工 程中设置"三明治"式复合路面结构试验段.

岫水线为连接大石桥市铝镁矿区与营口港区 码头的主要干道,属于典型的重载交通路段,而且 当地采用高压轮胎的超载现象客观存在.此种超 载已经远超出了现有路面设计的范畴.因此,需要 探索一种适合重载交通实际工程情况的路面结 构.基于上述原因,本试验段选择了"三明治"式复 合路面结构作为重载交通的试验路面结构.

本次研究的"三明治"式复合路面结构主要由 如下3部分组成:斜向交叉缓黏结预应力混凝土

收稿日期: 2018-01-04; 修回日期: 2018-07-15.

基金项目: 辽宁省自然科学基金资助项目(20170540741).

作者简介: 郭 超(1980-),男,博士,副教授,E-mail;guochaoglovel@126.com;陆征然\*(1982-),女,博士,副教授,高级工程师, E-mail;luzhengranglovel@126.com.

上面板(CTCP)、沥青砂(AS)应力吸收层、连续配 筋混凝土下面板(CRCP).其中,CTCP能够充分 发挥保证路面连续、减少温缩缝的优势;AS应力 吸收层则能有效地吸收重载车辆的冲击作用; CRCP具有强度高的特性,可以抵抗重载交通下 的车辆荷载作用,相应的复合路面结构如图1所 示,预应力筋及端部钢筋网平面布置如图2所示.

郭



图 1 CTCP-CRCP 复合路面结构





图 2 预应力筋及端部钢筋网布置

Fig. 2 Prestressing tendons and end mesh reinforcement distribution

此复合路面结构采用 C35 商品混凝土进行 现场浇筑.其中,CTCP 连续长度 150 m、宽 6 m、 厚 0.18 m,在板中心层面处设置直径 15.2 mm、 间距 0.8 m,极限抗拉强度 1 860 MPa 并与线路 纵向交叉角度为 30°的斜向交叉缓黏结预应力钢 筋网,所用路面材料参数如表 1 所示.

表 1 路面材料参数 Tab.1 Parameters of pavement material

组成部分	厚度/m	$ ho/(\mathrm{kg}\cdot\mathrm{m}^{-3})$	$E/\mathrm{MPa}$	μ
CTCP	0.18	2 500	$3.25 \times 10^4$	0.15
AS	0.02	2 500	354	0.20
CRCP	0.18	2 500	$3.25 \times 10^{4}$	0.15
CSMB	0.60	2 200	1 200	0.20
土基	—	1 800	45	0.35

CTCP 中采用缓黏结剂涂敷和高密度聚乙烯 护套包裹的预应力钢绞线. 通过调整缓黏结剂配 合比,可以控制其凝固时间,进而实现缓黏结的功 能. 当缓黏结剂未凝固时,钢绞线能够在护套内移 动,此时相当于无黏结预应力筋,应进行初次张 拉;当缓黏结剂凝固后,钢绞线与护套黏结在一 起,且护套与混凝土浇筑成整体,此时就相当于有 黏结预应力筋.

利用缓黏结预应力筋具备的无黏结与有黏结 预应力筋的双重优势,将其应用到水泥混凝土路 面中,并通过分阶段张拉预应力筋的方法以实现 无黏结向有黏结的转换,具体实施过程如下:

首先,当混凝土强度达到 5 MPa,缓黏结剂保 持液态,张拉预应力筋至极限抗拉强度的 30%, 防止路面温度收缩裂缝;然后,当混凝土强度达到 16.7 MPa,缓黏结剂固化前,张拉预应力筋到极 限抗拉强度的 75%,抵抗路面板内的温度应力;最 后,当缓黏结剂固化后,预应力钢绞线通过护套与 混凝土路面实现有效黏结成为有黏结预应力路面.

CRCP 为每节 10 m、宽 6 m、厚 0.18 m 的双 向配筋混凝土板.上下面板间设置 2 cm AS 应力 吸收层.下部为 0.60 m 水泥稳定碎石基层 CSMB.

### 2 试验路面振动监测原理

上述"三明治"式复合路面结构为在重载交通 下的首次应用,因此,需要探索其在重载车辆冲击 作用下的工作性能.引起重载车辆振动的原因主 要有车辆自身振动、路面不平整造成的车辆振动、 车辆-路面耦合而产生的振动.重载车辆的振动作 为路面振动的外部激励,将进一步引起路面各结 构层的振动,并且,这些振动将在路面结构层内部 形成弹性波.然而,这类弹性波的频率较低,属于 低频振动,采集到的信号频带较窄,而高频分量则 在向地层深部的传播过程中发生衰减.

为了测量重载车辆在复合路面中引起的冲击 作用,利用预先埋设在 CTCP、CRCP 内的加速度 计记录各结构层在不同轴载激励下的全时加速度 反应谱.引入 CTCP 与 CRCP 加速度比值作为 AS 应力吸收层的应力吸收因数,通过概率统计 分析,以反映其应力吸收能力的强弱.

#### 3 试验路面振动测试

#### 3.1 测试仪器

试验中的加速度计为秦皇岛市协力科技开发 有限公司研制的 YD301 电压输出型(IEPE)单轴 向加速度传感器,灵敏度 1 V/(m • s<sup>-2</sup>),频率  $0.1\sim500$  Hz,测量范围 5 m • s<sup>-2</sup>,分辨率 0.000 03 m • s<sup>-2</sup>,尺寸 30 mm×32 mm.加速度 信号采集分析仪采用江苏东华测试技术股份有限 公司生产的 DH8301 高性能动态信号采集测试分 析系统,其采样频率为 80 Hz.

#### 3.2 测试过程

为了使加速度计的测量位置处于重载车辆轴 载作用的中心部位,同时保证重载车辆通过测量 位置处不会导致路面局部破坏,在试验路面中心 车道投影处埋入加速度计及其保护装置,包括加 速度计保护盒、数据线防护钢管等.将加速度计数 据线通过防护钢管引到浇筑路面混凝土模板外侧 的线缆井中.为提高测试成功率,在同一路面内分 别埋设两组加速度计.车辆荷载激励下的路面加 速度采集测试系统包括动态数据采集仪、220 V 配电箱、电脑等.试验过程中,采用115型重载卡 车作为标准试验车,并且通过调整车载矿粉体积 来实现100、200、300 kN的不同轴载作用.

#### 4 试验数据处理与分析

复合路面中各结构层在 40 km/h 的重载车 辆作用下,加速度全时波形及通过对其进行傅里 叶变换得到的频率曲线如图 3~5 所示.



由图 3 可知:在 100 kN 标准轴载作用下, CTCP与 CRCP加速度最大峰值分别为 0.022、 0.010 m·s<sup>-2</sup>,路面板加速度时程曲线与相位相 关.振动主频分布在 7~15 Hz,傅里叶变换幅值 分别为 1.2、0.4.

由图 4 可知:在 200 kN 超标准轴载作用下, CTCP 与 CRCP 加速度最大峰值分别为 0.039、 0.015 m·s<sup>-2</sup>,路面板加速度时程曲线与相位相 关.振动主频分布在 5~15 Hz,傅里叶变换幅值 分别为 0.70、0.10.



由图 5 可知:在 300 kN 超标准轴载作用下, CTCP 与 CRCP 加速度最大峰值分别为 0.059、 0.025 m • s<sup>-2</sup>,路面板加速度时程曲线与相位相 关.振动主频分布在 2~23 Hz,傅里叶变换幅值 分别为 0.42、0.16.

以上 3 种轴载作用下复合路面结构中 CTCP、 CRCP 的加速度及傅里叶变换幅值测试结果如图 6 所示. 随着轴载从 100 kN 增加到 300 kN, CTCP 的加速度从 0.022 m • s<sup>-2</sup> 增加到 0.059 m•s<sup>-2</sup>,傅里叶变换幅值从 1.2 下降到 0.42;
CRCP 的加速度从 0.010 m•s<sup>-2</sup>增加到 0.025
m•s<sup>-2</sup>,傅里叶变换幅值从 0.4 下降到 0.16.

郭



图 6 加速度/傅里叶变换幅值随轴载变化曲线 Fig. 6 Curves of acceleration and Fourier transformation amplitude with axle load

将 CTCP 与 CRCP 加速度比值定义为 AS 应 力吸收层的应力吸收因数 α,并对其统计分析,结 果如图 7 所示.从图中可以看出,在 100、200、300 kN 轴载作用下,α 分别服从 LN(3.15,0.040)、 LN(3.38,0.0.038)、LN(3.46,0.041)的对数正 态分布,应力吸收因数 α 均值随着车辆轴载的增 大而有少量增加,可取为 3.38.



Fig. 7 Ratio of CTCP and CRCP accelerations

## 5 结 论

(1)随着车辆轴载的增加,复合路面结构的加速度幅值呈现非线性增长的趋势,而且 CTCP 的加速度增长更为显著,重载车辆将引起复合路面结构的大幅振动,从而使路面结构进入加速破坏阶段.

(2)随着车辆轴载的增加,复合路面结构的加速度时程曲线的傅里叶变换幅值呈现非线性减小的趋势,这从频谱特征上进一步说明了复合路面结构受车辆荷载激励影响的频率范围越来越大,

路面结构与重载车辆更容易发生共振.

(3)复合路面结构中 AS 应力吸收层能够有 效降低重载车辆对于 CRCP 的冲击作用,从而进 一步缓解对基层、土基等结构层的破坏作用,所以 "三明治"式复合路面结构可以在重载交通中发挥 重要作用.

# 参考文献:

- [1] 张 锋,冯德成,凌贤长,等.春融期重载车辆-路 面-路基垂向动力分析模型[J].中国公路学报, 2011, 24(4):7-14,86.
  ZHANG Feng, FENG Decheng, LING Xianchang, et al. Vertical dynamical analysis model of heavy vehicle-pavement-subgrade during spring-thawing period [J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(4):7-14,86. (in Chinese)
  [2] 周华飞,蒋建群.刚性路面在运动车辆作用下的动
- 力响应[J]. 土木工程学报, 2006, **39**(8):117-125. ZHOU Huafei, JIANG Jianqun. Dynamic response of rigid pavements to moving vehicles [J]. **China Civil Engineering Journal**, 2006, **39**(8):117-125. (in Chinese)
- [3] DING Hu, YANG Yan, CHEN Liqun, et al. Vibration of vehicle - pavement coupled system based on a Timoshenko beam on a nonlinear foundation [J]. Journal of Sound and Vibration, 2014, 333(24):6623-6636.
- [4] 刘小云,史春娟. 车辆荷载下沥青路面动力响应随机特性及可靠性分析[J]. 中国公路学报,2012, 25(6):49-55.

LIU Xiaoyun, SHI Chunjuan. Random characteristics and reliability analysis of asphalt pavement under vehicle random load [J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(6):49-55. (in Chinese)

[5] 卢 正,姚海林,骆行文,等. 矩形移动荷载作用下路面-双层地基系统三维振动分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(11):3493-3499.

LU Zheng, YAO Hailin, LUO Xingwen, *et al.* 3D vibration of pavement and double-layered subgrade coupled system subjected to a rectangular moving load [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(11): 3493-3499. (in Chinese)

- LAK M A, FRANÇOIS S, DEGRANDE G, et al. Development and experimental validation of a numerical model for the prediction of ground vibration generated by pavement breaking [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2015, 79: 199-210.
- [7] AGOSTINACCHIO M, CIAMPA D, OLITA S.

The vibrations induced by surface irregularities in road pavements — a Matlab approach [J]. **European Transport Research Review**, 2014, **6**(3): 267-275.

- [8] KIM S M, YANG S. Moving two-axle high frequency harmonic loads on axially loaded pavement systems [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2010, 14(4):513-526.
- [9] LI Mengxing, ANDERSON N, SNEED L, et al. Condition assessment of concrete pavements using both ground penetrating radar and stress-wave based techniques [J]. Journal of Applied Geophysics, 2016, 135:297-308.
- [10] 佘艳华,苏华友,肖正学. 交通荷载作用下路面结构 的微地震试验[J]. 中国公路学报,2009,22(6): 40-46.

SHE Yanhua, SU Huayou, XIAO Zhengxue. Microseismic experiment of pavement structure under traffic load [J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(6):40-46. (in Chinese)

[11] ALHASAN A, WHITE D J, DE BRABANTERB K.
 Continuous wavelet analysis of pavement profiles [J].
 Automation in Construction, 2016, 63:134-143.

- [12] HUNAIDI O, GUAN W, NICKS J. Building vibrations and dynamic pavement loads induced by transit buses [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2000, 19(6):435-453.
- [13] STOCKER M, SILVONEN P, RÖNKKÖ M, et al. Detection and classification of vehicles by measurement of road-pavement vibration and by means of supervised machine learning [J]. Journal of Intelligent Transportation Systems, 2016, 20(2): 125-137.
- [14] KIM S M, CHUNG W. Vibration of simplified prestressed pavement model under moving two-axle harmonic loads [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2009, 13(6):409-421.
- [15] 李金辉,何 杰,李旭宏. 车辆随机及移动荷载作用 下路面动态响应[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2015, 35(2):38-45.
  LI Jinhui, HE Jie, LI Xuhong. Dynamic response of pavement under vehicle random load and moving constant load [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2015, 35(2):38-45. (in

# Experimental study of vibration of CTCP-CRCP composite pavement under heavy traffic

Chinese)

GUO Chao<sup>1</sup>, LU Zhengran<sup>\*2</sup>, HOU Shiwei<sup>1</sup>, YU Hongmei<sup>1</sup>

( 1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China;

2. School of Management, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China )

**Abstract**: The acceleration response of the sandwich type composite pavement which consists of three components, namely, the cross tensioned concrete pavement (CTCP), the asphalt sand (AS) stress-absorbing layer, and the continuously reinforced concrete pavement (CRCP), from top to down, is experimentally studied under different heavy vehicle impacts. First, the acceleration response spectra of CTCP and CRCP are measured by the embedded accelerometer under the axle loads of 100, 200 and 300 kN, respectively. The statistical mean of the ratio of CTCP and CRCP accelerations is defined as the stress-absorbing factor of the AS stress-absorbing layer. After that, the frequency spectra of the pavements are received from the Fourier transformation of 3 groups of acceleration response spectra. The test results show that under the 3 groups of axle loads the acceleration max peak values of CTCP are 0.022, 0.039 and 0.059 m  $\cdot$  s<sup>-2</sup>, those values of CRCP are 0.100, 0.015 and 0.025 m  $\cdot$  s<sup>-2</sup>, and the stress-absorbing factors of the AS stress-absorbing layer are 3.15, 3.38 and 3.46. It can be known that the sandwich type composite pavement is suitable for the application in the heavy traffic, because the AS stress-absorbing layer can effectively decrease the pounding of the heavy vehicle on the pavements.

Key words: road engineering; pavement vibration; acceleration test; composite pavement