

# 水泥混凝土路面纵缝拉杆传荷试验研究

李晶晶<sup>1,2</sup>, 张 擎<sup>2</sup>

(1. 陕西交通职业技术学院 公路工程系 陕西 西安 710018; 2. 长安大学 公路学院 陕西 西安 710064)

**摘 要:** 在分析重复荷载作用下接缝工作机理的基础上, 通过弯曲疲劳试验, 研究不同板厚、拉杆长度和拉杆直径等条件下水泥混凝土路面纵缝拉杆传荷能力。结果表明: 纵缝传荷系数的变化在荷载作用 50 万次前后大致分为快速下降阶段和保持阶段; 纵缝传荷系数随着拉杆直径和拉杆长度的增加而增大, 但增幅不足 9%; 纵缝传荷系数随着板厚的增加而降低, 幅度约为 8%; 结合现行规范对于旧水泥混凝土路面接缝传荷能力等级的评定, 表明在试验模拟的工况下, 荷载作用 50 万次后纵缝传荷系数保持值均在 80% 以上, 具有优良的传荷能力。

**关键词:** 道路工程; 水泥混凝土路面; 接缝传荷系数; 弯曲疲劳; 拉杆

**中图分类号:** U416.222 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-6833.2015.06.024

## 0 引言

为了减小温度或湿度变化在水泥混凝土路面结构内引起的收缩或翘曲应力问题以及便于铺筑施工, 人们通常采用纵向和横向的各种接缝形式将路面分割为规则形状的混凝土板, 但接缝也是最容易出现病害的部位, 是整个路面结构的最薄弱环节<sup>[1-3]</sup>。国内外许多道路工作者对于接缝传荷能力和传力杆接缝运行特性进行了大量的研究工作<sup>[2-8]</sup>, 但基本上只测横向接缝传荷系数, 往往忽略了纵缝传荷性能。我国现行的水泥混凝土路面设计规范针对纵缝拉杆的设计主要考虑在温度收缩作用下拉杆本身的抗拉强度及拉杆与水泥混凝土之间的粘结力是否超过容许拉应力<sup>[1]</sup>, 也没有考虑拉杆的实际受荷特性及其传荷性能, 而在实际路面的受力中纵缝拉杆的传荷性能不能忽视, 因此, 有必要对水泥混凝土路面纵缝拉杆传荷性能进行研究。

## 1 重复荷载作用下接缝工作性能

### 1.1 接缝传荷能力评定

接缝的传荷能力是指水泥混凝土路面板的接缝具有将车轮荷载由一侧直接承受荷载的板块向接缝另一侧非直接承受荷载的板块进行传递的能

力<sup>[2,4]</sup>, 通常可用接缝两侧板边的荷载和弯沉来计算。

#### 1.1.1 荷载法

表征接缝传荷能力的直接指标是接缝两侧所承受荷载的比值, 其计算方法虽然与传荷能力的定义完全一致, 但对于荷载分配的实际状况却难以测量。

$$k_j = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $k_j$  为接缝传荷系数;  $P_2$  为未受荷板接缝边缘处所承受的荷载, kN;  $P_1$  为受荷板接缝边缘处所承受的荷载, kN。

#### 1.1.2 弯沉法

现行的《公路水泥混凝土路面设计规范》(JTG D40—2011) 采用受荷板一侧接缝边缘处的弯沉与未受荷板接缝边缘处弯沉之比来评定接缝传荷能力<sup>[1]</sup>。根据接缝传荷系数大小将接缝传荷能力分为优良、中、次、差 4 个等级。该方法目前广泛用于评定接缝传荷能力。

$$k_j = \frac{w_u}{w_i} \times 100\% \quad (2)$$

式中:  $k_j$  为接缝传荷系数;  $w_u$  为未受荷板接缝边缘处的弯沉值, 0.01 mm;  $w_i$  为受荷板接缝边缘处的弯沉值, 0.01 mm。

收稿日期: 2015-06-02; 修订日期: 2015-08-03

基金项目: 浙江省交通运输厅科研计划项目(2014H38); 陕西省教育科学“十二五”规划项目(SGH14093)

作者简介: 李晶晶(1985—), 女, 湖北随州人, 陕西交通职业技术学院讲师, 长安大学博士研究生, 研究方向为路面材料与结构, E-mail: lijingjingqi@163.com。

## 1.2 重复荷载作用下接缝工作机理

在重复荷载作用下,拉杆与混凝土相互作用致使与拉杆接触的混凝土界面出现一定的缝隙,即累计损伤,用松动量来表示<sup>[4]</sup>. 发生松动现象

的单杆传荷系统,假定传荷系统始终处于线弹性工作范围,总荷载为  $P$ ,拉杆长为  $l$ ,松动量为  $\Delta$ ,缝宽为  $b$ ,单根拉杆工作过程可分解为图 1 所示的模型.

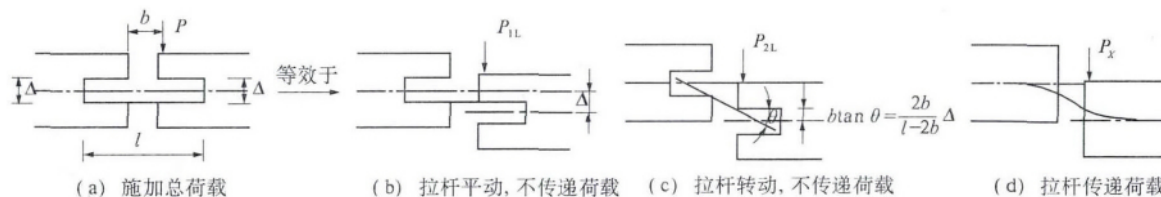


图 1 重复荷载下单根拉杆工作过程

Fig. 1 The work process of single tie bar under repetitive loads

由图 1 可以看出,荷载作用在水泥混凝土路面板时,拉杆并没有立即开始传荷,作用在受荷板的荷载由  $P = P_{1L} + P_{2L} + P_X$  三部分组成,其中, $P_{1L}$ 和 $P_{2L}$ 用来克服接缝松动, $P_X$ 是按照没有产生松动的正常情况传递.这个工作过程仅对单根拉杆而言的,在实际传荷系统中,往往有多达十几根的拉杆,并不是每根拉杆同时按图 1 所示受力工作,它是一个逐渐变化的过程.

## 2 纵缝拉杆传荷疲劳试验与分析

### 2.1 重复荷载试验方法

为了得出拉杆对纵缝工作性能的影响,通过弯曲疲劳试验来分析纵缝拉杆传荷能力的变化,其试验装置类似于水泥混凝土抗弯拉试验,不同的是该装置的支座为两个距离 450 mm 的固定支座,用落锤式弯沉仪测得其反应模量为  $45 \text{ MN/m}^3$ ;为真实模拟行车荷载通过接缝时其两侧受力不均匀以及荷载传递情况,试验中上压头采用偏心设置的单压头,试验中压头所接触的试块一端为受荷端,未接触的一端为非受荷端,在非受荷端一侧搭接一刚性平台布置位移传感器用以记录非受荷端在荷载作用过程中位移的变化情况,该刚性平

台到接缝的距离与压头距接缝的距离相等.试块的固定示意图如图 2 所示.接缝传荷系数用弯沉法来进行表征.

试验中针对不同板厚的拉杆进行尺寸选择:试件尺寸( $X \times Y \times Z$ )为  $90 \text{ cm} \times 15 \text{ cm} \times 24 \text{ cm}$  和  $100 \text{ cm} \times 15 \text{ cm} \times 28 \text{ cm}$  两种规格.拉杆材质选用 HRB355 螺纹钢,拉杆位于试件中央,直径选用 12, 14, 16, 18 mm 4 种,长度选用 600, 700, 800, 900 mm 4 种情况.

试验开始前,将 MTS 材料试验机的下作动头向上移动至重复弯曲试验装置的压头与试块紧密接触,施加一个小于 1 kN 的初始压力,且每次试验时控制初始压力相等;根据现场调查拉杆的受力情况以及试验室内传力杆的疲劳模拟经验<sup>[3,7,8]</sup>,试验时以  $0.05 \text{ kN/s}$  的速度加载到 5 kN,然后,控制 MTS 材料试验机以 5 Hz 的频率完成 5 ~ 20 kN 的一个加载周期,重复加载,记录试验数据的变化过程.

### 2.2 疲劳作用下纵缝拉杆传荷能力衰变规律

通过对拉杆的传荷疲劳试验进行分析,发现在荷载循环作用过程中,接缝传荷系数的变化规律类似,在此仅列出板厚为 24 cm 拉杆长度为 600 mm

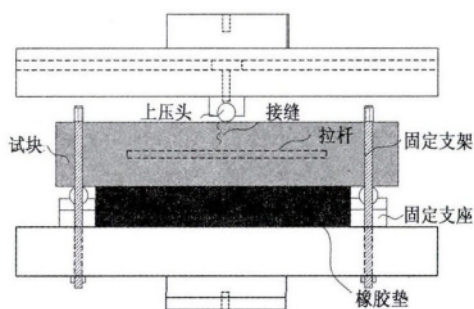
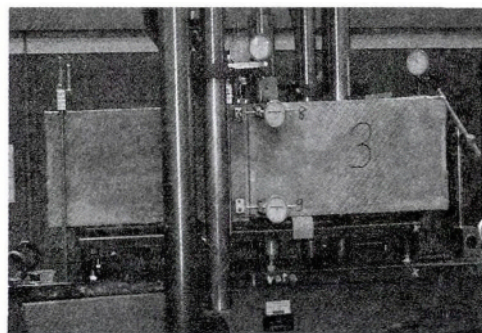


图 2 重复弯曲试验试块固定示意图

Fig. 2 Schematic diagram of fixing in repeated flexural test



的不同直径拉杆试验结果,见图3。分析可知:当拉杆直径为12、14、16、18 mm时,接缝传荷能力的初始值分别为89%、91%、92%和93%。由此可见,随着拉杆直径的增大,纵缝传荷能力的初始值逐渐增大。进一步分析可知,在荷载循环作用过程中,接缝传荷系数的变化在荷载作用50万次前后可以大致分为两个阶段:快速下降阶段和保持阶段。在接缝传荷系数的保持阶段,随着荷载循环作用的继续,接缝传荷系数保持不变。当拉杆直径为12、14、16、18 mm时,接缝传荷系数分别保持在86%、87%、91%和92%。在工程中,更关心的是初始阶段和保持阶段的纵缝受力情况,因此,不同板厚、拉杆直径和拉杆长度的疲劳试验结果仅分析初始阶段和保持阶段的传荷系数。

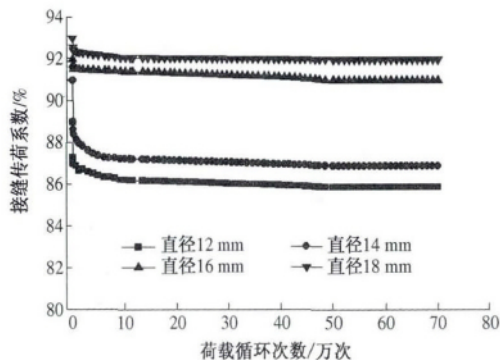


图3 板厚24 cm,拉杆长度600 mm时不同直径拉杆的纵缝传荷能力

Fig. 3 The transfer coefficient of longitudinal joint (the slab thickness is 24 cm, the length of tie bar is 600 mm)

### 2.2.1 拉杆直径和长度

对水泥混凝土路面板厚为24 cm的纵缝拉杆进行疲劳试验,结果见图4(a)。分析可知:当拉杆长度为600 mm,拉杆直径为12、14、16、18 mm时,纵缝传荷系数的初始值分别为89%、91%、92%和93%,保持值分别为86%、87%、91%和92%;当拉杆长度为700 mm,拉杆直径为12、14、16、18 mm时,纵缝传荷系数的初始值分别为89%、92%、92%和92%,保持值分别为87%、89%、90%和91%;当拉杆长度为800 mm,拉杆直径为12、14、16、18 mm时,纵缝传荷系数的初始值分别为90%、93%、93%和93%,保持值分别为87%、90%、92%和92%。结果表明,当板厚和拉杆长度一定时,随着拉杆直径的增大,纵缝拉杆传荷系数的初始值和保持值均逐渐增大,但增幅不大;对于相同直径的拉杆而言,纵缝拉杆传荷系数随着拉杆长度的增大也在逐渐增加,同样整体增幅不太

明显,且拉杆直径和长度达到一定程度时,拉杆在保持阶段的纵缝传荷水平相当。因此,在实际工程中选用拉杆直径和长度时,应综合考虑接缝传荷能力和经济性,不能盲目追求高直径和高长度的拉杆。

对板厚28 cm的纵缝拉杆传荷能力进行疲劳试验,结果见图4(b)。分析可知:当拉杆长度为700 mm,拉杆直径为12~18 mm时,纵缝传荷系数的初始值为84%~90%,在快速下降阶段,纵缝传荷系数衰减了4%~7%;当拉杆长度为900 mm,拉杆直径为12~18 mm时,纵缝传荷系数的初始值为86%~95%,在快速下降阶段,纵缝传荷系数衰减了5%~11%。结果表明,当板厚和拉杆长度一定时,纵缝拉杆传荷系数随着拉杆直径的增大而增大,增幅为6%~9%;在接缝传荷能力快速下降阶段,其衰减值也是随着拉杆直径的增大而增大,致使在保持阶段接缝传荷系数变化幅度不大于3%。

### 2.2.2 板厚

对不同板厚进行纵缝拉杆传荷疲劳试验,结果见图5。当拉杆长度为700 mm时,板厚24 cm的纵缝传荷系数初始值为89%~92%,保持值为87%~91%;板厚28 cm的纵缝传荷系数初始值为84%~90%,保持值为80%~83%;当拉杆长度为800 mm时,板厚24 cm的纵缝传荷系数初始值为90%~93%,保持值为87%~92%;板厚28 cm的纵缝传荷系数初始值为85%~93%,保持值为80%~83%。这表明当拉杆长度一定时,纵缝拉杆传荷系数无论是初始值还是保持值均随着板厚的增加而降低,幅度约为8%;当板厚一定时,随着拉杆长度和直径的增加而增大。因此,在工程应用中,当交通量增加需增加板厚时,应适当加大拉杆直径和增大拉杆长度来提高纵缝的传荷能力。

根据《公路水泥混凝土路面设计规范》(JT-GD40—2011)中关于旧水泥混凝土路面接缝传荷能力等级划分的相关规定:当接缝传荷系数大于等于80%时,接缝传荷能力评定为优良。通过以上分析可知,当板厚为24 cm和28 cm,拉杆长度为600~900 mm,拉杆直径为12~18 mm时,荷载作用50万次后纵缝传荷系数保持值均在80%以上,这表明纵缝拉杆承受荷载50万次循环后仍具有良好的传荷能力。

## 3 结论

(1) 通过弯曲疲劳试验进行拉杆传荷能力分



析,发现在荷载循环作用下,纵缝传荷系数在荷载作用 50 万次前后大致分为快速下降阶段和保持

阶段,与传力杆受力情况相似。

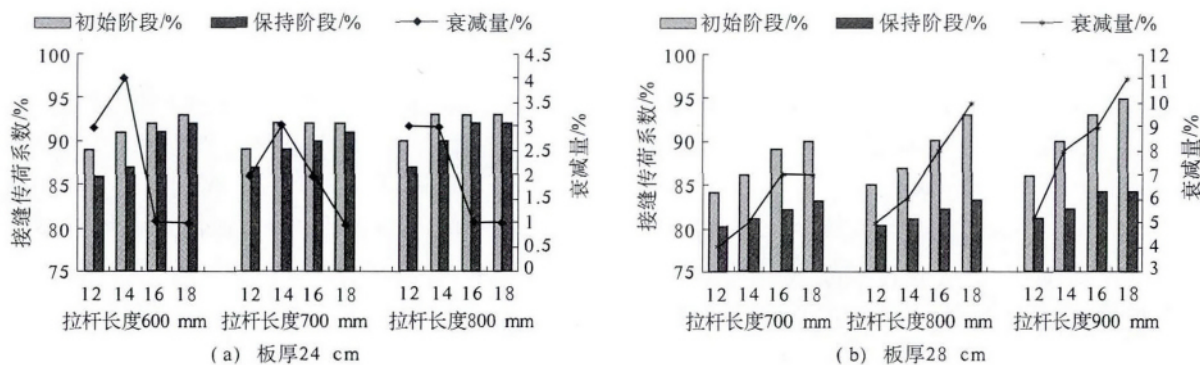


图4 不同拉杆直径和长度的纵缝传荷能力

Fig. 4 The transfer coefficient of longitudinal joint when the length and diameter of tie bar is different

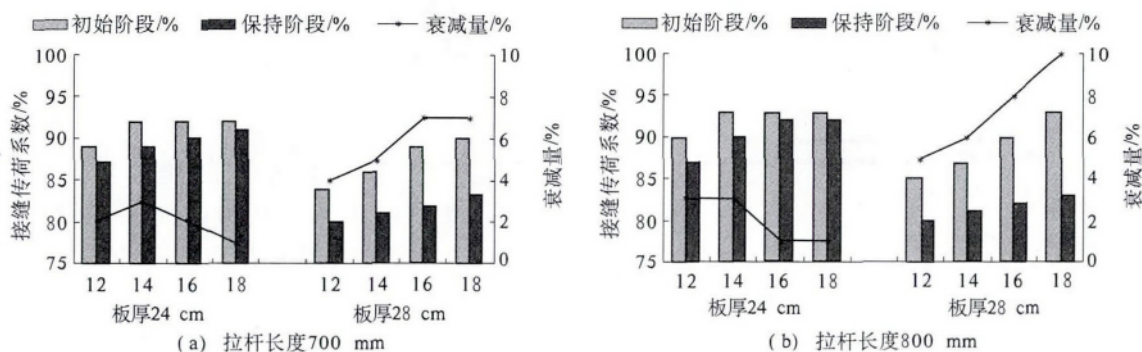


图5 板厚对纵缝拉杆传荷能力的影响

Fig. 5 The transfer coefficient of longitudinal joint of different slab thickness

(2) 纵缝传荷系数随着拉杆直径的增加而增大,初始阶段的增幅为 3%~9%,保持阶段的增幅为 3%~6%;随着拉杆长度的增加而增大,初始阶段和保持阶段的增幅均不大于 3%;随着板厚的增加而降低,幅度约为 8%。结合现行规范对于旧水泥混凝土路面接缝传荷能力等级的评定,结果表明,在试验模拟的工况下,荷载作用 50 万次后纵缝传荷系数保持值均在 80% 以上,具有优良的传荷能力。因此,在实际工程中针对不同板厚的路面结构选用拉杆直径和长度时,应综合考虑接缝传荷能力和经济性。

#### 参考文献:

- [1] 国家建设部. JTG D40—2011 公路水泥混凝土路面设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [2] 周德云, 姚祖康. 水泥混凝土路面接缝传荷能力的分析[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 1993, 21(3): 57-65.
- [3] 彭鹏, 田波, 牛开民. 水平安装误差时传力杆工作性能研究[J]. 公路交通科技, 2011, 28(6): 62-67.
- [4] 张宁, 黄晓明. 重复荷载下传力杆接缝运行特性[J]. 东南大学学报(自然科学版), 1998, 28(2): 89-95.
- [5] TAYABJI S D. Optimized performance at concrete pavement joints[C]//Proceedings of 3rd International Conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation. West Lafayette, Indiana: Purdue University, 1985: 595-608.
- [6] 冯升. 水泥混凝土路面纵缝传荷性能测试方法[J]. 中外公路, 2009, 29(1): 90-92.
- [7] 刘旭峰. 水泥混凝土路面接缝传荷衰变试验研究[D]. 西安: 长安大学公路学院, 2012.
- [8] 徐真真, 曹高尚, 王杰. 基于灰色理论的水泥路面拉杆传荷能力有限元分析[J]. 城市道桥与防洪, 2013(1): 133-136.

(下转第 128 页)

## Analysis of Out-of-plane Stability of Standard Concrete-filled Steel Tube Dumbbell-shaped Rib Arch

CHEN Lirong<sup>1,2</sup>, CHEN Baochun<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 2. Fujian Communications Planning and Design Institute, Fuzhou 350008, China)

**Abstract:** Information of concrete-filled steel tube (CFST) dumbbell-shaped rib arch bridge was investigated. Main influencing factors of out-of-plane stability of this kind of arch bridge were statistically analyzed. A standard dumbbell-shaped rib arch which could be representatively in accordance with engineering practice was built by referring to real bridges. The parameter analysis was conducted on this standard arch. The results show that coefficient of elastic stability increases firstly and then decreases while the rise-span ratio increases. When the rise-span ratio is in the range from 0.22 to 0.25, the coefficient of elastic stability of dumbbell-shaped arch bridge reaches the peak. The influence of the width-span ratio of arch is similar to the rise-span ratio. Brace form not only affects the stability coefficient of arch, but also affects the out-of-plane instability mode. The top brace has greater effect on elastic stability than side braces. Enlarging the diameter of steel pipe can effectively improve the out-of-plane stability of dumbbell-shaped arch, but enlarging the section height of arch rib could only slightly improve the out-of-plane stability. Then coefficient of elastic stability of arch will enlarge with the increase of deck stiffness, but there is a reasonable value interval of deck stiffness. While exceeding this interval, the coefficient increases slowly.

**Key words:** concrete-filled steel tubular (CFST); dumbbell-shaped; standard arch; out-of-plane stability; parameter analysis

(上接第 122 页)

## Test Research on Load Transfer of Tie Bar of Concrete Pavement

LI Jingjing<sup>1,2</sup>, ZHANG Qing<sup>2</sup>

(1. Department of Highway Engineering, Shaanxi College of Communication Technology, Xi'an 710018, China; 2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** After the working mechanism of joint under repetitive loads was analyzed, the bending fatigue test was made, and then the load transfer ability of tie bar under different thickness, the length and diameter of tie bar were studied. The results show that the load transfer coefficient of longitudinal joint is roughly divided into the fast decline and maintaining phase, before and after the load is 50 million times; the transfer coefficient of longitudinal joint is enlarged by the increase of the length and diameter of tie bar, but the growth is less than 9%; the transfer coefficient of longitudinal joint is decreased with the increasing of the slab thickness, about 8%; combined with the current specification for the level evaluation of load transfer capability of the old cement concrete pavement, after the load is applied 50 million times under the experiment conditions, the transfer coefficient is above 80%, it has excellent load transfer capacity.

**Key words:** road engineering; cement concrete pavement; load transfer coefficient; bending fatigue; tie bar