

装配式水泥路面夹环连接式传力杆接缝设计及验证

赵鸿铎¹, 涂巧毓¹, 马鲁宽¹, 赵举飞², 钟 盛³

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 湖州吴兴国有资本投资发展有限公司, 浙江 湖州 313000;

3. 上海同陆云交通科技有限公司, 上海 201804)

摘要: 面向可拆卸装配式水泥路面, 提出了一种夹环连接式传力杆接缝, 在阐述其特征和基本参数的基础上, 选取挠度传荷系数和弯沉差作为指标, 使用有限元方法分析了下开口槽、传力杆、夹环构件等参数对夹环连接式传力杆接缝传荷能力的影响, 同时分析了夹环连接式传力杆接缝的构件及界面应力的变化规律, 得到了合理的接缝参数; 此外, 通过室内足尺试验评价了夹环连接式传力杆接缝的传荷性能。结果表明, 提出的夹环连接式传力杆接缝的传荷能力满足要求, 具有一定的工程应用价值。

关键词: 装配式水泥路面; 夹环连接式传力杆; 接缝参数; 有限元分析; 足尺试验

中图分类号: U416. 216

文献标志码: A

Design and Verification of Precast Cement Concrete Pavement Joint with Clamping Ring Connected Dowel Bar

ZHAO Hongduo¹, TU Qiaoyu¹, MA Lukuan¹, ZHAO Jufei², ZHONG Sheng³

(1. The Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Huzhou Wuxing State-owned Capital Investment and Development Co., Ltd., Huzhou 313000, China; 3. Shanghai Tonglucloud Transportation Technology Co., Ltd., Shanghai 201804, China)

Abstract: For detachable precast cement concrete pavement, a joint with clamping ring connected dowel bar is proposed. Based on expounding its structural characteristics and basic parameters, the deflection load transfer coefficient and deflection difference are selected as indexes, and the finite element method is used to analyze the influence of the parameters of the lower opening groove, the transmission rod, and the clamping

ring on the load transfer ability of the joint with clamping ring connected dowel bar. Meanwhile, the varying regularity of the elements and the interface stress of the clamping ring connected dowel bar joint is analyzed, and reasonable structural parameters are obtained. Furthermore, the load transfer performance of the clamping ring connected dowel bar is evaluated by indoor full-scale test. The results show that the load transfer capacity of the proposed joint with clamping ring connected dowel bar meets the requirements, which has certain engineering practical value.

Keywords: precast cement concrete pavement; clamping ring connected dowel bar; joint parameters; finite element analysis; full-scale test

装配式水泥混凝土路面具有施工速度快、可重复利用和易于拆换维修等优点, 被广泛用于道路修复和建设中^[1]。与普通水泥混凝土路面相同, 接缝是装配式水泥混凝土路面的关键部位, 其传荷能力直接关系着路面的抗破坏性和耐久性。目前, 装配式水泥混凝土路面的接缝构造常采用普通传力杆结构, 即在预制板中预留传力杆位置, 在面板安装过程中, 将传力杆置入预留的位置中, 再使用修补材料填充空隙。但当装配式路面板损坏维修时, 需要对路面进行过切, 即将周围路面板含传力杆的部分切除, 再通过钻孔或开槽, 移植新的传力杆^[2]。上述过程费时费力, 破坏接缝构造, 而且还会引起周围板块的局部损坏; 同时, 板块切割及传力杆移植对放样精度及施工误差控制有较高的要求, 否则极易对装配式路面的施工质量产生影响。

收稿日期: 2022-08-02

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(52008310)

第一作者: 赵鸿铎, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为机场与道路铺面的智能化。

E-mail: hdzhao@tongji.edu.cn。

通信作者: 马鲁宽, 副研究员, 工学博士, 研究方向为新型铺面结构设计、评价及智能化。

E-mail: malukuan5071@163.com。



论文
拓展
介绍

为了避免因接缝带来的装配式路面结构的施工和维护问题,同时便于部分结构构件回收利用,可拆卸的接缝构造应运而生^[3]。目前,日本使用的可拆装式接缝主要包括压缩型接缝^[4]和Cotter连接构件连接的接缝^[5]。压缩型接缝是Fumishige等在喇叭型接缝的基础上改进形成的,其通过跨接缝设置的紧固件向接缝部分施加压缩力来结合装配式水泥路面板;Cotter连接构件是将H型五金(楔形)压入C型五金内,用螺栓固定H型与C型五金,在螺栓上施加预紧力的结构^[5],只要保证螺栓预紧力,则可保证使用过程中传递弯矩和剪力,需要拆除时将螺栓松开即可^[6]。此外,美国Fort Miller公司提出了一种可拆装式传力杆Super Dowel^[7],与普通传力杆相比,其为空心传力杆且直径更大,端部有螺纹,在使用时通过舍弃表面光滑的空心传力杆,便可获得路面板的可拆除性。2016年,韩国现代工程建设研究开发部先进材料研究组提出了一种新的接缝构造^[8],将传力杆及周围混凝土作为整体,通过螺栓实现整体的可拆装。与上述采用传力构件进行传荷的方法不同,荷兰提出了一种面向未来的铺面结构ModieSlab^[9-10],其路面板直接放置在4个桩基上,板间不设置传力杆;与此类似,Guo提出了梁基础路面结构的概念及其模型结构^[11],其中的梁基础是由在基层四周设置的梁和中间填充的柔性基层组成,在不设置传力杆的情况下,冬夏季节接缝传荷能力非常相近。ModieSlab和梁基础路面都不需设置传力构件,因此便于拆装与快速更换,属于可拆式的范畴,但其面向修复时施工工艺相对复杂,尚待进一步优化。

基于以上研究,本文提出一种新的可拆装式接缝—夹环连接式传力杆接缝^[12-13],在详细阐述其特征及参数的基础上,通过有限元方法分析参数对接缝传荷性能的影响,并探究夹环连接式传力杆接缝的构件及界面应力变化规律,以明确构造参数取值;同时,通过室内足尺试验,分析和验证夹环连接式传力杆接缝在应用于装配式水泥混凝土路面时的传荷性能。研究成果可为夹环连接式传力杆接缝在装配式水泥混凝土路面中的应用提供技术支撑,具有一定的工程价值。

1 夹环连接式传力杆接缝特征与参数

1.1 接缝特征

夹环连接式传力杆接缝主要包括夹环连接式传力杆、下开口槽和接缝处开口,分别位于接缝两侧的路面板中,如图1所示,其中,夹环连接式传力杆由

一个紧固螺栓、螺母、上下夹环以及两段杆件组成。

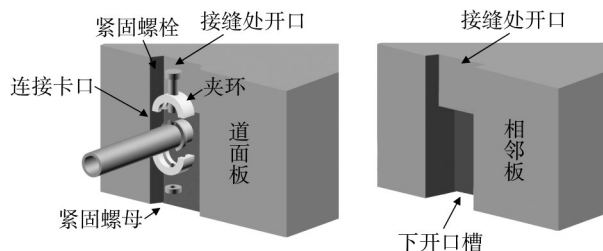


图1 夹环连接式传力杆接缝示意图

Fig.1 Schematic diagrams of the joint with clamping ring connected dowel bar

设置夹环连接式传力杆接缝的方法如下:

- (1) 板块装配前,夹环连接式传力杆置于预制混凝土板内,且预制混凝土板在接缝处预留开口槽;
- (2) 装配时,将两预制混凝土板的传力杆对准,扣上夹环,拧紧紧固螺栓,完成传力杆的连接;
- (3) 在槽内注浆,之后对板表面的开口进行封盖及防水处理;
- (4) 拆卸时,直接通过接缝处开口将紧固螺栓拆卸,夹环将脱落,接缝间的连接解除。

因此,与传统传力杆接缝构造相比,夹环连接式传力杆接缝构造实现了可拆卸功能,并且与Cotter传力构件接缝构造相比,其结构形式简单;同时,相比于传统传力杆接缝,夹环连接式传力杆接缝经济性欠佳,但其具有可重复利用的特点,在一定程度上弥补了其经济性不足的问题。

1.2 接缝基本参数

根据图1,夹环连接式传力杆接缝的基本参数如表1所示。

2 夹环连接式传力杆接缝参数分析

2.1 有限元模型

采用ABAQUS软件构建有限元模型。水泥混凝土路面结构假定为Winkler弹性地基上的双层板结构。其中,选择两块路面板作为分析对象,路面板之间设置夹环连接式传力杆接缝;同时,为保证分析结果的合理性,考虑基层两侧横向0.75 m超宽。路面结构参数和材料参数如表2所示。

对于接缝,夹环连接式传力杆的间距为0.3 m,最外侧传力杆距离路面板侧面0.375 m;考虑实际情况,夹环连接式传力杆一端设置为滑动端,另一端设置为固定端,滑动端与固定端交替布设。夹环连接式传力杆接缝采用实体建模,钢材的弹性模量取值210 GPa,

表 1 夹环连接式传力杆接缝基本参数

Tab.1 Basic parameters for the joint with clamping ring connected dowel bar		
序号	参数	表征内容
1	夹环切割角度	为了使上、下夹环在压紧杆件卡口的同时不相互触碰,在半圆形夹环两侧切割一定的角度,切割线过夹环中轴线
2	夹环环腹宽度	用夹环环腹宽度表征夹环宽度尺寸,当夹环内部与连接卡口对应的卡槽尺寸一定时,环腹宽度越大,表明夹环尺寸越大,夹环也越厚实
3	夹环翼缘宽度	夹环翼缘宽度表征夹环的厚度,当夹环内部与连接卡口对应的卡槽尺寸一定时,夹环翼缘宽度越大,其越厚实
4	连接卡口宽度及高度	用连接卡口宽度、高度来描述连接杆件卡口的尺寸
5	杆壁厚度	杆壁厚度越大,表示杆件空心部分越少
6	杆件直径	杆件直径越大,表示杆件部分越粗
7	杆件长度	杆件长度指连接杆尾端到卡口端的长度
8	螺栓直径	忽略螺栓螺纹,用螺栓直径表示螺栓的粗细,且螺杆的预紧力与螺栓直径相关 ^[14]
9	下开口槽宽度	下开口槽横向尺寸
10	下开口槽高度	下开口槽竖向尺寸
11	下开口槽深度	下开口槽纵向尺寸

表 2 有限元模型中路面结构参数和材料参数

Tab.2 Pavement structural parameters and material parameters in the finite element model

路面结构	参数	取值
水泥混凝土路面板	板块数	2
	长×宽×厚/(m×m×m)	5.0×3.75×0.24
	弯拉弹性模量/MPa	36000
	泊松比	0.15
水稳碎石基层	长×宽×厚/(m×m×m)	10.01*×5.25×0.30
	回弹模量/MPa	2 000
	泊松比/ μ	0.20
Winkler 弹性地基	$K/(\text{MN}\cdot\text{m}^{-3})$	50

注: *接缝宽度取为 1cm。

泊松比为 0.30;在滑动端,传力杆与混凝土路面板间采用非连续接触,切向摩擦系数为 0.25,法向接触为硬接触;同时,传力杆部分和下开口槽均采用 C3D20R 单元,传力杆凸出连接部分构造较为复杂,采用四面体 C3D10 单元,螺栓采用 2mm 网格密度,夹环网格为 2.5mm,传力杆总体网格密度为 1cm,圆周上网格均分为 20 等分。最终,夹环连接式传力杆的单元划分如图 2 中夹环连接式传力杆所示。

在模型中,路面板和基层间采用非连续接触,切向摩擦系数为 5^[10],法向接触为硬接触;路面板和基层均采用 C3D8I 单元;同时,为提高模型的计算速度,路面板和基层的网格平面尺寸为 0.3m,厚度方向分为 3 层,在传力杆范围内加密至 0.03m。对于模型边界条件,约束路面板前后侧面在行车方向上的水平向位移,约束基层侧面在垂直于侧面方向上的位移^[14-15]。此外,不考虑荷载间的叠加作用,在接缝中部位置处路面板上施加 BZZ-100 的一个双轮组荷载,大小为 50kN,胎压为 0.7MP,假定轮印为长 0.192m,宽 0.186m 的矩形,双轮印间距为 0.128m。夹环连接式传力杆接缝构造

参数分析有限元模型如图 2 所示。

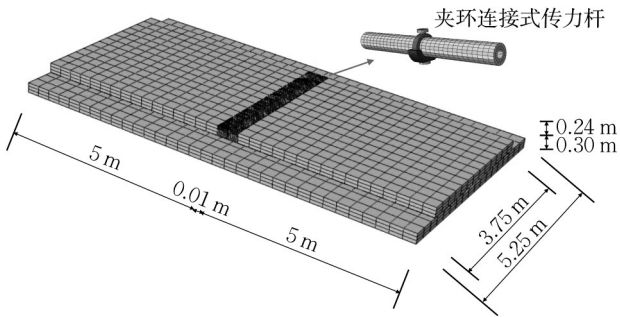


图 2 夹环连接式传力杆接缝构造参数分析的有限元模型
Fig.2 Finite element model for the analysis of structural parameters of the joint with clamping ring connected dowel bar

2.2 结果与分析

(1) 分析参数及水平

本文参照传力杆型接缝的设置方法,固定传力杆长度为 30cm,下开口槽深度取 20cm;另外,螺栓预紧力大小根据螺栓直径取值^[16];根据夹环连接式传力杆接缝的构造特征和基本参数,考虑参数对接缝性能的影响,分析了如表 3 所展示的 9 个参数,并给出了参数水平,选取 $L_{27}(3^9)$ 正交表设计正交分析试验。

(2) 夹环连接式传力杆接缝构造参数正交分析

基于正交分析表试验工况,分别以挠度传荷系数 E_r (非受荷板最大弯沉和受荷板最大弯沉之比) 和弯沉差 $\Delta\omega$ (受荷板最大弯沉与非受荷板最大弯沉之差) 表征夹环连接式传力杆接缝的传荷性能和变形协调性能,利用构建的有限元分析模型计算 27 种工况;在此基础上,开展直观分析及方差分析,结果如图 3 和表 4 所示。

表3 有限元模型的分析参数及水平

Tab.3 Analysis parameters and levels of the finite element model

分析参数		水平 1	水平 2	水平 3
夹环构件	夹环厚度/mm	10	12.5	15
	夹环内斜面坡度	0.3	0.4	0.5
	螺栓直径/mm	8	10	12
传力杆	传力杆直径/mm	30	35	40
	传力杆杆壁厚度/mm	5	10	15
	距板底距离/h	1/4	1/3	1/2
下开口槽	宽度/cm	8	10	12
	高度/cm	14	16	18
	材料模量/MPa	8 000	14 000	20 000

由图 3 和表 4 可知,挠度传荷系数随着传力杆直径、传力杆杆壁厚度、传力杆距板底距离、下开口槽模量的增大而增大,增大值在 0.5%~1.25% 之间;随下开口槽宽度的增大先减小后不变,减小值为 0.4% 左右,几乎不随其他因素变化。从影响程度上看,传力杆直径、传力杆杆壁厚度、传力杆距板底距离、下开口槽模量的影响为“高度显著影响”,而其他因素皆无显著影响,因此可忽略下开口槽宽度的影

在分析界面应力的变化规律时,当荷载加载于下开口端(荷载在右)时,选取:下开口槽材料的最大竖向压应力 S33min、下开口槽材料的竖向最大拉应力 S33max、下开口槽材料最大剪应力 S23max、混凝土端界面最大水平拉应力 S22max、侧面最大竖向拉应力 S33max 这 5 个指标;当荷载加载于混凝土端(荷载在左)时,选取:混凝土端界面最大剪应力 S23、最大竖向压应力 S33min 这 2 个指标。

图 5 是传力杆—混凝土/下开口槽界面应力及螺栓预紧力损失均值随各构造参数的变化情况。从图 5 可以看出:

(1)传力杆—混凝土界面最大压应力 S33min 随夹环厚度、夹环内斜面坡度变化较小,随传力杆直径、下开口槽宽度的增大而减小,减小值约 0.5MPa,受其他因素影响均呈上升趋势,特别是传力杆杆壁厚度影响较大,极差约为 2.0MPa;

(2)传力杆一下开口槽材料界面最大压应力 S33min 受夹环构件参数及下开口槽宽度的影响较

此外,从图 5 还可以看出,螺栓预紧力的损失值与各因素均相关。螺栓预紧力的损失值随夹环厚度、传力杆杆壁厚度、下开口槽高度的增大而减小,受夹环厚度影响最大,减小幅度为 7.5MPa;随螺栓直径、传力杆直径、下开口槽材料模量的增大而增大,螺栓直径的影响最大,增大幅度为 7.5MPa;随着

响。同时,接缝两端弯沉差随传力杆直径、传力杆杆壁厚度、传力杆距离板底的距离、下开口槽模量的增大而减小,其中,下开口槽模量的影响最大,减小值为 2 μ m 左右;几乎不随其他因素而变化。从方差分析来看,传力杆直径、传力杆杆壁厚度、传力杆距离板底的距离、下开口槽模量的影响都为“高度显著影响”,其他因素皆无显著影响。

(3)夹环连接式传力杆接缝的构件及界面应力变化规律

图 4 是夹环传力构件在荷载作用下的典型受力图。图 4 可以看出,杆件卡口、夹环的最大主应力在 100~130MPa 之间,螺栓所受拉应力在仅有预紧力作用时为 240MPa,在荷载和预紧力共同作用时为 224MPa,传力杆构件所受剪应力约为 1.35MPa,对钢材而言该应力远不及其屈服应力,因此构件的承载能力能满足路面使用需求。值得注意的是,在螺栓受荷载力后,螺栓会逐渐松动,从而致使螺栓最终失效,因此对预紧力减小值的评估应作为螺栓类构件应力的主要指标,选取的观测点位于螺栓中部。小,随传力杆直径、下开口槽高度的增大而减小,随传力杆杆壁厚度、传力杆距板底距离、下开口槽材料模量的增大而增大,下开口槽材料模量影响最大,极差约为 1.5MPa;

(3)传力杆—混凝土界面最大剪应力 S23max 随传力杆直径的增大而略有减小,随传力杆杆壁厚度的增大先增大后减小,随传力杆距板底距离的增大而增大;

(4)传力杆—混凝土界面侧向最大拉应力 S33max、混凝土界面横向最大拉应力 S22max 随传力杆距板底距离的增大而减小,减小幅度为 1.0~2.0MPa,传力杆一下开口槽材料界面最大剪应力 S23max 随传力杆距板底距离的增大而小幅增大,三者基本不受其他因素影响;

(5)传力杆一下开口槽材料界面最大竖向拉应力 S33max 随螺栓直径、传力杆距板底距离、下开口槽材料模量的增大而增大,随传力杆直径、传力杆杆壁厚度、下开口槽高度的增大而减小,幅度变化均较小。夹环内斜面坡度的增大先增大后减小,随传力杆距板底的距离、下开口槽宽度的增大先减小后增大。

2.3 接缝参数确定

根据上述有限元分析结果,综合考虑传荷性能、变形协调性能和受力状况,最终确定的夹环连接式传力杆接缝的合理参数如表 5 所示。

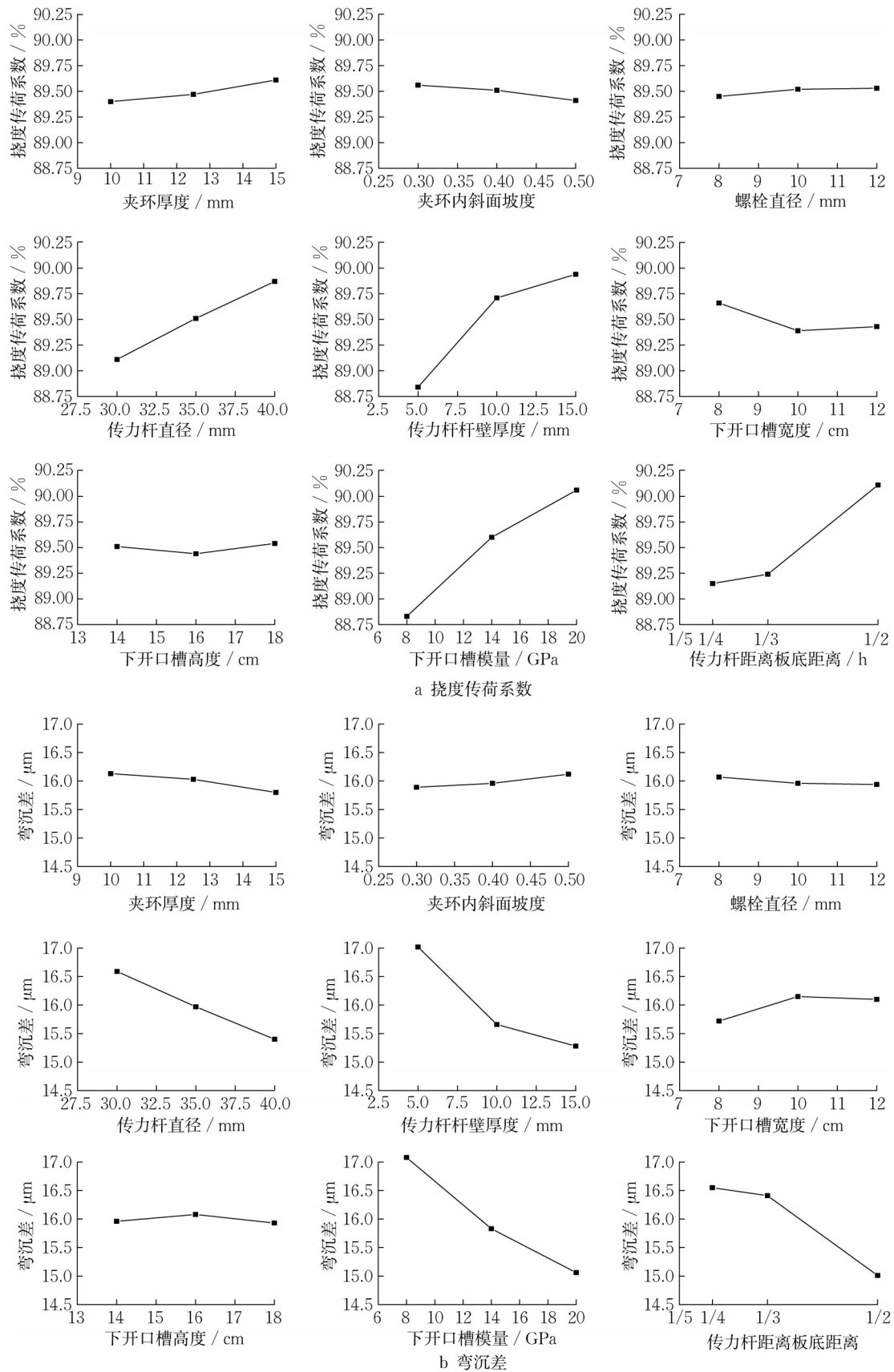


图 3 接缝传荷性能受构造参数影响的水平均值结果

Fig.3 Horizontal mean value results of influence of structural parameters on load transfer capacity of joints

表 4 接缝传荷性能受构造参数影响的方差分析结果

Tab.4 Analysis of variance results of the influence of structural parameters on the load transfer capacity of joints

构造参数		E_t		$\Delta\omega$	
		F 值	显著性	F 值	显著性
夹环构件	厚度	0.81	不显著	0.82	不显著
	内斜面坡度	0.4	不显著	0.42	不显著
	螺栓直径	0.13	不显著	0.14	不显著
传力杆	直径	10.16	高度显著	10.37	高度显著
	杆壁厚度	24.06	高度显著	24.31	高度显著
	距板底距离	19.92	高度显著	20.83	高度显著
下开口槽	宽度	1.49	不显著	1.63	不显著
	高度	0.18	不显著	0.17	不显著
	材料模量	27.11	高度显著	29.99	高度显著

注:表中 F 临界值: $F_{0.01}(2,12)=8.65, F_{0.05}(2,12)=4.46, F_{0.1}(2,12)=3.112$ 。

3 夹环连接式传力杆接缝试验验证

为了进一步验证夹环连接式传力杆的传荷性能,在室内铺设足尺的装配式水泥混凝土路面板,并通过挠度传荷系数 E_t 表征接缝传荷能力。

3.1 足尺试验方案

(1)装配式水泥混凝土路面板尺寸及传力构件布设
足尺路面板的结构,如图6所示。板块尺寸为 $2.5\times 2.5\times 0.24\text{m}^3$,使用C40混凝土浇筑。两板之间接缝预留开口的传力杆槽(槽口长25cm、宽10cm、高16cm),在槽口内设置①~⑦共7个传力杆,相邻传力杆间距为0.3m。其中,①~③为夹环连接式传力杆,直径为40mm,其余构造参数如表5所示,紧固螺栓直径为12mm;④~⑦为普通传力杆,杆件直径为40mm,长度与夹环连接式传力杆相同。

此外,为了给夹环预留操作空间,在路面板接缝端传力杆槽位置预留宽10cm,深2.5cm的开口。路面板预制好28d后,先在一侧路面板中安装传力构件,并用快凝砂浆填封传力杆槽(传力构件位于槽口间位置,竖向位于板块厚度中间)。待快凝材料形成强度后,在试槽内完成板块的拼装,将两块路面板放置于平整基层上;调整好板块的水平、高程位置后,在板底注浆,并填封另一侧板块的传力杆槽。路面板装配,如图7所示。

(3)接缝传荷能力测试

使用落锤式弯沉仪(Falling Weight Deflectometer,



图 4 夹环构件的空间应力分布特征

Fig.4 Spatial stress distribution characteristics of clamping ring

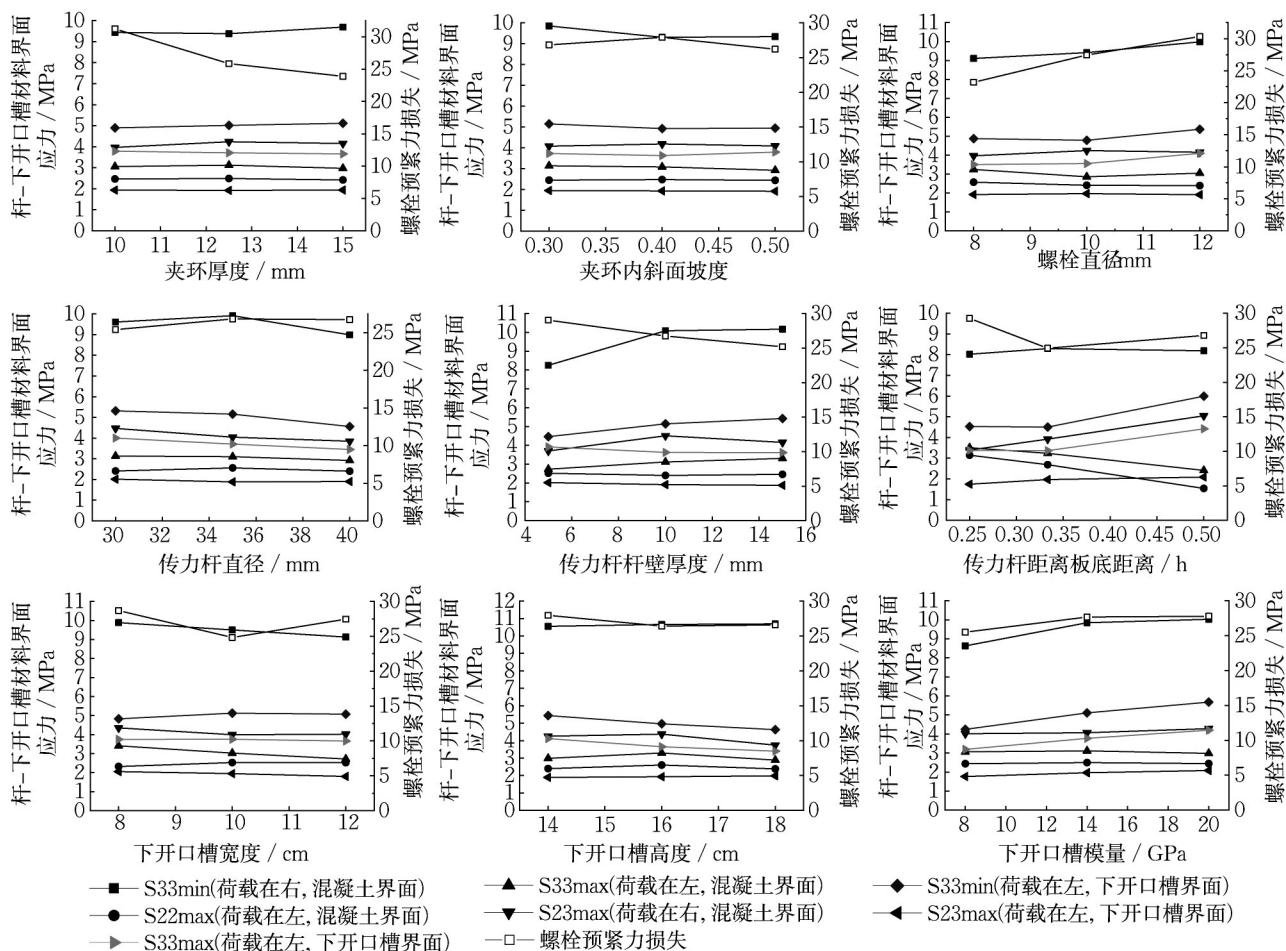


图5 构造参数对夹环连接式传力杆接缝构造界面应力的影响

Fig.5 Influence of structural parameters on interface stress of the joint with clamping ring connected dowel bar

表5 夹环连接式传力杆接缝的合理参数

Tab.5 Reasonable parameters of the joint with clamping ring connected dowel bar

影响因素	对性能的影响描述			合理取值
	传荷性能	变形协调性能	界面及构件应力	
传力杆直径	越大越好	越大越好	增大有利	考虑经济性取 35mm
传力杆长度	影响较小	影响较小	影响较小	考虑经济性取 30cm
杆距板底距离	越接近板中越好	越接近板中越好	影响有限, 降低有利,	考虑设计与施工, 置于 1/2 板厚处
开口槽材料模量	越大越好	越大越好	越小越好	考虑性能, 参考相关文献 ^[17] , 取 20GPa
开口槽高度	影响较小	影响较小	影响有限	高度方向受力核心区域为 2~3 倍, 取值 1/2 板厚 + (1~1.5) 倍传力直径
开口槽宽度	越小越好	越小越好	影响有限	横向受力区域为 2.5~3 倍, 取 2.5~3 倍传力杆直径
开口槽深度	越小越好	越小越好	影响有限	考虑灌浆和安装误差, 取 1/2 传力杆长度 + (30~50)mm
传力杆杆壁厚度	越大越好	越大越好	越小越好	超过 10mm 后性能上升慢, 取 10mm
夹环厚度	影响较小	影响较小	对螺栓应力影响大	取 12.5mm
夹环内斜面坡度	影响较小	影响较小	对螺栓应力影响大	取低水平值 0.3
螺栓直径	影响较小	影响较小	对螺栓应力影响大	取中水平值 10mm

FWD)对试验路面板的接缝传荷能力进行测试。由于 ⑤⑥普通传力杆间的接缝传荷能力。场地限制,测试时分别测试②③夹环连接式传力杆间、

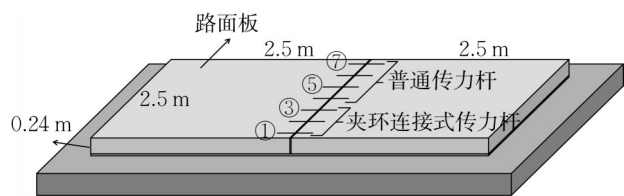


图6 足尺装配式路面板结构及尺寸

Fig.6 Structure and dimensions of the full-scale precast pavement slab

3.2 试验结果分析

对②③夹环连接式传力杆间、⑤⑥普通传力杆间这两个测点各进行两次测试,每次测试进行7级荷载测试(50kN-50kN-50kN-80kN-80kN-110kN-110kN)。将每次测的数据中第一次测试数据(50kN)及明显异常数据舍弃;使用除第一次外的数据计算接缝挠度传荷系数,获得多个接缝挠度传荷

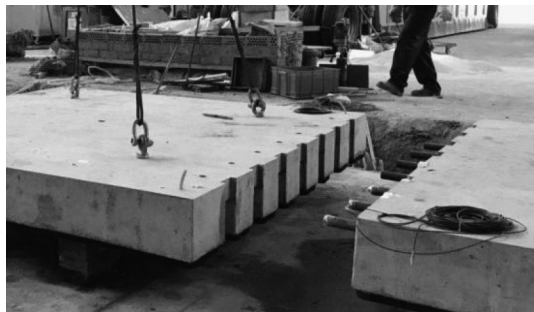


图7 路面板装配施工

Fig.7 The construction of pavement slab assembly

系数 E_t 。对 E_t 从大到小排序,将序列中下四分之一点记为 q_1 ,上四分之一点记为 q_3 ,当测试数据 E_t 不满足 $q_1 - 1.5(q_3 - q_1) < E_t < q_3 + 1.5(q_3 - q_1)$ 时,将数据剔除;将排除异常值后的数据求平均,得到该接缝的平均接缝传荷系数。测试结果如表6。

表6 FWD荷载作用下接缝传荷能力测试结果

Tab.6 Test results of load transfer capacity of joints under FWD loading

测点		夹环连接式传力杆②③之间				普通传力杆⑤⑥之间			
测试记录	当量荷载/kN	相邻板弯沉/ μm	荷载作用板弯沉/ μm	$E_t/\%$	当量荷载/kN	$\omega_2/\mu\text{m}$	$\omega_3/\mu\text{m}$	$E_t/\%$	
测试1	51.4	91.6	98.7	*107.8	51.6	90.3	83.8	92.8	
	50.6	98.7	97.9	99.2	51.7	87	81.7	93.9	
	81.1	141.9	150	*105.7	82.4	134.7	128.3	95.2	
	79.8	119.1	152	*127.6	84.2	136.2	129.3	94.9	
	107.5	236.2	186.7	79.0	106.3	172.2	161.3	93.7	
	107.3	201	197.8	98.4	108.9	186.1	161.2	86.6	
测试2	51.5	111.9	94.7	84.6	51.5	77.8	73.5	94.5	
	50.7	105.8	95.4	90.2	51.5	85	81.5	95.9	
	83.9	163.8	154.2	94.1	81.4	131.2	130.1	99.2	
	81.8	151.1	150.9	99.9	82.3	126.7	122.8	96.9	
	106.0	202.5	191.3	94.5	110.2	173.5	168.1	96.9	
	108.8	197.8	197.7	99.9	109.5	183.3	168.6	92.0	
平均挠度传荷系数				93.3%	平均挠度传荷系数				94.4%

注:接缝传荷能力大于100%星号数据为异常值。

由表6可知,除个别异常值外,测试结果总体正常;排除异常值后,夹环连接式传力杆的接缝挠度传荷测试结果为79.0%~99.9%,平均挠度传荷系数为93.3%,夹环连接式传力杆个别测试的挠度传荷系数较低,其对应的当量荷载也较低,可能是由于设备测量误差引起的;排除异常值后,普通传力杆的接缝挠度传荷测试结果为86.6%~99.2%,平均挠度传荷系数为94.4%。夹环连接式传力杆在路面板中的传荷能力略低于普通传力杆,反映出夹环连接式传力杆因空心杆件、接缝处留有开口,传荷能力有所下降;总体而言,本文提出的夹环连接式传力杆接缝的传荷能力与普通传力杆接缝类似,能够承担接缝间的荷载传递,是一种较为有效的接缝传力构件。

4 结论

- (1)夹环连接式传力杆接缝的挠度传荷系数随着传力杆直径、传力杆杆壁厚度、传力杆距板底距离、下开口槽模量的增大而增大,随下开口槽宽度的增大先减小后不变,几乎不受其他因素影响。
- (2)夹环连接式传力杆接缝的接缝两端弯沉差随传力杆直径、传力杆杆壁厚度、传力杆距离板底的距离、下开口槽模量的增大而减小,其中下开口槽模量的影响最大,几乎受其他因素影响。
- (3)数值分析表明,夹环连接式传力杆接缝的构件承载能力能满足路面使用性能需求,同时基于下开口槽、传力杆、夹环构件等构造参数对传力杆—混

凝土和传力杆一下开口槽界面应力的响应分析,明确了其合理构造参数。

(4)足尺试验表明,夹环连接式传力杆接缝的传荷能力略低于普通传力杆接缝,但总体能满足路面接缝传荷性能需求,且拆卸拼装便捷,是一种较为有效的接缝传力构件。

本文仅对夹环连接式传力杆接缝传荷能力的短期性能开展了试验分析,后续建议开展室内和现场长期性能试验,以探究夹环连接式传力杆接缝的耐久性,从而推动其工程应用。

作者贡献声明:

赵鸿铎:论文审定,论文整体结构与研究方法指导;

涂巧毓:论文撰写,文献调研以及图表绘制;

马鲁宽:研究思路和技术指导;

赵举飞:有限元建模与参数分析;

钟 盛:文献调研与有限元建模。

参考文献:

- [1] TAYABJI S, YE D, BUCH N. Precast concrete pavement technology [M]. Washington DC: Transportation Research Board, 2013.
- [2] 王俏. 水泥混凝土路面预制拼装快速修复技术研究[J]. 长沙交通学院学报, 2007, 23(4): 33.
WANG Qiao. Study of rapid repair technology for precasted assembling slab of cement concrete pavement [J]. Journal of Changsha Communications University, 2007, 23(4): 33.
- [3] KIDA Y, KOIZUMI J, NOUMI S, *et al.* Cotter and quick-joint method for shield-segment jointing [C]//Proceedings of Tunnel Engineering, JSCE. Tokyo: Japan Society of Civil Engineers, 1993, 3: 281-286.
- [4] AKAMINE F, HACHIYA Y. Load transfer mechanism of compression joint at precast PC slab pavements [J]. Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers, 2000 (662): 217.
- [5] ITO A, YAMAWAKI H, TANAKA H, *et al.* Basic examination about the design of the high strength RC precast pavement slab in airport [J]. Journal of Pavement Engineering, 2003(8): 173.
- [6] HACHIYA Y, MATSUZAKI K, ITO A, *et al.* Application of high strength RC precast slab pavements in airports [J]. Journal of Pavement Engineering, 2003(8): 183.
- [7] SMITH P. Removable dowel connector and system and method of installing and removing the same; U.S. Patent 8, 840,336[P]. 2014-9-23.
- [8] NA Opkin, SEO Taesuk, KIM Junhyung, *et al.* Performance test of high-durable precast concrete pavement system [J]. Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation, 2016, 16 (3): 221.
- [9] DOMMELEN A E, KOOIJ J, HOUBEN L J M, *et al.* LinTrack APT research supports accelerated implementation of innovative pavement concepts in the Netherlands [C]//2nd Int. Conference on Accelerated Pavement Testing. Minneapolis. Twin Cities: University of Minnesota, 2004: 1-19.
- [10] KOHLER E, DU PLESSIS L, SMITH P J, *et al.* Precast concrete pavements and results of accelerated traffic load test [C]//International Conference on Optimizing Paving Concrete Mixtures and Accelerated Concrete Pavement Construction and Rehabilitation. Atlanta: [S.n.], 2007: 263-281.
- [11] 陈昊昱, GUO Edward, 李琛琛, 等. 刚性铺面的平衡刚度设计理念与原型结构[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2022, 50(9): 1303.
CHEN Haoyu, GUO Edward, LI Chencheng, *et al.* Balance-stiffness design concept and prototype structure of rigid pavement [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2022, 50(9): 1303.
- [12] 钟盛. 可拆装式刚性铺面的接缝构造及性能[D]. 上海: 同济大学, 2018.
ZHONG Sheng. Research on structure and behaviour of joint of removable precast concrete pavement [D]. Shanghai: Tongji University. 2018.
- [13] 赵举飞. 装配式复合路面接缝及性能评价[D]. 上海: 同济大学, 2021.
ZHAO Jufei. Precast composite pavement joints and performance evaluation [D]. Shanghai: Tongji University. 2021.
- [14] 官盛飞. 水泥混凝土路面路基工作状态与设计指标[D]. 上海: 同济大学, 2009.
GUAN Shengfei. The working status and design index of subgrade under PCC pavement [D]. Shanghai: Tongji University. 2009.
- [15] 赵炜诚, 许志鸿, 黄文. 混凝土面层与贫混凝土基层的层间作用对荷载应力和弯沉的影响[J]. 中国公路学报, 2003, 16(4): 9.
ZHAO Weicheng, XU Zhihong, HUANG Wen. Influence of load stress and deflection on interfacial interaction between portland concrete pavement and lean concrete base [J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(4): 9.
- [16] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 重型机械通用技术条件 第10部分: 装配 JB/T 5000.10-2007[S]. 北京: 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 2008.
National Development and Reform Commission of PRC. Heavy mechanical general technical specification — Part 10: Assembling JB/T 5000.10-2007 [S]. Beijing: National Development and Reform Commission of PRC, 2008.
- [17] SHOUKRY SN, FAHMY M, PRUCZ JG. Validation of 3DFE analysis of rigid pavement dynamic response to moving traffic and nonlinear temperature gradient effects [J]. International Journal of Geomechanics, 2007, 1(7): 16.