

简支T梁桥平板型桥面连续受力特性研究

王城泉^{1,2}, 邓国良^{1,2}, 王孔杰², 王新泉^{1,2}, 李 泉², 骆大江³, 黄毅方⁴

(1. 华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013; 2. 浙大城市学院工程学院, 浙江 杭州 310015;
3. 杭州众邦基础工程有限公司, 浙江 温州 310002; 4. 浙江大学工程师学院工程创新与训练中心, 浙江 杭州, 310015)

摘要:为解决传统多跨简支梁桥因混凝土开裂和设计缺陷导致的耐久性下降和腐蚀问题,文章提出了一种新型钢-混凝土组合平板型桥面连续构造(简称平板型桥面连续)。以一座三跨简支梁桥为工程背景,通过建立精细化有限元模型对平板型桥面连续和传统拉杆式桥面连续的简支梁桥在不同车辆荷载下的变形和受力特性进行了有限元数值仿真分析。结果显示,在跨中荷载和偏载作用下,传统拉杆式桥面连续的最大拉应力分别为1.16 MPa和4.5 MPa,而新型平板型桥面连续则表现为上表面处于受压受力状态。此外,对比分析表明,在超载和抗倾覆条件下,采用新型平板型桥面连续的简支梁桥,其主梁跨中横断面挠度差分别减少了24.50%和13.43%。新型平板型桥面连续能够有效防止桥面发生开裂,同时在提高桥梁抗倾覆方面具有明显优势,为多跨简支梁桥设计与改造提供了新思路。

关键词:桥面连续;钢-混凝土组合结构;简支梁桥;力学性能;倾覆分析

中图分类号:U443

文献标志码:A

Research on the Stress and Deformation Characteristics of Simply-Supported T-Girder Bridge Featuring a Continuous Flat Deck

Wang Chengquan^{1,2}, Deng Guoliang^{1,2}, Wang Kongjie², Wang Xinquan^{1,2}, Li Xiao²,
Luo Dajiang³, Huang Yifang⁴

(1. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;
2. Department of Civil Engineering, Hangzhou City University, Hangzhou 310015, China; 3. Hangzhou Zhongbang Basic Engineering Co., Ltd, Hangzhou 310011, China; 4. Engineering Innovation and Training Center, College of Engineers, Zhejiang University, Hangzhou 310015, China)

Abstract: This study aims to address the reduced durability and corrosion issues of traditional multi-span simply supported beam bridges caused by concrete cracking and design flaws. A novel steel-concrete composite flat slab continuous bridge deck structure (referred to as the flat slab continuous) is proposed, which effectively prevents surface cracking by subjecting the surface concrete to compression under positive bending moments. With a three-span simply supported beam bridge as the engineering context, this research conducted finite element numerical simulation on the deformation and force characteristics of the flat slab continuous and the traditional tie-rod continuous simply supported beam bridges under various vehicle loads by establishing a detailed finite ele-

收稿日期:2024-11-01

基金项目:浙江省自然科学基金项目(LTGG23E080001)

ment model. The results indicate that under mid-span load and off-center load, the maximum tensile stresses for the traditional tie-rod continuous were 1.16 MPa and 4.5 MPa, respectively, in contrast, the upper surface of the novel flat slab continuous was in compression. Furthermore, comparative analysis shows that under overload and anti-tipping conditions, the deflection difference at the mid-span cross-section of the main beam for the flat slab continuous simply supported beam bridge was reduced by 24.50% and 13.43%, respectively. The findings demonstrate that the flat slab continuous can effectively prevent the occurrence of deck cracking and has a significant advantage in improving the bridge's anti-tipping performance, offering a new perspective for the design and retrofitting of multi-span simply supported beam bridges.

Key words: link slab; steel-concrete composite structure; simply-supported girder bridge; mechanical performance; bridge overturning analysis

传统桥梁建设中,通常需要在以下部位设置伸缩缝:相邻梁体的端部之间、梁体端部与桥台之间、悬臂梁的两端以及桥梁的铰接位置,以便桥梁结构能够适应因温度变化导致的梁体膨胀和收缩,以及由车辆荷载引起的梁端转动和纵向位移^[1]。然而在长期的使用过程中,简支梁桥由于其结构特点,逐渐暴露出一些缺陷^[2]。为解决伸缩缝对桥梁所带来的不利影响,多跨连续梁桥的构造形式被提出。

多跨连续梁桥具有变形小、受力合理、行车平稳舒适、抗震性能优越、造型简洁优美等特点,因而在众多桥型中,多跨连续梁桥成为最受欢迎的桥型之一。但是,连续梁桥也有较为明显的缺点:首先,其施工过程相比于装配简支梁而言更为繁琐复杂、造价更高,其次,对于跨径较大的超静定结构连续梁,在恒载和活载的作用下,支点处的负弯矩通常超过跨中正弯矩,使得受力情况变得更加复杂^[3-5]。国内外诸多学者专家针对桥面连续构造有关问题的研究工作已有很多,这些桥面连续结构体系主要分为3类,包括主梁梁体连续的结构体系、主梁梁体简支而桥面铺装连续的结构体系和主梁梁体简支桥面板连续的结构体系。其中,主梁梁体结构简支桥面板连续的结构体系的相关研究工作有待进一步深入开展。

20世纪70年代,英国开始无缝梁桥领域相关工作的研究。张亮等^[6]对位于湖南境内的常德至益阳高速公路分离式立交桥结构进行了受力分析,这是我国的第一座无缝梁桥。Caner等^[7]研究了桥面板

连续构造的性能,提出了一种简单的桥面板连续构造的设计方法并给出了3个设计实例。王黎明等^[8]提出将PFRC(聚丙烯纤维混凝土)应用于桥面连续施工的技术,通过实验研究发现PFRC具有加强桥面连续构造的抗渗性、韧性、抗冻性和抗疲劳性的功能。KIM等^[9]进行了耐久混凝土桥面连接板的试验,比较了考虑材料、尺寸和钢筋因素的纤维增强水泥基复合材料(ECC)与传统钢筋混凝土连接板的挠度承载力和疲劳性能。国外许多学者也对ECC在桥梁缝中的应用做了相关研究^[10-12]。Okeil等^[13]推导了桥面连续部位的曲率变形计算公式,并通过验证确认了该算法的合理性,为连续桥面结构的设计提供了计算基础。Wing等^[14]根据一种新型桥面连续装置的桥梁远程监测数据及荷载试验结果,验证了在交通荷载和温度荷载共同作用下,确认了桥面连续装置设计的基本需。刘丽芬^[15]以工程实例为基础,系统研究了伸缩缝破坏的影响因素并对其进行局部受力计算,提出并分析了一种简支梁桥面部分连续梁新型构造。Abe等^[16]通过实验研究,对碳纤维增强聚合物(CFRP)材料的连续装置进行了疲劳性能的评估。认为CFRP材料的应用能够有效提升桥面连续装置的结构性能。潘志炎等^[17]通过有限元分析比较了刚接式和植入式桥面连续构造的力学行为,发现植入式构造能有效分散混凝土形变,降低桥面应力和应变。王岗等^[18]发现简支梁的位移和变形是桥面破坏的关键因素,并提出使用拱型加劲钢板来支撑桥面连续缝,以优化其受力性能。林

幸福等^[19]建立了带转动弹簧的简支梁模型,分析了主梁与桥面连续构造在车辆荷载下的表现。王城泉^[20]使用ABAQUS软件对钢-混凝土组合桥面连续构造进行了有限元模拟和疲劳试验,结果表明该构造能有效防止混凝土开裂。许洁炜等^[21]等基于结构力学原理,提出了一种简化的桥面连续构造计算分析模型,该模型对钢筋设计具有实际指导意义。Gergess^[22]研究了粘结连接板在不同负载下的性能,并分析了其对剪力和弯矩分布的影响。他还根据美国PCI标准,推导出了三跨对称桥梁的闭合解,并进行了参数研究。崔人文^[23]通过构建非线性交互式模型系统,对桥面板连续结构中的简支轻型T梁体系进行了研究,并分析了力学模型、桥面板连续区的最佳长度以及配筋设计方案。徐行军^[24]以某简支T梁桥为项目依托,改进了现有简支梁桥粘贴钢板加固技术。王清泉等^[25]提出了一种新型桥面连续结构设计,针对倒T形盖梁的简支组合槽梁进行了力学分析,发现竖向支承刚度、无粘结长度和桥面板厚度是影响其受力性能的关键参数。

鉴于上述研究,本文以一座三跨简支梁桥为背景进行有限元数值仿真分析,在桥梁上同时建立拉杆型桥面连续和平板型桥面连续,采用ABAQUS大型有限元仿真模拟软件,研究钢-混凝土组合平板桥面连续桥在车辆荷载超载50%的情况下的力学响应,同时还研究了在超载偏载作用下,钢-混凝土组合平板型桥面连续构造相比于伸缩缝对桥梁上部结构的抗倾覆作用效果。

1 平板型桥面连续介绍

本文针对的一种平板型桥面连续构造,其示意图如图1,图2所示,其组成部分包括钢板、剪力钉、桥面连续混凝土铺装、U形排水槽、不锈钢板、聚四氟乙烯支座(简称F4板)和连接钢筋。该钢-混凝土组合平板型桥面连续可以有效阻止T梁端部转角位移和纵向伸缩位移这两个主要因素对桥面连续表面混凝土带来的破坏,避免桥面连续上表面混凝土受到过大拉伸应力而出现裂纹,另外,还通过插入不锈钢板设置人工分割缝、F4板滑动支座、连接钢筋等构造设施将平板型桥面连续结构受力模型由受拉构件转变为受弯构件,进而达到桥梁在跨中活载作用下,平板型桥面连续结构在正弯矩的作用下,导致其表面混凝土承受压缩效应。

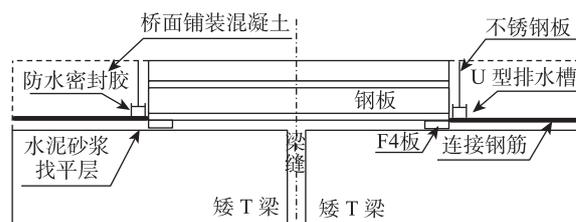


图1 平板型桥面连续构造示意图

Fig. 1 Schematic of the flat slab link slab

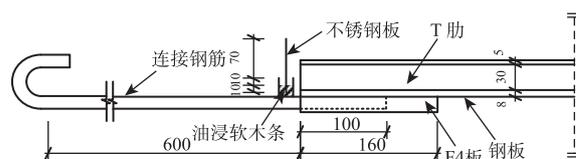


图2 试验构件构造设计图(单位:mm)

Fig. 2 Design details of the test specimen (Unit: mm)

2 多跨简支T梁桥平板型桥面连续构造有限元数值仿真分析

2.1 工程背景

预应力混凝土矮肋T梁拥有相对较小的主梁间距,较优的受力模式,以及较低的建筑高度,其宽厚的腹板为预应力钢绞线提供了一定的保护层厚度,大大提高了桥梁结构的耐久性。所以本文针对钢-混凝土组合式桥面连续在矮T梁桥中的应用进行了有限元分析。

本节中的有限元模型以某一座3跨预应力混凝土矮T梁通道桥为工程背景,按图3所示的T梁桥设计图建造,图中为跨径16m的预应力混凝土简支T梁,横桥宽10m(0.5m宽护栏+0.75m宽路缘带+7.5m宽道路+0.75m宽路缘带+0.5m宽护栏),主梁高度为0.78m,翼缘板宽度为1.2m,腹板宽度为0.35m,横隔板厚度为0.2m。桥涵的车辆设计荷载为公路-I级,桥面铺装系统由以下层次构成:10cm厚的沥青混凝土桥面铺装层,防水材料层,10cm厚的C40混凝土找平层。主梁的梁体采用强度等级为C50的混凝土进行浇筑,而桥面连续混凝土的强度等级为C40,纵向钢筋和构造钢筋均选用HRB

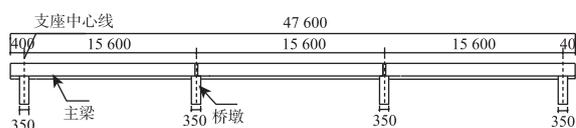


图3 桥梁设计简图(单位:mm)

Fig. 3 Sketch of bridge design (Unit: mm)

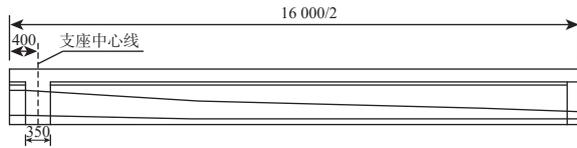


图4 T梁构造图(单位:mm)
Fig. 4 T-girder structure (Unit: mm)

335级别的热轧带肋钢筋,预应力筋采用 $9 \times \varphi_s \times 15.2$ mm高强度低松弛预应力钢绞线,张拉控制应力 $\sigma_{con} = 0.75f_{pk}$,预应力采用后张法施工。

2.2 三跨简支T梁桥全桥有限元模型建立

利用ABAQUS有限元软件对上述工程背景中跨径为16 m的T梁进行数值仿真模拟,全桥共计3跨,每跨包含7根主梁,跨1和跨2之间布置钢-混组合平板型桥面连续构造,作为对比试验,跨2和跨3之间布置拉杆式桥面连续构造,砼采用C3D8R实体单元(8节点6面体),普通钢筋和预应力筋采用T3D2桁架单元(2节点线性3维桁架单元),钢筋与砼的连接关系在Interaction(相互作用)模块中的Create Constraint(创建约束)选项中采用Embedded region(嵌入)的关系进行处理,梁体上表面与F4板以及人工分隔缝之间在法向上采用Hard contact(硬接触连接关系),钢板与桥面连续砼采用Tie(绑定连接方式),简支的边界条件采用Load(荷载)模块下

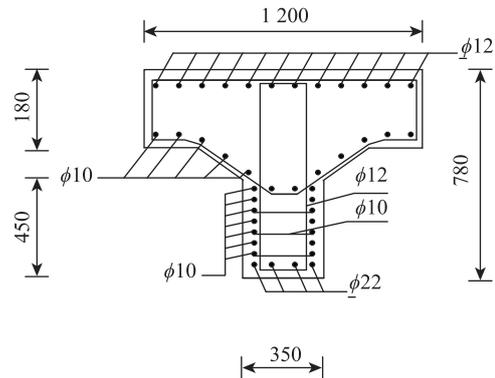


图5 T梁配筋图(单位:mm)
Fig. 5 T beam reinforcement (Unit: mm)

的Create boundary condition(创建边界条件)中的Displacement/Rotation(位移转角)选项,限制其支座所在中心线处的 x 和 y 方向的线位移,从而达到限位支座的作用。本文模型研究重点为桥面连续构造部分,因此在桥面连续部分进行网格细化处理。该模型共计使用了159 253个节点,104 734个实体单元,其中包括103 599个C3D8R实体单元和1 135个,划分单元的最大尺寸为0.2 m、最小尺寸0.024 m。

图6所示为全桥ABAQUS有限元模型网格划分示意图,本文重点研究桥面连续,因此对平板型桥面连续拉杆式桥面连续采取了较为密集的网格划分模式。

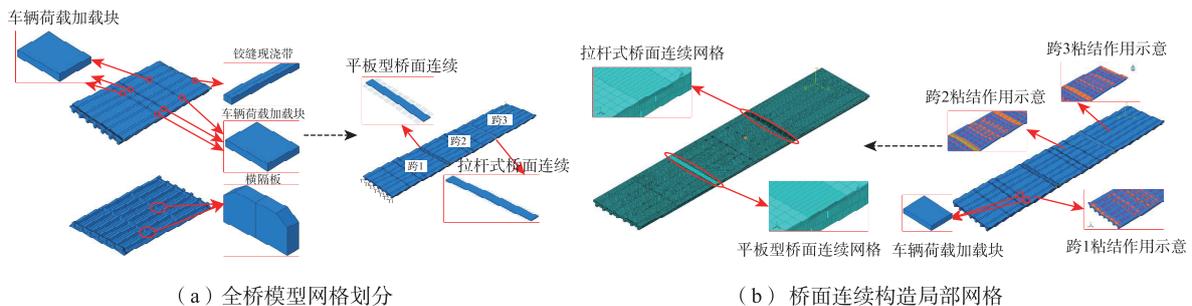


图6 ABAQUS有限元模型网格划分示意图(注意图6排通栏图)
Fig. 6 ABAQUS finite element model meshing diagram

2.3 车辆荷载工况设置

为了分析不同受力状态下简支T梁桥和平板型桥面连续的受力的变形状态,该有限元仿真模型采用30 t重载重卡车作为加载模拟条件(引用桥梁通用设计规范中的加载车辆尺寸图),通过改变桥面上刚性加载块的位置及其对应的荷载加载顺序以模拟仿真不同的荷载工况和加载级别。

本文中共计采用4种活载作用工况,每种工况自T1号梁至T2号梁的方向分3级加载,工况2

是基于工况1在跨2中部自T1号梁至T2号梁的方向分3级逐级加载,工况4是基于工况3在跨4中部自T1号梁至T2号梁的方向分3级逐级加载,加载级别编号见表1和表2,车辆荷载布置如图7及图8所示。

表1中1-1代表工况-加载级别,工况1代表在跨1横向加载一辆重载卡车,加载级别2代表在跨1加载两辆重载卡车。工况3以此类推,加载卡车顺序及位置如图8所示。

表1 单跨加载(工况1、3)级别编号表

Tab.1 Double-span load level number

工况-加载级别编号	工况	工况-加载级别编号	工况	加载量
1-1	跨1加载	3-1	跨3加载	30 t
1-2	跨1加载	3-2	跨3加载	30 t+30 t
1-3	跨1加载	3-3	跨3加载	30 t+30 t+30 t

表2 双跨加载级别编号表

Tab.2 Double-span load level number

工况-加载级别编号	工况	工况-加载级别编号	工况	加载量
2-4	跨1、跨2加载	4-4	跨2、跨3加载	90 t+30 t
2-5	跨1、跨2加载	4-5	跨2、跨3加载	90 t+30 t+30 t
2-6	跨1、跨2加载	4-6	跨2、跨3加载	90 t+30 t+30 t+30 t

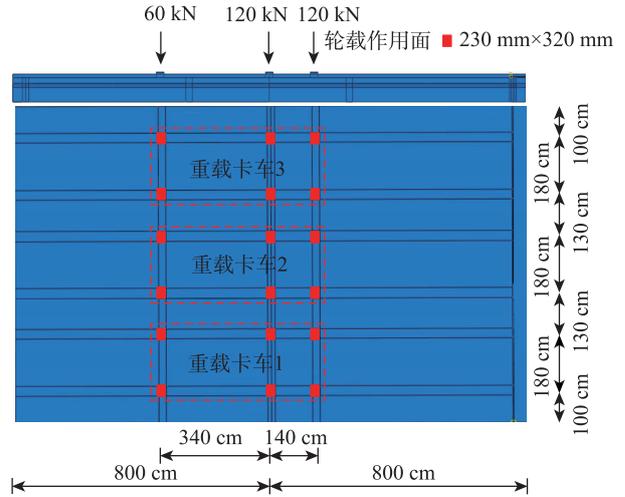


图8 车辆荷载作用布置图

Fig. 8 Layout of vehicle load action

表2中2-4代表工况-加载级别,工况2代表在跨1横向加载了三辆重载卡车的情况下,继续在跨2上加载重载卡车,加载级别代表桥梁上重载卡车的总数,加载卡车顺序及位置如图8所示。

表2中4-4代表工况-加载级别,工况4代表在跨3横向加载了三辆重载卡车的情况下,继续在跨2上加载重载卡车,加载级别代表代表桥梁上重载卡车的总数,加载卡车顺序及位置如图8所示。

图7中工况1为钢-混组合平板型桥面连续构造偏载分析,工况3为拉杆式桥面连续构造偏载分析,目的是分析桥面连续构造在非对称荷载作用下的应力和形变分布;工况2和工况4分别对桥面连续构造两侧跨中施加对称车辆荷载,以分析桥面连续构造表面混凝土是否会开裂。

2.4 平板型桥面连续和拉杆式桥面连续受力对比分析

2.4.1 工况2、4下的计算结果分析

工况2、4为钢-混组合平板型桥面连续和拉杆式桥面连续在两侧跨中荷载作用下的受力特性分析,两侧桥跨共分六级进行加载,最后一级加载后的全桥的应力云图如图9,由图可以看出桥面连续两侧桥跨在荷载作用下产生向下弯曲变形,两侧挠度基本一致。

由图9、图13可得,各片T梁的跨中竖向位移随着加载级别的增加而增大,且在图10和图11中可明显看出横向各片T梁存在荷载横向分布规律,车辆荷载最先施加在跨1的T1号梁上附近,所以该跨主梁先发生向下的位移变形且T1号梁体的竖向位

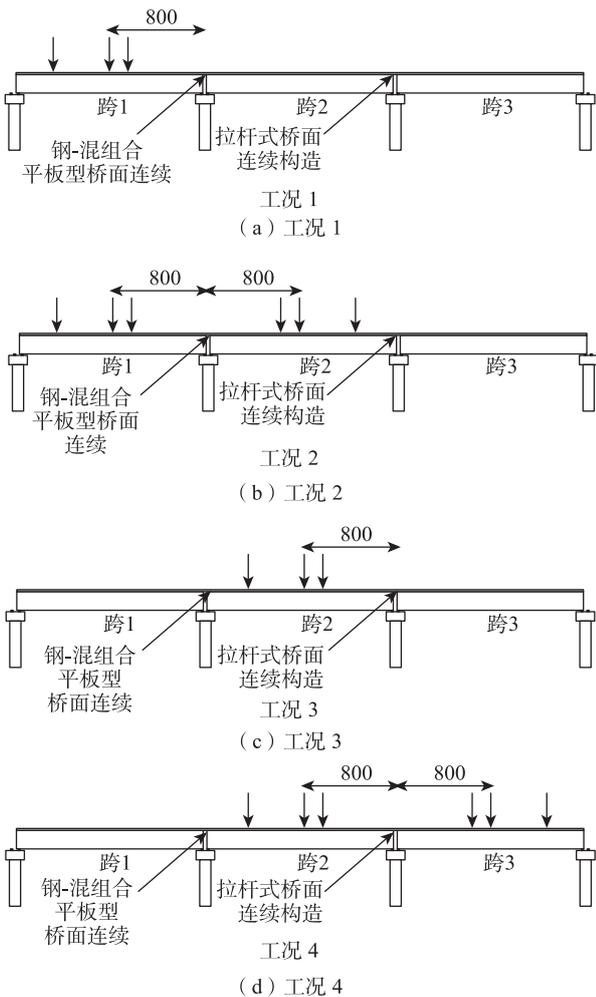


图7 车辆荷载工况布置图

Fig. 7 Vehicle load condition layout

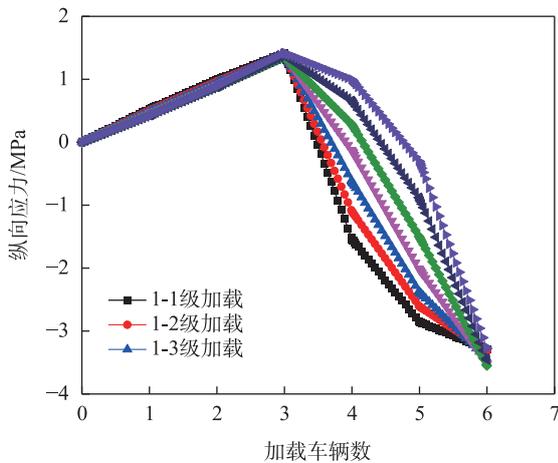


图9 跨1中竖向位移曲线

Fig. 9 Vertical displacement curve in span 1

移增幅最大,最终各跨横桥向车辆荷载施加完毕后,各T1~T7号梁的竖向位移基本相同;除此之外,由图9可以发现跨1和跨2加载完毕后,由于拉杆式桥面连续构造的连续钢筋会对相邻跨3的简支梁产生拉力,所以加载会对临跨的竖向位移会产生影响。从图9、图13可以看出跨2完成前三级的加载后,图中的跨3主梁竖向发生了向上的弯曲变形,等跨3中后3级车辆荷载施加时跨2向下的竖向位移会发生减小,由此可拉杆式桥面连续构造对简支梁桥的承载力也有一定的提高。当跨2的后3级车辆荷载施加时,跨1的向下竖向位移会减小,由此可见钢-混组合平板型桥面连续构造对简支梁桥的承载力也有一定的提高。

在工况2中,车辆荷载在跨2两侧对称施加,形成均匀分布的荷载,使桥面连续构造的表面混凝土保持受压状态,压应力增加。对称荷载使桥梁受力更加均衡,平板型桥面连续构造的刚度有效抵抗荷载,避免了开裂。随着荷载逐级增加,桥面连续构造的承载能力得到充分利用,展现出良好的力学性能,表明其能有效应对对称荷载的挑战。

在工况4中,超载荷载导致跨2桥梁出现显著下弯。这种超载使桥面连续构造的拉应力超出设计标准,尤其是拉杆式构造在偏载下拉应力分布不均,增加开裂风险。荷载还导致桥面连续构造产生弯矩,影响结构性能。由此可见超载、受力不均和弯矩效应共同导致拉杆式桥面连续构造性能下降。

由图10也可以看出钢-混组合平板型桥面连续构造的表面砼的纵桥向应力全部为压应力,其

最大值达到了1.66 MPa,相对于工况1的偏载作用下的压应力有所增加,能有效防止其表面混凝土开裂。拉杆式桥面连续构造在跨2的3级荷载加载完毕后,其表面砼存在拉应力,最大拉应力值达到4.5 MPa,相比于钢-混组合平板型桥面连续构造,其存在开裂的可能性。平板型桥面连续上表面砼均处于受压状态,且压应力分布范围很大也较为均匀,对阻止桥面连续表面的砼防开裂非常有利,而拉杆式桥面连续构造的上表面砼还存在较大的拉应力,存在开裂的可能性;正弯矩的作用桥面连续下表面砼处于受拉状态,但是由于底部钢板为主要受拉构件,因此下表面作用的拉应力最大值仅为1.66 MPa。

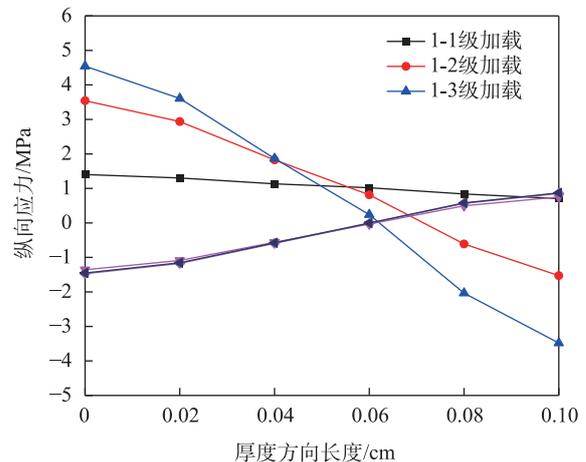


图10 两种桥面连续构造沿厚度方向纵向应力曲线
Fig. 10 Longitudinal stress curve along thickness direction of two kinds of link slab structure

图11为平板型桥面连续和拉杆式桥面连续在工况2和工况4加载过程中沿纵桥向表面应力的分布曲线,由图中曲线可以看出平板型桥面连续在加载过程中全表面均处于受压状态,且不受偏载工况的影响;而拉杆式桥面连续除偏载时有部分区域存在压应力外,其他区域均处于拉应力状态。由此可以验证钢-混凝土组合平板桥面连续结构在T梁桥中的应用可行性。

2.4.2 工况1、3下的计算结果分析

工况1、3条件下,加载车辆依次自T1号梁~T7号梁的方向加载跨1的中部,跨1主梁从T1号梁~T2号梁逐渐产生向下的竖向位移,跨中部竖向位移达到了最大值,此时钢-混组合平板型桥面连续和拉杆式桥面连续均处于单跨偏载状态;横桥向荷载逐步

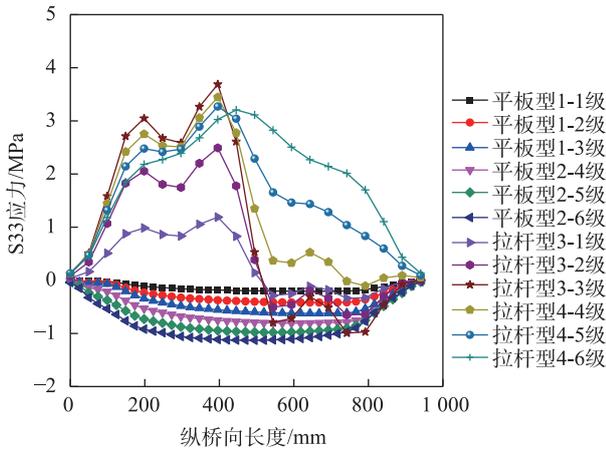


图 11 桥面连续沿纵向分布 S33 应力对比曲线
Fig. 11 The stress contrast curve is continuously distributed along the longitudinal link slab

分布均匀,由于横隔板的存在,矮T梁桥的横向刚度较大,由图 12 可观察到,工况 1 条件下直至加载到 1~3 级各片主梁的挠度基本趋于一致,工况 2 条件下直至加载到 2~10 级各片主梁的挠度基本趋于一致。由图 12 和图 13 还可观察到,非荷载作用跨梁体会产生一定的向上竖向位移,这是因为存在桥面连续构造的简支梁桥其基本受力形式虽然保持简支梁的特性,但钢-混组合式平板型桥面连续构造的存在会对临跨的梁体产生高于其中性轴界面的拉力,进而使得临跨梁体产生向下的弯矩,并处于上部受拉、下部受压状态。

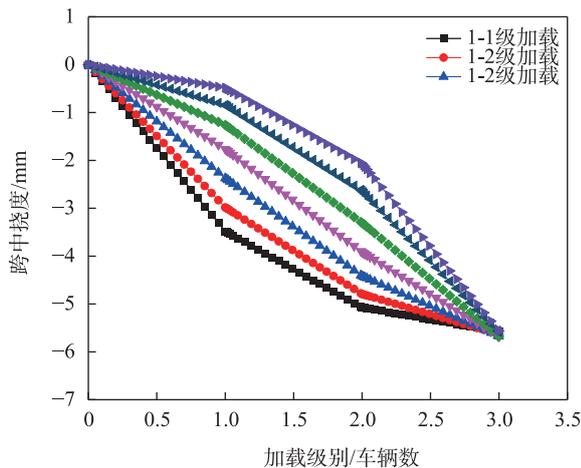


图 12 工况 1 矮 T 梁竖向位移与加载等级关系曲线
Fig. 12 Operating condition 1 Relation curve between vertical displacement and loading grade of low T-girder

在工况 1 中,车辆荷载集中施加于跨 1 中部,导致 T1 号~T2 号梁之间竖向位移逐渐增大,主要是由

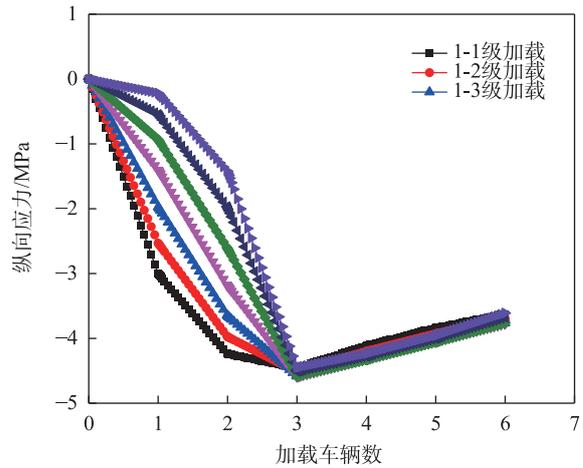


图 13 工况 3 矮 T 梁竖向位移与加载等级关系曲线
Fig. 13 Operating condition 3 relation curve between vertical displacement and loading grade of low T-girder

于中部荷载使主梁受压下弯。横隔板增强了桥梁横向刚度,使得荷载作用下的梁体变形更均匀,减少了梁间挠度差异。桥面连续构造还使得非荷载区梁体受拉,产生向上变形。荷载分布、增强的横向刚度和桥面连续构造共同作用,导致了跨 1 主梁的竖向位移及非荷载区梁体的变形。

在工况 3 中,车辆荷载集中于跨 2 中部,导致 T1~T2 号梁竖向位移增加,主因是中部荷载使主梁承压下弯。拉杆式桥面连续构造传递荷载至相邻跨,影响其变形。横隔板增强横向刚度,使跨 2 主梁挠度一致。荷载集中、连续构造影响及横隔板刚度共同作用,导致跨 2 主梁及非荷载区梁体挠度变化。

在工况 1 和工况 3 的各级加载过程中,各片矮 T 梁的竖向挠度随着荷载等级提升的变化曲线如图 12、图 13 所示。随着横桥向车辆荷载的逐级增加,直接作用车辆荷载的梁体竖向挠度变化最大,非直接作用车辆荷载的梁体竖向挠度较小。如前文所述,由于横隔板的横向刚度加强作用,在加载完成后,T1~T7 号矮 T 梁的跨中竖向位移基本保持一致。说明拉杆式桥面连续的偏载工况分析与平板型桥面连续的偏载分析处于相同的荷载条件。

为更直观明了的研究钢-混组合平板型桥面连续构造在工况 1、3 条件下的纵桥向和厚度方向的应力分布情况,在 ABAQUS 有限元仿真模型中沿钢-混组合平板型桥面连续构造的纵桥向上表面中心线提取其纵向应力变化曲线,如图 14 所示;沿钢-混平板型桥面连续厚度中心线提取其纵向应力变化

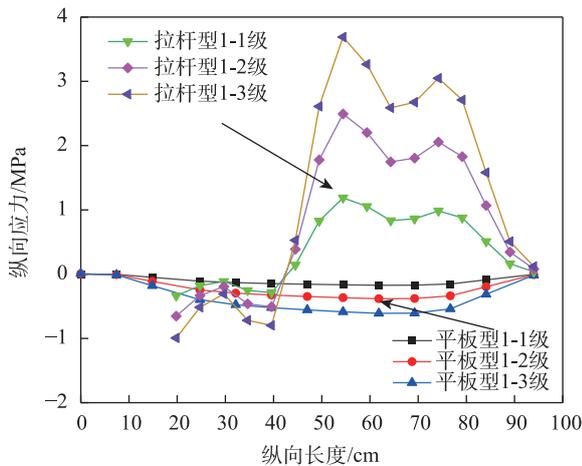


图14 两种桥面连续构造沿纵向长度应力变化曲线

Fig. 14 Continuous stress curve along longitudinal length of two kinds of link slab

曲线,如图15所示。图中的曲线与上文的分析完全吻合,且由两图曲线可以看出,拉杆式桥面连续的表面砼同时存在拉应力和压应力,其表面砼的拉应力最大值达到3.69 MPa,已超过拉杆式桥面连续构造表面砼的极限抗拉强度,表面砼存在开裂现象;其表面最大压应力达到1.16 MPa其在矮T梁桥中发挥的作用与预期保持高度一致,因此拉杆式桥面连续构造的表面混凝土更容易开裂,而平板型钢-混组合桥面连续构造表面混凝土受压,不会发生开裂现象,且相比于拉杆式桥面连续,它的受力更加均匀。

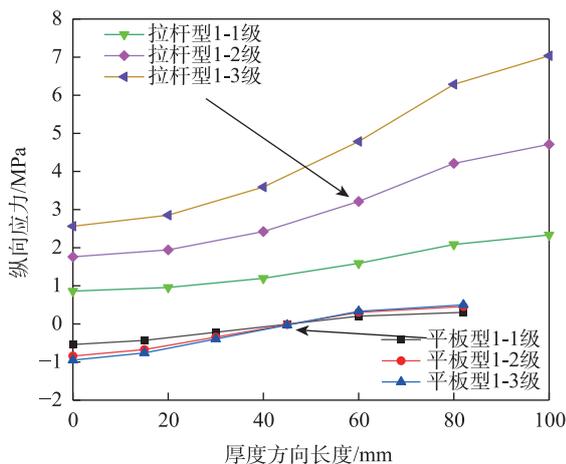


图15 两种桥面连续构造沿厚度方向应力变化曲线

Fig. 15 Curve of stress variation along thickness direction two kinds of link slab structure

由以上计算结果和应力云图的分布特征可以得到,钢-混组合平板型桥面连续在车辆荷载作用

下的受力和变形状态如下图16所示。桥面连续与梁端接触部位的内侧为空心,该设计为梁端的上翘变形提供了必要的空间,防止了由于主梁上端桥面连续而可能引起的桥面连续上部混凝土产生负弯矩;钢板下设光滑聚四氟乙烯支座,钢板可在支座上沿纵向滑动,从而能够消解梁体端部在水平、竖向及转角位移过程中产生的应力的效果;通过设置分隔缝,实现桥面铺装层与桥面连续混凝土层之间的完全分离,有效阻断了拉力从桥面铺装直接传递至桥面连续层,通过纵向钢筋将梁体位移产生的拉力传递至钢板,实现了力的传递,避免了因混凝土传力而导致的结构破坏。连接钢筋将纵向拉力传递至钢板的两侧端部,由于这些连接钢筋位于桥面连续截面的中性轴以下,使得焊接钢筋将纵向拉力传递到桥面连续结构的两侧末端时,结构整体产生正弯矩作用,使桥面连续由受拉结构转换成为受弯构件且桥面连续上表面受到压应力作用。

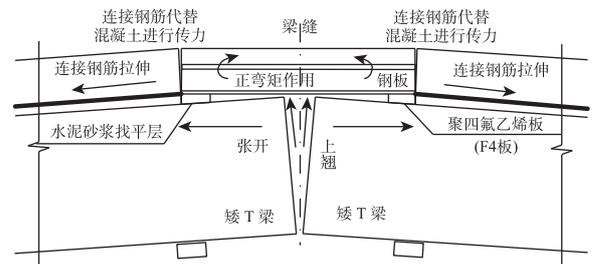


图16 T梁主梁牵引作用下平板型桥面连续作用机理示意图

Fig. 16 Schematic diagram of the working mechanism of the flat slab link slab under the traction of the T-girder

3 结论

本文分析了钢-混凝土组合平板桥面连续矮T梁桥在4种车辆荷载工况及超载50%情况下的力学响应,评估了其在矮T梁桥中的适用性和受力特性,并与拉杆式桥面连续进行了对比。研究得出以下结论。

1) 在超载偏载作用下,钢-混凝土组合平板型桥面连续相比于伸缩缝可有效减小简支梁桥跨中横桥向挠度差,进一步降低了简支梁桥在超载偏载作用下的倾覆概率,增强了结构的安全性,有助于提升桥梁在极端荷载下的表现。

2) 平板型桥面连续构造通过连接钢筋拉力引发正弯矩,使桥面受压,防止开裂。拉杆式桥面连续构造通过拉杆连接梁端,增强抗弯能力,减少位

移。受力特点上,平板型构造因正弯矩使桥面受压,避免开裂;而拉杆式构造可能导致混凝土拉应力超限,引发开裂。

3) 在跨中荷载和偏载作用下,传统拉杆构造桥面最大压应力分别为 1.16 MPa 和 4.5 MPa,而新型平板桥面无拉应力。新型平板构造在超载和抗倾覆条件下,跨中挠度差减少 24.50%和 13.43%。

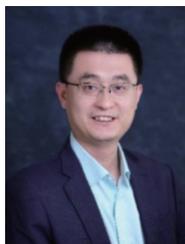
参考文献:

- [1] 魏清洁. 市政道路与桥梁连接处及伸缩缝设计问题分析[J]. 林业科技情报, 2023, 55(1): 170-172.
WEI Q J. Analysis on the design of the joint and expansion joint between municipal road and bridge[J]. Forestry Science and Technology Information, 2023, 55(1): 170-172.
- [2] 尤正奇. 简支梁桥上部结构病害成因加固对策及维护质量控制[J]. 山东交通科技, 2021(2): 67-70.
YOU Z Q. Countermeasures and quality control strategies for superstructure of simply supported beam bridge[J]. Shandong Jiaotong Keji, 2021(2): 67-70.
- [3] 亓兴军, 倡贞贞, 李淑莹, 等. 车桥耦合振动下损伤连续梁桥承载力评定方法研究[J]. 华东交通大学学报, 2024, 41(3): 45-54.
QI X J, SI Z Z, LI S K, et al. Research on the bearing capacity evaluation method of damaged continuous beam bridge under vehicle-bridge coupling vibration[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41(3): 45-54.
- [4] 张龙, 唐盛华, 卢江波. 大跨斜交变截面宽箱连续梁桥裂缝成因分析[J]. 华东交通大学学报, 2020, 37(6): 46-50.
ZHANG L, TANG S H, LU J B. Analysis on the causes of cracks in long-span skew variable cross-section wide box continuous girder bridge[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2020, 37(6): 46-50.
- [5] 陈水生, 葛圣林, 彭爱红. 不同墩截面形式的高墩连续梁桥地震响应分析[J]. 华东交通大学学报, 2020, 37(5): 38-46.
CHEN S S, GE S L, PENG A H. Seismic response analysis of high pier continuous beam bridge with different cross sections[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2020, 37(5): 38-46.
- [6] 张亮, 宁夏元. 设置小边跨的无缝连续梁桥设计[J]. 中南公路工程, 1998, 23(2): 18-20.
ZHANG L, NING X Y. Design of seamless continuous beam bridge with small side span[J]. Highway Engineering, 1998, 23(2): 18-20.
- [7] CANER A, ZIA P. Behavior and design of link slabs for jointless bridge decks[J]. PCI Journal, 1998, 43(3): 68-80.
- [8] 王黎明, 唐维中, 郭浩. 聚丙烯纤维混凝土在桥面连续及伸缩缝中的应用[J]. 东北林业大学学报, 2003, 31(1): 49-50.
WANG L M, TANG W Z, GUO H. Application of polypropylene fiber reinforced concrete to the joint of continuous slab-deck and the expansion joint of bridge[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2003, 31(1): 49-50.
- [9] KIM Y Y, FISCHER G, LI V C. Performance of bridge deck link slabs designed with ductile engineered cementitious composite[J]. ACI Structural Journal, 2004, 101(6): 792-801.
- [10] FUJISHIRO M, NAGATA Y, SUDA K. Jointless prestressed concrete viaduct using ECC[M]//Tailor Made Concrete Structures. Boca Raton: CRC Press, 2008: 102.
- [11] LI V C, FISCHER G, KIM Y, et al. Durable link slabs for jointless bridge decks based on strain-hardening cementitious composites[J]. Michigan Department of Transportation, 2003:01115249.
- [12] LEPECH M, LI V C. Design and field demonstration of ECC link slabs for jointless bridge decks[C]// Vancouver: Proceedings of the third International Conference on Construction Materials: Performance, Innovation and Structural Implications, 2005: 22-24.
- [13] OKEIL A M, ELSAFTY A. Partial continuity in bridge girders with jointless decks[J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 2005, 10(4): 229-238.
- [14] WING K M, KOWALSKY M J. Behavior, analysis, and design of an instrumented link slab bridge[J]. Journal of Bridge Engineering, 2005, 10(3): 331-344.
- [15] 刘丽芬. 混凝土简支梁桥面部分连续新型构造研究[D]. 西安: 长安大学, 2006.
LIU L F. Research on a new constution of multibarrel tube-confined concrete columns[D]. Xi'an: Chang'an University, 2006.
- [16] ABE T, KIDA T. The fatigue durability study on blind expansion joint using continuous fiber sheet[C]//Osaka: Proceedings of 5th Symposium on Decks of Highway Bridges, 2006.
- [17] 潘志炎, 茅兆祥, 刘敏, 等. 简支梁桥面连续构造的有限元分析与改进[J]. 公路交通科技, 2010, 27(4): 89-94.
PAN Z Y, MAO Z X, LIU M, et al. Finite element analysis and improvement of continuous slab-deck of simple supported beam bridge[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(4): 89-94.
- [18] 王岗, 谢旭, 王城泉, 等. 简支梁桥拱型桥面连续构造的受力性能[J]. 浙江大学学报(工学版), 2014, 48(6): 1049-

1057.
WANG G, XIE X, WANG C Q, et al. Mechanical performance of arch-type continuous slab-deck on simply-supported girder bridge[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2014, 48(6): 1049-1057.
- [19] 林幸福, 林云, 丁勇. 考虑桥面板开裂的连续桥面简支梁桥力学性能研究[J]. 宁波大学学报(理工版), 2016, 29(4): 86-91.
LIN X F, LIN Y, DING Y. Research on mechanical properties of simple supported girder bridge with continuous deck considering crack of slab[J]. Journal of Ningbo University (Natural Science & Engineering Edition), 2016, 29(4): 86-91.
- [20] 王城泉. 钢-混组合桥面连续构造的设计理论与试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
WANG C Q. Design theory and experimental study on continuous structure of steel-concrete composite bridge deck[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [21] 许洁炜, 颜全胜, 余晓琳, 等. 桥面连续构造的简化力学计算模型研究[J]. 中外建筑, 2018(7): 239-243.
XU J W, YAN Q S, YU X L, et al. Research on simplified mechanical calculation model of continuous slab-deck[J]. Chinese & Overseas Architecture, 2018(7): 239-243.
- [22] GERGESS A N. Analysis of bonded link slabs in precast, prestressed concrete girder bridges[J]. PCI Journal, 2019, 64(3): 47-65.
- [23] 崔人文. 轻型T梁桥面板连续区结构优化研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
CUI R W. Structural optimization of simply supported light T-beam with jointless bridge deck[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019.
- [24] 徐行军. 简支梁桥加固与技术改造[J]. 江西建材, 2021(11): 157-158.
XU X J. Reinforcement and technical transformation of the concrete beam bridge[J]. Jiangxi Building Materials, 2021(11): 157-158.
- [25] 王清泉, 曹沛, 邓青儿. 简支钢混组合梁新型桥面连续结构的力学性能参数分析[J]. 结构工程师, 2023, 39(4): 35-44.
WANG Q Q, CAO P, DENG Q E. Mechanical properties and parametric analysis of a new type of continuous deck structure of simply supported steel-concrete composite beam bridge[J]. Structural Engineers, 2023, 39(4): 35-44.



第一作者: 王城泉(1989—), 男, 副研究员, 硕士生导师, 研究方向为预制装配式结构。E-mail: wangcq@hzcw.edu.cn。



通信作者: 王新泉(1981—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为大直径桩基承载与变形特性。E-mail: wangxq@zucc.edu.cn。