

• 土木工程 •

DOI:10.12454/j.jsuese.202300495



本刊网刊

飞机荷载桥梁装配式主梁横向新型连接方案及其静动力性能分析

王琳¹, 白增庆², 江辉^{2*}, 曹铁志¹, 宋光松², 吴松华¹, 任阳²

(1.民航机场规划设计研究总院有限公司, 北京 100029; 2.北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘要: 针对既有装配式主梁铰缝连接强度弱、湿连接施工复杂等问题, 充分考虑飞机荷载桥梁荷载集度大、空间受力显著等特点, 提出一种剪力键和横向预应力筋混合连接的装配式主梁连接方案。该方案通过剪力键与键槽实现相邻主梁拼接, 采用横向预应力筋为接缝界面提供压应力储备, 具有结构整体性好、施工方便等优点。以某机场滑行道桥为对象, 基于ABAQUS平台建立新型连接装配式主梁的非线性数值模型, 开展静、动力学性能分析以验证方案的可靠性, 揭示了剪力键位置、数量、高度及初始预应力对主梁力学行为和抗震性能的影响规律。结果表明: 飞机静载作用下, 该方案能够满足规范对于主梁挠度限值的要求且具有可观的安全储备。增设跨中剪力键及增加其数量可显著降低主梁跨中挠度和弯矩; 相较于仅设置梁端剪力键, 加设3道跨中剪力键可使静载下力学响应分别降低19.92%、23.35%, 使地震下力学响应分别降低17.29%、40.12%。剪力键倾角和高度对主梁受力影响较小, 增大横向预应力筋初始张拉力可有效提高主梁接缝界面的预压应力, 静载、地震下的最大增幅分别为45.31%、46.51%。研究成果可为飞机荷载桥梁的主梁拼装提供重要的技术支撑, 并可拓展应用于重载公路、铁路桥梁。

关键词: 飞机荷载桥梁; 装配式主梁; 剪力键; 横向预应力筋; 静力性能; 抗震性能

中图分类号: U443.35

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2024)04-0098-10

近年来, 在中国“十四五”规划“国家综合立体交通网规划”等战略的指导下, 机场新建及改扩建需求进一步扩大。针对既有机场跑滑系统几近饱和、工程受土地要素制约等建设瓶颈, 推进预制拼装机场桥梁的建设可有效解决传统混凝土桥梁施工缓慢、土地资源紧张、噪声污染严重等问题, 符合中国当前大力发展绿色建筑的理念, 应用前景十分广泛。截至目前, 北京首都国际机场B7[#]滑行东桥、上海浦东国际机场三期扩建飞行区桥梁、澳门机场滑行道联络桥等工程均采用了预制装配式桥梁。

由于预制构件间拼接接缝的存在, 重载作用下装配式主梁横向连接处极易出现损伤, 严重时会导致“单梁受力”。因此, 国内外学者针对不同结构形式的装配式主梁(空心板梁、“T”梁、小箱梁等)及其横向连接方式开展了研究。

空心板梁桥通常采用现浇企口式铰缝连接, 实际桥梁运营结果表明^[1], 该连接方式刚度较小, 在重载作用下易出现横向铰缝破坏、底板开裂等问题。此类问题可采用两种措施解决: 一是改善铰缝处受力性能以提高结构整体性, 如在铰缝处设置抗剪钢筋^[2]、增设钢板^[3]、灌注高强混凝土及改变铰缝构造形式^[4]等, 本质上加强了铰缝内混凝土, 却易导致铰缝新老混凝土界面黏结出现问题; 二是在主梁外部增设粘贴钢板^[5]、填充高强混凝土^[6]、增加横向预应力钢筋^[7]等以提高横向连接强度, 此类措施主要用于旧桥加固。

“T”梁与小箱梁按受力性能的不同, 横向连接可分为铰接、刚接和半刚半铰连接。铰接在主梁翼缘预埋连接钢筋, 接缝处布置钢筋网, 并将二者浇筑在桥面混凝土铺装层内。孙胜江等^[8]研究了公路桥梁在

收稿日期: 2023-06-30 修回日期: 2024-03-08 网络出版日期: 2024-05-22

基金项目: 中国民航机场建设集团有限公司科研项目(JSRDKYN20220202); 北京市自然科学基金资助项目(8192035)

作者简介: 王琳(1979—), 男, 高级工程师。研究方向: 飞机荷载桥梁设计与研究。E-mail: jswanglin@cacc.com.cn

*通信作者: 江辉, 教授, E-mail: jianghui@bjtu.edu.cn

汽车荷载作用下的动挠度,发现铰接“T”梁整体刚度较差。半刚半铰连接通常在横隔板下方和顶部翼板边缘处设置焊接钢板,其在后期使用中易出现钢板锈蚀和开裂。刚接通常采用湿接缝和横隔板连接,采用该方式的装配式主梁荷载横向分布均匀,结构整体性较好,但施工复杂、技术难度较高、施工耗时长。为此,周长东等^[9]以朔黄铁路芦沟双线特大桥为背景,提出在梁体腹板间增设钢支撑加固“T”梁横向联系。Chen^[10-11]、彭卫兵^[12]等均提出以钢桁架式横向连接结构代替传统横隔梁加固“T”梁和小箱梁。

梳理上述研究成果可发现,传统装配式主梁横向连接形式中,铰缝连接强度较弱,湿连接施工复杂、周期较长。此外,目前针对不同连接方案力学性能及改进措施的研究主要集中于公路、铁路桥梁,而飞机荷载桥梁具有荷载集度大、空间受力明显、施工不停航等特点,对主梁横向连接强度及施工效率具有更高的要求,当前相关研究尚较缺乏,亟需提出一种适用于飞机荷载桥梁装配式主梁的新型横向连接

方案。

本文提出一种剪力键和横向预应力筋混合连接的主梁横向连接方案,并以某机场三期扩建工程H1滑行道桥为对象,基于ABAQUS平台建立精细化非线性数值模型,开展静、动力分析验证该方案的合理性,揭示各种影响因素对新型连接装配式主梁力学性能的作用机理。研究成果可为飞机荷载桥梁的主梁拼装提供重要的技术支撑,并可拓展应用于重载公路、铁路桥梁。

1 新型横向连接方案

装配式主梁剪力键和横向预应力筋混合连接方案构造形式如图1所示,各片主梁横隔板边缘处设置竖向剪力键,其中,一侧向外凸起形成剪力键,另一侧向内凹陷形成剪力键槽,相邻主梁匹配拼装。剪力键与键槽间的缝隙涂抹环氧树脂胶以保证界面的黏结强度。此外,为避免主梁接缝处过早开裂,分别在箱梁底板和顶板布置贯通的横向预应力筋。

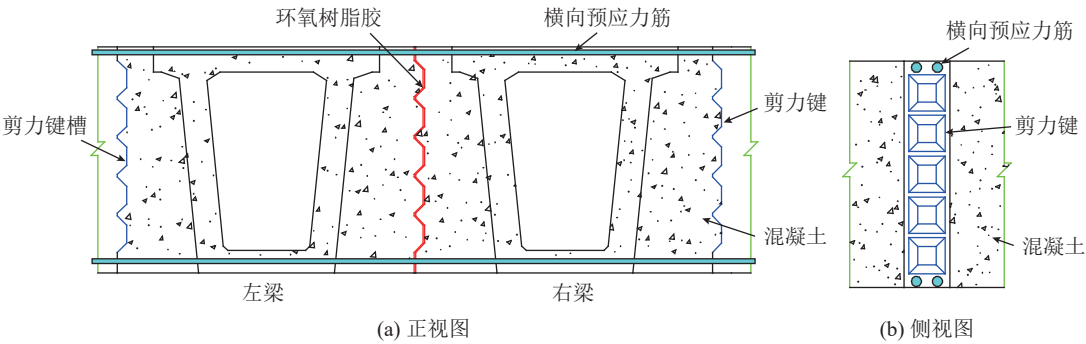


图 1 装配式主梁新型连接方案构造示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the novel connection of prefabricated beams

该方案具有以下特点: 1)主梁间依靠混凝土摩擦力、机械咬合力和黏结力传递荷载,可有效保证界面承载能力; 2)横向预应力钢筋可为界面提供压应力储备,提高桥梁耐久性; 3)剪力键可减少现场湿作业,起到施工定位作用,提高建造效率。

2 工程背景及有限元模拟

2.1 工程背景

某机场三期扩建工程H1滑行道桥(图2)为跨径35 m的两跨简支梁桥,桥宽39 m。

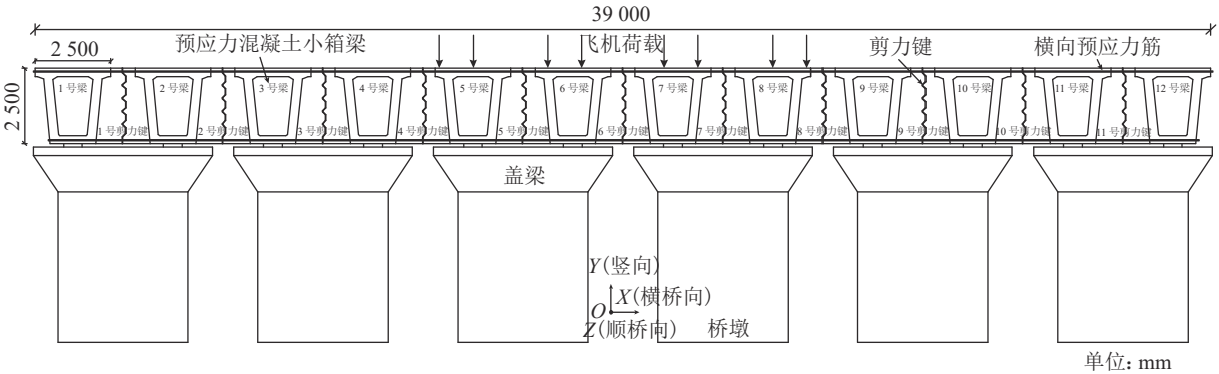


图 2 H1滑行道桥横断面布置图

Fig. 2 Cross section layout of the H1 taxiway bridge

上部结构采用12片预应力混凝土小箱梁,各片主梁高2.5 m,宽2.5 m;下部结构跨中采用重力式桥

墩,两侧为“一”字形桥台。参照《公路装配式混凝土桥梁设计规范》(JTG/T3365-05—2022)^[13]和《装配式混凝土结构技术规程》(JGJ 1—2014)^[14]中关于剪力键尺寸的规定及既有工程剪力键的设计原则,确定剪力键底面尺寸为400 mm×400 mm,顶面尺寸为200 mm×200 mm,倾角为45°,高度为100 mm,相邻键间的净距为50 mm,如图3所示。参考实际工程及相关研究^[15-16],在剪力键顶部与底部分别布置两根 $\phi 15.2$ mm的横向预应力钢绞线,初始张拉应力为1 395 MPa。为方便后文表述,分别对主梁(1号~12号)和剪力键(1号~11号)从左往右依次进行编号(图2)。

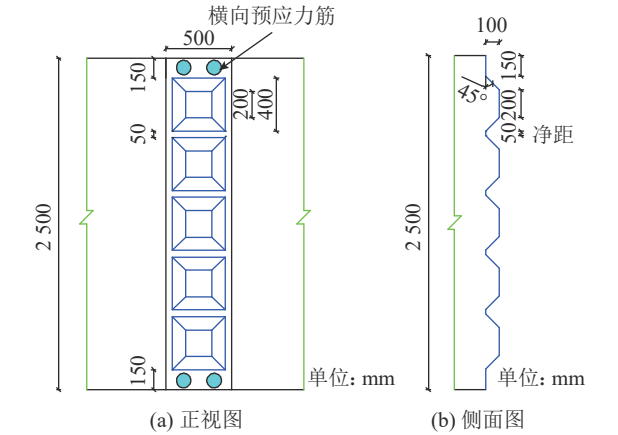


图 3 剪力键尺寸

Fig. 3 Detail of the shear key dimensions

2.2 有限元模拟及验证

基于ABAQUS建立H1滑行道桥有限元模型,如图4所示。混凝土采用3维减缩积分单元(C3D8R)模拟,预应力筋和普通钢筋采用桁架单元(T3D2)模拟;混凝土及钢筋本构关系分别选用Mander非约束混凝土模型^[17]及双线性理想弹性模型。荷载作用下,环氧树脂胶与混凝土间通常不会发生剥离,且前者抗拉和抗剪强度均大于后者,因此剪力键与环氧树脂胶间的界面接触关系采用绑定约束(Tie)。为充分考虑桥面板对主梁的约束作用及飞机荷载的传递作用,对桥面板底面与主梁顶面绑定约束。支座采用连接器单元(Connector)和理想弹性材料模拟,桥墩与桥台底部固结。

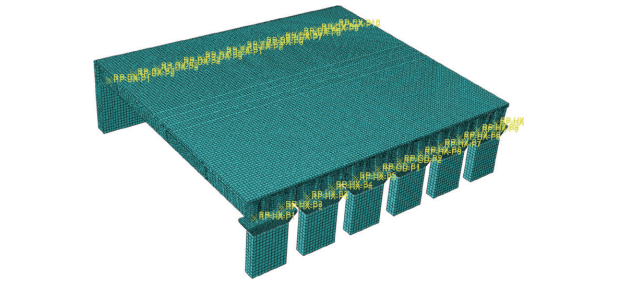


图 4 H1滑行道桥有限元模型

Fig. 4 Finite element model of the H1 taxiway bridge

为验证上述模拟方法的合理性,基于孙雪帅^[18]设计的K-E-M2装配式主梁结构建立有限元模型,并将有限元模拟与直剪试验结果进行对比。表1给出了剪力键接缝处承载力和弹性刚度模拟结果相对于试验的误差,二者最大误差均未超过7%,较好地验证了模拟方法的可靠性。

表 1 数值模拟与试验结果对比

Tab. 1 Result comparison of numerical simulation and test

指标	承载力/kN	弹性刚度/(kN·mm ⁻¹)
直剪试验	1 090.70	1 084.03
数值模拟	1 038.98	1 152.21
误差/%	6.29	4.74

3 静力性能影响因素分析

3.1 飞机荷载模拟

飞机荷载桥梁在服役过程中主要承受结构恒载及飞机活载,其中恒载采用重力荷载施加,飞机荷载则采用该滑行道桥E类飞机荷载设计等级的B747-400机型施加^[19]。由于飞机前起落架轴重远小于主起落架,前者对主梁跨中的力学作用远小于后者,故飞机荷载仅考虑主起落架荷载并以中载方式布设,即将主起落架中心与桥面板中心对齐,按照主起落架轮胎投影面施加面力。飞机荷载布置平面图如图5所示。

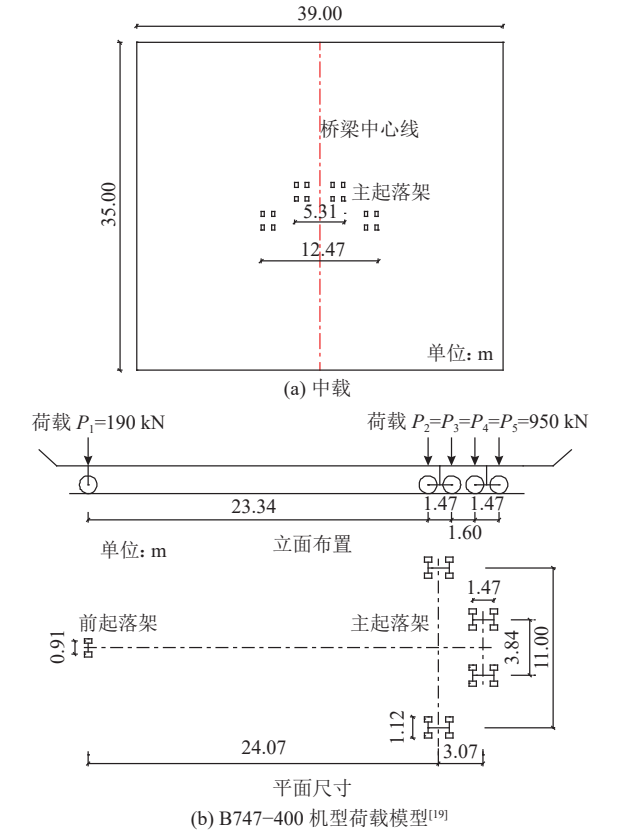


图 5 飞机荷载布置平面图

Fig. 5 Plan layout of the aircraft load

3.2 影响因素分析

3.2.1 剪力键位置

已有研究^[20]表明, 剪力键的布置位置对装配式主梁的力学性能存在不可忽略的影响。本文共设置4种工况(表2)研究剪力键沿顺桥向不同位置布置时对新型连接装配式主梁力学性能的影响规律。

表 2 剪力键位置工况

Tab. 2 Working conditions of shear key position	
工况编号	布置位置(顺桥向)
1	仅设置梁端剪力键
2	设置梁端剪力键及1道跨中剪力键
3	设置梁端剪力键及2道1/3跨中剪力键
4	设置梁端剪力键及2道1/4跨中剪力键、1道跨中剪力键

图6分别给出了不同剪力键位置下各片主梁跨中挠度及弯矩分布。从图6可看出, 设置跨中剪力键可显著降低主梁跨中内力响应峰值。工况1中梁(6号梁)的跨中挠度、跨中弯矩响应分别为6.33 mm、2750.60 kN·m。相较于工况1, 工况2、3、4中梁的跨中挠度分别降低了15.84%、10.33%、19.92%, 跨中弯矩分别降低了23.40%、3.67%、23.35%。不难发现, 工况2和4中梁的跨中弯矩显著小于工况1和3, 这是因为前者均布置了一道跨中剪力键, 对提高跨中的横向刚度和连接性能有直接影响。此外, 经验算, 采用新型连接方式的装配式主梁满足文献[13]对挠度限值的规定且具有可观的安全储备。

图7为各工况下主梁竖向位移分布。从图7可看出, 工况2和4跨中处红色区域相较于工况1和3更加

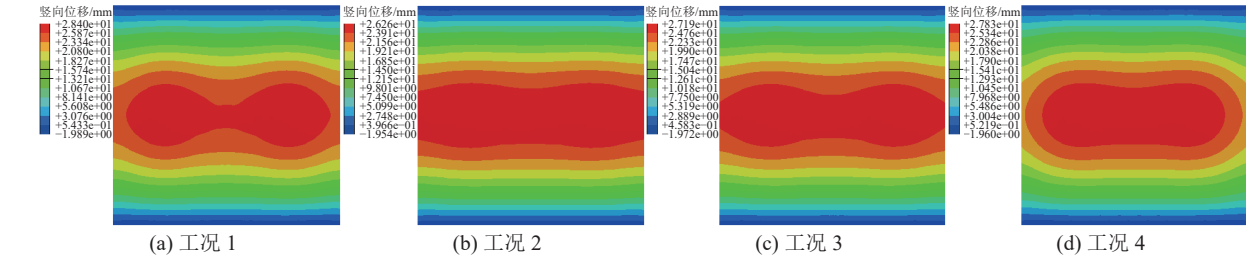


图 7 不同剪力键位置的主梁竖向位移分布
Fig. 7 Vertical displacement distribution of the beam with different shear key positions

3.2.2 剪力键数量

以工况2为基准, 分别调整主梁跨中截面处竖向剪力键数量 N 为3、4、5, 如图8所示, 分析其对装配式主梁力学性能的影响规律。

图9给出了不同剪力键数量下各片主梁跨中挠度和跨中弯矩分布。从图9可看出, 增设剪力键数量可有效提高跨中截面刚度, 显著降低跨中截面挠度与弯矩响应。当跨中设置3个剪力键时, 中梁跨中挠度与弯矩响应分别为6.10 mm和2 389.14 kN·m; 相对而言, 设置4、5个剪力键时, 中梁跨中挠度分别降低

饱满, 说明布置跨中剪力键可使中梁与其他主梁挠度变形更加接近, 各片主梁受力更加均匀, 可增强各梁间的协同变形能力。

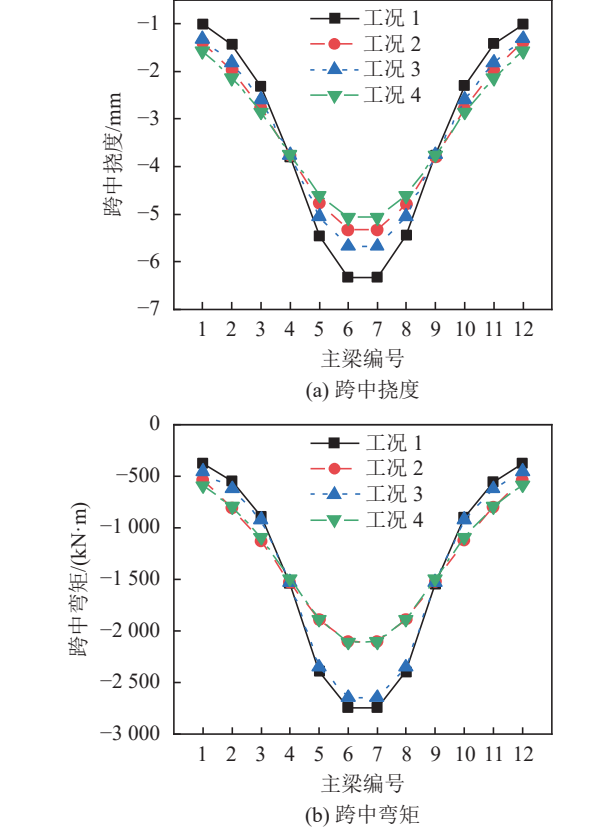


图 6 剪力键位置对主梁跨中挠度及弯矩响应的影响
Fig. 6 Effect of shear key positions on mid-span deflection and bending moment response of the beam

了6.05%与16.94%, 跨中弯矩分别降低了10.11%与20.71%。此外, 随着剪力键数量的增加, 中梁与边梁

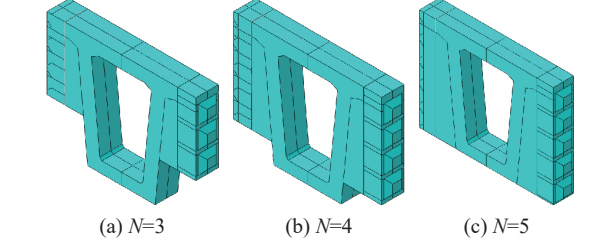


图 8 不同剪力键数量示意图
Fig. 8 Sketch of different shear key numbers

挠度差不断减小, 全桥整体性提高。具体地, 剪力键数量从3个增加到5个时, 挠度差可降低29.44%。

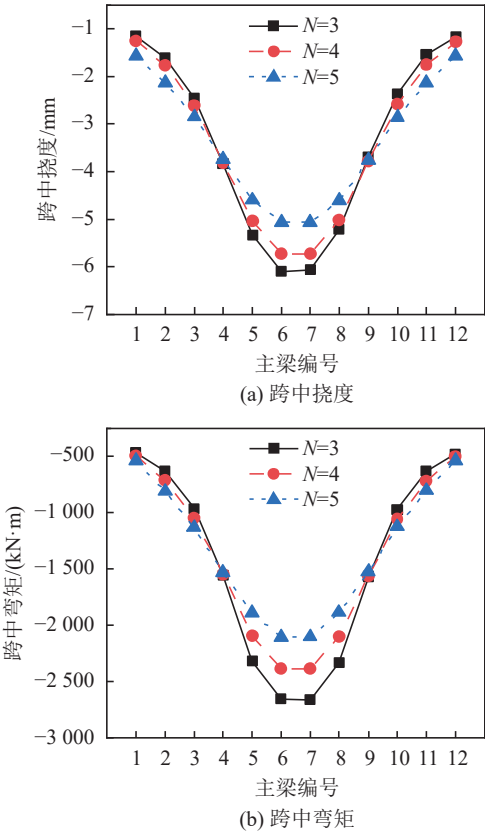


图 9 剪力键数量对主梁跨中挠度及弯矩响应的影响
Fig. 9 Effect of shear key numbers on mid-span deflection and bending moment response of the beam

3.2.3 剪力键倾角

剪力键倾角过小易导致剪力键与键槽间的机械咬合力降低, 不利于界面处剪力的传递; 倾角过大则

会增大键根受力, 增加破坏风险及施工难度, 因此需对剪力键倾角进行合理设计。既有研究^[21]中, 剪力键倾角的范围通常取30°~75°。在剪力键横截面及高度不变的前提下, 本文研究5种剪力键倾角(30°、45°、60°、75°、90°)对主梁及接缝处受力性能的影响规律。

改变剪力键倾角对主梁力学性能基本无影响, 不同剪力键倾角下, 主梁挠度及弯矩响应变化幅度仅为1.10%, 此处不再赘述。图10给出了不同倾角下各剪力键根部的剪力响应。从图10可看出, 由于飞机荷载呈对称布置, 直接承受荷载作用的4号和8号剪力键根部剪力最大。当倾角为30°时, 各剪力键根部剪力响应过小, 不利于界面处剪力传递; 当剪力键倾角大于45°时, 各剪力键根部剪力值趋于稳定。

图11为不同倾角下4号剪力键竖向剪应力分布云图。

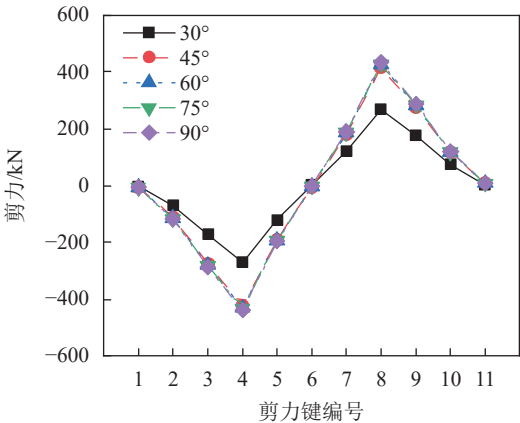


图 10 剪力键倾角对键根剪力响应的影响
Fig. 10 Effect of shear key inclination angles on the shear response of key roots

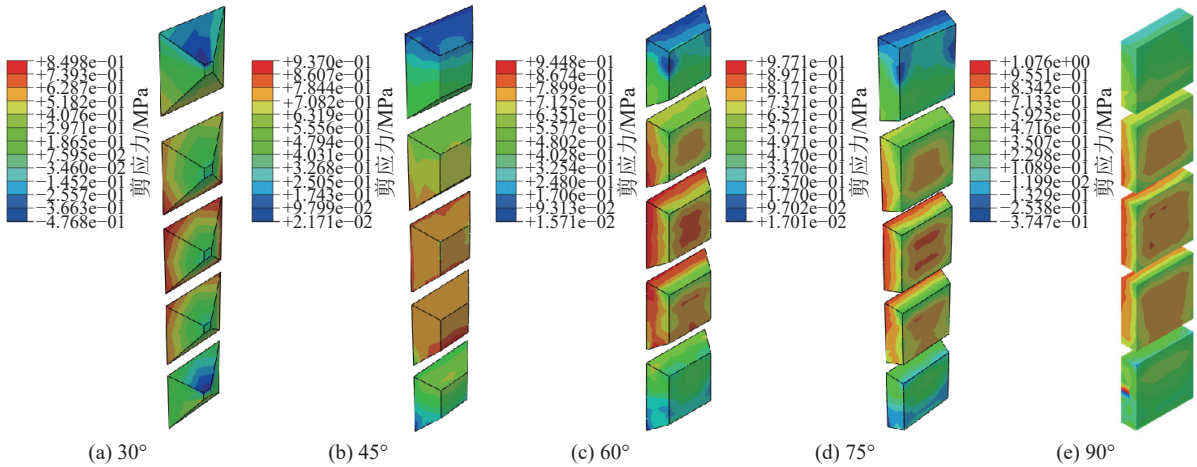


图 11 不同倾角下4号剪力键竖向剪应力分布

Fig. 11 Vertical shear stress cloud of the No. 4 shear key with different inclination angles

从图11可看出, 剪应力主要分布在剪力键根部位置(红色部分)。当剪力键倾角从30°增加至90°时, 剪力键侧向传力面积逐渐减小, 键根剪应力不断增

大; 倾角为30°、45°、60°、75°、90°时, 所对应的根部最大剪应力分别为0.85、0.93、0.94、0.98、1.07 MPa。此外, 飞机静载作用下, 各剪力键最大剪应力和拉应力

均未超过混凝土抗剪强度和抗拉强度设计值。

3.2.4 剪力键高度

剪力键高度过大会增加键根开裂的风险,降低主梁承载力和耐久性;高度太小则会增加施工难度,施工产生的误差会降低界面横向连接性能,影响横向传力效果,因此需对剪力键高度的合理取值进行研究。保持剪力键倾角及横截面尺寸不变,参照实际工程及相关研究中剪力键高度^[22],研究5种剪力键高度(50、100、150、200、250 mm)对装配式主梁及剪力键力学性能的影响规律,如图12所示。

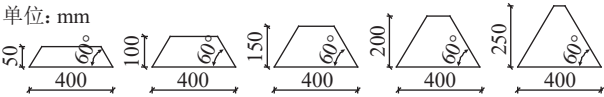


图 12 不同剪力键高度示意图

Fig. 12 Sketch of different shear key heights

研究发现,剪力键高度对装配式主梁跨中挠度及弯矩响应影响甚微,此处不再赘述。图13以4号剪力键为例,给出了不同高度剪力键的最大剪应力与横向拉应力响应。由图13可知,当剪力键横截面尺寸与倾角保持一定时,随着高度增大,剪力键传力面积不断增大,接触界面应力不断减小,因此,剪力键根部应力不断降低。当高度为50 mm时,剪力键根部应力最大,剪应力与横向拉应力分别为0.98和0.85 MPa;当高度增加至250 mm时,两者应力响应分别降低了

14.29%和50.59%。

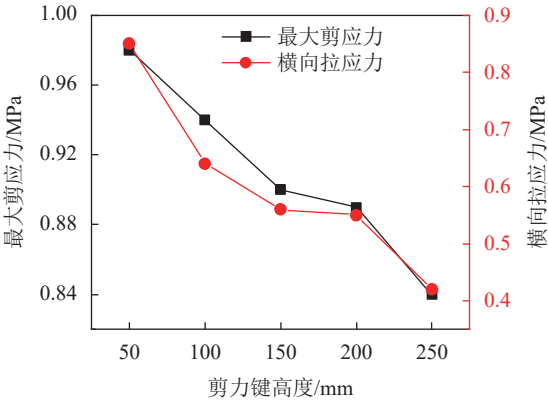


图 13 不同高度下4号剪力键最大剪应力与横向拉应力响应
Fig. 13 Shear stress and tensile stress response of the No. 4 shear key with different heights

图14给出了不同高度下4号剪力键键槽处竖向剪应力分布云图。从图14可看出,剪应力主要分布在键槽竖向的中间部位。由于箱梁顶板和底板布置了横向预应力钢筋,该处产生的预压力会抵消飞机荷载引起的拉应力,故剪力键槽顶部与底部处于受压状态。随着剪力键高度增大,剪力键剪切面面积逐渐增加,键槽最大竖向拉应力逐渐降低。当高度为50 mm时,最大竖向剪应力为0.96 MPa;高度为100、150、200、250 mm时,最大竖向剪应力分别降低了6.30%、7.30%、8.40%、11.46%。

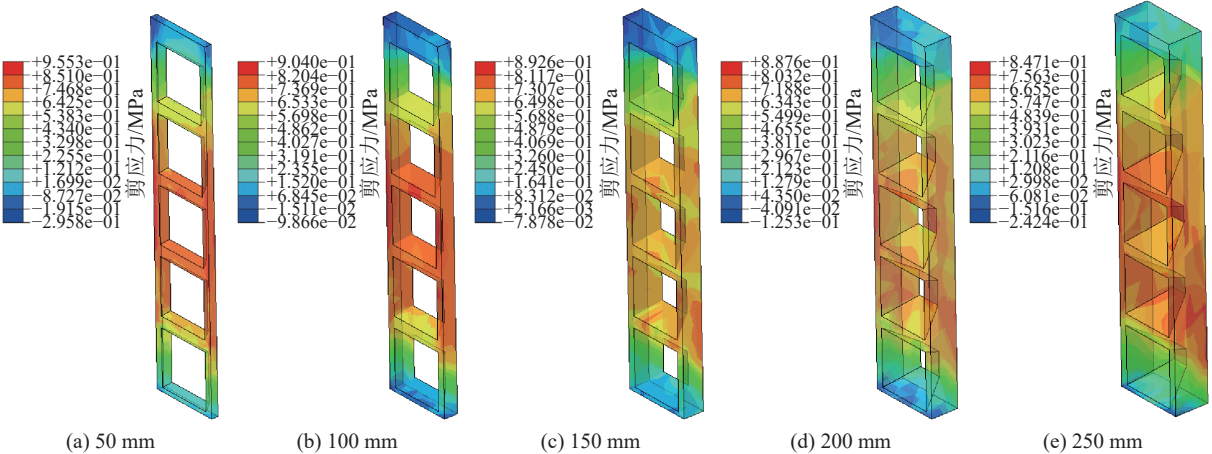


图 14 不同高度下4号剪力键键槽竖向剪应力分布

Fig. 14 Vertical shear stress cloud in the groove of No. 4 shear key with different heights

3.2.5 预应力水平

基于工况2,分别调整横向预应力筋的初始张拉力为135、165、195 kN(屈服强度的50%~75%),研究横向预应力筋预应力水平对主梁及剪力键受力性能的影响规律。

研究发现,不同初始张拉力下,主梁跨中挠度及弯矩变化幅度很小,主要影响各剪力键接缝界面应

力响应。图15给出了4号剪力键接缝横桥向应力响应。从图15可看出,初始张拉力从135 kN增加到195 kN时,跨中最大压应力从0.64 MPa提高到0.93 MPa,增幅为45.31%。图15以初始张拉力195 kN为例,图16给出了不同位置处剪力键接缝应力响应。从图16可看出,峰值应力(1.61 MPa)发生在1号剪力键跨中附近,应力分布呈现明显的抛物线形,逐渐向梁端递减,在距离

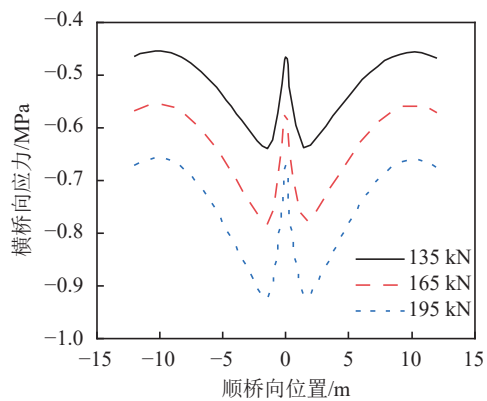


图 15 不同初始张力下4号剪力键接缝应力响应

Fig. 15 Joint stress response of the No. 4 shear key with different initial tensile forces

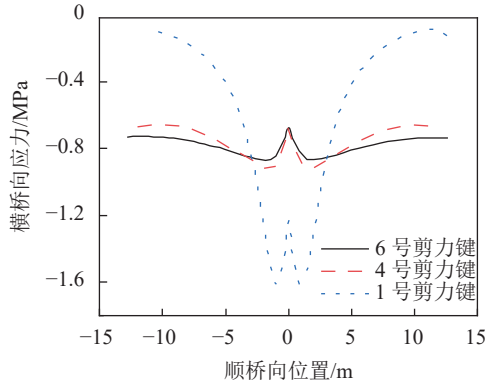


图 16 不同位置处剪力键接缝应力响应

Fig. 16 Joint stress response of shear key at different positions

表 3 所选取的地震动记录信息

Tab. 3 Information of the selected ground motion records

编号	地震事件	台站名称	震级M	断层距/km	剪切波速 $v_{30}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	PGA		
						主方向	次方向	竖向
1 [#]	Tabas_Iran	Ferdows	7.35	89.76	302.64	0.105g	0.093g	0.053g
2 [#]	Hector Mine	Fort Irwin	7.13	65.04	367.43	0.126g	0.106g	0.056g
3 [#]	Christchurch_New Zealand	SBRC	6.20	43.88	263.20	0.069g	0.048g	0.024g

4.2.1 剪力键位置

图17给出了1[#]地震动作用下,不同剪力键位置的各片主梁跨中挠度及弯矩峰值响应。从图17可看出:增设跨中剪力键可有效降低挠度和弯矩的峰值响应,工况1中,梁的挠度和弯矩分别为48.45 mm和16 292.62 kN·m;工况2~4中,梁跨中挠度较工况1分别降低了13.92%、11.54%、17.29%,跨中弯矩分别降低了31.37%、12.49%、40.12%。

4.2.2 预应力水平

基于工况2,图18分别给出了1[#]地震动作用下,不同初始张拉力的6号剪力键接缝处横桥向应力响应。

跨中10 m处应力接近于0,所产生的预压影响范围约20 m。对于6号剪力键,接缝处峰值应力为0.87 MPa,且应力分布沿顺桥向更均匀。此外,由图16还可发现,各剪力键应力从边梁向中梁不断降低,预压范围不断增大,且越靠近中梁的剪力键,其应力沿顺桥向的分布越均匀。这是由于横向预应力张拉位置位于边梁处,张拉端产生应力集中现象,且随初始张拉力的增大逐渐明显。

4 抗震性能影响因素分析

4.1 地震波选取

按照以下原则选取地震动:1)工程桥址位于6度设防区,Ⅱ类场地,所选地震动的剪切波速 v_{30} 范围为260~300 m/s;2)震级大于6.0级;3)断层距大于20 km,无脉冲;4)地震动均值谱与设计谱匹配。

根据上述原则,共选取了3组地震记录,主要参数如表3所示。地震动按三向输入,主地震动作用于横桥向,其加速度峰值调幅为0.2g;次地震动作用于顺桥向,按主地震动比例调幅。

4.2 影响因素分析

由第3节中静力作用下的剪力键对装配式主梁的力学研究结果可知,飞机静载作用下,剪力键位置对装配式主梁力学性能影响较大,预应力水平对剪力键接缝处局部应力影响较明显,故重点讨论上述两因素对桥梁抗震性能的影响规律。

从图18可发现,增大初始张拉力可显著增加接缝应力。张拉力为135 kN时,最大应力为0.26 MPa;张拉力为165、195 kN时,峰值应力响应分别增大了34.62%、65.39%。

由图18(a)可知,接缝应力峰值响应发生在23.5 s,分别提取该时刻6号不同横向位置的剪力键接缝应力,如图18(b)所示。由图18(b)可知:提高初始张拉力可明显增大拼装接缝界面处的压应力储备,最大压应力位于距离跨中截面2.8 m处;初始张拉力为195 kN时,最大压应力为0.63 MPa,相较初始张拉力135 kN时提高了46.51%。

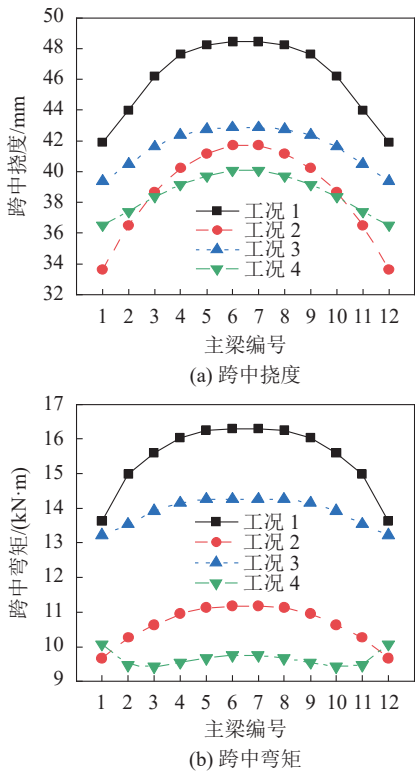


图 17 不同剪力键位置的主梁跨中挠度及弯矩地震峰值响应
Fig. 17 Seismic peak response of mid-span deflection and bending moment of beams with different shear key positions

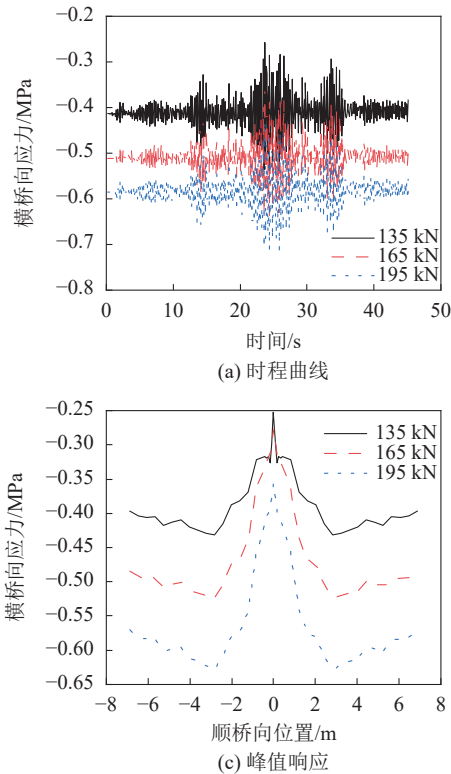


图 18 不同初始张拉力的6号剪力键接缝横桥向应力响应
Fig. 18 Joint stress response of the No. 6 shear key with different initial tensile forces

5 结 论

1)提出了一种剪力键和横向预应力筋混合连接的飞机荷载桥梁装配式主梁新型横向连接方案,具有荷载横向分布均匀、结构整体性好、施工方便等优点。经检验,该方案可满足规范对挠度限值的规定,可为飞机荷载桥梁的主梁拼装提供重要的技术支撑,并可拓展应用于重载公路铁路桥梁。

2)飞机静载作用下,增设跨中剪力键及增加其数量可显著降低主梁跨中挠度和跨中弯矩,有效提高结构整体性,相较仅梁端设置剪力键,跨中加设3道横隔板可使跨中挠度和弯矩分别降低19.92%、23.35%,剪力键倾角及高度的影响并不显著。

3)飞机静载作用下,增大横向预应力筋初始张拉力可有效提高主梁接缝界面的预压应力,避免结构过早开裂,初始张拉力从135 kN增加至195 kN时,直接承受飞机荷载的剪力键跨中处预压应力可提高45.31%。

4)地震作用下,不同剪力键位置及预应力筋初始张拉力下,结构响应变化规律与静载作用下相似,跨中加设3道剪力键可使主梁跨中挠度及弯矩分别降低17.29%和40.12%,增大预应力筋初始预压应力可使中梁接缝界面处压应力增大46.51%。

参考文献:

[1] Liu Chao,Zou Yugang,Zhao Zheng.Comparison of reinforcement schemes for hollow slab beam bridge of Tongji road overpass[J].*Bridge Construction*,2018,48(4):118-123.
[刘超,邹宇罡,赵正.同济路立交桥空心板梁桥加固方案比选[J].*桥梁建设*,2018,48(4):118-123.]
[2] Ye Jianshu,Liu Jiusheng,Yu Bo,et al.Experiment on shear property of hinge joints of concrete hollow slab[J].*Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2013,30(6):33-39.[叶见曙,刘九生,俞博,等.空心板混凝土铰缝抗剪性能试验研究[J].*公路交通科技*,2013,30(6): 33-39.]
[3] He Yuliang,Ding Xiaopeng,Guo Shijie,et al.An experimental study on reinforcement of a hollow plate beam bridge based on an inserted steel plate method[J].*Journal of Vibration and Shock*,2022,41(24):184-191.[何余良,丁小鹏,郭士杰,等.插钢板法加固空心板梁桥铰缝试验研究[J].*振动与冲击*,2022,41(24):184-191.]
[4] Hussein H H,Sargand S M,Al-Jhayyish A K,et al.Contribution of transverse tie bars to load transfer in adjacent prestressed box-girder bridges with partial depth shear key[J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*,2016,31(2): 4016100.
[5] Wang Shichao,Wang Chunsheng,Duan Lan,et al.Flexural

- behavior experiment of full-scale PC box girder strengthened by composite technique[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2018, 18(5): 56–65. [王世超, 王春生, 段兰, 等. 组合加固足尺预应力混凝土箱梁抗弯性能试验[J]. *交通运输工程学报*, 2018, 18(5): 56–65.]
- [6] Liu Jie, Chen Xuyong, Bu Yangmin, et al. Experimental study on shear behavior of new coarse aggregate UHPC hinge joint of hollow slab bridge[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2022, 35(9): 298–310. [刘杰, 陈旭勇, 卜阳敏, 等. 空心板桥新型粗骨料UHPC铰缝抗剪性能试验[J]. *中国公路学报*, 2022, 35(9): 298–310.]
- [7] Steinberg E P, Semendary A A. Evaluation of transverse tie rods in a 50-year-old adjacent prestressed concrete box beam bridge[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2016, 22(3): 05016010.
- [8] Sun Shengjiang, Xu Jianwei, Han Wanshui, et al. Whole rigidity characteristic of T-beam bridge under random traffic flow[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2010, 10(5): 23–29. [孙胜江, 徐建伟, 韩万水, 等. 随机车流作用下T梁桥的整体刚度特性[J]. *交通运输工程学报*, 2010, 10(5): 23–29.]
- [9] Zhou Changdong, Zhang Xu, Tian Miaowang, et al. Research on the mechanical property of railway bridge strengthened with adding steel braces[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2016, 33(9): 41–47. [周长东, 张许, 田苗旺, 等. 后加钢支撑加固铁路桥梁的力学性能研究[J]. *铁道工程学报*, 2016, 33(9): 41–47.]
- [10] Chen C, Yang C. Experimental and simulation studies on the mechanical performance of T-girder bridge strengthened with transverse connection[J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2019, 33(5): 04019055.
- [11] Chen Chen, Yang Caiqian, Pan Yong, et al. Simulation and design considerations on transverse connection of prestressed concrete T-girder bridge[J]. *International Journal of Steel Structures*, 2021, 21(4): 1182–1196.
- [12] 彭卫兵, 黄晨露, 全柳萌, 等. 三角形钢横隔梁装配式梁桥静动力特性研究[J/OL]. *工程力学*, 2023: 1–11. [2023–06–30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.O3.20230913.1529.007.html>.
- [13] 中交第二公路勘察设计研究院. 公路装配式混凝土桥梁设计规范: JTG/T 3365—05—2022[S]. 北京: 人民交通出版社, 2022.
- [14] 中国建筑标准设计研究院. 装配式混凝土结构技术规程: JGJ 1—2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [15] Wu Qingxiong, Huang Wankun, Wang Qu, et al. Mechanical performance and design calculation method of prefabricated voided slab bridge with transverse post-tensioning[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2022, 22(6): 130–142. [吴庆雄, 黄宛昆, 王渠, 等. 采用横向预应力的装配式空心板桥受力性能与设计计算方法[J]. *交通运输工程学报*, 2022, 22(6): 130–142.]
- [16] Pan Zuanfeng, Fu C C, Lü Zhitao. Study on transverse post-tensioning in assembly slab bridges[J]. *Journal of Southeast University(Natural Science Edition)*, 2010, 40(6): 1264–1270. [潘钻峰, 傅 C C, 吕志涛. 装配式板桥的横向预应力设计[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2010, 40(6): 1264–1270.]
- [17] Mander J, Priestley M, Park R. Theoretical stress strain model for confined concrete[J]. *Journal of Structural Engineering-ASCE*, 1988, 114: 1804–1826.
- [18] Sun Xueshuai. Experimental study on shear behavior of joints in precast segmental bridges[D]. Nanjing: Southeast University, 2015. [孙雪帅. 预制拼装桥梁节段间接缝抗剪性能试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.]
- [19] 中交公路规划设计院. 民用机场飞机荷载桥梁设计指南: MH/T 5063—2023[S]. 北京: 中国民航出版社, 2023.
- [20] Wu Xiaoguang, Qin Faxiang, Xiao Kailong, et al. Comparison and analysis of the reasonable section parameter of the transverse diaphragm of the assembly type T beam bridge[J]. *Highway Engineering*, 2019, 44(2): 86–90. [邬晓光, 秦发祥, 肖凯龙, 等. 装配式T梁桥横隔板参数优化设计分析[J]. *公路工程*, 2019, 44(2): 86–90.]
- [21] Huang Fanglin, Meng Xiandong, Feng Fan, et al. Analysis of the mechanical behavior of precast deck slab with square platform shear key wet joint[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2023, 20(6): 2151–2164. [黄方林, 孟宪冬, 冯帆, 等. 预制桥面板方台形剪力键湿接缝受力性能分析[J]. *铁道科学与工程学报*, 2023, 20(6): 2151–2164.]
- [22] Yang Jiguang. Design research of precast segmental continuous girder with epoxy joints on high speed railway[J]. *Railway Engineering*, 2021, 61(5): 28–30. [杨继光. 高速铁路节段预制胶拼连续梁设计研究[J]. *铁道建筑*, 2021, 61(5): 28–30.]

A Novel Transverse Connection Scheme for Prefabricated Beams in Aircraft Loading Bridges and Its Static–Dynamic Performance Analysis

WANG Lin¹, BAI Zengqing², JIANG Hui^{2*}, CAO Tiezhi¹, SONG Guangsong², WU Songhua¹, REN Yang²

(1. China Airport Planning and Design Inst. Co. Ltd., Beijing 100029, China; 2. School of Civil Eng., Beijing Jiaotong Univ., Beijing 100044, China)

Abstract:

Objective The hinge joint connection in traditional prefabricated beam transverse connections exhibits weak strength and poor stiffness, whereas the wet joint connection involves complex construction processes and lengthy durations. Research on the mechanical properties and enhancement

measures of various connection schemes focuses primarily on highway and railway bridges. Aircraft loading bridges are characterized by large load sets, significant spatial stress, and continuous construction requirements, all demanding greater strength and construction efficiency in the transverse connections of main beams. However, research on the relevant transverse connections of prefabricated beams for aircraft loading bridges remains unaddressed.

Methods A prefabricated beam transverse connection scheme is proposed to address these challenges, featuring a hybrid connection of shear keys and transverse prestressing tendons. This scheme considers the mechanical characteristics of aircraft loading bridges. Vertical shear keys are employed to connect adjacent beams at the joints, which are then bonded with epoxy resin adhesive. Transverse prestressing tendons, embedded within the top and bottom plates of the beams, apply compressive stress to the joint interface. This approach offers multiple advantages, including reliable connection performance, enhanced structural integrity, improved durability, and simplified construction processes. Material nonlinearities and contact nonlinear behaviors under load were considered based on a prefabricated beam’s straight shear test results. A reasonable solid model numerical simulation method is developed to analyze the mechanical performance of prefabricated beams using the ABAQUS platform. The results showed that the errors in bearing capacity and initial stiffness at the joint between numerical simulation and test results do not exceed 7% thus confirming the accuracy of the simulation method.

Results and Discussions Taking the H1 taxiway bridge of an airport’s Phase III expansion project as the research object, a nonlinear numerical model of the prefabricated beam with the proposed connection scheme is developed. Both static and dynamic analyses are conducted to validate the reliability of the proposed scheme. The results indicated that the proposed connection can meet the specification of beam deflection under static aircraft load with considerable safety reserves. The effects of parameters such as the positions, numbers, and heights of shear keys, as well as the initial prestress, on the structure’s mechanical behavior and seismic performance are examined. Under the impact of the aircraft’s static load, the beam’s mid-span deflection and bending moment are significantly reduced by the strategic placement of mid-span shear keys and an increase in their quantity. This adjustment enhances the collaborative deformation capacity among the beams and ensures uniform distribution of forces across the center and edge beams, effectively enhancing the structural integrity. Compared to the placement of shear keys only at the beam ends, incorporating three shear keys at the mid-span can lead to reductions in mid-span deflection and bending moment by 19.92% and 23.35%, respectively. The inclination and height of the shear keys had a minimal impact on the mechanical properties of the main beam but significantly influenced the local stress state of the shear keys. Decreasing the shear key inclination angle or increasing the shear key height enlarges the shear key force transfer area, reducing contact interface and key root shear stresses. The maximum shear and tensile stresses for each shear key in the proposed scheme do not exceed the design values for concrete shear and tensile strengths. Increasing the initial prestress of the transverse prestressed tendons enhances the pre-compression stress at the joint interface of the beam, preventing premature cracking of the structure. With the initial tension force rising from 135 to 195 kN, the compressive stress of the shear key directly bearing the aircraft load increased by 45.31%. The structural response variation under earthquake action, with differing shear key positions and initial prestress levels of prestressing tendons, reflected that observed under static load conditions. Incorporating three shear keys in the mid-span can reduce the beam’s deflection and bending moment by 17.29% and 40.12%, respectively. In addition, an increase in the initial prestress of the prestressing tendons can boost the compressive stress at the joint interface of the mid-span by 46.51%.

Conclusions The research findings can provide essential technical support for the prefabricated beams used in aircraft loading bridges and can apply to heavy-load railway and highway bridges.

Key words: aircraft loading bridge; prefabricated beams; shear key; transverse prestressed tendon; static analysis; seismic response

(编辑 张 琼)

引用格式:Wang Lin,Bai Zengqing,Jiang Hui,et al.A novel transverse connection scheme for prefabricated beams in aircraft loading bridges and its static–dynamic performance analysis[J].Advanced Engineering Sciences,2024,56(4):98–107.[王琳,白增庆,江辉,等.飞机荷载桥梁装配式主梁横向新型连接方案及其静动力性能分析[J].工程科学与技术,2024,56(4):98–107.]