

装配式空心板桥抗剪加固模型试验

王昊¹, 李广奇², 郭建民¹, 黄宛昆³

(1. 山东高速股份有限公司, 山东 济南 250014; 2. 山东省交通科学研究院, 山东 济南 250101;
3. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350116)

摘要: 针对传统加固方法受空心板桥作业空间的限制, 难以实现空心板桥抗剪加固的这一弊端, 提出一种凿除空心板端部顶板并在端部空腔内注入混凝土的空心板桥抗剪加固方法。模型试验结果表明, 未加固的空心板在试验荷载作用下, 腹板发生开裂后试验构件立即失去承载能力。加固后的空心板在腹板发生开裂后可以继续保持承载, 填芯混凝土与空心板混凝土保持整体受力。加固后空心板腹板发生开裂时的荷载较未加固的空心板提高 5.1%, 极限荷载较未加固的空心板提高 19.2%。加固后的加载点的挠度比加固前小 21.1%, 而加固后跨中截面的挠度比加固前小 4.0%。加固后空心板最大剪应变比加固前降低约 7%。说明抗剪加固可以有效提高空心板抗剪承载能力, 空心板端部填充的混凝土极大地提高了支点附近的局部刚度。

关键词: 桥梁工程; 装配式空心板桥; 抗剪加固; 模型试验

中图分类号: U443.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2023)06-0056-07

Model Test of Shear Strengthened Prefabricated Voids Slab Bridge

WANG Hao¹, LI Guangqi², GUO Jianmin¹, HUANG Wankun³

(1. Shandong Hi-speed Company Limited, Jinan, Shandong 250014, China;

2. Shandong Transportation Institute, Jinan, Shandong 250101, China;

3. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350116, China)

Abstract: Aiming at the disadvantage that the traditional strengthening method is limited by the working space of the voided slab bridge, which is difficult to strengthen the shear performance of the bridge, a voided slab shear strengthening method that removes the top plate and inject grouting concrete in the end of the slab is proposed. The model test results show that, for the voided slab without strengthening, the slab loses the shear bearing capacity immediately when the web plate cracks emerged under the test load. For the strengthened voided slab, it can remain bearing the load after the web plate cracks, and the grouting concrete and the voided slab maintain suffering as a whole. For the strengthened slab, the load when the web plate cracks emerged is 5.1% higher than the unstrengthened slab, while the ultimate load is 19.2% higher than that of the unstrengthened slab. The deflection of the loading point after strengthening is 21.1% smaller than the unstrengthened one, and the deflection of the mid-span section after strengthening is 4.0% smaller than the unstrengthened one. The maximum shear strain of the slab after strengthening is about 7% lower than the unstrengthened one. The shear strengthening can effectively improve the shear bearing capacity of the slab. The grouting concrete at the end of the slab significantly improves the local stiffness near the end.

Keywords: bridge engineering; prefabricated voided slab bridge; shear strengthening; model test

装配式空心板桥因其结构简单、受力明确、施工方便、标准化制造、经济适用等优点, 是我国中小跨径桥梁建设中的首选^[1]。目前在役的空心板桥数量极为庞大, 但是早期的空心板桥随着结构的老化和车辆荷载的增加, 容易出现承载能力不足并引起

结构病害^[2-3]。对于简支的空心板梁桥而言, 承载能力不足可以分为抗弯承载能力不足和抗剪承载能力不足, 其病害表现在跨中附近的底板横向裂缝和支点附近的腹板斜向裂缝^[4]。这些裂缝病害会导致雨水和腐蚀性物质的渗透, 进一步加剧结构病害

收稿日期: 2023-08-13

修稿日期: 2023-09-19

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2019J01060166); 福州市科技创新平台项目(2020-PT-140); 福州大学科研启动基金资助项目(XRC-23020)

作者简介: 王昊(1971—), 男, 硕士, 研究员, 主要从事桥梁与隧道工程等方面工作。E-mail: WLL19991101@126.com

通讯作者: 黄宛昆(1982—), 男, 博士, 实验师, 主要从事桥梁工程等方面工作。E-mail: huangwankun@fzu.edu.cn

的开展,对桥梁结构安全产生严重的威胁^[5-6]。

为了应对车辆荷载增加、空心板桥承载能力下降和病害严重,对结构进行加固是常用的应对方案^[7-8]。国内外的专家学者提出的空心板梁桥抗剪加固方法包括粘贴碳纤维布或预应力碳纤维板^[9-11],增大截面法加固^[12-14]和采用体外预应力进行加固^[15]。其中,聂建国^[16]采用高强不锈钢绞线网配合渗透性聚合砂浆进行混凝土梁加固,并进行抗剪受力试验研究,试验结果表明加固后混凝土梁的抗剪承载能力得到了显著提升。

桥梁抗剪加固的通常做法是在梁端腹板处粘贴加固材料,但是受空心板特别是中板作业空间的限制,常用的桥梁结构加固方法难以实现空心板桥的抗剪加固。因此,探索高效且实用的空心板梁桥抗剪加固方法具有重要的工程应用价值。本文提出一种端部填芯的空心板桥抗剪加固方法,即先凿除空心板端部顶板后在端部空腔处绑扎填芯钢筋并注入混凝土的抗剪加固方法,克服传统加固方法的不足。通过开展足尺模型试验与未加固的空心板抗剪承载能力进行对比,分析空心板桥抗剪加固的加固效果,并对加固后的空心板桥抗剪受力性能进行研究。

1 空心板桥抗剪加固方法

1.1 加固方法

目前常用的桥梁加固方法诸如粘贴钢板法、体外预应力法、粘贴预应力碳纤维板法等受空心板特别是中板作业空间的限制,难以实现空心板桥的抗剪加固。因此,本文提出一种凿除空心板梁端顶板、在端部空腔处绑扎填芯箍筋、并注入混凝土的空心板桥抗剪加固方法。由于简支空心板桥斜截面抗剪最不利截面位于梁端,因此空心板桥的抗剪加固在梁端进行。

以跨径 16 m 的空心板为例,空心板梁高为 70 cm,板宽 101 cm。填芯空心板尺寸和钢筋布置如图 1 所示。加固时采用与原空心板等级相同的 C40 混凝土进行填芯。注浆加固空心板桥的研究结果表明,加固段长度大于两倍梁高后,提高加固段长度对极限荷载的影响非常小^[17],因此填芯段长度取梁高的两倍即 1.4 m。为保证填芯段混凝土与空心板梁混凝土共同受力,在填芯段内布置箍筋和架立钢筋,并与凿开后裸露的顶板钢筋绑扎在一起。新增箍筋采用 HRB335,直径选用 $\Phi 8$,箍筋间距为 100 mm。加固布置如图 2 所示。

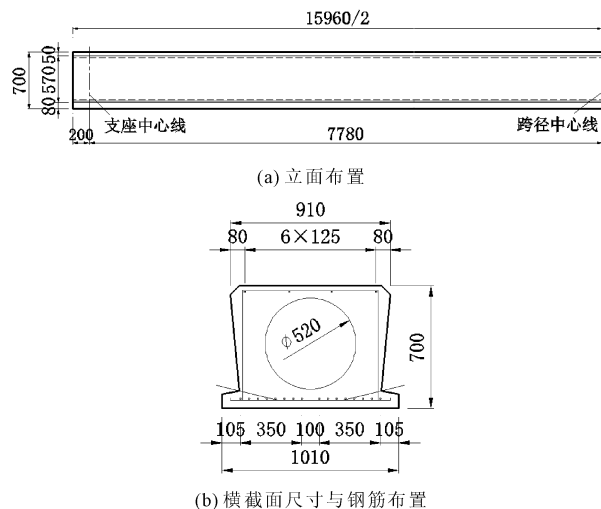


图 1 空心板尺寸(单位:mm)

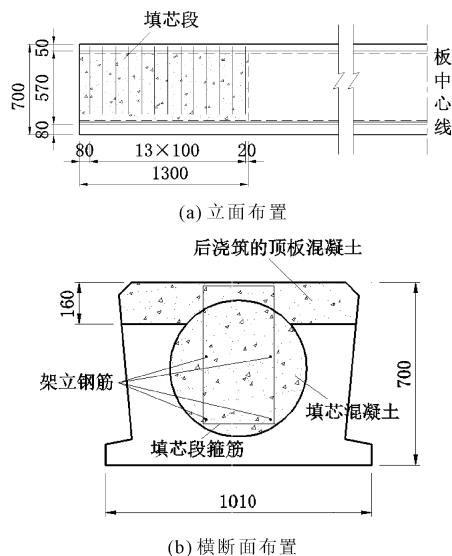


图 2 加固布置(单位:mm)

1.2 抗剪承载力计算

抗剪加固空心板梁的抗剪承载力可以依据《公路桥梁加固设计规范》^[18](JTG/T J22—2008)或《混凝土结构加固设计规范》^[19](GB 50367—2013)关于增大截面法加固受弯构件的抗剪承载能力计算方法进行计算。其中,《公路桥梁加固设计规范》(JTG/T J22—2008)关于抗剪承载力的计算方法参考了《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》^[20]中 5.2.9 的规定,采取半理论半经验的公式进行计算:

$$\gamma_0 V_d \leq 0.43 \times 10^{-3} \alpha_1 \alpha_3 b_2 h_0 \psi_{cs} \sqrt{(2 + 0.6P)} \sqrt{f_{cu,k} \rho_{sw} f_{sv}} + 0.75 \times 10^{-3} f_{sd} A_{sd} + \psi_{vb} V_{d2} \quad (1)$$

式中: γ_0 为结构重要性系数; V_d 为加固后构件验算截面处第二阶段剪力组合设计值,kN; α_1 为异号弯

矩影响系数; α_3 为受压翼缘的影响系数; b_2 为加固后梁斜截面顶端正截面处腹板宽度, mm; h_0 为加固后梁斜截面受压端正截面的有效高度, mm; ψ_{cs} 为与原梁斜裂缝有关的修正系数; P 为加固后计算截面斜裂缝范围内纵向钢筋的配筋百分率; $f_{cu,k}$ 为原构件混凝土强度等级; ρ_{sv} 为原梁斜截面内箍筋配筋率; f_{sv} 为原梁箍筋抗拉强度设计值, MPa; f_{sd} 为普通弯起钢筋的抗拉强度设计值, MPa; A_{sd} 为普通弯起钢筋的截面面积, mm^2 ; ψ_{vb} 为修正系数; V_{d2} 为加固后由后期恒载、车辆荷载及其他可变荷载作用的剪力组合设计值, kN。

公式(1) 包括三项:

加固后的混凝土截面与原梁箍筋提供的抗剪承载力 V_{cs} :

$$V_{cs} = 0.43 \times 10^{-3} \alpha_1 \alpha_3 b_2 h_0 \psi_{cs} \sqrt{(2 + 0.6P)} \sqrt{f_{cu,k} \rho_{sv} f_{sv}}$$

原梁弯起钢筋提供的抗剪承载力 V_{sd} :

$$V_{sd} = 0.75 \times 10^{-3} f_{sd} A_{sd}$$

加固后新增箍筋提供的抗剪承载力 V_{sv} :

$$V_{sv} = \psi_{vb} V_{d2}$$

此时, 加固后空心板梁抗剪承载力的提升主要来源于第一项加固后混凝土截面变大和第三项加固后新增箍筋。根据公式计算可得, 加固前的空心板梁抗剪承载力设计值为 554 kN, 抗剪加固后的空心板梁抗剪承载力设计值为 886 kN。

2 模型试验加载与测点布置

2.1 试验加载方式

为了对填芯抗剪加固空心板桥的受力性能进行研究, 考虑到空心板截面大小和尺寸效应的影响, 采用足尺模型进行试验。试验背景空心板桥为一跨标准跨径为 16m 的装配式预应力混凝土筒支空心板梁, 计算跨径 15.96 m, 参考交通部公路规划设计院 JT/GGQS 011—84 标准图设计。试验空心板共设置两片, 一片未加固, 一片采用局部填芯法进行加固。填芯段钢筋采用 HRB335, 直径选用 $\Phi 10$ 。

试验通过液压千斤顶进行加载。加载设计时取剪跨比 $\lambda = 1$, 加载点纵桥向距梁端 0.9 m, 通过分配梁作用于空心板顶板上, 分配梁与空心板之间垫有橡胶垫。加载装置布置如图 3 所示。试验荷载分级加载, 每 60 kN 设为一级, 待试验现象稳定后进行挠度和应变的测试, 并观察空心板裂缝的开展。为消除初始误差的影响, 试验加载前先进行 60 kN 的预加载。

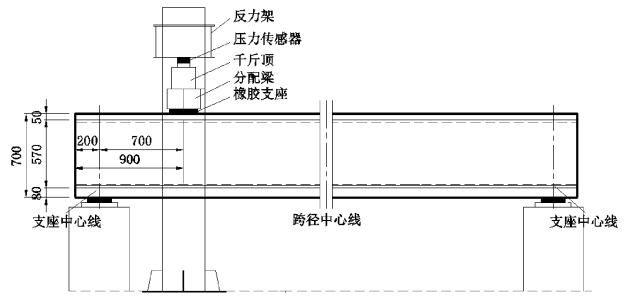


图 3 加载布置(单位:mm)

2.2 测点布置

为了解加固前后空心板梁的承载能力和加固后空心板梁桥的受力性能, 对空心板在试验荷载作用下的挠度和应变进行测量。挠度和应变测点布置如图 4 所示。挠度测量共设置 6 个截面, 即左右梁端支座处、加载点处、 $L/4$ 截面、跨中位置和 $3L/4$ 截面, 每个测试截面沿横桥向布置两个位移计。应变测量沿着支承点 45° 向上的方向布置剪应变测点(应变花), 应变测点沿空心板腹板高度方向均匀布置。试验模型和加载装置的照片如图 5 所示。

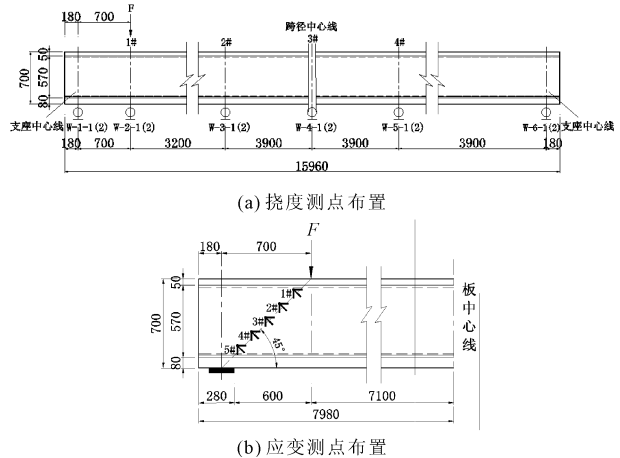


图 4 测点布置(单位:mm)



图 5 试验模型和加载装置

3 试验结果与抗剪承载力计算

3.1 试验结果

对于未填芯加固的试验模型,当荷载小于 780 kN 时未加固试件表现为弹性工作状态,梁体未见明显裂缝开展,也未听到混凝土被压碎发出声音。当荷载达到 780 kN 时,随着一声脆响,出现一条贯穿空心板的斜裂缝。裂缝起始点距支座中心线约 30 cm 处,裂缝一出现就贯通底板,呈斜向上约 45° 向加载点处发展,呈下宽上窄的形态。破坏为脆性破坏,裂缝最大宽度超过 1 cm,试验模型退出工作停止加载。未填芯加固的空心板破坏照片如图 6 所示。

未填芯加固的空心板挠度测试结果如图 7 所示。由图可见,未填芯加固的空心板在测试位置处挠度的增长在试验全过程都呈线性,加载点处的最大挠度为 4.56 mm,挠度最大值发生在跨中位置为 9.64 mm。可以看到, $L/4$ 位置处与跨中位置处的最大挠度相差不到 1%,表明加载点在靠近梁端位置时,试验荷载造成的空心板挠曲变形较小。



图 6 未加固空心板破坏照片

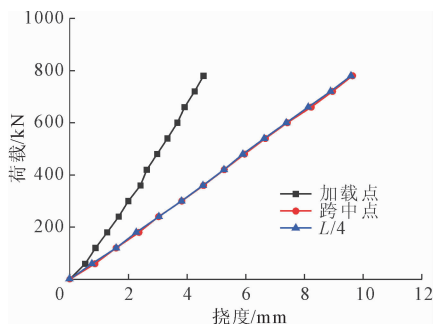


图 7 未加固挠度测试结果

填芯加固后的空心板破坏照片如图 8 所示。对于填芯加固后的空心板,加载初期的试验构件处于弹性工作状态,主梁的腹板和底板未发现明显裂缝。当试验荷载达到 820 kN 时,加载端支座边缘处出现

一条斜裂缝,斜裂缝沿梁高方向呈 45° 角向上,宽度约为 0.1 mm,长度约为 40 cm。当荷载达到 890 kN 时,在试件距支座边缘约 20 cm 处出现第二条裂缝,裂缝贯通底板并延伸至两侧腹板高度 50 cm 处,裂缝在腹板朝着加载点的方向发展,裂缝宽度约为 1.55 mm。当荷载持续加载到 930 kN 时,最先出现的裂缝继续朝着加载点方向发展,裂缝宽度并未出现明显变化。同时在加载点下方,出现了两条近似垂直方向的细小裂缝,裂缝宽度约为 0.2 mm。当荷载达到 930 kN 后,空心板内钢筋屈服,空心板失去承载能力。整个过程中裂缝的产生未发生脆性破坏。最先产生的裂缝在荷载作用下持续开展,说明填芯混凝土与空心板混凝土粘结良好,试验构件保持整体受力。

采用局部填芯加固后的空心板挠度测试结果如图 9 所示。采用混凝土填芯加固后的空心板在腹板开裂前挠度的增长呈线性,表明空心板在裂缝产生前处于弹性工作状态。荷载在 820 kN 之后,由于腹板裂缝的产生,可以看到各个位置挠度的增长都有加快的趋势。加载过程中加载点处的最大挠度为 4.77 mm,挠度最大值发生在跨中位置为 11.47 mm。说明试验荷载对空心板造成的挠曲变形较小。



图 8 加固后空心板破坏照片

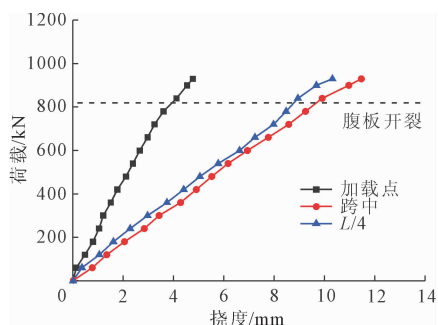


图 9 加固后挠度测试结果

3.2 结果分析

加固前后的空心板试验模型在荷载作用下的试

验现象对比见表 1 所示。采用局部填芯加固后的空心板,其腹板发生开裂时的荷载较未加固的空心板提高 5.1%,极限荷载较未加固的空心板提高 19.2%。说明采用局部填芯法进行抗剪加固可以有效提高空心板抗剪承载能力,防止空心板在剪力荷载作用下发生脆性破坏。

表 1 试验现象和荷载对比

试验现象	未加固/kN	加固后/kN
腹板开裂	780	820
极限破坏	780	930

试验结果表明,抗剪加固后空心板梁抗剪试验荷载极限值为 930 kN,是抗剪承载力设计值 886 kN 的 1.05 倍,说明抗剪加固后空心板梁的抗剪承载能力可以参照《公路桥梁加固设计规范》进行计算。

未填芯加固的空心板的破坏模式为脆性破坏,空心板发生开裂后立即失去承载能力,因此未对裂缝在试验荷载作用下的开展进行测试。空心板的裂缝分布如图 10 所示。

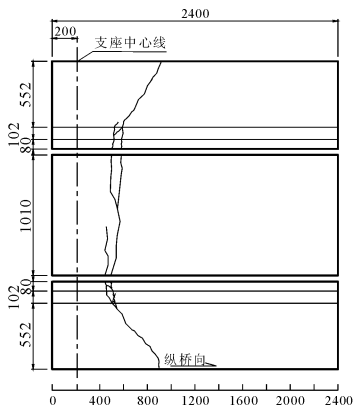


图 10 未加固裂缝分布图(单位:mm)

填芯加固后的空心板裂缝分布如图 11 所示。采用混凝土填芯加固的空心板在试验荷载作用下的裂缝宽度随荷载变化情况如图 12 所示。从图示结果可以看出,随着荷载的增加,裂缝宽度随之迅速增加。

加固前后空心板加载点和跨中截面在试验荷载作用下的挠度对比见图 13 所示。从图 13 可以看出,同样在 780 kN 的试验荷载作用下,加固后加载点的挠度比加固前小 21.1%,而加固后跨中截面的挠度比加固前小 4.0%。说明空心板端部填充的混凝土极大地提高了加载点也就是支点附近的局部刚度,但是对空心板的整体刚度没有太大的影响。

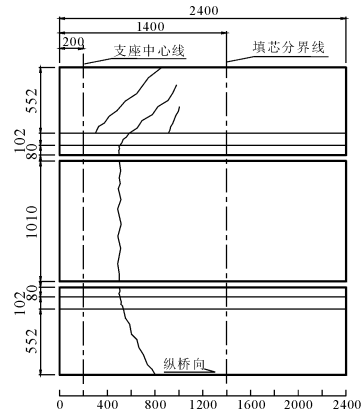


图 11 加固后裂缝分布图(单位:mm)

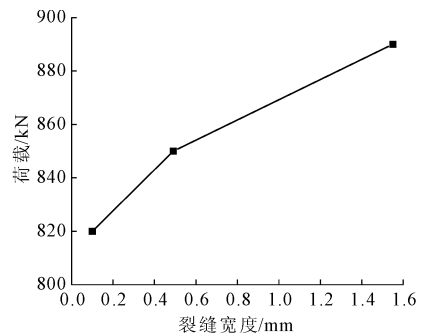
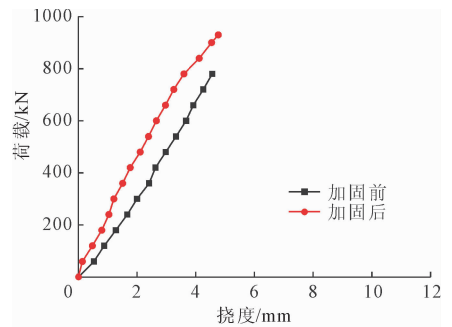
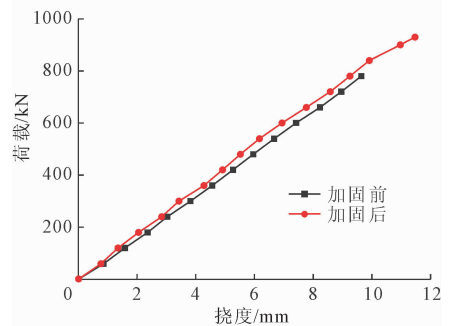


图 12 裂缝宽度测试结果



(a) 加载点挠度对比



(b) 跨中截面

图 13 挠度测试结果对比

未加固的空心板最不利位置的剪应变测试结果如图 14 所示。由图 14 可以看出,未加固的空心板在加载过程中剪应变呈线性增长的趋势,测得最大

剪应变为 $-225.23 \mu\epsilon$,这与试验现象吻合。

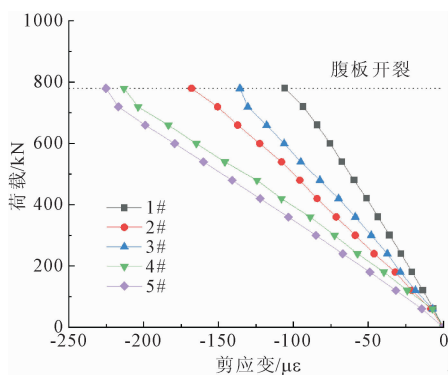


图 14 未加固剪应变测试结果

填芯加固后的空心板在腹板测点位置的剪应变测试结果如图 15 所示。由图可见,填芯加固后的空心板在腹板中下位置的测点在荷载达到 820 kN 前线性增长趋势良好,空心板处于弹性工作状态。在荷载达到 820 kN(空心板腹板开裂)之后,各个测点测得的剪应变都有加速增长的趋势,说明此时空心板进入弹塑性工作状态。测得最大剪应变为 $-209.31 \mu\epsilon$,测点同样处于最靠近加载点的位置。

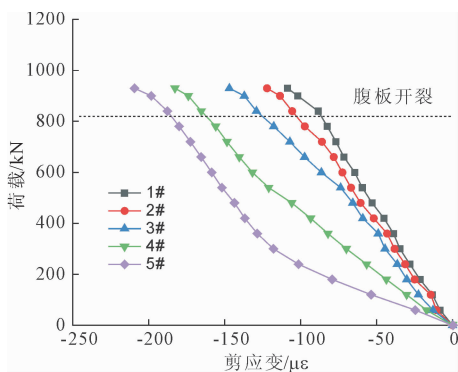


图 15 加固后剪应变测试结果

最不利测点加固前后的剪应变测试结果如图 16 所示。从图 16 可以看出,同样在 780 kN 的试验荷载作用下,加固后空心板最大剪应变比加固前降低 20.1%,说明采用局部填芯加固后空心板整体强度提升。

4 结 论

(1) 针对传统加固方法受空心板桥作业空间的限制,难以实现空心板桥抗剪加固这一弊端,提出了一种凿除空心板端部顶板并在端部空腔内注入混凝土的空心板桥抗剪加固方法。模型试验结果表明,抗剪加固后空心板梁抗剪试验荷载极限值为 930 kN,是抗剪承载力设计值 886 kN 的 1.05 倍,说明抗

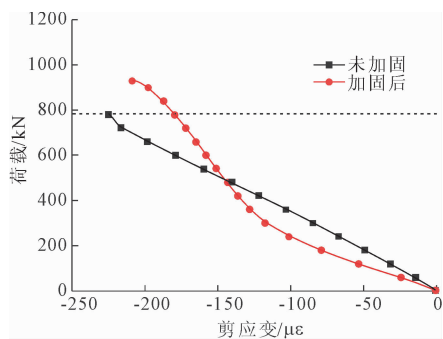


图 16 最不利测点剪应变测试结果对比

剪加固后空心板梁的抗剪承载能力可以参照《公路桥梁加固设计规范》进行计算。

(2) 填芯加固后空心板腹板发生开裂时的荷载较未加固的空心板提高 5.1%,极限荷载较未加固的空心板提高 19.2%,说明采用局部填芯法进行抗剪加固可以有效提高空心板抗剪承载能力,防止空心板在剪力荷载作用下发生脆性破坏。

(3) 填芯加固后的加载点的挠度比加固前小 21.1%,而加固后跨中截面的挠度比加固前小 4.0%。说明空心板端部填充的混凝土极大地提高了加载点也就是支点附近的局部刚度,但是对空心板的整体刚度没有太大的影响。加固后空心板最大剪应变比加固前降低 20.1%,说明采用局部填芯加固后空心板整体抗剪强度提升。

参考文献:

- [1] 吴庆雄,黄宛昆,陈宝春,等. 结合面底部设开孔钢板的铰接空心板力学性能[J]. 交通运输工程学报, 2017,17(4):45-54.
- [2] 张劲泉,李鹏飞,董振华,等. 服役公路桥梁可靠性评估的若干问题探究[J]. 土木工程学报,2019,52(S1):159-173.
- [3] 袁伟璋,黄海云,张俊平,等. 基于实际运营车辆荷载效应的既有桥梁可靠度研究[J]. 振动与冲击,2019,38(6):239-244.
- [4] 周术明,颜东煌. 车辆荷载作用下损伤开裂筒支空心板的断裂力学特征[J]. 公路交通科技,2019,36(1):94-101.
- [5] Hussein H H, Sargand S M, Khoury I, et al. Environment-induced behavior of transverse tie bars in adjacent prestressed box-girder bridges with partial depth shear keys[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2017,31(5):1-13.
- [6] 张劲泉,李鹏飞,韦 韩,等. 注浆加固预应力混凝土空心板梁抗剪性能试验研究[J]. 工程力学,2020,37(S1):32-41.

- [7] 赵亚飞,周建庭,宁金成,等. 体外预应力加固钢筋混凝土空心板的试验研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2012,31(1):22-24,28.
- [8] Hussein H H, Walsh K K, Sargand S M, et al. Interfacial properties of ultrahigh-performance concrete and high-strength concrete bridge connections[J]. Journal of Material Civil Engineering, 2016,28(5):04015208.
- [9] 宗周红,程 怡,黄学漾,等. CFRP 板加固 RC&PPC 梁抗剪性能试验研究[J]. 工程力学,2013,30(6):236-246.
- [10] Chen Guangming, Teng J G, Chen Jianfei. Shear strength model for FRP-strengthened RC beams with adverse FRP-Steel interaction[J]. Journal of Composites for Construction, 2013,17(1):50-66.
- [11] 王 渠,吴庆雄,黄宛昆,等. 预应力碳纤维板加固空心板桥试验研究[J]. 南昌大学学报(工科版),2019,41(3):247-252.
- [12] Escrig C, Gil L, Bernat M E, et al. Experimental and analytical study of reinforced concrete beams shear strengthened with different types of textile-reinforced mortar [J]. Construction & Building Materials, 2015, 83:248-260.
- [13] Liu Simeng, Sun Ma, Liu Qing. Study on bearing capacity of beams strengthened with section enlargement method considering secondary loading process [J]. Advanced Materials Research, 2012,368:2200-2203.
- [14] 杨 斌,陈世宏. 增大截面加固受弯构件的斜截面抗剪承载力计算方法[J]. 公路交通科技,2016,33(8):99-105.
- [15] 项贻强,邢 骋,邵林海,等. 横向加固空心板梁桥荷载横向分布计算方法与试验研究[J]. 中国公路学报,2013,26(2):63-68.
- [16] 聂建国,蔡 奇,张天申,等. 高强不锈钢绞线网-渗透性聚合砂浆抗剪加固的试验研究[J]. 建筑结构学报,2005,26(2):10-17.
- [17] 顾冠男. 预应力空心板梁抗剪试验及注浆加固方法研究[D]. 南京:东南大学,2021.
- [18] 公路桥梁加固设计规范:JTG/T J22—2008[S]. 北京:人民交通出版社,2008.
- [19] 混凝土结构加固设计规范:GB 50367—2013[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [20] 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范:JTG 3362—2018[S]. 北京:人民交通出版社,2018.

(上接第 28 页)

- [14] 季 赛,黄丽萍,孙亚杰. 面向无线传感结构健康监测的压缩感知方法研究[J]. 传感技术学报,2013,26(12):1740-1746.
- [15] 张笑华,肖兴勇,方圣恩. 面向桥梁结构健康监测的压缩感知动力响应信号重构[J]. 振动工程学报,2022,35(3):699-706.
- [16] Ji Shihao, Xue Ya, Carin L. Bayesian compressive sensing [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008,56(6):2346-2356.
- [17] Huang Yong, Beck J L, Wu S, et al. Bayesian compressive sensing for approximately sparse signals and application to structural health monitoring signals for data loss recovery [J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2016,46:62-79.
- [18] Ji S, Dunson D, Carin L. Multi-task compressive sensing[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2009, 57(1):92-106.
- [19] 马云飞,白华军,温 亮,等. 基于 Laplace 先验和稀疏块相关性的旋转机械振动信号贝叶斯压缩重构[J]. 兵工学报,2021,42(12):2762-2770.
- [20] 沈 益,朱 歌. 压缩感知理论综述与展望[J]. 西华师范大学学报(自然科学版),2018,39(4):337-344.
- [21] Hoerl A E, Kennard R W. Ridge regression: biased estimation for nonorthogonal problems [J]. Technometrics, 2000,42(1):80-86.
- [22] Donoho D L, Johnstone I M. Adapting to unknown smoothness by wavelet shrinkage [J]. Journal of the American Statistical Association, 1995,90(432):1200-1224.
- [23] Donoho D L, Johnstone I M. Ideal spatial adaptive via wavelet shrinkage [J]. Biometrika, 1994,81(3):425-455.
- [24] Zhang Xiaohua, Xu Youlin, Zhan Songye, et al. Dual-type sensor placement for multi-scale response reconstruction [J]. Mechatronics International Journal, 2014,24(4):376-384.
- [25] 张笑华. 结构环境振动模态参数识别随机子空间方法与应用[D]. 福州:福州大学,2006.