

文章编号: 1005-0523(2019)06-0106-06

横向钢板加固对空心板桥受力影响研究

张丽芳, 常 赟

(南京航空航天大学土木工程系, 江苏 南京 210016)

摘要: 为了探究铰接空心板桥横向加固后的横向受力分配变化及其计算方法, 引入横向受力分配比的概念, 对某简支空心板加固前后的荷载试验数据与铰接板法及修正刚接板法的理论计算结果对比, 发现通过横向受力分配比实测值与计算值对比可以清晰展示单板受力现象, 但实测数据形成的趋势线很不平滑; 因此, 引入横向受力分配增长值作为参数进行分析。虽然桥面现浇层及横向钢板加固增强了横向刚度, 但实测横向受力分配比与按铰接板法的计算值吻合更好, 说明铰接板法理论可以满足此类桥梁加固前后的横向分布计算。

关键词: 空心板桥; 铰接; 横向受力分配比; 钢板加固; 荷载试验; 铰接板法

中图分类号: U444

文献标志码: A

DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.2019.06.016

在我国目前运营的中小跨径桥梁中, 空心板桥数量庞大。从实桥检测及大量文献报道中发现, 空心板桥主要结构性病害表现为铰缝失效引起单板受力、板底开裂等。究其原因, 一方面是车道线相对稳定, 在反复车辆荷载作用下, 部分板的状态退化严重; 另一方面是交通量的增长及超载现象, 导致空心板的强度刚度安全储备降低。拆除这些桥梁进行重建既造成经济浪费又要长期中断交通; 因此, 加固维修是一种有效的解决手段。对于加固前后的效果评价, 大跨径桥梁常用监测的方法^[1]; 而对于中小跨径桥梁, 荷载试验是一种有效的常用方法^[2-4]。

装配式空心板桥受力分析往往需要将空间问题转化为平面问题, 大多利用铰接板理论计算其横向分布^[5-6]。但实际的装配空心板上方往往浇筑一层整体现浇混凝土, 在汽车荷载作用下铰接板的横向连接表现出一定的刚性连接^[7], 而运营过程中铰缝的失效又往往使得空心板之间的连接与铰接板理论假设偏离; 因此, 空心板桥的实际横向分布与理论值偏差较大。在空心板桥加固维修中, 采用钢板横向加固是提高空心板桥横向整体受力性能的有效方法, 横向加固后的空心板桥与铰接板理论的假定不符。对此, 有学者提出采用修正 G-M 法计算横向分布^[8], 亦有直接采用有限元空间建模分析^[9-10]。G-M 法是所有横向分布计算理论中最复杂的一种方法, 使用效率较低; 采用有限元建立空间分析模型比较复杂, 而且目前其分析结果与设计规范衔接不好。从构造上分析横向加固后的空心板桥, 再考虑桥面整体现浇层的作用, 铰缝之间能传递一定的弯矩, 已具备一定的刚性连接特征。因此, 本文以某简支空心板桥为例, 采用铰接板理论及修正的刚接板理论展开分析, 通过对比加固前后的实桥荷载试验结果, 对加固后空心板桥的横向分布计算方法提出建议。

采用荷载试验判断桥梁的横向受力分布时, 往往采用一辆加载车从桥面的一侧横向侧移加载至另一侧, 每一个加载工况下均可测得各片板挠度和应变, 可推算出板的横向受力分配比, 为了更直观地对比各工况下板的受力状况, 本文采用横向受力分配比的实测值和理论值进行对比。

收稿日期: 2019-04-17

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目(BK20150750)

作者简介: 张丽芳(1977—), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为桥梁评估与改造。

1 桥梁概况

1.1 加固前检测状况

东朱范桥建于2001年,为3×10 m简支板桥,桥面总宽17 m,桥面布置为0.5 m(护栏)+16 m(行车道)+0.5 m(护栏)。每跨横向由13片空心板组成,空心板高度为45 cm、中板宽124 cm、边板宽162 cm,铰缝宽1 cm。预制空心板、铰缝及桥面整体现浇混凝土均为C30。桥面铺装层采用10 cm厚的钢筋混凝土现浇层+5 cm厚的中粒式沥青混凝土。设计荷载:汽-20级,挂-100。

检测发现铰缝损坏较多,上游侧1号板跨中底板出现长约200 mm,宽约0.1 mm的裂缝(见图1(a)),2号板跨中底板有较多横向贯穿裂缝,2号板和3号板的铰缝处发生竖向错位最大处约3 cm,但铰缝间隙未增大(见图1(b))。



图1 空心板病害照片

Fig.1 Photos of hollow core slab diseases

1.2 加固情况

该桥在检测及荷载试验之后进行了加固,加固措施如下。

1) 空心板裂缝处理及加固:板底裂缝处用火碱水清刷干净后,对宽度大于0.15 mm的裂缝采用改性环氧树脂胶压力注射灌缝处理,宽度小于0.15 mm裂缝采用改性环氧树脂胶表面封闭处理。采用预应力C-GFRP(碳-玻混杂)对结构进行加固,提高构件疲劳承载力并恢复其刚度。每块空心板下安装4道15 cm宽的单层混杂纤维布,板底喷涂保护层,比采用单一的碳纤维加固节约20%成本,且采用碳-玻混杂主动加固效果较普通碳纤维明显提高。

2) 横向刚度加强:在板梁下部锚固Q345钢板带,以提高横向刚度。每条钢板宽15 cm,厚4 mm,相邻两条钢板中心间距40 cm,钢板位于C-GFRP下方。

加固后实桥图片如图2所示。



图2 实桥加固后板底状况

Fig.2 Bottom of the reinforced bridge

2 荷载试验情况

现场踏勘以后,选取病害较多、测试条件较便利的东边跨进行荷载试验。

2.1 加载车辆

根据《公路桥梁承载能力检测评定规程》^[11]规定,静力荷载试验效率 η_q 按式(1)计算

$$\eta_q = \frac{S_s}{S' \cdot (1 + \mu)} \quad (1)$$

式中: S_s 为静力试验荐载作用下,某一加载试验项目对应的加载控制截面内力、应力或变位最大计算效应值; S' 为检算荷载产生的同一加载控制截面内力、应力或变位的最不利效应计算值; μ 为冲击系数值。

本桥冲击系数为 1.324,通过试验方案,拟定工况 I 为横向分布加载,工况 II 为跨中弯矩控制加载,其中工况 II 采用 3 辆加载车,加载的效率系数为 0.99,介于 0.95~1.05 之间,满足规程要求;工况 I 采用一辆加载车,加载的效率系数为 0.33。用于横向分布加载的车辆如图 3 所示。

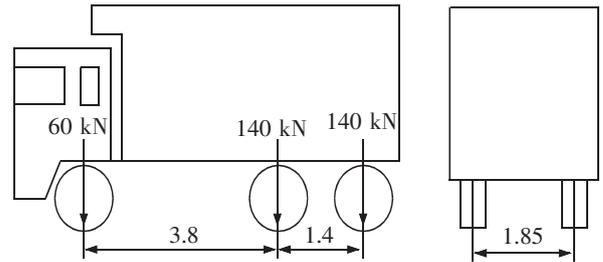


图 3 加载车辆示意图(单位:m)

Fig.3 Diagram of field test vehicle for load (Unit:m)

2.2 荷载试验工况安排

试验横向分布加载记为工况 I-1,I-2,I-3,I-4,I-5。采用图 3 所示的车辆横向移动位置分 5 级加载,各级荷载的纵向加载位置为车辆中轴和桥梁跨中线对齐,各级荷载的横向位置如图 4 所示。每次停车熄火稳定后读数。

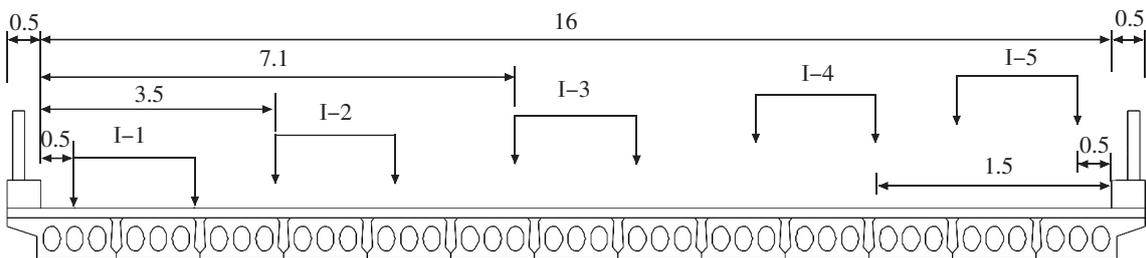


图 4 横向加载位置示意图(单位:m)

Fig.4 Diagram of transverse load location (Unit:m)

2.3 测点布置

由于条件限制,加固前试验取半幅桥宽(7 片板,编号从边板到中板依次增加)的板进行测试,在每片板跨中处底版下设置 2 片应变计和一个位移计,两端支座位置各设置一个位移计。

加固后测点方案与加固前基本一致,但增加了纤维布下的应变测点,在每片板底粘贴的中间一块纤维布处布置碳纤维布应变片,1~7 号板每片板布置 3 个应变片,编号从边板到中板依次递增。

3 试验结果及理论分析

3.1 加固前试验及分析

单片板跨中实测位移记为 f_m ,支点位移记为 f_{z1} 和 f_{z2} ,整理得到该片板跨中实测挠度为 $f_i = f_m - (f_{z1} + f_{z2})/2$ 。假设另半幅板的状况与测试半幅的一致,类似处理以后,计算各片板的挠度比值并归一化处理,即得到实测的横向受力分配比:

$$m_i = \frac{f_i}{\sum_{j=1}^n f_j} \quad (2)$$

式中: n 为板的总片数。

根据铰接板理论,计算各片板的横向分布影响线,再按工况 I 的横向加载位置,在每片板的横向分布影响线上插值求出 2 个车轮位置对应的影响线竖标 η_{i1}, η_{i2} , 则可算出每片板的理论横向受力分配比 $m_{ci}=(\eta_{i1}+\eta_{i2})/2$, 两者对比见表 1。

表 1 加固前横向加载计算值与实测值对比

Tab.1 Comparison of calculated and measured value under transverse load before reinforcement

工况	加载值	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#
I-1	理论值	0.251	0.206	0.166	0.115	0.080	0.056	0.039
	实测值	0.187	0.200	0.332	0.125	0.055	0.078	0.020
I-2	理论值	0.111	0.115	0.143	0.155	0.137	0.105	0.073
	实测值	0.042	0.085	0.231	0.154	0.163	0.162	0.090
I-3	理论值	0.039	0.041	0.051	0.069	0.096	0.129	0.145
	实测值	0.005	0.012	0.060	0.048	0.075	0.196	0.208
I-4	理论值	0.015	0.015	0.019	0.026	0.036	0.051	0.073
	实测值	0.000	0.000	0.005	0.001	-0.003	0.068	0.117
I-5	理论值	0.008	0.008	0.011	0.014	0.019	0.027	0.039
	实测值	0.000	-0.001	-0.001	0.000	0.001	0.002	0.028

以上数据处理表明,采用横向受力分配比可以较直接、快捷地展示荷载实验工况下桥梁各板的横向受力对比。由表 1 可以看出,工况 I-1~I-3 下测试板(1#~7# 板)分配到较大的荷载,数值可比性好,而工况 I-4, I-5 下荷载远离测试板,实测值很小,数值可比性差。各片板之间实测横向分配比的变化较计算值大,尤其是 3# 板明显偏大且存在突变现象,判断有可能是板本身刚度偏低或与两侧板的连接削弱,出现单板受力现象,与检测结果(该板板下裂缝较多且与 2# 板之间有错台状况)互相印证。此外,边板的计算值明显大于实测值,可能是边板位移测试误差的影响或边板桥面构造的影响。

3.2 加固后试验及分析

1) 计算值修正。采用横向钢板带加固后,横向刚度得到提升,各片板之间的连接和铰接板理论的假定偏差更大,进一步考虑桥面上有整体现浇层,可以认为各片板之间横向联系加强且能传递一定的弯矩,故本文按整体板进行分析,采用修正的刚接板法计算。板的纵向抗弯惯性矩 I 和抗扭惯性矩 I_T 按原板计算,单位宽度板的横向抗弯惯性矩按式(3)计算

$$I_1 = h_1 \left(\frac{h_1 + h}{2} \right)^2 + \frac{E_s}{E_c} A_s \left(\frac{h}{2} \right)^2 \quad (3)$$

式中: h_1 为桥面现浇层厚度,mm; h 为预制板厚度,mm; E_s, E_c 分别为钢筋和混凝土的弹性模量之比,MPa; A_s 为单位板宽内钢板的面积,mm。

利用板的刚度特性,求得刚度系数^[5]如下:

$$\gamma = \frac{\pi^2 EI}{4GI_T} \left(\frac{b_1}{l} \right)^2 = 5.8 \frac{I}{I_T} \left(\frac{b_1}{l} \right)^2 \quad (4)$$

$$\beta = \frac{f}{\omega} = \frac{\pi^4 I d_1^3}{3l^4 I_1} = \frac{\pi^4 I b^3}{24I_1 l^4} \quad (5)$$

式中: I 为截面抗弯惯性矩,mm⁴; I_T 为截面抗扭惯性矩,mm⁴; I_1 为单位板宽的抗弯惯性矩,mm⁴; b_1 为板宽,mm; l 为计算跨径,mm。

按刚接板法计算横向分布系数,可得到加固后 I-1 和 I-2 横向受力对比如图 5 所示。可以看出加固后横向受力分配的变化趋势更靠近计算值,说明横向加固达到预期的加强横向刚度的效果,尤其是单板受力状

况得到明显改善。

2) 实测数据处理。由图5可以看出,各片板下实测数据形成的趋势线很不平滑,影响了与计算值的对比。分析原因认为主要有两方面影响:一是板本身劣化的影响;二是测试误差的影响。为了尽量消除测试误差,采用相对变化值进行对比。记工况I-2和工况I-1横向受力分配增长值为 m_{2-1} 、工况I-3和工况I-1横向受力分配增长值为 m_{3-1} 。

由图5和图6对比可见横向分配增长值消除了单次测试误差的影响,与计算值的对比效果更好,变化趋势清晰。同时,由图6的计算值与实测值对比可以发现,虽然实桥有桥面现浇层及较密集的横向钢板加固,但横向分布并未如理论分析那般有较强的横向刚度,实测值的分布与按铰接板法的计算值吻合较好,说明无论加固前后,铰接板法理论可以满足此类桥梁的横向分布计算。

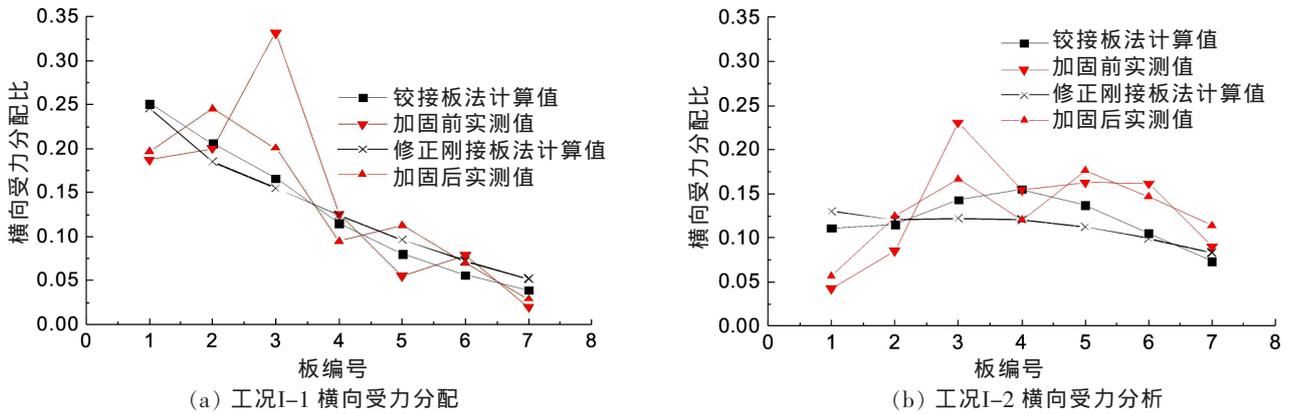


图5 工况I-1和I-2横向受力对比

Fig.5 Comparison of transverse distribution ratio under condition I-1 and I-2

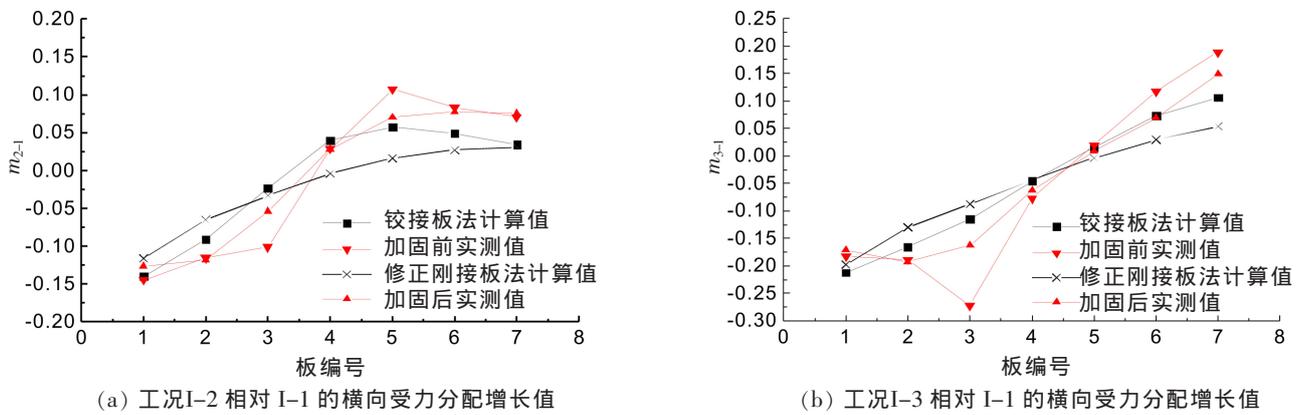


图6 横向分配增长值对比

Fig.6 Comparison of transverse distribution growth value

4 结论

通过对采用横向钢板带加固的某简支梁桥开展加固前后荷载试验,侧重分析了桥梁加固前后的荷载横向受力情况,得到以下结论:

1) 用横向受力分配比可以快捷地展示桥梁荷载试验过程中各片板的受力对比,加固前试验与计算横向受力分配比的对比可以清晰展示桥梁中个别劣化梁板的单板受力现象。

2) 采用横向钢板加固后,各片板的横向受力分配比的变化趋势更靠近计算值,达到预期的加强横向刚度的效果。

3) 引入相对横向受力分配增长值进行对比,可以更清晰地展示变化趋势。

4) 尽管实桥有桥面现浇层及横向钢板加固,增强了横向连接刚度,但横向受力分配实测值与按铰接板法的计算值吻合较好,说明无论加固前后,铰接板法理论可以满足此类桥梁的横向分布计算,无需考虑横向刚性增强进行修正。

参考文献:

- [1] 贾永峰,邱婷,宋庆辉,等. 基于光纤传感技术的大跨连续刚构桥施工阶段张拉预应力监测[J]. 华东交通大学学报,2018,35(2):24-31.
- [2] 蒋伟,崔海. 体外预应力加固桥梁的荷载试验评定研究[J]. 中外公路,2017,37(2):85-88.
- [3] EVA O L LANTSOGHT,COR VAN DER VEEN,ANE DE BOER,et al. State-of-the-art on load testing of concrete bridges[J]. Engineering Structures,2017,150:231-241.
- [4] HEEYOUNG LEE,WOO TAI JUNG,WONSEOK CHUNG. Field test of an old RC bridge before and after NSM strengthening[J]. Composite Structures,2018,202:793-801.
- [5] 贺栓海,谢仁物. 公路桥梁荷载横向分布计算方法[M]. 北京:人民交通出版社,1996.
- [6] 王敏强,薛飞,张桓,等. 铰接板梁荷载横向分布影响线计算方法[J]. 武汉大学学报(工学版),2004,37(4):68-72.
- [7] LENG YANLING,ZHANG JINQUAN,JIANG RUINIAN,et al. Experimental research on transverse load distribution of prefabricated hollow slab concrete bridges with hinge joint cracks[J]. IABSE Symposium Report,2013,99(7):1694-1700.
- [8] 项贻强,邢聘,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.
- [9] OGUZHAN HASANCEBI,TAHA DURLUPINAR. Detailed load rating analyses of bridge populations using nonlinear finite element models and artificial neural networks[J]. Computers and Structures,2013,128:48-63.
- [10] 赵宝俊,党智平,朱郭瑞,等. 空心板桥拓宽后新旧板耦合受力分析[J]. 建筑科学与工程学报,2016,33(1):61-66.
- [11] 中华人民共和国交通运输部. JTG/T J21-2011 公路桥梁承载能力检测评定规程[S]. 北京:人民交通出版社,2011.

Study on Effect of Transverse Steel Plate Reinforcement on Stress of Hollow Core Slab Bridge

Zhang Lifang, Chang Yun

(College of Civil Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to study the transverse distribution change of hollow core slab bridge after reinforcement by transversal steel plate, a simply supported hollow core slab bridge was employed as an example. The field load test data of the bridge before and after reinforcement were compared with the theoretical results by hinged-joint slab method and modified rigid-joint slab method. It is found that the phenomenon of 'single plate load effect' can be clearly displayed by comparing the measured and calculated values of the transverse distribution ratios. As the trend line formed by the measured data was not smooth, the relative transverse distribution growth value was introduced in the paper. Although the cast-in-situ deck and transverse steel plate reinforcement enhanced the transverse stiffness, the measured transverse distribution ratios were in good agreement with the calculated values according to the hinge-jointed slab method. The results show that the theory of hinge-jointed slab method can meet the transverse distribution calculation before and after the strengthening of such bridges.

Key words: hollow core slab bridge; hinge-joint; transverse distribution ratio; strengthened by steel plate; field load test; hinge-jointed slab method