

基于智能化建造的T梁横隔体系研究

刘浪,陶齐宇,徐其刚

(四川省公路规划勘察设计研究院有限公司,四川成都 610041)

摘要:为解决传统预制T梁在桥梁智能化建造中面临的横隔板数量过多、模板安拆困难及智慧化程度低等问题,该文围绕横隔板道数优化和装配式横隔板的应用两个方面展开研究。通过对不同横隔板配置方案的分析,以及对装配式横隔板与预制横隔板在桥梁横向刚度贡献上的对比,深入探究了横隔板对桥梁性能的影响。研究表明:T梁少横隔板体系在智能化建造中是可行的,但无横隔板体系对桥面板的性能提出了更高要求;装配式横隔板相较于预制横隔板,在桥梁横向刚度上的贡献较低,采用装配式横隔板会增大桥面板的受力;横隔板的安装位置对桥梁横向刚度具有显著影响。

关键词:智慧化建造;少横隔体系;湿接缝;装配式横隔板

中图分类号:U448.14

文献标志码:A

Research on T-Beam System with Diaphragm Based on Intelligent Construction

LIU LANG, TAO Qiyu, XU Qigang

(Sichuan Highway Planning, Survey, Design and Research Institute Ltd., Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: The traditional precast T-beam faces issues such as excessive diaphragms, difficult formwork installation and removal, and low levels of intelligence in intelligent bridge construction. To address these issues, this paper focused on the optimization of the number of diaphragms and the application of prefabricated diaphragms. By analyzing different diaphragm configuration schemes and comparing the contributions of prefabricated diaphragms and precast diaphragms to the lateral stiffness of the bridge, this paper deeply explored the impact of diaphragms on bridge performance. The research results indicate that the T-beam system with fewer diaphragms is feasible in intelligent construction, but the system without diaphragms places higher demands on the performance of bridge decks. Additionally, compared to precast diaphragms, prefabricated diaphragms contribute less to the lateral stiffness of the bridge, and their use increases the stress on bridge decks. Furthermore, the installation position of diaphragms has a significant impact on the lateral stiffness of the bridge.

Keywords: intelligent construction; system with fewer diaphragm; wet joint; prefabricated diaphragm

0 引言

在《中国制造2025》行动纲领的指引下,公路桥梁预制梁厂正朝着信息化、自动化、智能化等建设思路发展。目前,国内外高速公路、高速铁路预制梁场在现有技术装备研发创新的基础上,T梁智能化制造可基本实现:① 钢筋数控加工以及主筋全定位绑扎;

② 预应力管道精准定位、自动压浆;③ 预应力钢束自动穿束、抽拔;④ 全自动养护等^[1-3]。智能化建造使得结构的可靠性、耐久性大幅度提高,但预制T梁构造最不规则的位置在横隔板。无横隔板模板如图1所示,采用旋转方式开合,模板构造简单、脱模速度快且质量好、占用场地小。带有横隔板的预制T梁模板如图2所示,采用平推方式开合,模板构造复杂、

收稿日期:2023-11-10

基金项目:四川省交通运输厅科技项目(编号:藏高科技2021-A-05)

作者简介:刘浪,男,博士,高级工程师.E-mail:705119767@qq.com

通用性差。目前生产的T梁绝大部分都是带横隔板构造,这也大大制约了T梁智能化建造程度,为此亟须对T梁横隔板构造进行深入研究。



图1 无横隔板T梁模板

Figure 1 T-beam formwork without diaphragm



图2 有横隔板T梁模板

Figure 2 T-beam formwork with diaphragm

预制T梁的横向联系主要由桥面板和横隔板提供,而两者对于结构整体性的贡献并没有明确的定论,加之装配式横梁与桥面板为脱空状态,这使得问题更为复杂。吕玉匣等^[4]采用Ansys对T梁横隔板道数进行参数化分析,结果表明:设置3道横隔板时,其计算结果与刚性横梁法误差小于5%;姜增国等^[5]针对跨径13 m的工字形截面梁进行了有无横隔板的实桥荷载试验,结果表明:设置横隔板,可以使得横向分布更为均匀,且降低15%的冲击系数;牛艳伟等^[6]开展了横隔板对装配式桥梁空间受力影响的模型试验,结果表明:当不设置桥面板湿接缝时,装配式横隔板提供的横向刚度有限,不足以达到刚性连接的效果。本文分两个思路对横隔板开展研究:①对比分析横隔板道数对于结构受力的影响;②将常规预制T梁横隔板改为装配式横隔板,如图3所示,进行结构受力对比分析。

1 工程概况

计算模型采用30 m T梁,桥面宽度16.6 m,由7片T梁组成,T梁采用马蹄形截面,梁高2 m,相邻T梁中心间距2.43 m,腹板厚度由跨中的20 cm变化到

梁端的40 cm,中横隔板厚度20 cm,端横隔板厚度30 cm,桥面板厚度为18 cm。以往对于T梁计算通常采用梁格模型,梁格模型能准确地分析主梁和横隔板的受力,但是无法采用车道面荷载对桥面板进行分析。本文采用梁-板模型对T梁进行建模,如图4所示,其中主梁采用梁单元,桥面板和横隔板采用板单元。



图3 装配式T梁横隔板

Figure 3 T-beam with prefabricated diaphragm

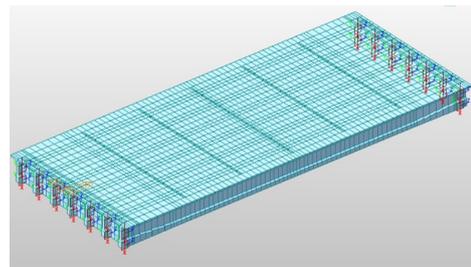


图4 T梁全桥模型

Figure 4 Model of T-beam bridge

2 T梁横隔板道数优化

在不调整结构参数的情况下,比较横隔板道数对主梁应力、结构刚度、桥面板和横隔板受力的影响,并分析其变化规律,确定能否减少横隔板道数。横隔板道数会影响主梁应力分布的均匀性,但由于主梁压应力储备较大,不设横隔板主梁应力也能满足规范要求^[7],本文不再进行分析。

2.1 横隔板道数对结构刚度的影响

为了比较横隔板道数对于结构整体刚度的影响,假定桥梁在两车道偏载作用下,车轮荷载布置如图5所示,并分别建立以下模型:①无横隔板;②2道端横隔板;③2道端横隔板+1道中横隔板;④2道端横隔板+3道中横隔板;⑤2道端横隔板+5道中横隔板;⑥2道端横隔板+6道中横隔板。不同横隔板道数T梁的最大挠度见表1。

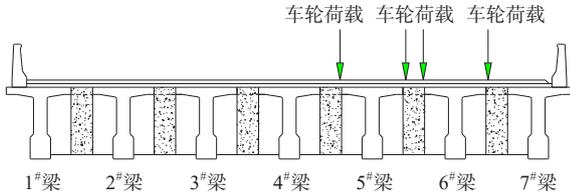


图5 车辆偏载布置情况

Figure 5 Partial load arrangement of vehicle

表1 不同横隔板道数T梁最大挠度

Table 1 Maximum deflection of T-beam with different numbers of diaphragm

横隔板道数	桥面板最大挠度/mm	最大挠度位置
无横隔板	11.7	6#梁
2道端横隔	11.3	6#梁
2道端横隔+1道中横隔	11.0	7#梁
2道端横隔+3道中横隔	10.9	7#梁
2道端横隔+5道中横隔	10.8	7#梁
2道端横隔+6道中横隔	10.8	7#梁

图6、7为不设中横隔板和设置5道中横隔板T梁的应力和变形图。当只设置2道端横隔板时,在车

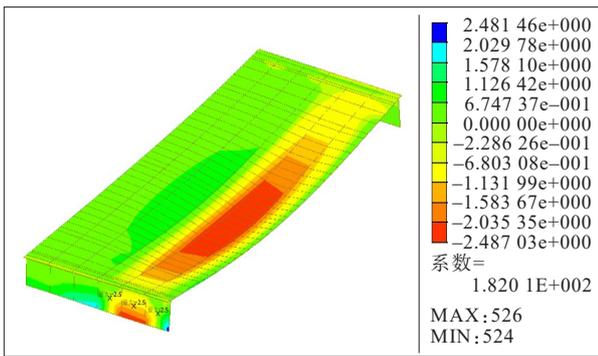


图6 2道端横隔板T梁变形及应力图(单位:MPa)

Figure 6 Deformation and stress diagrams of T-beam with two end diaphragms (unit:MPa)

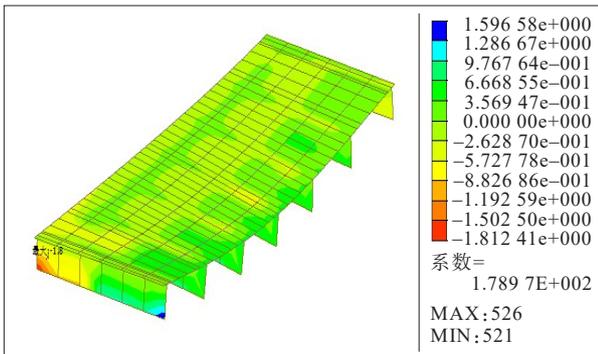


图7 2道端横隔板+5道中横隔板T梁变形及应力(单位:MPa)

Figure 7 Deformation and stress analysis of T-beam with two end diaphragms and five intermediate diaphragms (unit:MPa)

轮荷载作用位置桥面板的应力较为集中,而且该位置的竖向变形量较大,形成一个较为明显的凹腔;当设置5道中横隔板时,桥面板的应力较为均匀,且整体变形协调。

从跨中截面提取设置不同横隔板数量时1#~7#梁片的竖向挠度如图8所示。

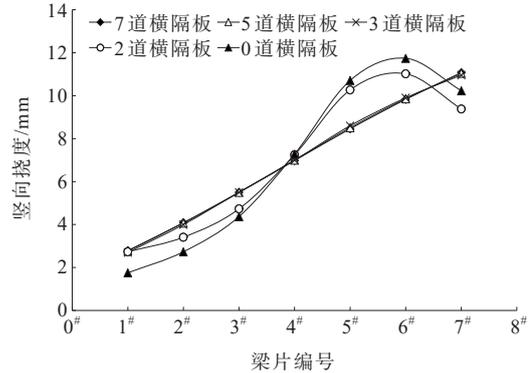


图8 不同横隔板道数T梁梁片变形曲线

Figure 8 Deformation curve of T-beam with different numbers of diaphragm

由图8可知:随着横隔板道数增加桥面板的最大挠度减小,但变化幅度并不明显。横隔板道数对各片梁的挠度分布影响较大,当设置横隔板数量较少时,在车轮荷载作用位置桥面变形呈现突变曲线,但结构还是保持有一定的横向刚度,整体趋势呈直线分布,其主要原因为桥面板湿接缝提供的横向刚度不可忽视;当设置1道中横隔后各梁片的挠度基本呈直线分布,再增加横隔板数量对结构的变形影响不大。

提取设置不同横隔板数量时结构的前3阶自振频率,结果如表2所示。

表2 不同横隔板道数T梁自振频率

Table 2 Natural vibration frequency of T-beam with different numbers of diaphragm

横隔板道数	1阶竖向弯	绕纵向反对称	绕纵向对称
	曲频率/Hz	扭转频率/Hz	扭转频率/Hz
无横隔板	2.47	2.65	3.24
2道端横隔	2.48	2.80	3.63
2道端横隔+1道中横隔	2.49	2.82	7.01
2道端横隔+3道中横隔	2.49	2.87	12.50
2道端横隔+5道中横隔	2.50	2.88	13.30
2道端横隔+6道中横隔	2.50	2.88	13.80

由表2可知:横隔板道数对1阶竖向弯曲频率影响较小,说明增加横隔板道数无法明显提高结构的竖向刚度;横隔板道数对绕纵向的反对称扭转和对称扭转频率影响较大,说明横隔板道数对于扭转刚度影响较大,中横隔板对扭转刚度的贡献大于端横隔板,当设置3道以上中横隔后结构的扭转刚度变化较小。

2.2 横隔板道数对湿接缝受力的影响

预制T梁桥面板采用湿接缝进行连接,在车轮荷载作用下,湿接缝沿横桥向短边方向上缘受压下缘受拉,对下缘进行抗弯承载能力验算以及裂缝宽度验算,结果如表3所示。

表3 不同横隔板道数T梁湿接缝受力情况
Table 3 Wet joint stress of T-beam with different numbers of diaphragm

横隔板道数	湿接缝处 最大拉应 力/MPa	湿接缝 裂缝宽 度/mm	桥面板 横向弯 矩分配/%	承载能力 安全系数
无横隔板	2.7	0.131	100	1.54
2道端横隔	2.6	0.128	95	1.59
2道端横隔+ 1道中横隔	1.5	0.076	75	2.72
2道端横隔+ 3道中横隔	0.7	0.050	65	4.00
2道端横隔+ 5道中横隔	0.4	0.041	62	4.80
2道端横隔+ 6道中横隔	0.4	0.040	61	4.90

由表3可知:当不设置横隔板时,结构横向弯矩全部由桥面板湿接缝承担,虽然桥面板湿接缝裂缝宽度验算和承载力能力验算都能满足规范要求,但是需要考虑支座失效、支座安装精度不足、湿接缝施工质量等问题等不利因素的影响,如不设置横隔板,湿接缝很容易开裂破坏^[8]。当设置1道中横隔板后,湿接缝的安全系数明显提高,当设置5道以上的中横隔后,湿接缝的安全系数变化幅度已经很小。

2.3 横隔板道数对横隔板受力的影响

考虑最不利车道荷载组合作用下,当车道荷载对称布置在横桥向两侧时,横隔板上缘拉应力最大,当车道荷载布置在横桥向中间时,横隔板上缘拉应力最大,计算结果如表4所示。

表4 不同横隔板道数T梁横隔板受力情况

Table 4 Diaphragm stress of T-beam with different numbers of diaphragm

横隔板道数	中横隔板下 缘拉应力最 大值/MPa	横隔板下 缘裂缝宽 度/mm	中横隔板上 缘拉应力最 大值/MPa	横隔板上 缘裂缝 宽度/mm	承载能 力安全 系数
无横隔板					
2道端横隔	1.8	0.087	0.9	0.057	2.7
2道端横隔+ 1道中横隔	5.3	0.237	2.1	0.184	1.2
2道端横隔+ 3道中横隔	2.9	0.120	1.4	0.106	2.2
2道端横隔+ 5道中横隔	2.2	0.099	1.0	0.058	2.8
2道端横隔+ 6道中横隔	2.0	0.095	0.9	0.054	3.0

由表4可知:当只设置1道中横隔板时,中横隔板的尺寸和配筋已无法满足抗裂计算需求,当设置5道以上的中横隔后,横隔板的安全系数变化幅度已经很小。

综上所述:横隔板与湿接缝共同承担桥梁横向弯矩的传递,两者都不可忽视。横隔板道数直接关系到横隔板自身受力以及湿接缝的受力情况,横隔板数量较少时,横隔板自身以及湿接缝受力较大,横隔板过多对结构受力均匀性影响不大,另外还会增加施工难度。设置3道中横隔板后,T梁的整体性能、湿接缝的受力情况能满足规范要求,对横隔板的截面尺寸以及配筋加强后,可以实现横隔板道数的优化。

3 装配式横隔板

为了便于T梁智能化建造,通过T梁预埋直螺纹套筒,预制横隔板后安装的方式,减少了T梁预制时附带的横隔板。预制横隔板顶部与桥面板底部会存在一个高差 H , H 的取值关系到桥面板和预制横隔板两者的弯矩分配情况,为此建立 $H=0$ (顶紧)、15 cm、50 cm、85 cm、120 cm设置2道端横隔+5道中横隔的计算模型(图9),计算结果如表5所示。

由表5可知:当 $H=0$ cm时,横隔板与桥面板顶

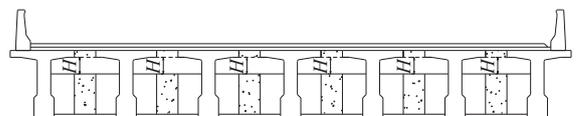


图9 计算模型

Figure 9 Computational model

表5 不同 H 值下T梁桥面板、横隔板受力情况
Table 5 Stress of T-beam bridge deck and diaphragm under different H values

桥面板底部到横隔板顶部距离 H/cm	桥面板裂缝宽度/ mm	桥面板承载能力安全系数	横隔板承载能力安全系数	桥面板横向弯矩分配/%	横隔板横向弯矩分配/%
0(顶紧)	0.06	2.58	2.8	62	38
15	0.07	2.13	3.0	78	22
50	0.07	2.02	3.4	80	20
85	0.08	1.91	4.1	85	15
120	0.11	1.37	4.8	98	2
无中横隔	0.12	1.33	—	100	0

紧,此时横隔板分配内力最多,计算结果与现浇横隔板几乎一致。当 $H=15\text{ cm}$ 时,横隔板与桥面板脱离,横隔板对于横向弯矩的分配比例大幅度降低。随着 H 值的增大,桥面板横向弯矩分配比例增加,桥面板承载能力安全系数降低,横隔板对于横向弯矩分配的作用逐渐减小。当 $H=120\text{ cm}$,横隔板对于横向弯矩的分配作用已经很小,湿接缝受力情况几乎与不设横隔板时一致。在保证连接可靠的基础上,装配式横隔板能起到现浇横隔板的作用,但是对于横向刚度的贡献与现浇横隔板相比大幅度下降,采用装配式横隔板的T梁应对桥面板进行加强设计,另外横隔板应尽量靠T梁上缘进行布置。

4 结论

(1) 梁-板模型能较为准确地计算横隔板与桥面板对梁桥横向刚度的分配情况,也适用于装配式横隔板的分析计算。

(2) 桥面板对于横向刚度贡献不可忽视,在少横隔板的情况下,桥面板对横向刚度起主要作用。

(3) 中横隔板能明显提高T梁的横向刚度,无中横隔板会降低桥梁整体性能,大大增加桥面板受损破坏的可能性。如果采用少横隔体系,应对中横隔以及桥面板进行相应的加强。

(4) 装配式横隔板对于横向刚度的贡献比现浇横隔板低,装配式横隔板应尽量靠T梁上缘布置,且对桥面板性能有较高的要求。

参考文献:

References:

[1] 韩晓强,刘文荐,江忠贵,等.铁路智能化预制梁场实践[J].

中国铁路,2021(9):73-78.

HAN Xiaoqiang, LIU Wenjian, JIANG Zhonggui, et al. Practice of railway intelligent girder fabrication yard[J]. China Railway,2021(9):73-78.

[2] 李廉水,石喜爱,刘军.中国制造业40年:智能化进程与展望[J].中国软科学,2019(1):1-9,30.

LI Lianshui, SHI Xiaai, LIU Jun. 40 years of manufacturing in China: Intelligentization process and outlook[J]. China Soft Science,2019(1):1-9,30.

[3] 但晨,朱明,肖春红.基于BIM+GIS技术的常规桥梁设计信息数字化交付方法研究[J].中外公路,2023,43(5):141-147.

DAN Chen, ZHU Ming, XIAO Chunhong. Research of digital delivery method for conventional bridge design information based on BIM+GIS technology[J]. Journal of China & Foreign Highway,2023,43(5):141-147.

[4] 吕玉匡,刘炎海.横隔板对多主梁结构受力行为的影响分析[J].兰州交通大学学报,2004,23(1):38-42.

LYU Yuxia, LIU Yanhai. On analysis of effect of diaphragm on multi main beam structure behavior subjected to force[J]. Lanzhou Jiaotong University,2004,23(1):38-42.

[5] 姜增国,王敏,鲁冲.有无横隔板桥梁结构性能对比分析[J].武汉工程大学学报,2012,34(6):27-29.

JIANG Zengguo, WANG Min, LU Chong. Performance assessment of bridge with and without diaphragm based on loading tests[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology,2012,34(6):27-29.

[6] 牛艳伟,杜隆基,曹宏恩,等.横隔板对装配式梁桥空间受力影响的模型试验研究[J].结构工程师,2016,32(3):149-154.

NIU Yanwei, DU Longji, CAO Hongen, et al. Experiment of diaphragm effect on spacial internal force distribution of precast beam bridge[J]. Structural Engineers, 2016, 32(3): 149-154.

[7] 李油油,于晓坤,贾艳敏,等.预应力混凝土连续矮肋T梁抗弯承载力分析[J].中外公路,2020,40(6):104-108.

LI Youyou, YU Xiaokun, JIA Yanmin, et al. Analysis of flexural bearing capacity of prestressed concrete continuous T-beam with short ribs[J]. Journal of China & Foreign Highway,2020,40(6):104-108.

[8] 杜元.基于大数据的装配式小箱梁桥病害发展规律及原因分析[J].中外公路,2022,42(1):163-168.

DU Yuan. Analysis of disease development law and causes of composite box girder bridge based on big data[J]. Journal of China & Foreign Highway,2022,42(1):163-168.