

斜交小箱梁中横隔板优化布设研究

麦鑫浩

(中铁二十四局集团有限公司,上海市 200071)

摘要:为了确定斜交小箱梁中横隔板的最优布置方式,以某50 m跨径预应力混凝土小箱梁桥为研究对象,对其在运梁荷载下的内力进行数值模拟和实测对比。首先,根据实测应力数据对模型进行修正,并采用限制翘曲正应力确定中横隔板的最大间距。然后,根据桥梁跨中挠度差系数,确定中横隔板的高度和厚度。最后,根据小箱梁挠度的变化规律,分析中横隔板的最佳数量。结果表明:中横隔板最大间距为13.1 m,设置1~2道中横隔板会导致因间距过大而引起箱梁翘曲正应力超限;在符合构造要求的情况下,中横隔板高度越大,自身应变越小,荷载横向分布效果越好;随着中横隔板厚度的增加,荷载横向分布效果增强,但过大的厚度会增加桥梁自重;随着中横隔板数量增加,其荷载横向和纵向分布效果均增强,但考虑到中横隔板自重影响,增加中横隔板数量会使小箱梁挠度增加。总体而言,设置4道中横隔板对小箱梁均匀受力及中横隔板受力最为有利,且符合构造要求,继续增加中横隔板数量会显著增加小箱梁挠度。

关键词:斜交小箱梁;优化布置;实测验证;中横隔板;荷载横向分布

中图分类号:U448.21+3

文献标志码:A

0 引言

随着城市建设提速,市政桥梁数量迅速增加,预应力混凝土多箱式桥梁因其便于架设、跨度较大且适于宽幅城市道路的特点,应用日趋广泛^[1]。预应力混凝土小箱梁之间常设置中横隔板以将荷载横桥向传递,其作为多箱式桥梁的关键受力构件,需要根据受力状态确定最优布置方式。

目前,国内外已有横隔板设置相关方面一些研究。例如唐先习等^[2]通过建立有限元模型,初步研究了混凝土T梁横隔板合理的高度与厚度;田康等^[3]研究了横隔板设置数量及间距对主梁受力的影响规律;张莉^[4]通过有限元软件对简支钢箱梁的畸变效应进行分析,研究了横隔板数量及箱梁几何特征对箱梁畸变效应的影响规律。但已有研究对于装配式小箱梁桥中横隔板数量、高度和厚度的确定方法仍缺乏理论支撑。小箱梁为空心箱体结构,不同箱梁间中横隔板不连续,其腹板与中横隔板的相互作用特点与具有连续中横隔板的T梁有较大差别。现有研

究集中于T形梁桥,对多片箱梁组合截面研究较少,且未对装配式中横隔板的受力特性深入研究,也未进一步确定桥梁状态实时预警阈值^[5]。

1 工程背景

无锡市通沙路上跨铁路区段桥梁跨径为50 m,设计速度为40 km/h,设计荷载等级为1.3倍城-B级,属于城市次干道。桥梁上部结构采用预应力混凝土小箱梁,下部结构为桩柱式桥墩。桥面位于 $R=600$ m的圆曲线上,桥面横坡为2%,纵断面位于 $R=1\,950$ m的竖曲线上,最大纵坡为4%。上跨沪宁城际无锡站股道,梁底面距电气化杆最高点55 cm。

两侧简支端均设置双支座,4#墩端固定,5#墩端可在桥轴线方向活动。小箱梁就位、安装各片箱梁间的盖板后现浇端横隔板、中横隔板,最后施工桥面现浇层、桥面铺装。沿梁轴方向设置若干中横隔板,本文选取中横隔板具有代表性的下翼缘横桥向应力值进行对比^[6]。中横隔板下翼缘横桥向应变传感器布置位置如图1所示,L1~L12为小箱梁主梁编号,

收稿日期:2022-05-31(修改稿)

基金项目:江苏省重点研发计划项目(编号:BE2018120)

作者简介:麦鑫浩,男,大学本科,高级工程师.E-mail:1147961146@qq.com

S1~S19为JMZX-215HAT智能弦式应变传感器布设编号,量程为 $\pm 1\,500\,\mu\epsilon$ 。预制小箱梁、中横隔板、预制盖板均采用C55混凝土,混凝土弹性模量 $E=3\times 10^4\text{ MPa}$ 。

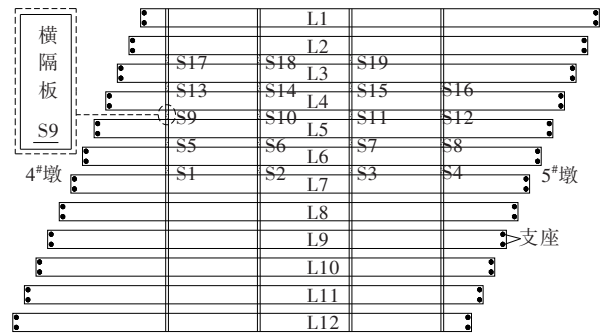


图1 中横隔板下翼缘横桥向应变传感器布置

2 有限元建模及其验证

采用Midas/Civil软件建立全桥有限元模型(图2)。小箱梁采用梁单元模拟,跨中与端部采用变截面过渡,共12片小箱梁,每片小箱梁21个单元,共

252个梁单元;中横隔板和盖板均采用梁单元模拟,相邻两片梁之间的中横隔板或盖板为一个单元;中横隔板垂直于桥轴线布置,一道为11个单元,单块横隔板横向抗弯刚度为 $0.345\,6\text{ m}^4$;盖板平行于端横隔板布置,共88个单元。

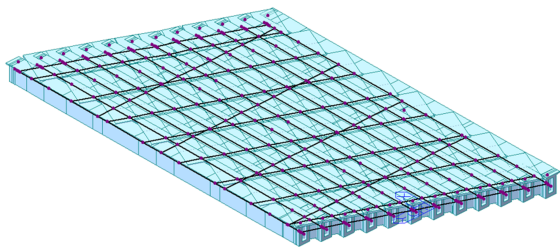


图2 全桥有限元模型

运梁车加载工况如图3所示,工况1~3分别为1/4跨、1/2跨、3/4跨加载工况。中横隔板分别设置1~4道,均等分跨长。由于本工程中桥梁斜交角度较小,中横隔板采用正交方式或者斜交布置方式结构在受力和变形上区别不大^[7],且正交中横隔板便于施工,故不讨论斜交中横隔板布置方式。

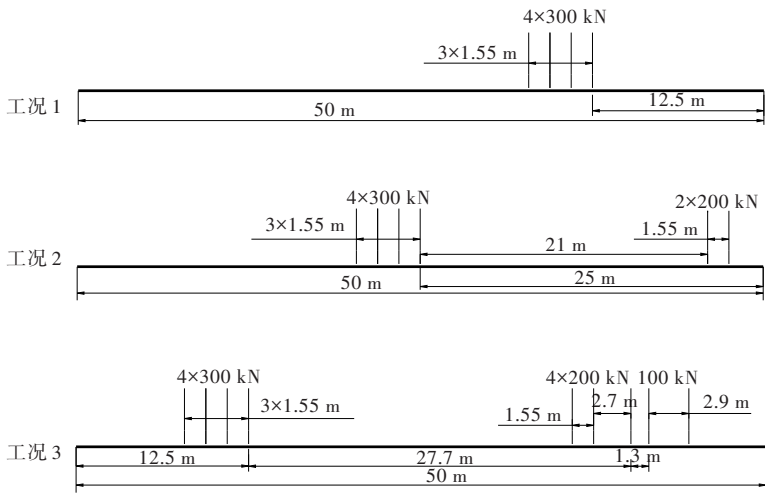


图3 运梁车加载工况



由于存在弯扭耦合,常规的曲梁计算模型不能得到独立的畸变效应,因此本文采用一种分析曲梁的简化方法——M/R法^[8]。基于现场实测数据对初始有限元模型进行修正及试算^[9],验证是否符合结构实际的受力状态。表1为中横隔板下翼缘横桥向实际(模拟)应变。

由表1可知:车轮四周为中横隔板应变最大位

置,其次是通过车轮的支承线正交线附近的中横隔板应变较大,靠近梁端支承线的中横隔板因端部约束,造成应力偏小。在远离梁端的位置,同一横截面上的中横隔板下缘应力,随着与车轮距离的增大呈先慢后快地递减^[10]。车辆荷载产生的中横隔板下翼缘应力范围为 $2.3\sim 7.7\text{ MPa}$,选取模型加载位置为中横隔板应变较大处。

表 1 中横隔板下翼缘横桥向实测(模拟)应变 $\mu\epsilon$

传感 器编号	工况 1		工况 2		工况 3	
	实测	模拟	实测	模拟	实测	模拟
S1	49.8	38.5	154.8	167.4	193.2	198.5
S2	67.5	62.4	215.8	199.2	200.5	218.9
S3	115.6	107.2	223.1	217.8	164.8	186.0
S4	92.1	85.4	176.8	154.8	140.2	146.4
S5	44.3	7.2	172.1	177.9	189.6	205.3
S6	80.5	71.3	211.2	226.7	182.8	199.0
S7	118.0	85.3	218.4	220.5	146.9	160.3
S8	86.6	68.0	157.9	148.3	143.0	208.7
S9	53.7	44.8	178.3	166.5	169.1	189.1
S10	79.2	66.4	175.6	180.3	158.8	176.4
S11	87.3	68.3	189.7	191.2	139.7	151.2
S12	66.8	38.5	115.4	123.2	124.2	129.5
S13	57.5	25.6	145.5	152.9	150.4	158.8
S14	62.0	47.4	146.8	140.2	148.5	143.5
S15	72.4	59.1	143.9	131.7	118.4	132.6
S16	38.2	22.4	82.4	91.6	107.0	122.8
S17	49.8	21.3	72.1	80.7	128.3	130.4
S18	44.9	32.2	101.7	108.6	121.1	127.3
S19	40.1	18.6	97.6	99.3	110.3	117.8

桥轴线方向上靠近跨中位置中横隔板应变模拟精度较高,垂直于桥轴线方向上靠近桥轴线位置中横隔板应变模拟精度较高,认为应变模拟精度符合要求,可进行进一步分析。

3 中横隔板参数优化分析

中横隔板最大间距,中横隔板数量,中横隔板高度、厚度均为影响桥梁整体性能的关键因素^[11]。对于中横隔板形式,空腹式中横隔板施工过程较实腹式中横隔板复杂,在钢筋绑扎和模板架设过程中,工序明显增加。特别是倒角的处理,尺寸小、要求高、影响大,施工处理不好,往往成为病害集中的区域,影响了中横隔板的受力,进而影响结构横向联系,最终对桥梁结构的耐久性产生影响。故采用实腹式中横隔板,用数值模拟方法围绕影响桥梁性能的关键因素展开分析。根据加载工况 2 研究中横隔板各项参数变化下桥梁整体受力规律。

3.1 中横隔板最大间距

将模型中荷载通过中横隔板分布的工况简称为中横隔板工况,将模型中荷载均匀分布于每片梁上的工况简称为均布工况。中横隔板工况下梁底正应力为 σ_1 ,均布工况下梁底正应力为 σ_2 ,经有限元模拟确定 $\sigma_2=75.3$ MPa。中横隔板最大间距的确定原则为:以偏心荷载下翘曲正应力 $\sigma_w=\sigma_E-\sigma_s$ 为基准,使其控制在对称弯曲荷载下的最大正应力 σ_M 的 20% 以内,即 $\sigma_w/\sigma_M\leq 20\%$ 。已有研究表明, σ_w 与 $\sigma_1-\sigma_2$ 近似相等, σ_M 与 σ_2 近似相等^[12]。表 2 列出了不同中横隔板数量下近似翘曲正应力(表中中横隔板分别为等分跨长位置设置 3 道、4 道、5 道)。

表 2 小箱梁不同中横隔板数量下近似翘曲正应力

中横隔板数/道	σ_2 /MPa	σ_1/σ_2-1
3	89.6	0.19
4	85.8	0.14
5	84.3	0.12

由表 2 可得:当箱梁不设置中横隔板时,畸变造成的翘曲正应力达到活载产生的弯曲正应力同样的水平,为活载产生的弯曲正应力的 1~2 倍。随着中横隔板数的增加,翘曲正应力很快减小。当中横隔板增加至 3 道,翘曲正应力下降至弯曲应力的 19%,可见中横隔板的作用明显。若中横隔板数为 n ,则中横隔板间距 $s=L/(n+1)$, L 为梁长。根据表 2 中数值,利用内插法可得:当 $(\sigma_E-\sigma_s)/\sigma_M=20\%$ 时,中横隔板间距为 13.1 m,作为中横隔板间距的临界值。即当中横隔板间距小于此值时,梁段截面的翘曲正应力不超过对称荷载作用下弯曲正应力的 20%^[13]。

3.2 中横隔板高度

在模型中设置 4 道等分跨长、厚度为 0.2 m 的中横隔板。图 4 为中横隔板下翼缘横桥向应力变化随中横隔板高度变化的曲线图。由图 4 可知:当高度取 2.65 m 以上时,不符合规范构造要求。可见,跨中中横隔板下翼缘横桥向应力最大;中横隔板下翼缘横桥向应力随中横隔板高度的增加而降低;中横隔板高度越大,不同跨度处中横隔板下翼缘横桥向应力越接近,中横隔板高度增加具有增加荷载纵向分布的作用。

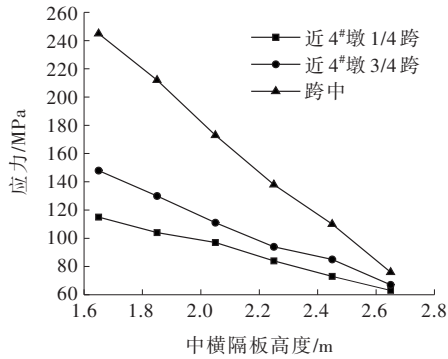


图4 中横隔板下翼缘横桥向应力变化

小箱梁跨中挠度差系数计算公式为：

$$B = \frac{\sum_{j=1}^{11} |\eta_j - \eta_{j+1}|}{\bar{\eta}} \quad (1)$$

式中： B 为小箱梁跨中挠度差系数，表示各片梁之间挠度不均匀程度； $\bar{\eta}$ 为各片小箱梁跨中挠度平均值； η_j 为第 j 片小箱梁的跨中挠度。

简支梁跨中挠度随荷载增加而增大，跨中挠度可表示单梁承受的横向分布荷载大小。如图5所示，跨中挠度差系数在中横隔板高度为1.65~2.45 m范围内随中横隔板高度增加而减小，后稍有增加；中横隔板数量越少，各片梁之间挠度越不均匀；中横隔板由3道增加至4道时，荷载横向分布作用较大程度地增加，由4道增加至5道时，增加程度相对较小。综上，应选取图4中应力最小值和图5中系数较小值对应的中横隔板高度，因此中横隔板最佳高度为2.65 m。

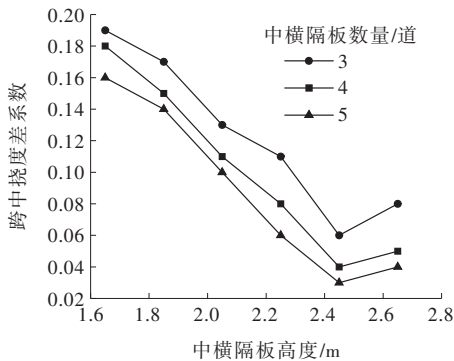


图5 不同中横隔板高度下跨中挠度差系数变化

3.3 中横隔板厚度

在设置4道等分跨长、高度为2.65 m的中横隔板的情况下，中横隔板厚度是影响中横隔板面内剪切刚度的主要因素^[14]，通过改变中横隔板厚度的方式来研究其变化对于结构整体受力的影响。根据不同中横隔板厚度分为7个计算模型，同样是通过跨中挠度

差系数来衡量荷载横向分布。图6为不同中横隔板厚度下跨中挠度差系数变化规律。由图6可知：中横隔板厚度在0.1~0.3 m范围内，跨中挠度差系数随中横隔板厚度增加而减小；在0.3~0.4 m范围内，跨中挠度差系数随中横隔板厚度增加而增加。综上，中横隔板最佳厚度为0.3 m。

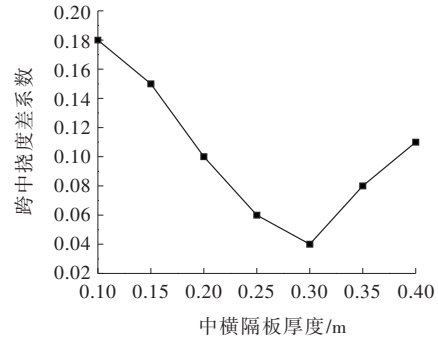


图6 不同中横隔板厚度下跨中挠度差系数变化规律

3.4 中横隔板数量影响

图7为不同中横隔板数量下小箱梁跨中挠度。

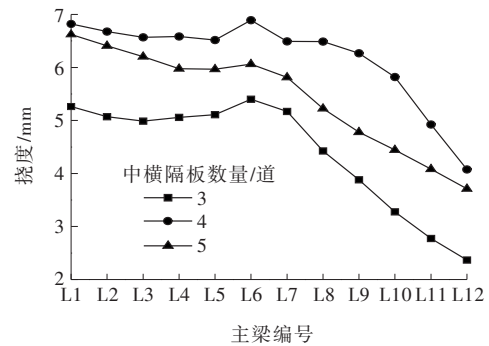


图7 不同中横隔板数量下小箱梁跨中挠度

由图7可知：随着梁编号的增加，跨中挠度总体呈减小趋势，且从L1至L6号梁挠度呈先减小后增加趋势，从L7至L12号梁挠度呈大幅下降趋势。由于靠近集中荷载直接作用位置，3道和5道中横隔板的布置方式均在L6号梁出现挠度最大值；布置5道中横隔板时，L7~L12号梁呈现靠近加载位置变化较慢，远离加载位置变化较快的特点。因为中横隔板自重较大，布置4道中横隔板时各片梁所承受荷载均较小，且各片梁之间荷载分布较均匀。

在相同跨度处，第 i 片梁的挠度系数 C_i 定义为：

$$C_i = \frac{\eta_i}{\sum_{j=1}^{12} \eta_j} \quad (2)$$

图8为跨中挠度横向分布沿纵向的变化，加载位

置为梁轴线的四等分点。

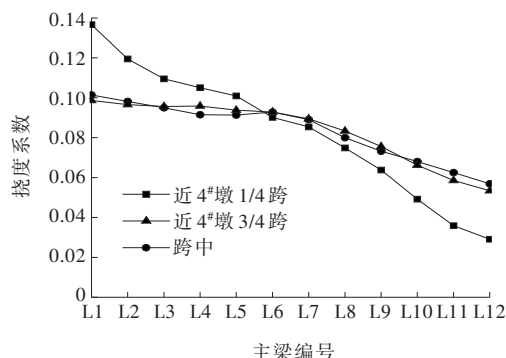


图8 挠度横向分布沿纵向的变化

由图8可知:对于4道中横隔板梁不同纵向位置处的荷载横向分布,小箱梁所承受荷载均随梁编号增加而降低,且降低速率均呈快-慢-快的特点。靠近4#墩1/4跨度处降低速率最大,其他纵向位置变化规律近乎相同。

中横隔板最佳布置方式如图9所示,采用4道等分跨长的实腹式中横隔板(即相邻中横隔板间距为10 m),单块中横隔板高2.65 m,厚度均为0.3 m。

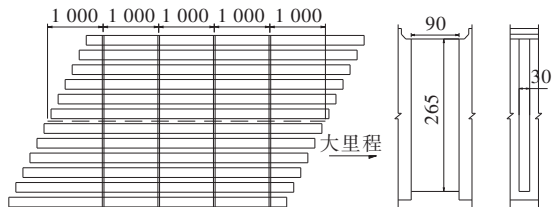


图9 中横隔板最佳布置方式(单位:cm)

4 结论

本文采用数值模拟结合实测对比的方式,通过改变中横隔板设置方式,研究中横隔板对小箱梁荷载横向分布规律的影响,并对计算方法进行校核,得出主要结论如下:

(1) 通过有限元模拟,结合插值计算可较准确地确定使小箱梁翘曲正应力符合要求的中横隔板间距。此案例中横隔板最大间距为13.1 m,故有布置3道、4道、5道中横隔板3种方式。

(2) 符合构造要求下,增加横隔板高度可增强荷载纵向分布;在一定范围内,增加横隔板高度可增强

荷载横向分布。

(3) 中横隔板的设置能明显改善桥梁的整体受力性能,提高桥跨的实际承载能力,当桥跨内设置4道中横隔板时,变形趋于均匀,继续增加中横隔板数量会引起挠度显著增加,且荷载横向分布作用增加有限,故设置4道中横隔板为最佳方案。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 唐先习,徐岳.混凝土T梁横隔板合理截面尺寸数值分析[J].郑州大学学报(工学版),2010,31(1):34-39.
- [3] 田康,曾志斌,王勋文.正交异性钢桥面板构造参数的优化[J].铁道建筑,2019,59(8):34-38.
- [4] 张莉.横隔板及几何特征对钢箱梁畸变效应的影响[J].铁道工程学报,2013,30(8):68-73.
- [5] 赵维刚,王新敏,杜彦良,等.常用跨度铁路桥梁运行状态分布式监测与预警技术[J].上海交通大学学报,2015,49(7):1046-1051.
- [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.
- [7] 戴公连,栗森.斜交连续钢箱梁桥横隔板布置方式研究[J].铁道工程学报,2015,32(9):67-72.
- [8] TUNG D H H, FOUNTAIN R S. Approximate torsional analysis of curved box girders by the M/R-method[J]. Engineering Journal-American Institute of Steel Construction Inc, 1970,7(3):65-74.
- [9] 唐煜,岳杰,华旭刚.基于人工蜂群算法的桥梁有限元模型局部刚度修正[J].铁道科学与工程学报,2021,18(9):2333-2343.
- [10] 赵楷林,宗海,祝青鑫,等.基于长期实测的南京栖霞山长江大桥车辆荷载分析[J].东南大学学报(自然科学版),2021,51(6):979-985.
- [11] 李如鑫.高速公路扩宽桥梁设计研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.
- [12] 李传习,李游,陈卓异,等.钢箱梁横隔板疲劳开裂原因及补强细节研究[J].中国公路学报,2017,30(3):121-131.
- [13] 谢旭,黄剑源.薄壁箱形梁桥约束扭转下翘曲、畸变和剪滞效应的空间分析[J].土木工程学报,1995,28(4):3-14.
- [14] 张元海.设置跨内横隔板的箱形梁畸变效应分析[J].土木工程学报,2021,54(11):91-98.