

某空心板梁桥垮塌原因分析及应急抢修方案探讨

陈丽军, 胡 宁

(武汉市政工程设计研究院有限责任公司, 湖北 武汉 430010)

摘 要: 针对武汉市长丰桥引桥空心板垮塌事故进行了有限元分析。整体模型分析表明,在实际超重车辆荷载的作用下,空心板主梁的抗弯、抗剪承载力均超出结构安全范围,存在空心板主梁折断的风险;局部实体模型分析表明,在实际超重车辆荷载的作用下,桥面板的混凝土拉应力已远远超出限值,且桥面混凝土产生大面积开裂,存在桥面板局部塌陷的风险。详细介绍了事故处理的应急抢修方案,该方案可极大地节省工期,且具有很强的实施性,根据后期的持续监测,维修效果较好。该方法可为同类事故处理提供参考。

关键词: 空心板梁桥; 开裂; 垮塌; 应急抢修; 健康监测

中图分类号: U446; TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)11-0235-04

Analysis of the Collapse Cause of a Hollow Slab Beam Bridge and Discussion on Emergency Repair Plan

Chen Lijun, Hu Ning

(Wuhan Municipal Engineering Design&Research Institute Co., Ltd, Wu Han 430010, China)

Abstract: Based on the collapse accident of the hollow slab of the Changfeng Bridge approach bridge in Wuhan, the finite element analysis was established. The overall model analysis shows that under the actual overweight vehicle load, the bending and shear bearing capacity of the hollow slab main beam exceed the structural safety range, and there is a risk of the hollow slab main beam breaking. Local entity model analysis shows that under the actual overweight vehicle load, the tensile stress of the concrete on the bridge deck has far exceeded the limit, and the concrete on the bridge deck has undergone extensive cracking, posing a risk of local collapse of the bridge deck. At the same time, a detailed emergency repair plan for accident handling was introduced, which can greatly save construction time and has strong implementability. Based on continuous monitoring in the later stage, the repair effect is very perfect. This method can provide reference for handling similar accidents.

Keywords: hollow slab beam bridge; Cracking; cllapse; emergency repair; health monitoring

0 引言

空心板梁桥作为中小跨径桥梁的典型结构,具有自重轻、施工便捷等优势,自20世纪80年代起在我国桥梁建设中大量使用,但随着交通环境的发展,近年来空心板梁桥垮塌事故时有发生。本文结合实际工程案例,通过有限元模型,分析了某空心板梁桥发生垮塌的原因,并介绍了相应的应急抢修技术方案。

1 工程概况

武汉市长丰桥(江汉五桥)于2001年建成通车,

全长1 130 m,是武汉市三环线连接汉口和汉阳之间的重要交通枢纽。全桥共分为主桥、汉口岸引桥和汉阳岸引桥3个部分。其中,跨越汉江的主桥为大跨径钢管混凝土系杆拱桥,长372 m;引桥跨汉江大堤处为三跨钢筋混凝土T形钢构,其余部分为简支先张法预应力空心板梁结构,汉口岸引桥长368 m,汉阳岸引桥长390 m,引桥下部结构采用三柱式桥墩,基础采用钻孔灌注桩,桥台为框架式桥台^[1-2]。

2021年3月16日20:30,三环线长丰桥汉口至汉阳方向,1辆满载砂石重102 t的货车通行至长丰桥汉口岸引桥上方时,发生侧翻,造成汉口岸引桥5#~6#跨20 m空心板21#梁受损断落,现场无人员伤亡(见图1)。

根据中铁大桥科学研究院有限公司编制的《长丰桥汉口岸引桥5#~6#跨20 m空心板21#断梁应急

收稿日期: 2025-02-11

基金项目: 武汉市城建局科技计划项目(202214)

作者简介: 陈丽军(1987—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁抗震及加固设计研究工作。

检测报告》,汉口岸引桥5#~6#跨处桥面总宽26 m,共由24片空心板梁组成。本次5#~6#跨处21#空心板梁垮塌主要造成相邻的17#~20#空心板有明显受损,对桥墩及其他跨空心板的影响相对较小。为尽可能地降低桥梁垮塌对当地交通的影响,并保证该桥的安全性和耐久性,需对桥梁进行相应的应急抢修加固^[3-4]。

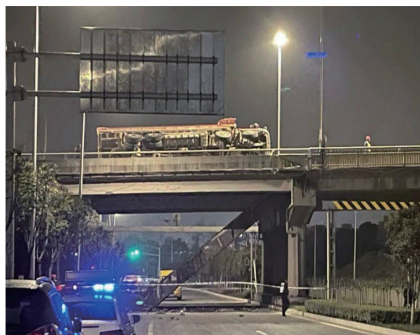


图1 空心板梁垮塌事故图

2 空心板整体模型有限元分析

长丰桥设计于1998年8月,本文根据原桥设计的20 m预应力混凝土空心板图纸及相关资料,对本次事故中落梁的空心板进行有限元分析。空心板横断面如图2所示。

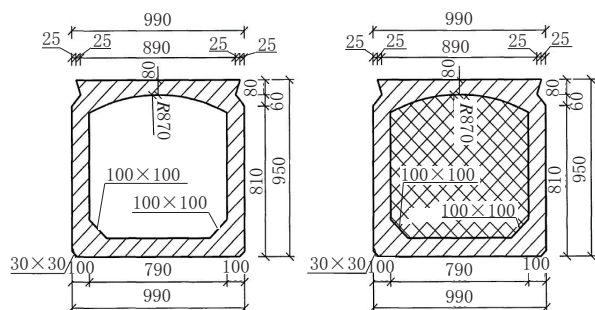


图2 空心板横断面图(单位:mm)

2.1 原设计荷载下的分析结果

采用MIDAS Civil软件,综合考虑恒载、预应力荷载、汽超-20活载(考虑冲击系数为0.27、车道折减横向分布系数为0.296),并按A类预应力混凝土构件验算^[5-6],建立空心板有限元模型。计算结果如下。

(1)在正常使用、承载能力极限状态下,截面的最大法向压应力为9.08 MPa,小于16.2 MPa,满足正截面混凝土法向压应力验算的要求。

(2)在正常使用、承载能力极限状态下,截面的最大主压应力为9.08 MPa,小于19.4 MPa,满足斜截面混凝土主压应力验算的要求。

(3)在正常使用、承载能力极限状态下,主梁截面在频遇效应组合下的拉应力为0.47 MPa,而在准

永久效应组合下为压应力,两者均满足A类预应力混凝土构件正截面抗裂计算要求。

(4)在频遇效应组合下,主梁截面中最大的主拉应力为1.01 MPa,小于1.33 MPa,满足规范规定的斜截面抗裂要求。

(5)在持久状况、承载能力极限状态下,主梁跨中截面的最大弯矩为1 547 kN·m,小于截面的抗弯承载能力(1 849 kN·m),主梁正截面的抗弯承载能力满足要求,且有一定的富余。

(6)在持久状况、承载能力极限状态下,主梁截面的最大剪力为525 kN,小于截面的抗剪承载能力(645 kN),主梁斜截面的抗剪承载能力满足要求,且有一定的富余。

2.2 实际车辆荷载下的分析结果

采用实际事故车辆荷载进行加载,车辆总重102 t,车型为前4后8轮。根据上述数据,通过相似车型加载车辆荷载并布置立面图,如图3所示。

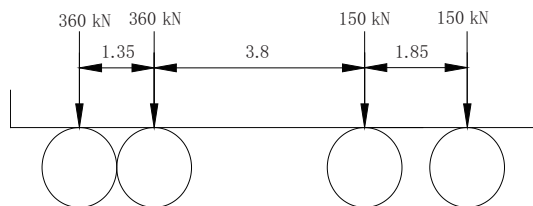


图3 实际加载车辆(单位:m)

采用MIDAS Civil软件,建立空心板有限元模型,计算考虑了恒载、实际活载(考虑冲击系数为0.27、车辆横向分布系数为0.216)。同时,为分析本次桥梁垮塌事故的原因,主要进行主梁承载能力验算,且验算中所有系数均取1.0(即不考虑安全储备)。有限元模型计算结果如下。

(1)在持久状况、承载能力极限状态下,主梁跨中截面的最大弯矩为2 269 kN·m,大于截面的抗弯承载能力(1 849 kN·m)。实际弯矩的最大值大于构件承载能力的设计值,超出结构安全要求的范围。

(2)在持久状况、承载能力极限状态下,主梁截面的最大剪力为777 kN,大于截面的抗剪承载能力(645 kN),实际剪力最大值大于构件承载能力的设计值,超出结构安全要求的范围。

可见,在实际超重车辆(102 t)荷载作用下,空心板主梁的抗弯、抗剪承载能力均超出结构安全的范围,因此出现空心板主梁折断的情况。

3 空心板局部模型有限元分析

根据事故发生时路过车辆的行车记录仪监控,

该超载货车为后车轮下陷后发生侧翻,为进一步了解垮塌空心板梁(21#)的局部桥面受力情况,本文对局部桥面进行精细化有限元实体分析。

3.1 实体有限元模型

依据圣维南原理,车轮荷载的局部应力分布只与其附近区域的应力有关,即远离车轮区域的应力状态对其应力分布的影响可以忽略不计。本文分析采用柔性边界条,将车辆后轴附近 3 m 长的空心板主梁作为研究对象。

采用大型空间有限元软件,建立本桥空心板主梁的局部实体模型,局部模型中仅考虑实际货车后轴荷载对空心板主梁桥面的作用。模型的约束条件包括:腹板底板的竖向约束,车轮与铺装的接触面积为 600 mm(横桥向)×200 mm(顺桥向);100 mm 现浇层对轮载的扩散作用,扩散角度按照 45° 考虑,车辆的后轴重力为 180 kN,并考虑乘以冲击系数 1.3,得到作用在空心板桥面上的局部轮载压力为 0.74 MPa。有限元模型及普通钢筋布置分别如图 4 和图 5 所示。

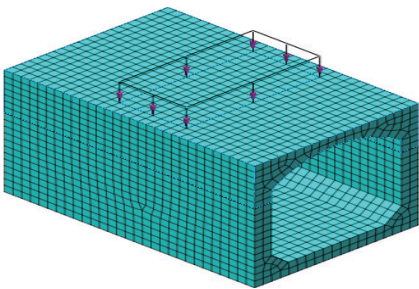


图 4 实体计算模型

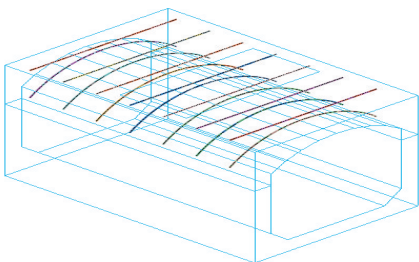


图 5 桥面板钢筋布置

3.2 混凝土本构关系

混凝土结构的非线性材料模型,采用了总应变转动裂缝模型。其中,受压本构采用 Thorenfeldt 硬化模型(见图 6),受拉本构模型采用多折线模型(见图 7)。

受拉本构模型参数采用《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)附录 C 中的数据,如表 1 所示^[7]。

3.3 实体模型计算结果

实际超重车辆(102 t)荷载作用下空心板桥面的实体分析结果如图 8 所示。具体计算数值结果如下。

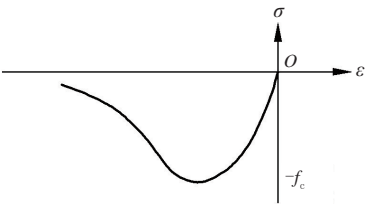


图 6 混凝土受压 Thorenfeldt 模型($f_c=50\text{ MPa}$)

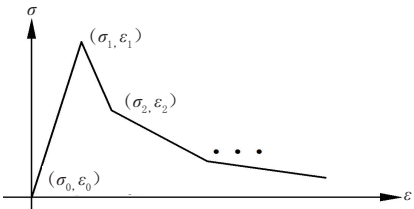


图 7 混凝土受拉多折线模型

表 1 混凝土单轴受拉应力—应变曲线的参数取值表

$f_{t,r}/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-2})$	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
$\varepsilon_{t,r}\times 10^{-6}$	65	81	95	107	118	128	137
α_1	0.31	0.70	1.25	1.95	2.81	3.82	5.00

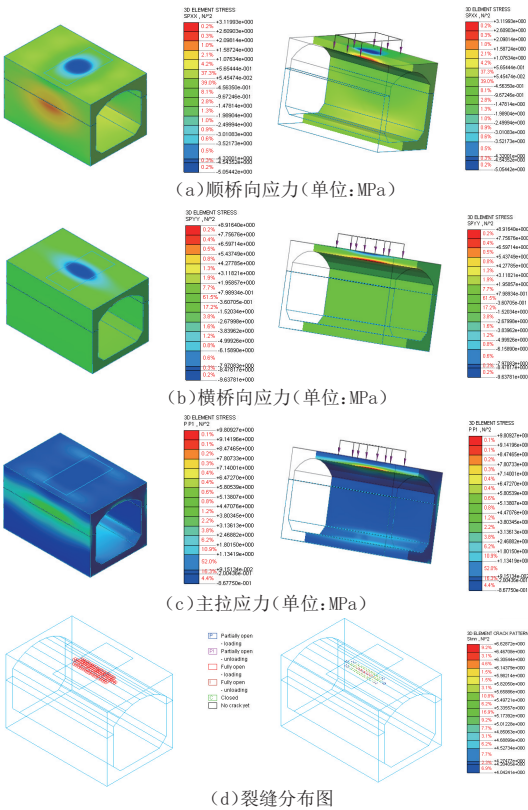


图 8 实体模型计算结果

- (1)空心板桥面板混凝土顺桥向的最大拉应力为 3.12 MPa,最大压应力为 5.05 MPa。
 - (2)空心板桥面板混凝土横桥向的最大拉应力为 8.92 MPa,最大压应力为 9.64 MPa。
 - (3)空心板桥面板混凝土的主拉应力为 9.8 MPa。
- 由实体分析结果可知,桥面板混凝土的拉应力已远远超出 C50 混凝土的抗拉强度。因此,混凝土

桥面板产生大面积开裂,出现桥面板局部塌陷的情况,进而引起车辆侧翻。

4 应急抢修方案

事故发生后,桥梁运维管养单位迅速组织多位专家及相关部门对抢修方案进行研究讨论。经研究认为,为保证桥梁结构的安全性和耐久性,除了对断落空心板进行置换外,还应同步对受损明显的空心板进行处理。

原桥为老式小铰缝先张法预应力混凝土空心板结构,目前市面上已难以紧急采购到同款结构,若仍采用混凝土空心板结构替换受损主梁,需重新制作模板预制。综合考虑施工和养护周期,抢修时间约需30 d。若采用钢箱梁结构替换受损的混凝土空心板梁,因钢箱梁自重较轻,且可根据现场情况灵活地调整尺寸,综合施工周期约为15 d^[8-9]。

考虑到长丰桥是武汉三环线西段的重要快速过江通道,每日的交通流量约为11万辆。综合考虑三环线的交通和造成的社会影响,为便于快速抢修,应急抢修方案推荐采用施工速度较快的钢箱梁,对受损空心板梁进行置换,即采用5 m宽整体钢箱梁,对汉口岸引桥5#~6#跨垮塌受损的17#~21#共计5片空心板进行置换(见图9)。

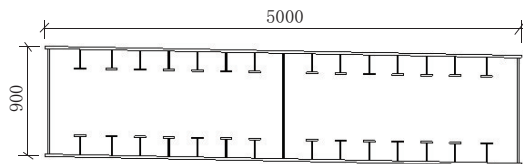


图9 新建钢整体箱梁(单位:mm)

新建钢箱梁与两侧原有空心板应保障竖向变形的协调性,以避免后期桥面铺装在交界区产生纵桥向裂缝。因此,新建钢箱梁的整体竖向刚度应略大于5片空心板梁的竖向刚度总和;同时,钢箱梁两侧腹板侧设剪力钉,以增强铰缝联结的效果。

为进一步加强桥面的整体性,对汉口岸引桥5#~6#跨受损侧的半幅桥面进行重新铺装,先凿除空心板原有现浇层铺装(13#~24#空心板范围内),再将现状既有的旧空心板与新建钢箱梁的桥面铺装连成整体,铰缝内采用灌浆料填充,并在铰缝处加密铰缝横桥向联结钢筋;新建桥面铺装采用10 cm厚的UHPC超高性能混凝土和4 cm厚的改性SMA13沥青

铺装。

在应急抢修期间,桥梁作为武汉市三环线的重要过江通道,仍维持半幅桥面通车,仅在施工桥面进行UHPC超高性能混凝土浇筑和养护时完全中断交通1 d,极大地降低了对区域交通和社会的影响。

5 结论

(1)通过整体模型的计算分析,空心板梁在实际超重车辆荷载的作用下,主梁的抗弯、抗剪承载力均超出结构安全范围。因此,可能出现空心板主梁折断的情况。

(2)通过对主梁桥面的实体分析,在实际超重车辆的轮载作用下,桥面板的局部拉应力已远远超出C50混凝土的抗拉强度。因此,混凝土桥面板产生大面积的开裂,可能出现桥面板局部塌陷的情况。

(3)桥梁空心板主梁在2021年3月16日垮塌后,采用钢箱梁置换的方案进行应急抢修,并于4月2日恢复双向正常通行。该方案节省了抢修的工期,极大地降低了三环线重要的快速过江通道垮塌造成的交通和社会影响。

(4)根据中铁大桥科学研究院有限公司后期对桥梁持续近2年的监测,相较于相邻跨对应位置的梁体而言,经过维修,汉口岸引桥5#~6#跨剩余空心板梁体的受力和变形均得到明显的改善,且桥面铺装保持完整^[10]。

参考文献:

- [1] 武汉市政工程设计研究院有限责任公司.武汉市中环线江汉五桥施工图[Z].武汉:武汉市政工程设计研究院有限责任公司,1998.
- [2] 唐黎明,鲁应慧,刘新痴,等.武汉市江汉五桥的设计[J].城市道桥与防洪,2002(2):7-11.
- [3] 中铁大桥科学研究院有限公司.长丰桥汉口岸引桥空心板应急检测报告[Z].武汉:中铁大桥科学研究院有限公司,2021.
- [4] 中铁大桥科学研究院有限公司.武汉市长丰桥检测报告[Z].武汉:中铁大桥科学研究院有限公司,2020.
- [5] JTJ 021—89,公路桥涵设计通用规范[S].
- [6] JTG D60—2015,公路桥涵设计通用规范[S].
- [7] GB 50010—2010,混凝土结构设计规范[S].
- [8] JTG/T J22—2008,公路桥梁加固设计规范[S].
- [9] 武汉市政工程设计研究院有限责任公司.长丰桥应急维修工程施工图[Z].武汉:武汉市政工程设计研究院有限责任公司,2021.
- [10] 中铁大桥科学研究院有限公司.长丰桥引桥监测日报[Z].武汉:中铁大桥科学研究院有限公司,2021—2022.