

有腹板斜裂缝的空心板梁抗剪性能试验研究

张伟略¹, 魏明光²

[1. 上海市道路运输事业发展中心, 上海市 200023; 2. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要: 为探明空心板梁的梁端腹板斜裂缝对结构性能的影响, 依托上海外环高速泰和路桥修复养护工程对拆除的空心板梁进行抗剪静载试验, 试验参数主要包含: 初始病害、剪跨比、横向偏载。试验结果表明: 试验梁的剪切破坏具有脆性特征, 最终破坏时均发生了钢绞线的滑移。试验梁的抗剪承载力的实测平均值是规范的理论抗力计算值的1.44倍, 是荷载效应计算值的1.57倍。有腹板斜裂缝病害的空心板梁的抗剪能力平均下降了12.2%。在偏载作用下, 空心板梁的承载力较正载作用下的空心板梁平均下降了17.3%。在桥梁的运维过程中, 应重点关注斜裂缝病害的发展及桥梁横向联系病害。结合病害的严重程度、桥梁运营荷载情况、施工条件、社会经济影响等因素, 从提高桥梁整体性和提高单梁自身承载力两个方面选择合适的措施提高桥梁的安全性。

关键词: 空心板梁; 腹板斜裂缝; 试验; 承载力

中图分类号: U446.1

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)08-0312-05

Experimental Study on Shear Performance of Hollow Slab Beams with Web Inclined Cracks

ZHANG Weilue¹, WEI Mingguang²

[1. Shanghai Road Transportation Development Center, Shanghai 200023, China; 2. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: To investigate the impact of web inclined cracks at the beam ends on the structural performance of hollow slab beams, a shear static loading test is conducted on hollow slab beams removed from the Taihe Road Bridge Repair and Maintenance Project of the Outer Ring Expressway in Shanghai. The main test parameters include the initial damage, shear span ratio and transverse eccentric load. The test results indicate that the shear failure of the test beams has the brittle characteristics, with slippage of the steel strands occurring at the final failure stage. The measured average value of the shear bearing capacity of the test beam is 1.44 times the theoretical resistance calculation value specified in the code, and is 1.57 times the calculated value of the load effect. The shear resistance capacity of hollow slab beams with web inclined crack disease decreases by an average of 12.2%. Under eccentric loading, the bearing capacity of hollow slab beams decreases by an average of 17.3% compared with that under normal loading. During the bridge operation and maintenance process, the particular attention should be paid to the development of diagonal crack diseases and the lateral connection diseases of bridges. Combined with the factors such as the severity of the damage, operational load conditions of bridge, construction conditions, and socio-economic impact, the appropriate measures should be taken to improve the safety of the bridge by enhancing both the overall integrity of the bridge and the load-bearing capacity of individual beams.

Keywords: hollow slab beams; web inclined cracks; experiment; load-bearing capacity

0 引言

截止2023年底, 中国公路桥梁总量攀升至107.93万座, 其中, 中小跨径桥梁占比超90%以上^[1]。

空心板梁因具有结构简单、受力明确、自用材经济、施工方便快捷等诸多优点而被广泛应用, 是我国中小跨径桥梁目前最常用的桥型。

近十年来, 随着重载交通的增长, 部分长期服役的小跨径空心板梁逐渐显现适应性不足问题, 在大量桥梁的检测中, 发现存有铰缝开裂、端头斜向裂缝、底板横向裂缝等病害, 且呈较快发展趋势^[2]。空心板梁端头主要承受剪力, 斜裂缝产生后, 原来由混

收稿日期: 2025-01-23

基金项目: 上海市交通委员会道路运输行业科研项目(JT2024-KY-001)

作者简介: 张伟略(1988—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事道路桥梁维修养护工程设计管理工作。

凝土承受的拉力转由与斜裂缝相交的箍筋承受,进而影响梁体承载能力,增大落梁风险,杭州钱塘三桥引桥垮塌、昆明南二环桥评定危桥均证明此类裂缝的危险性,上海外环高速泰和路桥也因端头斜裂缝的快速发展,对桥梁上部结构进行了全部更换^[3]。

现有研究中,罗文林等^[4]基于足尺试验结果,对空心板梁剪切破坏机理和病害评估分级进行了研究,提出了不同裂缝宽度下量体特征;杜孟林等^[5]对某高速已使用 20 a 的空心板梁进行抗剪能力试验,试验发现量体抗剪能力仍满足规范,但富余量较少,桥面铺装层对桥梁抗剪能力贡献超 15%;郑开启^[6]在其博士论文中针对斜裂缝对混凝土桥梁抗剪性能能力影响进行了系统性研究,并提出一种简化的评估方法;袁国泰、李莲莲、吴亚娟^[7-9]对空心板梁斜裂缝的病害成因分析、防治对策、加固方案等多方面进行了研究。已有研究中的相关实验利用原桥在役板梁的较少,而模型试验与实际在役桥梁存在一定差异,对斜裂缝的影响判断不够准确,本次研究利用上海外环高速泰和路修复养护工程中拆除的小铰缝空心板梁进行抗剪承载力试验,获得了在役单梁的裂缝演变过程、实测极限承载力和破坏特征,确定了初始病害对工程梁的性能影响。

1 试验设计

1.1 依托项目概况

本次试验依托上海外环高速泰和路高架桥修复养护工程。该桥位于上海外环高速公路(S20)西北段。该桥为一座东西走向的 186 孔简支混凝土梁桥,总长 4 024 m,于 2001 年建成通车,总体布置分为 2 幅,标准断面总宽为 17 m,横向布置为 0.50 m(防撞墙)+16.00 m(车行道)+0.50 m(防撞墙)=17.00 m。桥面采用 8 cm 沥青+8 cm 钢筋混凝土铺装。桥梁两侧设置钢筋混凝土防撞墙,桥梁设计荷载等级为汽车—超 20 级,特种平板车—300,桥梁标准跨径为 22 m,采用先张应力空心板梁。

标准跨的空心板梁的梁长 21.12 m、宽 0.99 m、高 0.9 m,混凝土采用 50 号混凝土,箍筋采用直径为 8 mm 的光圆钢筋,在梁端 2.2 m 范围内,箍筋间距为 100 mm,其余部分的箍筋间距为 200 mm。钢绞线采用符合《预应力用混凝土钢绞线》(GB/T 5224—1995)国家标准的直径为 15.2 mm 的高强度低松弛钢绞线,每股公称面积为 140 mm²,标准强度为 1 860 MPa,弹性模量 $E_s=1.95\times10^5$ MPa,控制张拉力 1 395 MPa。

根据梁体受力,在梁端对部分钢绞线进行了隔离,空心板梁的断面构造及配筋图如图 1 所示,钢绞线的隔离长度如表 1 所列。

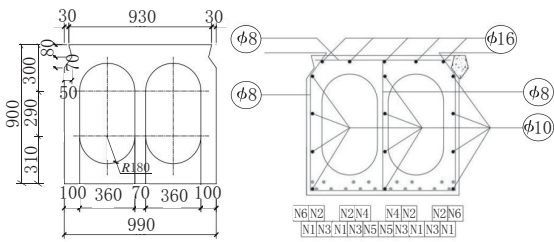


图 1 泰和路标准跨空心板梁构造图(单位:mm)

表 1 预应力钢绞线隔离长度

预应力钢筋编号	隔离长度/m	根数
N1	0	4
N2	1	4
N3	2	4
N4	3	2
N5	4	2
N6	5	2

泰和路桥在长期重载交通作用下,部分板梁端头出现斜裂缝(见图 2),且在近年的养护及检测过程中发现梁端腹板斜裂缝病害发展呈逐渐加速态势,且有些梁体还出现了梁端底板横缝和斜缝。为彻底消除病害,本次工程将跨径在 22 m 以下的小铰缝空心板梁全部更换为刚接空心板结构,新梁设计参考《先张法预应力混凝土空心板(桥梁)》(上海市建筑标准设计图集,2024 沪 Q003)。

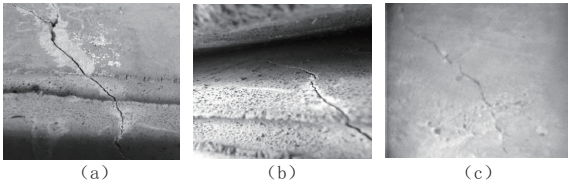


图 2 泰和路部分板梁端头斜裂缝实拍图

1.2 试验梁概况

为分析斜裂缝对承载力的影响,本次试验选取了 12 片泰和路高架上拆卸下来的服役了 23 a 的板梁,进行了共 24 组抗剪性能试验,包括:3 组无病害梁的偏载抗剪破坏试验和 3 组无病害梁的正载抗剪破坏试验,以及 7 组具有不对称腹板斜裂缝病害梁的偏载抗剪破坏试验和 11 组具有典型腹板斜裂缝病害梁的正载抗剪破坏试验。有病害梁的剪跨比根据梁端腹板初始病害斜裂缝的长度和位置来确定,将初始斜裂缝的上沿伸点设计为加载点,无病害梁选择与部分有病害梁相同的加载位置以形成对比。设计的剪跨比范围在 1.0~5.5 范围内,具有足够大的剪跨比范围,可以囊括可能出现的多种抗剪破坏模

式。各试验梁病害特征及加载情况如表2所列。

表2 试验梁的病害特征及加载情况表					
编号	试验内容	加载点剪跨比	裂缝数量/条	裂缝最大宽度/mm	裂缝与梁端距离/m
1A	正载试验	1.69	2	0.06	1.50
1B		2.27	7	0.1	2.15
2A		2.62	7	0.15	2.35
2B		2.62	无病害(2A对比组)		
3A		1.10	1	0.02	0.70
3B		5.52	17	0.2	5.28
4A		1.45	6	0.06	1.30
4B		2.03	7	0.35	1.80
5A		1.10	6	0.2	1.19
5B		3.02	3	0.1	0.95
6A	偏载试验	3.31	11	0.25	2.65
6B		0.99	2	0.15	1.00
7A		3.31	无病害(6A对比组)		
7B		1.69	无病害(1A对比组)		
8A		2.38	3	0.06	2.10
8B		2.03	4	0.08	1.83
9A		1.45	3	0.01	1.27
9B		2.03	4	0.06	1.75
10A		1.74	11	0.06	1.75
10B		1.74	无病害(10A对比组)		
11A		1.92	1	0.06	1.68
11B		3.31	8	0.08	2.90
12A		2.38	无病害(8A对比组)		
12B		3.31	无病害(11B对比组)		

注:编号中A和B分别表示一根试验梁的两端

1.3 试验加载方案

该试验通过静力加载获得梁体的抗剪破坏特征及抗剪承载力。为模拟实际桥梁的支承条件,试验梁采用与原桥相同的橡胶支座支承。竖向荷载由两台液压千斤顶施加,两侧对称进行,加载反力系统采用两套锚杆反力架,并通过压力传感器测量施加荷载的大小,正载试验选择梁中心加载,偏载加载选择腹板裂缝较多一侧,考虑车轮宽度与扩散角度,加载距离为距空心板梁中心线0.215 m。



图3 加载装置图

加载过程中通过应变片、位移计、压力传感器等设备记录混凝土应变、预应力钢绞线滑移、位移和裂缝宽度、加载吨位等数据,加载流程共分为以下5个

- 步骤:
- (1)施加 50 kN 作为预加载,反复加载 3 次,消除非弹性变形,卸载后将传感器、应变片和位移计归零;
 - (2)按每级 50 kN 分级加载至空心板梁最大剪力标准组合,每级加载过程持荷 5 min,过程中观测裂缝发展及宽度等数据;
 - (3)按每级 50 kN 分级加载至空心板梁最大剪力基本组合进行承载能力检验,每级加载过程持荷 5 min,过程中观测裂缝发展及宽度等数据;
 - (4)梁表面出现新裂缝后或旧裂缝继续发展后,继续用 50 kN 为步长继续加载至试验梁破坏,每级荷载的稳载时 5 min,稳载后测量记录裂缝宽;
 - (5)在裂缝逐渐扩展至梁体临近破坏时,继续加载至试验梁的极限荷载,稳载后测量裂缝宽度,记录试验结果后停止加载。

2 试验结果

2.1 正载试验结果

在 14 组试验梁中,在既有斜裂缝梁 11 组的加载过程中,裂缝的发展和梁体的破坏大致可分为以下 4 个阶段:

- (1)荷载 < 400 kN,初始裂缝无扩展或扩展幅度较小,基本无新裂缝产生;
- (2)500 kN > 荷载 > 400 kN,初始裂缝进一步发展,部分试验梁产生新裂缝;
- (3)600 kN > 荷载 > 500 kN,初始裂缝宽度进一步增加,新增裂缝增多,部分试验梁产生板底横缝或支座与加载点的斜裂缝;
- (4)荷载 > 600 kN,底板逐渐出现大量裂缝,并随着持续加载产生预应力钢绞线脱粘,发出巨大响声,直至彻底失去承载力。

无病害的 3 组,在荷载 600 kN 以下时,无明显裂缝出现,当荷载超过 700 kN 后,逐步产生裂缝、钢绞线脱粘直至彻底失去承载力。

根据试验结果,试验梁的破坏模式根据剪跨比的不同有所差异,当剪跨比在 1 以内(或接近 1)时,呈斜压破坏;剪跨比在 1~3 时呈粘结-剪切破坏;剪跨比大于 3 时呈斜截面弯曲破坏,较为典型的试验组情况如表 3 所列,破坏情况现场实拍如图 4 至图 6。

2.2 偏载试验结果

偏载试验中梁体的破坏进程与正载基本一致,

表 3 正载试验典型试验组破坏特征梳理表				
试验组	剪跨比	破坏特征	破坏模式	破坏荷载/kN
1B	2.27	支座至加载点主斜裂缝+其他主斜裂缝	粘结-剪切破坏	944
3B	5.52	加载点腹板下缘多条竖向裂缝+梁端平行斜裂缝	斜截面弯曲破坏	851
6B	0.99	腹板混凝土剥落+支点至加载点主斜裂缝	斜压破坏	1 277



图4 试验组 1B 破坏情况现场实拍



图5 试验组 3B 破坏情况现场实拍



图6 试验组 6B 破坏情况现场实拍

但由于偏载的作用,加载至 400 kN 时,原裂缝即进一步发展,并逐步出现新裂缝,600 kN 左右时部分试验梁即出现钢绞线脱粘等现象,不同剪跨比下,偏载试验梁的破坏模式与正载试验一致。

由于偏载作用,梁体荷载超过弹性阶段后,将产生扭转,载梁两侧的荷载位移曲线形式基本一致,但偏载一侧位移量明显大于另一侧。以 8A 组为例(见图 7、图 8),最终破坏时,两侧位移差约 15 mm,扭转角 0.92°。

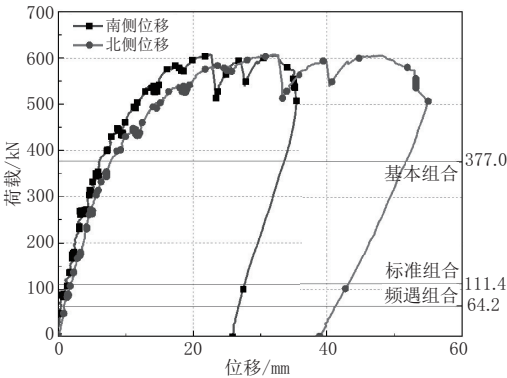


图7 8A组荷载-位移曲线图

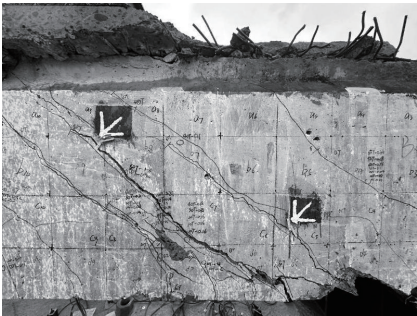


图8 试验组 8A 破坏情况现场实拍

3 试验梁抗剪承载力分析

将本次 24 组试验梁的抗剪承载力实测值分别与泰和路原桥设计所参考的《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTJ 023—85)和现行《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)要求的结构承载能力及基本组合下的荷载效应进行对比,如图 9、图 10 所示。

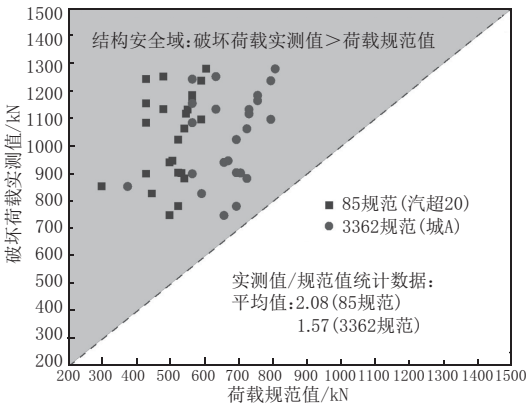


图9 试验梁静载安全性评估

从图 9 可以看出试验梁的实测承载力均大于按规范计算的荷载效应,安全系数分别为 2.08(原设计规范)和 1.57(现行规范)。从图 10 可以看出,试验梁的实测承载力的平均值大于按规范计算的梁体承载力,安全系数分别为 1.78(原设计规范)和 1.44(现行规范),但有 2 片梁的实测承载力小于现行规范的计算值。

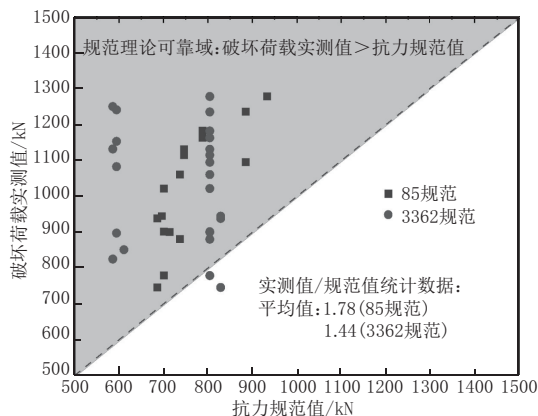


图10 规范抗剪理论方法评估

对比有病害梁和无病害梁的承载力以及偏载梁和正载梁的承载力后发现:相比于无病害梁,有病害梁的抗剪承载力下降12.2%左右;偏载梁的承载力较正载梁下降17.3%。

通过本试验可知:泰和路的空心板梁当出现腹板斜裂缝后,其抗剪承载力的实测值大于规范计算的荷载效应,并具有一定的安全度。但桥梁斜裂缝的出现是桥梁性能退化的重要标志,因此,桥梁管养单位在桥梁的维修养护中,应对梁体斜裂缝病害的发展情况予以重点关注并结合道路的实测荷载,对病害梁采取相应的养护维修措施,如增大截面、粘贴碳纤维布(板)、局部换梁、整体换梁。

为了减少偏载效应,保证上部结构整体性,在桥梁的运维养护需重点关注铰缝病害情况,对于出现破损的铰缝及时处理,对于重载交通量大、运营期较长的桥梁,可采用增厚铺装或铰缝注胶的方法对横向联系进行加强。

4 结 论

本次研究依托上海外环高速泰和路高架修复养护工程对服役期超过20 a的小铰缝空心板梁进行了一系列化的抗剪性能试验,主要结论如下:

(1)出现腹板斜裂缝的空心板梁抗剪承载力的

实测平均值大于荷载效应的规范计算值和梁体抗力的规范计算值。

(2)斜裂缝的出现是空心板梁性能退化的重要标志,出现斜裂缝后,空心板梁的抗剪承载能力会有所下降。

(3)当空心板梁承受偏载作用后,其抗剪承载能力会下降。

(4)桥梁养护中应对出现斜裂缝病害及铰缝病害的板梁予以重点关注,结合桥梁运营期的荷载情况,从提高桥梁整体性和单梁承载力两方面采取合适的修复加固措施,确保桥梁的安全。

(5)本研究主要针对桥梁的静载抗剪承载力进行了研究,桥梁的疲劳性能需进一步研究论证。

(6)本研究的板梁主要来自上海外环泰和路高架,可结合其他工程项目,增加其他桥梁的试验及维修加固方案的研究,提高上海空心板梁桥的管养水平。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国交通运输部. 2023年交通运输行业发展统计公报[EB/OL]. (2024-06-18) [2025-01-15] https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202406/t20240614_4142419.html.
- [2] DB31JT/Z 008—2024,小铰缝空心板梁日常养护管理导则[S].
- [3] 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司.S20外环泰和路高架桥(K93+283~K97+111、K0+000~K0+237)修复养护工程可行性研究报告[R].上海:上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司,2023.
- [4] 罗文林,王成明,顾冠男,等.预应力混凝土空心板梁抗剪试验及剪切斜裂缝评估研究[J].公路交通科技,2023(6):148-154.
- [5] 杜孟林,宗周红,廖丰宸,等.服役预应力混凝土空心板梁抗剪承载性能[J].东南大学学报,2021(3):384-390.
- [6] 郑开启.斜裂缝对混凝土桥梁受剪性能影响研究[D].南京:东南大学,2017.
- [7] 袁国泰.空心板梁桥病害成因分析及防治对策[D].西安:长安大学,2016.
- [8] 吴亚娟.装配式中小桥涵病害分析与加固方式研究[D].西安:长安大学,2009.
- [9] 李莲莲.既有钢筋混凝土板桥状况评价及加固方法研究[D].西安:长安大学,2007.