

基于旧规设计理念的在役空心板梁 抗剪性能对比

卢悄悄¹, 宋淑琴², 赵鹄鹏^{1*}, 梁茂景³

1. 山东交通学院交通土建工程学院, 山东 济南 250357; 2. 济南金日公路工程有限公司, 山东 济南 250101;
3. 菏泽交通投资发展集团有限公司, 山东 菏泽 274000

摘要:为分析目前在役旧空心板梁支点剪力区的抗剪性能,保障桥梁的使用安全性及耐久性,考虑板梁截面形式、普通钢筋布置方式、预应力钢筋张拉布置方法、混凝土材料强度、荷载作用组合等影响因素,采用软件 MIDAS CIVIL 分别按公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范(JTJ 023—1985)、公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范(JTG D62—2004)设计空心板梁模型 S1、S2,在静力荷载和移动荷载下进行剪力分析;按缩尺比例 1 : 4,根据 JTJ 023—1985、JTJ 062—2004 要求分别设计制作试验梁 T1、T2,采用分级加载方式加载至 JTJ 062—2004 正常使用极限状态和承载力极限状态设计荷载,直至试验梁破坏,对根据 JTJ 023—1985、JTJ 062—2004 设计的空心板梁在公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范(JTG 3362—2018)车道荷载作用下进行抗剪性能研究,将有限元模型分析结果与缩尺模型加载试验结果进行对比。结果表明:1)在恒载作用下,空心板梁 S1 所受剪力普遍略小于 S2,空心板梁 S1、S2 的最大剪应力随 JTG 3362—2018 道荷载组合效应的增大而大幅增大,分别增大 26.8%、16.8%。2)试验梁 T1、T2 的试验现象类似,随荷载增大,加载点底板、纯弯段底板、剪压区先后出现裂缝,剪压区斜裂缝延伸为主裂缝,主裂缝附近出现次生裂缝,加载点横向裂缝延伸至腹板。3)试验梁 T1 的挠度比试验梁 T2 大。4)二者在加载初期,主拉应变和荷载大致呈线性关系,随荷载增大,中部主拉应变增速最快,底部次之,梁体中部剪压区首先出现裂缝,延伸至底部,顶部主拉应变变化较小;后期曲线斜率较大,荷载小幅增大时,应变增速过快,裂缝变化较大。5)试验梁 T1 和 T2 在加载至 JTG 3362—2018 设计承载能力极限状态时,试验梁 T2 的抗剪承载力安全系数不足;试验梁 T1 基本满足 JTG 3362—2018 的抗剪要求,但结构安全系数较小。6)试验梁 T1 和 T2 的挠度和应变校验系数满足要求,但在剪力区过早出现裂缝将直接影响桥梁使用耐久性,降低桥梁整体刚度。

关键词:桥梁工程;抗剪性能;在役空心板梁;对比试验

中图分类号:U448.21⁺2

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2025)02-0120-11

引用格式:卢悄悄,宋淑琴,赵鹄鹏,等.基于旧规设计理念的在役空心板梁抗剪性能对比[J].山东交通学院学报,2025,33(2):120-130.

LU Qiaobao, SONG Shuqin, ZHAO Kunpeng, et al. Comparison of shear performance of in-service hollow slab beams based on abandoned standards[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2025, 33(2): 120-130.

0 引言

空心板梁桥结构简单,受力明确,施工周期短,耗材少,在桥梁建筑领域应用广泛^[1]。随着国民经济

收稿日期:2024-03-19

基金项目:山东省交通运输科技计划项目(2020B02)

第一作者简介:卢悄悄(2000—),女,广西贵港人,硕士研究生,主要研究方向为交通运输,E-mail:1437522376@qq.com。

*通信作者简介:赵鹄鹏(1984—),男,济南人,教授,硕士研究生导师,工学博士,主要研究方向为桥梁检测加固与后评估技术,E-mail:204085@sdjtu.edu.cn。

的发展,交通运输量和重载交通的比例日益增大,按文献[2-3]设计的空心板梁在运营过程中逐渐出现不同类型的裂缝病害,其中,空心板腹板斜裂缝出现较多^[4-6]。若斜裂缝持续加剧,可能危及桥梁的结构安全,研究旧空心板梁的抗剪性能具有重要的现实意义^[7-8]。了解旧空心板梁在当下交通荷载条件下的抗剪承载力,才能选择更合理的裂缝修补加固方案^[9-11]。

从空心板梁的受力性能和破坏机理角度考虑,贾艳敏等^[12]通过软件 MATLAB 径向基神经网络修正已服役 20 a 的预应力空心板梁有限元模型,修正后的模型与实际结构的物理形态非常接近,提高板梁有限元模型的准确性和合理性;任伟等^[13]通过有限元软件 ABAQUS 建立先张法预应力混凝土空心板梁的 1/4 模型,分析板梁在超载及预应力逐渐损失时对梁端横向裂缝的影响,梁端混凝土损失较严重,最先达到最大应力和应变,先于其他部位开裂;罗文林等^[14]试验研究梁抗剪承载能力足尺、空心板梁梁端斜裂缝发展特征,对其进行损伤评级;于洋等^[15]通过试验研究不同跨径预应力混凝土空心板梁的抗剪承载力、板梁破坏模式和极限承载力,提出考虑斜裂缝水平投影度的抗剪承载力预测模型,结果表明各试验梁破坏形式为剪压破坏,梁端钢绞线滑移,梁跨比增大时,极限荷载减小,加载点位移增大;雷建华等^[16]对现浇空心板梁桥纵向裂缝的成因进行试验研究,分析结构构件尺寸设计对板梁力学性能的影响,结果表明板高不足和宽跨比较大是纵向开裂的主要原因;刘红义等^[17]对服役 22 a 预应力空心板梁进行抗弯加载试验,通过弹性试验、开裂试验、重裂试验及破坏试验分析试验梁的挠度以及裂缝的产生、开合、延伸过程,结果表明随荷载增大,在试验梁跨中底板先出现横向裂缝,而后腹板出现竖向裂缝,由跨中向两端依次产生。大部分学者研究在役空心板梁的裂缝成因,但对接文献[2-3]设计建造的在役空心板梁的对比研究较少。不同规范设计的桥梁出现的病害程度不同,相应的后期养护方式和成本投入也不同。

考虑文献[2-3]的板梁截面形式、普通钢筋构造要求、预应力钢筋张拉方式、混凝土强度、荷载组合设计等影响因素,采用有限元软件 MIDAS CIVIL 根据文献[2-3]构建 2 组空心板梁模型,并分析其受力情况。制作 2 组对应的缩尺试验梁,对试验梁进行荷载试验,观测试验梁的实际受力状况。通过对比有限元模拟结果与实际试验结果,探讨基于文献[2-3]设计的空心板梁的抗剪性能。

1 不同规范下空心板梁设计

1.1 板梁截面形式

板梁的截面形式影响桥梁结构的受力性能。以长 16 m 的空心板梁为研究对象,根据文献[2]设计预应力混凝土空心板梁,梁高 0.75 m,为减轻自重,每块板横截面挖空率较大。根据文献[3],为改善梁板的刚度不足问题,设计板梁的梁高普遍比文献[2]增大 100~500 mm;为改进桥梁的横向联系,板梁的铰缝统一采用深铰形式;顶板和底板的厚度不小于 80 mm。根据文献[2-3]分别设计的空心板梁桥截面尺寸如图 1 所示。

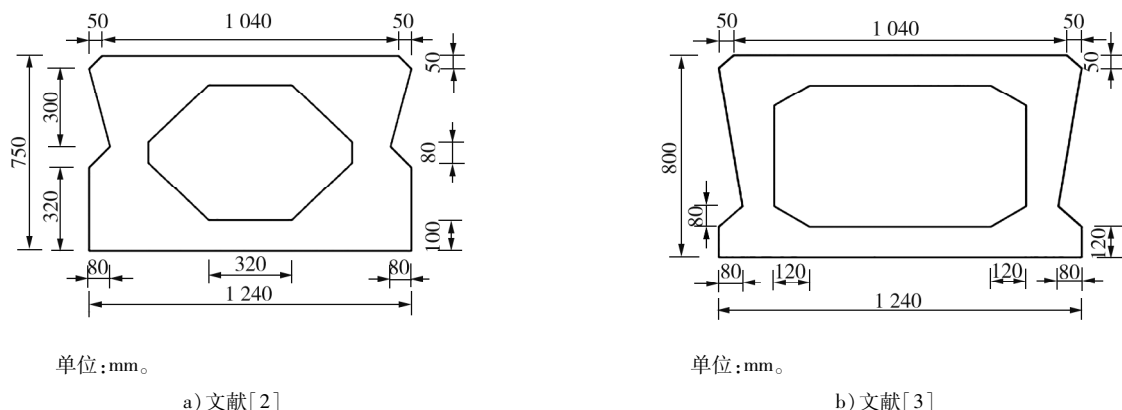


图1 根据文献[2-3]分别设计的空心板梁截面尺寸

1.2 板梁钢筋构造要求

混凝土桥梁的钢筋布置对承载能力有直接影响。根据文献[3]要求,以 HRB400 为主导钢筋,HRB335 为辅助钢筋,所选钢筋的抗剪强度比文献[2]更高,延性更好。普通钢筋的总体用量增大约 15%~30%;采用高强度低松弛的预应力钢材,改善预应力钢束的布置。采用环氧树脂涂层钢筋,使带裂缝工作的构件避免钢筋被锈蚀或减轻钢筋锈蚀程度。根据文献[2]要求,主导钢筋直径应大于 10 mm,跨中主筋间距为 7~20 cm,且可在跨径的 1/4~1/6 弯起。普通钢筋材料的力学性能对比如表 1 所示。

表 1 普通钢筋材料力学性能对比

钢筋类型	文献[2] 要求类型	文献[3] 要求类型	标准屈服 强度/MPa
光圆钢筋	I 级钢筋	R235	235
	II 级钢筋	HRB335	335
带肋钢筋	III 级钢筋	HRB400 KL400	400

4 种钢筋的强度标准值保证率(实际强度不低于标准值的统计概率)不低于 95%。对预应力钢筋,文献[3]中钢绞线和钢丝的品种和规格比文献[2]多。根据文献[2]要求,空心板梁的普通钢筋直径 $\Phi \geq 12\text{mm}$ 时采用 I 级钢筋, $\Phi \leq 8\text{mm}$ 时采用 II 级钢筋,钢绞线屈服强度为 1 570 MPa,直径为 15 mm,张拉方式为后张法;根据文献[3]要求,空心板梁的普通钢筋选用 HRB335,低松弛高强度钢绞线抗拉强度标准值(指在标准试验条件下,材料在拉伸过程中达到最大承载能力的应力)为 1 860 MPa,直径为 15.2 mm,张拉方式为先张法。文献[2~3]空心板梁桥截面及立面配筋如图 2、3 所示。

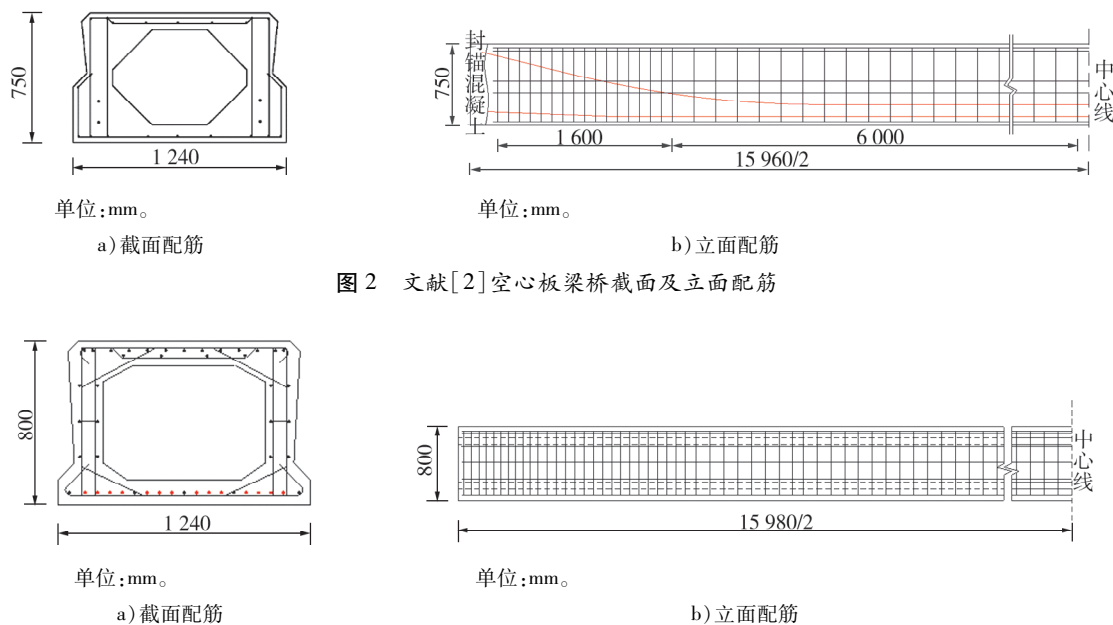


图 2 文献[2]空心板梁桥截面及立面配筋

图 3 文献[3]空心板梁桥截面及立面配筋

1.3 混凝土强度及荷载作用

混凝土强度的基本指标是立方体抗压强度。根据文献[2]要求,按混凝土标号划分,立方体试件边长 200 mm,抗压强度保证率(是指在混凝土或岩石等材料中,抗压强度达到或超过设计强度的概率)为 85%。根据文献[3],按混凝土强度等级划分,立方体试件边长 150 mm,抗压强度保证率为 95%。混凝土强度要求不同,直接影响棱柱体抗压(拉)强度。

公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范由文献[2]改为文献[3]后,公路桥梁设计由经验极限状态转变为以可靠性理论为基础的概率极限状态。文献[3]在承载力极限状态的设计表达式中,特别强调大概率出现的主导荷载的重要性,引入折减系数使非主导荷载参与计算。在文献[2]中,由基本可变荷载与永久荷载构成组合 I,由基本可变荷载、永久荷载与其他可变荷载构成组合 II,由平板挂车与结构重力、预应力等构成组合 III,由基本可变荷载、永久荷载与偶然荷载构成组合 IV。在文献[3]中,按承

载能力极限状态设计,可构成基本组合和偶然组合;按正常使用极限状态设计,可构成短期效应组合和长期效应组合。

2 空心板梁受力有限元分析

2.1 梁单元模型

采用有限元软件 MIDAS CIVIL 中梁格法,分别根据文献[2-3]要求建立横向布置9片空心板梁模型 S1、S2^[18],文献[2-3]要求的建模参数如表2所示,有限元模型 S1、S2 如图4所示。

表2 文献[2-3]的建模参数

文献	单元数	模型桥长/m	混凝土强度等级	汽车荷载	冲击系数
[2]	740	16.00	C40	汽-超20挂-120	0.220
[3]	332	15.96	C50	公路I级的车道荷载	0.347

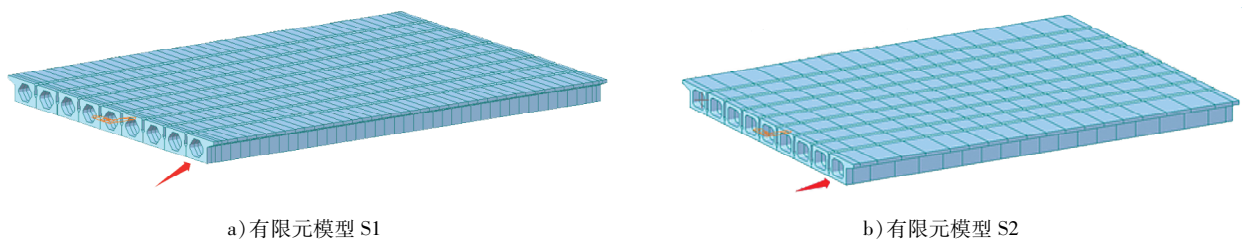


图4 空心板梁有限元模型

分析有限元模型在桥梁的静力荷载与移动荷载作用下所受剪力,静力荷载主要包括一期恒载(结构自重)、二期恒载和预应力筋预加荷载,根据荷载最不利情况依次布置移动荷载。计算结果如图5、6所示。由图5、6可知:在恒载作用下,空心板梁 S2 所受剪力普遍略小于空心板梁 S1,表明 S2 的抗剪性能比 S1 高;桥梁在文献[19]车道荷载下产生的剪力均大于文献[2-3],文献[19]荷载对空心板梁 S1、S2 影响较大。计算得到的剪力效应为理论计算结果,可与后期缩尺试验获得的实际计算结果对比,分析空心板梁 S1、S2 抗剪性能的安全系数(理论剪力与实际试验测得剪力之比)。

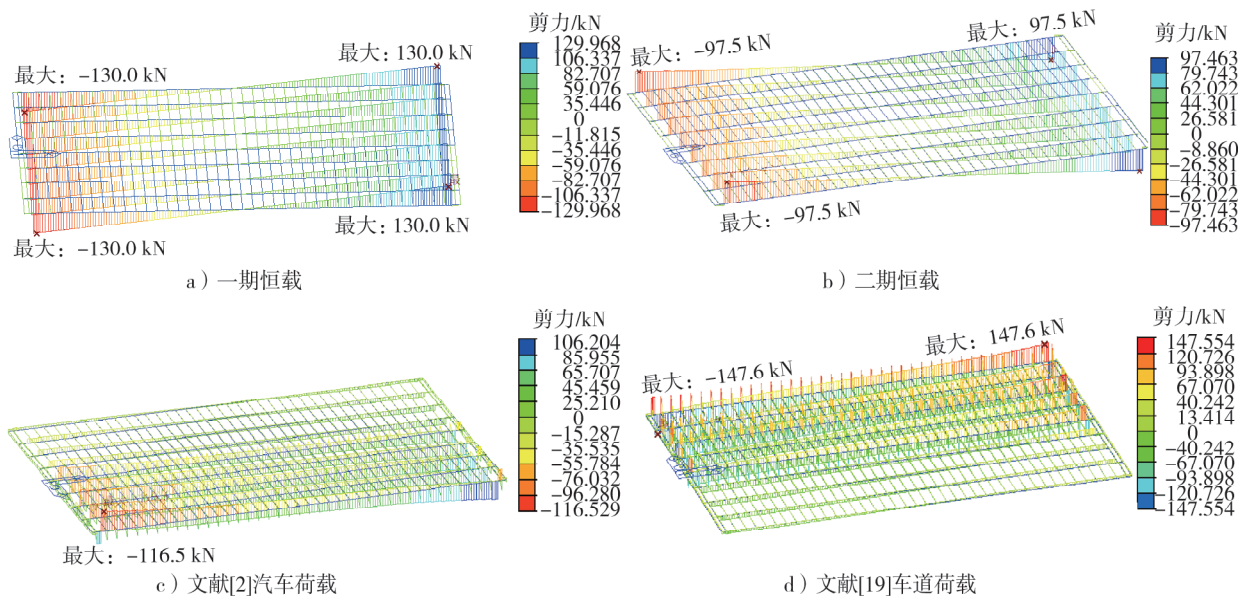


图5 空心板梁 S1 在各荷载作用下的剪力

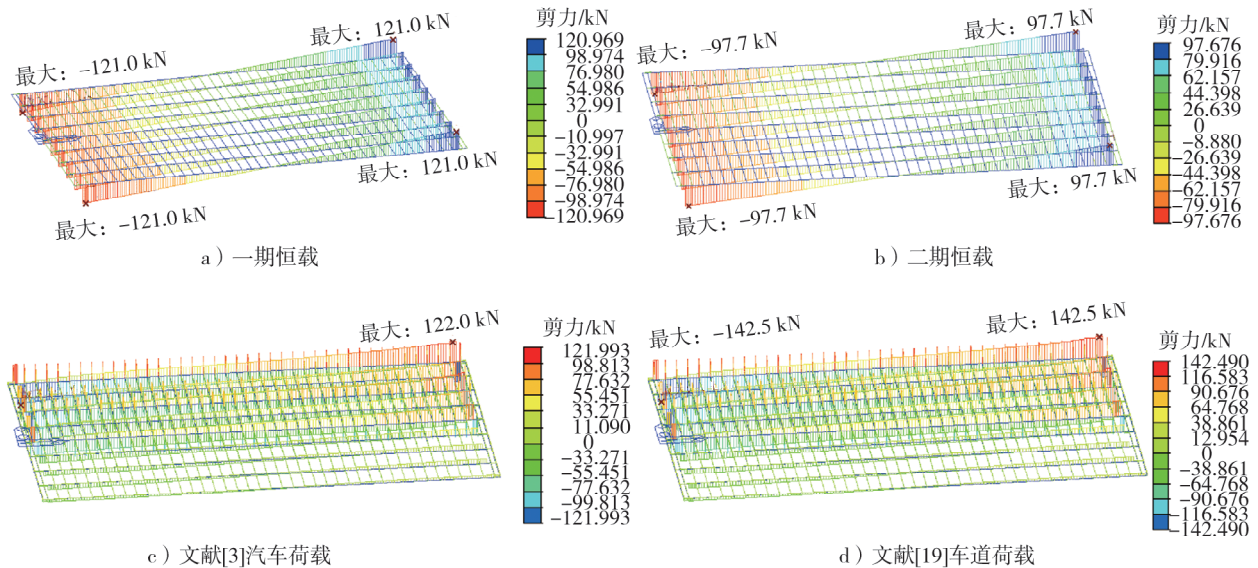


图 6 空心板梁 S2 在各荷载作用下的剪力

2.2 模型理论数据分析

空心板梁 S1、S2 支点附近出现的病害程度不同,与所受剪力有关^[20]。不同荷载作用下,空心板梁 S1、S2 的最大剪力对比如表 3 所示。

表 3 不同荷载作用下空心板梁的最大剪力对比

设计标准及荷载作用	最大剪力/kN	
	S1	S2
一期恒载	130.0	121.0
二期恒载	97.5	97.7
文献[2]汽车荷载(S1)、文献[3]汽车荷载(S2)	116.5	122.0
文献[19]公路-I级荷载	147.7	142.5
文献[19]正常使用极限状态(1.0 倍的恒载与 70%的可变荷载之和)	330.9	318.5
1.2 倍的一期恒载、1.2 倍的二期恒载、1.4 倍的可变荷载之和与 1.1 倍的文献[3]承载力极限状态荷载之积	527.8	508.1
在文献[19]车道荷载作用下最大剪力增幅	26.8%	16.8%

注:最大剪力增幅为文献[19]公路-I级荷载下最大剪力与文献[2-3]汽车荷载下最大剪力之差与后者之比。

由表 3 可知:空心板梁 S1、S2 在文献[19]荷载作用下,最大剪力比文献[2-3]荷载下分别增大 26.8%、16.8%。剪力增大不利于结构安全。对空心板梁 S1、S2 进行荷载试验,判断二者承载力是否满足文献[19]要求,计算桥梁结构安全系数。

3 结构模型试验

3.1 结构模型参数

按缩尺比例 1:4,根据文献[2-3]要求分别设计制作试验梁 T1、T2,根据相似定理原则确定缩尺模型其他参数,缩尺模型的相似常数如表 4 所示。由表 4 可求出结构模型在文献[2-3]要求下的试验荷载,如表 5 所示。

根据面积相等和惯性矩不变的原则对试验梁截面进行换算,并将实际梁截面形状换算为易于试验的

箱形^[21-22],换算的空心板梁缩尺尺寸如图 7 所示。试验梁 T₁ 配筋分别为 N₁~N₅,试验梁 T₂ 配筋分别为 M₁~M₅,试验梁配筋参数如表 6、7 所示。

表 4 空心板梁缩尺模型的相似常数

项目	物理量	量纲	相似常数	项目	物理量	量纲	相似常数
几何特性	长度 L	$[L]$	1/4	材料特性	弹性模量 E	$[FL^{-2}]$	1
	截面面积 S	$[L^2]$	1/16		剪切模量 G	$[FL^{-2}]$	1
试验结果	应力 σ	$[FL^{-2}]$	1	测试参数	集中力 F	$[F]$	1/16
	应变 ε	$[1]$	1		均布荷载 q	$[FL^{-1}]$	1/4
	挠度 γ	$[L]$	1/4		弯矩 M	$[FL]$	1/64
	位移 x	$[L]$	1/4				

表 5 不同结构模型的试验荷载计算结果

试验对象	试验梁类型	正常使用极限状态/kN	承载能力极限状态/kN
原型空心板梁	文献[2]	330.9	527.8
	文献[3]	318.5	508.1
缩尺结构模型	文献[2]	20.6	32.9
	文献[3]	19.9	31.7

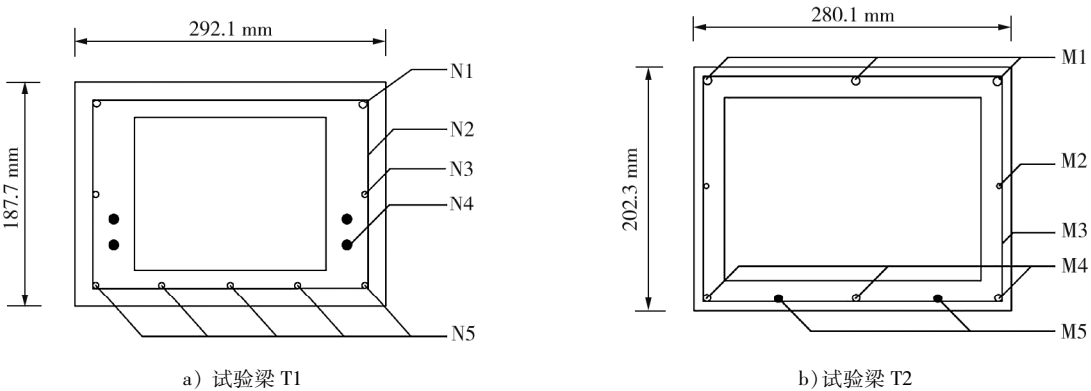


图 7 空心板梁缩尺尺寸

表 6 试验梁 T1 配筋

编号	直径/mm	长度/mm	配筋数
N1	8.0	3 980	2
N2	6.0	1 040	54
N3	6.0	3 980	2
N4	12.7	5 000	4
N5	6.0	3 980	4

表 7 试验梁 T2 配筋

编号	直径/mm	长度/mm	配筋数
M1	14.0	3 980	3
M2	8.0	3 980	2
M3	6.0	1 045	54
M4	12.0	3 980	3
M5	12.7	5 000	2

3.2 测点布置

试验梁的测点布置如图 8 所示,加载点与跨中截面沿梁高各布置 5 片应变片,试验梁 T1、T2 支点与加载点距离 L 分别为 187.7、202.3 mm,支点与加载点连线处各布置 3 个应变花,同时每片试验梁布置 3 个位移计。

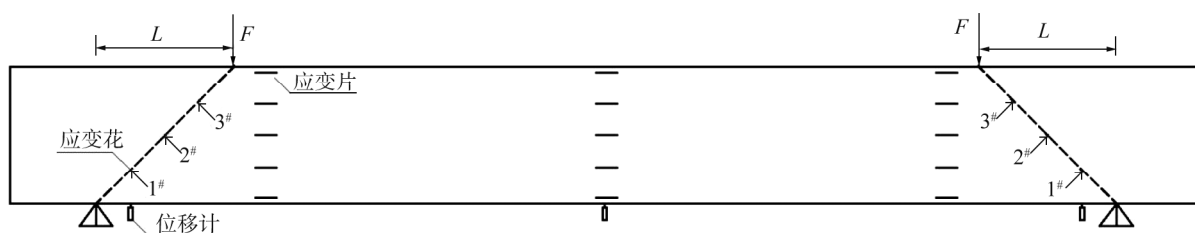
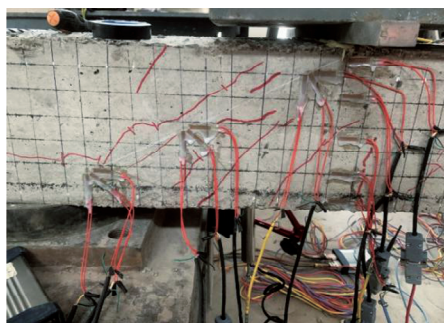


图 8 测点布设示意图

3.3 试验加载方案及试验现象

试验前进行预加载减小试验误差。试验采用分级加载方式持续加载 5 min, 加载至文献[3]下正常使用极限状态和承载力极限状态设计荷载, 而后持续加载至试验梁破坏。

试验梁 T1 剪压区及纯弯段裂缝如图 9 所示。对试验梁 T1 加载增至 19.3 kN 时, 加载点底板出现微型裂缝; 随后在试验梁梁长的 1/4 至 3/4 范围内(纯弯段)底板出现宽度较小的裂缝; 荷载持续增至 35.7 kN 时, 梁端部剪压区出现第 1 条斜裂缝, 随后斜裂缝不断延伸增大发展为主裂缝; 荷载增至 76.2 kN 时, 主裂缝附近出现 3~4 条次生裂缝; 加载至 89.6 kN 时, 加载点横向裂缝已延伸至腹板, 且宽度增大较快, 当腹板裂缝宽度大于 1.5 mm 时, 出于试验安全考虑, 停止加载。



a) 剪压区裂缝



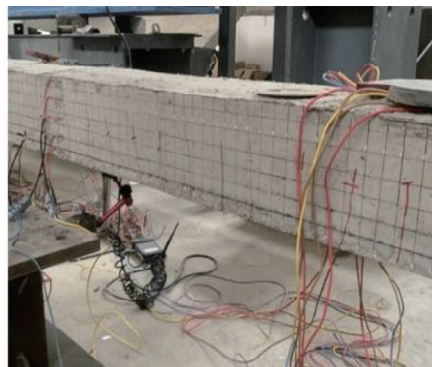
b) 纯弯段裂缝

图 9 试验梁 T1 剪压区及纯弯段裂缝

试验梁 T2 剪压区及纯弯段裂缝如图 10 所示。试验梁 T2 的试验现象与试验梁 T1 类似。试验梁 T2 在加载至 19.8 kN 时, 加载点底板出现细小裂缝; 荷载增至 30.2 kN 时, 梁端剪压区出现第 1 条斜裂缝, 试验梁 T2 出现斜裂缝的荷载比试验梁 T1 小, 原因是试验梁 T1 的预应力钢绞线竖向弯起延后了斜裂缝的出现; 荷载为 74.8 kN 时, 斜裂缝发展为主裂缝, 同时伴随 2~4 条次生裂缝, 裂缝宽 0.15~0.25 mm; 荷载达到 95.6 kN 时, 斜裂缝最大宽度为 0.45 mm, 当腹板裂缝宽度大于 1.50 mm 时, 出于试验安全考虑, 停止加载。



a) 剪压区裂缝



b) 纯弯段裂缝

图 10 试验梁 T2 剪压区及纯弯段裂缝

4 试验结果分析与讨论

4.1 位移-荷载关系

试验梁的位移-荷载曲线如图 11 所示,曲线斜率可反映梁体刚度。试验梁位移-荷载曲线斜率如表 8 所示。随荷载增大,梁体不断产生竖向裂缝,梁体挠度变化幅度增大。在同级荷载作用下,试验梁 T1 曲率明显大于试验梁 T2,表明试验梁 T1 的挠度比试验梁 T2 大,这与设计空心板梁的截面形式、钢筋构造要求和混凝土材料有较大关系^[20]。

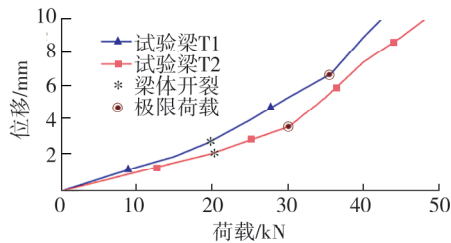


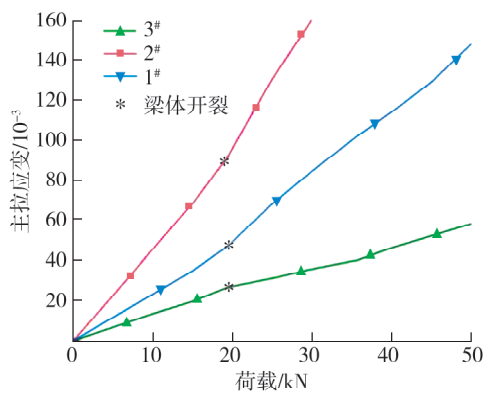
图 11 试验梁位移-荷载曲线

表 8 试验梁位移-荷载曲线斜率

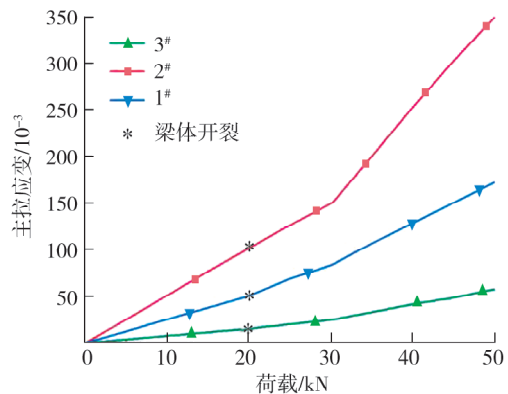
试验梁	开裂荷载前斜率	开裂荷载加载至极限荷载斜率	极限荷载后斜率
T1	0.14	0.25	0.45
T2	0.11	0.15	0.36

4.2 主拉应变-荷载关系

采用对称的方式加载试验梁,同一梁高处的应变接近。取左、右两侧同一梁高的平均应变表示同一梁高的应变。主拉应变-荷载如图 12 所示。由图 12 可知:加载初期,主拉应变和荷载大致呈线性关系。随荷载增大,中部 2[#]应变花主拉应变增速最快,底部 1[#]应变花次之,梁体中部首先出现剪压区的裂缝,延伸至底部;顶部主拉应变变化趋势较小,原因为所施加荷载未能使裂缝延伸至顶板;后期曲线的斜率较大,即荷载小幅增大时,应变增速过快,裂缝变化较大。



a) 试验梁 T1



b) 试验梁 T2

图 12 试验梁的主拉应变-荷载曲线

4.3 对比分析

试验梁对比分析结果如表 9 所示。

表 9 试验梁对比分析

试验梁	文献[19]设计承载能力 极限状态荷载/kN	实测破坏荷载/kN	文献[18]设计正常使用 极限状态荷载/kN	开裂荷载/kN	结构安全系数 ^①
T1	32.9	35.7	20.6	19.3	1.09
T2	31.7	30.2	19.9	19.8	0.95

①结构安全系数为桥梁荷载试验测得的实测破坏荷载与设计承载能力极限之比。

由表9可知:试验梁T2的抗剪承载力安全系数不足;试验梁T1基本满足文献[19]的抗剪要求,但结构安全系数较小。试验梁T1和试验梁T2未达到文献[19]设计正常使用极限状态时就出现裂缝,说明试验梁T1和试验T2的耐久性有待提高。

对于正常使用极限状态,以实测开裂荷载作为正常使用极限状态标点,结合软件MIDAS CIVIL分析得到试验梁T1和T2的理论挠度和理论应变。预应力混凝土桥的挠度校验系数为0.7~1.0,应变校验系数为0.6~0.9^[20],试验梁试验校验系数如表10所示。由表10可知:试验梁T1和T2的挠度和应变校验系数在规定范围内,空心板梁整体受力效应满足要求,但在剪力区过早出现裂缝将直接影响桥梁使用耐久性,降低桥梁整体刚度^[23-24]。

表10 试验梁试验校验系数

试验梁	实测挠度/mm	实测应变/ 10^{-3}	理论设计挠度/mm	理论设计应变/ 10^{-3}	挠度校验系数	应变校验系数
T1	3.40	91	3.90	150	0.87	0.60
T2	2.53	100	3.97	136	0.63	0.73

5 结论

以分别按文献[2-3]设计的长16 m的空心板梁为研究对象,采用有限元模型分析与缩尺模型加载试验相结合的对比研究方法,在文献[19]车道荷载作用下,对此类板梁进行抗剪性能研究。

1)采用软件MIDAS CIVIL分别按文献[2-3]设计空心板梁S1、S2,在恒载作用下,S1所受剪力普遍略小与S2。随文献[19]车道荷载组合效应的增大,空心板梁的最大剪应力也随之大幅增大。空心板梁S1、S2在文献[19]车道荷载作用下的最大剪力分别增大26.8%、16.8%。

2)按缩尺比例1:4,根据文献[2-3]要求分别设计制作试验梁T1、T2,在相应位置布设应变片、应变花和位移计,采用分级加载方式加载至文献[19]正常使用极限状态和承载力极限状态设计荷载,直至试验梁破坏。试验梁T1、T2的试验现象类似,随荷载增大,加载点底板先出现微裂缝,纯弯区底板出现裂缝,剪压区出现斜裂缝,斜裂缝延伸为主裂缝,附近出现次生裂缝,加载点横向裂缝延伸至腹板。

3)试验梁T1的挠度比试验梁T2大。加载初期,主拉应变和荷载大致呈线性关系。随荷载增大,中部主拉应变增速最快,底部次之,梁体中部首先出现剪压区裂缝,延伸至底部,顶部主拉应变变化较小;后期曲线斜率较大,即荷载小幅增大时,应变增速过快,裂缝变化较大。试验梁T1和T2在加载至文献[19]设计承载能力极限状态时,试验梁T2的抗剪承载力安全系数不足;试验梁T1基本满足文献[19]的抗剪要求,但结构安全系数较小。试验梁T1和T2的挠度和应变校验系数在规定范围内,空心板梁整体受力效应满足要求,但在剪力区过早出现裂缝将直接影响桥梁使用耐久性,降低桥梁整体刚度。

参考文献:

- [1] 项贻强,竺盛,赵阳,等. 快速施工桥梁的研究进展[J]. 中国公路学报, 2018, 31(12): 1-27.
- [2] 中华人民共和国交通部,交通部公路规划设计院. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范:JTJ 023—1985. 北京:人民交通出版社,1985.
- [3] 中华人民共和国交通部,中交公路规划设计院. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范:JTG D62—2004[S]. 北京:人民交通出版社,2004.
- [4] 彭卫兵,金瑞雨,李翠华,等. 现浇混凝土护栏对空心板边铰缝受力性能的影响研究[J]. 桥梁建设, 2022, 52(4): 39-45.
- [5] FENG C Q, LI B L, LIU Y F, et al. Crack assessment using multi-sensor fusion simultaneous localization and mapping (SLAM) and image super-resolution for bridge inspection[J]. Automation in Construction, 2023, 155: 105047.
- [6] CHEN L, YAN J, WU Z G, et al. Experimental and numerical study on shear behavior of shear pockets between ultra-high-performance and normal concrete for precast girder bridges[J]. Structures, 2023, 55: 1645-1658.

- [7] YE M X, ZENG Z P, LI P C, et al. Analysis of early-age mechanics and crack of the base plate on the bridge in summer based on Extended FEM[J]. Structures, 2023, 55: 2403–2418.
- [8] 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(自然科学版), 2021, 51(3): 384–390.
- [9] 王佳泽. 基于迁移学习的交通流参数预测模型实时更新方法研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学, 2023.
- [10] 赵亚娟. 中小跨径空心板桥抗剪承载力提高方法研究[D]. 济南:山东交通学院, 2022.
- [11] 侯洋. PC箱梁桥粘贴钢板抗剪加固研究[D]. 西安:长安大学, 2021.
- [12] 贾艳敏,郭凯强,赵学,等. 已服役20年的PC空心板梁有限元模型修正[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(26): 109–113.
- [13] 任伟,陈博,唐泉,等. 基于损伤模型的聚碳酸酯板桥异常裂缝成因分析及处置[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(16): 6628–6634.
- [14] 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, 40(6): 148–154.
- [15] 于洋,石南,高磊,等. 预应力混凝土空心板梁抗剪承载力分析[J]. 山东大学学报(工学版), 2023, 53(3): 88–95.
- [16] 雷建华,段君良,何恒波. 现浇空心板梁桥纵向开裂成因分析与试验研究[J]. 公路工程, 2017, 42(5): 85–89.
- [17] 刘红义,张劲泉,周建庭,等. PC空心板梁裂缝变化抗弯足尺试验研究[J]. 桥梁建设, 2021, 51(6): 92–98.
- [18] 刘效尧,徐岳. 公路桥涵设计手册:梁桥[M]. 2版. 北京:交通出版社, 2011.
- [19] 中华人民共和国交通运输部,中交公路规划设计院有限公司. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范:JTG 3362—2018[S]. 北京:人民交通出版社, 2018.
- [20] 徐光辉,胡明义. 公路桥涵设计手册:梁桥[M]. 北京:人民交通出版社, 1996.
- [21] 中华人民共和国交通运输部,长安大学. 公路桥梁荷载试验规程:JTG/T J21—2015[S]. 北京:人民交通出版社, 2015.
- [22] 王银辉,陆晓宏. 钢筋混凝土梁在冲击作用初期的惯性力分布[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(6): 2457–2463.
- [23] 徐晨,肖涵,杨澄宇. 超高性能混凝土组合桥面板短群钉抗剪性能分析[J]. 南大学学报(自然科学版), 2022, 53(11): 4359–4371.
- [24] 彭世红,周思源,董卓越,等. 新旧混凝土植筋界面抗剪承载力影响因素研究及规范对比[J]. 工程力学, 2023, 40(增刊1): 167–173.

Comparison of shear performance of in-service hollow slab beams based on abandoned standards

LU Qiaoqiao¹, SONG Shuqin², ZHAO Kunpeng^{1*}, LIANG Maojing³

1. School of Civil Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China;

2. Jinan Jinyue Highway Engineering Co., Ltd., Jinan 250101, China;

3. Heze Transportation Investment Development Group Co., Ltd., Heze 274000, China

Abstract: To analyze the shear resistance performance of the existing old hollow slab beam bearing shear zone, to ensure the safety and durability of the bridge, considering the factors such as the section form of the slab beam, the layout of ordinary steel bars, the arrangement of prestressed steel bars, the strength of concrete materials, and the combination of load effects, the software MIDAS CIVIL is used to design hollow slab beams S1 and S2 according to Code for Design of Highway Reinforced Concrete and Prestressed Concrete Bridges and Culverts JTJ 023–1985 and JTG D62–2004, and to perform shear analysis under static loads and moving loads; according to the scale ratio of 1:4, experimental beams T1 and T2 are designed and manufactured according to the requirements of JTJ 023–1985 and JTJ D62–2004, and loaded in a stepwise manner to the normal service limit state and ultimate limit state design loads specified in JTG D62–2004 until the failure of the experimental

beams. Research on the shear resistance performance of the hollow slab beams designed according to JTJ 023-1985 and JTJ D62-2004 under the lane load effects specified in Specifications for Design of Highway Reinforced Concrete and Prestressed Concrete Bridges and Culverts (JTG 3362-2018), and comparison of the results of finite element model analysis with the results of scaled model loading tests. The results show: 1) Under constant load, the shear force on S1 is generally slightly smaller than S2, the maximum shear stress of hollow slab beams S1 and S2 increases significantly with the increase of the combined effect of lane load in JTG 3362-2018, by 26.8% and 16.8% respectively. 2) The experimental phenomena of beams T1 and T2 are similar: As the load increases, cracks appear successively at the loading point bottom plate, pure bending zone bottom plate, and shear compression zone, the inclined cracks in the shear compression zone extend as the main cracks, secondary cracks appear near the main cracks, and transverse cracks at the loading point extend to the web plate. 3) The deflection of beam T1 is greater than that of beam T2. 4) At the beginning of loading, the relationship between the main tensile strain and the load is roughly linear. As the load increases, the main tensile strain in the midspan increases the fastest, followed by the bottom, cracks first appear in the shear compression zone in the middle of the beam, extending to the bottom, the top main tensile strain changes less; the later stage has a larger slope, when the load slightly increases, the strain increase is too fast, and the crack changes greatly. 5) Beams T1 and T2 have not reached the failure state when loaded to the design carrying capacity limit state in JTG 3362-2018, the overall safety margin of the slab beams meets the requirements, but the margin is small. 6) The deflection and strain verification factors of beams T1 and T2 meet the requirements, but early appearance of cracks in the shear zone will directly affect the durability of bridge usage and reduce the overall stiffness of the bridge.

Keywords: bridge engineering; shear-resistant; hollow beam in service; contrast test

(责任编辑:王惠)

.....
(上接第 119 页)

theoretical calculation results from all three models; however, model A's displacement and strain correction factors are overall too low, which may lead to misjudgment of the bridge's actual load-bearing state, while model B's correction factor is less than that of model C; under offset loading, in the transverse direction of the bridge, the theoretical midspan deflection of models A and B is inconsistent with the measured deflection trend, while model C's theoretical midspan deflection aligns with the measured midspan deflection trend, with the maximum deflection located at slab 4[#]; compared with models A and B, model C's calculated neutral axis of the edge beam is consistent with the measured neutral axis of the edge beam; due to the joint effect of the guardrail and bridge deck pavement on the beam-slab system, model C better reflects the actual stress state of the bridge structure.

Keywords: prestressed concrete hollow slab; static load test; bridge deck pavement and guard rail; combined action; calculation model

(责任编辑:王惠)