

# 钢板加固的空心板桥梁的横向分布系数的研究



何化南<sup>1,\*</sup>, 王佳伟<sup>2,3</sup>, 徐少晨<sup>1</sup>, 张冠华<sup>2</sup>, 刘晓鹏<sup>1</sup>, 赵育鹏<sup>1</sup>

<sup>1</sup>大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁大连 116024

<sup>2</sup>辽宁省交通规划设计院有限责任公司, 辽宁沈阳 110166

<sup>3</sup>辽宁大通公路工程有限公司, 辽宁沈阳 110005

**摘要:** 本文通过一种新型粘贴钢板加固方法用以恢复空心板梁横向联系, 从而使加固后的桥梁能够满足结构的正常使用功能。对京沈高速公路绥中至沈阳段跨度为8m的混凝土空心板原梁采用粘贴钢板法加固, 加固完成后进行偏载工况加载并运用abaqus软件进行数值计算。基于桥梁结构荷载横向分布系数理论, 采用不同计算方法得到加固后试验梁荷载横向分布系数, 验证铰接板法可以用于粘贴钢板加固后的空心板梁计算。此外, 结合前期计算、试验结果与数值分析, 讨论新型粘贴钢板加固法对桥梁横向联系的恢复效果。结果表明: 铰接板法可以用于粘贴钢板加固后的空心板梁荷载横向分布系数计算, 同时粘贴钢板加固法能够有效恢复空心板间横向联系, 满足桥梁结构使用功能。

**关键词:** 桥梁加固; 横向联系; 混凝土空心板; 粘贴钢板法; 数值计算

**DOI:** [10.57237/j.cear.2023.01.003](https://doi.org/10.57237/j.cear.2023.01.003)

## Study on Lateral Distribution Coefficients of Hollow Slab Bridges After Reinforced by Pasted Steel Plates

He Hua-nan<sup>1,\*</sup>, Wang Jia-wei<sup>2,3</sup>, Xu Shao-chen<sup>1</sup>, Zhang Guan-hua<sup>2</sup>, Liu Xiao-peng<sup>1</sup>, Zhao Yu-peng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China

<sup>2</sup>Liaoning Provincial Communication Planning & Design Institute Co., Shenyang 110166, China

<sup>3</sup>Liaoning Datong Road Construction Co., Shenyang 110005, China

**Abstract:** This paper adopts a new method of pasting steel plate to restore the transverse connection of hollow slab bridge, so that the strengthened bridge can meet the requirements under the state of serviceability. The original beam of the concrete hollow slab with a span of 8m from the Suizhong to Shenyang section of Jing-Shen highway was reinforced by a method of pasting steel plates. In the test the eccentric load condition was loaded and the abaqus software was used for numerical calculation after the reinforcement. Based on the theory of load transverse distribution coefficient of bridge structure, different calculation methods were used to obtain the transverse load distribution coefficient of the strengthened test beam, and it is verified that the hinged plate method can be used to calculate the hollow slab beam strengthened with steel plate. In addition, combined with previous calculations, test results and numerical analysis, this

\*通信作者: 何化南, hehuanandl@163.com

paper discusses the restoration effect of the new type of pasted steel plate reinforcement method on the bridge lateral connection. The results show that the hinged plate method can be used to calculate the load lateral distribution coefficient of hollow slab beams strengthened by pasted steel plates. therefore, the pasted steel plate reinforcement method can effectively restore the horizontal connection between the hollow slabs and meet the use of bridge structures.

**Keywords:** Bridge Reinforcement; Lateral Connection; Concrete Hollow Slab; Pasted steel Plate Method; Numerical Calculation

## 1 引言

对于中小跨径装配式空心板桥梁结构来说，横隔梁或铰缝结构对维持各空心板间的横向联系起着决定性影响[1]，随着使用年限的增长，荷载等级提高、重车作用频繁以及养护管理不当等因素均可能对桥梁结构造成较为严重的损伤和破坏，削弱其空心板间横向联系甚至引起其横向联系失效，进而导致出现单板受力的情况，迫使结构服役时间缩短或者终止[2]。实际工程中通常采用加固措施来解决此状况以提升桥梁整体性能和承载力[3]。至今，国内外桥梁研究者们在横向分布系数理论和横向联系加固法等领域开展了大量研究，取得成果颇丰[4-8]。关于构建荷载横向分布系数理论体系，AASHTO 规范[9]给出一种具有一定参考意义的理想化计算方法；日本规范[10]主要按桥梁宽度将现有计算方法分成偏心修正法和 G-M 法两个大类。王敏强[11]等从铰接板理论和结构力学最基本原理出发，建立了荷载横向分布影响线的最一般方程，从而应对不同截面、板梁数的铰接板桥设计和计算问题，丰富了荷载横向分布系数计算体系。刘华[12]等研究了主梁挠度与荷载分配之间的联系，提出了综合考虑桥梁结构动力性影响的计算方法，通过算例验证了该方法的合理性，为空间问题向平面问题转化提供了新的思路。对于加固后的桥梁的结构整体性研究亦开展了很多，如邬晓光[13]等基于传统横向刚接法，提出了湿接缝情况下考虑铰缝损伤程度的修正刚接梁计算模型；魏保立[14]等讨论了影响荷载横向分布系数的主要因素，在此基础上推导了具有一定参考意义的既有病害桥梁荷载横向分布系数计算方法。旷斌[15]等以 5 块空心板装配式桥梁荷载试验为研究背景，基于铰接板法计算模型，提出受铰缝损伤影响的铰缝刚度分配系数和协同工作系数，从而修正现有计算模型，并通过试验值与计算值良好的吻合度说明了该方法的合理性。

然而，以上多数研究都是基于实验室里新浇筑的模型试件开展的，与实际工程的桥梁构件从尺寸、连接到施工方法都有一定的差异，故为了更为切合现场加固施工的实际情况，本文从现役的京沈高速绥中至沈阳段通道桥中拆取损伤的构件进行结构整体性分析，提出相应的加固措施和设计方法。以荷载横向分布系数理论为基础，重点分析了粘贴钢板加固法在不中断交通的情况下恢复桥梁横向联系的可能性。此外通过试验分析了空心板梁粘贴钢板加固后的荷载横向分布情况，验证了参考铰接板法计算粘钢加固后空心板梁荷载横向分布系数的合理性，讨论加固后空心板梁的横向联系恢复效果。

## 2 京沈高速 8m 空心板梁结构计算

### 2.1 工程概况

本文研究的京沈高速绥中至沈阳段 K249+250.00 通道桥是一座跨径为 8m 的简支混凝土空心板梁桥，该桥上部结构由 16 块混凝土空心板组成，桥面宽度 34.5m。根据横断面的不同可将桥面板分为边跨空心板和中跨空心板两类，边跨板高 0.4m，受压翼缘宽度为 1.27m，板底部宽度 0.995m；中跨板高为 0.4m，板顶端宽度 0.79m，板底部宽度 0.99m。混凝土空心板梁计算跨径为 7.96m，主体结构采用 C25 混凝土，底部受拉钢筋型号为 HRB335，箍筋选用 HPB300 钢筋。设计荷载为公路—I 级，人群荷载大小为 4.5kN，环境标准为 I 类，设计安全等级为一级。经检测后承载力和混凝土铰缝横向联系均有不足，需进行结构加固。为方便计算，现将通道桥各空心板参照图 1 的断面图从左至右按 1-16 依次编号。

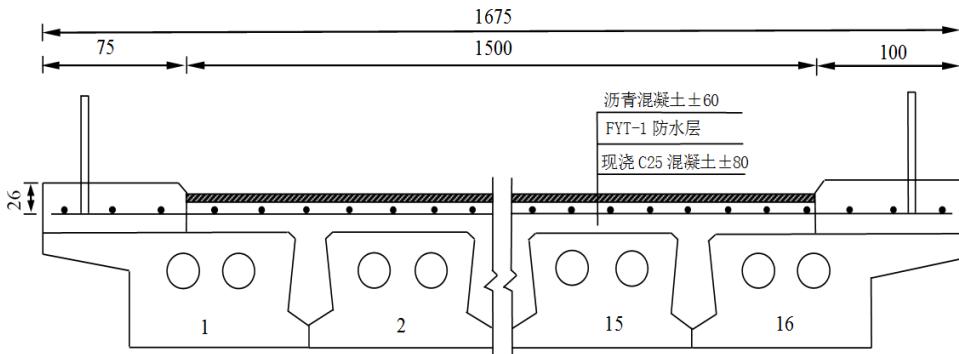


图 1 通道桥断面图及桥型布置图 (mm)

Figure 1 Cross-sectional view of the bridge and layout of the bridge

## 2.2 原梁结构计算

根据原桥梁设计资料,按式(1)计算得到空心板刚度参数 56。此外,参考桥梁工程[16]中铰接板法的荷载横向影响线和横向分布系数计算方法,计算得到与的横向影响线竖标值,然后采用线性插值的方法求得当时各空心板对应的横向影响线竖标值。

$$\gamma = 5.8 \frac{I}{I_T} \left(\frac{b}{L}\right)^2 \quad (1)$$

$$m_q = \frac{1}{2} \sum \eta_{iq} \quad (2)$$

$$m_r = \sum \eta_{ir} \quad (3)$$

将计算得到的竖标按照一定的比例尺绘于对应板的轴线下方并连成光滑的曲线后,得到每块板相应的影响线图,横桥向车辆荷载按规范要求遵循最不利原则布置,并根据式(2)~(3)计算得到每块空心板荷载横向分布系数。由于本文研究桥梁结构具有对称性,因此只需计算前 8 块板即可,得到各板跨中荷载横向分布系数如下表 1 所示。

表 1 跨中荷载横向分布系数计算表

Table 1 Calculation table for transverse load distribution coefficient of mid span

空心板编号	1	2	3	4	5	6	7	8
分布系数	0.257	0.273	0.287	0.300	0.305	0.305	0.312	0.312
左	0.346	0.240	0.146	0.094	0.062	0.040	0.026	0.017
	0.001	0.001	0.001	0.002	0.003	0.005	0.007	0.011
	0.347	0.241	0.147	0.096	0.065	0.045	0.033	0.028

由表 1 可知,原结构在可变荷载作用下,荷载横向分布系数最大值为 0.312 (跨中 8 号板),最小值为 0.257 (边板 1 号板),且由桥面板两侧向跨中呈增大趋势。此外,由所有空心板荷载横向分布系数所处区间以及相邻空心板间的荷载横向分布系数相差较小可知,荷载在原结构各块空心板间分配较为均匀,空心板桥梁结构在设计阶段已充分考虑横向联系这一属性。

合的连接方式,加固用的钢板型号采用 Q235B 钢板,厚度统一为 6mm,长宽根据实际需要进行切割,具体型号类别详见表 2。锚固用的锚栓性能等级为 8.8 级,采用全螺纹非焊接螺杆,钻孔直径为 20mm,钻孔深度 160mm。在混凝土底表面钻孔前应探明钢筋位置,避免钻孔时损伤主筋,同时焊接位置也应避开铰缝位置。

表 2 钢材规格数量表

Table 2 Steel specification quantity table

编号	规格 (mm)	数量	单位重 (kg/m)
N1	300×6×1980	3	14.13
N2	300×6×1000	4	14.13
N3	200×6×7160	2	9.42
N5	200×6×7160	2	9.42

## 3 粘贴钢板加固方案

为了达到恢复空心板间横向联系的目的,本试验采用粘贴钢板法对既有结构拆卸后的原空心板混凝土梁进行加固,共采用 9 块加固钢板,其中 N<sub>1</sub>、N<sub>2</sub> 板与空心板的空隙用钢板填充,并采用胶黏剂与锚栓相结

针对空心板梁可能出现的因横向联系失效而引起的单板受力问题,在桥梁底面粘贴纵向N3钢板来提高其抗弯性能。此外,在桥梁底面粘贴长度不同的横向N1、N2钢板,其中N1钢板贯穿整个横桥底面布置,N2钢板仅覆盖相邻两块空心板的底面,主要用于恢复桥梁结构各空心板间的横向联系,从而当桥梁结构受

外部力作用时,荷载能更均匀地分配到每块空心板梁上。需要注意的是,加固施工时纵向钢板的粘贴位置应避开铰缝所在位置,同时沿桥纵向铰缝底部两侧布置并控制好钢板边缘距铰缝中线的距离。图2为桥梁加固的立面图及相邻两块空心板的板底平面图。

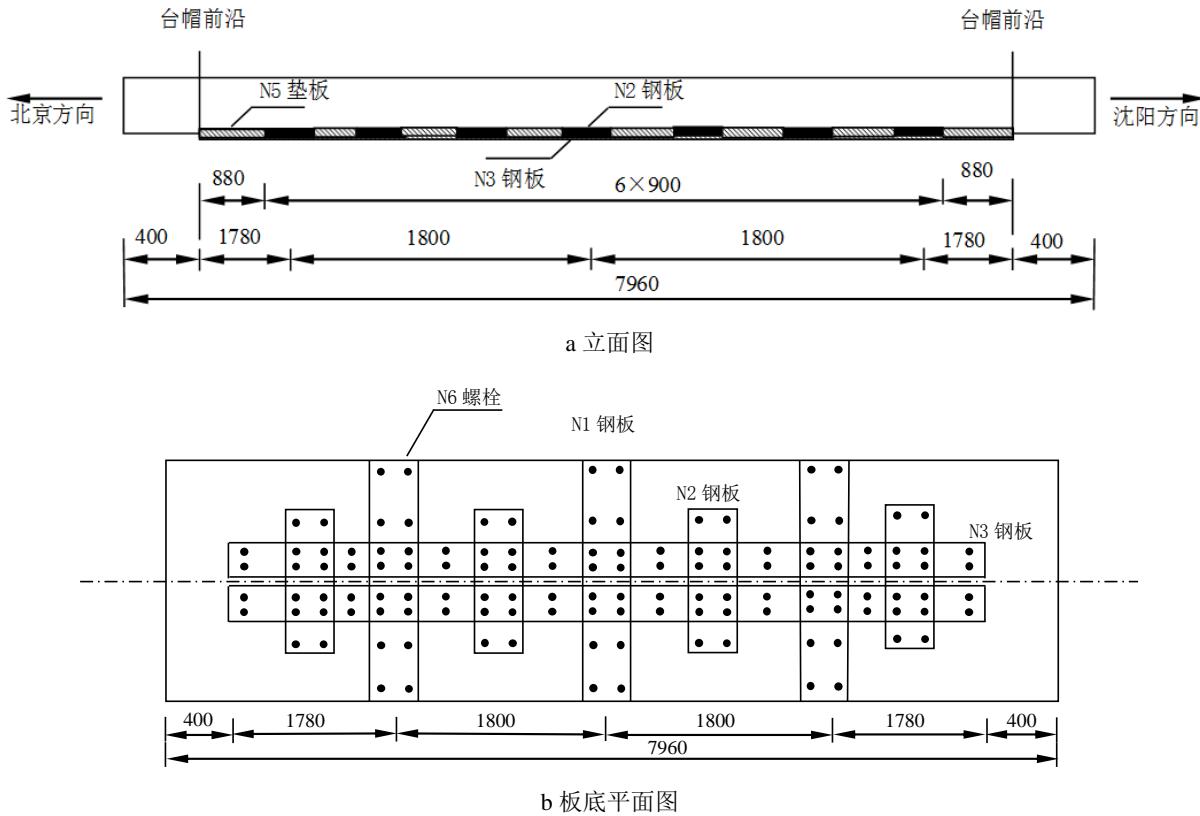


图2 8m 空心板铰缝加固布置图 (mm)

Figure 2 8m hollow plate hinge joint reinforcement layout

## 4 京沈高速公路 8m 空心板梁加固 试验研究

### 4.1 8m 空心板加固试验方案

本文采用一种新型粘贴钢板法对两块试验梁进行加固,对加固后的试验梁进行偏载工况的四点加载试验,两块空心板之间浇筑素混凝土,可近似认为铰接,与工程实际基本一致。参考铰接板法基本原理并结合位移测点的试验结果,计算试验梁两块板的荷载横向分布系数。通过分析试验梁在试验过程中的荷载横向分布情况,验证铰接板法可以用于粘贴钢板加固后的

空心板梁荷载横向分布系数计算。此外,将计算结果与加固前原梁设计要求进行比较,讨论粘贴钢板加固后混凝土空心板梁能否达到预期加固效果。

由于旧桥结构因横向刚度损失而不能满足使用要求,通过试验梁在静载作用下跨中截面的应变及挠度等,分析新旧空心板间横向联系的恢复情况。此外,通过试验得到的跨中截面测点的应力及挠度情况,分别计算横桥向两铰接空心板各自跨中截面最大弯矩及荷载横向分布系数,以达到验证铰接板法是否可以用于粘贴钢板加固后的空心板梁荷载横向分布系数计算的目的。应变测试截面为桥梁结构最大正弯矩处,现选择跨中截面、混凝土底板布置横向钢板处为本试验的主要测试截面。

表 3 主要测点分布表

Table 3 Distribution table of main measuring points

截面编号	截面位置	测量内容
A-A	跨中	应变、位移
B-B、C-C	N2 钢板位置	应变
D-D、E-E	N1 钢板位置 (1/4 跨)	应变、位移

本试验原梁主体结构和铰缝采用 C25 混凝土，后浇筑混凝土铰缝使用与原结构相同强度等级混凝土。原结构混凝土板底部受拉纵向钢筋以及顶部受压钢筋

为 HRB335，箍筋及其余钢筋为 HPB300 钢筋。加固用钢板为 Q235B 钢板，钢板厚度为 6mm。

试验采用四点弯曲梁试验，加载装置如图 3 所示。在加载初始阶段先进行预加载至 10kN 检测试验装置及仪器连接情况，随后卸载并正式开始加载。试验总体采用力分级加载，偏载工况每级 10kN，每级持载 2min 待采集仪数值稳定后进行下一级加载，加载至空心板梁底部混凝土位移最大值超过 13.33mm (L/700) 后停止加载，试验结束。

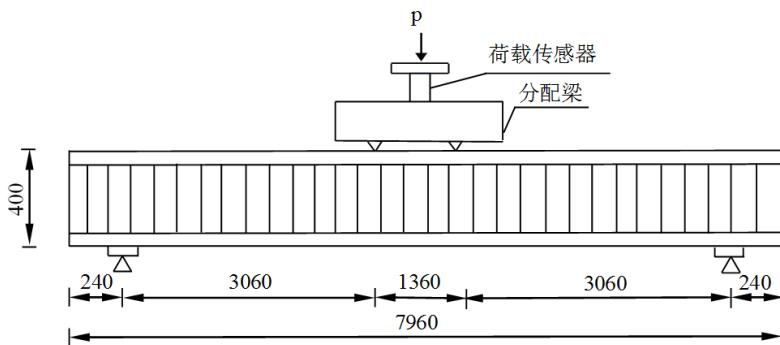


图 3 加载装置图 (mm)

Figure 3 Test setup

## 4.2 应变及挠度分析

试验加载结束后，得到相应测点的应变及挠度值，计算分析空心板简支梁内目标截面的弯矩以及荷载横向分布系数。对于测点编号在此进行简要的说明，钢筋编号 AJ 加 1 中，A 代表选测点所在截面，J 代表钢筋，“加”代表加载测，1 为测点编号；钢板编号 A-BZB 加 1 中，A-B 代表截面 A、B 之间的钢板测点，ZB 代表纵向钢板，HB 代表横向钢板，其余测点命名规则均与钢筋编号相同。

分析偏载工况下荷载大小为 350kN 时，跨中 A 截面的应力及挠度试验结果如下表：

表 4 偏载工况截面 A 测点应力-应变试验结果

Table 4 Result of stress-strain test of measuring point of section A

测点类型	测点编号	应变	应力 (N/mm <sup>2</sup> )
钢筋	AJ 加 1	$6.43 \times 10^{-4}$	129.243
	AJ 加 2	$6.31 \times 10^{-4}$	126.831
	AJ 加中	$5.84 \times 10^{-4}$	117.384
	AJ 中	$6.34 \times 10^{-4}$	127.434
	AJ2	$4.73 \times 10^{-4}$	95.073
	AJ1	$5.16 \times 10^{-4}$	103.716
混凝土	A 加侧上 1	$-2.38 \times 10^{-4}$	-6.67

测点类型	测点编号	应变	应力 (N/mm <sup>2</sup> )
钢板	A 加侧上 2	$-2.20 \times 10^{-5}$	-0.61
	A 加侧中	$1.40 \times 10^{-5}$	0.39
	A 加侧下 2	$1.98 \times 10^{-4}$	1.78
	A 加侧下 1	$2.12 \times 10^{-4}$	1.78
	A 侧上 1	$-2.21 \times 10^{-4}$	-6.19
	A 侧上 2	$-8.61 \times 10^{-5}$	-2.41
	A 侧中	$1.20 \times 10^{-4}$	1.78
	A 侧 2	$1.98 \times 10^{-4}$	1.78
	A-BZB 加 1	$7.24 \times 10^{-4}$	145.524
	A-BZB 加 2	$6.02 \times 10^{-4}$	121.002

表 5 截面 A 测点竖向位移试验结果

Table 5 Test result of vertical displacement of measuring point of section A

测点类型	荷载大小	测点编号	竖向位移 (mm)
混凝土	350kN	A 加下 1	13.29
		A 加下 2	10.64
		A 下 2	10.58
		A 下 HB	9.79
		A 下 1	5.25

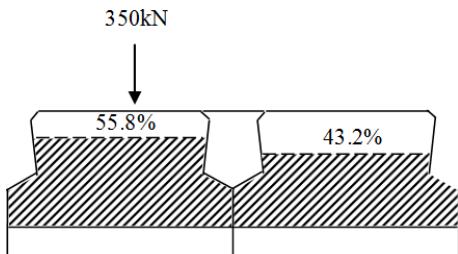


图 4 空心板梁跨中截面荷载横向分配情况

Figure 4 Transverse load distribution of mid-span loads of hollow slab beams

由偏载试验测点应变及挠度可知,当外荷载达到350kN时,加载端最外侧混凝土竖向位移值为13.29mm,已达到正常使用状态下的临界挠度值(L/700)。参考荷载横向分布系数计算方法中的铰接板法的计算原理,由跨中挠度值计算得到偏心荷载作用下荷载横向分布系数分别为 $m_1=0.549$ , $m_2=0.451$ 。

由于截面A加载侧受拉区混凝土实际应变已经达到混凝土极限拉应变0.00015,即部分混凝土已经受拉开裂。但由于外荷载作用下空心板梁并未进入破坏阶段,所以空心板梁混凝土存在受拉塑性变形区。因此在计算空心板梁正截面最大弯矩时,受拉区塑性变形部分混凝土应力大小统一按混凝土轴心抗拉强度标准值取用。综上,为简化计算模型,可认为受拉区混凝土在达到抗拉强度标准值前符合线弹性规律,在达到极限拉应变前应力大小保持不变直到混凝土受拉破坏。

由于试验梁由两块空心板铰接而成,将加载端空心板记为1号板,未加载端空心板为2号板。由混凝

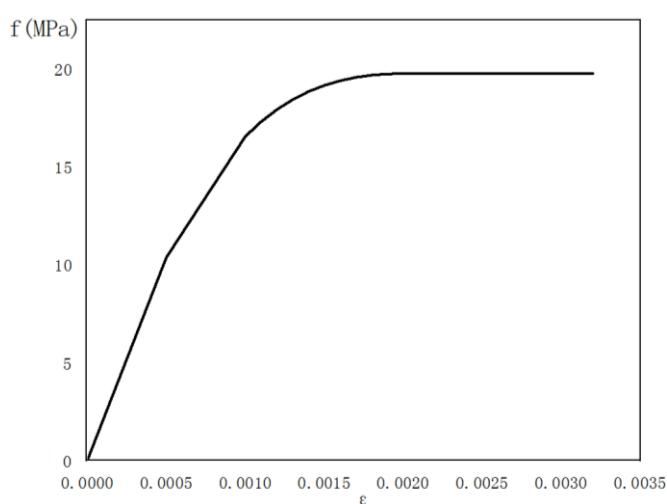
土、钢筋及钢板上的应力分别计算得到1号板正截面弯矩值为311.28kN·m;2号板正截面弯矩值为246.43kN·m。这说明了荷载实际分配情况基本满足荷载横向分布系数假定计算得到的理论结果,同时加固后的空心板梁横向联系恢复效果理想。

## 5 京沈高速公路8m空心板梁加固数值模拟

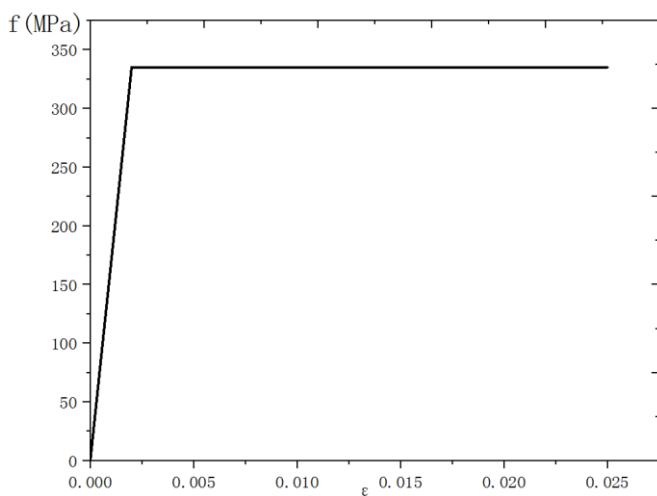
### 5.1 有限元建模

本文运用abaqus软件对8m空心板加固试验梁进行有限元分析,建立了混凝土、钢筋和钢板部件模型,并按照实际情况装配完成。其中混凝土、钢板单元均选择实体C3D8R单元;构成空心板梁内部钢筋骨架的纵向钢筋及箍筋单元则选线性单元中的桁架单元。需要注意的是,本文所建立的有限元模型根据《混凝土结构加固设计规范》GB50367-2013对于加固原理和材料使用形状的规定,即假定混凝土与加固材料之间结合紧密,无相对滑移。

数值模拟中的材料参数取值均与试验材料参数相一致,其中混凝土材料的本构关系如图5(a)所示,混凝土受压的应力应变关系基于混凝土结构设计规范GB50010-2010中的公式[17]。钢筋选用双线性等向强化模型,如图5(b)所示,混凝土、钢筋及钢板的材料参数取值如表6所示。



(a) 混凝土材料本构模型



(b) 钢筋本构模型

图 5 材料本构模型

Figure 5 Material Ontology Model

表 6 粘钢加固的材料属性

Table 6 Material properties of bonded steel reinforcement

材料名称	规格	弹性模量 (MPa)	抗压强度 (MPa)	泊松比
混凝土	C25	$2.8 \times 10^4$	19.75	0.2
钢筋	HRB335	$2.06 \times 10^5$	335	0.3
钢板	Q235	19.75	235	0.3

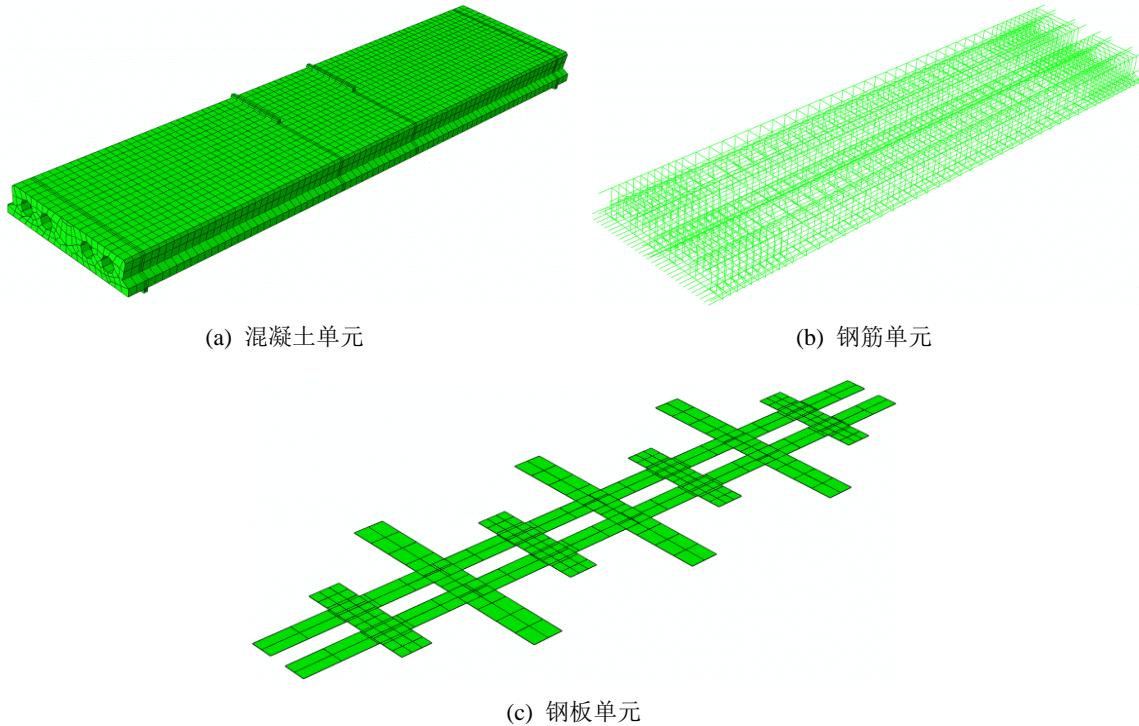


图 6 试验梁有限元模型

Figure 6 Test beam finite element model

试验中用到的试验梁为旧桥结构拆卸下的二次加固梁，旧梁并无结构性损伤，承载力满足要求，因此建模时可不考虑损伤的影响。原始纵筋为螺纹钢，可认为钢筋与混凝土之间的粘结良好。粘贴用的钢板表面经除锈打磨处理，并通过胶黏剂和锚栓共同作用将钢板与混凝土结合，也可认为钢板与混凝土之间的粘结良好。于是为了简化计算模型，在有限元分析时不考虑钢筋与混凝土以及钢板与混凝土之间的粘结滑移。为了保证有限元分析结果的准确性，采用的模型几何参数与实际试验梁的完全相同。几何建模如图7所示。

在有限元模过程中，加固试验梁有限元模型主要由3个独立的部件构成，分别为混凝土、钢筋骨架及粘贴用的钢板。其中钢筋与混凝土之间使用嵌入式区域约束连接方式来模拟钢筋与混凝土之间的粘结，钢板与混凝土之间的连接方式选用绑定约束，从而保证模拟钢板与混凝土之间有良好的粘接力。此外，为了

防止加载过程中支座因应力集中发生破坏，在构件模型的加载点及支座处设置垫块，垫块与构件之间的约束为绑定约束，同时将垫块的刚度系数设置为无穷大。

本文采用全模型进行 8m 空心板梁加固试验的有限元模拟, 约束支座处的平动自由度  $U_1=U_2=0$ , 释放  $U_3$ ; 转动自由度  $UR_2=UR_3=0$ , 释放  $UR_1$ 。约束加载端的平动自由度  $U_1=U_3=0$ , 加载过程通过位移控制, 即在试验梁加载垫块处上表面中间位置处沿 Y 轴负方向施加位移。模型网格划分采用结构化网络划分技术, 在加载垫块及支座处通过切割优化网格节点。

## 5.2 数值模拟结果分析

图 7 所示为京沈高速公路 8m 空心板梁加固性能研究跨中截面相应测点荷载-挠度试验结果与模拟结果的比较情况。其中需要说明的是, 模拟全过程按位移加载的方式加载, 截取加载点位移达到 20mm 时模拟试

验梁的荷载-挠度曲线，并将模拟值与试验值绘制成曲

线图进行比较。

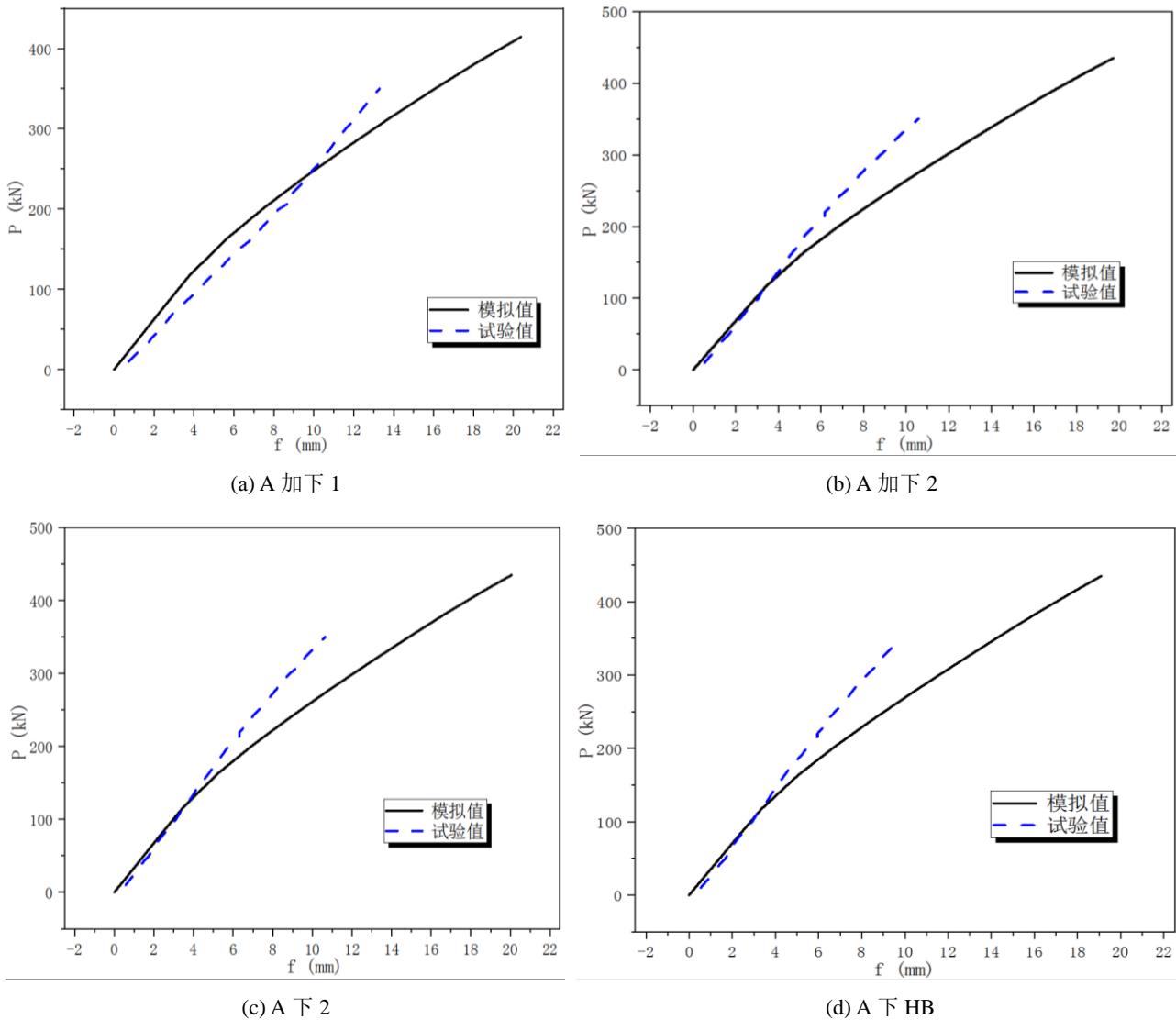


图 7 偏载工况荷载-挠度曲线

Figure 7 Partial load case load-deflection curve

由图 7 可见, 从荷载-挠度曲线的变化趋势来看挠度为 0-20mm 上升段模拟曲线与试验曲线的发展规律基本吻合。其中 0-20mm 部分上升段除测点 A 加下 1 外, 其余测点竖向挠度试验值较模拟值均偏小, 这可能是因为实际测点被粘贴的钢板覆盖, 选择靠近支座一侧紧贴钢板位置混凝土代替导致的; 而测点 A 加下 1 处起初挠度较大则可能是由于混凝土初始缺陷较严重导致的; 从荷载-挠度曲线不难看出, 正常使用阶段模拟梁和试验梁随荷载的变形基本相等, 刚度基本相同, 跨中各测点挠度随荷载呈线性增长; 因此采用 Abaqus 有限元分析可以较好地模拟正常使用阶段梁的受弯过程。

表 7 对模拟梁的正常使用状态下 1 号板、2 号板相应测点挠度值和比值与试验值进行了对比, 其中  $n$  代表模拟值,  $j$  代表计算值。

表 7 模拟值及计算值与试验结果比较

Table 7 Comparison of simulated and calculated values with test results

测点编号	$f_{n,k}$ (mm)	$f_{j,k}$ (mm)	$f_k$ (mm)	$f_{n,k} / f_k$	$f_{j,k} / f_k$
A 加下 1	13.77	13.73	13.29	1.04	1.03
A 加下 2	12.76	12.54	10.64	1.20	1.18
A 下 2	12.58	12.53	10.58	1.19	1.18
A 下 HB	12.25	12.03	9.79	1.25	1.23

由表 7 可见, 测点 A 加下 1 位置处竖向位移模拟值与试验值的比值为 1.04, 计算值与试验值比值为 1.03, 作为正常使用状态下的最大挠度误差较小; 随着荷载的增加, 跨中截面其余测点的竖向位移模拟值、计算值与试验值的比值均在 1.20 左右且沿横截面的变化趋势基本保持线性状态, 这说明前文提出的集中荷载作用下跨中截面横向挠度计算公式能够较为准确的反应试验梁跨中截面加载侧横向挠度的变化规律, 同时计算值的误差更小, 更契合实际工况下的变形情况。

表 8 试验梁荷载横向分布系数

Table 8 Test beam load lateral distribution coefficient

荷载横向分布系数	$m_1$	$m_2$
试验结果	0.549	0.451
铰接板法	0.522	0.478
模拟值	0.520	0.480

由表 8 各情况下试验梁 1、2 号板荷载横向分布系数大小可知, 模拟结果与参考铰接板法计算得到的计算结果基本吻合, 这不仅进一步验证了铰接板法可以用于粘贴钢板加固后的空心板梁, 同时还说明了该加固方法可达到有效恢复空心板梁间横向联系的目的。此外, 将试验梁挠度的模拟值与试验结果按铰接板法计算原理得到空心板的荷载横向分布系数; 计算结果表明, 模拟环境下荷载在试验梁间分配更均匀, 这是由于模拟时未考虑桥梁结构的初始损伤且材料性能理想化导致的。

## 6 结论

- (1) 为实现通过粘贴钢板法恢复桥梁结构空心板间横向联系的目的, 基于本文研究的京沈高速公路 8m 空心板梁工程背景和主要病害, 提出切实可行的粘贴钢板加固方案。试验表明, 横向粘贴加固钢板可以有效起到横向连接与传递力的作用, 空心板间荷载横向分布趋于均匀, 空心板间横向联系恢复效果显著, 加固效果理想。
- (2) 参考铰接板法计算得到桥梁设计阶段各块空心板的荷载横向分布系数, 计算结果表明, 空心板荷载横向分布系数分布区间为 0.257 至 0.312, 这说明桥梁在设计阶段充分考虑了横向联系条件, 空心板铰缝的横向连接作用在未发生病害时效果较好。

- (3) 以桥梁结构荷载横向分布系数理论为基础, 参考铰接板法计算偏载工况下试验梁荷载横向分布系数并分析试验过程中荷载在两块空心板间实际分配情况, 验证了铰接板法可以用于粘贴钢板加固后的空心板梁荷载横向分布系数计算。此外, 由试验结果可知, 荷载在空心板间近乎均匀分配, 空心板横向联系恢复效果较好。
- (4) 在不考虑钢板与混凝土之间因胶黏剂破坏而产生位移的前提下, 基于本文所研究的空心板梁工程加固方案通过 Abaqus 建立有限元模型, 将试验梁受弯各阶段挠度模拟值与试验结果比对后可认为有限元分析可以较好地模拟加固试验梁的受弯变化规律, 可以考虑通过数值模拟的方法来研究空心板梁加固的性能。

## 参考文献

- [1] Cai C S, Araugio, M Chaudoln. A, et al. Diaphragm effects of prestressed concrete girder bridges. Review and discussion [J]. Practice Periodical on Structural and Design and Construction 2007, 12 (3): 161-167.
- [2] Razapqr A. Ghani, Ghali Amin. Design of transverse reinforcement in flange of t-beams [J]. Journal of the American Concrete Institute 1986, 83 (4): 680-689.
- [3] Wird H. S. Traffic Generated Vibrations and Bridge Integrity [J]. Journal of Structural Engineering 1984, 110 (10): 2487-2489.
- [4] 李淑芬, 钱永久, 马艳峰. 荷载横向分布计算方法比较分析 [J]. 湖南工程学院学报(自然科学版), 2007 (01): 84-87.
- [5] 黄立浦, 谭海亮, 曹素功, 姜欢, 李聪. 装配式简支 T 形梁桥横向分布系数的研究 [J]. 长沙大学学报, 2011, 25 (05): 12-14.
- [6] 吕玉匣, 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 (01): 38-42.
- [7] 刘润阳. T 梁横隔板不同连接状态对主梁受力的影响 [J]. 铁道建筑, 2009 (03): 46-48.
- [8] 姚晓飞, 徐岳, 丁怡洁, 付迎春. 翼缘刚接混凝土 T 梁桥结构体系损伤评价研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32 (01): 169-173.
- [9] AASHTO LRFD Bridge Design Specifications [S]. Customary U.S. Units, 4th Edition, 2007.
- [10] Mabsout M E, Tarhini K M, Frederick GR. Finite Element Analysis of Steel Girder Highway Bridges [J]. Bridge Engineering, 1997, 2 (3): 83-87.

- [11] 王敏强, 薛飞, 张桓, 徐洪超. 铰接板梁桥载荷横向分布影响线计算方法 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2004 (04): 68-72.
- [12] 刘华, 叶见曙, 俞博, 李海生. 桥梁荷载横向分布系数计算方法 [J]. 交通运输工程学报, 2009, 9 (01): 62-66.
- [13] 邬晓光, 钱若霖, 苏佩. 考虑湿接缝刚度损伤的桥梁荷载横向分布计算方法 [J]. 铁道建筑, 2018, 58 (01): 93-95.
- [14] 魏保立, 邓苗毅. 损伤桥梁的荷载横向分布计算方法研究 [J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2015, 34 (01): 102-108.
- [15] 旷斌, 李院军. 考虑铰缝损伤的装配式空心板梁桥荷载横向分布系数计算方法 [J]. 世界桥梁, 2019, 47 (05): 74-78.
- [16] 姚玲森. 桥梁工程 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
- [17] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.

## 作者简介

### 何化南

1972 年生, 副教授, 研究方向为纤维混凝土结构等.  
E-mail: hehuanandl@163.com