

空心板梁横向分布特性与再利用策略研究

许 严¹, 朱建彬²

(1. 上海公路投资建设发展有限公司, 上海市 2003351; 2. 中交一公局集团有限公司, 北京市 100024)

摘 要: 针对高速公路改造项目中跨径20 m空心板梁拆除后再利用的问题, 提出了一种基于荷载横向分布系数校验的板梁再利用策略。首先, 基于铰接板梁理论, 得到设有企口铰缝的板梁跨中荷载横向分布系数理论值; 然后, 分别基于弹性地基梁理论和梁格理论建立有限元模型, 计算未设置铰缝的板梁跨中荷载横向分布系数。计算结果表明: 两种理论下荷载横向分布系数与铺装层厚度之间的关系具有高度一致性, 但梁格法计算得到的荷载横向分布系数略高于弹性地基梁理论的计算值; 在梁格理论下, 当混凝土铺装层厚度达到15 cm时, 未设置铰缝的板梁横向分布系数与设计值基本一致。后期可以通过合理设计混凝土铺装层厚度实现空心板梁的再利用。

关键词: 板梁再利用; 横向分布系数; 铰接板梁法; 弹性地基梁; 梁格理论

中图分类号: U443.3

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)06-0151-05

Study on Lateral Distribution Characteristics and Reuse Strategies of Hollow Slab Beams

XU Yan¹, ZHU Jianbin²

(1. Shanghai Highway Investment and Construction Development Co., Ltd., Shanghai 200335, China; 2. China Communications First Highway Group Co., Ltd., Beijing 100024, China)

Abstract: Aiming at the issue of reusing the 20 m-span hollow slab girders after demolition in the expressway reconstruction project, a reuse strategy of slab girders based on the verification of the transverse distribution coefficient of loads is proposed. Firstly, based on the hinged plate girder theory, the theoretical value of the transverse distribution coefficient of the mid-span load of the slab girder with tongue-and-groove hinge joints is obtained. Then, based on the elastic foundation beam theory and the beam grillage theory respectively, the transverse vehicle distribution coefficients of the mid-span load without the hinge joints are calculated. The calculation results show that the relationship between the transverse distribution coefficient of load and the thickness of the pavement layer under the two theories is completely consistent, but the transverse distribution coefficients of the load calculated by the beam grillage method is slightly larger than that calculated by the elastic foundation beam theory. Under the beam grillage theory, when the thickness of the pavement layer reaches 15 cm, the transverse distribution coefficient of the plate girder without hinge joints is basically consistent with the design value. In the later stage, the reuse of hollow slab girders can be achieved by rationally designing the thickness of the concrete pavement layer.

Keywords: reuse of plate girder; transverse distribution coefficient; hinged plate beam method; elastic foundation beam; beam grillage method

0 引言

随着国内基础设施建设的快速发展, 高速公路网络规模不断扩大。然而, 许多地区的高速公路已逐渐进入大规模养护与改造阶段, 其中桥梁结构的更新与升级成为亟待解决的重要问题。一方面, 桥梁改造过程中产生的大量废弃构件(如板梁)不仅加

剧了资源浪费与环境污染, 还对固体废弃物处理系统造成了巨大压力; 另一方面, 传统桥梁拆除方式中废弃板梁的利用率普遍较低, 通常采用直接填埋或破碎回收的方式, 未能充分发挥其原有的承载性能和材料价值。这种现象反映了当前基础设施全生命周期管理中资源利用效率不足的现实问题。因此, 如何科学合理地实现高速公路改造工程中的板梁再利用, 不仅是工程实践中的关键技术难题, 更是实现绿色、低碳、可持续发展的重要研究方向。

近年来, 针对废弃桥梁构件再利用的研究取得

收稿日期: 2025-03-04

作者简介: 许严(1986—), 男, 工学博士, 高级工程师, 从事交通基础设施建设管理工作。

了一定进展。例如,许多学者聚焦于板梁的材料再利用,提出通过破碎回收骨料或再生混凝土的方式实现资源回收^[1-3]。然而,这类方法的资源转化率较低,且忽视了板梁作为整体结构的潜在价值。与此同时,也有学者研究通过对废弃板梁进行结构加固与改造,将其重新应用于次要工程(如低等级公路、乡村桥梁)的建设中^[4-5]。尽管这些研究在一定程度上提升了废弃板梁的再利用率,但在实际工程中仍面临诸多技术瓶颈,尤其是在板梁再利用过程中铰缝处理的问题。一方面,新设铰缝需要植筋操作,这不仅可能对板梁结构造成损伤,还会增加施工难度和成本;另一方面,在不设置铰缝的情况下,如何实现荷载的有效横向分布仍是一个亟待解决的技术难题。这些问题表明,当前板梁再利用的研究尚缺乏系统性与全面性,特别是在理论支撑和工程实践方面仍存在不足。

本文以高速公路改造项目中拟拆除的跨径20 m的板梁为研究对象,探讨利用拆除板梁建设施工便桥的可行性,以降低施工成本并实现节能减排。基于实桥数据,本文建立了实体有限元模型和杆系有限元模型,计算并分析了设有铰缝的板梁跨中荷载横向分布系数,以及未设置铰缝、仅依靠铺装层连接的板梁荷载横向分布系数。研究结果可为板梁再利用及板梁桥加固提供理论参考和工程指导。

1 工程概况

某高速公路需拓宽改造,拟拆除既有上跨桥梁桥。现状桥梁跨径布置为11×22 m,桥宽13 m。上部结构为22 m预应力混凝土空心板梁,梁高90 cm,中梁宽99 cm,边梁宽135 cm。桥面铺装为8 cm钢筋混凝土+6 cm沥青混凝土。下部结构为柱式墩,钻孔灌注桩基础,立柱直径90 cm,每排3根,盖梁为倒T盖梁。既有桥梁的断面布置见图1。

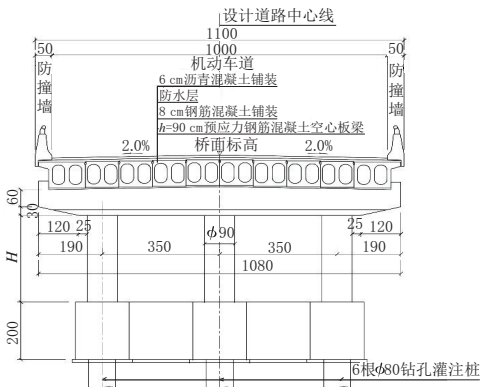


图1 桥梁断面布置图(单位:cm)

该桥建于2005年,设计荷载为城—B级,设计使用年限为100 a。根据2024年桥梁定期检测报告,该桥上部结构技术状况评定为2类,主要病害为47条铰缝存在不同程度的渗水,以及部分梁底出现局部析白现象。鉴于该桥整体技术状况较好,计划将拆除后的桥梁用于建设本项目的施工便桥,以实现资源的合理再利用。

2 铰接板理论下的荷载横向分布计算

对于采用现浇混凝土纵向企口缝连结的装配式板桥,板梁跨中荷载的横向分布规范推荐采用铰接板理论来计算^[6]。其计算步骤如下:首先,确定结构中每片梁的荷载横向分布系数影响线;其次,对每片梁施加设计车辆荷载并进行最不利布载;然后,计算每片梁在最不利加载条件下的荷载横向分布系数;最后,选取最大荷载横向分布系数作为该片梁的横向分布系数^[7]。理论上,每片梁的横向分布系数可能各不相同。然而,从设计的简化和高效性考虑,通常对边梁给予单独的横向分布系数,而其余中梁则统一采用相同的横向分布系数^[8]。

由于在采用铰接板法计算横向分布系数时需要求解大量联立方程组,计算过程较为复杂,因此,对于常规板梁桥,通常借助铰接板荷载横向分布影响线的计算用表来确定横向分布系数。具体步骤为:首先确定荷载横向分布影响线的竖向坐标值;接着进行最不利荷载布置;最后计算并得出荷载横向分布系数^[9]。

铰接板理论下的荷载横向分布影响线与板梁的截面特性及几何尺寸密切相关。通过引入刚度参数 γ ,可以快速求得各片梁横向分布影响线的竖标值。板梁的刚度参数 γ 可按照以下公式计算:

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

式中: γ 为刚度参数; I 为板梁的抗弯惯矩, m^4 ; I_T 为板梁的抗扭惯矩, m^4 ; b 为单片梁的宽度, m ; l 为单片梁的计算跨径, m 。

根据该桥的施工图纸,板梁的抗弯惯矩 $I = 4.686 \times 10^{-2} \text{ m}^4$,抗扭惯矩 $I_T = 7.497 \times 10^{-2} \text{ m}^4$,板宽 $b = 1 \text{ m}$,计算跨径 $l = 21.5 \text{ m}$,由此计算得刚度参数 $\gamma = 0.0078$ 。利用内插法,可以求得此刚度参数下各片板梁跨中荷载横向分布影响线的竖标 η ,在最不利布载条件下,得到横向分布系数 m_e ,具体计算结果详见表1。

表 1 铰接板理论下荷载横向分布系数计算表

梁号	γ	横向分布影响线竖标 η										m_e
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	0.00	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.313
	0.01	0.181	0.158	0.131	0.110	0.093	0.080	0.070	0.063	0.058	0.056	
	0.007 8	0.163	0.145	0.124	0.108	0.095	0.084	0.077	0.071	0.067	0.066	
2	0.00	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.305
	0.01	0.158	0.154	0.137	0.114	0.097	0.083	0.073	0.065	0.061	0.058	
	0.007 8	0.145	0.142	0.129	0.111	0.098	0.087	0.079	0.073	0.070	0.067	
3	0.00	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.310
	0.01	0.131	0.137	0.137	0.123	0.105	0.091	0.078	0.070	0.065	0.063	
	0.007 8	0.124	0.129	0.129	0.118	0.104	0.093	0.083	0.077	0.073	0.071	
4	0.00	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.308
	0.01	0.110	0.114	0.123	0.127	0.116	0.102	0.087	0.078	0.073	0.070	
	0.007 8	0.108	0.111	0.118	0.121	0.112	0.102	0.090	0.083	0.079	0.077	
5	0.00	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.304
	0.01	0.093	0.097	0.104	0.116	0.123	0.114	0.100	0.090	0.083	0.080	
	0.007 8	0.095	0.098	0.103	0.112	0.118	0.111	0.100	0.092	0.087	0.084	

根据文献[8],在设计阶段,边梁的荷载横向分布系数取为 0.349,中梁的荷载横向分布系数统一取为 0.303,该结果与铰接板理论下计算得到的荷载横向分布系数接近。

3 弹性地基梁理论下的荷载横向分布计算

3.1 桥面铺装的弹性地基比拟

基于弹性地基梁理论,本文将混凝土铺装层视为具有一定抗弯刚度的连续板,并建立了铺装层与板梁共同作用的弹性地基比拟模型,如图 2 所示。

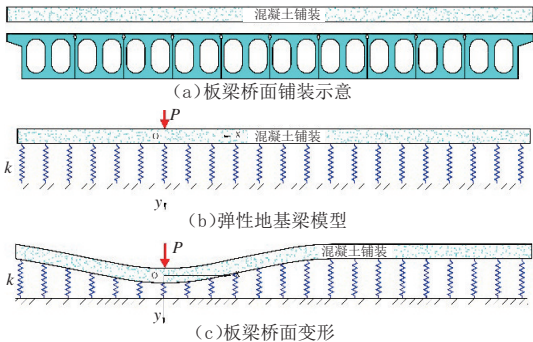


图 2 铺装-板梁弹性地基比拟模型

理论上,当混凝土铺装层和板梁的抗弯刚度均趋于无限大时,车辆荷载 P 通过铺装层传递至各片板梁的作用力应完全相等。然而,由于板梁的抗弯刚度存在差异,使得弹性地基(弹簧)的弹性系数 k 也不相同。同时,由于混凝土铺装层的弯曲刚度较小,车辆荷载作用在铺装层上会引起桥面铺装的不均匀变形,从而导致板梁对桥面铺装作用分布(地基反力)的不均匀性。根据文献[10],混凝土铺装层竖向挠度 y 、车辆荷载 P 和地基反力 $p(x)$ 的关系满足如

下方程:

$$E_c I_c \frac{d^4 y}{dx^4} + k y b_c = p(x) b_c \tag{2}$$

式中: E_c 为桥面铺装层的弹性模量; I_c 为桥面铺装层的抗弯惯矩; y 为桥面铺装层的竖向挠度; k 为地基的弹性系数; b_c 为混凝土桥面铺装的纵桥向宽度。

由于桥面铺装和板梁在承受荷载后的变形曲线相当复杂,难以找到合适的数学模式以全面准确地反映其变化规律,因此微分方程的求解也变得极为困难^[11]。目前,现有的弹性地基梁计算方法均存在不同程度的理想化假设,具有一定的局限性。为此,本文采用实体模型进行有限元分析,以求解板梁的横向分布系数。

3.2 有限元模型及其计算结果

本文采用 MIDAS FEA 有限元分析软件进行建模与分析。首先,构建了铺装层、空心板梁和钢筋的实体几何模型。随后,采用自由网格划分技术将铺装层和板梁划分为四面体单元,并将钢筋划分为植入式桁架单元。为了模拟简支空心板梁桥的边界条件,建立了节点单元以模拟支座中心位置,并将该节点与空心板底面支座范围内的节点进行弹性连接,其中竖向弹簧刚度设定为 1×10^7 kN/m,水平向弹簧刚度设定为 1×10^3 kN/m。网格划分后的有限元模型如图 3 所示。

根据设计资料,板梁和桥面铺装均采用 C40 混凝土。在有限元模型中,混凝土的本构关系采用总应变裂缝模型,其中受拉函数为常数函数,受压函数采用 Thorenfeldt 函数。钢筋的本构关系采用范梅塞

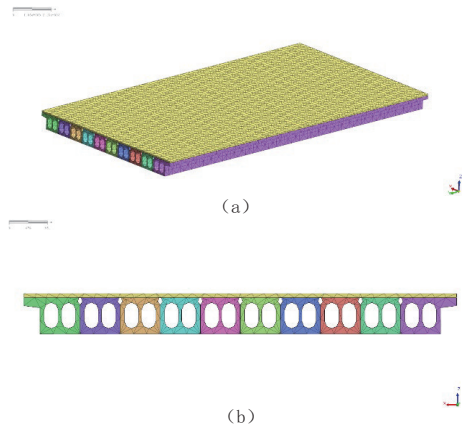


图3 实体模型

斯模型,考虑为理想的弹塑性本构。其余材料参数按照规范取值。

本文分别计算了不同铺装厚度(6~30 cm)下的板梁跨中荷载的横向分布系数,计算结果见表2。

表2 弹性地基拟下荷载横向分布系数计算表

铺装层厚度/ cm	梁号				
	1	2	3	4	5
6	0.540	0.364	0.423	0.441	0.420
8	0.459	0.318	0.333	0.328	0.325
10	0.392	0.295	0.310	0.306	0.305
12	0.400	0.286	0.295	0.294	0.293
15	0.415	0.290	0.281	0.276	0.275
20	0.440	0.296	0.273	0.269	0.268
25	0.482	0.292	0.262	0.258	0.257
30	0.496	0.288	0.243	0.241	0.240

由表2可知,荷载横向分布系数与桥面混凝土铺装层厚度呈现显著相关性。具体而言,对于3#~5#板梁,随着铺装层厚度的增加,横向分布系数逐渐减少并趋于稳定;对于2#板梁,当桥面板厚度达到10 cm后,横向分布系数基本保持稳定。

对比表1和表2可以看出,基于弹性地基梁理论计算得到的边梁荷载横向分布系数显著大于铰接板理论计算值。这一差异主要源于铰接板理论的基本假设,即各片梁或板的截面相同。然而,在实际工程中,由于边梁存在挑臂,其刚度明显大于中梁,导致边梁的荷载横向分布系数存在一定程度的偏小。当混凝土铺装厚度达到10 cm时,弹性地基梁理论计算得到的中梁荷载横向分布系数与铰接板理论计算值基本一致。

4 梁格理论下的荷载横向分布计算

4.1 梁格模型及其计算结果

为了与实体有限元模型进行对比,本文利用MIDAS Civil建立了梁格模型(见图4)。在模型中,

将承重构件(空心板梁)和传力构件(桥面板)分别考虑为杆系单元,其中桥面板的刚度计算时计入0.8倍的高度折减系数^[12]。桥面板和空心板梁间仅约束位移,其中竖向约束刚度取为1×10⁷ kN/m,水平向约束刚度取为1×10³ kN/m。

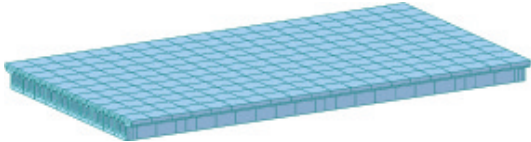


图4 梁格模型

基于梁格模型,计算了不同铺装厚度(6~30 cm)条件下板梁跨中荷载的横向分布系数,计算结果见表3。

表3 梁格法计算的荷载横向分布系数

铺装层厚度/ cm	梁号				
	1	2	3	4	5
6	0.560	0.401	0.468	0.466	0.465
8	0.509	0.336	0.365	0.363	0.362
10	0.469	0.298	0.331	0.327	0.326
12	0.480	0.300	0.318	0.314	0.313
15	0.495	0.304	0.304	0.299	0.298
20	0.517	0.306	0.289	0.283	0.282
25	0.535	0.304	0.274	0.270	0.269
30	0.544	0.297	0.256	0.253	0.252

对比表3和表2可知,在梁格理论下计算得到的荷载横向分布系数大于弹性地基梁理论的计算值,但两种理论下荷载横向分布系数与铺装层厚度之间的变化规律完全一致。在梁格理论下,当混凝土铺装厚度达到15 cm时,计算所得到的中梁荷载横向分布系数与铰接板理论计算值基本一致。

4.2 跨径、截面对荷载横向分布的影响

为了研究不同跨径和不同截面空心板梁在仅考虑混凝土铺装层作用时的荷载横向分布系数,建立了文献[8]中跨径分别为8、10、13、16 m的梁格模型,铺装层厚度统一取为20 cm。计算得到的荷载横向分布系数见表4。

表4 不同跨径板梁的荷载横向分布系数

计算跨径/m	梁号				
	1	2	3	4	5
8	0.476	0.288	0.325	0.322	0.321
10	0.505	0.297	0.319	0.311	0.310
13	0.508	0.299	0.321	0.314	0.313
16	0.499	0.288	0.314	0.307	0.306
20	0.517	0.306	0.289	0.283	0.282

由表4可知,在铺装层厚度恒定的条件下,不同跨径板梁的跨中荷载横向分布系数基本一致。其

中,边梁的荷载横向分布系数最大差异为 8%,中梁的荷载横向分布系数最大差异为 12%。

5 空心板梁再利用策略

根据前面的分析,通过合理设置混凝土铺装层厚度,可以实现与设置铰缝相近的荷载横向分布效果。考虑到板梁分缝处的铺装层在车轮反复碾压下容易开裂,进而导致铺装层刚度降低,从而影响车辆荷载的横向分布,建议铺装层厚度取值不低于 20 cm,并设计为双筋截面(即受拉区和受压区均配置横桥向受力钢筋),且受力主筋直径不小于 16 mm。

6 结 语

本文详细探讨利用混凝土桥面铺装实现荷载横向分布的可行性,研究成果旨在为后续高速公路改造项目中拆除板梁的再利用提供一种新的思路。同时,研究成果也可以为既有桥梁的加固改造工程提供借鉴与参考。

参考文献:

[1] 张胜,吕仁杰,黄岩.建筑废弃物在虹桥综合交通枢纽工程中的应用[J].城市道桥与防洪,2009(8):210-213;261.
[2] 易超,农宇.建筑垃圾再生黏土砖骨料用于水泥稳定碎石路面基层的可行性研究[J].西部交通科技,2023(9):35-37;45.
[3] 王立东.建筑固废在绕城高速公路建设领域中的应用[J].价值工程,2023,42(31):135-137.
[4] 仲秀丽.既有预应力空心板梁检评与再利用研究[D].合肥:合肥工业大学,2009.
[5] 程叙垚,熊欢,张腾.老旧桥梁改造再利用技术[J].施工技术(中英文),2022,51(15):25-28.
[6] JTG D60—2004,公路桥梁设计通用规范[S].
[7] 王永军.预制空心板梁桥横向接缝设计方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.
[8] DBJT08-101—2005,先张法预应力混凝土空心板(桥梁)[S].
[9] 姚玲森.桥梁工程[M].北京:人民交通出版社,2021.
[10] 黄义,何芳社.弹性地基上的梁、板、壳[M].北京:科学出版社,2005.
[11] 孙炳书,刘明文.关于弹性地基梁模型与计算方法[J].工业建筑,2014,44(增刊1):818-820.
[12] 王昊,李广奇,郭建民,等.基于广义梁格法的整体化铺装加固空心板桥荷载横向分布系数计算方法[J].水利与建筑工程学报,2024,22(3):149-157.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址:<http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:roadbridgeflood@163.com

