

装配式空心板梁桥铰缝数值分析与试验研究

黄卫国¹, 俞博^{2*}, 易汉斌²

(1.江西省公路工程检测中心, 江西 南昌 330100; 2.江西省长大桥隧研究设计院有限公司)

摘要: 针对装配式空心板梁桥铰缝的横向抗剪性能进行有限元分析和试验研究。首先, 根据空心板梁桥结构形式和受力特点, 引入有限条元计算理论, 推导装配式空心板梁桥的有限条元计算列式, 研究铰缝抗剪性能的计算方法, 研制相应的计算程序; 其次, 结合某装配式空心板梁桥实桥试验, 提出铰缝相对位移差来衡量铰缝的抗剪性能, 评判铰缝的横向传力性能。实桥试验及数值计算结果表明: 铰缝相对位移差为 $1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-2}$ mm 数量级, 是实际可测的, 能够用来区分铰缝传力性能的优劣; 相比商用软件无法单独处理装配式空心板梁桥的铰缝而言, 有限条计算理论能用较少单元进行空心板铰缝的横向抗剪性能分析, 计算效率高。

关键词: 空心板; 铰缝; 相对位移差; 有限条元法

1 前言

装配式空心板梁桥通过空心板间的铰接构造传递板间的竖向剪力, 并主要通过该剪力实现行车荷载的横向传递与分配。由于构造和施工等问题, 铰缝始终是空心板梁桥的薄弱环节, 当其强度不足以抵抗行车荷载产生的竖向剪力时, 铰缝混凝土在行车荷载作用下就会开裂。目前, 当装配式混凝土空心板梁桥竣工验收或出现病害时, 往往用铰接板法横向分布计算值和实测值进行比较, 以此来评定是否达到设计要求或需要维修加固。值得注意的是, 铰接板法简单地把铰缝简化成只传递剪力、不传递弯矩的铰, 是在空心板梁桥设计时采用的方法, 重点是解决板的设计, 而非铰缝, 很难直接地、有效地用于衡量铰缝的抗剪性能。美国 Huckelbridge 等提出用相对位移差来评价铰缝的抗剪性能, 并进行了实桥荷载试验, 实测表明, 某些铰缝相对位移差最大达到 0.5 mm, 这足以直接说明该铰缝已经发生损伤。铰缝是板之间的局部传力区域, 可以说, 相对位移差反映了铰缝剪切受力状态的直接量。铰缝的局部受力分析多采用 Ansys、Abaqus 等商用有限元软件来完成。由于空心板和铰缝的几何尺寸相差过大, 采用实体单元建模会导致单元过多, 计算代价较大; 且直接得到局部应力而非内力, 无法很好地用于分

析铰缝的横向剪切性能。目前有关装配式混凝土空心板梁桥铰缝的模拟的研究成果相对较少。

为此, 该文结合空心板梁桥结构形式和受力特点, 引入有限条元计算理论, 利用有限条元模拟空心板和铰缝, 并用铰缝相对位移差来衡量铰缝的横向剪切性能, 为铰缝横向抗剪性能提供有效的数值分析方法, 并通过装配式空心板梁桥实桥荷载试验进行验证。

2 有限条法及控制方程

装配式空心板梁桥在纵向是一典型的条带结构, 用有限条元模拟是适合的。在直角坐标系下, 有限条元的应变与位移关系为:

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial x}, \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}, X_x = -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, X_y = -\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}, X_{xy} = 2 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \quad (1)$$

有限条元(图1)位移插值函数为:

$$f = \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \sum_{m=1}^r \begin{Bmatrix} u_m \\ v_m \\ w_m \end{Bmatrix} = \sum_{m=1}^r N_m \delta_m \quad (2)$$

式中: u_m 、 v_m 、 w_m 分别为级数项数为 m 时 x 、 y 、 z 方向的位移; N_m 为正交函数系 $\left\{ \sin\left(\frac{m\pi}{L}y\right) \right\}$ 和

收稿日期: 2019-10-21(修改稿)

作者简介: 黄卫国, 男, 大学本科, 高级工程师。

* 通信作者: 俞博, 男, 博士, 教授级高工. E-mail: yubo_bridge@163.com

$\left\{\cos\left(\frac{m\pi}{L}y\right)\right\}$ 的函数; L 为装配式空心板梁桥纵向长度; b 为条元宽度。

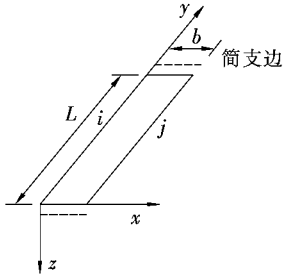


图1 有限条元

有限条元刚度矩阵为:

$$K_e = \int_V B^T D B dV = \int_V [B_1 \quad B_2 \cdots B_r]^T D [B_1 \quad B_2 \cdots B_r] dV$$

$$= \begin{bmatrix} K_{e11} & K_{e12} & \cdots & K_{e1r} \\ K_{e21} & K_{e22} & \cdots & K_{e2r} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ K_{er1} & K_{er2} & \cdots & K_{err} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: D 为弹性矩阵; 应变矩阵 B 由式(2)代入式(1)推求。式(3)中:

$$K_{e \quad mn} = \int_V B_m^T D B_n dV \quad (4)$$

利用谐函数 $Y_m = \sin(K_m y)$ 的正交性, 式(3)成为主对角块阵:

$$K_e = \text{diag} [K_{e11} \quad K_{e22} \cdots K_{err}] \quad (5)$$

则装配式空心板梁桥的第 m 项有限条控制方程为:

$$K_{mm} U_m = R_m \quad (6)$$

式中: $K_{mm} = \sum_e T^T K_{emm} T$, T 为整体坐标系到局部坐标系的旋转矩阵; U_m 和 R_m 分别为装配式空心板梁桥的第 m 项整体节线位移列阵和节线荷载列阵。则峰值位移列阵 U_m 关于级数 m 求和, 可得装配式空心板梁桥位移列阵 U :

$$U = \sum_{m=1}^r P_m U_m \quad (7)$$

式中: P_m 为第 m 级位移插值矩阵, 为正交函数系 $\left\{\sin\left(\frac{m\pi}{\alpha}\theta\right)\right\}$ 和 $\left\{\cos\left(\frac{m\pi}{\alpha}\theta\right)\right\}$ 的矩阵函数。

3 空心板梁桥数值模拟及实桥试验

某新建 3×20 m 装配式预应力混凝土简支空心板梁桥, 试验选取了其中一跨。试验桥计算跨径为 19.3 m, 桥宽为 13.5 m, 横向由 9 块中板和 2 块边板组成, 共有 10 道铰缝, 空心板宽 1.17 m, 高 0.9 m (图 2)。主梁混凝土为 C40。

试验采用两辆加载车进行加载, ①加载车前轴单个轮载 3.36 t, 中、后轴单个轮载 5.96 t, 总重 30.86 t; ②加载车前轴单个轮载 3.13 t, 中、后轴单个轮载 5.775 t, 总重 29.24 t; 试验进行了两个工况加载, 对应加载车尺寸及作用位置如图 3 所示。

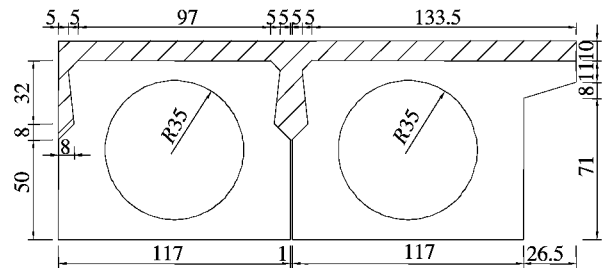
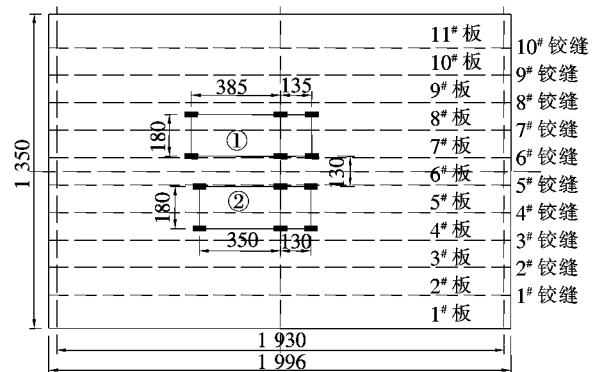
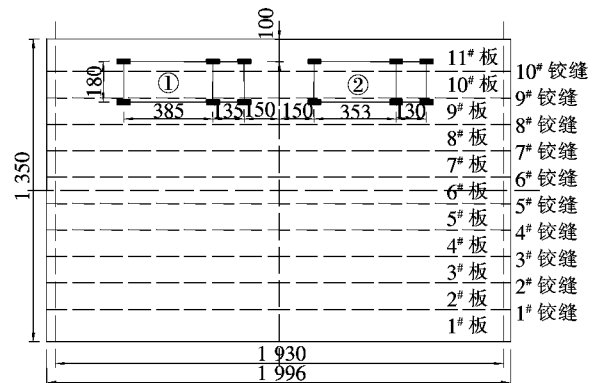


图2 试验桥空心板及铰缝(单位:cm)



(a) 工况 1



(b) 工况 2

图3 加载工况(单位:cm)

根据有限条控制方程编写有限条的计算程序。装配式空心板梁桥在纵向是一典型的条带结构,根据试验桥空心板和铰缝的几何尺寸和材料特性,横向划分为 21 个条带,其中空心板 11 条、铰缝 10 条。空心板单元编号见图 4。

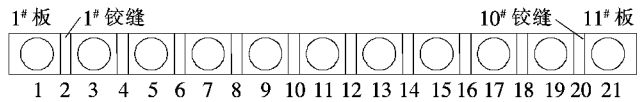


图 4 空心板的单元编号

在计算模型中,混凝土材料等级为 C40,取弹性模量 $E=3.25\times 10^4$ MPa,剪切模量 $G=E/2.3$ 。空心板条元和铰缝条元各向刚度计算值如下:

对于板条元,纵向弯曲刚度 $D_y=2.23\times 10^9$ N·m,横向弯曲刚度 $D_x=1.59\times 10^9$ N·m,扭转刚度 $D_{xy}=3.60\times 10^8$ N·m;假定铰缝完好,高度 h 为 0.5 m,铰缝条元的横向抗弯刚度为 $D_x=Eh^3/12$,其他各向刚度则同板条元。

梁格法的主要思路是将上部结构用一个等效的平面梁格或空间构架来模拟,在处理空心板梁桥时,纵向以板为单位考虑板的抗弯抗扭刚度,横向用虚拟横梁模拟,板间横梁连接(铰缝)只能简化成铰接和刚结两种。该文以加载工况 2 偏载为例,荷载试验中的横向分布与设计时采用的横向分布系数稍有不同,以每块板跨中横向中点的挠度和为 100%,每块板挠度与总挠度之比作为荷载横向分布,图 5 为空间梁格法模型

荷载横向分布计算值和实测值结果。

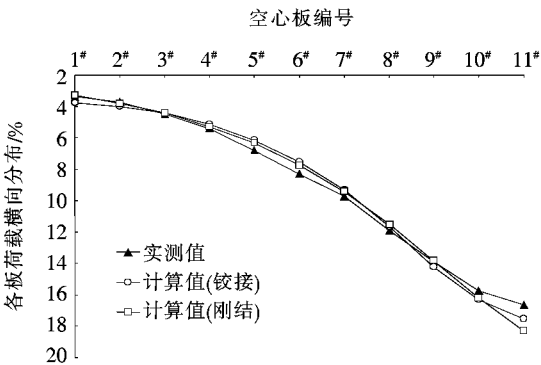


图 5 梁格法计算的空心板荷载横向分布比较

由图 5 可知:空间梁格法模型计算得到的荷载横向分布系数与实测值较为吻合,能够反映主梁的受力。但是,梁格法模型横梁(铰缝)采用铰接和刚结对主梁荷载横向分布影响很小。梁格法的主要问题在于横向联系(铰缝)只能简化成铰接与刚结,很难把铰缝作为一个独立的单元进行考虑。因此,主梁荷载横向分布很难直接用于评价铰缝受力性能,空间梁格法模型也很难模拟铰缝局部受力。

有限条计算模型计算得到各铰缝的相对位移差,并与实桥荷载试验值比较,见表 1。表中各铰缝相对位移差是编号小板侧的竖向位移减去编号大板侧的竖向位移,即相对位移正负号代表剪力的传递方向,“+”代表编号小板向编号大板传递,“-”则反之。

表 1 实桥 1 铰缝相对位移差

加载工况 1						加载工况 2					
铰缝 编号	相对位移/($\times 10^{-3}$ mm)		铰缝 编号	相对位移/($\times 10^{-3}$ mm)		铰缝 编号	相对位移/($\times 10^{-3}$ mm)		铰缝 编号	相对位移/($\times 10^{-3}$ mm)	
	计算值	试验值		计算值	试验值		计算值	试验值		计算值	试验值
1#	-5	-19	6#	3	5	1#	-5	-7	6#	-9	-20
2#	-6	-15	7#	5	-	2#	-5	-6	7#	-10	-
3#	-6	-28	8#	6	21	3#	-6	-6	8#	-10	-24
4#	-5	-13	9#	6	17	4#	-7	-15	9#	-10	-20
5#	-3	-5	10#	5	20	5#	-8	-12	10#	-11	-20

由表 1 可知:有限条程序计算得到铰缝相对位移差为 $1\times 10^{-3}\sim 1\times 10^{-2}$ mm 数量级,这个数量级的变形差是可以通过现有的试验仪器(百分表、千分表等)测得的。实桥荷载试验表明:实测值的数量级与计算值是一致的,但实测值较计算值大,显示铰缝存在一定的损伤。该文采用的有限条法程序中,铰缝作为独立的单元,其属性包括截面特性和材料属性,因此,可以

模拟不同的铰缝状态。

4 结语

该文针对装配式空心板梁桥,引入有限条元计算理论,利用有限条元模拟空心板和铰缝,并用铰缝相对位移差来衡量铰缝的横向剪切性能。数值计算及试验

基于响应面法的混凝土连续刚构桥模型修正

付波¹, 余毅², 王建凯³

(1.杭州都市高速公路有限公司, 浙江 杭州 310024; 2.中铁大桥科学研究院有限公司; 3.交通运输部公路科学研究院)

摘要:为建立适用于混凝土桥梁的高精度有限元分析模型,获取桥梁在荷载作用下的准确力学响应,提出了一种结合实桥试验的混凝土桥梁有限元模型修正方法。首先以一座混凝土连续刚构桥为工程背景建立了初始三维有限元模型。在考虑依托工程桥梁结构的特点和施工误差的基础上选取桥面铺装厚度、主梁弹模以及桥墩弹模3个影响因素作为待修正结构参数;根据实桥试验条件选择中跨跨中挠度、中跨跨中截面底板应力、墩顶截面顶板应力以及第1阶竖向振动频率4个覆盖了结构静、动力力学性能的指标作为目标函数;其次采用中心复合设计方法生成待修正参数的样本集,并导入初始有限元模型进行分析后获取对应的结构响应信息。最后采用响应面法建立了待修正结构参数和目标函数的二次多项式函数关系,得到了响应面方程。结合实桥试验结果对响应面方程进行了修正,得到了高精度的混凝土连续刚构桥有限元分析模型。结果表明修正后的有限元模型计算值与实桥试验结果吻合良好;采用二次多项式的响应面方程即使在不考虑交叉项时也能够较好地拟合待修正参数与结构静、动力响应之间的函数关系;修正后的有限元模型具有较高的精度,可真实反映桥梁实际结构的受力状态,为桥梁结构运营期间的健康监测、状态评估、损伤检测提供可靠的分析手段。

关键词:桥梁工程;有限元模型修正;响应面法;混凝土连续刚构桥;实桥试验

高精度的有限元模型在桥梁状态评估、损伤识别以及健康监测等领域具有重要的作用,但目前采用传统方法依据设计图纸建立的有限元模型的精度较低,且模型的材料属性、边界条件、结构尺寸的取值也会产

生一定的误差,使得有限元模型不能真实地反映桥梁结构的力学状态,导致有限元计算结果与真实情况存在差异,消除这个差异的过程称之为有限元模型的修正。

结果表明:该文提出的铰缝相对位移差为 $1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-2}$ mm数量级,是实际可测的。相比商用软件,有限条计算理论很好地符合了装配式空心板梁桥的条带特点,能用较少单元进行空心板铰缝的横向抗剪性能分析,计算效率高。另外,有限条元法可以把铰缝划分为单独的条带单元,有利于采用优化算法对铰缝损伤进行识别。

参考文献:

- [1] 胡肇滋.桥梁结构简化分析——荷载横向分布[M].北京:人民交通出版社,1996.
- [2] 宋宇锋,孙勇,杨立坡.空心板梁桥铰缝受力特性与破坏模式的试验与理论研究[J].中外公路,2018(2).
- [3] 张娟秀,刘军,叶见曙,等.空心板侧表面粗糙处理研究[J].中外公路,2013(6).

- [4] Arthur A. Huckelbridge Jr., Hassan El-Esnawi, Fred Moses. Shear Key Performance in Multi-Beam Box Girder Bridges[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 1995, 9(4): 271-285.
- [5] Deng L. Z., Michel G., Ales Z., et al. Nonlinear Flexural Behavior of Prestressed Concrete Girder Bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2001, 6(4): 276-284.
- [6] Barbosa A. F., Ribeiro G. O. Analysis of Reinforced Concrete Structures Using ANSYS Nonlinear Concrete Model[J]. Computational Mechanics: New Trends and Applications, Barcelona, Spain, 1998.
- [7] Y. K. Cheung. 结构分析的有限条元法[M].北京:人民交通出版社,1980.
- [8] Lezin S. Minsili, 夏禾, Mamba Mpele, 等. 混凝土板梁的有限条法简化分析(英文)[J]. 北京交通大学学报, 2009(6).

收稿日期:2019-04-11

作者简介:付波,男,工程师,E-mail: fubo1818@126.com