

板刚度损失对空心板桥荷载横向分布系数的影响

刘明慧

(上海市政交通设计研究院有限公司, 上海市 200030)

摘要: 基于损伤板对空心板桥荷载横向分布系数的影响,建立修正的铰接板法计算公式,并计算出单板受损的空心板桥的荷载横向分布系数,与实测横向分布系数和无损伤有限元模型计算出的横向分布系数进行对比。通过空心板桥有限元模型,模拟计算出抗弯、抗扭刚度不同、损伤程度不同及损伤板位不同对荷载横向分布系数的影响。

关键词: 损伤板; 空心板桥; 铰接板法; 荷载横向分布系数; 有限元

装配式空心板梁桥以其建筑高度低、自重轻、造价低廉、施工期短等优势在中国公路桥梁中占有很大的比例。将预制的空心板通过企口式铰联结成整体,荷载作用下通过铰传递剪力,达到分配荷载的作用。在荷载或者其他环境因素的反复作用下,将会对铰或主梁造成损伤,铰的损伤将会影响到桥梁整体的剪力传递,造成单板受力,主梁损伤使刚度下降,以上两种损伤都会影响到荷载在各个梁上的分配,即桥梁荷载横向分布系数的影响。目前国内外学者的研究多注重于铰缝破损对横向分布系数的影响,但对主梁刚度损伤的影响较少。该文通过实际工程试验与有限元理论分析相结合的办法,研究损伤板对荷载横向分布系数的影响。

1 铰接板法修正与验证

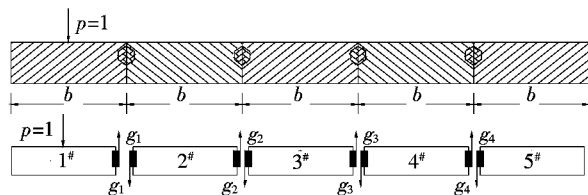
1.1 修正铰接板法

在文献[6]中,假定企口缝连接的装配式板在竖向荷载作用下铰缝只传递竖向剪力,即铰接板法的计算理论假定。借助挠度规律来确定荷载横向分布系数,即式(1)(1[#]为损伤板,2[#]为无损板),板号及荷载位置见图1。

$$\frac{\omega_1(x)}{\omega_2(x)} = \frac{M_1(x)}{M_2(x)} = \frac{Q_1(x)}{Q_2(x)} = \frac{p_1(x)}{p_2(x)} = C \quad (1)$$

式中: ω_i 为第*i*板的挠度; M_i 为第*i*块板的弯矩; Q_i 为第*i*块板铰缝所受的剪力; p_i 为第*i*块板所分配的荷载。

由式(1)可知,在桥上荷载作用下,任意两片梁分



注: g_i 为第*i*块铰缝的铰接力。

图1 铰接板法计算图示

配到的荷载比值、挠度比值及截面内力比值为常数。根据材料力学公式,对损伤1[#]板: $M_1(x) = -kEI\omega''$, $Q_1(x) = -kEI\omega'''$;未损伤的2[#]板: $M_2(x) = -EI\omega''$, $Q_2(x) = -EI\omega'''$ 。其中*k*为1[#]板抗弯惯性矩损失比。于是有下式:

$$\frac{\omega_1(x)}{\omega_2(x)} = \frac{k\omega''_1(x)}{\omega''_2(x)} = \frac{k\omega'''_1(x)}{\omega'''_2(x)} = \frac{p_1(x)}{p_2(x)} = C \quad (2)$$

为使荷载、挠度、内力三者变化规律协调统一,且根据正弦函数求导积分的性质,采用峰值 $p_0=1$ 的半波正弦荷载来研究荷载横向分布问题。半波正弦荷载为:

$$p_x = p_0 \sin\left(\frac{\pi x}{l}\right) \quad (3)$$

对于*n*块板组成的空心板桥,就有*n*-1个铰缝,每一个铰缝内都作用有一对大小相同、方向相反的正弦分布铰接力。欲求未知铰接力峰值 g_i ,实质是求解具有*n*-1个未知铰接力的超静定问题。该文以5块板为例,如图1所示的基本体系,利用两板之间的竖向位移值为零变形协调条件,根据力法列出4个正则方程:

$$\left. \begin{aligned} \delta_{11}g_1 + \delta_{12}g_2 + \delta_{13}g_3 + \delta_{14}g_4 + \delta_{1p} &= 0 \\ \delta_{21}g_1 + \delta_{22}g_2 + \delta_{23}g_3 + \delta_{24}g_4 + \delta_{2p} &= 0 \\ \delta_{31}g_1 + \delta_{32}g_2 + \delta_{33}g_3 + \delta_{34}g_4 + \delta_{3p} &= 0 \\ \delta_{41}g_1 + \delta_{42}g_2 + \delta_{43}g_3 + \delta_{44}g_4 + \delta_{4p} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: δ_{ij} 为铰缝 j 内作用单位正弦铰接力, 在铰接缝 i 处引起的竖向相对位移值; δ_{ip} 为外荷载 p 在铰缝处 i 引起的竖向位移。

为求解 δ_{ij} 和 δ_{ip} , 在任意板上作用单位正弦铰接力的典型情况, 如图 2 所示。对于横向近乎刚性的板, 偏心荷载可以用一个作用于中心的荷载和一个扭矩来代替。如图 3 所示, 设中心荷载板跨中产生的挠度为 ω , 扭矩引起的转角为 φ 。这样在左侧产生的总挠度为 $\omega + (b/2)\varphi$, 在右侧产生的挠度为 $\omega - (b/2)\varphi$ 。根据该原理就可以用 ω 和 φ 表示全部的 δ_{ij} 和 δ_{ip} 。

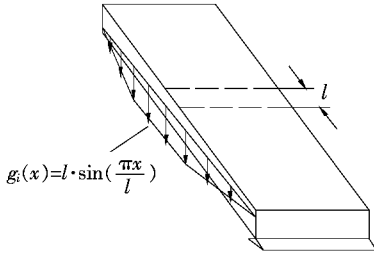


图 2 空心板作用单位正弦铰接力示意图

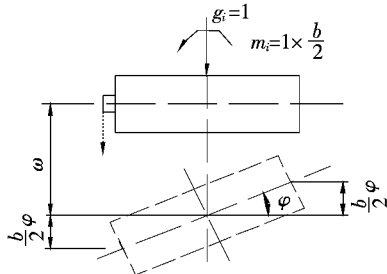


图 3 铰接力作用下单板变形示意图

对于损伤 1# 板:

$$\left\{ \begin{aligned} \delta_{11} &= 2\left(k\omega + \frac{b}{2}h\varphi\right) \\ \delta_{12} &= \delta_{21} = -\left(k\omega - \frac{b}{2}h\varphi\right) \\ \delta_{13} &= \delta_{14} = \delta_{31} = \delta_{41} = 0 \\ \delta_{1p} &= -k\omega \end{aligned} \right. \quad (5)$$

对于未损伤的板:

$$\left\{ \begin{aligned} \delta_{22} &= \delta_{33} = \delta_{44} = 2\left(\omega + \frac{b}{2}\varphi\right) \\ \delta_{23} &= \delta_{34} = \delta_{32} = \delta_{43} = -\left(\omega - \frac{b}{2}\varphi\right) \\ \delta_{24} &= \delta_{42} = 0 \\ \delta_{2p} &= \delta_{3p} = \delta_{4p} = 0 \end{aligned} \right. \quad (6)$$

上述系数中: k 、 h 分别为抗弯惯性矩损失比和抗扭惯性矩损失比。将上述系数代入式(4)中, 并使全式

除以 ω , 另设 $\gamma_1 = \frac{b}{2} \frac{h\varphi}{k\omega}$, $\gamma = \frac{b}{2} \frac{\varphi}{\omega}$ 。得到正则方程的简化形式:

$$\left\{ \begin{aligned} 2(1+\gamma_1)g_1 - (1-\gamma_1)g_2 &= 1 \\ -(1-\gamma_1)g_1 + 2(1+\gamma)g_2 - (1-\gamma)g_3 &= 0 \\ -(1-\gamma)g_2 + 2(1+\gamma)g_3 - (1-\gamma)g_4 &= 0 \\ -(1-\gamma)g_3 + 2(1+\gamma)g_4 &= 0 \end{aligned} \right. \quad (7)$$

根据文献[6]附录 I 可知: $\gamma_1 = \frac{\pi^2 kEI}{4hGI_T} \left(\frac{b}{l}\right)^2$, $\gamma =$

$\frac{\pi^2 EI}{4GI_T} \left(\frac{b}{l}\right)^2$, 除了确定刚度参数 γ_1 和 γ 外, 板的块数 n 和荷载位置确定后就可以得到各个铰缝的铰缝力。从而确定出各板分配的荷载。绘制各板横向影响线, 通过布置最不利车道荷载, 求出各板横向分布影响线。

1.2 损伤空心板桥荷载横向分布系数测定

为验证以上修正计算式的正确性, 拟通过实测损伤空心板桥数值与计算值进行对比。某桥上部构造为 2 孔 8 m 简支钢筋混凝土空心板, 设计荷载等级为公路 II 级, 设计时板与板之间按铰接计算。空心板中板抗弯惯性矩 $I = 0.00592 \text{ m}^4$ 、中板抗扭惯性矩 $I_T = 0.016986 \text{ m}^4$ 、边板抗弯惯性矩 $I = 0.00604 \text{ m}^4$ 、边板抗扭惯性矩 $I_T = 0.017025 \text{ m}^4$ 。该桥面宽度为净 6.0 m + 2 × 0.5 m 防撞护栏, 全宽 7.0 m。图 4 为空心板桥截面布置示意图。

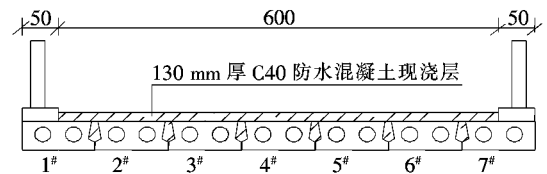


图 4 空心板桥截面布置示意图(单位: cm)

由于施工质量控制不严格, 在通车后一孔 1# 板跨中出现受力裂缝, 裂缝度为接近 0.02 mm 的极限裂缝宽度, 处于带裂缝工作阶段, 因此用开裂抗弯惯性矩代入式(7), 计算损伤板桥的荷载横向分布系数。通过静载试验求取在荷载作用下各板的挠度变化, 并根据挠度的分配情况得到该损伤板桥的荷载横向分布系数。加载采用弯矩影响线加载, 求得最大的挠度变化值。

为求得损伤空心板桥荷载横向分布系数与设计值的差距, 通过 Midas/Civil 进行模拟计算, 计算出未损伤空心板桥静载试验跨中挠度值, 并根据式(1)求得各

板的横向分布系数。图 5 为有限元模型,采用单点加载方式模拟车辆加载。根据测量各板跨中的挠度值,由式(1)计算出各梁的横向分布系数。图 6 为有限元计算荷载横向分布系数值与修正公式计算值及实测值对比图。

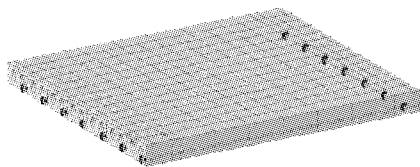


图 5 空心板桥有限元模型图

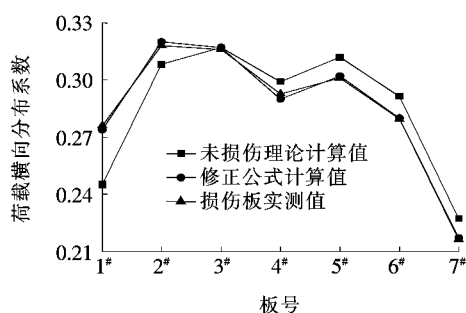


图 6 有限元、公式计算、实测分布系数对比

由图 6 可知:空心板结构完好时,桥梁横向分布系数最大的板为 3# 板,且呈两侧对称分布。在边板损伤时,即 1# 板结构刚度下降时,荷载横向分布系数最大值为 2# 板,且原有结构设计时的对称分布被破坏,荷载向损伤板一侧偏移。修正公式计算值与实测值变化趋势一致,且在峰值 2# 板处计算值略大于实测值,证明修正公式对损伤板的验算是偏于安全的。梁损伤前后,损伤板最大荷载横向分布系数最大值大于未损伤板的最大值,这一现象与结构设计时的控制值相差较大,将会造成结构运行的不安全。

2 结构刚度损失对荷载横向分布系数的影响

结构设计计算主梁内力时,荷载横向分布系数起

至关重要的作用。根据结构形式,绘制出每一片梁的荷载横向影响线,然后横向布载最不利的车道,求得每一片梁的最大横向分布系数,最终利用最不利的横向分布系数作为内力计算的控制值。

根据该工程实例中损伤板对横向分布系数的影响可知:当某些板的刚度损失时会引起结构对荷载的重新分布,重新分配后的荷载分布系数将会超过控制设计的横向分布系数,将导致截面开裂。当处于带裂缝工作阶段的桥梁承载能力不足时,将造成安全事故。该文通过有限元模拟计算,研究抗弯刚度 I 和抗扭刚度 I_T 损伤程度及不同的梁位损伤对荷载横向分布系数的影响。有限元模拟刚度损失时,抗剪刚度和抗弯刚度损失采用全板损失。

2.1 边板刚度损失对分布系数的影响

钢筋混凝土桥梁在荷载作用下,将会导致桥梁截面开裂,使桥梁处于带裂缝工作阶段,而该阶段在桥梁服役的时间中占绝大多数时间。由于混凝土收缩徐变、光照温差以及冻胀等原因,混凝土空心板桥也会产生纵向裂缝。不论是竖向截面开裂还是纵向开裂,这都会影响结构的刚度。通常结构刚度损失 30% 左右时,结构将会进入破坏阶段。该文拟用 1# 板在该损伤范围内研究不同刚度损失对横向分布系数的影响。图 7 为空心板桥抗弯刚度下降对横向分布系数的影响(板号示意图见图 4)。表 1 为空心板桥抗扭刚度同时损失对横向分布系数的影响。

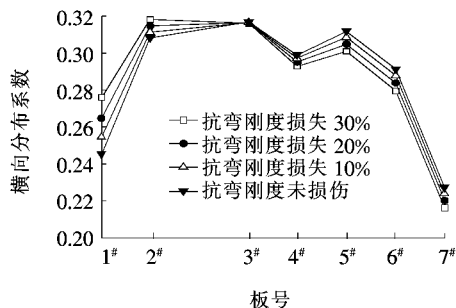


图 7 抗弯刚度损失对横向分布系数的影响

表 1 抗扭刚度损失对横向分布系数的影响

损伤度	不同板号的分布系数						
	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#
损伤 30%	0.243	0.310	0.317	0.299	0.312	0.291	0.227
损伤 20%	0.244	0.309	0.317	0.299	0.312	0.291	0.227
损伤 10%	0.245	0.309	0.317	0.299	0.312	0.291	0.227
未损伤板桥	0.245	0.308	0.317	0.299	0.312	0.291	0.227

由图 7 可知:当 1# 板截面开裂即抗弯刚度下降时,1#、2# 板的荷载横向分布系数随抗弯刚度的损失程度加深逐渐增大,且大于未损伤板桥的横向分布系数,4#、5#、6#、7# 板均向小于设计横向分布系数方向减小,3# 板基本保持不变。这说明荷载横向分配时向损伤板方向偏移。由表 1 可以得出:随着板抗扭刚度降低,1# 板的横向分布系数处于下降趋势,2# 板呈上升趋势,但是变化值很小,几乎可以忽略不计,而其他板的横向分布系数不变。这说明抗扭刚度损失对荷载横向分布系数向未损伤板一侧偏移。板抗弯刚度、抗扭刚度损失对横向分布系数的影响与计算公式中 γ_1 的变化规律吻合。

2.2 不同损伤板位对分布系数的影响

桥梁结构在荷载、外界恶劣环境等不利条件作用下,必将造成桥梁结构的损伤。而损伤的位置是随机

出现的,不同的损伤位置都会影响桥梁的整体受力,该文拟用有限元模型模拟计算出在抗弯刚度及抗扭刚度损失 30% 时,不同的损伤梁位对横向分布系数的影响。图 8 为单板损伤时,不同损伤位置对横向分布系数的影响。表 2 为多片梁损伤时,不同损伤位置对横向分布系数的影响。

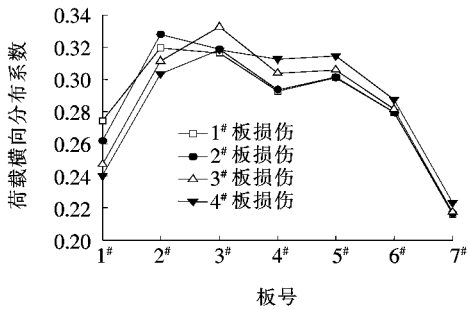


图 8 单板损伤时不同板位对分布系数的影响

表 2 多板刚度损失对横向分布系数的影响

损伤板号	不同板号的分布系数						
	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#
1#、2#	0.294	0.341	0.318	0.287	0.289	0.266	0.204
1#、3#	0.277	0.323	0.332	0.298	0.295	0.270	0.206
1#、4#	0.269	0.315	0.318	0.306	0.304	0.276	0.212
2#、3#	0.264	0.331	0.335	0.298	0.295	0.269	0.207
2#、4#	0.257	0.323	0.321	0.307	0.304	0.276	0.213
3#、4#	0.242	0.306	0.335	0.318	0.308	0.277	0.213
1#、2#、3#	0.296	0.345	0.334	0.291	0.283	0.256	0.194
1#、3#、4#	0.272	0.318	0.334	0.311	0.297	0.266	0.202
2#、3#、4#	0.259	0.326	0.337	0.312	0.297	0.265	0.203
1#、2#、3#、4#	0.291	0.339	0.337	0.305	0.285	0.253	0.190

由图 8 可知:单板的损伤程度相同时,不同的损伤板位对横向分布系数的影响程度不同。在各个计算工况的分布系数峰值中,3# 板的峰值最大。在 2#、3#、4# 板单板损伤时,随着损伤板位距 1# 板的距离减小,1# 板的横向分布系数逐渐提高。这说明损伤板对邻近板的影响大于较远端的板。由表 2 可知:在 3 块板同时损伤时,横向分布的峰值多集中在 2#、3# 板上,表明 2#、3# 板对板损伤的影响最敏感。在各种计算工况中,在 1#、2#、3# 板同时损伤时,产生了最大的横向分布系数 0.345,而设计时最大横向分布系数为 0.308,超出 12%。

3 结论

利用建立的修正铰接板法计算公式,计算实际损

伤空心板桥的横向分布系数并与实测值对比,并通过有限元模型分析损伤板对荷载横向分布系数的影响,得出如下结论:

- (1) 通过实测损伤板桥的横向分布系数验证了修正铰接板法计算公式,横向分布系数的准确性。
- (2) 单板损伤时,荷载横向分布系数随抗弯刚度的损失程度加深而逐渐增大,且荷载分布系数峰值向损伤板方向偏移。抗扭刚度损失对横向分布系数的影响较小。
- (3) 损伤板在不同板位时,对横向分布系数的影响较大,且损伤板对邻近板的影响大于较远端的板。
- (4) 钢筋混凝土板桥大部分时间处于带裂缝工作阶段,损伤截面对荷载横向分布系数有较大的影响,这一影响超过了原设计的横向分布系数,将会导致结构

正交异性钢桥面铺装有限元分析方法的比较

宋君超¹, 周艳^{2*}

(1. 济南黄河路桥建设集团有限公司, 山东 济南 250014; 2. 山东建筑大学 道路与交通工程山东省高校重点实验室)

摘要: 目前用于正交异性钢桥面铺装结构受力研究的有限元方法有5种:混合单元法、子模型法、预应力简化模型法、整体模型法、局部简化模型法。研究建立相同条件的5种有限元模型,应用单梁模型对混合单元模型的正确性进行了验证,并详细分析了施加横向和纵向预应力的对桥面铺装各向受力的影响。将各模型计算得到的应力应变结果与整体模型法计算得到的应力应变进行比较,最终得出混合单元法所得的应力应变最接近整体模型法所得结果。

关键词: 钢桥面铺装;混合单元法;预应力简化模型法;整体模型法;简化模型法

1 引言

针对正交异性钢桥面板结构铺装的问题,研究人员大多运用有限元分析法。日本学者采用有限单元法,通过8节点空间等参单元分析了带加劲肋的桥面顶板,得出了车辆荷载作用下桥面铺装表面出现最大横向拉应力的位置,并且从控制铺装层受拉破坏的角度提出了加劲肋间距、横梁间距、钢板厚度等参数的推荐值。欧美的学者也曾对桥面板进行了有限元分析, Gunther 等从钢桥面板厚度、主梁附近补强加劲肋、沥青铺装层的材料特性及铺装层强度等方面探讨了影响铺装层耐久性的因素。

中国正交异性钢桥面铺装的受力分析数值模型有整体模型法、多尺度模型法(混合单元法)、子模型法、简化模型法等。

混合单元法多用于土木工程和桥梁工程力学计算中,极少用于桥面铺装的应力分析中。此法是将杆系模型与梁板壳模型相结合的一种有限元方法,对与研究相关部位及对结果感兴趣的构件用板壳单元模拟,其他部位用梁单元模型。

子模型法一般采用梁单元对整体模型进行计算分析,然后用板壳单元建立需详细分析的区域子模型,并划分较细的单元网格,子模型的边界条件由整体模型相应位置的节点位移或插值确定。

预应力模型法在局部桥面系计算模型中,将整体

的不安全。

参考文献:

- [1] 王亚军,于坤,蔡仕强.公路预应力空心板梁桥单梁试验及评定[J].桥梁建设,2011(5).
- [2] 张志.空心板铰缝破坏机理及防治措施研究[J].山西建筑,2009(35).
- [3] 成琛,沈成武,许亮.用铰接板(梁)法计算有损伤桥梁的横向分布系数[J].武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2004(2).
- [4] 潘桂梅,李平杰,马牛静.旧铰接板梁桥横向分布系数现

场试验研究[J].中外公路,2006(2).

- [5] 冷艳玲,张劲泉,程寿山,等.装配式混凝土空心板梁桥单板受力问题的数值解析[J].公路交通科技,2013(5).
- [6] 姚玲森.桥梁工程[M].2版.北京:人民交通出版社,2009.
- [7] 贾艳敏,高力.结构设计原理[M].北京:人民交通出版社,2008.
- [8] 肖玉辉,沈立宏.混凝土桥梁病害成因分析及对策研究[J].中外公路,2004(1).
- [9] 李忠献,陈宇,李宁.基于材料损伤的钢筋混凝土构件损伤模型[J].工程力学,2014(6).

收稿日期:2018-04-08

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(编号:51408339)

作者简介:宋君超,男,高级工程师.E-mail:sjczy@126.com

* 通信作者:周艳,女,副教授.E-mail:zhouyan2002100@sdjzu.edu.cn