

基于大数据的装配式小箱梁桥病害发展规律及原因分析

杜元

(江苏高速公路工程养护技术有限公司, 江苏 南京 211106)

摘要:随着桥梁使用年限的增加,由于设计、施工、运营荷载、材料老化等方面的影响,绝大部分桥梁都出现了不同程度的劣化现象,桥梁养护形势日趋严峻。该文以装配式小箱梁桥为例,利用 Ansys 有限元程序、大数据以及现场检测等手段,分析桥梁病害的发展规律及病害产生的原因,得出结论:① 现阶段,装配式小箱梁桥主要病害以腹板竖向裂缝为主,底板横向裂缝次之,且在各孔间分布差异较大,绝大多数分布于中间几孔,而靠近边孔的次边孔病害较为严重;② 箱梁的开裂与采用的设计标准、计算跨径等因素相关;③ 重车(车辆荷载总重和轴载)的分布情况对箱梁开裂起到了决定性影响,箱梁开裂之后随着车辆荷载轴载次数的不断累积,裂缝数量呈现快速增长趋势。

关键词: 装配式小箱梁桥; 病害; 养护; 大数据

装配式小箱梁桥指采用预制单片预应力混凝土小箱梁,现场拼装、现场浇筑预制小箱梁翼缘间的连接缝(湿接缝),与翼缘形成一体的装配式桥梁结构。与装配式后张法预应力混凝土 T 梁相比,具有建筑高度低、抗扭刚度大、活载横向分配均匀等受力性能优点,可显著节约钢材,混凝土用量也有所减少。相同桥梁横断面组合箱梁较 T 梁片数少,施工速度快、现场连接操作条件好,同时,组合箱梁横向稳定性好,运输安装较为安全。自 20 世纪 90 年代组合箱梁首次在中国高速公路应用以来,随着高速公路发展,装配式小箱梁桥在中国应用越来越少,目前 25~40 m 跨径组合箱梁是高速公路桥梁中应用比例最高的桥型结构。

随着通车年限增长,一些早期建设的装配式小箱梁桥出现了不同程度的病害。陈策^[1]根据江苏省超过 4 000 km 10 年的检测大数据分析得到,组合箱梁的主要病害是梁体裂缝,各类裂缝中腹板竖向裂缝发生较多,而底板纵向裂缝和翼板横向裂缝较少,裂缝长度则多集中在 1~5 m,裂缝宽度则主要集中在 0.1~0.15 mm;李建^[2]对山西省公路小箱梁结构分布进行了充分调研,考虑不同地域气候特点、不同建设年代及不同荷载等特点,选取了 18 座代表性的病害桥梁进行分析,发现腹板和底板纵向开裂是小箱梁普遍存在的病害,病害的发生与运营年限、荷载水平相关性较小,与施工偏差、养护程度、温度效应及结构本身构件偏薄等因素有关;杜建^[3]以安徽省某高速公路桥梁定期检测

结果为背景,对不同桥型结构的桥梁常见病害进行统计分析,得到组合箱梁主要病害为:底板纵向裂缝且伴有白色析出物,混凝土锈胀露筋、剥落掉角,梁间湿接缝横向裂缝且伴有白色析出物;陈泽^[4]对桥梁运营中出现的小箱梁主梁出现结构性裂缝病害归纳汇总和成因分析,得到 JTJ 021—89《公路桥涵设计通用规范》与 JTG D60—2004《公路桥涵设计通用规范》在梁截面温度梯度、汽车冲击系数等两种计算模式的区别导致结构实际应力要比原设计状态下的应力值大;薛达等^[5]对某 25 m 小箱梁桥原结构设计状态进行结构验算,并结合该高速公路超载现状,考虑 1.3 倍活载超载系数,得出梁体下缘拉应力超限,导致梁底横向开裂、腹板竖向开裂;吴清^[6]分析了广州地区部分小箱梁的病害情况,小箱梁腹板开裂一般发生在梁端至 1/4 跨处,主要是因为设计考虑不周和施工不周等原因导致腹板厚度减弱;张勇等^[7]对某高速公路 25 m 小箱梁桥进行动静载试验发现底板中部出现不连续纵向裂缝,并结合箱梁预制施工情况和理论计算分析病害产生的原因及对结构受力影响,得出预应力管道定位不准、混凝土纵向受力的泊松效应、混凝土收缩是重要影响因素。

综上,现阶段的研究主要集中在较少数量的小箱梁桥的病害特征描述及简单的病害产生原因分析,对病害的发展规律研究较少。因此,该文将基于大数据对装配式小箱梁桥的病害发展规律及其病害原因进行

深度剖析,从而为装配式小箱梁桥预防性养护决策研究提供依据,也为类似的桥梁病害研究提供思路。

1 主梁裂缝发展规律

基于大数据的装配式小箱梁桥病害发展规律研究,对 8 条典型的高速公路桥梁历年定期检查报告原始记录表,统计分析病害发生和发展的规律,其中箱梁裂缝近 40 000 条。

裂缝发展规律包含几方面内容:① 裂缝早期出现的时间及位置;② 随通车年限增长,裂缝位置、数量、裂缝区宽度等特征的变化。按照与通车年限及空间位置的关系,分为空间规律和时间规律。

1.1 理论计算

基于 Ansys 建立某装配式小箱梁桥有限元模型,如图 1 所示。

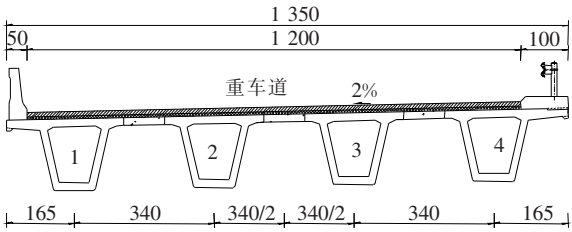


图 1 装配式小箱梁横断面布置图(单位:cm)

预应力混凝土小箱梁、湿接缝及现浇层采用 Sol-id45 实体单元模拟;预应力钢绞线采用 Link8 单元模拟,并采用施加初应变的方式模拟预加力;沥青混凝土桥面铺装层仅考虑其质量效应,忽略其刚度贡献,采用 Mass21 单元对沥青铺装层的质量分布进行模拟;支座采用 Combine14 弹簧单元模拟。

在网格划分方案方面,为保证计算精度和满足几何体拓扑关系要求,先建立全桥几何模型,并人工切分为若干规则几何体,采用映射网格对全桥进行网格划分,实体单元形状均为六面体。最终,全桥有限元模型共计 2 182 509 个节点,2 204 254 个单元。

桥梁跨径组成为 6×30 m,桥梁净宽 12 m,铺装层为 5 cm 厚调平混凝土+9 cm 厚沥青混凝土。梁体编号按照从道路外侧往中间分隔带依次编号为 1[#]梁、2[#]梁、3[#]梁、4[#]梁,为研究实际车道荷载作用下梁体空间受力情况,横桥向在实际重车道位置施加车道荷载,纵向上在第 1、3、5 孔施加,以获得第 1、3 孔的最不利应力情况。计算结果如表 1 所示,分析发现实际车道荷载作用下,中间孔的应力增量大于边孔,压应力储

备小于边孔;边、中孔中,重车道下的 2[#]、3[#]梁和外边梁 1[#]梁受力最不利,其中 2[#]梁最不利。

表 1 应力计算结果

部位	恒载/MPa	车道荷载/MPa	增量/MPa
1 [#] 孔 1 [#] 梁	-4.85	-4.476	0.370
1 [#] 孔 2 [#] 梁	-4.80	-4.400	0.400
1 [#] 孔 3 [#] 梁	-4.66	-4.340	0.320
1 [#] 孔 4 [#] 梁	-4.39	-4.210	0.180
3 [#] 孔 1 [#] 梁	-4.33	-3.735	0.595
3 [#] 孔 2 [#] 梁	-4.03	-3.400	0.630
3 [#] 孔 3 [#] 梁	-4.29	-3.660	0.630
3 [#] 孔 4 [#] 梁	-4.86	-4.310	0.550

1.2 空间规律

1.2.1 联内分布规律

以多孔组成的联为单位,统计分析病害在联内的出现及发展规律。从数据集中筛选出现裂缝(底板横向裂缝、腹板竖向裂缝)的联,区分 4 孔联、5 孔联、6 孔联及 7 孔联,并梳理出历年检查首次发现病害的联(称为首次病害联)以及其后历次检查的发展情况,称为二次病害联、三次病害联,等。篇幅有限,仅给出 6 孔联各次检查裂缝分布统计如表 2 所示。

由表 2 可知:① 纵向裂缝在各孔间分布无明显差异,在边孔和中孔均有存在,且数量差异不大;② 腹板竖向裂缝及底板横向裂缝在各孔间分布差异较大,绝大部分都存在于中间几孔,从 1[#]、2[#]、3[#]孔或者 4[#]、5[#]、6[#]孔来看,边孔病害数量仅占 2%,且中间几孔中靠近边孔的次边孔病害较为严重;③ 首次病害 6 孔联两个边孔病害数量占比为 2.9%,到四次病害时病害数量占比已经达到 10.8%,说明随着病害的发展,边孔病害数量占比提高。

1.2.2 孔内分布规律

筛选所有病害孔,梳理历年检查中首次出现病害的桥孔,以及其后历次检查的病害发展情况,分析发现各路段装配式小箱梁桥孔内病害发展规律相近。

(1) 首次病害孔。统计所有裂缝在孔跨内的相对位置,以无量纲参数 α 表示,“0”为梁的一端,“1”为梁的另一端。此外,定义梁的裂缝区宽度为梁体中纵向距离最远的两个竖向或横向裂缝间的距离,则第 i 片梁的裂缝区宽度计算公式为 $(\alpha_{\max} - \alpha_{\min})_i \cdot L$ 。定义孔的裂缝区宽度为各梁裂缝区宽度的最大值,计算公式为 $|(\alpha_{\max} - \alpha_{\min})_i|_{\max} \cdot L$,定义裂缝区相对宽度为

表2 6孔联各次检查裂缝分布统计

孔号	首次检查			二次检查			三次检查			四次检查		
	底板横 向裂 缝/条	腹板竖 向裂 缝/条	比例/ %	底板横 向裂 缝/条	腹板竖 向裂 缝/条	比例/ %	底板横 向裂 缝/条	腹板竖 向裂 缝/条	比例/ %	底板横 向裂 缝/条	腹板竖 向裂 缝/条	比例/ %
1 [#]	0	8	1.9	0	12	1.6	1	25	3.9	1	45	7.6
2 [#]	0	119	28.4	13	259	34.2	9	190	29.3	1	204	34.3
3 [#]	4	95	22.7	9	134	17.7	0	107	16.5	0	77	13.0
4 [#]	21	68	16.2	25	137	18.1	5	128	19.7	2	100	16.8
5 [#]	9	125	29.8	11	205	27.1	10	176	27.2	0	149	25.1
6 [#]	0	4	1.0	0	10	1.3	0	22	3.4	0	19	3.2

与跨径无关的 $|(\alpha_{\max}-\alpha_{\min})_i|_{\max}$ 。分析可得:1[#]梁平均裂缝区长度为0.015L,2[#]梁为0.019L,3[#]梁为0.01L,4[#]梁为0.002L,则该孔裂缝区宽度为0.019L;各孔裂缝区宽度平均值为0.03L。

(2) 二次病害孔。各部位裂缝分布差异无明显变化。纵向裂缝65条,占比10%,相对于首次病害孔有少量下降。底板横向裂缝20条,占比3%,略有上升,腹板竖向裂缝567条,占比86%,也是有上升,各梁裂缝区长度平均值提高,各孔裂缝区长度平均值=0.04L,相比首次病害孔有明显提高。

(3) 三次病害孔。各部位裂缝分布差异无明显变化。纵向裂缝65条,占比略有上升达到了11.6%;底板横向裂缝20条,同样占比略有上升,达到了4%;腹板竖向裂缝567条,占比略有下降,达到了84%;各梁裂缝区长度平均值进一步增加,各孔裂缝区长度平均值略有增加,达到了0.044L。

1.3 时间规律

为研究装配式小箱梁桥病害随通车年限变化的规律,绘制各路段通车时间与装配式小箱梁桥孔开裂比例(腹板竖向裂缝)关系如图2所示,绘制各路段通车时间与开裂桥孔的平均裂缝数量关系,如图3所示。

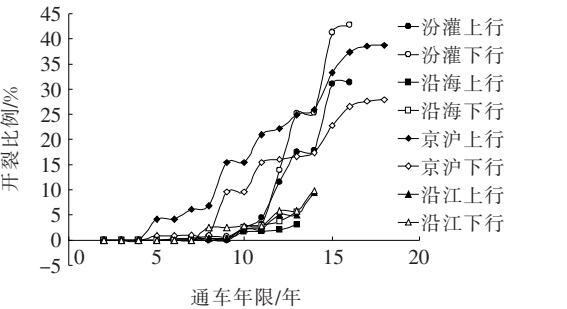


图2 通车时间与桥孔开裂比例关系图

由图2、3可见:随着通车年限的增长,各路段产生裂缝的桥孔越来越多,桥梁开裂后的裂缝数量也越来

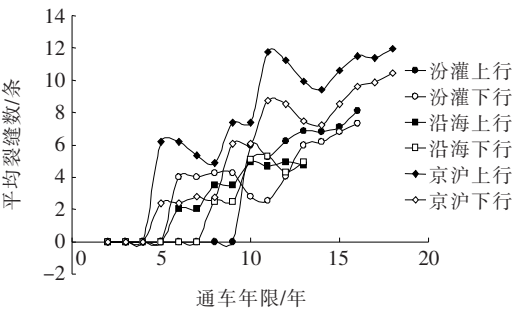


图3 通车时间与开裂桥孔平均裂缝数量关系图

越多,但不同路段之间,同一路段的上行、下行之间在发展速度上都存在明显差异。截至2017年,汾灌下行装配式小箱梁桥的开裂比例最大,达到41.2%。开裂比例是装配式小箱梁桥开裂桥孔数占组合箱梁总桥孔数的比例。

2 病害原因分析

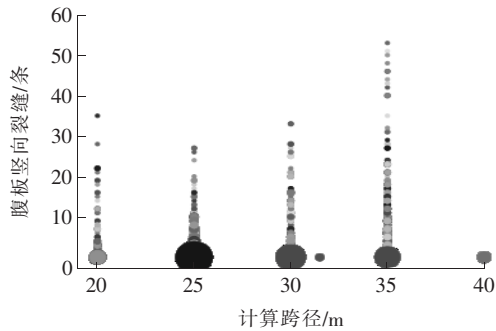
2.1 基于历史数据的病害相关性分析

2.1.1 计算跨径

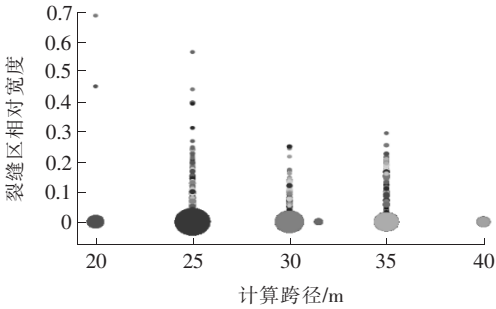
为研究不同计算跨径桥梁病害特征,分别绘制计算跨径和腹板竖向裂缝、裂缝区相对宽度的散点图,如图4所示。图4表明:腹板竖向裂缝的开展均和计算跨径相关,计算跨径越大,裂缝越多。关于裂缝区相对宽度,剔除裂缝数量非常少但裂缝区相对宽度很大的异常值后,可基本判断裂缝区相对宽度与计算跨径无明显关联。

2.1.2 车辆荷载

单一路段的上下行桥梁在设计、施工、通车时间等方面基本一致,可以推断上下行桥梁在病害发展上的差异基本上是由荷载导致的,因此研究上下行桥梁病害发展过程及荷载发展过程,有助于揭示荷载与病害间的内在关系。



(a) 计算跨径-腹板竖向裂缝



(b) 计算跨径-裂缝区相对宽度

图 4 计算跨径对桥梁病害的影响

(1) 轴载次数

为研究轴载次数与病害的相关性,绘制了各路段历年累计轴载次数和装配式小箱梁桥孔开裂比例关系,如图 5 所示,绘制了各路段历年累计轴载次数和开裂桥孔的平均裂缝数量的关系,如图 6 所示。由图 5 可见:虽然随着历年累计轴载次数的增加,各路段装配式小箱梁桥孔开裂比例不断上升,但各路段上升速度差距很大,在设计、施工、通车时间等因素较为接近的上下行之间也存在较大差异,因此,可以推断轴载的累积作用不是导致桥孔开裂的主要原因。开裂之后孔的裂缝数量与轴载次数的相关性则较为紧密,而不管设计、施工、通车年限等因素是否相同,说明一旦桥孔开裂,即使超载情况得到改善,仍然会随着轴载次数的累积,裂缝数量越来越多。

(2) 车辆总重及轴重与病害的相关性

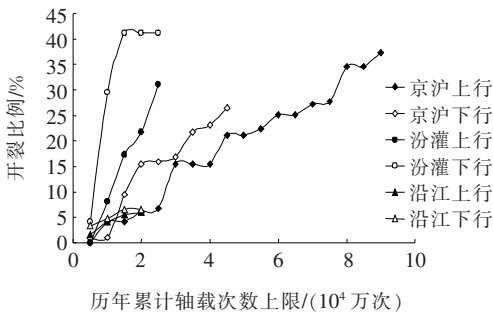


图 5 轴载次数与开裂比例关系

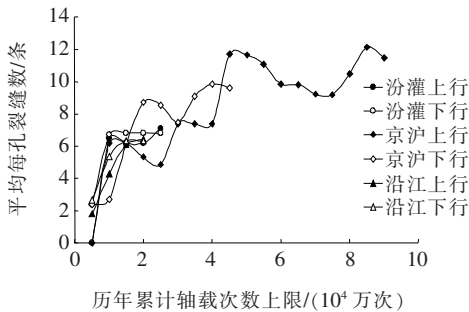


图 6 轴载次数上限与裂缝数量关系

基于动态称重数据分析车辆总重及轴重分布情况与装配式小箱梁桥病害的相关性,主要通过比较同一路段上下行间桥孔开裂比例与总重轴重的关系。主要应用了京沪、汾灌、沿江、沿海 4 条高速公路 6 套称重系统部分时段的数据,数据总量约 1.03 亿辆车,如表 3 所示。该文仅以京沪高速公路为例,分析车辆总重及轴重与病害的相关性。

表 3 称重系统数据

路段	系统名称	数据时段	车辆数/ (10 ⁴ 辆)	
			上行	下行
京沪 高速	新沂河大桥系统	2012.05—2018.09	1 977	1 923
	永安河大桥系统	2015.07—2017.05	817	815
汾灌 高速	新沐河大桥系统	2014.12—2017.06	329	302
	锡澄运河大桥系统	2016.01—2017.05	498	535
沿海 高速	灌河大桥系统	2013.07—2018.04	648	834
	烈士河大桥系统	2015.05—2017.05	807	800
合计			5 076	5 209

京沪高速公路桥孔开裂比例与开裂桥孔裂缝数量两个指标在上下行的对比结果一致,仅对桥孔开裂比例与车辆荷载、轴载的关系进行关联性分析。京沪高速公路上下行装配式小箱梁桥孔历年开裂比例如图 7 所示,可见上行一直明显大于下行。

选取京沪高速公路新沂河大桥动态称重系统车辆荷载数据绘制总重分布图及轴重分布图,如图 8、9 所示。图 8、9 表示超过一定重量车辆荷载或轴载占有车辆荷载或轴载的比例,由图 8、9 可见上行车辆荷载和轴载都大于下行,与桥孔开裂情况非常吻合。

2.1.3 设计标准

主要分析采用参考文献[10]、[11]、[12](简称 97 版、01 版、02 版)设计的桥梁病害特征的差异。对比了

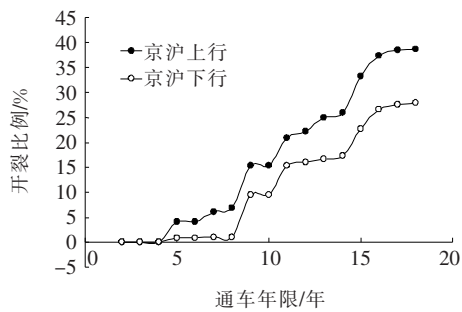


图 7 京沪装配式小箱梁桥孔开裂情况

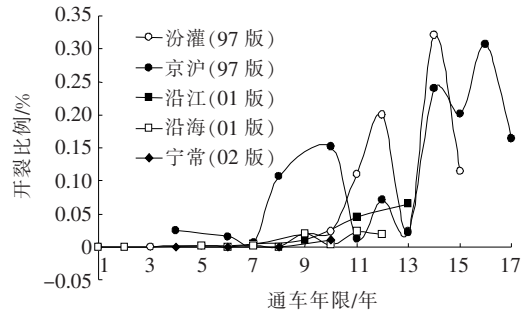


图 10 相同通车年限下不同设计标准桥孔开裂比例

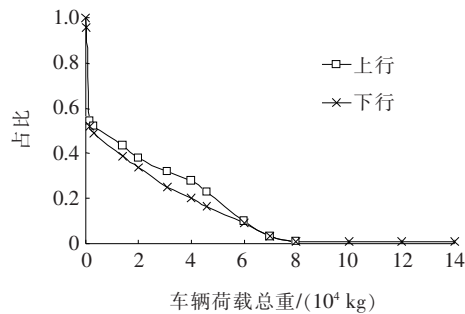


图 8 新沂河大桥车辆荷载总重分布

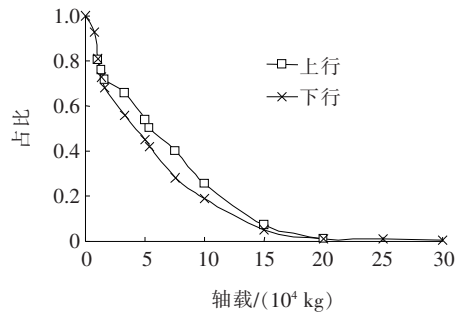


图 9 新沂河大桥车辆荷载轴载分布

相同通车年限和相同轴载次数下的桥梁开裂比例,如表 4、图 10 所示,发现相同的通车年限和轴载次数情况下,采用 97 版通用图设计的桥梁更容易出现较多病害,由此可见设计标准是造成装配式小箱梁桥病害发展的重要原因。

表 4 不同设计标准桥孔开裂比例分布统计

通用图版本	存在腹板竖向裂缝孔数/个	总孔数/个	占比/%
97 版	657	1 893	34.71
01 版	195	3 009	6.48
02 版	10	891	1.12

2.1.4 定量分析

为定量分析变量间的相关性,计算变量间 Spearson 秩相关系数,计算公式如下:

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n (R_i - Q_i)^2}{n(n^2 - 1)} \quad (1)$$

式中: R_i 为 x_i 的秩次; Q_i 为 y_i 的秩次; $R_i - Q_i$ 为 x_i 、 y_i 的秩次之差。

计算结果如表 5、6 所示。

表 5 重要裂缝病害与各因素的相关系数

因素	相关系数		
	底板横向裂缝	腹板竖向裂缝	裂缝区相对宽度
累计轴载	0.08	0.23	0.21
底板纵向裂缝	0.09	0.15	0.15
腹板纵向裂缝	0.00	0.03	0.06
横隔板竖向裂缝	0.05	-0.01	0.01
湿接缝横向裂缝	-0.01	-0.02	-0.02
设计标准	0.01	-0.20	-0.18
通车年限	0.02	0.22	0.21
计算跨径	0.02	0.12	0.08

表 6 次要病害与各因素的相关系数

因素	相关系数			
	底板纵向裂缝	腹板纵向裂缝	横隔板竖向裂缝	湿接缝横向裂缝
累计轴载	0.11	0.02	0.31	-0.26(后期记录问题)
设计标准	-0.01	-0.04	0.33	-0.05
通车年限	0.08	0.06	0.02	0.01
计算跨径	0.00	0.06	-0.09	0.02

由表 5、6 可见:底板横向裂缝因为数据极少,难以分析其真实的影响因素,累计轴载、通车年限、设计标准与腹板竖向裂缝、裂缝区相对宽度相关性较强,应该是影响病害开展的重要因素。

分析底板纵向裂缝、腹板纵向裂缝、横隔板竖向裂缝以及湿接缝横向裂缝等次要裂缝病害开展原因,发现除了横隔板竖向裂缝开展与设计标准关系很大外,其余病害和轴载次数、设计标准、通车年限以及计算跨

径的关联性都很小。说明采用 01 版本设计的桥梁横隔板竖向裂缝要多于 97 版本设计的桥梁。

2.2 基于现场检查的病害相关性分析

2.2.1 梁体厚度与裂缝病害相关性

对检查范围中的 36 孔箱梁采用钻孔法测量梁体厚度,分析所检梁体厚度实测与设计偏差值与对应梁体裂缝数量之间的关系。发现当实际腹板厚度与设计厚度偏差值为 $[-20, +40]$ mm 时,腹板病害与实际腹板厚度相关性较弱,超过这个范围箱梁更易产生竖向裂缝;内外腹板厚度差对相应梁体病害有较明显影响,厚度差大时,病害较多;底板实测厚度与设计厚度的偏差对底板横向裂缝及腹板横向裂缝的开展均有较大影响,底板厚度超限都会导致病害增加(图 11)。

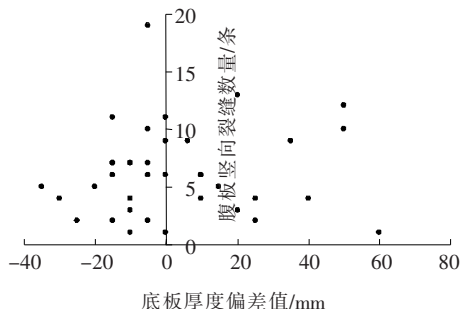


图 11 底板实测厚度与设计厚度偏差值
同腹板竖向裂缝的相关性

2.2.2 桥面线形与裂缝病害的相关性

跨中测点实测高程与计算高程偏差与对应梁体裂缝数量之间的相关性见图 12。偏差为负时表示梁体跨中下挠,偏差为正时表示梁体跨中上拱。可见梁体跨中下挠程度与腹板竖向开裂有较大的相关性。

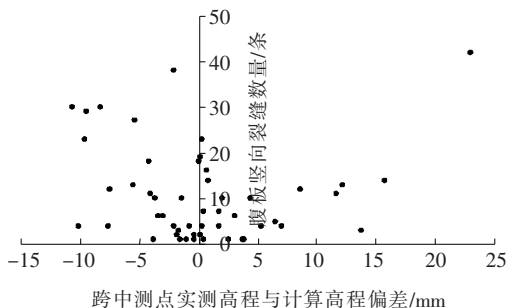


图 12 跨中测点实测高程与计算高程偏差同
腹板竖向裂缝的相关性

3 结论

(1) 现阶段,装配式小箱梁桥主梁病害以腹板竖

向裂缝为主,底板横向裂缝其次,且在各孔间分布差异较大,绝大多数分布于中间几孔,靠近边孔的次边孔病害较为严重。

(2) 腹板竖向裂缝的开展与箱梁的计算跨径相关,计算跨径越大,裂缝数量越多,而裂缝区相对宽度与计算跨径无明显关联。

(3) 箱梁的开裂与采用的设计标准相关,早期设计的桥梁更容易出现较多病害。

(4) 重车(车辆荷载总重和轴载)的分布情况对箱梁开裂起决定性影响,箱梁开裂之后随着车辆荷载轴载次数的不断累积,裂缝数量呈现快速增长趋势。

(5) 当实际腹板厚度与设计厚度偏差为 $[-20, +40]$ mm 时,腹板病害与实际腹板厚度相关性较弱,超过这个范围箱梁更容易产生竖向裂缝;内外腹板厚度差对箱梁病害有较明显影响,厚度差大时,病害较多;底板实测厚度与设计厚度的偏差对底板横向裂缝及腹板横向裂缝的开展均有较大影响,底板厚度超限都会导致病害增加。

(6) 梁体跨中下挠程度与腹板竖向开裂有较大相关性,建议定期监测主梁跨中挠度,对于跨中下挠较为明显的桥跨应及时采取干预措施。

参考文献:

- [1] 陈策. 检测大数据在组合箱梁桥病害分析中的应用[J]. 大数据时代, 2019, 33(12): 20—24.
- [2] 李健. 小箱梁结构在高等级公路中的应用发展及运营病害综述[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2015, 11(4): 9—12.
- [3] 杜建. 高速公路桥梁典型病害统计与成因分析[J]. 江西建材, 2019(5): 33—34.
- [4] 陈泽. 装配式简支转连续小箱梁病害原因分析及加固设计[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2017, 13(1): 37—38, 64.
- [5] 薛达, 王石磊, 冯海龙. 预应力混凝土小箱梁跨中裂缝成因分析与加固方案比选[J]. 铁道建筑, 2016(10): 10—12.
- [6] 吴清. 预制小箱梁常见裂缝分类和防治[J]. 城市道桥与防洪, 2011, 4(6): 200—203, 323.
- [7] 张勇, 梁志广, 胡强. 简支小箱梁底板纵向裂缝原因分析[J]. 铁道建筑, 2008(1): 31—33.
- [8] JTJ 021—89 公路桥涵设计通用规范[S].
- [9] JTG D60—2004 公路桥涵设计通用规范[S].
- [10] JTJ 021—1997 公路桥涵设计通用规范[S].
- [11] JTJ 021—2001 公路桥涵设计通用规范[S].
- [12] JTJ 021—2002 公路桥涵设计通用规范[S].