

# 混凝土桥梁空心板铰缝劣化模拟及预养护研究

张 海<sup>1</sup>,王爱迪<sup>1</sup>,焦 莉<sup>2</sup>

(1. 沈阳建筑大学交通与测绘工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘 要** 目的 研究大跨径空心板梁桥铰缝在不同损伤状态下铰缝混凝土劣化指标,为该类型梁桥的预养护提供参考。方法 应用 MIDAS 软件建立有限元分析模型,并通过试验分析不同受损长度及位置下铰缝劣化指标,进而提出新型铰缝检测方案,基于试验提出铰缝劣化指标,结合注环氧树脂加固技术进行铰缝预养护;结合现有桥梁历年检测数据,提出铰缝混凝土服役年限预估方法。结果 提出了劣化指标公式及铰缝混凝土劣化模型,通过铰缝混凝土劣化模型可计算出劣化时间,试验桥梁采取新型检测方案和预养护结合技术后,铰缝混凝土劣化时间延长至未采取措施前的 2 倍以上。结论 应用新技术可以提前预防铰缝受损,节约维修加固成本,延长寿命,为此类空心板梁桥铰缝的预养护管理和维修加固提供参考。

**关键词** 空心板梁桥;铰缝劣化;铰缝预养护;环氧树脂;有限元

中图分类号 TU375;U446.3

文献标志码 A

## Study on Preventive Maintenance and Deterioration of Hinged Joints in Hollow Slab of Girder Bridges

ZHANG Hai<sup>1</sup>, WANG Aidi<sup>1</sup>, JIAO Li<sup>2</sup>

(1. School of Transportation and Geomatics Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168;

2. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China 110168)

**Abstract:** The deterioration index of hinge joint concrete of long-span hollow-slab girder bridge under different damage states is studied, and to provide a reference for the pre-conservation program of this type of girder bridges. The finite element analysis model is established by MIDAS software, the deterioration index of hinge joint under different damaged length and position of hinge joint is studied by experiment, and then a new hinge joint detection scheme is proposed, based on the test, the deterioration index of hinge joint is proposed, combined with epoxy resin injection reinforcement technology, hinge joint pre-maintenance is carried out; Combined with the existing bridge over the years of test data on the hinge joint degradation time, the hinge joint concrete service life prediction method is put forward. The formula of deterioration index and the deterioration model of hinge joint concrete are put forward. through the calculation of the deterioration model of hinge joint concrete, it is concluded that the deterioration time of hinge joint

收稿日期:2022-11-15

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC0809600)

作者简介:张海(1972—),男,副教授,博士,主要从事公路、城市道路及桥梁工程等方面研究。

concrete is extended to more than 2 times before the measures are not taken after the test bridge adopts the new detection scheme and the pre-maintenance combined technology. The application of new technology can prevent the damage of hinge joints in advance, save the cost of maintenance and reinforcement, prolong the service life, and provide reference for the pre-maintenance management and maintenance and reinforcement of hinge joints of such hollow-slab girder bridges.

**Key words:** hollow-slab girder bridge; hinge joint deterioration; hinge joint preventive conservation; epoxy resin; finite element

预应力钢筋混凝土空心板梁桥是中小跨径桥梁应用的典型结构。空心板梁桥通过现浇铰缝混凝土连接形成桥面结构,铰缝承担着横向联系和传递荷载的关键作用,因其构造特征原因易出现损伤,导致铰缝部分或全部失效,从而削减板梁的横向受力,甚至形成单板受力。因此,国内外学者对铰缝损伤进行试验研究和理论分析,M. A. Abdo 等<sup>[1-7]</sup>明确了基于铰缝的刚度变化、相对位移指标、加速度幅值变化、振型数据变化等一系列评定指标。张亮等<sup>[8-16]</sup>提出了基于 BIM、PDCA、桥梁智慧管理系统、BMS 的方法的桥梁全生命周期的预养护方法。任振甲等<sup>[17-22]</sup>针对铰缝受损提出了以板底粘贴钢板法、板底粘贴复合材料法、增大截面法、体外预应力加固法四种方法作为基本的维修加固技术。

近年来,国内外对于空心板梁桥的研究主要集中在明确铰缝损伤评定的标准以及桥梁整体的预养护,而对于其预养护策略的研究较少。桥梁的设计使用年限一般为一百年,而在实际使用中会出现不同程度、不同形式的损伤。为延长桥梁使用寿命、降低运营维护成本,笔者针对某一 16 m 跨径的空心板梁桥铰缝进行了不同损伤状态下的有限元分析,结合注环氧树脂封缝维修加固技术进行预养护,在试验基础上提出铰缝劣化指标公式,对辽宁省内 165 座空心板梁桥的历史检测数据进行统计分析,提出铰缝混凝土服役年限预估方法,从而提出铰缝劣化指标检测方案与注环氧树脂的新型维修加固技术结合

的铰缝混凝土的预养护方案。

## 1 铰缝劣化有限元模拟

### 1.1 有限元模型

以辽宁省某大桥为研究对象建立有限元模型,桥跨组合为 11 × 16 m、桥面净宽 10.5 m、桥面板为预应力混凝土预制板。桥横截面构造见图 1。

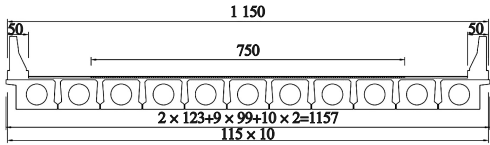


图 1 桥横截面构造图

Fig. 1 Structural drawing of bridge deck

通过 MIDAS 有限元软件建立混凝土空心板梁桥模型,梁板间使用具有一定刚度的横梁进行联立,通过释放梁端约束的方式实现梁板铰接和横向传力。采取双向单车道、公路Ⅱ级荷载;采取削减虚拟横梁数量的方法表征铰缝受损,模拟 1~6 号铰缝不同受损状态下的有限元模型,定义 8 种受损状态,即受损长度  $L$  分别为 2, 4, 6,  $\dots$ , 16 m;如图 2 所示。

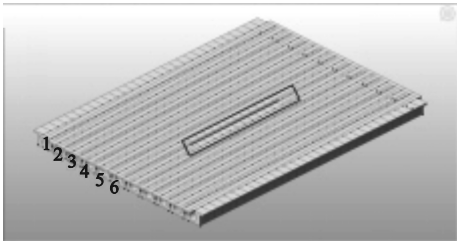


图 2 第 6 号铰缝受损示意图

Fig. 2 Schematic diagram of damaged 6 # hinge joint

1.2 铰缝劣化协同工作效率

在模拟中,对1~6号铰缝11块板跨中施加300 kN的集中荷载,研究其在不同受损长度下横向分布影响线的变化规律。定义铰缝劣化指标:

$$y = (|y_{aa}| + |y_{ab}| + |y_{ba}| + |y_{bb}|)/4,$$
$$(b = a + 1).$$

(1)

式中: $y_{aa}$ 为 $a$ 梁横向分布影响线中 $a$ 梁影响线的增长率; $y_{ab}$ 为 $a$ 梁横向分布影响线中 $b$ 梁影响线的增长率; $y_{ba}$ 为 $b$ 梁横向分布影响线中 $a$ 梁影响线的增长率、 $y_{bb}$ 为 $b$ 梁横向分

布影响线中 $b$ 梁影响线的增长率。

通过有限元模拟计算得出铰缝劣化协同工作效率参数(见表1)。表1中, $y$ 为相邻两梁板的横向分布影响线增长率均值; $\Delta y$ 为不同铰缝受损位置的横向分布影响线增长率绝对值的极差。结合表1数据绘制不同受损位置与铰缝劣化指标和极差的关系曲线(见图3)。由图3可知,铰缝劣化指标 $y$ 越小,表明铰缝传力效果越好;反之,指标 $y$ 越大,铰缝的性能状态越差。

表1 铰缝劣化协同工作效率

Table 1 Joint deterioration cooperative work rate

L/m	铰缝 1						铰缝 2					
	y11	y12	y21	y22	Δy	y	y22	y23	y32	y33	Δy	y
2	7.716	-4.352	-4.744	1.599	6.117	4.603	4.361	-3.767	-3.938	2.044	2.316	3.528
4	18.953	-10.093	-10.961	3.587	15.366	10.898	11.937	-9.889	-10.313	5.321	6.617	9.365
6	37.379	-20.107	-20.024	6.245	31.135	20.939	23.323	-18.844	-19.621	9.918	13.406	17.926
8	64.344	-30.868	-33.003	9.801	54.544	34.504	39.895	-31.352	-32.500	16.039	23.856	29.947
10	92.905	-43.413	-45.875	13.231	79.674	48.856	62.761	-48.367	-49.621	24.038	38.723	46.197
12	129.383	-59.482	-61.735	17.467	111.917	67.017	83.926	-64.132	-64.942	31.177	52.748	61.044
14	177.366	-80.628	-80.222	24.240	153.126	90.614	109.338	-83.172	-82.028	39.196	70.142	78.434
16	196.889	-88.868	-86.481	24.225	172.664	99.116	119.004	-90.188	-87.774	41.940	77.064	84.727

L/m	铰缝 3						铰缝 4					
	y33	y34	y43	y44	Δy	y	y44	y45	y54	y55	Δy	y
2	3.938	-4.300	-4.446	2.670	1.776	3.838	3.779	-4.475	-4.600	3.197	1.403	4.013
4	10.542	-11.146	-11.470	7.076	4.394	10.058	9.965	-11.712	-11.962	8.302	3.659	10.485
6	20.295	-21.021	-21.581	13.285	8.296	19.046	18.907	-22.015	-22.400	15.448	6.952	19.693
8	33.303	-32.355	-35.125	21.466	13.659	30.562	30.967	-35.812	-36.222	24.743	11.479	31.936
10	51.340	-51.835	-52.367	31.744	20.624	46.821	46.308	-53.340	-53.278	35.999	17.341	47.231
12	71.307	-71.672	-71.140	42.788	28.884	64.227	63.277	-72.849	-71.199	47.486	25.363	63.703
14	84.405	-84.721	-82.397	49.354	35.367	75.219	74.181	-85.469	-81.028	53.367	32.103	73.511
16	91.091	-91.197	-87.262	52.152	39.045	80.426	79.706	-91.714	-84.881	55.735	35.980	78.009

续表 1

L/m	铰缝 5						铰缝 6					
	y55	y56	y65	y66	$\Delta y$	y	y66	y67	y76	y77	$\Delta y$	y
2	3.682	-4.603	-4.650	3.410	1.240	4.087	3.428	-4.632	-4.575	3.637	1.204	4.068
4	9.618	-12.005	-12.055	8.857	3.199	10.634	8.897	-12.052	-11.950	9.537	3.155	10.609
6	18.108	-22.546	-22.644	16.581	6.063	19.969	16.583	-22.605	-22.417	17.978	6.021	19.896
8	32.845	-40.705	-40.709	29.460	11.250	35.930	26.527	-36.467	-36.332	29.243	9.940	32.142
10	43.708	-54.027	-53.589	38.224	15.803	47.387	38.299	-53.529	-53.865	43.489	15.566	47.296
12	63.224	-78.170	-74.990	51.619	26.551	67.001	49.586	-71.100	-73.238	59.141	23.652	63.266
14	66.206	-81.952	-78.193	53.832	28.120	70.046	54.704	-80.193	-85.649	68.905	30.945	72.363
16	73.952	-91.866	-83.628	56.549	35.317	76.499	56.678	-83.545	-91.793	73.697	35.115	76.428

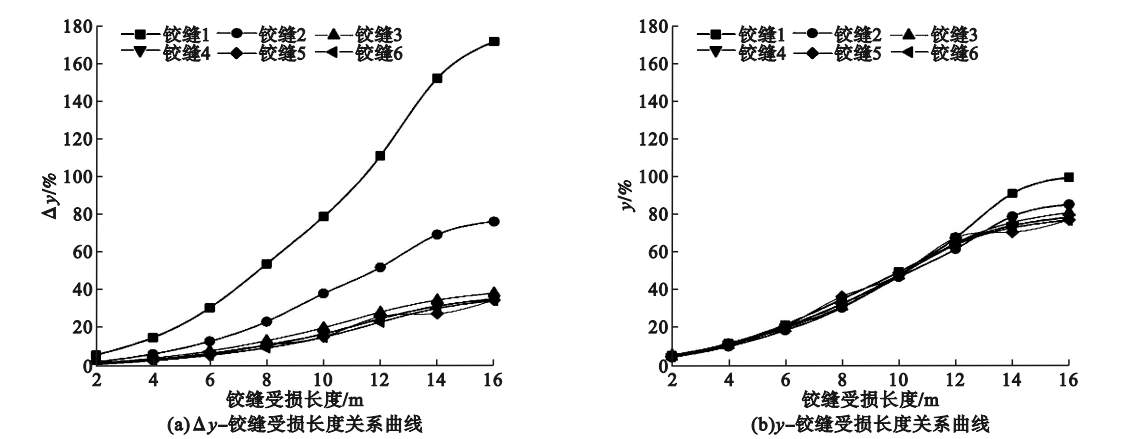


图 3 不同受损长度与铰缝劣化指标及极差关系曲线

**Fig. 3** Relation curves between different damaged positions and hinge joint deterioration index and range

**1.3 铰缝检测指标**

基于不同受损长度下的铰缝劣化指标  $y$ 、铰缝受损度  $x$  ( $x = \text{铰缝受损长度}/16 \text{ m}$ )、铰缝相邻两梁板相对位移  $z$ 、相邻两梁板的挠度比  $w$ , 提出铰缝检测方案。各项参数指标如表 2 所示。

表 2 不同铰缝受损长度下各指标参数

L/m	铰缝 1			铰缝 2			铰缝 3		
	y	$z/\text{mm}$	w	y	$z/\text{mm}$	w	y	$z/\text{mm}$	w
2	4.603	0.053	1.654	3.528	0.050	1.462	3.838	0.053	1.452
4	10.898	0.099	1.943	9.365	0.089	1.674	10.058	0.094	1.663
6	20.939	0.167	2.526	17.926	0.146	2.048	19.046	0.154	2.037
8	34.504	0.264	3.492	29.947	0.226	2.747	30.562	0.230	2.635
10	48.856	0.360	5.007	46.197	0.335	4.249	46.821	0.339	4.201
12	67.017	0.470	8.315	61.044	0.434	6.912	64.227	0.487	8.086
14	90.614	0.612	21.029	78.434	0.550	16.769	75.219	0.528	16.137
16	99.116	0.693	39.174	84.727	0.652	30.087	80.426	0.563	29.024

续表 2

L/m	铰缝 4			铰缝 5			铰缝 6		
	y	z/mm	w	y	z/mm	w	y	z/mm	w
2	4.013	0.051	1.441	4.087	0.052	1.433	4.068	0.053	1.415
4	10.485	0.097	1.652	10.634	0.097	1.643	10.609	0.097	1.616
6	19.693	0.158	2.022	19.969	0.163	2.011	19.896	0.158	1.966
8	31.936	0.241	2.706	35.930	0.262	2.955	32.142	0.240	2.599
10	47.231	0.357	4.158	47.387	0.410	4.123	47.296	0.340	3.884
12	63.703	0.452	7.975	67.001	0.466	9.862	63.266	0.446	6.755
14	73.511	0.517	15.896	70.046	0.487	12.146	72.363	0.506	10.194
16	78.009	0.561	28.762	76.499	0.530	28.206	76.428	0.533	12.427

基于表 2 得到铰缝受损长度为 2 ~ 16m 时,劣化指标 y 与 x,z,w 各指标的拟合曲线,如图 4 所示。铰缝劣化指标 y 与 x 成指数关系,与 z 成线性关系、与 w 成幂指数关系,且三种参数的校验系数均高于 0.97。由此得到铰缝劣化指标 y 与 x、z、w 的关系式:

$$y = 34.56x^{1.588} + 50.364z + 10.302\ln(w) - 3.489.$$

(2)

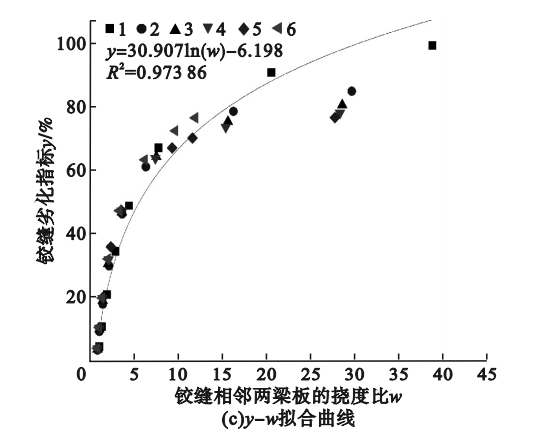
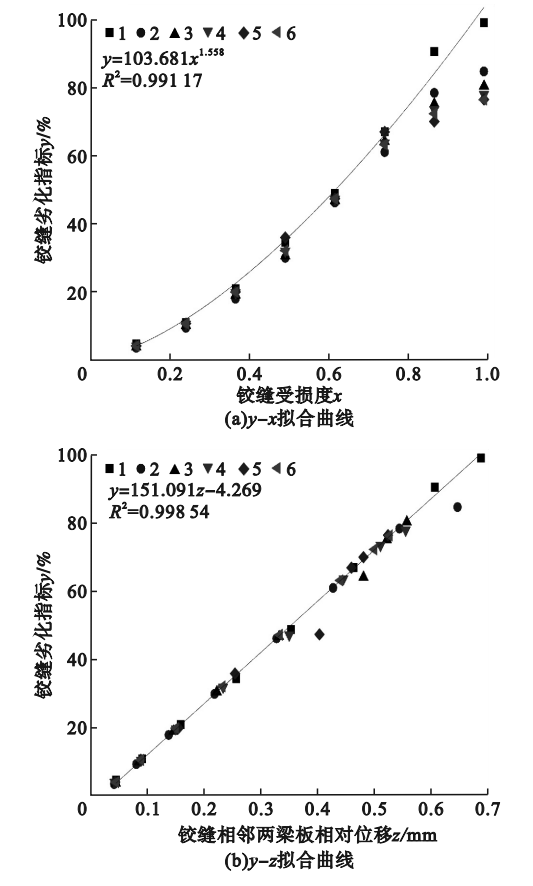


图 4 各指标与铰缝劣化系数 y 的拟合曲线  
Fig. 4 Fitting curves of each index and hinge joint deterioration coefficient 'y'

用铰缝劣化指标公式对 6 号铰缝进行模拟计算,得到的劣化指标验证误差(见表 3)。

表 3 劣化公式误差分析

铰缝损伤 长度/m	y		相对误差 率/%
	计算模拟	公式求解	
2	4.032	4.763	18.132
4	10.165	10.860	6.840
6	18.713	19.280	3.033
8	29.935	30.293	1.197
10	43.998	43.956	-0.095
12	60.540	59.422	-1.847
14	73.871	70.593	-4.437
16	83.875	78.021	-6.979

在铰缝受损长度为 2 m 时,由于试验参数较小,分析横向分布影响较小,铰缝公式求解的铰缝劣化指标与有限元模拟结果误差较大,排除较大误差值,其他误差均值不超过 7%,说明以  $x$ 、 $z$ 、 $w$  作为自变量可以较好地表征铰缝劣化指标  $y$ 。

由上述结论,将不同受损状态下铰缝劣化指标划分为 5 个等级:当  $0 \leq y \leq 11$  时,铰缝完好;当  $11 < y \leq 21$  时,铰缝轻微损伤;当  $21 < y \leq 49$  时,铰缝中度损伤;当  $49 < y \leq 67$ ,铰缝严重损伤;当  $y > 67$ ,铰缝完全失效。

2 工程应用

2.1 铰缝的现场检测

根据外观检查结果,对试验桥每跨重车道范围内的首跨 K1 及中间跨 K4 中破损较为严重的几条铰缝(K1 跨 1~5 号铰缝、K4 跨 4~8 号铰缝)进行测试。在跨中相邻两片板梁间设置位移监测装置,在既有交通状况下,不间断地采集相邻两片板梁铰缝位置处的两侧板梁的相对位移及挠度。检测布置如图 5 所示。

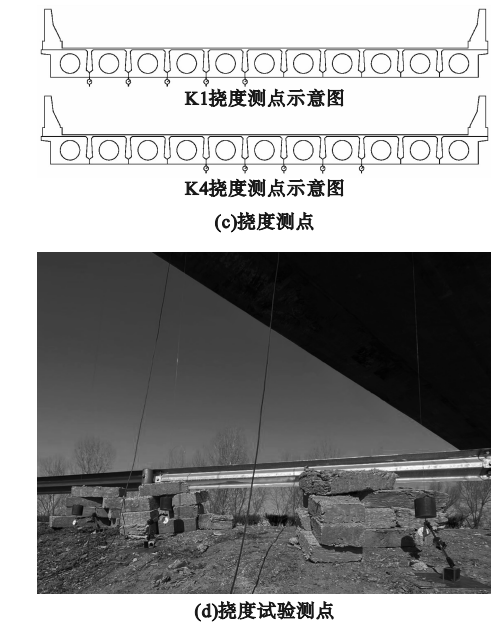


图 5 各指标测点布置示意图

Fig. 5 Layout diagram of measuring points for each index

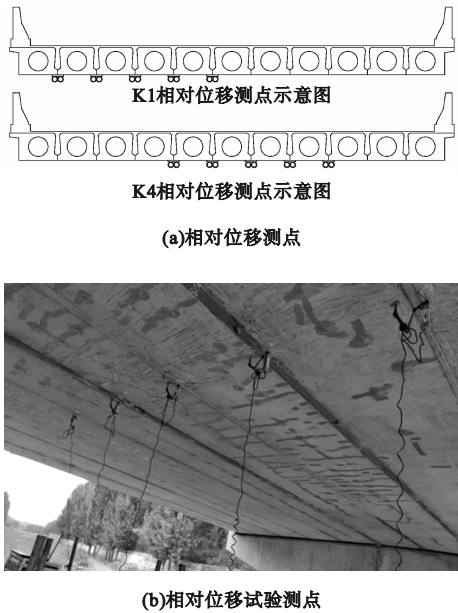
表 4 实桥检测铰缝劣化指标参数  
Table 4 Deterioration index parameters of hinge joint for real bridge inspection

编号	$x$	$z/\text{mm}$	$w$	$y$
K11	0.590	0.005	0.781	9.171
K12	0.680	0.020	0.547	10.030
K13	0.020	0.028	8.384	19.900
K14	0.090	0.222	22.016	40.296
K15	0.030	0.207	16.474	35.930
K44	0.680	0.003	0.597	10.058
K45	0.550	0.145	16.710	46.197
K46	0.800	0.007	0.320	9.365
K47	0.320	0.053	3.971	19.050
K48	0.290	0.008	2.129	9.537

将检测结果输入有限元模型,得出计算结果,经过统计分析,K1 跨 1~5 号铰缝和 K4 跨 4~8 号铰缝的  $y$ 、 $x$ 、 $z$ 、 $w$  值如表 4 所示。由表 4 可知,K1 跨铰缝劣化指数  $y$  维修前处于 9.171%~40.296%;1,2 号铰缝处于完好状态;3 号铰缝轻微损伤;4,5 号铰缝中度损伤。K4 跨铰缝劣化指数  $y$  在维修前处于 9.365%~46.197%;4,6,8 号铰缝状态完好;7 号铰缝轻微损伤;5 号铰缝处于中度损伤状态。

2.2 铰缝混凝土预养护方案

检测结果表明试验桥整体状况良好,个



(b)相对位移试验测点



别铰缝损坏,最严重为中度损伤。为延长大桥铰缝的寿命,基于新型检测方案结果,对全桥铰缝注环氧树脂进行封缝加固维修处理,并对其维修后铰缝劣化指标参数进行校验,结果如表5所示。

表5 维修后铰缝劣化指标参数

Table 5 Hinge joint deterioration index parameters after maintenance				
编号	$x$	$z/\text{mm}$	$w$	$y$
K11	0.000	0.020	1.519	5.261
K12	0.056	0.190	1.630	10.740
K13	0.020	0.060	2.062	4.632
K14	0.024	0.054	1.933	6.776
K15	0.000	0.010	1.403	3.804
K44	0.025	0.070	1.424	8.932
K45	0.038	0.310	2.160	15.957
K46	0.016	0.030	1.793	6.003
K47	0.000	0.010	1.888	3.029
K48	0.000	0.010	1.403	3.560

从表5中看出,维修后K1跨中铰缝均为完好状态;K4跨中除5号铰缝轻度损伤外均为完好状态。说明注环氧树脂进行封缝加固维修处理是有效的。基于此,提出将铰缝劣化指标检测方案与注环氧树脂的新型维修加固技术结合的铰缝混凝土的预养护方案。

2.3 铰缝混凝土服役年限预估

结合铰缝劣化指标提出铰缝混凝土劣化模型:

$$Y(t)=67[e^{a(t-t_1)}-1],\quad t>t_1.$$

(3)

式中: $Y(t)$ 为服役 $t$ 年的铰缝劣化指标; $t_1$ , $t$ 分别为铰缝混凝土初始劣化时间和劣化时间, $a$ ;  $a$ 为无量纲参数;常数67为上节中铰缝劣化指标大于67%时认定为铰缝处于完全失效状态。

通过对辽宁省内165座空心板梁桥历史检测数据统计分析,发现铰缝病害大多产生在服役第7年,如图6所示。一般2~4 a对桥梁进行一次详细检测。假定在桥梁建成前6 a铰缝混凝土不发生性能劣化,即定义铰缝混凝土初始劣化时间 $t_1=6$ 。

试验桥于2003年建成通车,距今已服役19

a,铰缝混凝土劣化初始时间 $t_1=6$ 。将荷载试验中计算获取的铰缝劣化指标 $y$ 代入到劣化模型中进行参数 $a$ 的求解,结果如表6所示。

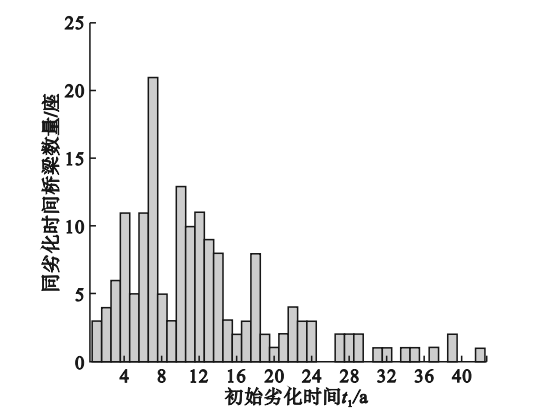


图6 初始劣化时间统计图

Fig. 6 Statistical chart of initial deterioration time

表6 维修前后无量纲参数a

Table 6 Dimensionless parameters before maintenance a				
编号	维修前		维修后	
	$y/\%$	$a$	$y/\%$	$a$
K11	9.170	0.010	5.260	0.006
K12	10.030	0.011	10.740	0.011
K13	19.900	0.020	4.630	0.005
K14	40.300	0.036	6.780	0.007
K15	35.930	0.033	3.800	0.004
K44	10.060	0.011	8.930	0.100
K45	46.200	0.040	15.960	0.016
K46	9.370	0.010	6.000	0.007
K47	19.050	0.019	3.030	0.003
K48	9.540	0.010	3.560	0.004
均值	20.950	0.020	6.870	0.007

将分析得到的维修前后无量纲参数 $a$ 均值代入铰缝混凝土劣化模型中,得到试验桥维修前后铰缝混凝土劣化时间(见表7),从而预估出铰缝混凝土的使用寿命。

表7 维修前后铰缝劣化时间

Table 7 Degradation time of hinge joint before and after maintenance				
铰缝状态	$y/\%$	$t/a$		
		维修前	维修后	
完好	11	14	28	
轻微损伤	21	20	45	
中度损伤	49	34	85	
严重损伤	67	41	105	

表 7 的数据分析表明,试验桥在维修前服役 41a 后铰缝就处于完全破坏状态,此时维修需要采取体外预应力加固或增加横梁等方式,维修加固成本会大大增加。通过及时检测并结合注环氧树脂对全桥铰缝进行维修加固后,铰缝劣化时间提升到原来的 2 倍以上,最高时间从原来的 41a 延长至 105a,且铰缝混凝土每段性能状态、服役时间都得到提升。从而说明通过新型检测技术与新型维修加固技术结合的空心板铰缝预养护策略可以更好地增加铰缝混凝土服役时间,同时节约运行维护成本。

3 结 论

(1)对 16 m 空心板梁桥铰缝混凝土进行有限元分析,根据铰缝劣化指标划分损伤等级,基于试验提出铰缝劣化指标  $y = 34.56x^{1.588} + 50.364z + 10.302\ln(w) - 3.489$  及铰缝混凝土劣化模型  $Y(t) = 67[e^{a(t-t_1)} - 1]$ ,预估铰缝混凝土的服役年限。

(2)基于试验提出将劣化指标与注环氧树脂封缝维修加固技术相结合方案,通过铰缝混凝土劣化模型计算得出,维修后试验桥的铰缝服役年限提升了 2 倍,其性能状态有大幅度提升,还能节约运营维护成本,为此类空心板梁桥铰缝的预养护管理和维修加固提供参考。

参考文献

[ 1 ] ABDON M A. Parametric study of using only static response in structural damage detection. [J]. Engineering structures, 2012, 34: 124 - 131.

[ 2 ] 胡晓. 基于频谱分析的桥梁铰缝损伤检测方法研究[J]. 上海公路,2020,(3):60 - 63.

(HU Xiao. Research on damage detection method of bridge hinge joint based on spectrum analysis [J]. Shanghai highway, 2020 (3): 60 - 63.)

[ 3 ] 张枢文. 空心板梁铰缝的非接触式检测方法研究[J]. 低温建筑技术,2017,39(10):

87 - 89.

(ZHANG Shuwen. Research on non-contact detection method for hinge joint of hollow slab beam [J]. Low temperature building technology,2017,39(10):87 - 89.)

[ 4 ] 李岩,商贺嵩,吴志文,等. 基于车桥耦合振动的空心板桥铰缝损伤评价指标分析[J]. 科学技术与工程,2017,17(22):129 - 134.

(LI Yan,SHANG Hesong,WU Zhiwen,et al. Evaluation index of hinged joint damage for simply supported multi-slab girder bridges based on vehicle and bridge coupled vibration [J]. Science, technology and engineering, 2017,17(22):129 - 134.)

[ 5 ] NEJAD B F, RAHAI A, ESFANDIARI A. A structural damage detection method using static noisydata [J]. Engineering structures,2005,27(12):1784 - 1793.

[ 6 ] CADDEMI A, MORASSI A. Detecting multiple open cracks in elastic beams by static tests [J]. Journal of engineering mechanics, 2010,137(2):113 - 124.

[ 7 ] 邬晓光,李院军,时元绪,等. 装配式空心板梁桥铰缝损伤评估方法[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2019,35(4):637 - 644.

(WU Xiaoguang, LI Yuanjun, SHI Yuanxu, et al. Damage assessment method for hinged joint of fabricated hollow slab girder bridge [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science),2019,35(4):637 - 644.)

[ 8 ] 张亮. 空心板梁桥预防性养护方法研究[J]. 城市道桥与防洪,2020(5):198 - 201.

(ZHANG Liang. Research on preventive maintenance method of hollow slab girder bridge [J]. Urban road and bridge and flood control,2020(5):198 - 201)

[ 9 ] 吴华勇. 既有桥梁数字化运维管理平台集成研究[J]. 上海建设科技,2020(4):81 - 84.

(WU Huayong. Research on integration of digital operation and maintenance management platform for existing bridges [J]. Shanghai construction science and technology,2020(4):81 - 84.)

[ 10 ] 万晓敏. 全寿命周期养护理念对市政设施养护工作模式的启示[J]. 上海公路,2021,(2):151 - 154.

(WAN Xiaomin. Inspiration of life-cycle maintenance concept on the maintenance mode



- of municipal facilities [J]. Shanghai highway, 2021, (2): 151 - 154.
- [11] 王亚飞, 钟继卫, 李成, 等. 桥梁智慧管理系统的探索与实践. [J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2020, 42(4): 18 - 24.  
(WANG Yafei, ZHONG Jiwei, LI Cheng, et al. Exploration and practice of bridge smart management system. [J]. Journal of wuhan university of technology (information and management engineering edition), 2020, 42(4): 18 - 24.)
- [12] GATTULLI V, CHIARAMONTE L. Condition assessment by visual inspection for a bridge management system [J]. Computer-aided civil and infrastructure engineering, 2005 (20): 95 - 107.
- [13] LEE S H, JEONG Y S. A system integration framework through development of ISO 10303-based product model for steel bridges [J]. Automation in construction, 2006 (15): 212 - 228.
- [14] LIU M, ASCE A M, DAN M. Optimizing bridge network maintenance management under uncertainty with conflicting criteria: life-cycle maintenance, failure, and user costs [J]. Journal of structural engineering, 2006, 132(11): 1835 - 1845.
- [15] 王欣. 基于 BIM 的桥梁建模及运维的应用研究[D]. 苏州: 苏州科技大学, 2020.  
(WANG Xin. Application research of BIM-based bridge modeling and operation [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2020.)
- [16] 吴宏波. 如何让 BIM 在桥梁全生命周期充分发挥作用[J]. 中国公路, 2020(14): 43 - 46.  
(WU Hongbo. How to give full play to bim in the whole life cycle of bridges [J]. China highway, 2020(14): 43 - 46.)
- [17] 任振甲, 任白玉. 空心板横向裂缝粘钢板处理法[J]. 建筑技术, 2001(6): 406 - 407.  
(REN Zhenjia, REN Baiyu. Treatment of transverse cracks in hollow slabs by sticking steel plates [J]. Building technology, 2001(6): 406 - 407.)
- [18] 王涛. 预应力碳纤维在桥梁工程中的应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2006.  
(WANG Tao. Research on the application of prestressed carbon fiber in bridge engineering [D]. Xi'an: Chang'an University, 2006.)
- [19] 张迪. 空心板桥纵向裂缝产生机理及加固方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.  
(ZHANG Di. Study on the mechanism of longitudinal cracks and reinforcement method of hollow slab bridge [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.)
- [20] FU C C, Pan Z F, MOHAMED S A. Transverse posttensioning design of adjacent precast solid multibeam bridges [J]. Journal of performance of constructed facilities, 2011, 25(3): 223 - 230.
- [21] GRACE N F, JENSEN E A, BEBAWY M R. Transverse post-tensioning arrangement for side-by-side box-beam bridges [J]. Pci journal, 2012(4): 48 - 63.
- [22] BAE S W, MURPHY M, MIRMIRAN A, et al. Behavior of RC T-Beams strengthened in shear with CFRP under cyclic loading [J]. Journal of engineering, 2013, 18(2): 99 - 10.
- [23] 商东洋. 某预应力混凝土筒支空心板梁桥加固设计[J]. 山西建筑, 2023, 49(7): 158 - 16.  
(SHANG Dongyang. Strengthening design of a prestressed concrete simply-supported hollow slab girder bridge [J]. Shanxi architecture, 2023, 49(7): 158 - 161.)
- [24] 王敏强, 薛飞. 铰接板梁桥荷载横向分布影响线计算方法[J]. 武汉大学学报(工学版), 2004, 37(4): 68 - 72.  
(WANG Minqiang, Xue Fei. Method of transverse load distribution influence line for an articulated slab girder bridge [J]. Journal of wuhan university (engineering edition), 2004, 37(4): 68 - 72.)
- (责任编辑: 王国业 英文审校: 刘永军)