

文章编号:1671-8879(2009)02-0065-05

## 混凝土铰接 T 梁桥结构体系损伤评价试验

姚晓飞,徐 岳,付迎春

(长安大学 旧桥检测与加固技术交通行业重点实验室,陕西 西安 710064)

**摘 要:**以 16 m 跨径的 T 梁桥标准图为基础,按 1:4 的缩尺比例,采用焊接钢板的连接方法设计了一座 5 片 T 梁桥模型。通过不同的钢板连接方式,从试验焊接顺序、横向连接和纵向连接损伤 3 个方面,就横向连接损伤对桥梁承载能力的影响进行了试验和有限元分析,研究了不同损伤工况对铰接梁桥荷载横向分配的影响。结果表明:横向连接损伤只对与损伤横向连接相邻梁的影响最大,对相隔梁的影响很小,对其他梁的影响几乎没有;当横向连接损伤率达到 5/9(约 55.55%)时,单梁受力的现象已经十分严重;在 5 片梁铰接完好状态下,主要是相邻的 3 片梁来承担荷载,所以在连接损伤情况下,除了相邻梁的荷载横向分布系数影响线坐标变化较大外,其他横向连接完好梁仍然保持铰接状态下横向分布系数影响线坐标。

**关键词:**桥梁工程;混凝土 T 梁桥;横向连接损伤;损伤评价;模型试验

**中图分类号:**U448.21 **文献标志码:**A

## Test on damage assessment of hinged concrete T-beam bridge system

YAO Xiao-fei, XU Yue, FU Ying-chun

(Key Laboratory of Bridge Detection and Reinforcement Technology Ministry of Communications,  
Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** The effect of damaged transverse connection on prefabricated concrete beam bridges was studied through model test and finite element analysis in this paper. On the basis of standard drawing of 16 m T-beam bridge, one 4 m hinged prefabricated concrete model T-beam bridge by using of welding steel plate was designed. The impacts on damages of different conditions for transverse load distribution were discussed. Firstly, the damage of transverse connections has a big influence on the adjacent girders, but it has little effect on the girders apart from them and almost has nothing to do with other ones. Secondly, when the damage rate is 55.55%, the phenomenon of single beam bearing has become a problem. Thirdly, when the hinges of the five girders are undamaged, loads are supported mainly by the three beams adjacent to the loading point. Accordingly under the condition of transverse connections damaged, the transverse load distribution influence line coordinate values of beams adjacent to the connections will change obviously, while the other beams with undamaged connections will remain unchanged. 5 tabs, 5 figs, 7 refs.

**Key words:** bridge engineering; T-beam bridge; damaged transverse connection; damage evaluation; model test

收稿日期:2008-04-05

基金项目:国家西部交通建设科技项目(2005 318 223 16)

作者简介:姚晓飞(1976-),男,河南灵宝人,工学博士研究生,E-mail:slbyxf@163.com。

0 引 言

近年来,中国采用预制安装施工方法修建了大量的钢筋混凝土和预应力混凝土空心板梁、T 梁与小箱梁桥。这些桥梁目前普遍出现了梁端支承受力不均、支座滑脱,造成梁体受力不均、铰缝纵向开裂严重、横向联接薄弱或退化等现象,单板或单梁受力特征显著,存在极大的安全隐患<sup>[1]</sup>。目前,中国对横向连接损伤的桥梁横向分布系数的研究很少,大部分是针对实际情况,通过实测数据和理论值的比较来评价横向连接状态,为维修加固提供科学依据<sup>[2-3]</sup>。文献[4]则根据铰接板(梁)法理论,建立有损伤铰的荷载横向分布模型,并与遗传算法相结合,寻找损伤的位置和程度。桥梁的横向连接状态测试是评定桥梁运营状态的重要指标。为此,本文针对典型的铰接横向连接方式,采用试验和数值模拟相结合的方法,研究不同横向连接损伤对混凝土梁式桥荷载横向分布及体系的影响,为混凝土梁式桥的损伤评估提供借鉴。

1 试验概况

1.1 模型梁原型选择与相似关系

在结构模型试验中,结构模型的几何尺寸确定需要综合考虑模型类型、材料、制作条件、加载能力、测点布置以及设备条件等。另外,根据所研究的内容不同,模型的缩尺比例也应不同。根据以上要求,确定模型的几何尺寸见表 1<sup>[5]</sup>。

表 1 模型与原型尺寸

项目	跨径/m	梁宽/m	梁高/m	翼缘厚/m	肋板厚/m
原型	16	1.60	1.10	0.11	0.18
模型	4	0.45	0.40	0.07	0.09

1.2 模型梁构造和编号

对于横向连接构造,横向损伤的模拟则通过横向连接钢板的不同连接情况来实现。工程实际中的桥面板钢板焊接横向连接构造,是用一块钢盖板焊在相邻两块板的预埋钢板上,连接构造的纵向中距通常为 0.80~1.50 m,预埋钢板尺寸为 80 mm×100 mm,跨中部分布置较密,向两端支点处逐渐减疏。模型中连接构造的纵向中距为 0.50 m,预埋钢板尺寸为 50 mm×60 mm,整个桥跨共 9 排<sup>[6]</sup>。桥面板横向连接构造及编号见图 1、图 2。不同位置的横向连接编号规则为:横向连接编号(1、2、3、4)-预埋钢板上下排号(铰接试验中只有 A 排)-预埋钢板纵向位置编号(1、2、3、4、5)。试验照片见图 3(见下页)。在试验的同时,混凝土梁采用 SOLID45 单元,钢板采用 SHELL63 单元,建立了仿真模型,见图 4<sup>[7]</sup>(见下页)。图 4 中,1-A-3 表示:横向连接编号为 1;预埋钢板排号为 A 排;预埋钢板纵向位置编号为 3;其余以此类推。

1.3 测试项目

对于混凝土梁桥来说,由于混凝土应变的离散较大,用实测应变结果推算结构的横向分布状态难度较大,故实测中以荷载在试验梁跨中顶面沿横桥向移动而测得的各梁体(片)的挠度来推算结构的横

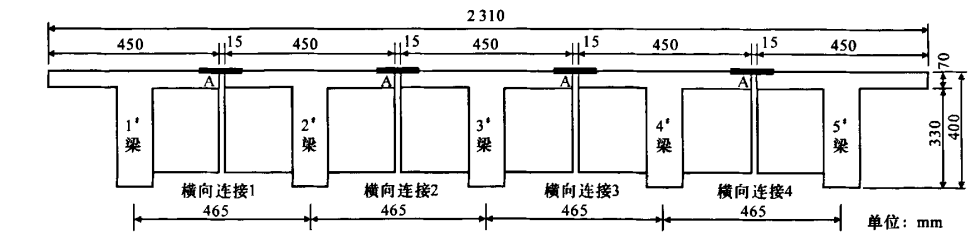


图 1 模型梁整体布置及横向位置连接编号

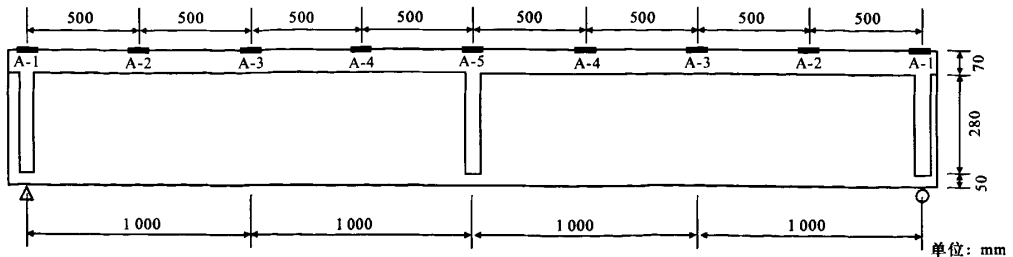


图 2 模型梁整体布置及纵向位置连接编号



图 3 模型桥试验照片

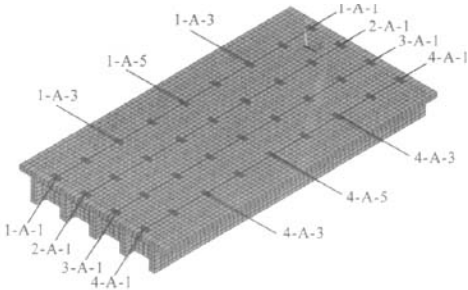


图 4 有限元模型及编号

表 2 试验工况

类型	工况	不同横向连接损伤情况	研究方式	桥梁工作状态
第一类	1	1-A-1、2-A-1、3-A-1、4-A-1 全焊	试验、数值	无裂缝
	2	1-A-1/2、2-A-1/2、3-A-1/2、4-A-1/2 全焊	试验、数值	无裂缝
	3	1-A-1/2/3、2-A-1/2/3、3-A-1/2/3、4-A-1/2/3 全焊	试验、数值	无裂缝
	4	1-A-1/2/3/4、2-A-1/2/3/4、3-A-1/2/3/4、4-A-1/2/3/4 全焊	数值	无裂缝
	5	1-A、2-A、3-A、4-A 全焊(完整)	试验、数值和理论	无裂缝
第二类	6	4-A、1-A 全焊, 2-A-4/5、3-A-4/5 损伤无焊接	试验、数值	无裂缝
	7	1-A、3-A、4-A 全焊, 2-A-4/5 损伤无焊接	试验、数值	无裂缝
	8	2-A-5、3-A-5 损伤无焊接, 其余全焊	数值	无裂缝
	9	2-A-4/5、3-A-4/5 损伤无焊接, 其余全焊	数值	无裂缝
	10	2-A-3/4/5、3-A-3/4/5 损伤无焊接	数值	无裂缝
	11	2-A-2/3/4/5、3-A-2/3/4/5 损伤无焊接	数值	无裂缝
第三类	12	1-A-4/5 损伤无焊接, 其余全焊	数值	无裂缝
	13	1-A-3/4/5 损伤无焊接, 其余全焊	数值	无裂缝
	14	1-A-2/3/4/5 损伤无焊接, 其余全焊	数值	无裂缝
	15	2-A-4/5 损伤无焊接, 其余全焊	试验、数值	无裂缝
	16	2-A-3/4/5 损伤无焊接, 其余全焊	数值	无裂缝
	17	2-A-2/3/4/5 损伤无焊接, 其余全焊	数值	无裂缝

注:1-A-1/2/3 即 1 号横向连接 A 排纵向位置 1、2 和 3 处的钢板;2-A 即 2 号横向连接 A 排所有的钢板;其余类推。

2 试验结果

试验梁随着横向连接程度的不同,单片梁分配的荷载也不断变化,为了使各工况下的荷载分配效果明显,各个工况下的荷载随着横向连接的强弱略有不同。为了使试验结果有可比性,对各片梁的挠度进行了单位化处理,即用实测挠度除以试验加载

向分布状态。同时,在梁腹板跨中底部粘贴应变片和应变计来监控加载吨数,防止梁体开裂。

1.4 试验仪器及布置

对于挠度及变形的测试,主要通过布置百分表来完成,分别在两边支座上部、1/4 跨下部、跨中下部、3/4 跨下部、梁两端和梁体两侧布置,共 31 块。

1.5 试验加载方案及工况

根据焊接方式的不同和焊接顺序的不同,共进行了 8 种工况的试验。同时,依据试验梁的数据,采用铰接梁法计算了各片梁横向分布系数影响线坐标,作为对比。在数值和试验值、理论值符合完好的基础上,利用数值进行了其他 9 种工况的研究。第一类主要是焊接试验工况,顺序为从支座向跨中对称焊接;第二类为单板受力试验,目的是研究何种程度损伤时趋于单板受力,顺序为从跨中向支座对称拆除;第三类为单个横向连接损伤,分别研究了横向连接 1、2 不同程度损伤对荷载横向分配的影响,顺序为从跨中向支座对称拆除。试验工况见表 2。

吨数。同时,各片混凝土模型梁因制作工艺误差,所以横向分配系数不是完全对称的。不同工况下 3# 梁的试验结果和有限元模拟结果见表 3(见下页)。

3 试验结果分析

3.1 第一类结果比较分析

在试验焊接顺序下,3# 梁的荷载横向分布系数影响线坐标变化见图 5(见下页)。

表 3 各工况下 3# 梁试验结果对比

加载位置		1#	2#	3#	4#	5#
工况 1	试验值	0.037 9	0.110 7	0.669 8	0.135 3	0.046 3
	模拟值	0.050 7	0.100 5	0.697 5	0.100 5	0.050 7
工况 2	试验值	0.051 8	0.126 1	0.604 9	0.154 1	0.063 3
	模拟值	0.059 4	0.137 1	0.607 0	0.137 1	0.059 4
工况 3	试验值	0.063 5	0.151 4	0.522 5	0.185 0	0.077 6
	模拟值	0.073 6	0.166 6	0.520 0	0.166 6	0.073 6
工况 5	试验值	0.072 6	0.188 4	0.420 1	0.230 2	0.088 7
	模拟值	0.086 1	0.196 1	0.435 7	0.196 1	0.086 1
	理论值	0.038 2	0.246 0	0.431 7	0.246 0	0.038 2
工况 6	试验值	0.065 6	0.140 8	0.541 4	0.172 1	0.080 2
	模拟值	0.079 1	0.151 6	0.538 6	0.151 6	0.079 1
工况 7、15	试验值	0.080 3	0.153 8	0.471 2	0.202 0	0.092 7
	模拟值	0.081 4	0.157 1	0.477 8	0.200 5	0.083 2

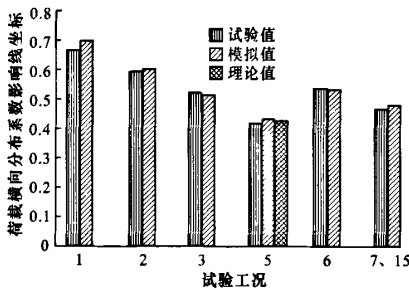


图 5 3# 梁各工况下荷载横向分布系数影响线坐标比较

通过表 3、图 5 可看出,随着横向连接程度的增强,各片主梁承担的荷载逐渐趋向于均匀,尤其当荷载作用在自身和相邻梁上时,这种变化更为明显,这些都与实际情况相符合。随着横向连接焊接从支座向跨中对称移动,各片梁横向分配系数变化率逐渐减小,端部横向连接对桥梁整体性的贡献最大。当横向连接在完全焊接时,试验值、理论值和有限元模拟值都吻合得很好;在有横向连接损伤的情况下,试验值和模拟值也比较接近。因此,在试验的基础上,可以用有限元模型进行一些其他工况的研究。

### 3.2 第二类结果比较分析

分别进行了横向损伤率同为 11.11%、2# 梁单板受力、3# 梁单板受力等不同工况的计算比较。限于篇幅,仅给出 3# 梁单板受力不同横向损失率下荷载横向分布计算结果。因为各种工况对称,所以只给出 1#、2#、3# 梁的计算结果,见表 4。

通过以上比较可看出,横向损伤率同为 11.11% 时,各种损伤对各片梁的荷载横向分配系数影响不大,最大为 5% 左右。而且这种变化也只有当荷载作用在横向连接损伤两侧的梁上才会发生。在本文 5 片模型梁的情况下,3# 梁承受的单位荷载由完整

表 4 3# 梁单板受力工况下荷载横向分布系数影响线坐标比较

项目		2/3-A-5、 2/3-A-4、 2/3-A-3 和 2/3-A-2 损伤	2/3-A-5、 2/3-A-4 和 2/3-A-3 损伤	2/3-A-5 和 2/3-A-4 损伤	2/3-A-5 损伤	完整值
加载位置	1#	0.062 5	0.069 9	0.079 1	0.084 7	0.086 1
	2#	0.096 0	0.128 1	0.161 6	0.187 2	0.196 1
	3#	0.682 9	0.604 0	0.518 6	0.456 1	0.435 7
绝对差 (与完好 值比较)		-0.023 5	-0.016 1	-0.007 0	-0.001 4	
		-0.100 1	-0.068 0	-0.034 5	-0.008 8	
		0.247 2	0.168 3	0.082 9	0.020 4	
相对值 (与完好 值比较)/ %		-27.33	-18.76	-8.12	-1.58	
		-51.04	-34.67	-17.57	-4.51	
		56.74	38.62	19.02	4.69	

注:2/3-A-5 即 2 号、3 号横向连接 A 排纵向 5 处的钢板;其余类推。  
时的 0.435 7 增加到损伤率 3/9 时的 0.518 6,再增加到损伤率 7/9 时的 0.682 9,增加了约 56.74%。即损伤率超过 5/9 时,单板受力的趋势已经十分明显。而且增加率基本是按照横向连接的强弱在均匀的变化,大约都是 19%。同样工况下,2# 梁单板受力分析与对比,也充分验证了这一规律。

### 3.3 第三类结果比较分析

为了研究不同横向连接损伤情况对结构体系及其失效模式的影响,在试验的基础上,分别模拟了横向连接 1、2 不同损伤情况对荷载横向分配的影响和有损伤情况下体系的变化情况。限于篇幅,仅给出 2# 梁单板受力不同横向损失率下荷载横向分布计算结果。横向连接 2 第三类工况下 2# 梁荷载横向分配比较见表 5。

表 5 2# 梁第三类工况下荷载横向分布系数影响线坐标比较

项目		2-A-5 损伤	2-A-5 和 2-A-4 损伤	2-A-5、 2-A-4 和 2-A-3 损伤	2-A-5、 2-A-4、 2-A-3 和 2-A-2 损伤	完好
加载位置	1#	0.223 4	0.224 6	0.224 4	0.221 9	0.222 7
	2#	0.451 5	0.482 1	0.522 8	0.563 1	0.441 2
	3#	0.186 4	0.157 3	0.118 6	0.079 2	0.196 3
	4#	0.082 6	0.079 2	0.073 9	0.067 5	0.083 6
	5#	0.056 2	0.056 8	0.060 3	0.068 3	0.056 2
绝对差 (与完好 值比较)		0.000 6	0.001 8	0.001 6	-0.000 9	
		0.010 3	0.040 9	0.081 6	0.121 9	
		-0.009 9	-0.039 0	-0.077 7	-0.117 1	
		-0.001 0	-0.004 4	-0.009 7	-0.016 1	
		0.000 0	0.000 6	0.004 1	0.012 1	
相对值 (与完好 值比较)/ %		0.29	0.82	0.72	-0.39	
		2.33	9.28	18.50	27.63	
		-5.05	-19.86	-39.57	-59.63	
		-1.21	-5.25	-11.59	-19.24	
		0.01	1.11	7.36	21.52	

注:2-A-5 即 2 号横向连接 A 排纵向位置 5 处的钢板;其余类推。

从以上对比和计算可以看出,在5片梁的情况下,横向连接2发生损伤,当荷载作用在2#梁上时,随着横向连接的不断减弱,2#梁承受的单位荷载越来越大,从完好状态时的0.4412增加到损伤率33.33%时的0.4821,再增到损伤率77.78%时的0.5631,增加了约27.53%。而当荷载作用在3#梁上时,随着横向连接的减弱,2#梁承受的单位荷载越来越小,从完好状态时的0.1963增加到损伤率33.33%时的0.1573,再增到损伤率77.78%时的0.0792,减少了约59.63%,显然,这两种情况下变化的绝对值相差不大。当荷载作用在其他梁时(即与损伤横向连接相隔的梁),2#梁的荷载横向分布系数影响线坐标的影响在绝对值上很小。横向连接2发生损伤时,3#梁的荷载横向分布系数影响线坐标的影响与2#梁类似,荷载作用在2#梁和3#梁上时影响最大,荷载作用在其他梁上时影响很小。但是1#梁、4#梁和5#梁的荷载横向分布系数影响线坐标,不论荷载作用在什么位置,其影响绝对值都很小。在同样工况下,横向连接1的分析与对比,也是如此。以上分析说明,在铰接状态下,横向连接损伤只对与损伤横向连接相邻梁的影响最大,对相隔梁的影响很小,对其他梁的影响几乎没有。

在5片梁铰接完好状态下,当荷载作用在其中1片梁上时,以这片梁为中心相邻的3片梁的荷载横向分布系数影响线坐标之和占到全部的80%以上。而当荷载作用于边梁,则相邻2片梁的荷载横向分布系数影响线坐标之和占到全部的80%以上,相邻3片梁的影响线坐标之和占到全部的90%以上。因此主要是相邻的3片梁来承担荷载,所以在连接损伤情况下,除了相邻梁的荷载横向分布系数影响线坐标变化较大外,其他横向连接完好梁仍然保持铰接状态下横向分布系数影响线坐标。

## 4 结 语

(1)采用钢板焊接不同的连接方式,模拟实际的横向连接损伤是可行的;在5片梁的情况下,横向连接损伤只对与损伤横向连接相邻梁的影响最大,对相隔梁的影响很小,对其他梁的影响几乎没有。

(2)在5片模型梁的情况下,在横向损伤率同为11.11%时,各种损伤对各片梁的荷载横向分配系数影响不大,最大为5%左右;当横向连接损伤率达到55.55%时,单板受力的现象已经十分严重;本文各种工况的试验和计算结果,可为实际的铰接梁承载能力评估和加固提供定量的评判标准。

(3)在5片梁铰接完好状态下,当荷载作用在其中1片梁上时,以其为中心相邻的3片梁的荷载横向分布系数影响线坐标之和占到80%以上;说明主要是相邻的3片梁来承担荷载,所以在连接损伤情况下,除了相邻梁的荷载横向分布系数影响线坐标变化较大外,其他横向连接完好梁仍然保持铰接状态下荷载横向分布系数影响线坐标;试验结果可为损伤状态下的铰接梁体系可靠性评估提供借鉴。

## 参考文献:

### References:

- [1] 梁志广,张 勇,刘建磊.装配式T梁横隔板病害及加固[J].中国市政工程,2007(5):92-94.  
LIANG Zhi-guang, ZHANG Yong, LIU Jian-lei. Disease and reinforcement of the diaphragm of fabricated T-beam bridges [J]. China Municipal Engineering, 2007(5):92-94.
- [2] 洪 帆,韩劲龙,姜增国.在役桥梁结构横向连接状态的评价方法研究[J].交通科技,2007(5):12-14.  
HONG Fan, HAN Jin-long, JIANG Zeng-guo. Research on assessment method of transversal connection of existing bridges[J]. Transportation Science & Technology, 2007(5):12-14.
- [3] 秦禄生.重载条件下小跨径简支板桥的横向铰接能力分析[J].公路,2007(10):14-16.  
QIN Lu-sheng. Analysis on transverse hinged ability of small-span simple supported slab bridge under heavy loads[J]. Highway, 2007(10):14-16.
- [4] 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,2004,28(2):229-231,251.  
CHENG Chen, SHEN Cheng-wu, XU Liang. The hinged-jointed plate method for calculating transverse load distribution on a damaged bridge[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering, 2004, 28(2):229-231, 251.
- [5] 章关永.桥梁结构试验[M].北京:人民交通出版社,2002.
- [6] 范立础.桥梁工程[M].北京:人民交通出版社,2001.
- [7] 任 伟,赵 煜,栾好发.钢板加固持荷RC梁承载力数值分析方法[J].交通运输工程学报,2007,7(6):96-100.  
REN Wei, ZHAO Yu, LUAN Hao-fa. Numerical method of bearing capacity for preloaded RC beam strengthened by bonding steel plates[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(6):96-100.