

# 受超高车辆撞击的钢筋混凝土空心板桥 抗弯承载力评定<sup>\*</sup>

陈刚<sup>1</sup>, 郭学庆<sup>1</sup>, 吕松刚<sup>1</sup>, 李星<sup>2</sup>

(1.邵阳县公路建设养护中心, 湖南 邵阳 422100; 2.长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:** 科学评定受超高车辆撞击的桥梁抗弯承载力, 为制订桥梁维修加固方案提供理论依据具有十分重要的意义。文中以某座受超高车辆撞击的钢筋混凝土空心板桥为例, 基于受撞后桥梁的材质状况和状态参数检测结果, 通过有限元软件 MIDAS/Civil 进行数值模拟, 对钢筋混凝土空心板的抗弯承载力进行评定, 计算结果表明空心板的抗弯承载力不满足设计荷载标准要求。

**关键词:** 桥梁; 钢筋混凝土空心板桥; 超高车辆; 撞击; 抗弯承载力

中图分类号: U446.2

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2022)04-0116-04

跨线立交桥是现代交通的重要组成部分。由于驾驶员的违章驾驶、粗心大意或路政管理体系不健全忽略了路段超高限制, 车辆在立体交叉处撞击立交桥上部结构的事故屡有发生。已有学者对桥梁结构受撞现象进行了研究, 如水涛等通过模型试验和有限元模拟得出钢筋混凝土 T 梁桥在超高车辆撞击下可能产生局部破坏; 周杰峰、陆新征等通过车—梁撞击模型进行非线性有限元分析, 得出车—桥碰撞损伤取决于车辆的刚度和撞击冲量大小, 车辆刚度一定的情况下, 汽车撞击冲量越大, 对主梁损伤也越大; 王向阳等对车—桥墩碰撞进行了有限元模拟分析; 段敏等对船舶撞击桥梁的分析方法进行了归纳总结。上述研究均仅限于理论计算。该文依托一座受超高车辆撞击的钢筋混凝土空心板桥, 根据实测技术参数, 通过 MIDAS/Civil 模拟, 评估其受损后抗弯承载力, 为受超高车辆撞击的桥梁抗弯承载力评定提供借鉴。

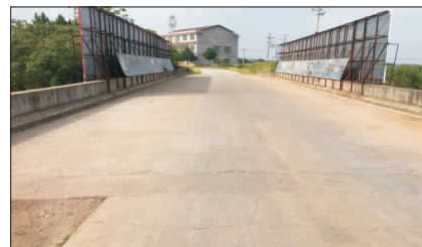
## 1 工程概况

某桥上部结构为 13 m+16 m+13 m 三跨钢筋混凝土简支空心板, 全长 49.4 m, 桥面宽度为 0.5 m 栏杆+8.0 m 行车道+0.5 m 栏杆=9.0 m (见图 1)。每跨由 9 片空心板组成, 每片空心板的宽度和高度分别为 99.5 cm、70 cm, 采用 C40 混凝土。空心板尺寸见图 2。桥梁下部结构为双柱式桥墩, 浆砌块

石台身及钢筋混凝土台帽重力式桥台。桥梁荷载等级为公路—II 级。



(a) 立面布置



(b) 平面布置

图 1 桥型布置

## 2 桥梁材质状况和状态参数检测

依据 JTG/T J21—2011《公路桥梁承载能力检测评定规程》、JTG 3362—2018《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》对该桥第 2 跨钢筋混凝土空心板的材质状况和状态参数进行检测。

### 2.1 桥梁受损情况

该桥第 2 跨受桥下通行超高车辆撞击, 造成

<sup>\*</sup> 基金项目: 长沙市自然科学基金项目(kq2202208); 湖南省教育厅科学研究一般项目(20C0063); 湖南省教育厅科学研究创新平台开放基金项目(20K005)

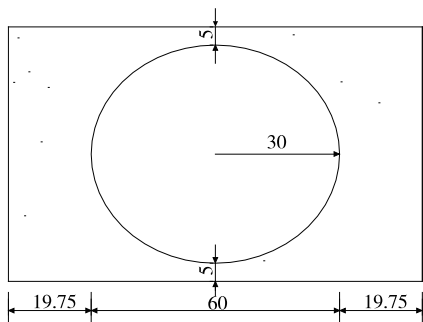


图 2 空心板尺寸示意图(单位:cm)

2—9# 空心板断裂(见图 2),纵向距离 1# 桥墩 0.50~15.50 m 处、横向距离 2—8# 与 2—9# 空心板之间铰缝 0.0~0.99 m 处底板混凝土剥落,最大深度为 50 cm,且有 8 处主筋和 62 处箍筋外露、锈蚀和断裂,主筋、箍筋露筋长度分别为 1.30~15.00 m、0.08~0.85 m。



图 3 受撞后 2—9# 空心板损伤情况

2.2 混凝土及钢筋强度

使用回弹仪对第 2 跨钢筋混凝土空心板的混凝土强度进行检测,测试 10 个测区,第 2 跨空心板的混凝土强度实测平均值和实测推定值分别为 54.0 MPa、51.3 MPa。空心板设计采用 C40 混凝土,第 2 跨空心板的混凝土平均强度匀质系数  $K_{bm}$  和推定强度匀质系数  $K_{bt}$  分别为 1.35、1.28,混凝土强度状态为良好,评定标度值为 1。

在 2—9# 空心板被撞破损底面截取 2 根纵向主钢筋,量测其直径,直径平均值为 25.0 mm。对钢筋进行拉伸试验,第 1 根钢筋的屈服强度、极限强度分别为 342.6 MPa、536.0 MPa,第 2 根钢筋的屈服强度、极限强度分别为 343.2 MPa、538.4 MPa。

2.3 混凝土保护层厚度和碳化深度

采用钢筋扫描仪对第 2 跨空心板进行混凝土保护层厚度检测,每片空心板检测 10 个测点;采用酚酞溶剂和游标卡尺对第 2 跨空心板进行碳化深度检测,每片空心板检测 1 个测点。检测结果见表 1。

表 1 混凝土保护层厚度和碳化深度检测结果

| 空心板<br>编号 | 混凝土保护层厚度/mm |     |      |              | 碳化深<br>度/mm |
|-----------|-------------|-----|------|--------------|-------------|
|           | 最大值         | 最小值 | 平均值  | 特征值 $D_{ne}$ |             |
| 2—1#      | 23          | 14  | 18.7 | 13.1         | 2.0         |
| 2—2#      | 25          | 14  | 19.3 | 13.3         | 1.5         |
| 2—3#      | 30          | 14  | 20.4 | 12.4         | 2.0         |
| 2—4#      | 26          | 16  | 22.3 | 17.4         | 1.5         |
| 2—5#      | 30          | 20  | 24.0 | 18.7         | 2.0         |
| 2—6#      | 30          | 14  | 20.5 | 12.8         | 1.5         |
| 2—7#      | 25          | 15  | 19.1 | 13.2         | 1.5         |
| 2—8#      | 28          | 15  | 19.7 | 13.4         | 1.5         |
| 2—9#      | 23          | 13  | 17.8 | 13.1         | 2.0         |

空心板的混凝土保护层厚度设计值为 30 mm。由表 1 可知:该桥第 2 跨空心板的混凝土保护层厚度特征值  $D_{ne}$ /设计值  $D_{nd}$  为 0.41~0.62,对结构钢筋耐久性有较大影响,混凝土保护层厚度评定标度值为 5;混凝土碳化深度实测值均远小于混凝土保护层厚度实测值,评判标度值为 1。

此外,采用钢筋扫描仪对第 2 跨空心板的纵向主钢筋数量及间距进行检测,每片空心板的主钢筋数量为 12 根,其中底缘第 1 层为 10 根,相邻钢筋中心间距为 10 cm,两侧主钢筋上方各叠放 1 根。

2.4 钢筋锈蚀电位

采用钢筋锈蚀检测仪对第 2 跨空心板进行钢筋锈蚀电位检测,共检测 25 个测点,检测结果见表 2。

表 2 第 2 跨空心板钢筋锈蚀电位检测结果

| 测点号 | 电位水<br>平/mV | 测点 | 电位水<br>平/mV | 测点 | 电位水<br>平/mV |
|-----|-------------|----|-------------|----|-------------|
| 1   | -312        | 10 | -360        | 19 | -358        |
| 2   | -361        | 11 | -350        | 20 | -362        |
| 3   | -350        | 12 | -340        | 21 | -320        |
| 4   | -356        | 13 | -337        | 22 | -333        |
| 5   | -352        | 14 | -357        | 23 | -354        |
| 6   | -305        | 15 | -362        | 24 | -363        |
| 7   | -388        | 16 | -363        | 25 | -370        |
| 8   | -342        | 17 | -321        |    |             |
| 9   | -350        | 18 | -301        |    |             |

由表 2 可知:第 2 跨空心板钢筋锈蚀电位的评定标度值为 3,有锈蚀活动性,且发生锈蚀的概率大于 90%。

2.5 桥梁结构自振频率

通过计算,第 2 跨空心板的理论计算频率  $f_{di}$  为 5.107 0 Hz。在第 2 跨空心板跨中截面桥面上布置加速度传感器测试自振频率,结果见图 4。

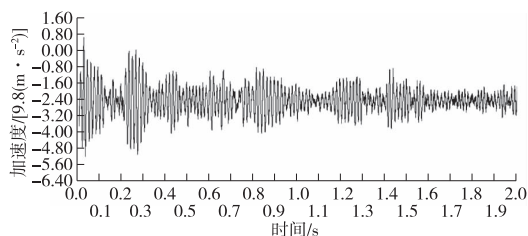


图4 第2跨空心板实测自振频率测试结果

由图4可知:第2跨空心板实测自振频率 $f_{mi}$ 为6.660 5 Hz, $f_{mi}$ 与 $f_{di}$ 的比值为1.30,自振频率评定标度值为1。

### 3 桥梁技术状况评定

根据JTJ/T H21—2011《公路桥梁技术状况评定标准》,当主要部件评分达到4类或5类且影响桥梁安全时,可按照桥梁主要部件最差全损状况评定。2—9#空心板被车撞击后发生断裂,主要部件空心板达到5类且影响结构安全,按照桥梁主要部件最差缺损状况评定为5类桥。

## 4 基于检测结果的抗弯承载力评定

### 4.1 系数计算

该桥处于干燥、不冻、无侵蚀性介质的环境条件,依据JTJ/T J21—2011《公路桥梁承载能力检测评定规程》,混凝土电阻率和氯离子含量根据实桥情况可不检测,评定标度值取1。使用线性内插法对第2跨空心板的承载力检算系数 $Z_1$ 、承载力恶化系数 $\xi_e$ 、配筋混凝土结构截面折减系数 $\xi_c$ 和钢筋截面折减系数 $\xi_s$ 进行计算或确定,结果见表3~5。

表3 承载力检算系数 $Z_1$ 计算

| 检测指标 | 权重值<br>$\alpha_j$ | 评定标<br>度值 $D_j$ | 综合评<br>定度 $D$ | 承载力检<br>算系数 $Z_1$ |
|------|-------------------|-----------------|---------------|-------------------|
| 缺损状况 | 0.4               | 5               |               |                   |
| 材质强度 | 0.3               | 1               | 2.6           | 1.04              |
| 自振频率 | 0.3               | 1               |               |                   |

表4 承载力恶化系数 $\xi_e$ 计算

| 检测指标    | 权重值<br>$\alpha_j$ | 评定标<br>度值 $E_j$ | 标度值<br>$E$ | 承载力恶<br>化系数 $\xi_e$ |
|---------|-------------------|-----------------|------------|---------------------|
| 缺损状况    | 0.32              | 5               |            |                     |
| 钢筋锈蚀电位  | 0.11              | 3               |            |                     |
| 混凝土电阻率  | 0.05              | 1               |            |                     |
| 混凝土碳化状况 | 0.20              | 1               | 2.86       | 0.046               |
| 钢筋保护层厚度 | 0.12              | 4               |            |                     |
| 氯离子含量   | 0.15              | 1               |            |                     |
| 混凝土强度   | 0.05              | 1               |            |                     |

表5 截面折减系数 $\xi_c$ 、 $\xi_s$ 计算

| 项目                   | 检测指标       | 权重<br>值 $\alpha_j$ | 标度<br>值 $R_j$ | 综合评定<br>标度 $R$ | 折减<br>系数 |
|----------------------|------------|--------------------|---------------|----------------|----------|
| 结构截面折<br>减系数 $\xi_c$ | 材料风化       | 0.1                | 1             |                |          |
|                      | 混凝土碳化      | 0.35               | 1             | 3.20           | 0.914    |
|                      | 物理及化学损伤    | 0.55               | 5             |                |          |
| 钢筋截面<br>折减系数 $\xi_s$ | 主梁部分截面锈胀露筋 |                    |               | 3.00           | 0.950    |

### 4.2 抗弯承载力评定计算公式

配筋混凝土桥梁承载能力极限状态鉴定方法规定的承载力计算公式为:

$$\gamma_0 S \leq R(f_d, \xi_c a_{dc}, \xi_s a_{ds}) Z_1 (1 - \xi_e) \quad (1)$$

式中: $\gamma_0$ 为结构的重要性系数; $S$ 为荷载效应函数; $R(\cdot)$ 为抗力效应函数; $f_d$ 为材料强度设计值; $a_{dc}$ 为构件混凝土几何参数值; $a_{ds}$ 为构件钢筋几何参数值。

### 4.3 有限元模型建立

采用铰接板法计算汽车荷载的横向分布系数,得2—1#~2—9#空心板的荷载横向分布系数分别为0.247、0.247、0.245、0.242、0.236、0.242、0.245、0.247、0.247。选取受力最不利的2—9#空心板进行分析,采用MIDAS/Civil建立有限元计算模型,采用梁单元模拟,划分为32个单元、35个节点(见图5)。边界条件如下:一端为铰接支座,另一端为活动支座。

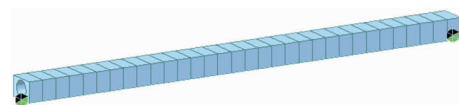


图5 有限元计算模型

### 4.4 计算结果分析

根据JTJ 3362—2018《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》、JTJ D60—2015《公路桥涵通用设计规范》对2—9#空心板的承载能力极限状态进行组合,在公路—II级荷载作用下,荷载效应组合弯矩包络图见图6。采用 $Z_1$ 、 $\xi_e$ 、 $\xi_c$ 、 $\xi_s$ 对抗弯承载力进行修正,2—9#空心板跨中截面的抗弯承载力分析结果见表6。

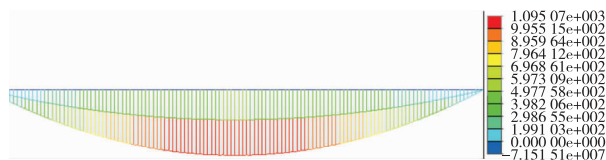


图6 2—9#空心板承载能力极限状态下弯矩包络图

(单位:kN·m)

表 6 2—9# 空心板跨中截面抗弯承载力分析结果

| 组合名称         | 类型     | 组合效应<br>值/(kN·m) | 抗力容许<br>值/(kN·m) | 验算  |
|--------------|--------|------------------|------------------|-----|
| 最大弯矩<br>组合效应 | MY-MAX | 1 060.17         | 769.92           | 未通过 |
| 最小弯矩<br>组合效应 | MY-MIN | 387.11           | 769.92           | 通过  |

由表 6 可知:在最大弯矩组合效应作用下,2—9# 空心板的正截面抗弯承载力抗力容许值小于组合效应值,表明该桥第 2 跨空心板的正截面抗弯承载力不满足公路—Ⅱ级荷载要求。

5 结论

(1) 对某钢筋混凝土简支空心板受超高车辆撞击后的材质状况和状态参数进行检测,基于检测结果评定该桥技术状况等级为 5 类。

(2) 采用有限元软件 MIDAS/Civil 对该桥受超高车辆撞击后的钢筋混凝土空心板抗弯承载力进行评定,结果表明该桥空心板的抗弯承载力不满足公路—Ⅱ级设计荷载要求。

参考文献:

[1] 田力,冯振宇.超高车辆撞击预应力箱型梁桥上部结构的动态响应[J].西南交通大学学报,2016,51(4):632—638.

[2] 何水涛,陆新征,卢啸,等.超高车辆撞击钢筋混凝土 T 梁桥主梁试验研究[J].兰州交通大学学报,2011,30(6):20—25.

[3] 周杰峰.集装箱车辆与跨线桥梁的碰撞响应分析[J].城市道桥与防洪,2019(1):162—164+170.

[4] 陆新征,张炎圣,何水涛,等.超高车辆撞击桥梁上部结构研究:损坏机理与撞击荷载[J].工程力学,2009,26(增刊 2):115—125.

[5] 王向阳,吴琼.城市跨线桥梁的车—桥墩碰撞模拟分析[J].公路与汽运,2017(5):142—145.

[6] 段敏,王银辉,袁伟东.船舶撞击桥梁分析方法探讨[J].公路与汽运,2015(6):137—142.

[7] 交通运输部公路科学研究院.公路桥梁技术状况评定标准:JTG/T H21—2011[S].北京:人民交通出版社,2011.

[8] 交通运输部公路科学研究院.公路桥梁承载能力检测评定规程:JTG/T J21—2011[S].北京:人民交通出版社,2011.

[9] 中交公路规划设计院有限公司.公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范:JTG 3362—2018[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.

[10] 中交公路规划设计院有限公司.公路桥涵通用设计规范:JTG D60—2015[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.

收稿日期:2021—11—27

\*\*\*\*\*

(上接第 115 页)

结果的比值为 0.73~2.61。

由于刚度等效仅考虑了波纹钢板抗弯刚度的等效,采用刚度等效方法能较准确地获得埋置式波纹钢板拱顶的位移与弯曲应力。但埋置式波纹钢结构会与土体发生相互作用产生轴力,还应进一步研究与土体—波纹钢相互作用有关的其他刚度等效。

参考文献:

[1] American Association of State Highway and Transportation Officials.AASHTO LRFD bridge design specifications,5th Edition[S].Washington DC:American Association of State Highway and Transportation Officials,2010:1634.

[2] Canadian Standards Association International.Canadian highway bridge design code:CAN/CSA—S6—06[S].

Canadian Standards Association International, Mississauga, Ontario, 2006:930.

[3] 常福清,袁帅.正弦波纹板第二主刚度的补正[J].机械强度,2010,32(2):320—323.

[4] 常福清,和梦欣,张晖辉.正弦波纹板第二主刚度的数值拟合[J].科技通报,2017,33(1):6—9.

[5] 冯岩.凹凸板结构弯曲刚度等效及力学特性研究[D].秦皇岛:燕山大学,2019.

[6] 张敏,李百建.波纹钢板截面几何性质计算[J].科学技术与工程,2012,12(10):2400—2403.

[7] 李百建,符铎砂,朱良生.基于刚度等效的钢波纹板—减压板力学特性研究[J].华南理工大学学报(自然科学版),2018,46(9):131—139.

[8] 李百建,朱良生,符铎砂.基于刚度等效的钢波纹板叠合梁结构数值分析[J].华南理工大学学报(自然科学版),2018,46(12):111—120.

收稿日期:2021—05—27