

撞击模拟分析在桥梁船撞安全性评估中的实践

林敏¹, 米孝生²

(1. 广东省交通规划设计研究院集团股份有限公司, 广东 广州 510507; 2. 广东省建筑设计研究院集团股份有限公司, 广东 广州 510100)

摘要: 桥梁梁体遭受船舶撞击后, 迅速而准确地进行损伤后安全性评估是制定维修加固措施的基础。以国内某连续箱梁桥为例, 通过撞击模拟分析方法进行了梁体船撞损伤后的安全性评估, 结合工程实践对评估方法进行总结。首先根据规范公式确定了船撞力, 以箱梁实际碰撞剪切破坏长度进行了验证; 然后通过数值方法模拟了船舶与桥梁的碰撞过程, 确定了箱梁腹板的撞击损伤影响范围, 分析了腹板和钢束损伤对梁体受力重分配等方面的影响; 最后根据撞击模拟分析的结果进行了桥梁结构安全性评估。提出的撞击模拟分析方法能够真实还原桥梁梁体遭受船舶撞击后的变化历程, 并准确反映梁体的真实受损情况, 可以作为下一步制定维修加固方案的理论依据。

关键词: 撞击模拟分析; 受损影响范围; 受力重分配; 安全性评估

中图分类号: U441+.5

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)05-0299-06

Practical Application of Impact Simulation Analysis in Bridge-ship Collision Safety Assessment

LIN Min¹, MI Xiaosheng²

(1. Guangdong Communication Planning and Design Institute Group Co., Ltd., Guangzhou 510507, China; 2. Guangdong Architectural Design and Research Institute Group Co., Ltd., Guangzhou 510100, China)

Abstract: After the bridge girder is hit by ship, the rapid and accurate safety assessment of the girders is the basis for preparing the maintenance and reinforcement measures. Taking a continuous box girder bridge in China as an example, the safety assessment of the girders after ship collision is carried out through the impact simulation analysis methods, and the assessment method is summarized in combination with the engineering practice. Firstly, based on the formula of the specification, the ship collision force is determined to verify the actual collision and shear failure length of the box girder. Then, the collision process of ship and bridge is simulated by numerical methods to determine the impact range of the collision damage on the web plate of the box girder. And the impact of the web plate and steel bundle damage on the force redistribution of the girder is analyzed. Finally, based on the results of the impact simulation analysis, the safety of the bridge structure is assessed. The proposed impact simulation analysis method can truly restore the change process of the bridge girder after being hit by a ship and accurately reflect the real damage situation of the girder, which can be used as a theoretical basis for the next step of preparing the maintenance and reinforcement schemes.

Keywords: impact simulation analysis; damage impact range; force redistribution; safety assessment

0 引言

船舶与桥梁之间的撞击事件常常导致桥梁结构的损坏, 这不仅对桥梁自身的完整性和使用寿命构成威胁, 甚至会引发重大安全隐患, 与此同时, 交通中断和紧急维修工作也会带来不良的社会影响和巨大的经济损失。事件发生后, 迅速而准确地评估桥

梁受损情况至关重要, 是确定采取进一步措施以确保公共安全和恢复交通的基础。本文结合实际工程案例, 重点分析撞击模拟分析在桥梁受损安全性评估中的实践应用, 通过数值模拟分析的方法来模拟船舶与桥梁的碰撞过程反映真实的受损情况, 并还原桥梁在撞击事件中所经历的变化, 以便准确评估桥梁结构的损伤程度和安全性能。通过撞击模拟分析, 能够更有针对性的制定应急处理措施及维修、加固方案, 以最大程度地减少损失并保障公众的安全。

收稿日期: 2024-07-10

基金项目: 中国博士后科学基金面上资助项目(2021M690742)

作者简介: 林敏(1973—), 女, 学士, 高级工程师, 从事路桥设计工作。

1 工程概况

某大桥于1984年建成通车,主桥桥跨布置为(73.5+90+73.5)m三跨先简支后结构连续预应力混凝土连续箱梁,桥梁全宽14.5 m。主桥箱梁横断面采用双箱单室,根部梁高为5.35 m,跨中梁高3.0 m,如图1所示。箱梁预制宽度顶板为6.2 m,底宽为2.30~3.0 m,两箱间为1.8 m的现浇行车道板;箱梁纵向分为边部梁、根部梁、中部梁三种,接头布设在反弯点附近,预制长度分为33 m(根部梁)和57 m(中、边部梁)两种。预应力钢丝束由24根直径为5 mm的高强钢丝组成,用钢制锥形锚具(弗氏锚)锚固。

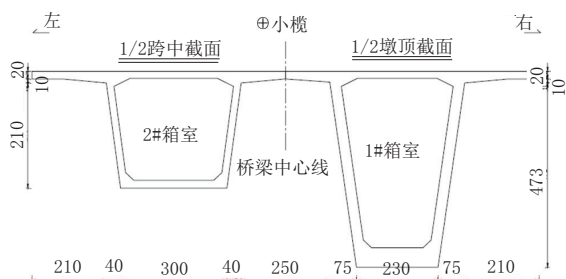
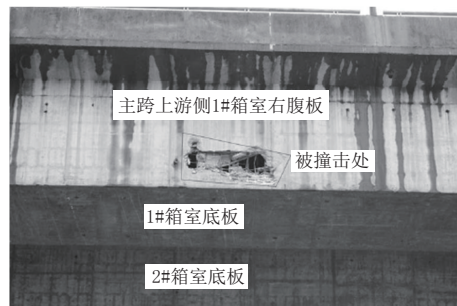


图1 主桥横断面布置图(单位:cm)

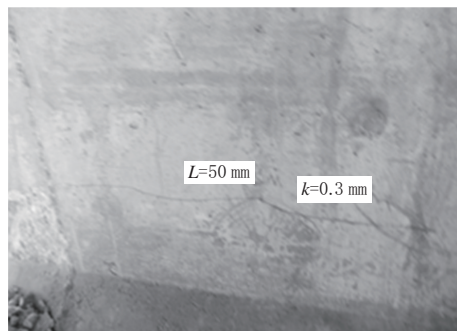
大桥因船只碰撞导致主跨腹板下部出现较大面积穿孔现象。根据事故检测报告,本次船只撞击点位于主桥主跨上游侧1#箱室右腹板下部,距跨中4.7 m处,产生的主要病害如下。

(1)撞击点处箱梁腹板混凝土破损严重,并穿孔剥落。箱内:受损面积为320 cm×110 cm;被撞孔洞两侧下部各有一条纵向裂缝,长分别为100、280 cm,宽分别为0.1、0.3 mm。箱外:箱外破损面积为270 cm×150 cm,破损位置周边伴有少数撞击所致的混凝土碎裂裂缝,裂缝长度较短,最长为50 cm。破损处下部距箱外底板25 cm处有一条裂缝,长50 cm,宽0.25 mm;右侧有4条裂缝,长度10~50 cm,宽度介于0.2~0.3 mm。撞击处箱梁腹板混凝土病害如图2所示。

(2)撞击处有4根腹板预应力钢束断开,钢束断开。此外,在腹板与底板交接的倒角处有2条钢束束波纹管破损,破损长度分别为50 cm和35 cm,破损处可见波纹管内混凝土注浆脱落,其上面一根预应力钢绞线外露5根钢丝,其中2束轻微碰损弯曲,但未见明显断开;下面一根预应力钢绞线外露4根钢丝,并未见明显弯曲、断裂除了撞击点附近注浆因碰撞而导致轻微松脱外,其余外露的波纹管管道注



(a)被撞击处梁体



(b)撞击处梁体裂缝

图2 撞击处箱梁腹板混凝土病害示意图

浆饱满。撞击处预应力钢束受损情况如图3所示。



(a) Z1至Z4钢束受损情况



(b) Z3、Z4钢束受损情况

图3 撞击处预应力钢束受损示意图

该次撞击对主梁造成了严重损伤,亟须对桥梁结构进行安全性评估,为后续维修加固及运营决策提供依据。由于大面积削弱了上部结构箱梁截面和预应力钢束,除了需对受损结构进行整体分析,还需要重点分析梁体穿孔周边混凝土的受损程度和影响范围以及梁体穿孔及受损钢束对梁体受力重分配等因素的影响,上述因素影响到受损桥梁安全性评估的准确性以及维修加固方案的合理性。

2 梁体穿孔周边混凝土受损程度及影响范围评估

该案例通过模拟分析船撞击力作用下位移及应力效应,还原撞击瞬间真实状况来评估梁体穿孔周边混凝土受损程度及影响范围。

2.1 船撞击力的取值

根据现场踏勘及基础资料收集情况,确定撞击时的船速、水流流速等参数取值。船速:据船员介绍,撞击船舶在距离大桥约 1 000 m 时,发现无法通过大桥,“船在离大桥约 400 m 时已经停船了,然后在约 300 m 处开始倒船,但受水流影响,还是碰到了桥。”“在与桥发生碰撞时,船的速度已经非常小了,当时在船舱里面都感觉不到震动。”海事人员估计该船平均速度为 6~7 节,约 3.1~3.6 m/s。偏安全计,取撞击当时船速度 1.0 m/s。

流速:缺乏桥址附近水流资料,参考下游约 18 km 附近水文站资料,“98.6”洪水落急平均流速 1.7~2.1 m/s;“99.7”中水落急平均流速 1.2~1.5 m/s,取当时流速 1.5 m/s。

船舶吨位:撞击船舶为起重船,排水量总吨位为 1 057 t,净吨 317 t,起重机重 200 t,固定压载 80 t,发生船撞时为空载合计重量 597 t,考虑不利因素取 DWT=800 t。

对比现行《公路桥梁抗撞设计规范》(JTG/T 3360-02—2020)^[1]和美国《公路桥梁船撞设计指南》计算船舶撞击力,美国指南给出的撞击力偏更不利。因此,该案例参照美国指南公式计算船对上部结构的撞击力 P_{DH} ,同时以箱梁检测混凝土强度剪切破坏值进行验证。

$$\begin{aligned} P_{DH} &= R_{DH} P_s \\ R_{DH} &= 0.2 - 0.10 \times DWT / 100\,000 = 0.199\,2; \\ P_s &= 1.2 \times 10^5 V \sqrt{DWT} \\ &= 1.2 \times 10^5 \times (1.5 + 1.0) \times \sqrt{800} = 84.9 \times 10^5 \text{ N} \\ P_{DH} &= 1\,690 \text{ kN}。 \end{aligned}$$

根据检测报告,受损箱梁混凝土强度评定值为 48.2 MPa,按照剪切破坏长度,计算出剪切力 V 为 1 813 kN,与美国规范公式计算船撞击力接近。

2.2 模拟分析主要结果

根据上述船撞击力取值计算结果,按照实际 2 个撞击点距离 1.5 m 进行加载,利用 ANSYS 建立有限元分析模型,模拟船撞击瞬间梁体受力状况,计算

模型如图 4 所示。分析撞击部位及影响区域主要应力情况如下。

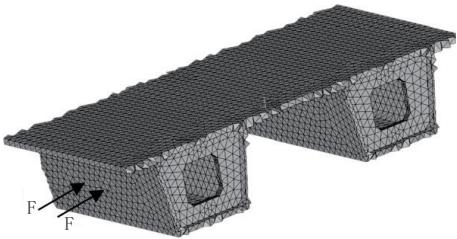


图 4 模型加载示意图

(1)位移分布情况如图 5 至图 7 所示,分析结果揭示,撞击处纵向约 2 m 区域内箱梁横向位移 7.1 mm,竖向和纵向位移小于 0.6 mm。

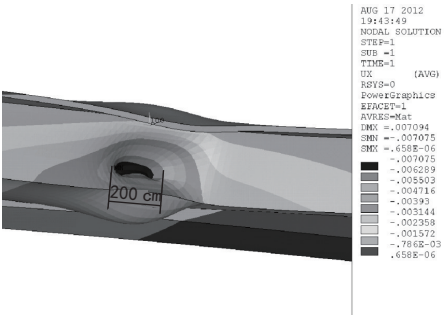


图 5 横桥向位移 D_x (单位:m)

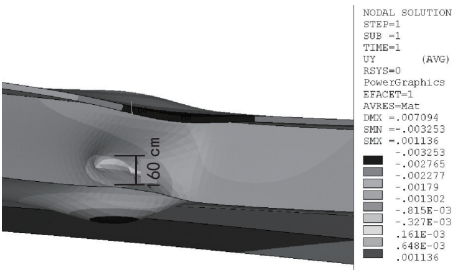


图 6 竖向位移 D_y (单位:m)

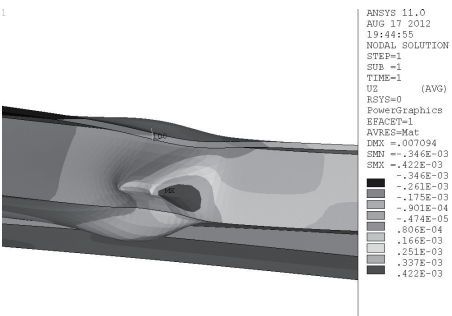
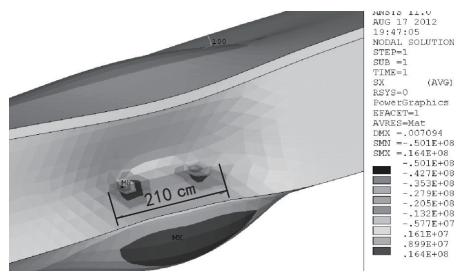
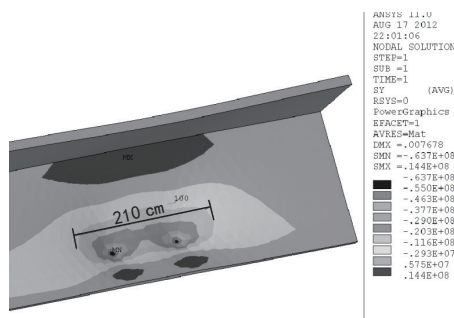
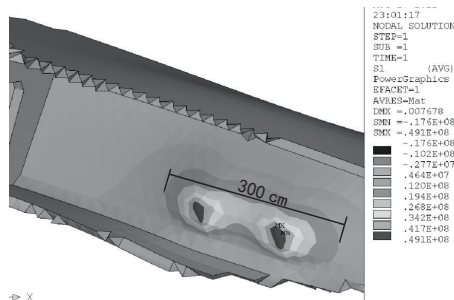
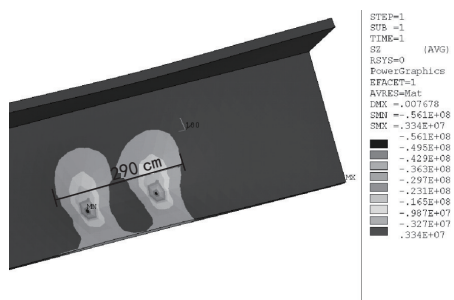
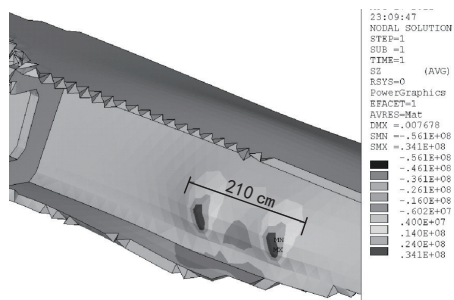
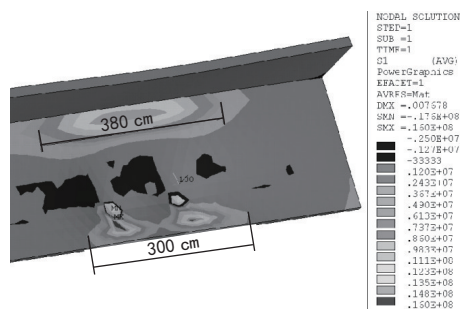
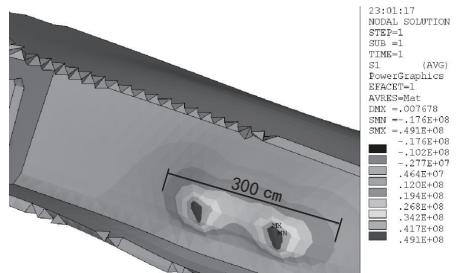


图 7 纵桥向位移 D_z (单位:m)

(2)撞击力影响区域应力分布情况如图 8 至图 14 所示,分析结果揭示内外侧横桥向、竖向、纵向均出现较大局部正应力和主拉应力,远超规范容许值。

2.3 主要结论

通过上述模拟撞击力作用分析,撞击力引起弯

图8 外侧横桥向正应力 S_x (单位: N/m)图9 外侧竖向正应力 S_y (单位: N/m)图10 内侧竖向正应力 S_y (单位: N/m)图11 外侧纵桥向正应力 S_z (单位: N/m)图12 内侧纵桥向正应力 S_z (单位: N/m)图13 外侧主拉应力 S_1 (单位: N/m)图14 内侧主拉应力 S_1 (单位: N/m)

在竖向和纵向双向弯曲作用下混凝土及普通钢筋受拉破坏。主要分析结论如下。

(1) 撞击处纵向约 2 m 区域内箱梁横向位移 7.1 mm, 竖向和纵向位移均小于 0.6 mm。

(2) 横向应力局部应力最大值为 42.7 MPa 压应力, 箱梁底板底面与腹板交接处约 2.1 m 范围内产生 16.4 MPa 拉应力。拉应力远超规范^[2]容许值 2.45 MPa。

(3) 外侧竖向应力局部应力最大值为 55 MPa 压应力, 腹板与顶板交接处 3 m 范围内产生 14.4 MPa 拉应力, 内侧竖向应力局部应力最大为 19.4 MPa 拉应力。拉应力均远超规范容许值。

(4) 外侧纵向应力撞击点的局部应力为 49.5 MPa 压应力, 其余部分应力为 3.4 MPa 拉应力, 超过规范容许值; 内侧纵向应力, 撞击处局部应力最大为 14.0 MPa 拉应力, 远超规范容许值。

(5) 外侧主拉应力, 腹板底部 3 m 宽度范围应力为 16 MPa 拉应力, 腹板顶部与翼缘板相接处 3.8 m 宽度范围应力为 14.8 MPa 拉应力; 内侧主拉应力, 撞击处 3 m 范围应力最大为 19 MPa 拉应力。拉应力均远超规范容许值。

(6) 从各状态下应力分布情况看, 本次撞击破坏的影响范围集中在撞击点约 300 cm×160 cm 区域内, 与现场造成的混凝土梁体穿孔面积 270 cm×150 cm 吻合。

分析结果显示, 箱梁底板底面与腹板交接处, 箱梁腹板顶部外侧与翼缘板相接处均出现较大拉应力, 较大可能出现开裂。从检测报告看, 箱梁底板底

矩接近于短边传递的趋势, 还原撞击瞬间状况为: 撞击处混凝土压溃并开裂脱落, 腹板局部刚度急剧减弱, 撞击处瞬间力使预应力钢束产生剪切破坏, 同时

面与腹板交接处出现 0.2~0.3 mm 的纵向裂缝,与模拟分析结果吻合;根据分析结果,建议做进一步检测箱梁外表面,探明是否存在受损情况:通过现场补充检测箱梁腹板顶部外侧与翼缘板相接处状况,发现已闭合的纵向裂缝,与模拟分析结果吻合。

综上,通过模拟撞击力分析,梁体穿孔周边混凝土受损影响范围在 300 cm×160 cm 区域内,可以确定加固方案在该范围对穿孔梁体进行维修补强可满足要求。

3 梁体穿孔及受损钢束对梁体受力重分配的影响

通过建立大桥的实体有限元模型,可以比较真实的模拟实际结构的受力情况,尤其是对大桥受损后的局部的受力情况有一个直观的了解,通过模拟分析箱梁受损状况对应力分布的影响,来评估梁体穿孔及受损钢束对梁体受力重分配的影响。

3.1 有限元仿真分析模型及荷载工况

根据受损情况,本次计算分析的重点如下。

- (1)考虑活载最不利偏载作用下 1#梁(受损梁)各腹板的应力分配情况。
- (2)考虑 6 根受损预应力钢束断裂作用下对各腹板的应力分布情况。

采用 ANSYS 建立全桥三维仿真计算模型,混凝土采用实体单元模拟,预应力钢束采用拉压杆单元模拟,有限元模型如图 15 所示。

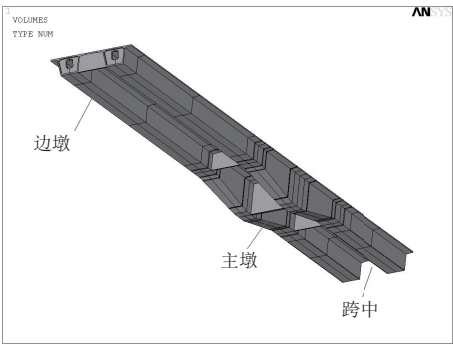


图 15 有限元模型 (1/2 结构)

根据以上分析的重点,主要有以下两个荷载工况:

工况 1:活载作用工况。按照相关规范^[3],考虑两列车队最不利加载在 1#梁侧顶板上。

工况 2:考虑 6 根受损预应力断裂的作用,以此对比 4 个腹板受力情况。

3.2 分析主要结果

(1)工况 1 计算结果

图 16、图 17 所示为工况 1 纵桥向正应力分布情况。从计算结果可以看出,1#梁破损处附近底板正应力分配不均匀,从 9.2 MPa 变化至 5.1 MPa(见图 16);对应于应力平均值的偏差约为 2 MPa,靠近腹板破损处的底板顺桥向正应力显著增大。可以看出,由于腹板大面积破损,导致 1#梁刚度发生变化,造成底板正应力分配不均匀,对结构承载非常不利。

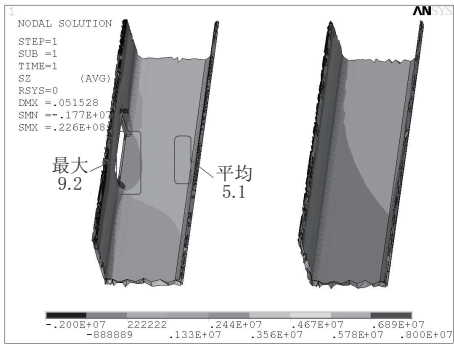


图 16 工况 1 纵桥向正应力分布 (俯视) (单位:MPa)

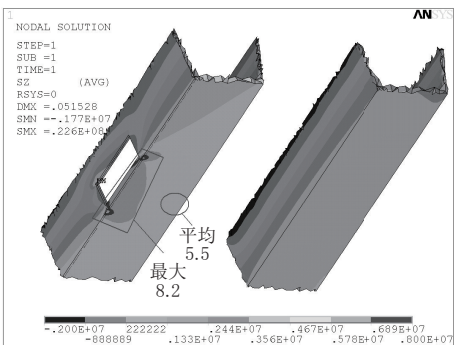


图 17 工况 1 纵桥向正应力分布 (仰视) (单位:MPa)

(2)工况 2 计算结果

图 18 和图 19 所示为工况 2 纵桥向正应力分布情况。从图中可以看出,1#梁与 2#梁相比,腹板纵桥向最大应力增量 1.6 MPa(见图 18);

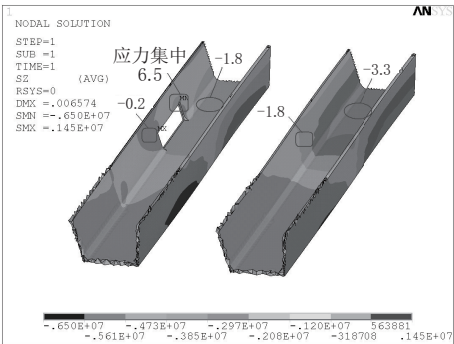


图 18 工况 2 纵桥向正应力分布 (俯视) (单位:MPa)

1#梁底板正应力分配不均匀,从 -1.6 MPa 变化至 -2.6 MPa(见图 19),对应于应力平均值的偏差为 0.5 MPa,2#梁底板纵桥向应力分布则较为均匀,平均约 -3.6 MPa。由于 6 根预应力钢束失效,导致 1#梁底板正应力分配不均匀,对应于应力平均值的偏差

为0.5 MPa,钢束失效削弱了梁体承载能力,同时导致箱梁梁体底板受力不均匀。

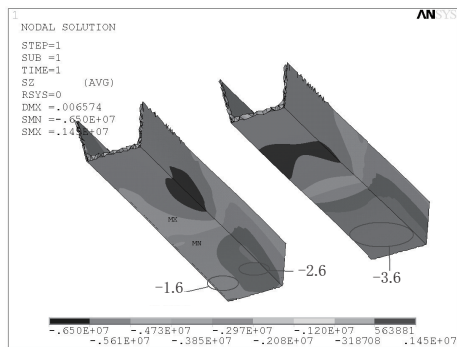


图19 工况2纵桥向应力分布(仰视)(单位:MPa)

3.3 主要分析结论

(1)考虑活载最不利偏载作用下,1#梁破损处附近底板正应力从9.2 MPa变化至5.1 MPa,对应于应力平均值的偏差约为2 MPa,靠近腹板破损处的底板顺桥向正应力显著增大。可以看出,由于腹板大面积破损,导致1#梁刚度发生变化,造成底板正应力分配不均匀,对结构承载非常不利。

(2)考虑6根受损预应力钢束断裂作用,1#梁与2#梁相比,腹板纵桥向最大应力增量1.6 MPa;1#梁底板正应力分配不均匀,从-1.6 MPa变化至-2.6 MPa,对应于应力平均值的偏差为0.5 MPa。可以看出,由于预应力钢束失效,削弱了梁体承载能力同时导致箱梁梁体底板受力不均匀。

4 结 语

(1)有限元模拟撞击分析方法还原撞击瞬间状况,可以确定受损梁体穿孔周边混凝土受损程度及

影响范围,并评估梁体穿孔及受损钢束对梁体受力重分配的影响,采用该方法可以准确评估受损桥梁安全性以及确定维修加固方案的合理性。

(2)根据本文有限元模拟分析结果,该桥梁体穿孔周边混凝土受损影响范围在300 cm×160 cm区域内;通过现场补充检测,揭示出箱梁腹板顶部外侧与翼缘板相接处存在已闭合的纵向裂缝,与模拟分析结果吻合。

(3)分析结果显示,梁体穿孔及受损钢束对梁体受力重分配产生底板正应力约2 MPa的偏差,以及腹板纵桥向最大应力1.6 MPa的增量,考虑应力增量对梁体进行验算,1#梁及2#梁在破损截面附近均未出现拉应力,1#梁下缘压应力比2#梁小1~2 MPa;1#梁跨中断面抗弯承载能力处于临界状态,受损断面则抗弯、抗剪承载能力均不能满足规范要求。

(4)本文案例基于撞击模拟分析揭示的梁体穿洞断索后应力分布及受力重分布、截面抗剪等现象,能够准确反映梁体的真实受损情况,为下一步制定维修加固方案提供理论支持,可供其他类似工程参考应用。

根据安全评估结论,本桥采用封闭交通、抢修加固的方案,目前已成功对受损梁体进行修补并增加体外预应力钢束进行了加固,运行通车状况良好。

参考文献:

- [1] JTG/T 3360-02—2020,公路桥梁抗撞设计规范[S].
- [2] JTG D62—2004,公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [3] JTG D60—2004,公路桥涵设计通用规范[S].

(上接第294页)

- [10] 马建军,符建云,任涛.基于ANSYS的大体积混凝土浇筑过程仿真分析[J].水电能源科学,2013,31(11):99-101;123.
- [11] GB 50666—2011,混凝土结构工程施工标准[S].
- [12] GB 50164—2011,混凝土质量控制标准[S].
- [13] 张淳勖.绿地金茂国际金融中心5.5 m厚底板大体积混凝土施工

- 技术[J].智能建筑,2022(7):47-50.
- [14] 沈志勇.基于窄带物联网的大体积混凝土温度监测系统研发与工程应用[J].建筑施工,2023,45(1):190-193.
- [15] 宋占璞,张丹,方海东,等.大体积混凝土水化热温度变化光纤监测技术研究[J].工程地质学报,2014,22(2):244-249.