

某大桥船撞事故后应急评估与处治设计

武建中¹, 杨子楠²

1. 广东省交通规划设计研究院集团股份有限公司 / 广东和立交通养护科技有限公司, 广东 广州 510000

2. 广东和立交通养护科技有限公司, 广东 广州 510000

摘要 : 广东某大桥主桥为预应力混凝土 T 形刚构 + 挂梁型式, 2023 年 11 月突发船舶撞击主桥挂梁的事故, 导致挂梁边梁严重受损, 预应力钢丝断丝率 16.7%, 受拉钢筋全部断裂。但本桥处于国道上, 中断交通社会影响大, 因此需结合检测报告和设计图纸进行分析评估, 论述当前保通的可行性, 并提出永久处治方案, 尽快恢复以降低社会影响。验算评估在有限元模拟结构损伤分析的基础上, 考虑将保通车道偏载在非受损梁片另一侧的工况, 各片梁结构承载能力和应力水平基本可控, 具备保通条件, 并按双车道保通进行实施。综合考虑安全耐久、施工快捷及对现场桥上交通和桥下通航影响等因素, 提出受损梁板更换与维修加固方案。最终推荐的维修加固方案, 采用破损修补、增设体外预应力索和粘贴钢板提高结构承载能力和抗裂性能, 并按原设计规范名义拉应力控制, 解决破损处修补混凝土的抗裂问题。

关键词 : 应急; 评估; 偏载; 体外预应力索

Emergency Evaluation and Treatment Design after a Ship Collision Accident on a Bridge

Wu Jianzhong¹, Yang Zinan²

1. Guangdong Provincial Transport Planning and Design Research Institute Group Co., Ltd./Guangdong Heli Transportation Maintenance Technology Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000

2. Guangdong Heli Transportation Maintenance Technology Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract : The main bridge of a bridge in Guangdong Province is of the prestressed concrete T-shaped rigid frame + suspended beam type. In November 2023, a sudden ship collision accident occurred on the suspended beam of the main bridge, resulting in severe damage to the side beam of the suspended beam. The prestressed steel wire breakage rate was 16.7%, and all tensioned steel bars were fractured. However, this bridge is located on a national highway, and the social impact of traffic interruption is significant. Therefore, it is necessary to analyze and evaluate the current feasibility of ensuring traffic based on inspection reports and design drawings, and propose a permanent treatment plan to restore it as soon as possible to reduce social impact. Based on the finite element simulation of structural damage analysis, the calculation and evaluation consider the working condition of offsetting the traffic lane to the other side of the non-damaged beam. The bearing capacity and stress level of each beam structure are basically controllable, meeting the conditions for ensuring traffic. The implementation follows the dual-lane traffic insurance plan. Considering factors such as safety, durability, quick construction, and impact on on-site bridge traffic and navigation under the bridge, a plan for replacing damaged beams and plates as well as repair and reinforcement is proposed. The final recommended repair and reinforcement plan adopts damage repair, adds external prestressed cables, and applies steel plates to improve the structural bearing capacity and crack resistance. It also controls the nominal tensile stress according to the original design specifications to address the crack resistance of the repaired concrete at the damaged location.

Keywords : emergency; evaluation; eccentric load; external prestressing tendon

一、概述

(一) 项目概况

某大桥位于国道 G228 上, 跨越磨刀门水道, 跨径组合为 (16 × 16 + 5 × 30 + 1 × 70 + 2 × 110 + 1 × 70 + 3 × 30 + 20 × 16)m, 桥梁全长 1180m。主桥上部结构为预应力混凝土 T 形刚构 + 30m 预应力混凝土挂梁, 主墩为双薄壁墩; 引桥上部结构为预应力混凝土简支

T 梁, 下部结构为双柱式桥墩。桥面横向布置为 10.5m (行车道) + 2 × 1m (人行道) = 12.5m。设计荷载为汽车 -20 级、挂车 -100 级, 人群荷载 3.0kN/m²。

桥位处水道为国家 I 级航道, 采用双孔单向通航, 通航净空为 2 × (90 × 22) m。

(二) 船撞事故及病害情况

2023 年 11 月 30 日中午, 一船只在河道下游往上游行驶过程

作者简介: 武建中 (1979—), 男, 高级工程师, 2002 年本科毕业于西南交通大学土木工程专业, 获得学士学位, 2010 年毕业于华南理工大学建筑与土木工程专业, 获得工程硕士学位, 现在广东省交通规划设计研究院集团股份有限公司 / 广东和立交通养护科技有限公司从事桥梁新建、改扩建及加固维修设计工作。

中，碰撞本桥梁体，造成主桥第24跨（通航孔）挂梁下游侧外边梁跨中严重损伤。

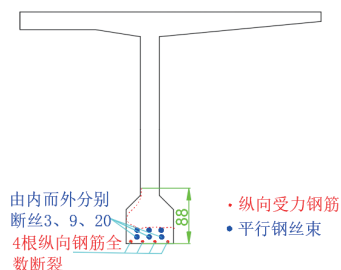


> 图1.1 船只撞击桥梁现场



> 图1.2 24-5#T梁损伤近照

经现场检查，外边梁马蹄边缘纵向4根钢筋全部断裂，底排3束预应力钢束断丝共计32丝，占全部预应力钢丝的16.7%。梁体混凝土破损范围纵向长约3m，竖向高度范围最大约0.9m，T梁底部2层共6束预应力钢丝均已露出。现场检测揭示挂梁未产生明显横向位移，桥面无明显异常。主桥上部承重构件技术状况为“4类”。

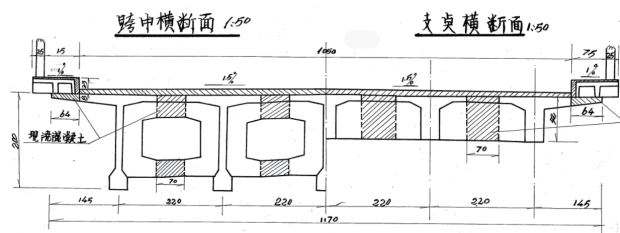


> 图1.3 病害情况梁截面图

经专项检测，本桥24-5#挂梁检算系数 Z_1 为1.08，恶化系数 ξ_e 为0.0592，截面折减系数 ξ_c 为0.98，钢筋截面折减系数 ξ_s 为0.99。

（三）第24#跨挂梁结构信息

挂梁为30m 预应力混凝土简支T梁，两端设牛腿，梁高2m，梁间距2.2m，横向布置5片。梁体采用40#混凝土，每片T梁布设8束24 Φ 5、标准强度 $R_y^b=1600\text{MPa}$ 的预应力高强钢丝。

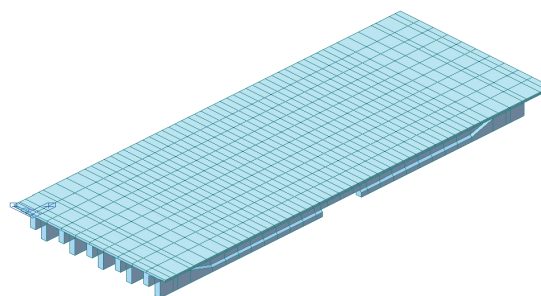


> 图1.4 第24#跨挂梁横断面图

二、撞击受损后现状评估

发生船舶撞击桥梁事故后，从安全考虑，主管部门及时对桥面交通进行封闭。同时考虑本桥处在国道上，长期中断交通社会压力大，需及时对现状受损后桥梁的结构安全性进行评估，以尽快确定何时开放交通或部分开放交通。

主桥参照竣工图建模，按原设计《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTJ 023-85) 进行验算。采用有限元软件 Midas Civil 建立单梁和梁格模型，模拟实际局部破损情况，进行结构承载能力和正常使用极限状态验算评估^{[1][2][3]}，梁格模型如图2.1。



> 图2.1 梁格模型图

（一）承载能力极限状态

表2-1 单梁模型破损后抗力验算

组合	验算位置	弯矩效应 (kN.m)	抗弯承载力 (kN.m)	安全系数
组合 I、II	边梁跨中	6602	7092.4	1.07
组合 III	边梁跨中	7281	7092.4	0.97

结论：T梁抗弯承载力在组合 I、II 下可满足，在组合 III 下不满足85规范要求。

（二）正常使用极限状态验算

考虑被撞边梁局部破损严重，梁体刚度有削弱，影响横向分配，故按梁格模型进行验算。

表2-2 截面法向拉应力统计表

组合	上/下缘	最大值位置	应力值 (MPa)	规范限值 (MPa)
组合 I	上缘	—	未出现	2.08
	下缘	跨中	1.5	2.08
组合 II、III	上缘	—	未出现	2.34
	下缘	跨中	11.7	2.34

表2-3 截面主拉应力统计表

组合	最大值位置	应力值 (MPa)	规范限值 (MPa)
组合 I	支点	4.5	2.08
组合 II、III	支点	12	2.34

表2-4 截面法向压应力统计表

组合	上/下缘	最大值位置	应力值 (MPa)	规范限值 (MPa)
组合 I	上缘	跨中	6.9	14
	下缘	1/4L	11	14
组合 II、III	上缘	跨中	10.7	16.8
	下缘	1/4L	10.7	16.8

表2-5截面主压应力统计表

组合	最大值位置	应力值 (MPa)	规范限值 (MPa)
组合 I	支点	12.6	16.8
组合 II、III	支点	15.6	18.2

结论: T 梁发生破损后, 按正常使用极限状态主拉应力及法向拉应力均不满足 85 规范要求, 其余均可满足。

(三) 考虑车道偏载工况的验算

结合上述 2.2 验算结果, T 梁撞击破损后按原设计荷载组合验算不满足规范要求。考虑结构安全和恢复通行的迫切性, 结合行车道总宽为 10.5m, 按 5# 梁侧围蔽、偏载至横桥向另一侧通行两车道, 试算结果如下:

表 2-6 破损后两车道偏载通行情况下 5# 边梁拉应力

组合	上 / 下缘	应力值 (MPa)	规范限值 (MPa)
组合 I	上缘	未出现	2.08
	下缘	未出现	2.08
组合 II、III	上缘	未出现	2.34
	下缘	未出现	2.34

结论: 破损后全封闭或偏载另一侧两车道通行情况下, 边梁未出现拉应力, 评估现状边梁的安全风险不大, 结构安全。

表 2-7 破损后两车道偏载通行情况下 5# 边梁压应力

组合	上 / 下缘	最大值位置	应力值 (MPa)	规范限值 (MPa)
组合 I	上缘	—	4.5	14
	下缘	跨中	11.1	14
组合 II	上缘	—	7.12	16.8
	下缘	跨中	11.55	16.8
组合 III	上缘	—	6.15	16.8
	下缘	跨中	11.1	16.8

结论: 5# 边梁船撞破损后, 两车道偏载另一侧通行情况下, 边梁下缘最大压应力满足 85 规范要求。

三、应急处治方案分析

(一) 设计目标

结合桥梁损伤情况, 依据检测报告和相关图纸进行验算, 根据验算结果提出处治方案, 以便尽快恢复桥梁结构安全和正常通行。综合考虑安全可靠、施工快捷、造价适中、对现场桥上交通和桥下通航影响小等因素。

(二) 重点影响因素

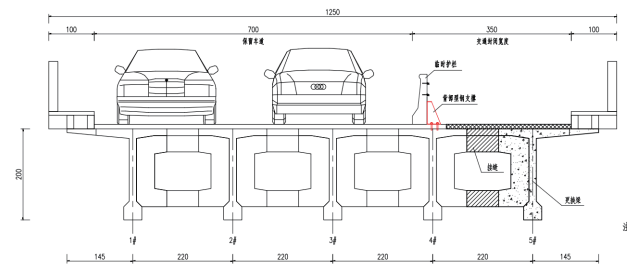
- (1) 梁体存在预应力钢束断丝、纵向钢筋断裂, 首先需恢复结构的安全性;
- (2) 结构损伤严重, 处治后需保证结构的耐久性;
- (3) 桥梁日均交通车流量约为 21000 辆, 及时恢复交通压力大, 处治方案应方便快捷, 同时需考虑施工期间的通行性;
- (4) 桥下船舶流量大, 处治方案施工期间尽量不影响通航净空。

(三) 处治方案比选

1. 方案一: 更换受损梁片

对 24-5# 边梁进行更换, 新换梁片尺寸按原竣工图, 梁高

2m, 梁顶面宽 2.2m, 跨中腹板 18cm。预应力钢束采用钢绞线, 预应力度适当加强。更换边梁处人行道及护栏按原竣工图进行设计。



> 图 3.1 更换梁片横断面图 (单位: cm)

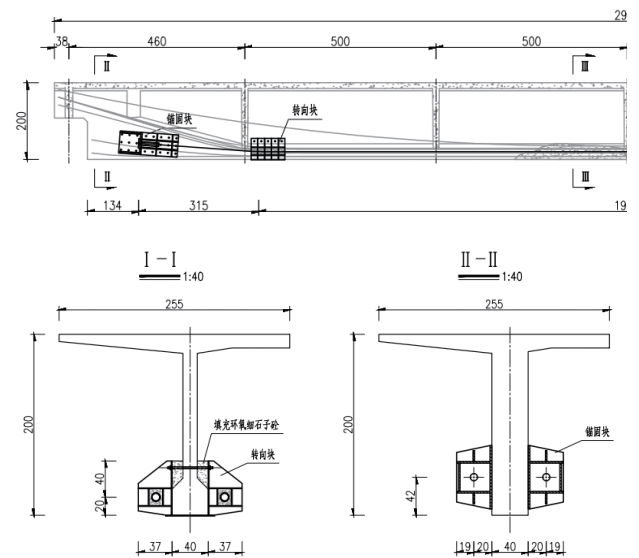
2. 方案二: 既有结构加固

(1) 加固技术标准:

按原设计汽车 -20、挂车 -100、人群 3.0kN/m²。

(2) 方案简述

对受损梁片局部采取 UHPC 修复^[4], 对断掉的预应力钢丝采用体外预应力进行补偿加固^{[5][6]}, 并采取粘贴钢板等措施控制修补混凝土的抗裂和提高结构冗余度, 使结构在较短时间内恢复承载能力和耐久性^[7]。



> 图 3.2 梁体破损修复示意图 (单位: cm)

(3) 加固计算分析

1) 体外预应力束加固

考虑梁体受船舶撞击, 预应力钢丝断丝率为 16.7%, 梁体承载能力和正常使用极限状态不满足 85 规范要求。结合边梁上下缘的应力水平, 本次拟采用腹板处左右各张拉 1 束 $\phi 15.2-3$ 的体外预应力束进行加固, 张拉控制应力为 1116MPa^[8]。体外预应力束满足可调可换, 以便后续调整索力。

2) 体外束加固梁体承载力计算

表 3-1 抗弯承载力验算

组合	验算位置	弯矩效应 (kN.m)	抗弯承载力 (kN.m)	安全系数
组合 I、II	边梁跨中	6361.5	8806.6	1.38
组合 III	边梁跨中	7040	8806.6	1.25

结论: 体外预应力束加固后, 梁体抗弯承载力满足 85 规范

要求。

3) 体外预应力束加固后梁体应力验算

表3-2 截面法向拉应力统计表

组合	上/下缘	最大值位置	应力值 (MPa)	规范限值 (MPa)
组合 I	上缘	—	未出现	2.08
	下缘	—	未出现	2.08
组合 II、III	上缘	—	未出现	2.34
	下缘	跨中	1.8	2.34

表3-3 截面法向压应力统计表

组合	上/下缘	最大值位置	应力值	规范限值	
				原设计 40# 混凝土	取芯试验 45# 混凝土
组合 I	上缘	跨中	9	14	15.75
	下缘	1/4L	15.6	14	15.75
组合 II、III	上缘	跨中	11.62	16.8	18.9
	下缘	1/4L	16.05	16.8	18.9

结论：按原设计40#混凝土，组合I作用下法向压应力不满足规范要求，超出1.6MPa，组合II、III作用下法向压应力可满足规范要求。

根据检测报告可知：在24-5#边梁翼板采用钻芯法检测混凝土强度（共4个芯样），芯样试件混凝土抗压强度介于45.0~62.5MPa，取最小值作为该构件混凝土抗压强度推定值，即为45.0MPa。按实际混凝土强度45MPa时，组合I、II、III作用下法向压应力均可满足规范要求。

4) 混凝土破损修补部位应力控制分析

本次增设的2束15-3体外预应力束张拉后，对破损处修补的T梁马蹄混凝土底缘可产生4.5MPa的压应力。考虑施工期间不能全封闭，需维持两车道通行，因此提取汽车-20级及温度作用下对T梁修补后的马蹄底缘产生4.7MPa的拉应力，在挂车-100级作用下对T梁修补后的马蹄底缘产生8.4MPa的拉应力，则梁底破损修补处混凝土在后续正常使用状态下存在拉应力，即在汽车-20级作用下T梁破损处底缘产生最大0.2MPa的拉应力，在挂车-100级作用下T梁破损处底缘产生最大3.9MPa的拉应力。按照85桥规B类构件裂缝宽度为0.2mm的容许名义拉应力控制^[110]，结果如下：

表3-4 混凝土破损部位新修补混凝土应力计算表

活载	新修补混凝土下缘拉应力 (MPa)	40#混凝土规范容许拉应力 (MPa)	原设计40#混凝土是否满足	取芯实测45#混凝土规范容许拉应力 (MPa)	取芯实测45#是否满足
汽车-20	0.2	3.57	满足	3.92	满足
挂车-100	3.9	3.57	不满足	3.92	满足

结论：按取芯实测混凝土强度低值45#混凝土，套用85桥规B类构件裂缝宽度为0.2mm的容许名义拉应力为5.6MPa*0.7=3.92MPa，满足规范要求，但处于临界值。因此，从安全耐久

考虑，拟增加粘贴钢板措施提高抗裂性能和耐久性。

3. 方案综合对比

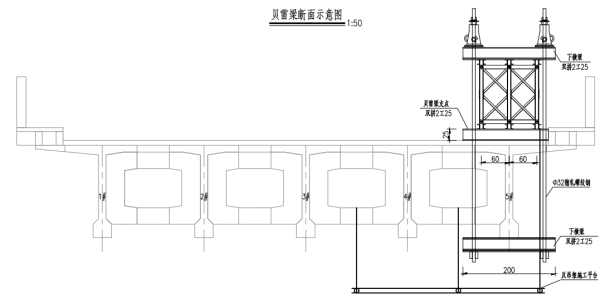
方案	方案一：更换受损梁片	方案二：既有结构加固
方案简述	拆除24-5#T梁，更换单片梁，恢复桥面系	1. 凿除破损混凝土、焊接恢复钢筋并浇筑混凝土修补； 2. 采用体外预应力束加固； 3. T梁马蹄粘贴钢板加固。
优点	1. 质量安全可靠； 2. 结构受力清晰。	1. 施工对交通影响较小； 2. 施工周期相对较短。
缺点	1. 施工对交通影响较大； 2. 施工周期较长； 3. 存在新旧梁变形协调问题； 4. 预制梁的制作周期稍长，如定制模板、台座等； 5. 工程费相对用较高。	1. 结构验算相对复杂； 2. 破损处修复比较困难； 3. 后期会开裂，且裂缝发展情况不便观测； 4. 施工工序较多，需要精细化施工； 5. 作为恢复短期若干年内承载能力的措施。
建安费	85万	70万
工期	2个月	1个月

经综合比选，结合当前的交通压力及主管部门后续针对“T型刚构+挂梁”桥型的综合整治规划，本次最终采用方案二。

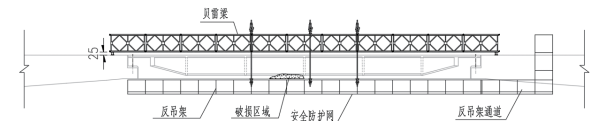
四、主要施工要点

(一) 悬吊系统

为减少施工对受损梁片的影响，提高施工期的安全性，在挂梁两侧T构上布置贝雷梁，与Φ32螺纹钢、I25横梁组成悬吊系统。悬吊系统下横梁仅与梁底面贴合，仅承担施工荷载。悬吊的吊点布置于跨中3片横隔板附近。考虑贝雷梁挠度，在两侧T构处采用双拼工25工字钢作为支点。施工反吊梁面积按5m×40m=200m²计。



>图4.1 贝雷梁横断面示意图



>图4.2 贝雷梁立面布置示意图

(1) 贝雷梁计算

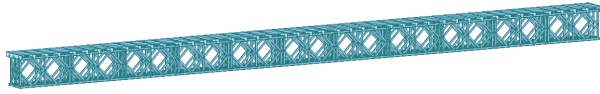
利用Midas Civil建立计算模型，贝雷梁纵向长33m，横向布置3片，间距0.6m。贝雷梁材料采用16Mn，设计容许应力取273MPa。

分阶段进行计算：(a) 第一阶段施加贝雷梁与反吊梁自重；

(b) 第二阶段增加混凝土修补；(c) 第三阶段组合其他施工荷载。

计算荷载考虑反吊架（含安全网、防渗布等）、修补混凝土、其他人、材、机等施工荷载。

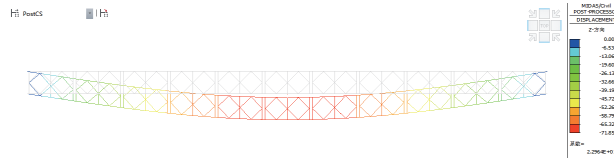
荷载组合：恒载起控制作用，强度计算组合按1.35恒载+1.4*0.7施工荷载；挠度计算按标准组合。



> 图4.3 贝雷梁计算模型



> 图4.4 组合施工荷载后贝雷梁应力图（单位：MPa）



> 图4.5 组合施工荷载后贝雷梁变形图（单位：mm）

计算得到第一阶段自重与反吊架作用下贝雷梁片最大应力为1.35×71.65=96.73MPa，最大竖向位移为40mm。

第二阶段增加修补混凝土后贝雷梁片最大应力为1.35×81.13=109.53MPa，最大竖向位移为46mm。

第三阶段组合施工荷载后贝雷梁片最大应力为122.86MPa < 273MPa，强度满足要求；最大竖向位移为56mm < 33000/400=82.5mm，满足要求。考虑最大竖向位移为56mm，为避免贝雷梁弯曲变形与受损梁片接触，需将贝雷梁支点处垫高，采用双拼工25工字钢作为支点。工字钢与桥面、贝雷梁之间采用进行牢靠连接，贝雷梁两侧做好横向支撑。

(2) 螺纹钢计算

每处吊点采用2根 Φ32精轧螺纹钢，有效面积804.2mm²，PSB785精轧螺纹钢强度设计值为650MPa。

则 $\sigma = (1.35 \times 32.1 + 1.4 \times 0.7 \times 12.44) \times 103 / 2 / 804.2 = 34.5 \text{MPa} < 650 \text{MPa}$ ，强度满足要求。

(3) 横梁计算

每处吊点上、下横梁均采用2I25双拼工字钢，长度2米， $I_x = 47400000 \text{mm}^4$ ， $W_x = 474000 \text{mm}^3$ ， $S = 272200 \text{mm}^3$ 。Q235钢材 $f = 215 \text{MPa}$ ， $f_v = 125 \text{MPa}$ 。

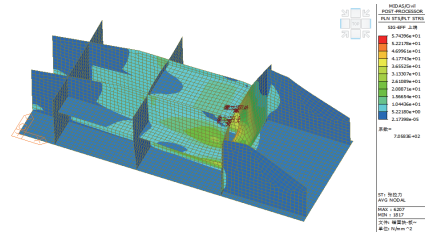
剪力 $V = (1.35 \times 32.1 + 1.4 \times 0.7 \times 12.44) / 2 = 27.8 \text{kN}$ ，弯矩 $M = 27.8 \times 1 = 27.8 \text{kN} \cdot \text{m}$

$\sigma = 27.8 \times 106 / 474000 = 58.6 \text{MPa} < 215 \text{MPa}$ ，抗弯强度满足要求。

$\tau = 27.8 \times 103 \times 272200 / 14 / 47400000 = 11.4 \text{MPa} < 125 \text{MPa}$ ，抗剪强度满足要求。

(三) 锚固块计算

本桥的锚固块为钢锚固块^[9]，锚固块钢板和钢管均采用Q355钢材，采用Midas对钢锚固块进行计算分析。



> 图4.6 锚固块等效应力图（单位：MPa）

计算结果表明，锚固块板件的最大应力为57.5MPa，出现在承压钢板开孔处，均小于Q355C钢材的设计强度295MPa，锚固块的强度满足设计要求，结构处于弹性状态。

锚固块采用8.8级M20对穿锚栓固定，共19套。锚固块承受剪力为 $V = 3 \times 140 \times 1116 / 1000 = 468.7 \text{kN}$ 。

由于锚栓为对穿锚栓，本次仅考虑50%锚栓参与受力，且偏安全不考虑粘钢胶提供的抗剪力。根据《混凝土结构加固设计规范》（GB50367-2013）中第16.2.3条，8.8级锚栓抗剪强度设计值 $f_{vb} = 290 \text{MPa}$ 。50%锚栓的抗剪承载力验算：

$N_v = n_v A_n f_v \times 50\% = 19 \times 245 \times 290 \times 50\% / 1000 = 675.0 \text{kN} > 468.7 \text{kN}$ ，满足要求。

(四) 转向块计算

体外预应力束在转向块弯起角度为4°，不计内部转向器及环氧砂浆，竖向作用力 $N_{vd} = 468.7 \times \sin 4^\circ = 32.7 \text{kN}$ 。转向块布置4个8.8级M20对穿锚栓，不考虑马蹄U形钢板和灌钢胶作用，按50%锚栓的抗剪承载力 $N_v = n_v A_n f_{vb} \times 50\% = 5 \times 245 \times 290 \times 50\% / 1000 = 142.1 \text{kN} >$ 转向块所受竖向力32.7kN，满足要求。

五、结论

1. 本次船舶撞击梁体后，对T构挂梁24-5#边梁的混凝土强度、未断的钢丝性能和应力有一定影响，但当前技术尚不能准确评估，建议后续加强监测。

2. 项目实施完成后，结合近半年的运营，效果良好。

参考文献

[1] 交通部公路规划设计院. 公路桥涵设计通用规范: JTJ 021-89. [S]. 人民交通出版社, 1989.
 [2] 交通部公路规划设计院. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范: JTJ 023-85. [S]. 人民交通出版社, 1985.
 [3] 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]. 人民交通出版社股份有限公司, 2021.
 [4] 梁拯. 超高性能混凝土的研究现状 [J]. 江苏建材, 2023, (05): 11-12+34.
 [5] 张王乐元, 张莽丰, 盛可鉴. 装配式简支T梁体外预应力加固技术应用 [J]. 交通科技与经济, 2020, 22(03): 62-67. DOI: 10.19348/j.cnki.issn1008-5696.2020.03.012.
 [6] 马士宾, 刘月钊, 汲港升, 等. 基于可靠度的简支梁体外预应力加固设计与优化方法 [J]. 工业建筑, 2022, 52(10): 168-175+145. DOI: 10.13204/j.gyjz.22052104.
 [7] 谌润水, 胡钊芳, 帅长斌. 公路旧桥加固技术与实例 [M]. 人民交通出版社, 2002.
 [8] 回达鹏. 体外预应力加固技术在桥梁维修中的应用 [J]. 交通世界, 2023, (14): 131-133. DOI: 10.16248/j.cnki.11-3723/u.2023.14.011.
 [9] 付星燃, 胡承译, 高洪波. 大跨径T梁体外预应力加固锚固块设计研究 [J]. 世界桥梁, 2021, 49(01): 101-106.
 [10] 吴迅, 王艺桥, 赵柏岩. 预应力混凝土桥底板纵向裂缝控制 [J]. 沈阳工业大学学报, 2012, 34(02): 215-219.