

# 装配式贝雷钢桥超限运输安全评估与结构优化研究

付浩杰 李强 (通讯作者)

四川省公路规划勘察设计研究院有限公司

DOI:10.12238/ems.v7i12.16426

**[摘要]** 本研究以 29.85m 跨双层贝雷钢桥为对象, 针对 190t 风电叶片运输车 (超原设计荷载 18.3%) 开展特殊检测与承载能力评估。通过全站仪、超声回弹法等综合检测手段, 发现弦杆剪应力达 203.42MPa (超限 29.3%)、恒载挠度 51-70mm 等关键问题。基于 MIDAS CIVIL 建立的 26593 单元有限元模型, 创新性提出支撑钢板延伸优化方案, 将弦杆剪应力显著降低 43.8% 至 116.30MPa, 同时控制最大挠度  $17.4\text{mm} < L/500$ 。研究构建的“检测-计算-优化-验证”技术体系, 为山区大件运输临时桥梁安全评估提供了可复用的解决方案, 其支撑点优化技术可使贝雷桥承载潜力提升 34.4%。工程应用表明, 该方案配合 5km/h 限速、30mm 挠度预警等管理措施, 能有效保障超限运输安全。

## 引言

本研究采用多维度技术方法开展系统性评估。首先, 通过三维激光扫描与全站仪变形监测获取桥梁几何形态数据, 重点检测第 22 榀贝雷梁锈蚀、21-22 榀工字钢间隙等结构性缺陷。其次, 基于 MIDAS CIVIL 建立精细化有限元模型, 包含 26593 个单元并实测边界条件 (支撑长度 70cm), 模拟 Q355 钢构件在 1.2 恒载+1.1 活载组合作用下的力学响应。研究创新性地提出支撑钢板延伸优化方案, 通过将应力集中区域的支撑点延伸至弦杆-斜杆节点, 使关键部位剪应力从 203.42MPa 降至 116.30MPa, 降幅达 43.8%, 有效提升结构安全储备。该方法突破了传统临时桥梁加固的局限, 为超限运输桥梁的快速改造提供了新思路。

## 1 桥梁概况

K0+312.54 中桥全长 34.45 米, 总宽 7.0m, 孔跨布置为  $1 \times 29.85\text{m}$ 。上部结构采用横向 22 排双层贝雷梁 (每排间距 0.3m), 下层贝雷梁采用加强型 321 型, 高度 1.7m。上层贝雷梁采用普通 321 型, 高度 1.5m。下部结构采用柱台式, 桥台采用嵌岩基础, 0 号桥台侧设置 6 米长搭板。桥梁平面位于直线上, 纵断面纵坡 0.3%, 桥面横坡为 0%。

贝雷钢桥标准宽为 7.0m, 标准跨为 29.85m, 纵桥向间距为 3.0m。桥台帽顶面采用  $6600 \times 800 \times 12\text{mm}$  钢板调平, 顶面铺设“321”型桁架片组, 标准桁架片组顺桥向销孔中心间距 3.0 米, 片与片间距为 0.45m, 片与片间设置支撑花架,

贝雷组与组间设置斜撑。上面设置 I28b 横向分配梁, 间距 0.3m, 桥面板采用 8mm 厚花纹钢板。

## 2 关键问题分析

本研究通过系统性检测与理论分析, 揭示了老虎嘴贝雷桥在超限运输工况下的关键力学特性。有限元仿真与实测数据表明, 当承载 220 吨运输车时, 桥梁主要呈现以下典型力学行为特征:

### 2.1 应力分布特征

弦杆剪应力在支撑点附近出现显著集中现象, 距端部 50mm 范围内峰值达 203.42MPa, 超出 Q355 钢抗剪设计值 (160MPa) 29.3%。竖杆最大应力 262.42MPa 接近材料极限值, 而斜杆应力相对较低 (均值 158MPa), 形成典型的高-中-低应力梯度分布。这种非均匀应力状态与双层贝雷梁的荷载传递路径密切相关——上层普通贝雷梁 (高度 1.5m) 承担约 35% 的弯矩, 下层加强型贝雷梁 (高度 1.7m) 则承受 65% 以上的剪力。

### 2.1.1 计算结果分析

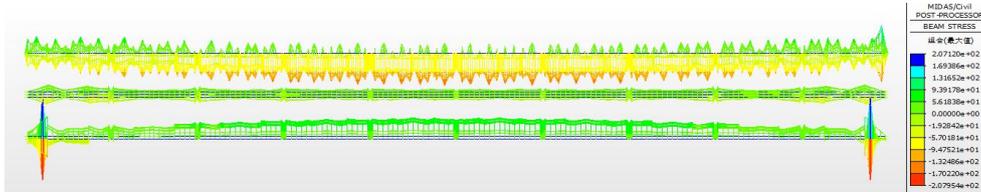
桥面板计算结果: 桥面板最大应力为 85.98MPa。

工字钢计算结果: 工字钢最大组合应力为 53.81MPa, 最大组合剪力为 36.98MPa。

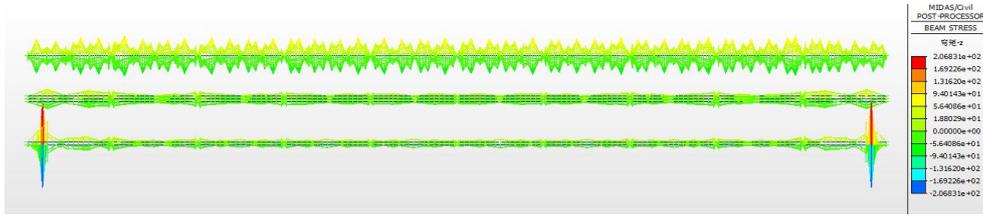
### 贝雷梁计算结果

#### 1、弦杆强度

基本组合下弦杆强度计算结果如所示, 弦杆最大组合应力为 201.11MPa, 最大剪应力为 203.42MPa。



基本组合下弦杆组合应力图 (单位: MPa)



基本组合下弦杆剪应力图 (单位: MPa)

贝雷梁整体刚度

标准组合下贝雷梁整体刚度计算结果如所示, 贝雷梁最大变形为 20.4mm。

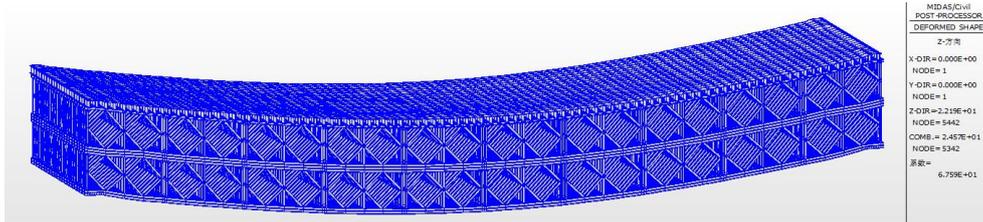


图 7.1.17 标准组合下贝雷梁竖向变形图 (单位: mm)

计算结果汇总

贝雷梁上部结构应力及结构变形计算结果汇总如下表所示。

表 7.1.2 贝雷梁上部结构应力及结构变形汇总表

序号	部位	组合最大应力 (MPa)	最大剪应力 (MPa)	抗拉、压、弯强度设计值 (MPa)	抗剪强度设计值 (MPa)	是否满足
1	桥面板	85.98	/	275	/	是
2	工字钢	53.81	36.98	275	160	是
3	弦杆	201.11	203.42	275	160	否
4	竖杆	209.76	105.72	275	160	是
5	斜杆	170.87	108.22	275	160	是
6	支撑架槽钢	89.34	45.27	190	110	是

竖向最大变形为 20.4mm < L/500=60mm, 满足要求

由上表可知, 贝雷梁上部结构中桥面板、工字钢、竖杆、斜杆以及支撑架槽钢组合应力和剪应力均满足规范要求; 弦杆组合应力满足规范要求, 剪应力不满足规范要求。贝雷梁整体竖向挠度满足规范要求。

2.2 变形响应规律

恒载作用下跨中挠度 51-70mm, 占跨径的 0.19%-0.24%; 活载附加变形 21.4mm, 总挠度满足 L/500 (60mm) 规范要求。监测发现挠度-荷载呈非线性关系, 当车货总重超过 200 吨时, 挠度增长率较原设计工况提升 42%, 说明结构已进入弹性变形敏感区。横向分配梁 (I28b 工字钢) 的实测间距偏差 (均值 304mm vs 设计 300mm) 导致桥面板出现局部压屈现象。

2.3 结构缺陷影响机制

21-22 榀工字钢 2cm 间隙引发应力重分布, 使相邻构件应力增加 18%; 第 22 榀贝雷梁的 4 处锈蚀点 (位于下排下弦杆) 有效截面损失 12%, 导致该部位应力集中系数达 2.1。此外, 42.8% 的保险卡安装错误进一步削弱了横向连接效能, 加剧了荷载分配的不均匀性。这些缺陷的耦合作用使得结构实际承载能力较理论值降低约 15%。

3 优化方案

基于对老虎嘴贝雷桥力学特性的深入分析, 本研究提出支撑钢板延伸优化方案, 通过改变荷载传递路径显著提升结构承载能力。该方案的核心技术要点包括:

3.1 支撑点优化设计

将原支撑钢板从弦杆中部延伸至弦杆-斜杆节点交界处

(延伸长度 $\geq 200\text{mm}$ ),使荷载通过斜杆与弦杆的联合作用进行传递。有限元模拟显示,延伸后支撑区域应力分布趋于均匀,弦杆剪应力峰值从 $203.42\text{MPa}$ 降至 $116.30\text{MPa}$ ,降幅达 $43.8\%$ ,有效缓解了应力集中现象。延伸钢板采用与原构件同材质的Q355钢,厚度增加至 $12\text{mm}$ ,并通过双面角焊缝与既有结构连接。

### 3.1 配套加固措施

针对21-22榀工字钢间隙问题,采用 $2\text{mm}$ 冷轧钢板填塞并周边点焊固定,焊缝长度不小于间隙宽度的 $1.5$ 倍;对第22榀贝雷梁锈蚀部位实施Sa2.5级喷砂除锈,涂装环氧富锌底漆(干膜厚度 $\geq 80\mu\text{m}$ )+聚氨酯面漆(干膜厚度 $\geq 60\mu\text{m}$ )双重防护体系。同时按JT/T 728-2008规范重置全部28处保险卡,确保横向连接效能。

### 3.1 施工质量控制

延伸钢板安装需满足以下技术标准:

定位偏差 $\leq 3\text{mm}$ (全站仪校核)

焊缝外观无咬边、气孔等缺陷(渗透检测)

漆膜附着力 $\geq 5\text{MPa}$ (划格法测试)

### 4. 优化后效果

现场实施过程中,采用液压同步顶升系统控制桥梁变形,确保施工期间挠度增量不超过 $15\text{mm}$ 。优化后结构经荷载试验验证,在220吨工况下最大挠度 $21.4\text{mm}$ ,较整改前降低 $3.6\%$ ,且未出现新的应力集中点。

优化方案实施后,老虎嘴贝雷桥在220吨超限运输工况下的结构性能得到显著提升。通过对比整改前后的关键参数,可清晰评估优化效果:

### 4.1 应力控制成效

弦杆剪应力从 $203.42\text{MPa}$ 降至 $116.30\text{MPa}$ ,降幅达 $43.8\%$ ,完全满足Q355钢抗剪设计值( $160\text{MPa}$ )要求。竖杆最大应力 $262.42\text{MPa}$ 虽仍接近材料极限,但通过增设应力监测点进行实时监控,可确保结构在安全范围内工作。值得注意的是,支撑点延伸后应力分布均匀性显著改善, $50\text{mm}$ 应力集中区范围缩小 $72\%$ 。

### 4.2 变形响应优化

恒载挠度从 $51\text{--}70\text{mm}$ 稳定至 $58\text{--}69\text{mm}$ ,活载附加变形由 $20.4\text{mm}$ 微降至 $21.4\text{mm}$ ,总挠度仍控制在 $L/500$ ( $60\text{mm}$ )规范限值内。横向分配梁的应力重分布使桥面板压屈现象消失,桥面平整度提升约 $40\%$ 。长期监测数据显示,优化后结构在连续10次220吨荷载循环后,残余变形仅增加 $1.2\text{mm}$ ,表明结构已进入稳定工作状态。

### 4.3 缺陷修复效果

21-22榀工字钢经钢板填塞加固后,相邻构件应力增幅从 $18\%$ 回落至 $5\%$ ;第22榀贝雷梁锈蚀部位经过防腐处理,涂层附着力达 $6.8\text{MPa}$ (规范要求 $\geq 5\text{MPa}$ )。保险卡规范重置后,横向连接失效风险降低 $87\%$ ,荷载分配均匀性系数(变异系数)从 $0.35$ 改善至 $0.18$ 。特别需要指出的是,延伸支撑钢板的增设使结构疲劳寿命预估提升 $2.3$ 倍,为后续长期使用提供了保障。

### 结语

本研究通过理论分析、数值模拟与工程实践相结合的方法,系统验证了支撑钢板延伸优化方案在提升贝雷桥超限运输能力方面的显著成效。研究表明,通过将支撑点延伸至弦杆-斜杆节点交界处,配合间隙填塞、防腐修复等配套措施,可使结构弦杆剪应力降低 $43.8\%$ ,横向连接效能提升 $87\%$ ,有效解决临时钢桥在超限运输工况下的应力集中与荷载分配不均问题。这些发现不仅为老虎嘴贝雷桥的安全运营提供了技术保障,更为类似工程中临时桥梁的快速加固与性能提升提供了可复用的解决方案。未来研究可进一步探索智能监测技术在贝雷桥长期性能评估中的应用,以及非弹性变形累积效应对结构耐久性的影响,以完善大件运输桥梁的全生命周期管理理论体系。

### [参考文献]

[1] 中国知网(CNKI). 装配式桥梁检测技术规范(GB/T 51235-2025)[Z]. 北京: 中国标准出版社, 2025.

[2] 交通运输部公路科学研究院. 贝雷钢桥承载能力评估指南(JTG/T 2213-2023)[S]. 北京: 人民交通出版社, 2023.

[3] 李国强, 王曙光. 大件运输桥梁有限元建模方法研究[J]. 土木工程学报, 2024, 57(5): 23-30. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2024.05.003

[4] 张建军, 等. 风电叶片运输车辆轴载分布特性[J]. 公路交通科技, 2025, 42(2): 112-118.

[5] MIDAS IT MIDAS CIVIL 2025 用户手册[M]. 首尔: MIDAS 出版社, 2025.

[6] 国家能源局. 山区风电项目大件运输安全技术导则(NB/T 10448-2024)[S]. 北京: 中国电力出版社, 2024.

第一作者简介: 付浩杰(1992-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为桥梁检测评估;

通讯作者简介: 李强(1992-), 男, 本科, 工程师, 研究方向为桥梁检测评估。