

# 基于全过程监测的大跨混凝土现浇梁 组合支架体系工作性能分析

唐子超<sup>1</sup>, 仇洁<sup>2</sup>, 胡莲生<sup>1</sup>, 孔祥民<sup>1</sup>, 崔凤坤<sup>2\*</sup>

1. 中建八局第二建设有限公司, 山东 济南 250022; 2. 山东交通学院交通土建工程学院, 山东 济南 250357

**摘要:**为分析大跨混凝土现浇梁组合支架体系的实际工作性能,避免施工过程中支架倾覆事故,优化结构冗余设计,以济南市有轨电车项目三跨连续梁桥为依托,通过布设高精度传感器构建监测系统,采用全过程实时监测与有限元模拟相结合的方法,研究钢管柱、贝雷梁及盘扣支架组合体系的关键力学行为。结果表明:在施工全过程,组合支架体系主要构件的受力监测结果普遍比有限元计算结果小5%~15%,基于有限元模拟设计的组合支架体系整体具有较高的安全储备;贝雷梁跨中上弦杆应力监测结果与有限元结果的差异明显大于跨中下弦杆,表明有限元模型内部约束条件与实际工作条件存在差别;钢管柱间剪力斜撑的应力监测结果大于有限元模拟结果,在设计阶段应引起注意。

**关键词:**组合支架体系;全过程监测;有限元分析;工作性能

**中图分类号:**U448.22;U445.47<sup>+</sup>1

**文献标志码:**A

**文章编号:**1672-0032(2025)06-0086-09

**引用格式:**唐子超,仇洁,胡莲生,等.基于全过程监测的大跨混凝土现浇梁组合支架体系工作性能分析[J].山东交通学院学报,2025,33(6):86-94.

TANG Zichao, ZHANG Jie, HU Liansheng, et al. Performance analysis of a large-span cast-in-place concrete beam composite support system based on full-process monitoring[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2025, 33(6): 86-94.

## 0 引言

近年来,新建混凝土桥梁与既有运营线交叉的工程越来越多。采用传统满堂支架施工建设跨线混凝土桥梁严重阻碍既有交通线路的运营,钢管柱和贝雷梁等组成的组合支架体系能保通施工,便捷高效,在大跨混凝土桥梁现浇施工中应用广泛。但组合支架体系杆件较多,力学行为复杂,易引发倾覆倒塌事故。主要原因是对组合支架体系的实际工作性能了解尚不彻底,支架设计中普遍存在安全系数不足的问题,亟待解决。

在混凝土现浇梁桥支架的施工工艺方面,罗小东<sup>[1]</sup>、李晓迪<sup>[2]</sup>、刘文龙<sup>[3]</sup>、张林鹏等<sup>[4]</sup>以公路桥梁为例,分析满堂支架地基处理、支架搭设和混凝土施工等工序的施工方法和要点;潘克敏<sup>[5]</sup>、王云海<sup>[6]</sup>以连续梁桥为例,研究盘扣式满堂支架桥梁施工中的施工质量管理与安全控制策略;闫闪闪<sup>[7]</sup>、高英桂等<sup>[8]</sup>结合实际工程,采用地基处理和支架预压等措施控制结构变形,有效改善支架系统的稳定性和承载能力。在支架力学性能分析方面,章杰等<sup>[9]</sup>采用有限元分析软件 MIDAS/Civil 模拟某跨河桥梁组合支架结构的受载水平及受力情况,研究组合支架体系的承载特性及适应范围;尚刘宏<sup>[10]</sup>以某跨河桥梁为例,采用软

收稿日期:2025-03-27

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2025MS826);山东省高等学校青创科技计划项目(2024KJH007)

第一作者简介:唐子超(1988—),男,山东烟台人,工程师,主要研究方向为土木工程,E-mail:724554856@qq.com。

\*通信作者简介:崔凤坤(1990—),男,山东青州人,副教授,硕士研究生导师,工学博士,主要研究方向为桥梁工程,E-mail:929599342@qq.com。

件 MIDAS/Civil 分析混凝土浇筑顺序对支架受力的影响;张一鹏<sup>[11]</sup>以镇果公路 A1 匝道桥预应力混凝土连续箱梁为例,建立盘扣支架-贝雷梁-钢管柱组合支架结构的有限元模型,研究组合支架系统的结构强度、刚度及稳定性,验证该支架系统的承载能力。现有针对组合支架体系的研究偏重于有限元分析和施工工艺,但组合支架体系构件较多、结构复杂,单一的有限元模型及计算假定与支架体系的真实受力行为存在偏差,还需结合结构受力全过程监测研究组合支架体系。

本文依托济南首条有轨电车项目,选用多型号高精度传感器,实时监测典型组合支架体系的钢管柱、贝雷梁及盘扣支架等核心构件的全过程力学行为;结合有限元分析,对比分析监测结果与有限元模拟结果的异同及规律,以期揭示组合支架体系的施工全过程真实受力特点及工作性能。

## 1 工程概况

济南市有轨电车项目跨越济南市荷花路与凤凰大道交叉口,为三跨连续梁桥。上部结构为 40 m-60 m-40 m 的预应力混凝土现浇箱梁,桥宽 11.4 m,从跨中到支点梁高 2.4~4.2 m 曲线渐变,腹板厚 45~80 mm 渐变;下部结构为长 3.0 m、宽 1.8 m 的 C40 混凝土独柱墩,墩高 7.0~12.0 m。桥梁跨度较大,选择满堂支架的形式进行现浇施工<sup>[12-14]</sup>。支架体系自上而下为盘扣支架-I14a 工字钢横向分配梁-贝雷梁-双拼 I50a 工字钢承重梁-钢管柱,边跨现浇梁组合支架体系如图 1 所示。

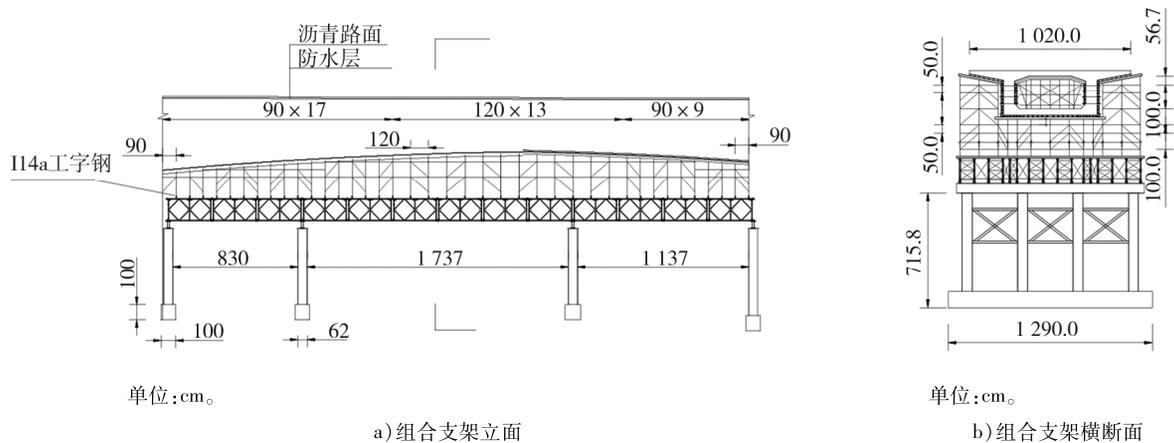


图 1 边跨现浇梁组合支架体系总体布置

盘扣支架部分从上到下依次由厚 1.5 cm 的竹胶板、边长 10 cm 的方木、I14a 工字钢和直径 48 mm 的钢管搭设而成。在顺桥向支架两端设置 18 根竖杆,间距为 90 cm,跨中竖杆间距为 120 cm,横桥向竖杆两端间距为 120 cm,中间间距为 60 cm,腹板下方横杆间距为 50 cm,翼板和底板横杆间距为 100 cm;盘扣支架下横向布置 I14a 工字钢,间距分别为 120、90 cm,工字钢采用焊接双拼构造,防止发生面外失稳;工字钢下纵向对称布置 8 片 321 型贝雷梁,间距从中间到两侧依次为 45、75、90 cm;贝雷梁底部为横向布置的双拼 I50a 工字钢,工字钢底部与钢管柱顶部焊接。

钢管柱直径为 630 mm、壁厚 10 mm,沿横桥向一排布置 4 根,钢管柱间距为 3.5 m,沿顺桥向布置 4 排,排距依次为 9.0、18.0、12.0 m。钢管柱与承台预埋钢板焊接,立柱间设 3 道剪刀撑,剪力撑采用 [16# 槽钢;采用桩身直径 1.25 m 的群桩基础,地基承载力不小于 946.7 kN,桩体顶部为长 7.3 m、宽 3.0 m、高 1.0 m 的长方体承台。

## 2 组合支架体系施工监测分析

为系统了解组合支架体系的实际工作性能,避免发生支架倾覆垮塌事故,同时优化部分支架冗余构件、节约施工成本,选取钢管柱、贝雷梁和盘扣支架等典型构件进行施工全过程受力行为监测,在支架体



考虑到结构间的柔性连接,以及结构与环境的相互影响,墩底采用一般支承。承重梁与贝雷梁间采用弹性连接,贝雷梁与盘扣支架的水平杆件和斜杆端头需释放梁端约束。现场实际监测与设计阶段不同,无需考虑额外分项系数。应根据施工实际荷载,在模型中通过节点荷载和线荷载的方式添加支架及模板自重、现浇箱梁自重及施工荷载等,模拟支架现场真实的受力状态;施工荷载包括作用在支架结构顶部模板上的施工设备荷载、临时堆放施工材料荷载、混凝土浇筑冲击荷载、风荷载、其他环境荷载等,设定施工荷载为  $2.5 \text{ kN/m}^2$  [25]。

### 2.2.2 受力分析

取中跨  $L/2$ 、中支点、边支点横断面处以及腹板处纵断面的盘扣支架竖杆最大应力,变化曲线如图 5 所示。由图 5a)可知:盘扣支架各支点以及中跨  $L/2$  横断面的应力均对称分布;中跨  $L/2$  横断面盘扣支架竖杆应力整体偏大,最大应力出现在中支点横断面中心距端部 (LCS2) 2.4 m 处,最大应力为  $-107.7 \text{ MPa}$ 。由图 5b)可知:沿纵桥向,盘扣支架竖杆纵断面最大应力沿桥梁跨中大致对称分布;从桥梁端部至跨中  $L/2$  处,竖杆应力先增大后减小;竖杆最大应力出现在中跨  $L/2$  距右端 5.7 m 处,最大应力为  $-183.0 \text{ MPa}$ 。

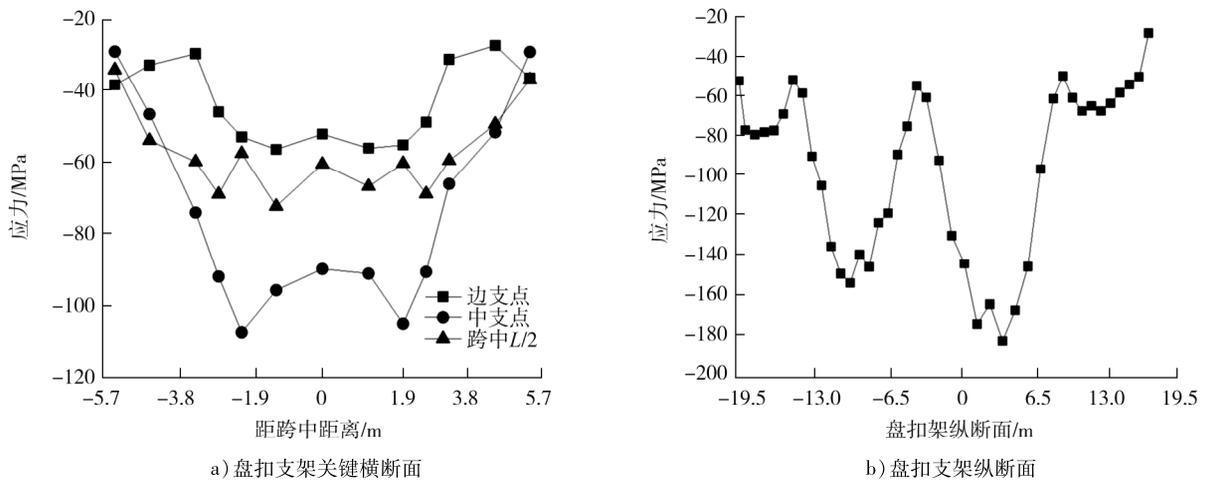


图 5 盘扣支架竖杆应力分布

贝雷梁横断面与纵断面应力变化如图 6 所示。由图 6 可知:贝雷梁受力沿桥纵桥向与横桥向中轴线对称分布,贝雷梁跨中及支点处为应力较大位置。贝雷梁跨中最大应力出现在上弦杆,为  $-142.9 \text{ MPa}$ ;支点处最大应力为  $-281.5 \text{ MPa}$ 。现场荷载条件更复杂,支点处应力有超限的风险,应采用焊接钢板等方法加强贝雷梁支点处的竖杆。

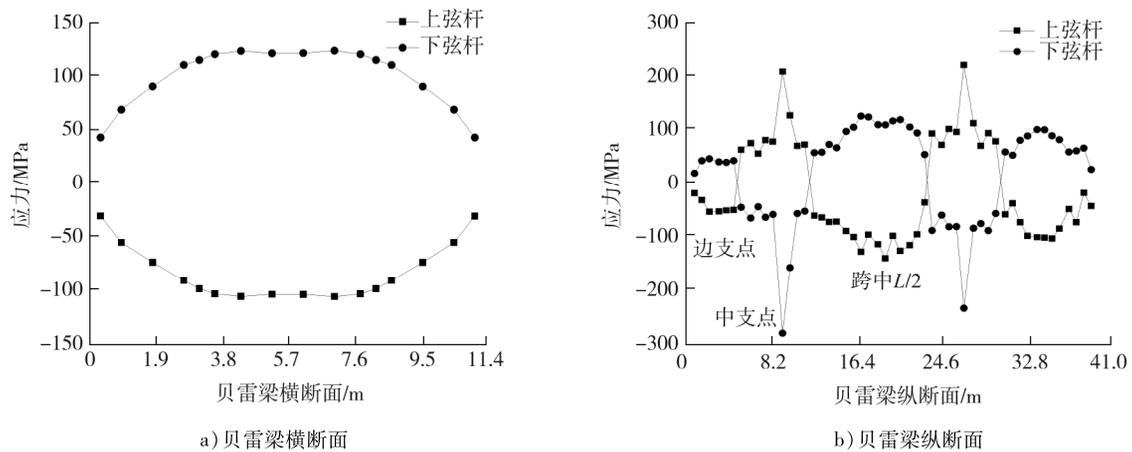


图 6 贝雷梁横断面与纵断面应力变化

选取左侧边支点和中支点断面处的两排钢管柱,立柱编号如图4所示。1#~8#钢管柱施工期的最大应力分别为-2.7、-11.7、-11.7、-2.8、-48.4、-112.0、-111.4、-44.2 MPa,沿 LCS2 局部坐标系的  $y_2$  轴基本呈对称分布。位于中支点断面钢管柱所受应力较大,最大应力出现在6#钢管柱处,为-112.0 MPa。腹板下侧2#、3#、6#、7#钢管柱所受应力是翼板处1#、4#、5#、8#钢管柱应力的2.5倍。中支点内侧6#、7#钢管柱应力为边支点内侧2#、3#钢管柱的9.5倍,中支点外侧5#、8#钢管柱所受应力为边支点外侧1#、4#钢管柱的16.0倍。

### 2.3 测点布设

根据施工监测需求及组合支架的受力特点,选取结构薄弱位置进行应力监控<sup>[26]</sup>。贝雷梁中跨跨中及中跨支点位置承受较大弯矩和剪力,故在第5片和第7片贝雷梁中跨跨中上下弦杆布设测点1、2、4和5,支点竖杆位置布设测点3和6监测应力;钢管柱中支点为主梁负弯矩最大区域,兼顾横断面的对称性,选取7#、8#墩柱设置7、8测点监测应力,同时在承重梁上设置测点10、11;在钢管柱的剪力撑斜杆设置测点9监测应力。为防止盘扣支架产生失稳破坏,在支架底板外边缘竖杆处断面设置测点15监测倾角,底板与腹板下方设置测点13与测点14监测轴力,支架底部斜撑设置测点12监测应力,测点布设位置如图7、8所示。

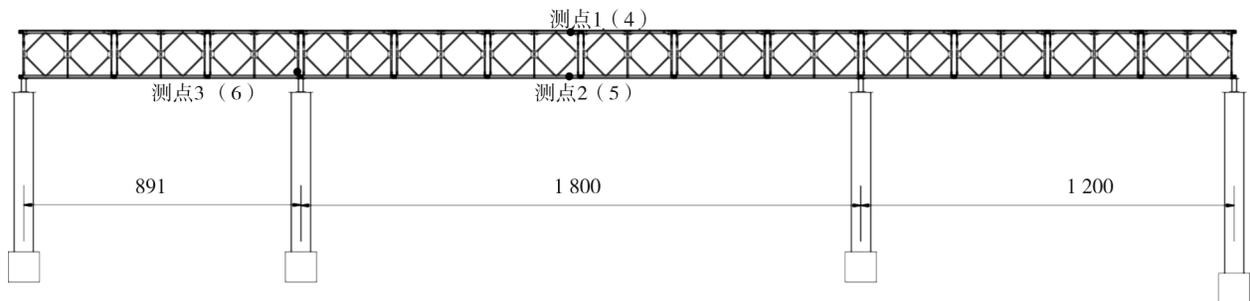


图7 贝雷梁测点布设位置示意图

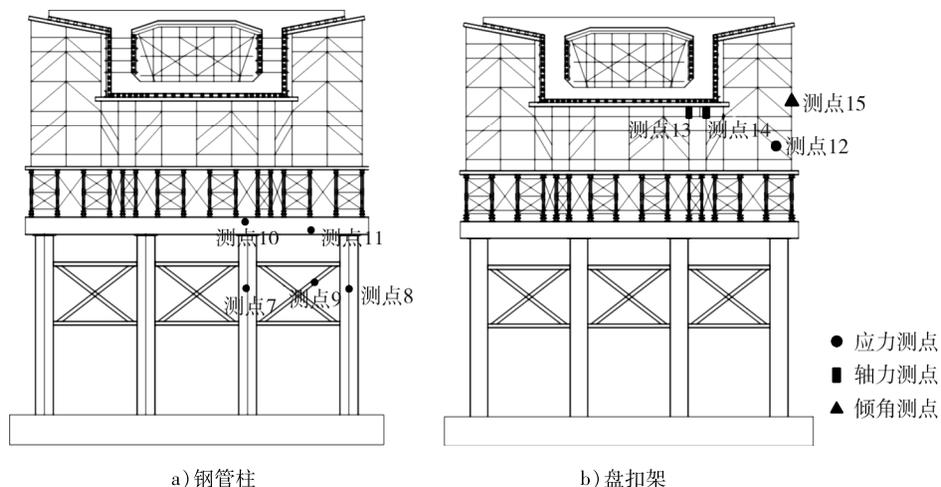


图8 钢管柱及盘扣支架测点布设位置示意图

### 2.4 监测数据分析

在混凝土浇筑、养护和钢筋张拉等施工阶段进行监测,采集监测数据历时43 d,数据采集频率为5 min/次。盘扣支架的轴力、应力和倾角变化状况如图9~11所示。

由图9可知:位于腹板与底板下方的测点13和14的轴力在混凝土浇筑阶段与钢筋张拉阶段显著增大,且在钢筋张拉结束后分别达到最大轴力9.35、10.49 kN,支架轴力曲线随施工过程呈阶梯状变化。浇筑过程中,腹板处支架承担的混凝土自重更大,故测点14所受轴力明显大于测点13。

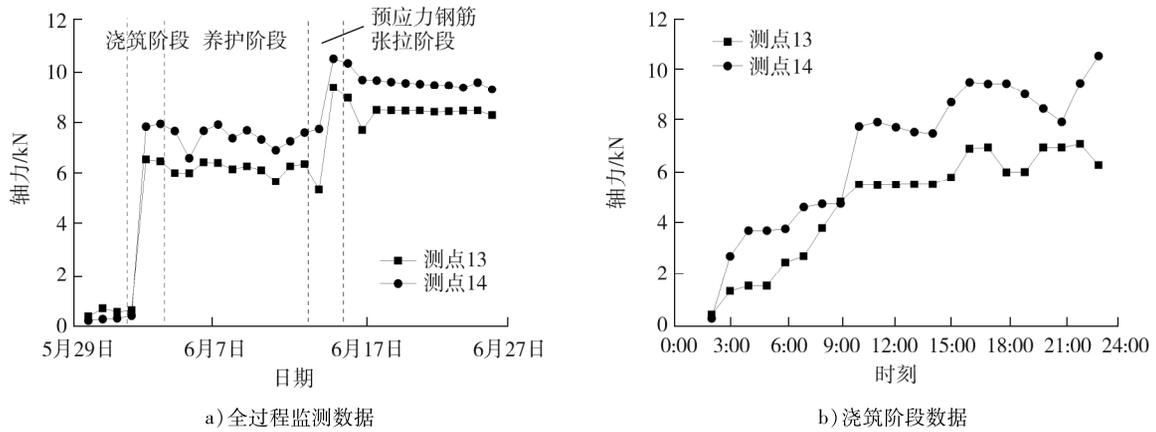


图 9 盘扣支架轴力监测数据对比

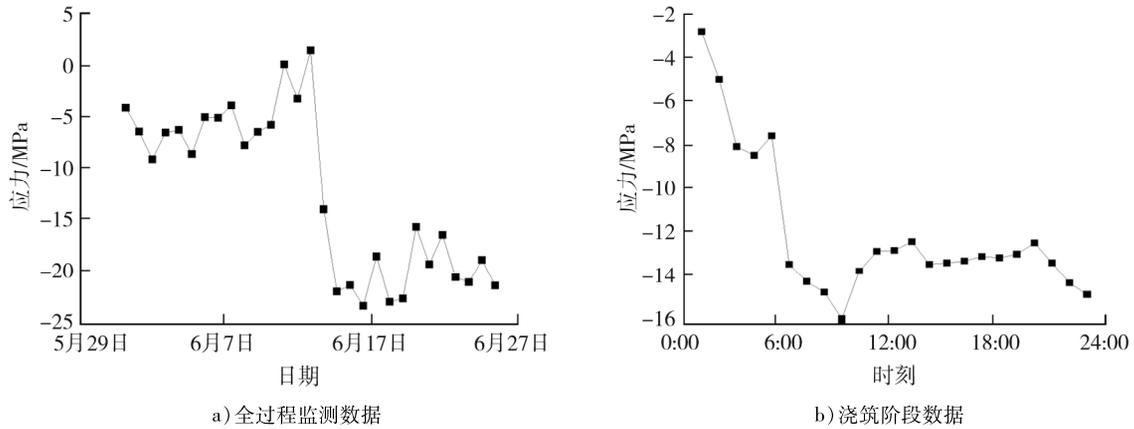


图 10 盘扣支架应力监测数据对比

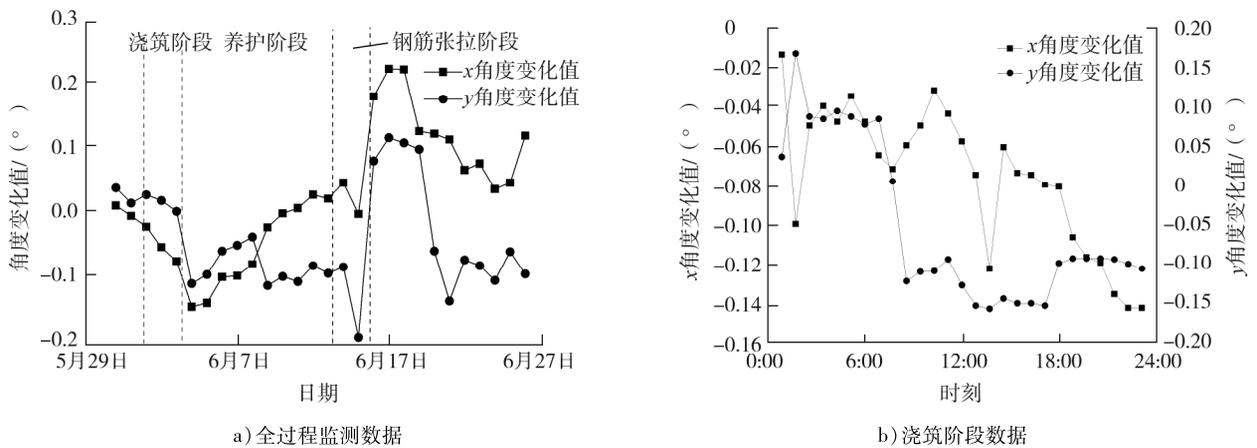


图 11 盘扣支架倾角监测数据对比

由图 10 可知:位于支架外边缘斜杆的测点 12 应力在钢筋张拉结束后突然增大。原因为盘扣支架斜杆的机械连接方式存在自由行程,斜杆应力波动较大。

由图 11 可知:在混凝土浇筑与钢筋张拉阶段,盘扣支架竖杆上部测点 15 倾角先增大后减小,数值波动范围为  $0.1^{\circ} \sim 0.2^{\circ}$ ,且  $x$  与  $y$  偏移方向一致。钢筋张拉结束后,倾角监测数据仍存在一定波动,与桥位施工处的风荷载有关。

贝雷梁应力的监测结果如图 12 所示。由图 12 可知:开始浇筑混凝土后,贝雷梁各测点应力迅速增大,基本呈线性变化。在养护阶段,各测点应力基本保持不变;进入预应力钢筋张拉阶段,贝雷梁各

测点监测数据出现差异:与混凝土浇筑结束时刻相比,位于支点位置的测点3、6应力分别增大10%、13%,位于跨中位置的测点1、2、4、5应力减小10%~15%。在预应力钢筋张拉阶段,支点位置应力增大的主要原因是预应力钢筋张拉引起梁体跨中上拱,组合支架体系承担的纵向荷载重新分布,并向支点位置转移。

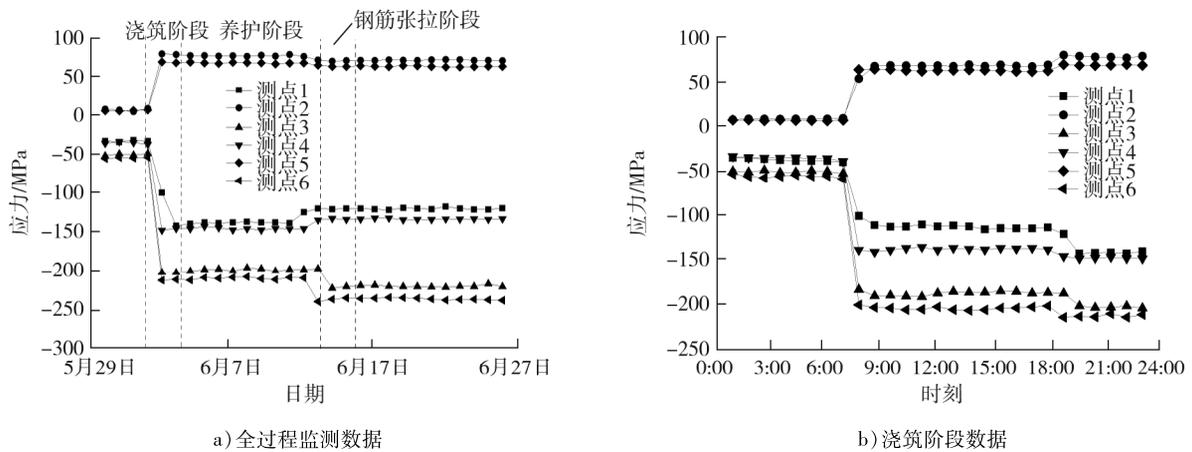


图12 贝雷梁应力监测数据对比

钢管柱应力的监测结果如图13所示。由图13可知:开始混凝土浇筑后,墩柱、承重梁及剪力斜撑位置的应力逐渐增大。与贝雷梁监测结果类似,在预应力钢筋张拉结束后,预应力钢筋张拉产生荷载重分配,中支点断面各测点应力减小。位于墩柱与斜撑位置的测点7、8、9应力减小8%~10%,位于承重梁的测点10、11应力分别减小10%、9%。

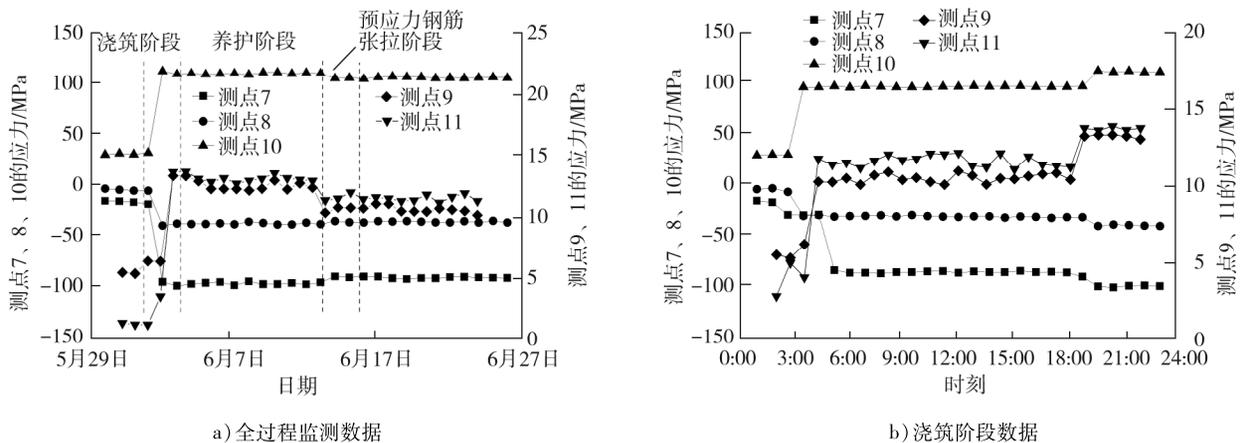


图13 钢管柱应力监测数据对比

### 3 对比分析

贝雷梁和钢管柱的有限元分析应力与监测应力对比如表1所示。由表1可知:在整个施工阶段,贝雷梁跨中下弦杆、支点竖杆和承重梁的最大监测应力比有限元分析结果小5%~15%。贝雷梁上弦杆监测应力与有限元分析应力的相对差(有限元分析结果与监测结果之差与有限元分析结果之比)为15%,明显大于下弦杆的相对差5%。原因为贝雷梁跨中下弦杆为自由边界,跨中上弦杆与盘扣支架连接,内部约束条件复杂,有限元模拟的边界条件与结构实际状态相对差较大,导致贝雷梁跨中上弦杆的应力数据相对差较大。对于钢管柱构件,施工阶段立柱最大监测应力比有限元分析应力小9%~13%,钢管柱斜撑的监测应力比有限元分析应力大14%,但未超过材料设计强度。钢管柱斜撑的有限元模拟方式偏不安

全,考虑到斜撑作为结构体系抗倾覆稳定性的重要部分,在组合支架体系设计阶段应引起重视,增大钢管柱横向连接系的断面尺寸或增加构件数量。

表1 有限元分析应力与监测应力对比

测点编号	有限元分析应力/MPa	监测应力/MPa	相对差/%	测点编号	有限元分析应力/MPa	监测应力/MPa	相对差/%
1	-163.6	-142.64	14.6	7	-111.4	-99.36	12.1
2	85.2	80.81	5.4	8	-44.2	-39.88	10.8
3	-245.4	-223.87	9.6	9	11.6	13.25	14.2
4	-170.1	-148.55	14.5	10	122.2	111.85	9.0
5	74.3	70.31	5.6	11	15.3	13.58	12.6
6	-267.9	-240.98	11.1				

对于盘扣支架构件,现浇梁底板与腹板处的竖杆监测轴力分别为-9.35、-10.49 kN,对应的有限元分析结果分别为-10.44、-12.1 MPa,相对差为10%~14%。在整个施工阶段,盘扣支架竖杆顶部在 $x$ 、 $y$ 方向最大倾角分别为 $0.229^\circ$ 、 $0.122^\circ$ 。经几何换算后,支架顶部位移为-11.321 5 mm,有限元分析结果为该点位的位移为-20.321 0 mm,有限元计算结果与现场监测结果之比为1.8,表明盘扣架构件的安全储备较高。

## 4 结束语

依托济南市有轨电车现浇梁项目,分析钢管柱、贝雷梁与盘扣组合支架体系关键部位的工作性能,采用软件MIDAS/Civil构建有限元模型,对监测数据与有限元数据进行对比分析。

1)组合支架体系主要构件在整个施工阶段应力、轴力与变形的实际监测数据比有限元模拟数据小,表明当前基于有限元的设计方法基本合理可行。

2)贝雷梁上弦杆与支架的内部连接较复杂,有限元模拟与实际状态存在一定偏差,但仍偏安全。

3)连接钢管柱的剪力斜撑应力实际监测数据大于有限元数据,偏不安全,在设计阶段应加大钢管柱横向连接系的断面尺寸或增加构件数。

### 参考文献:

- [1] 罗小东.公路现浇箱梁钢管支架贝雷梁施工技术分析[J].低碳世界,2024,14(9):157-159.
- [2] 李晓迪.高速公路满堂支架现浇箱梁桥施工技术[J].交通世界,2025(增刊1):269-271.
- [3] 刘文龙.某公路桥梁项目0号块支架法的施工技术[J].交通世界,2025(增刊2):261-263.
- [4] 张林鹏,曾学,黄萍,等.高速公路桥梁满堂支架现浇箱梁施工技术[J].交通世界,2022(8):125-126.
- [5] 潘克敏.市政桥梁工程施工中盘扣式满堂支架应用分析[J].城市建设理论研究(电子版),2025(5):202-204.
- [6] 王云海.浅谈高速公路现浇箱梁满堂支架施工技术[J].工程建设与设计,2024(16):155-157.
- [7] 闫闪闪.现浇箱梁满堂支架施工技术研究[J].科学技术创新,2025(7):128-131.
- [8] 高英桂,尹莎莎.立交上跨主线桥满堂支架法现浇箱梁施工技术[J].云南水力发电,2024,40(10):1-4.
- [9] 章杰,蒲建平.碗扣支架和贝雷梁复合支架在跨河桥梁中的应用[J].交通世界,2024,(29):161-163.
- [10] 尚刘宏.连续箱梁桥浇筑过程支架受力分析[J].建筑机械,2025(1):103-106.
- [11] 张一鹏.基于Midas civil的现浇箱梁组合支架建模技术及受力分析[J].交通科技与管理,2024,5(14):20-22.
- [12] 季炜.大跨径现浇连续箱梁施工技术研究[J].工程建设与设计,2024(22):175-177.
- [13] 杨光,雷宇超.大跨径预应力混凝土桥梁现浇支架应用分析[J].西部交通科技,2023(12):159-161.
- [14] 张晓光,吴永明.支承于既有桥梁上的现浇箱梁支架体系设计研究[J].公路,2022,67(11):240-243.
- [15] 闫高峰.高铁正线桥梁支架预压试验及监测研究[J].建筑科技,2024,8(11):80-83.

- [16] 皇甫晓滑. 基于在线监测施工支架可靠性分析与安全性评价[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2021.
- [17] 高策. 组合支架现浇连续箱梁施工监测与分析[D]. 北京:北京交通大学,2010.
- [18] 叶建新,钟学森,刘权,等. 自动化实时监测技术在水中现浇桥梁模板支撑工程中的应用与研究[J]. 广东建材, 2024,40(3):41-45.
- [19] 段庚鑫. 基于施工全过程的高支模监测系统设计与安全预警研究[D]. 长春:吉林大学, 2023.
- [20] 张瑾. 高速公路桥梁支架贝雷梁法施工数值模拟研究[J]. 交通世界,2024(36):165-167.
- [21] 张钰坤. 跨线刚构桥0~1#块支架设计分析与施工技术研究[J]. 价值工程,2025,44(8):105-107.
- [22] 邱洋. 斜撑贝雷梁组合支架研发及其在跨浅埋地铁现浇箱梁中的应用[J]. 交通工程,2025,25(1):106-112.
- [23] 于安文,谷亚陆,杨立,等. 阜溧高速软基区曲线现浇箱梁支架选型及力学特性研究[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2023,44(5):65-74.
- [24] 王先雷,张琴. 现浇箱梁组合支架综合施工技术 in 桥梁中的应用[J]. 建筑技术开发,2024,51(8):117-119.
- [25] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑施工模板安全技术规范:JGJ 162—2008[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [26] 白应华,张佳,汤旭. 混凝土箱梁桥承重支架受力特性研究[J]. 工程抗震与加固改造,2021,43(4):167-171.

## Performance analysis of a large-span cast-in-place concrete beam composite support system based on full-process monitoring

TANG Zichao<sup>1</sup>, ZHANG Jie<sup>2</sup>, HU Liansheng<sup>1</sup>, KONG Xiangmin<sup>1</sup>, CUI Fengkun<sup>2\*</sup>

1. China Construction Eighth Engineering Division Second Construction Co., Ltd., Jinan 250022, China;

2. School of Civil Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China

**Abstract:** To analyze the actual working performance of the large-span cast-in-place concrete beam combined supporting system, to prevent support overturning accidents during construction, and to optimize structural redundancy design, a monitoring system is established based on the Jinan tram project's three-span continuous beam bridge by deploying high-precision sensors. A method combining real-time monitoring throughout the construction process with finite element simulation is used to study the key mechanical behaviors of the combination system composed of steel pipe columns, Bailey beams, and buckle supports. The results indicate that during the entire construction process, the stress monitoring results of the main components of the combined support system are generally 5% to 15% lower than the finite element calculation results, suggesting that the overall design of the combined support system based on finite element simulation possesses a higher safety reserve; the stress monitoring results of the upper chord member of the Bailey beam at mid-span showed a significantly greater discrepancy compared to the finite element results than the lower chord member at mid-span, indicating that there is a deviation between the internal constraints of the finite element model and the actual working conditions; the stress monitoring results of the diagonal braces between the steel pipe columns are greater than the finite element simulation results, which should be noted during the design phase.

**Keywords:** composite support system; full-process monitoring; finite element analysis; working performance

(责任编辑:王惠)