

跨疏港铁路特大桥挂篮预压施工控制与变形特性研究

王纯昊¹ 王丹^{1,2} 金辉¹

1.中国葛洲坝集团三峡建设工程有限公司, 武汉 430000; 2.湖北工业大学, 武汉 430000

摘要: 本文以跨疏港铁路特大桥为研究对象, 深入探讨挂篮预压技术。在施工过程中, 挂篮预压至关重要, 它能有效检验挂篮的结构强度、刚度及稳定性。通过对不同预压方法的分析对比, 结合特大桥实际情况, 确定了合理的预压方案。实施过程中, 严格控制预压荷载、加载顺序及观测点布置, 确保数据准确可靠。经预压, 验证了挂篮性能满足施工要求, 为特大桥的顺利建设提供了有力保障, 也为类似工程提供了宝贵的经验参考。

关键词: 施工控制; 有限元分析; 变形监测与分析; 结构稳定性验证; 预拱度优化

1 主要参数

疏港铁路特大桥桥址位于荆门市沙洋县李家坪, 主要跨 S342 省道及规划铁路。S342 省道路基宽度为 20.5m, 桥下净空大于 5.2m, 路线与其交叉角度约为 38°, 规划铁路红线宽度 30m, 桥下净空大于 5.5m, 路线与其交叉角度约为 35.81°。桥址区地形地貌属构造剥蚀残丘地貌区, 地势总体略高, 起伏较小, 坡度在 15° 以内, 桥轴线地面标高在 62.7~67.0m 之间。桥址区内农田遍布, 省道 S342 及村道、乡道与外界相连, 交通便利。

桥宽组成: 标准桥面宽度为 0.5m(护栏)+15.5m(净宽)+1.5m(中间带)+15.5m(净宽)+0.5m(护栏)=33.5m; 左幅第 28(右幅第 29)跨上跨规划疏港铁路, 交叉角度为 35.81°, 加宽后桥宽组成: 桥面宽度为 0.525m(SS 级护栏)+1m 间距+0.545m(HB 级护栏)+15.5m(净宽)+1.5m(中间带)+15.5m(净宽)+0.545m(HB 级护栏)+1m 间距+0.525m(SS 级护栏)=36.64m。

本桥主桥悬浇箱梁共分为 12 段, 长度依次为 1#~4#段长 3.0 米, 5#~12#段长 4.0 米, 中跨合龙段长 2 米, 边跨合龙段长 2 米, 边跨现浇段长 4.8 米。箱梁为单箱双室结构, 5#块为最大悬臂梁段, 重量为 248.5t。

按照设计要求, 挂篮设计总重量 78.02t(1529KN), 挂篮与悬浇质量比为 0.31, 满足桥规 0.3~0.5 质量比要求。

① 挂篮由五部分组成: 承重桁架系统、后锚系统、底篮和悬挂系统、行走系统、模板系统等[1]。

② 主桁架系统: 承重主梁由两片菱形桁架组成, 每片桁架由五根受力杆件连接而成。主桁系统是整个挂篮的主要受力构件, 其主要由承重杆件、销轴、连接桁架、前上横梁等部分连接组成, 主桁是由型钢杆件和各节点采用销轴连接而成的菱形结构, 前上横梁架设在承重桁架的前端[2], 由型钢

焊接成的组焊件。

③ 后锚系统: 承重桁架片的锚固系统, 利用在浇筑混凝土时预埋的精轧螺纹钢筋作锚杆, 配重横梁将桁架锚固于已浇好的箱梁顶部, 用后锚杆穿过预留孔, 上端与挂篮后锚点连接[3], 下端用连接器锚固于预埋好的精轧螺纹钢筋上。

④ 底篮及悬挂系统: 由前下横梁、后下横梁、底篮纵梁等部分组成, 底篮纵梁采用工 36 型钢加工[2], 作为浇筑混凝土的底篮。前、后底横梁上设置连接点, 通过钢销与吊带连接。底篮的锚固系统, 通过吊带完成。后下横梁的锚固, 两侧用 2 根精轧螺纹钢筋作吊带, 悬挂于后顶横梁两端, 后端底部用精轧螺纹钢筋作吊带[5], 下端与后下横梁销接, 上端穿过主梁底板锚固于底板。前下横梁的锚固, 是用 6 根 Q355 钢板吊带(2 根 PSB830 ϕ 32 精轧螺纹钢), 下端与前下横梁销接, 上端直接与挂篮的前上横梁连接。采用液压千斤顶来调节前、后底横梁的高度, 以实现准确的立模标高[1][4][6]。

⑤ 行走及锚固系统: 主要由走行轨道、滑座、吊挂滚轮、轨道压梁、轨道垫梁等部分组成。轨道为双拼大型钢整体式轨道, 轨道主要供挂篮空载前移使用。挂篮前移时, 主千斤顶起前支座, 滑座与轨道脱开, 整体轨道向前拖动后锚固, 然后吊挂滚轮反扣在轨道上, 主桁前支座下放置在轨道上, 最后再通过液压油缸使挂篮顶推前移。锚固系统为主桁系统的自锚平衡装置, 主要由扁担梁、锚杆、螺帽、垫块等部分组成[1][3][4][5]。

⑥ 模板系统: 由内、外模板、滑梁及模板固定装置组成, 均采用大块钢模。浇筑混凝土时, 模板由内外滑梁支撑, 而内外滑梁的锚固, 则通过吊带一端锚固于混凝土箱梁的顶板, 一端锚固于挂篮前上横梁。内外模板侧模间由对拉螺杆承受浇筑混凝土时的侧向压力。挂篮移动时, 外模由外模滑梁支托随同挂篮前移, 内模及滑梁同时被拉出[1][3][4][5]。

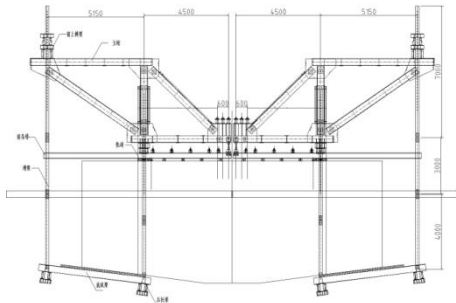


图 1 挂篮总装侧视图 (单位: mm)

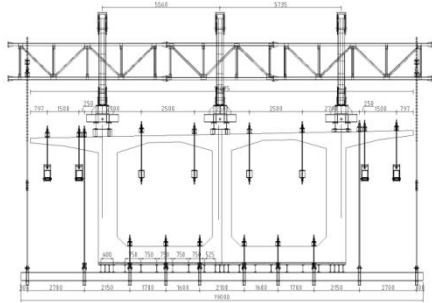


图 2 挂篮内外导梁正视图 (单位: mm)

- (1) 混凝土自重 $G_C=2.58\text{kN/m}^3$ (包含钢筋容重);
- (2) 钢材弹性模量 $E_s=2.06 \times 10^5\text{MPa}$;
- (3) 材料强度设计值:

Q235 钢材 $f=215\text{N/mm}^2$, $f_v=125\text{N/mm}^2$;

Q355 钢材抗拉、抗压、抗弯强度 450MPa, 抗剪 260MPa;
40Cr 钢棒剪应力取 570MPa;

PSB830 $\phi 32$ 精轧螺纹钢的弹性模量在 200GPa;

菱形架竖杆及前后斜杆采用双 [36#普通热轧槽钢组焊, 前横梁采用双 HN500 \times 200H 钢组焊 [7], 前后托梁均采用双 I40 工字钢组焊, 中门架由 [10#槽钢组焊, 底纵梁采用 I36 工字钢, 内外导梁采用双 [36#普通热轧槽钢组焊, 吊杆采用 PSB830 $\phi 32$ 精轧螺纹钢 [7], 吊带采用截面 $\delta 25 \times 150$ 材质为 Q355 钢板, 具体结构形式见图 1、图 2, 挂篮自重 624.2t。

2 挂篮预压

2.1 挂篮预压荷载取值

挂篮预压采用千斤顶反压方式, 主要验证挂篮的安全性及采集挂篮变形数据。疏港铁路特大桥 56+100+56m 连续梁 1#~12# 采用挂篮悬浇。

箱梁根部梁高 6.5m, 顶板厚 32cm, 底板厚度 32~75.9cm, 腹板厚度 50~90cm; 箱梁高度按二次抛物线变化; 箱梁梁面横向宽度 18.095m, 翼缘板宽 3m。

箱梁 1#~4# 节段为 3.0m, 1# 节段重 238.7 吨。

5#~12# 节段为 4m。

反压总力以连续梁体积最大、最重节段 5# 块箱梁重量为检验标准, 挂篮预压承受梁重的 1.2 倍控制, 并在横、纵桥向尽量模拟主要荷载的分布。

表 1 5# 块主梁材料数量统计表

| 规格 | 共长 (m) | 共重 (kg) |
|---------------------------|--------|---------|
| HRB400/20 (mm) | 4043.4 | 9987.2 |
| HRB400/16 (mm) | 2100 | 3318 |
| HRB400/12 (mm) | 404.5 | 359.2 |
| C50 混凝土 (m ³) | | 93.8 |

预压底板支撑分配纵横梁总重: $G_1=10.268\text{t}$

5# 块单块混凝土总重量为: $G_2=93.8 \times 2.6=243.88\text{t}$

模板自重: $G_3=9.15\text{t}$

施工荷载: $G_4=5\text{t}$

预压总重 = $(G_2+G_3+G_4) - G_1$

预压总重 = (5# 块混凝土自重 (悬浇最重节段) + 模板自重 + 施工荷载) - 预压底板支撑分配纵横梁总重

预压总重: $(243.88+9.15+5) - 10.268=247.762\text{t}$

挂篮预压总荷载: $2428.06 \times 1.2=2913.6\text{KN}$

通过油顶回归方程式计算出压力表读数, 来控制加载重量。

预压前先将挂篮安装到位, 并将后锚全部安装到位, 通过调整钢吊带将底篮调整水平, 底篮上放置好压梁, 反力三角架分别安装于 0# 断面腹板, 大里程用 3 台 500t (小里程用 3 台 400t) 千斤顶通过顶压反力三角架及底篮压梁将预压荷载传递到主桁架, 以达到预压目的。

每组千斤顶预压最大压力 $2913.6 \div 3=971.2\text{KN}=99.1\text{t}$ 。

挂篮反压布置图如下。

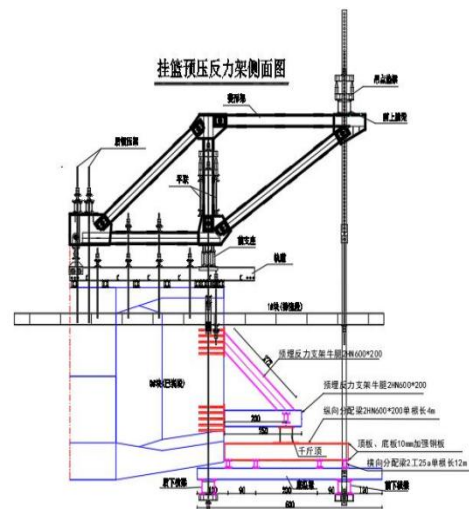


图 3 挂篮反压正面布置图

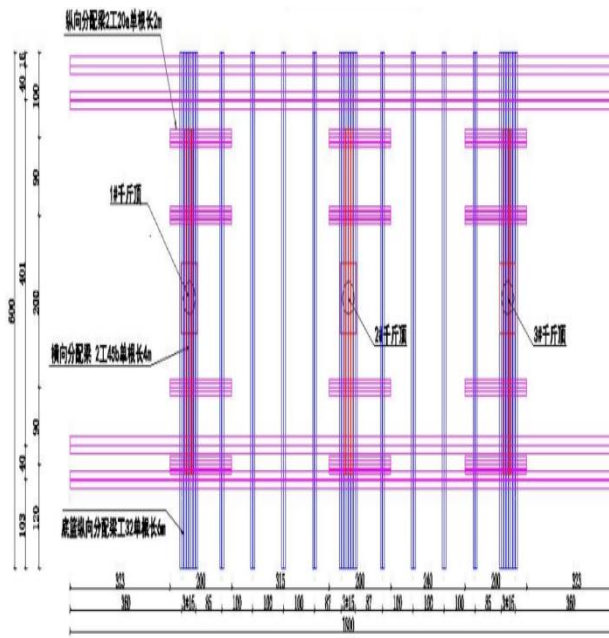


图 4 挂篮反压平面布置图

表 2 最不利工况挂篮荷载分级预压荷载控制表

| 千斤顶编号 | 1 | 2 | 3 |
|---------|---------------------------------|---------|---------|
| 反压压力 | 971.2KN | 971.2KN | 971.2KN |
| 挂篮预压总荷载 | $2428.06 \times 1.2 = 2913.6KN$ | | |

2.2 挂篮预压测点布置

挂篮变形测量主要包括：挂篮的后锚上挠值、前支点沉降值、主桁上前横梁吊杆处和跨中变形、底篮前托梁吊杆和跨中处挠度、腹板处底篮纵梁跨中挠度。

观测点设置：

- (1) 大里程前上横梁 4 个（吊带处）；
 - (2) 大里程前支腿 3 个；
 - (3) 小里程前上横梁 4 个（吊带处）；
 - (4) 小里程前支腿 3 个；
 - (5) 大里程悬臂端下横梁 6 个；
 - (6) 大里程 0#块混凝土截面端下横梁 4 个；
 - (7) 小里程悬臂端下横梁 6 个；
 - (8) 小里程 0#块混凝土截面端下横梁 4 个；
- 1 套挂篮总计 34 个观测点。

水准仪控制点设置：

- (1) 0#块桥面顶板中横梁轴线 2 片桁架之间各设置 1 个水准基点（共 2 个）；
- (2) 0#块腔室内中横梁人洞底板倒角处各设置 1 个水准基点（共 4 个）。

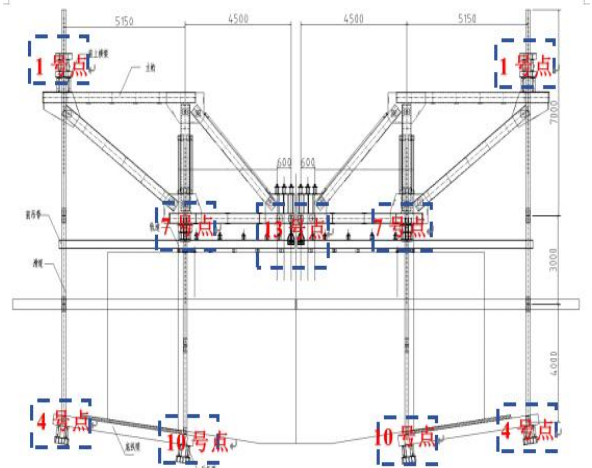


图 5 挂篮预压测量观测点布置图（侧视）

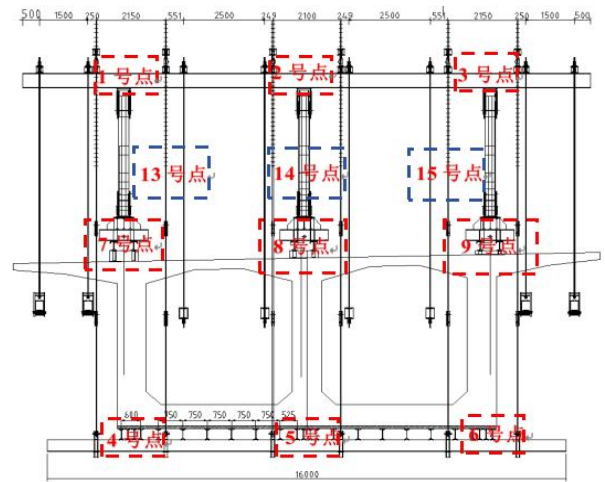


图 6 挂篮预压测量观测点布置图（正视）

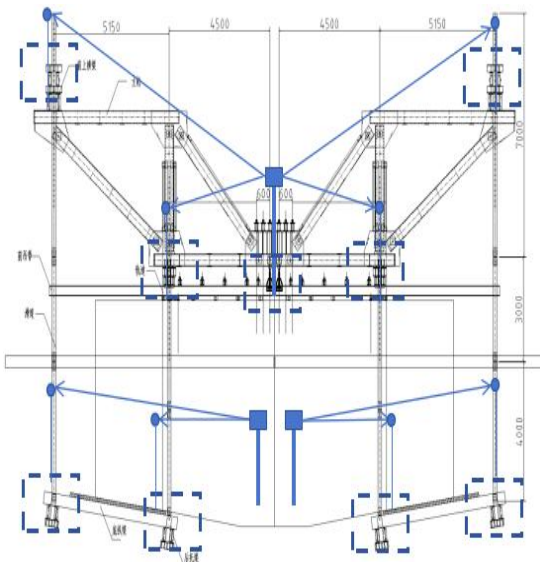


图 7 挂篮预压测量水准仪布置图（侧视）

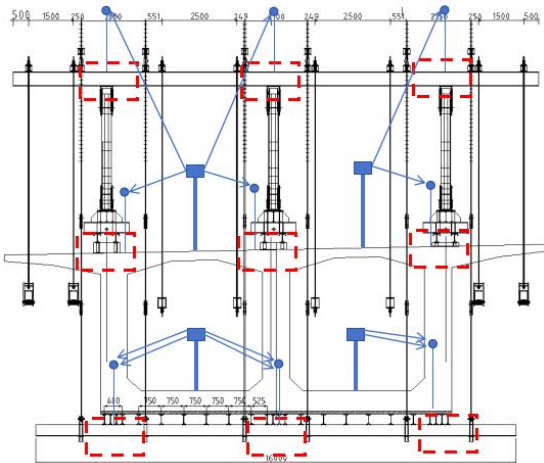


图 8 挂篮预压测量水准仪布置图（正视）

2.3 挂篮反压托架结构强度仿真模拟计算

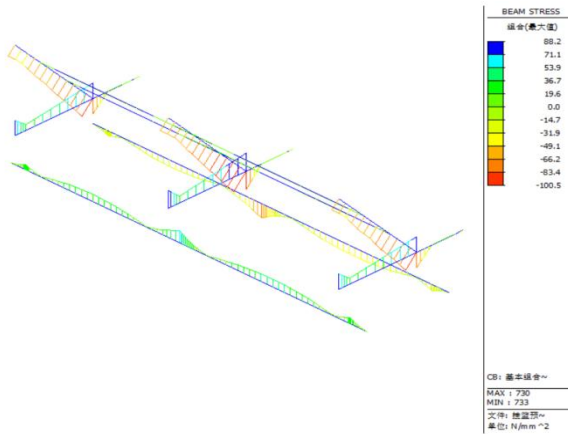


图 9 挂篮预压反力架组合应力 (M Pa)

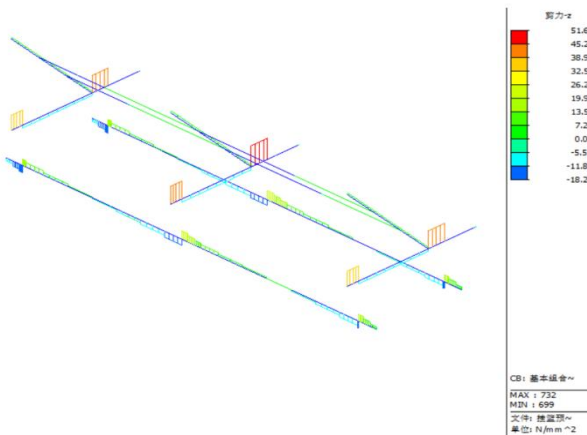


图 10 挂篮预压反力架剪应力 (M Pa)

从计算结果可以看出，挂篮预压反力架，在最大顶力下剪应力极值为 51.6MPa<125MPa，组合应力极值为 100.5MPa<215MPa，结构整体强度满足规范要求。

根据有限元计算，埋件反力结果如下：

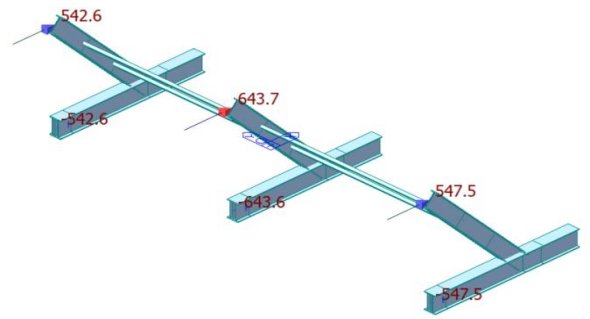
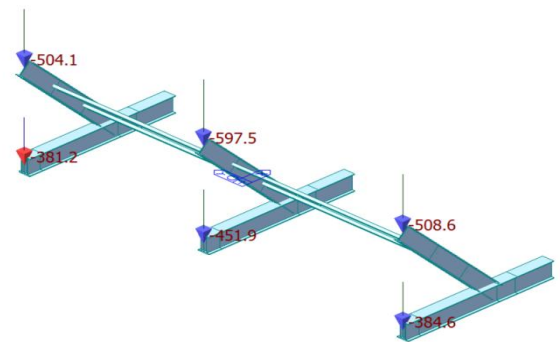


图 11 埋件拉压力计算结果 (N)



2.4 挂篮预压加压卸压分级参数设置

图 12 埋件剪力计算结果 (N)

从计算结果可以看出，下部埋件最大拉力 N1=643.6kNkN，最大剪力 V1=451.9kN，上部埋件最大剪力 V2=597.5kN。

根据埋件结构图，剪力全部由牛腿承受，底部拉力由底部拉杆承受，拉杆采用 PSB785 直径 $\phi 32$ 精轧螺纹钢。4 根 $\phi 32$ 精轧螺纹钢，可提供锚固力： $[N]=4 \times 803.8 \times 682=2193kN>643.6kN$ ，满足要求。

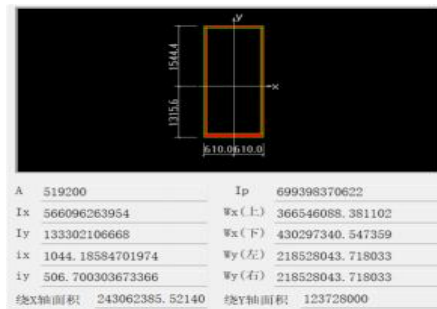


图 13 牛腿根部截面参数

Fig13. Section Parameters at the Root of Corbel
剪应力极值为：

$$\tau = \frac{VS}{Ib} = \frac{597.5 \times 10^3 \times 2.43 \times 10^8}{5.66 \times 10^{11} \times 12} = 21MPa < 125MPa$$

牛腿强度满足要求。

表 2 挂篮预压压力加载分级表 (500t 千斤顶)

| 序号 | 部位 | 分级加压 | 预压点编号 (单位: MPa) | | | 备注 |
|----|-----------------|---------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------|
| | | | 1#预压点 (1#顶) | 2#预压点 (2#顶) | 3#预压点 (3#顶) | |
| 1 | | 50% | 14.4 | 14.4 | 14.6 | 加载持荷 2 小时后测量 |
| 2 | 托架固结端 | 100% | 28.7 | 28.8 | 29.1 | 加载持荷 4 小时后测量 |
| 3 | | 120.00% | 34.5 | 34.5 | 35 | 加载持荷 24 小时后测量 |
| | 回归方程式 | | $y=0.009860X+0.02$ | $y=0.009850X+0.09$ | $y=0.009850X+0.43$ | 500t 千斤顶 |
| | 单点控制压力 (单位: KN) | | | | 2913.6 | |

表 3 挂篮预压压力卸载分级表 (500t 千斤顶)

| 序号 | 部位 | 分级加压 | 预压点编号 (单位: MPa) | | | 备注 |
|----|-----------------|---------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------|
| | | | 1#预压点 (1#顶) | 2#预压点 (2#顶) | 3#预压点 (3#顶) | |
| 1 | | 120.00% | 34.5 | 34.5 | 35 | 加载持荷 1 小时后测量 |
| 2 | 托架悬臂端 | 100% | 28.7 | 28.8 | 29.1 | 加载持荷 2 小时后测量 |
| 3 | | 50% | 14.4 | 14.4 | 14.6 | 加载持荷 3 小时后测量 |
| 4 | | 0% | 0 | 0 | 0 | 加载持荷 4 小时后测量 |
| | 回归方程式 | | $y=0.009860X+0.02$ | $y=0.009850X+0.09$ | $y=0.009850X+0.43$ | 500t 千斤顶 |
| | 单点控制压力 (单位: KN) | | | | 2913.6 | |

2.5 预压过程及成果分析应用

在预压过程中,能模拟挂篮在后续混凝土浇筑等施工阶段的实际受力情况,提前发现挂篮结构可能存在的薄弱环节,如杆件变形过大、连接部位松动等,及时进行加固处理,避免施工中出现坍塌等安全事故,保障现场人员生命安全和工程顺利推进。

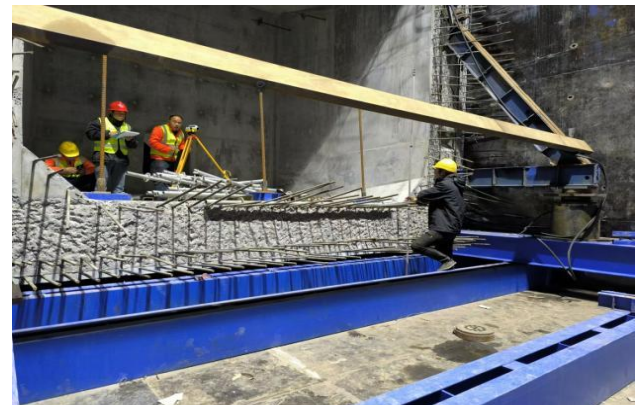
通过分析预压成果,精准掌握挂篮的变形规律,包括弹性变形与非弹性变形数值。在后续立模时,依据这些数据合理设置预拱度,使得浇筑成型的梁体线形与设计要求的相符,防止出现梁体下挠、开裂等质量问题,保证桥梁结构耐久性与稳定性。

其成果为同类型挂篮施工或后续节段施工提供关键数据支撑,后续施工可借鉴预压得到的挂篮性能参数、变形控制要点等,减少重复摸索过程,增强施工决策的科学性与准确性。

图 9 挂篮预压现场布置照片



(a) 挂篮桁架及吊带结构变形测量



(b) 挂篮底蓝纵横梁及模板变形测量



图 10 挂篮预压现场水准仪测量照片

表 4 挂篮大里程悬臂端下横梁下挠曲线图 (单位: m)

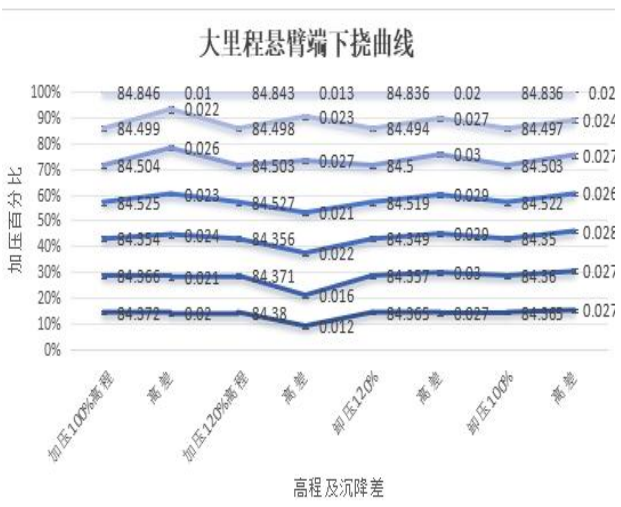
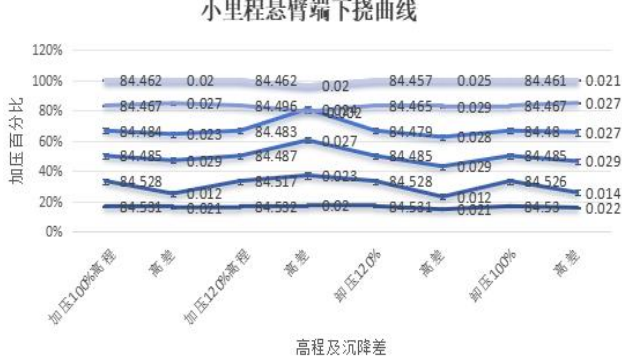


表 5 挂篮小里程悬臂端下横梁下挠曲线图 (单位: m)



通过预压得出挂篮弹性变形值在 6.3~29mm 之间, 梁段各特征点立模标高=设计标高+预拱度值+挂篮弹性变形值; 所以, 可以求出 1#块立模标高如下:

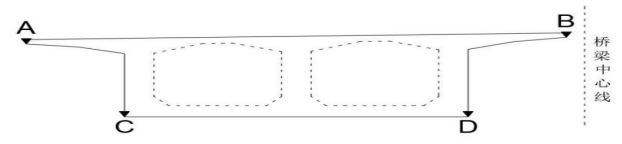


图 11 1#块立模标高控制点

表 6 1#块立模标高控制值 (单位: m)

| 里程桩号 截面号 节段特征点 | K26+078 2 | | | | K26+094 2' | | | |
|----------------------|--------------|--------|--------|--------|---------------|--------|--------|--------|
| | A | B | C | D | A | B | C | D |
| 设计高程 (m) | 91.134 | 91.495 | 85.872 | 85.872 | 90.869 | 91.230 | 85.608 | 85.608 |
| 预拱度值 (m) | 0.007 | 0.007 | 0.007 | 0.007 | 0.005 | 0.005 | 0.005 | 0.005 |
| 支架弹性变形值 (m) | 0.020 | 0.020 | 0.020 | 0.020 | 0.020 | 0.020 | 0.020 | 0.020 |
| 节段立模标高 (m) | 91.161 | 91.522 | 85.899 | 85.899 | 90.894 | 91.255 | 85.613 | 85.633 |

3 挂篮预压的总结

3.1 工程概述

本次菱形挂篮预压施工是为《疏港铁路特大桥主桥》的悬臂浇筑施工做准备。该桥梁(1#块~12#块)采用菱形挂篮进行悬臂施工, 为确保挂篮的安全性和可靠性, 以及准确掌握挂篮在施工过程中的变形情况, 进行了本次预压施工。

3.2 预压目的

检验挂篮的结构强度和稳定性, 确保在实际施工过程中能够承受混凝土浇筑荷载+模板荷载+施工荷载。

测量挂篮的弹性变形和非弹性变形值, 为后续悬臂浇筑施工中的模板调整提供依据。

发现挂篮在设计和加工过程中可能存在的问题, 及时进行整改, 避免在正式施工中出现安全隐患。

3.3 预压准备

确定预压方案: 根据桥梁的设计要求和挂篮的结构特点, 制定了详细的预压方案, 包括预压荷载的大小、加载方式、加载顺序等。

准备预压材料: 采用三角反力托架作为预压材料, 确保

预压荷载的准确性和稳定性。

安装测量设备: 在挂篮的关键部位安装高精度水准仪测量设备, 用于测量挂篮在预压过程中的变形情况。

3.4 预压过程

分级加载: 按照预压方案, 将预压荷载分为(3级)进行加载。每级加载后, 静置 1h, 观察挂篮的变形情况, 待稳定后再进行下一级加载, 加载至 120%后静载 24h, 然后进行分级(4级)卸载。

加载顺序: 遵循对称加载的原则, 先加载挂篮的主桁架部分, 然后再加载底模平台。

数据采集: 在加载过程中, 实时采集测量设备的数据, 记录了挂篮的变形情况。同时, 观察了挂篮的各个部位没有异常情况, 没有焊缝开裂、构件变形等。

3.5 预压结果

通过测量数据分析, 得到了挂篮在不同荷载下的弹性变形和非弹性变形值。挂篮设计、桥规允许弹性变形值≤20mm, 非弹性变形值≤3mm。

本次挂篮预压后非弹性变形最大值为 3mm, 弹性变形值

最大挠度为 29mm，满足桥规、挂篮结构设计要求。

强度和稳定性：在预压过程中，挂篮的各个部位未出现明显的变形和破坏现象，说明挂篮的强度和稳定性满足设计要求。

3.6 总结经验

在预压过程中，发现了一些局部缺陷，如反力托架刚节点处焊缝质量强度不足，导致预压过程中反力托架固结支点开裂，导致返工处理重新预压。针对这些问题，我们及时进行了整改（管理层面重新委派有经验的焊工补焊，技术层面增加了加劲肋、托架之间设置了联系横梁，增加了反力托架的节点刚度、整体结构强度和稳定性），确保了预压施工的顺利进行。

在施工荷载的 1.2 倍加压和卸压过程中，挠度过大主要集中在小里程左幅侧悬臂端下横梁处，最大挠度为 29mm，超过规范允许值，主要是因为小里程左侧悬臂端下横梁处于悬臂梁纵横坡调节最低点处，也是本桥施工过程中最不利工况处，在今后（1#块~12#块）施工过程中小里程左侧顶板、底板腔室尽量少堆载施工机具及其他载荷物，小型机具以及一般施工材料尽量堆载在大里程右侧腔室顶板、底板处，以平衡悬臂梁不平衡弯矩，更好的控制悬臂梁设计（监控指令）抛物线型。

同时，通过预压数据可以看出挂篮底篮悬臂横梁大、小里程在加压至 100%~120%、卸压 120%~100%时，整体挠度较大，符合工程力学基本属性。但是，局部挠度达到桥规、挂篮结构设计允许变形临界值，是因为挂篮自身的金属疲劳（项目周转）、测量误差±1mm、环境条件（温度变化、风力变化、湿度变化）的影响，尤其是悬臂梁设计自身纵横坡调整造成的不平衡弯矩。

本次预压总值为悬臂浇筑最不利工况=悬臂梁 5#块混凝土浇筑（悬臂浇筑最重节段 243.88t）+模板自重（9.15）+施工荷载（5t）。经过预压可知，在施工本节段（5#块）时，悬臂处（5#块）减少堆载施工荷载（除了必要的作业工人，其他活动荷载一律清场），在已浇筑节段（3#块）右侧大里程顶板、底板腔室内堆载总计 5t 荷载以平衡悬臂浇筑过程中的不平衡弯矩，降低 5#块底板小里程左侧（5#块小里程左腹板、1/2 底板）下挠度，最不利工况通过上述技术测量、技术计算和施工过程管理控制进行纠偏以满足施工需求，配合桥梁健康监测单位实施整体线形控制。

4 结语

通过本次预压，可以看出最不利工况也能满足施工需求，

说明其他条件状态更好的工况更加可以满足施工控制需求。本次菱形挂篮预压施工达到了总体预期目的，为后续的悬臂浇筑施工提供了可靠的依据。

在疏港铁路特大桥主桥的挂篮预压实践中，我们达成了关键目标。预压精准检验了挂篮结构强度与稳定性，获取的变形数据切实指导后续悬臂浇筑，确保施工安全、精准推进。过程虽遇反力托架焊缝、悬臂端挠度等问题，但团队迅速响应，从管理与技术层面协同发力整改，强化托架、优化荷载分布，有效化解难题。

此次经历为同类工程积累了宝贵经验，凸显施工全程精细管控的重要性。未来项目中，要深化对环境因素、金属疲劳影响的考量，进一步优化预压方案与施工流程。持续借助先进监测技术、强化施工管理，确保挂篮施工更高质高效，为桥梁建设领域技术革新添砖加瓦，铸就更多精品工程。

参考文献：

- [1]边绍志. 浅析红石梁大桥挂篮施工技术.《科技资讯》，2010-01-03
- [2]樵乐路-乐狮线立交小半径连续刚构悬臂施工下载.《网络（<https://ishare.iask.>）》，2023
- [3]沪宁城际铁路 HNCJZQ6 标段第五工区菱形挂篮悬浇施工作业指导书.《互联网文档资源（<http://www.docin.com>）》，2012
- [4]王仲军. 三角形挂篮设计与施工.《中国新技术新产品》，2009-05-25
- [5]回笋沟特大桥挂篮设计说明书.《互联网文档资源（<https://max.book118.>）》，2024
- [6]陈洪华. 赣龙复线铁路锦江特大桥挂篮设计与施工.《商品混凝土》，2013-01-15
- [7]王刚. 上跨高速匝道连续梁挂篮施工技术分析.《建筑技术开发》，2018-12-15
- [8]王海伟. 挂篮块件及合拢块施工技术分析.《科技与企业》，2013-05-22