

# T形刚构桥零号块—施工支架协同受力研究

文 / 殷 茹 安徽省宣城市市政工程建设管理处

**摘要:** T形刚构桥的零号块施工是桥梁建设中的关键, 施工支架的设计与受力分析直接关系到工程安全。文章主要研究 T形刚构桥零号块施工支架的协同受力机制, 通过数值模拟和实际施工案例分析结合, 探讨支架系统在不同施工阶段的应力分布、变形特征以及稳定性。在研究中, 使用 ANSYS 等有限元软件对零号块及支架结构进行空间实体建模, 通过模拟施工过程的受力变化, 关注协同受力部分。研究结果可以给安全施工、高效施工提供理论根据, 也可以给现场施工提供技术理论指导。

**关键词:** T形刚构桥; 零号块; 施工支架; 协同受力

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.18.073

## 引言

大跨度桥梁建设中, T形刚构桥由于经济性与便利性被人们广泛熟知和运用。零号块是连接刚构桥连续部分与墩身的过渡, 施工技术复杂, 对整个桥梁结构安全十分重要。在施工中, 施工支架是支撑零号块成型的关键临时结构, 在设计上要充分考虑结构的承载能力、施工阶段的荷载变化以及施工中主体部分的相互作用。文章阐述了当前 T形刚构桥零号块施工支架设计现状, 体现在支架受力分析的复杂性、施工过程非线性效应的不确定性等。文章在分析中, 提出使用先进仿真技术与工程实际参数, 系统性分析支架和零号块的协同受力, 提出更科学的支架设计方案来减少施工的风险, 确保施工效率, 给同类桥梁施工提供理论和实践的双重支持。

## 一、T形刚构桥零号块—施工支架设计现状

### (一) 支架结构受力复杂

零号块作为墩身和悬臂梁段的过渡结构, 需要承受悬臂浇筑荷载、支架反力及预应力所产生的复合应力。应力集中出现区域通常是横隔板和腹板连接区域。预应力管道密集区域, 尤其是横向、纵向钢束布置过密会导致截面应力分布不均匀, 需要通过精细化有限元模型来进行模拟, 目前技术方会通过 ANSYS 或 Midas 的三维空间建模来避免出现局部应力失真的情况。施工中需要通过弹性地基梁理论分析应力荷载分布状况, 避免浇筑混凝土的时候出现支架超载或者是局部失稳现象发生。协同受力机制与模型简化中要注意圣维南原理的应用: 模型简化极可能导致远端应力失真, 需要通过实际预压测试来修正立模标高。在施工中常用支架方案包含盘扣式满堂支架(低墩场景)、贝雷梁+钢管桩组合(高墩场景)以及三角形托架。在施工中可使用轻量化材料, 比如铝合金模板, 混合高强度钢材 Q345B 钢材, 可以降低结构的自重, 提升自身的抗剪能力。

### (二) 施工过程非线性效应的不确定性

弹性与非弹性变形叠加。支架的弹性变形与非弹性变化的出现, 包含贝雷梁挠度(弹性变形)、地基沉降与节点滑移(非弹性变形)需要通过预压试验进行修正。温度梯度与混凝土收缩徐变也会导致支架变形, 施工中需要结合物联网传感器等先进技术进行实时监控, 根据

数据动态调整施工参数来实现。在施工中通过分阶段加载与优化施工工艺来提高施工质量, 如首次浇筑高度控制在整体高度的 60%~70%, 减少支架瞬时荷载, 后续浇筑由支架与混凝土受力。预应力张拉和支架卸载要同步进行, 通常采取“对称—从内向外”张拉的顺序, 能够避免应力集中分布出现的安全事故。在复杂地形区域的施工, 如软土地形、高墩结构中, 支架需要结合地基加固和跨中临时支撑来避免出现不均匀沉降, 这是目前使用比较广泛的技术。在施工过程中, 可能存在模板定位偏差、预应力孔道偏移的情况, 可通过全生命周期管理进行控制, 比如 BIM 技术模拟施工全流程, 降低人为失误的出现。

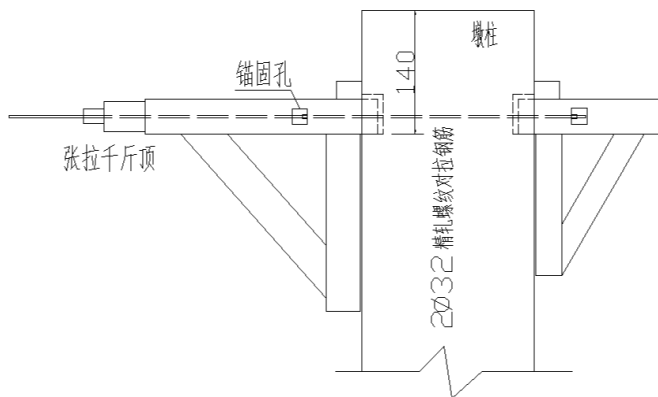


图 1 T型刚构桥零号块支架设计(部分)

## 二、T形刚构桥零号块与梁柱式支架的协同受力研究

### (一) 基于双层弹性地基梁理论

T形刚构桥零号块与梁柱式支架的协同受力可抽象为双层弹性地基梁模型。上层梁, 零号块混凝土结构, 设刚度为  $EI_1$ , 承受浇筑荷载、预应力以及施工荷载力。下层梁, 以梁柱式支架为例, 主要为贝雷梁+钢管桩组合, 设为  $EI_2$ , 设地基系数  $k$ , 通过弹性支撑来传递反力。首次浇筑后, 零号块与支架形成复合体系, 再使用弹性地基梁分析结构上的荷载分配, 避免出现超载或者是失稳情况。温克尔地基模型分析中, 设  $P = k(y_1 - y_2)$  ( $y_1$ 、 $y_2$  是上下层梁竖向位移); 平截面部分, 假设零号块混凝土和支架变形协调, 忽略横向剪切变形。上下层梁的挠

曲微分方程可表示为：

$$\frac{d^4 y_1}{dx^4} + \frac{k}{EI_1} (y_1 - y_2) = \frac{q(x)}{EI_1}$$

$$\frac{d^4 y_2}{dx^4} + \frac{k}{EI_2} (y_1 - y_2) = 0$$

上述公式中， $q(x)$  表示外荷载分布函数， $k$  表示弹性支撑的刚度。通过叠加原理，假设上下层梁的位移 = 齐次解 + 特解：

$$y_1 = q^{\beta x} (C_1 \cos \beta x + C_2 \sin \beta x) + q^{-\beta x}$$

$$(C_3 \cos \beta x + C_4 \sin \beta x) + y_p$$

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k}{4EI_1}}$$

在上述公式中， $y_p$  为特解，该参数由固定端、自由端和弹性约束来确定。地基系数  $k$  能够反映支架与地基的协同刚度，需要通过预压试验来标定。实际工程中通过建立三维实体模型，模拟分阶段进行，对比有限元结果，再借助圣维南原理进行修正，忽略梗腋构造可能导致的腹板交界处应力失真的情况，再通过实体单元精细建模。在施工中，双层弹性地基梁模型适用于高墩大跨连续刚构桥零号块施工工艺的协同受力分析，尤其是分次浇筑工况方面的分析，有很高的精确度。未来可在桥梁工程中引进物联网传感器来监测位移和应力，结合 AI 模型动态调整参数降低误操作率，在施工中运用轻量化设计来降低支架的质量。上述分析中，T 形刚构桥零号块与梁柱式支架的协同受力设计，可从经验主导转向数据驱动，从而提高施工的安全性以及经济性<sup>[1]</sup>。

## （二）关键参数影响

### 1. 混凝土强度等级分析

混凝土强度等级直接影响到零号块的承载能力和裂缝控制，在桥梁工程当中，运用 C50 及其以上的高强度混凝土能够提高零号块抗压能力。在施工中需要注意高强度混凝土收缩徐变效应极有可能加剧其局部应力的集中。在混凝土施工中，通过聚酯纤维混凝土来强化桥梁强度，掺入材料之后，混凝土在成桥阶段，顶板应力变化幅度  $\leq 2.5$ MPa，底板  $\leq 1$ MPa，相比普通混凝土能够减少 30% ~ 50% 的收缩裂缝风险。在桥梁施工当中，高强混凝土与预应力钢束的协同效应更高，比如在施工当中，运用 C55 混凝土与横向预应力钢束结合施工，降低了桥梁的主拉应力，从原本的 1.2MPa 降低到 0.8MPa。

### 2. 弹性夹层刚度影响分析

弹性夹层刚度对桥梁结构有直观性影响，弹性夹层刚度为  $k$ ，可反映出支架与地基的协同刚度，直接影响到荷载分配。在工程当中，可通过反力架预压试验标定  $k$  值，能够在一定程度上消除非弹性变形，调整立模的标高误差。在施工中，忽视弹性夹层刚度可能会导致远

端应力失真，只有通过可靠技术来调整与优化，如增设梗腋来消除应力集中现象。弹性夹层刚度分阶段加载会影响荷载的传递效率，因此首次浇筑之后，支架与混凝土协同来承担后续荷载比例，通常为 70%（工程不同，荷载参数有变化），若刚度不足则会导致挠度超标，出现这种情况需要进行另外加固。

### 3. 零号块第一次浇筑高度影响

分阶段加载施工中，首次浇筑高度通常控制在总高度的 60% ~ 70%，该高度能够平衡支架瞬时荷载与混凝土结构刚度的形成。如乌江特大桥在施工中，运用三次浇筑法（底板 - 腹板 - 顶板）施工进行，分层厚度  $\leq 1.5$ m，该施工方式能够显著降低水化热裂缝风险。首次浇筑之后，混凝土和支架形成复合受力体系，在后续，荷载则由混凝土和支架来共同承担，这能够减少支架超载的风险。

### 4. 纵梁类型与布置影响

在结构施工中，需要注意结构选型以及性能筛选，如贝雷梁 + 钢管桩组合，这种结构适用于高墩大跨场景的施工，最大应力可达到 155.3MPa（参考云南麻昭高速公路三岔沟特大桥工程案例），在项目中使用 Q235 钢材，节点部分使用双槽钢补焊来降低剪应力。三角形托架结构使用适用于峡谷地形（参考南昆铁路八渡南盘江特大桥），该结构施工复杂，在使用中运用劲性骨架 + 斜拉式悬臂平台，在施工中跨中挠度仅仅只有 0.6mm，主梁的应力误差  $\leq 5\%$ 。在结构当中，各方面的布置尽量使用先进技术进行创新设计，铝合金模板以及碳纤维增强支架能够从整体上降低桥梁结构的自重，根据工程实践总结经验，可降低 13% ~ 27% 的自重，且应力  $\leq 80$ MPa，这种轻量化材料适用于软土地基场景的施工当中。若是纵向预应力钢束的施工，要注意张拉顺序的处理，在进行科学的间距调整，确保施工的实现<sup>[2]</sup>。

## 三、T 形刚构桥零号块 - 施工支架协同受力的设计与优化策略

### （一）有限元仿真分析

有限元仿真分析主要是模型构建与边界条件的运用，在模型分析中，运用 ANSYS 或者 Midas 建立三维空间实体模型，通过精细划分网格，重点关注零号块与支架连接区域的应力分布，针对性进行调整以及加固。在施工中“圣维南原理”运用很关键，简化模型的时候需要确保远端应力可以反映真实状态，避免出现局部应力失真的情况。借助数字化模型进行动态荷载模拟，首次浇筑高度需要控制在总高度的 60% ~ 70%，后续浇筑的时候支架与混凝土协同受力，在进行预应力协同分析的时候，纵向预应力张拉和支架卸载同步进行，采取“对称 - 从内向外”的顺序，避免结构突变<sup>[3]</sup>。

### （二）工程案例分析

以某市政桥梁工程为例，该大桥全场施工采取钢混组合式钢构 - 连续桥结构，桥宽 19 米。项目位于城市核心区，跨越河流，是连接河流两岸重要的交通节点，是城市交通网络的重要组成部分。

### (三) T形刚构桥零号块-施工支架协同受力的设计优化

#### 1. 支架结构选型以及优化

施工中运用三角托架体系,若遇到复杂地形,则以“贝雷梁+钢管立柱”的组合结构进行施工,主纵梁采用321型标准贝雷梁,钢管立柱为 $\phi 630 \times 10$  mm螺旋钢管,横向分配梁采用I32a工字钢,在施工中运用有限元模型验证其应力与变形,实现结构优化。通过节点加固来提升抗力,通过钢管桩顶部、贝雷梁连接处采用双槽钢补焊或者是加强钢板,从而提升整体的抗剪能力,降低局部应力集中情况。

#### 2. 进行有限元仿真分析

根据项目实际情况,可利用Midas Civil或ANSYS建立起施工的三维模型,用来模拟浇筑和张拉等工况下的应力分布,方便后续施工进行更深入优化。如桥墩墩顶横隔板的最大应力为15.5MPa,需要进行局部加固,腹板交界处的拉应力为1.8MPa,通过增设梗腋进行优化。在动态荷载模拟中,分阶段加载首次浇筑高度为60%~70%,后续结构中支架与混凝土部分协同受力,避免瞬时超载现象发生。

#### 3. 预压与变形

使用千斤顶来对支架施加等效荷载,实测弹性变形与非弹性变形,对立模标高进行动态调整。在施工中结合物联网传感器实时监测温度梯度即混凝土收缩徐变,从而优化施工时序,实现桥梁结构受力分析的优化。

#### 4. 浇筑、预应力协同与高墩施工

首次浇筑底板与腹下板,厚度 $\leq 1.5$  m,二次完成腹板、顶板施工,三次完成横隔板施工,施工中控制水化热裂缝。底模部分的施工使用钢木组合体系,侧模则设置通风孔,设置直径为10cm的通风孔减少温差应力,端模预留预应力孔道定位误差,所设计误差 $\leq 3$  mm。纵向预应力束张拉顺序与支架卸载同步施工避免结构破损,横向预应力钢束布置于横隔板上,每间隔2~3米布置用以优化应力布置。高墩部分的施工,采用“劲性骨架+斜拉式悬臂平台”的组合进行施工,结合波形刚腹板横梁来提升结构的抗剪力,再通过足尺模型进行试验,验证其的稳定性。钢混接头部分,使用PBL剪力板与预应力钢筋联合设计,通过1:1.5模型试验验证,主跨钢箱梁整体吊装误差 $\leq 0.5$  mm。

#### 5. 项目技术创新

通过协同受力设计减少钢材用量20%~30%,缩短工期10%~15%。施工方可以引进物联网传感器、AI预测模型,实现应力、温度数据的监控,降低误操作率60%。还可以使用铝合金模板和碳纤维增强支架来降低桥梁的自重,约13%,同时保持应力 $\leq 80$  MPa。在施工中形成标准化施工技术,比如与预埋件定位误差 $\leq 2$  mm,螺栓连接的精度控制标准等<sup>[4]</sup>。

#### 6. 实践验证与效果

通过轻量化、智能化、动态化的设计与施工,借助

先进技术的运用验证了协同受力设计和分阶段施工在特大结构复杂桥梁施工中的有效性,施工技术给高墩大跨桥梁结构的设计施工提供了“数据驱动”的施工范式,推动行业从经验主导朝着智能化方向转型。

### 四、未来发展方向

#### (一) 引进物联网传感器技术

新时期的桥梁工程中,通过嵌入式传感器来实时采集应力、温度以及桥梁变形数据,再结合AI技术预测模型变形趋势,降低误差。在各项技术当中,运用区块链技术来确保数据不被篡改,再运用于误差溯源中。工程还可通过Midas Civil建立起分阶段的加载施工,以模拟最大悬臂状态下的顶板应力分布,减少实测误差。再结合地基加固技术(桩基+混凝土承台)和跨中设置临时支撑,避免在复杂地基下出现不均匀沉降<sup>[5]</sup>。在施工中通过预压与变形控制技术,结合技术来进行处理加以控制,避免出现施工中的问题。

#### (二) 未来技术发展

当下,3D打印模板技术得以实现,在施工中可以运用该技术来定制复杂纵梁节点,以此来提升施工精度,减少施工中的人为误差。未来发展中还可以通过量子计算优化有限元建模,缩短大型桥梁的仿真时间,实现多参数耦合分析,根据分析进行动态实时修正。新时期智能化技术进入基建领域,未来技术在施工中不断进步,总结施工经验,形成更丰富、更全面的技术体系,反哺未来的施工领域可持续发展。

### 结语

综上所述,文章对T形刚构桥零号块-施工支架协同受力研究加以分析,并结合案例阐述,分析参数协同优化以及智能化监测结合优势。未来,在施工中可推广碳纤维增强支架与聚酯纤维混凝土来提高结构的耐久性,降低桥梁结构的自重。在接下来的发展中将3D打印与拓扑技术结合,生产高效的传力路径。在现代技术的支持下,T形刚构桥施工从传统经验模式转向智能化、轻量化、标准化方向转型,为高墩大跨桥梁工程施工提供可靠的经验借鉴。

### 参考文献

- [1] 银庆友,王亮,王树臣,等.转体T形刚构桥施工监测技术研究[J].工程技术研究,2025,10(04):82-84.
- [2] 张斌.基于正态分布概率的T构曲线梁长期变形特征及影响参数化分析[J].中国公路,2024,(15):102-105.
- [3] 李营,尚立波.上跨省道“T”形刚构桥临时支架施工及稳定性研究[J].中国新技术新产品,2024,(12):101-103.
- [4] 明翊.某T形刚构桥转体施工监测与控制研究[D].华中科技大学,2024.
- [5] 黄国利,郑恒斌,覃文倩.基于有限元法的T形刚构桥施工过程中主梁状态分析[J].黑龙江交通科技,2023,46(12):70-73.