

桥梁施工中的支架系统设计与优化研究

文 / 陈雪松 四川省铁路建设有限公司

梁多伟 四川公路桥梁建设集团有限公司铁路工程分公司

吴嘉宇 四川公路桥梁建设集团有限公司铁路工程分公司

沈 涛 四川省铁路建设有限公司（通讯作者）

摘要：本研究聚焦于桥梁施工中支架系统的设计与优化，分析了斜交正做支架系统、跨河环境下立柱桩基设计、支架不均匀沉降的解决方案以及主梁截面承担拱圈荷载的挑战，提出了一系列优化设计和施工措施。研究表明，采用创新的支架系统设计和施工技术，能够显著提升桥梁工程的安全性和经济性，为未来桥梁施工提供了有价值的参考。

关键词：桥梁工程；支架系统设计；有限元分析；斜交正做；桩基础承载力；不均匀沉降控制

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.13.051

引言

在复杂的地质水文环境条件下，设计一个兼顾经济和安全指标的支架施工系统是工程师面临的主要挑战之一。通过分析桥梁施工中常用的支架系统设计，本文探讨了支架系统在不同施工环境中的应用，并提出了一系列优化措施，以提高桥梁施工的安全性和效率。

一、工程概况

本文依托于新建府河特大桥，全长 3862.261m，位于四川省成都市。本桥于 DK19+200 处跨越府河，属五级航道，府河河面宽 156m。设计采用 (72m+128m+72m) 预应力现浇混凝土箱梁 +152m 系杆拱跨越河道。府河特大桥 37# 墩至 38# 墩的 152m 系杆拱为双线有砟钢管混凝土系杆拱桥。本系杆拱采用先梁后拱、支架现浇系梁的施工方式。施工采用“钢管立柱+贝雷梁”的结构形式进行现浇施工，并使用 Midas Civil 软件进行验算。

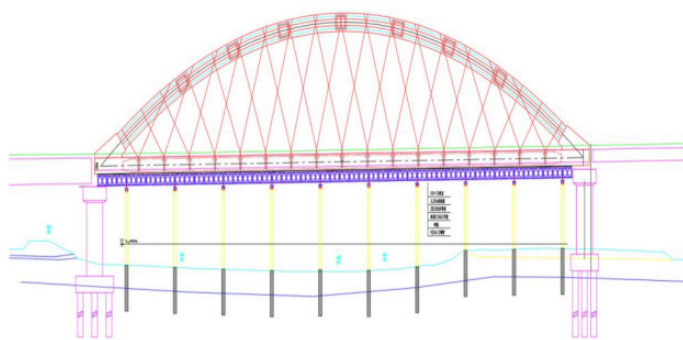


图 1 现浇支架立面图

二、支架系统斜交正做的背景和优点

斜交正做是一种创新的桥梁支架布置方式，通过使支架与桥梁轴线成角度布置，有效分散荷载并增强结构稳定性。该方法特别适用于宽幅桥梁和复杂地形，具有提高空间稳定性、降低施工难度、优化材料使用等优点，同时显著提升施工效率与安全性，并减少环境影响。

(一) 计算示例

假设一座桥梁的主轴线长度为 100m，支架系统布置

间距为 10m。传统支架系统的荷载主要集中在垂直支撑点上，而斜交正做支架系统则通过倾斜角度为 45 度的交错布置，将荷载分散到更多的支撑点上。

在传统支架系统中，假设桥梁的总荷载为 Q ，支撑点数量为 10 个，每个支撑点承受的荷载为：

$$F_{\text{传统}} = \frac{Q}{10} \quad (1)$$

在斜交正做支架系统中，支架布置呈 45 度角，斜长大于直线长，支撑点数量增多，荷载分散到更多的支撑点上。由于斜长为直线长的 $\sqrt{2}$ 倍，因此支撑点数量相应增加至 $n \times \sqrt{2}$ 。此时，单个支撑点承受的荷载为：

$$F_{\text{斜交}} = \frac{\text{总荷载}}{\text{支撑点数量} \times \sqrt{2}} \quad (2)$$

$$F_{\text{斜交}} = \frac{Q}{10 \times \sqrt{2}} \approx \frac{Q}{14.14} \quad (3)$$

斜交正做支架系统的每个支撑点承受的荷载比传统支架系统减少了约 30%，这表明斜交正做支架系统有效地分散了荷载，减小了单个支撑点的轴力，从而提高了结构的稳定性。

(二) 具体优势体现

斜交正做支架系统布置灵活，荷载分布均匀，施工调整较少，从而加快了施工进度，并减少了材料浪费和地面扰动，降低了对环境的影响。在实际应用中，传统支架系统因河床底质不均而难以确保稳定性，而斜交正做支架系统通过 45 度角布置有效分散荷载，避免了单点过载问题，提升了结构的稳定性和适应性，并降低了材料使用量。该系统尤其适用于跨河环境下应用，具有实用性、安全性、经济性和高效性。

三、跨河环境下立柱桩基的设计和承载力保障措施

(一) 外部条件

由于施工过程将跨越汛期，需充分考虑水位变化对施工的影响，以确保施工的安全性和连续性。府河河床

的地质特征复杂，由1米的松散粗圆砾土、4米的稍密粗圆砾土及5米的砂岩组成。桩基础施工需穿越多层不同性质的土层，地质条件复杂。此外，府河水文条件复杂，多年平均流量为82立方米/秒，最大流量可达1200立方米/秒，水流速度较快，对施工产生了显著影响。

(二) 支架桩基础

在每个钢管柱位置打设直径1.2m的钻孔灌注桩作为基础，布置形式为6排10列，桩基深入河床。根据设计要求，为满足河道管理单位的规定，支架横梁与贝雷梁以55°夹角布置，靠近38#墩一侧形成一个三角区域，并在该区域设置了7根间距不均匀的钢管柱以增强结构强度。桩基础采用C30混凝土浇筑，施工过程中采用钻孔灌注法，桩身混凝土浇筑。其布置形式如图3所示。

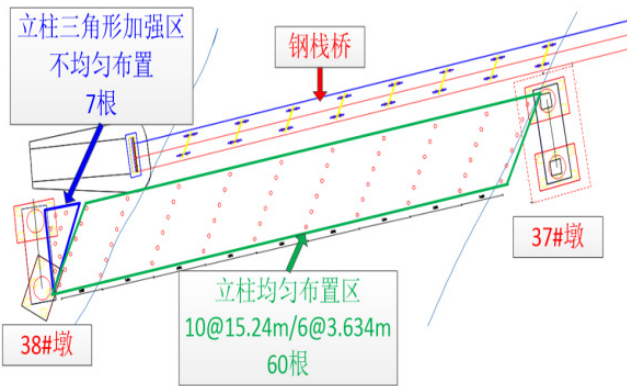


图2 钢管柱基础平面布置图

四、支架不均匀沉降的解决方案

在施工过程中，支架的不均匀沉降是一个控制难点，它可能导致结构变形甚至破坏。采用分级堆载预压技术，观测地基沉降和支架变形量，测试弹性变形和非弹性变形，有助于更好地控制和调整施工过程中的沉降问题。在本项目施工中应用这些技术，同时通过实时监控和调整，有效地应对了支架的不均匀沉降，确保了施工的顺利进行。

(一) 本项目重点解决思路

1. 地质条件

府河特大桥地质条件复杂，37#~38#墩位于府河岸边，地基土主要包括1m松散粗圆砾土、4m稍密粗圆砾土及5m砂岩。

2. 桩基础承载力计算

(1) 按照端承桩单桩轴受压容许承载力计算

拟采用直径为1m的钻孔灌注桩，伸入河床10m，河床考虑为1m松散粗圆砾土、4m稍密粗圆砾土及5m砂岩，桩周极限摩阻力分别为70kPa、90kPa及120kPa，钢管立柱最大反力为2160kN。

根据《码头结构设计规范》(JTS 167-2018)中4.2.8.3条，灌注桩单桩轴向抗压承载力设计值可按下列式计算：

$$Q_d = \frac{1}{\gamma_R} (U \sum \psi_{si} q_{fi} l_i + \psi_p q_{RA}) \quad (4)$$

式中： Q_d 为单桩轴向承载力设计值； γ_R 为单桩轴向承载力抗力分项系数，按表取值，按灌注桩取为1.6； U 为桩身截面外周长， $U = \pi d = 3.14 \times 1 = 3.14m$ ； ψ_{si} 、 ψ_p 为桩侧阻力、端阻力尺寸效应系数，当桩径不大于0.8m时，均取1.0，当桩大于0.8m时，按表取值，砂土、碎石类土取为0.93； q_{fi} 为单桩第*i*层土的极限侧摩阻力标准值，无当地经验值时，可按表取值，一般为70kPa、90kPa、120kPa； l_i 为桩身穿过第*i*层土的长度，三层，分别为1m+4m+5m，共10m； q_{RA} 为单桩极限端阻力标准值，无当地经验值时，可按表取值，取1000kPa； A 为桩身截面面积。

计算可得单桩轴向承载力设计值为2336.2kN，大于2160kN，灌注桩单桩轴受压承载力满足要求。

(2) 按照钻孔灌注桩摩擦桩计算

根据地勘钻孔取平均值求府河中层分布情况可看出，河床面标高443.0m，稍密粗圆砾土地层与强风化砂质泥岩地层分界面标高441.6m，强风化砂质泥岩地层与弱风化砂质泥岩地层分界面标高433.8m。因此从河床面往下，稍密粗圆砾土地层厚1.4m；强风化砂质泥岩地层厚7.8m；其下均为弱风化砂质泥岩地层。

本次桩基设计考虑嵌入弱风化砂质泥岩地层，按照钻孔灌注桩摩擦桩验算，采用容许应力法计算的桩基底部最大反力进行验算。“容许法-强度”工况下桩基底部最大反力为3483kN。采用《铁路桥涵地基和基础设计规范》(TB 10093-2017)第6.2.2条对桩基承载力进行验算，计算得到单桩最大容许承载力3553kN，满足规范要求。

五、主梁部分截面承担拱圈荷载的难点和应对措施

在本次桥梁支架方案设计中，主梁在承担拱圈荷载时面临的主要技术挑战包括负载分布不均和应力集中。如果这些问题如得不到准确分析和控制，可能会导致结构的局部失效，严重时影响桥梁的整体安全性和耐久性。通过有限元分析，可以模拟主梁在不同荷载工况下的应力和变形情况，优化主梁截面设计和材料选择，可以有效解决这些技术挑战。府河特大桥作为一座152m系杆拱桥，在设计和施工过程中面临着诸多难点。主要包括结构自重、施工支架与设备重量大，以及荷载分布传递复杂等。为了确保支架设计的合理性和可靠性，需要准确客观地认识和分析这些荷载。

(一) 结构自重与施工支架和设备重量大

1. 结构自重

府河特大桥的结构自重主要来源于钢管混凝土系杆拱桥。混凝土和钢材的自重给桩基和支架系统带来了巨大的竖向荷载。系杆拱桥跨越152m，梁和拱的重量接近2万吨。这些都要求桩基和支架具有极高的承载能力。

2. 施工支架与设备重量

施工过程中，支架系统和施工设备的重量同样不可

忽视。采用“钢管立柱+贝雷梁”的结构形式，钢管立柱和贝雷梁的重量巨大。施工设备如吊车、模板重量也会增加支架的荷载。

（二）荷载分布传递复杂

桥梁在施工和使用过程中，荷载的分布和传递是非常复杂的，准确、客观认识荷载是做好支架设计的前提。主梁截面需要承担拱圈荷载、活荷载、风荷载以及施工过程中产生的各种临时荷载。尤其在斜交正做支架系统中，荷载分散到多个支撑点上，增加了荷载分布的复杂性。

在支架系统中，各级支撑将荷载传递至地基，任何环节设计不当都会导致系统的失效。荷载传递路径需要充分考虑各级支撑的刚度和强度，确保荷载能够平稳传递到地基。

（三）分析方法和常见误区

首先，通过地质勘察，充分了解地基的承载力和沉降特性，为设计提供基础数据。其次，精确计算恒载、活载、风荷载和地震荷载，综合评估桥梁在不同工况下的受力情况。利用有限元分析，模拟荷载分布和传递路径，识别支架系统和桩基中的薄弱环节。通过静载试验和动态监测，验证计算结果，并根据实测数据进行调整，确保设计的科学性和可行性。

在荷载分析和设计中，常见误区包括忽视地基变形、简化荷载模型和忽略施工影响。忽视地基变形可能导致支架设计在实际应用中失效；简化荷载模型未考虑施工和使用中的荷载复杂性，低估了实际应力；忽略施工影响则可能低估附加荷载和临时荷载对结构的影响。这些误区如果未能及时纠正，将严重影响桥梁的安全性和耐久性，必须在设计中予以重视并加以避免。

（四）荷载分布不均的计算模型和优化方法

为解决荷载分布不均的问题，首先对主梁截面进行了全面的有限元分析，优化了荷载的分布。分析过程中，深入研究了系梁和拱肋的受力特性，识别并优化了结构的刚度和强度，确保其在各种荷载工况下的稳定性。通过精确分析桥梁自重荷载的传递路径，明确了荷载从主梁到支架系统的传递过程，确保荷载均匀分布。利用Midas Civil软件，详细分析了系梁和拱肋的受力情况，特别是针对结合部的应力集中进行了重点分析，并通过优化截面设计和采用高性能混凝土及先进钢材料，提升了主梁和拱肋的承载能力。

设计中对支架系统的荷载来源进行了精确分析，建立了全面的荷载传递模型，并优化了支架设计，确保结构在各种荷载作用下能够保持均匀的荷载分布，避免局部过载问题。最终，通过精细的施工控制和严格的质量管理，结合实时监测数据进行动态调整，确保了结构的安全性和施工的可行性。府河特大桥采用的“钢管立柱+贝雷梁”结构形式经过详尽的计算和分析，验证了设计的安全性和实际施工的可行性。

1. 有限元分析

通过有限元分析，可以模拟主梁在不同荷载工况下

的应力和变形情况。Midas Civil等工程软件提供了强大的计算功能，能够精确预测结构在各种复杂条件下的受力状态。在特大桥的设计中，采用了Midas Civil 2023建立支架的有限元模型。支架采用梁单元模拟，模型包含25635个节点和45776个单元。此次计算以贝雷梁的轴力为主要控制因素，应力为辅助控制因素。

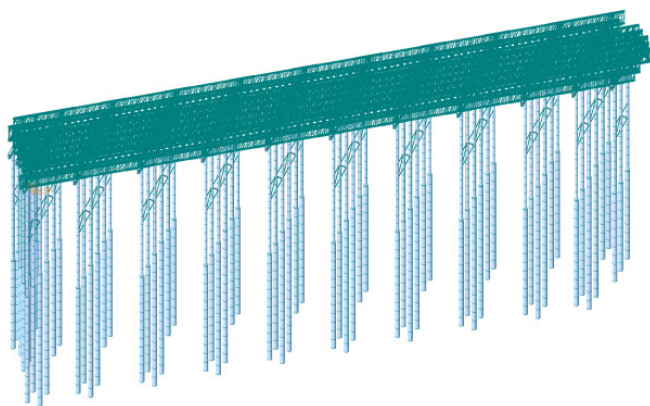


图3 有限元模型效果图

最终的计算结果表明，采用极限状态法和容许应力法两种方法验算，贝雷梁支架强度和刚度总体满足规范要求，桩基承载力也满足规范要求。

2. 截面优化与材料选择

优化主梁截面和选择高性能材料是改善负载分布不均的重要手段。通过增加截面的高度或宽度，或采用变截面设计，可以更均匀地分配荷载，减少应力集中现象。此外，选用高性能混凝土和高强度钢材等优质材料，可以显著提高主梁的承载能力和耐久性。这些优化措施和材料的应用，为结构的长效稳定性提供了有力保障。

结语

随着技术的进步和工程需求的增加，桥梁支架系统的设计不断发展与完善。通过采用先进的设计理念和施工技术，桥梁施工的安全性和经济性得到了显著提升。本文探讨了斜交正做设计、立柱桩基设计、支架沉降的解决方案及主梁截面优化，为桥梁工程提供了一系列创新的设计与施工方法。未来的研究可以进一步探索新材料和自动化技术在桥梁建设中的应用，以应对更为复杂和多变的工程环境。本研究通过理论与实践相结合，为桥梁工程领域提供了宝贵的参考和指导。

参考文献

- [1] 任锦辉. 城市快速路桥梁施工中的模板支架系统的优化[J]. 石材, 2024, (03): 94-96.
 - [2] 王祥, 曾坤, 罗雨舟, 等. 桥梁施工智能升降支架系统优化与性能验证研究[J]. 交通企业管理, 2024, 39(05): 89-91.
 - [3] 郭宗庆, 李宏涛, 谭振龙. 滑动模板支架系统在桥梁施工中的应用[J]. 科技展望, 2015, 25(15): 39.
- 通讯作者：沈涛，1982年，男，四川南充人，高级工程师，本科，主要从事桥梁与隧道施工技术管理工作。