

超大矢跨比钢箱拱竖转工艺设计与施工

孙荣国 王昕 陈龙银

(浙江钜实桥梁钢构有限公司, 浙江 湖州 313220)

【摘要】随着矢跨比的增大, 钢箱拱的施工难度也相应增加, 传统的施工方法往往难以满足工程需求, 因此, 现提出超大矢跨比钢箱拱竖转工艺设计与施工方法。施工整体过程设计以安装竖转铰与转体塔架、钢箱拱的吊装与就位、超大矢跨比钢箱拱的竖转操作设计三部分进行了分析设计, 避免了传统的分段施工方式, 大大提高了施工效率, 实例分析结果表明: 使用超大矢跨比钢箱拱竖转施工技术进行施工的桥梁工程符合施工要求。

【关键词】施工技术; 超大矢跨比钢箱; 拱竖转工艺; 桥梁工程

引言:

随着桥梁工程技术的不断发展和创新, 钢箱拱作为一种重要的桥梁结构形式, 在跨越宽阔水域、连接不同地形等方面展现出了独特的优势。特别是超大矢跨比钢箱拱, 其优雅的曲线和出色的结构性能, 为桥梁设计提供了更大的创造空间^[1]。竖转工艺作为一种新兴的施工方法, 在超大矢跨比钢箱拱的施工中逐渐受到关注。竖转工艺是指将钢箱拱在地面或低位平台上预制完成后, 通过竖转设备将其整体或分段竖立到设计位置的一种施工方法。该方法具有施工效率高、适应性强等优点, 特别适用于超大矢跨比钢箱拱的施工。然而, 竖转工艺的设计与实施涉及多个学科领域的交叉融合, 包括结构力学、自动化控制等, 技术难度较大。通过对竖转工艺的模拟计算、理论分析、实验研究等多方面的研究, 旨在解决超大矢跨比钢箱拱竖转过程中的关键技术问题, 提高施工效率和安全性, 为类似工程提供有益的参考和借鉴, 以期桥梁工程的可持续发展提供新的思路和方法。

一、超大矢跨比钢箱拱竖转工艺与施工技术设计

(一) 安装竖转铰与转体塔架

随着桥梁建设技术的不断发展, 超大矢跨比钢箱拱结构因其独特的造型和优越的受力性能, 在桥梁设计中越来越受到青睐。然而, 由于其特殊的结构形式和施工要求, 传统的施工方法往往难以满足施工需求。超大矢跨比钢箱拱竖转工艺具有以下特点: 适应性强: 该工艺适用于各种矢跨比和曲线形状的钢箱拱结构, 能够适应不同的桥梁设计需求。施工效率高: 通过竖转施工, 可以实现钢箱拱的整体吊装和就位, 避免了传统的分段施工方式, 大大提高了施工效率。

结构安全性好: 竖转施工过程中, 钢箱拱始终处于稳定的支撑状态下, 有效避免了施工过程中的结构失稳和变形等问题。因此, 超大矢跨比钢箱拱竖转工艺应运而生, 为桥梁施工带来了新的解决方案^[2]。

竖转法的结构体系主要包括转动铰、索塔、转体塔架和牵引装置。在拉索将待转的结构物提升至预定位置并完成转体的过程中, 拉索与水平面之间的夹角会达到最小值。为了确保钢箱拱的稳定性, 拉索在此阶段的索力会达到最大值。此外, 随着转体的进行, 拱肋结构会由多点支撑转变为扣点和转铰支撑的组合^[3]。为了调整结构的变形和受力状态, 有时在拉索扣点处会设置助升千斤顶以提供额外的支撑和调节力。

因此, 本文就转体塔架与转动铰的安装步骤进行设计, 首先, 施工过程中所采用转体施工的竖转铰, 其结构由内灌微膨胀 C40 混凝土、水平向的钢管混凝土柱与外焊有 C40 微膨胀混凝土的钢管混凝土柱构成。铰座采用凹型钢板, 使用预先埋入的钢筋与拱脚处相连。铰轴两端均设有对应的限位装置, 以限制铰轴旋转时的侧向位移, 确保施工安全。本文设计的竖转铰的结构构造示意图如下图 1 所示

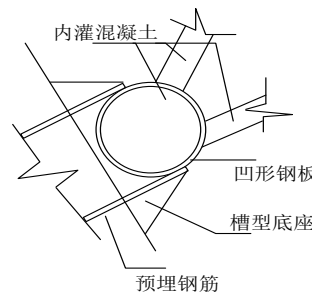


图 1 竖转铰结构

本文中的铰座是预先埋入拱脚混凝土中的，其安装精度直接影响到整个竖转工程的顺利实施，也将直接影响到横桥向位移。凹型钢板下面的沟槽基础混凝土的浇筑质量直接影响到钢箱拱的安全^[4]，因此，在浇筑和预制凹型钢板时，必须严格控制施工质量。铰座安装过程中的控制要点如下：

1. 偏离设计中心的位置坐标不超过 12mm。
2. 桥的两个端点的侧向位移不超过 2mm。
3. 单铰两个端点之间的高差不超过 2mm。
4. 凹型钢板下面的混凝土浇筑必须密实，不留孔洞。

在此基础上，设计的铰座安装步骤如下：

1. 铰座分次浇注混凝土，确保浇注时的振捣密度。
2. 采用立体坐标放样方法，求出两个铰座的中心坐标。
3. 替换测站，对铰座中心的坐标进行重新定位，确保各坐标的偏差符合上述控制要点的误差要求。

其次，转体塔架主要由底部分配梁、格构撑、横联、纵横向分配梁及主梁工程，塔架的整体安装过程采用 250t 履带起重机进行吊装，并分次吊装，塔架下部均布梁先起吊，为便于塔架的安装及吊装，每 10m 起吊一次，到设计高度后安装塔架横联，横联整体吊装，塔架上部横梁和分配梁单独分次吊装^[5]。

（二）箱拱的吊装与就位

在垂直起吊拱肋结构时，若吊点位置选择不当，将可能引发拱肋结构的显著变形，因此，钢箱拱起吊位置的选取可以直接影响吊装过程中钢箱拱肋的稳定。特别是在将整体结构吊至型桥墩位置时，过大的拱脚偏移可能会阻碍拱脚与桥墩预埋件的准确焊接。

在对钢箱拱吊装施工中，吊点位置的选择至关重要。吊点间距过近可能导致拱肋垂直变形过大，影响拱脚准确落地；而距离过远则可能使拱肋端部外翘，超出安装范围，甚至引发结构失稳和破坏。合理选择吊点位置能确保结构稳定性和安全性。在施工中，吊装点选取不当会导致吊杆受力不均，引发结构塑性变形和破坏风险。同时，在降低施工高度方面，推荐在拱肋翻卷和整个吊装过程中采用相同的吊装方式，以提高施工效率。

综上所述，结合实际施工条件，本文采用 6 个吊点布置方案，即在每片拱肋上选取 6 个吊点，并在 2 个拱脚之间均布置一根钢筋，经设计，钢箱拱的吊点位置设计如下图 2 示。

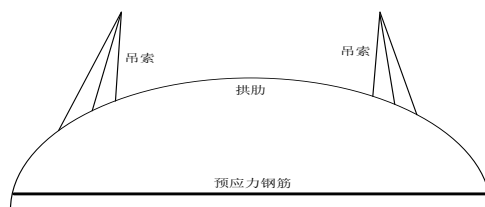


图 2 钢箱拱吊点设计

吊装过程中，根据施工现场条件、设备能力和施工要求，规划合理的竖转路径，确保钢箱拱能够平稳、准确地竖转至设计位置。采用液压同步提升技术于转动动力系统中，拉索与临时索各自分为两组，分别位于每半跨，每组包含五束钢绞线。同时，拉索与临时索的间距统一设定为 $2 \times (0.5 + 0.5 + 0.5 + 0.5) \text{ m}$ ，以确保系统的稳定与效率。

吊装就位后，该拱肋及转动体系应满足以下荷载需求，风荷载计算公式下：

$$f = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot w \cdot h \quad (1)$$

$$w = \frac{\eta \cdot v_d^2}{2}$$

$$\eta = 0.012017e^{-0.0001z}$$

式中： f 表示风压荷载标准值（kNm）， w 代表风压（kN/m²）， z 表示结构高程（m）， η 表示空气重力密度（kN/m³）， h 代表结构物的有效高度（m）， v_d 表示高度 z 处的风速（m/s）， k_1, k_2, k_3 分别表示风速换算系数、风载阻力系数、地形条件系数。

基于以上步骤，利用吊装设备将钢箱拱吊装至临时支撑结构上，并进行精确就位。

（三）超大矢跨比钢箱拱的竖转操作设计

在钢箱拱吊装完毕并就位后，就可以进行竖转准备。超大矢跨比钢箱拱的竖转操作设计是确保施工质量和安全的关键环节。通过合理的设计和施工步骤规划，可以实现钢箱拱的平稳、准确竖转，为桥梁施工的高效完成提供有力保障。

在转体阶段，可以利用静平衡法进行初转力的求解。首先，对钢箱拱的中心位置进行计算将自设为 g ，用 o 表示纵向接与初转力 F 的直距离，用 t 表示距钢制箱体的中心距离，然后根据力矩的均衡，以得出：

$$gt = Fo \rightarrow F = \frac{gt}{o} \quad (2)$$

由此可以看出，在转体施工之前， gt 是一个恒定值，而 F 值仅依赖于 o 。所以，为降低初转力，

在保证钢箱变形和施工装备的安全条件下，要尽可能地将 O 作用点向上移动。

在此基础上，可以进行超大矢跨比钢箱拱的竖转操作。在拱肋中心点处，当拱肋绕着吊索点转动时，索力也会发生改变，所以可以将其简化成一个带有铰支的悬臂结构。通过静力学平衡，可以得到：

$$T \cdot O - \sum g \cdot \varepsilon = 0 \quad (3)$$

公式中： T 代表索力， ε 表示扣索长度。则，扣索拉力的计算式如下：

$$T = \frac{\sum g \cdot \varepsilon}{O} \quad (4)$$

公式中： $\sum g$ 代表拱肋自重。

最后，拆除临时支撑结构和索具，在钢箱合拢施工中，应先封闭拱脚区竖转铰进行封铰，即在拱脚区钢箱内浇注混凝土。再进行箱梁顶部混凝土的浇筑，直到箱梁与混凝土形成刚性时，箱梁才能独立承担混凝土的荷载，当箱梁顶部的混凝土强度达到一定程度时，箱梁才会和混凝土形成一个整体，共同承担上部结构的荷载。至此，超大矢跨比钢箱拱的竖转施工已经完成。

二、实例分析

（一）工程概况

以某大型桥梁工程为例，该桥梁采用超大矢跨比钢箱拱结构，在施工过程中，施工团队严格按照竖转工艺流程进行操作，确保了施工质量和安全，通过本文提出的竖转工艺实现钢箱拱的施工，本次实验将对该施工结果进行测试分析，以验证该技术的施工效果。本次桥梁工程的拱肋设计参数如下表1所示。

表1 工程参数设计

参数	数据
主拱线形	二次抛物线
矢跨比	1/5.0
主拱	矩形钢箱截面
拱脚处截面宽度、高度	2.0m、5.0m
拱顶处截面宽度、高度	1.5m、3.0m
顶、底板厚度	50mm
顶、底板加劲肋	20mm、240mm
厚度、高度	

横撑使用矩形箱型断面，断面宽2.5m，高2.7m—3.5m。横撑的顶部、底部和腹板的厚度都是30mm，加强筋的厚度为17mm，高度为150mm。该桥梁工程共设置10根横撑，沿拱顶对称设置，共3种类型的横撑，由拱顶至拱顶按QW1～QW5顺序排列。该桥共设有23对吊杆箱，吊杆沿桥长12.3m，吊杆系由两层

热挤压聚乙烯外皮镀锌高强度平行钢缆构成。

（二）施工结果与讨论

本次测试以钢箱拱的位移为结果，测试结果如下表2所示。

表2 施工结果

钢箱拱测点	施工允许最大位移 /mm	工程的钢箱拱位移结果 /mm
#1	50.00	13.59
#2	50.00	24.01
#3	50.00	22.94
#4	50.00	17.65
#5	50.00	19.23
#6	50.00	31.98
#7	50.00	26.47

根据上述测试结果可以看出，使用本文提出的超大矢跨比钢箱拱竖转施工技术进行施工的桥梁工程符合施工要求，证明该竖转工艺能够确保钢箱拱在竖转过程中的安全性、稳定性和准确性，同时具有较高的施工效率。在实际工程中应用该竖转工艺设计和施工方案，有望提高施工质量和效率，降低施工风险。

三、结束语

在本次研究中，对超大矢跨比钢箱拱竖转施工设计进行了深入的分析研究。但超大矢跨比钢箱拱竖转施工设计仍然面临着一些挑战和难题，如结构稳定性、施工安全、施工效率等问题。因此，需要继续深入研究和探索，不断完善和优化该技术，以更好地服务于现代建筑事业的发展。

参考文献：

- [1] 王国铭，杨雨厚.基于有限元模型的大跨度刚架系杆钢箱拱桥对称施工分析[J].西部交通科技，2023(10):159-162.
- [2] 钱栋栋，陈潮，齐士乐等.目形钢箱拱肋截面承载力计算方法[J].水利与建筑工程学报，2023，21(04):192-200.
- [3] 袁正武，刘年明，刘卓谕等.下承式钢箱拱肋系杆拱桥上部结构施工技术研究[J].广东交通职业技术学院学报，2023，22(02):27-30+86.
- [4] 李艳凤，朱坤龙.下承式系杆钢箱拱桥动力特性及抗震分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版)，2022，38(06):1064-1071.
- [5] 李建，朱飞飞.BIM技术在钢箱拱组合梁桥三角区钢筋碰撞分析中的应用[J].铁道建筑技术，2021(11):96-99+116.