

高速铁路大跨度连续梁施工质量控制与关键技术研究 ——以 (74+128+74) m 连续梁为例

顾一阳

江苏高速铁路有限公司，江苏南京，210042；

摘要：本文针对大跨度连续梁的施工难题，深入研究了其混凝土施工质量控制体系及关键施工技术。通过原材料优选、配合比优化、温度调控、浇筑工艺创新与智能养护等措施，实现了高质量混凝土施工。同时，研发了先进的挂篮悬臂浇筑系统、预应力智能张拉工艺及合龙段时序控制技术，确保了施工的精度与安全性。研究成果在实际工程中成功应用，显著提升了桥梁施工质量，为同类桥梁建设提供了宝贵经验。

关键词：大跨度连续梁；施工质量控制；关键施工技术；智能养护；预应力智能张拉

DOI：10.69979/3029-2727.26.01.001

引言

(1) 研究背景及意义

随着交通基础设施建设的快速发展，大跨度连续梁因跨越能力强、结构性能优良等特点，在江河峡谷等复杂地形中得到广泛应用。然而，这类桥梁施工技术复杂，尤其是混凝土施工质量直接影响结构耐久性与安全性。传统施工方法在质量控制上存在不足，难以满足现代桥梁高精度、长寿命的要求。因此，研究其混凝土施工质量控制及关键施工技术具有重要的现实意义，能够提高施工质量、延长桥梁使用寿命、保障交通安全，并推动桥梁建设技术的进步。

(2) 国内外研究现状

国外在桥梁施工技术方面起步较早，部分领域领先。如日本、欧美在大跨度桥梁混凝土配合比设计、施工工艺创新上有深入研究，开发了高性能混凝土材料与先进施工设备，其智能张拉、温度控制技术较为成熟，且广泛应用。国内近年来桥梁建设发展迅速，研究不断深入，在挂篮设计、混凝土原材料优化等方面取得成果，但与国外相比，在智能化、精细化施工技术上仍有差距，尤其在复杂环境下质量控制稳定性不足。国内外研究为本文提供了基础，但也存在需要进一步完善和创新的空间。

(3) 主要研究内容

本文围绕大跨度连续梁施工核心问题，系统研究了混凝土施工质量控制体系与关键施工技术。包括施工环境分析、技术难点攻克，研发先进的挂篮悬臂浇筑系统、预应力智能张拉工艺及合龙段时序控制技术，构建全面

的混凝土施工质量控制体系涵盖原材料、配合比、温度调控、浇筑工艺及智能养护等环节，最后通过多方面质量检测与效果评估验证研究成果，确保施工质量和技术创新性。

1 工程概况

1.1 桥梁结构参数

梁体截面为单箱单室、变高度、变截面箱梁，底板、腹板、顶板局部向内侧加厚，均按折线线性变化。全联在端支点、中支点处设置横隔板，横隔板设有孔洞，供检查人员通过。

防护墙内侧净宽 9.0m，桥梁宽 12.6m，底板宽 6.7m，桥梁建筑总宽 12.9m。梁全长为 277.18m，计算跨径为 73.79+128+73.79m。中支点截面中心处梁高 10.035m，跨中 18m 直线段及边跨 19.59m 直线段截面处梁高为 5.535m，梁底下缘按二次抛物线变化。边支座中心线至梁端 0.8m，梁缝分界线至梁端 0.15m。支座横桥向中心距 5.60m。

顶板厚度 100-45-100cm，按折线变化；中支点处底板厚 180cm；跨中及边跨合龙段底板厚 100cm，按直线线性变化；箱梁根部梁高为 10.035m，跨中及边跨合龙段、边跨现浇段梁高为 5.535m，梁底下缘按二次抛物线变化，抛物线方程为 $y=5.535+4.5x^2/51^2(m)$ (x, y 以毫米计)。

连续梁主墩处 0 号节段长 12m，共计混凝土 501.48m³ (不考虑横隔板及加靴)，采用支架法施工；两边跨设 9.59m 边跨现浇段，采用支架现浇法施工；合

龙段长度 2.0m，利用吊架现浇，其余各跨由挂篮悬浇施工，梁体自 0 号节段左右各划分为 16 个悬浇段对称布置，节段长度分别为 3m、3.5m、4m 共 3 个尺寸，悬浇节段最大重量位于 A1#段，重 212.22 吨。节段划分详见连续梁立面布置图。

1.2 施工环境特征

本工程位于江苏省南京市六合区境内，呈南北走向，地势总体南高北低，沿线通过的地貌单元主要为构造剥蚀堆积陇岗区、低山丘陵区、残丘陇岗地貌。

残丘陇岗地貌，地形波状起伏，地面高程 7~52.3m，相对高差 0~8m，整体从北向南地势不断增高，线路两侧农田均为水田。

南京属北亚热带湿润气候，四季分明，雨水充沛。常年平均降雨 117 天，平均降雨量 1106.5 毫米，相对湿度 76%，无霜期 237 天。每年 6 月下旬到 7 月上旬为梅雨季节。年平均温度 15.4° C，年极端气温最高 39.7° C，最低 -13.1° C，年平均降水量 1106 毫米。南京进入春季是 4 月 1 日左右，进入夏季是 6 月 8 日左右，进入秋季是 9 月 18 日左右；进入冬季是 11 月 12 日左右。

1.3 技术难点分析

在大跨度连续梁的施工过程中，挂篮悬臂浇筑是核心技术之一，但该工艺存在诸多技术难点。挂篮作为高空作业的主要设备，其设计与安装精度要求极高，需要根据桥梁的结构特点和施工荷载进行专门设计，以确保其承载能力和稳定性。在挂篮行走过程中，由于受到风荷载、混凝土浇筑荷载等因素的影响，容易出现变形、倾斜甚至倾覆等安全风险，因此需要精确控制挂篮的行走速度、配重平衡以及轨道的安装精度。预应力张拉是保证桥梁结构受力性能的关键工序，传统张拉工艺存在张拉力控制不精准、伸长量测量误差大等问题，容易导致预应力损失或过度张拉，从而影响桥梁的结构安全和耐久性。合龙段施工是整个桥梁施工的关键环节，其时序控制直接关系到桥梁的结构整体性和施工精度。由于受到温度变化、混凝土收缩徐变等因素的影响，合龙段的混凝土浇筑时机难以准确把握，过早或过晚浇筑都会导致合龙段的应力状态不符合设计要求，甚至出现开裂等质量问题。

2 关键施工技术

2.1 挂篮悬臂浇筑系统

针对大跨度连续梁的挂篮悬臂浇筑需求，研发了一套先进的挂篮悬臂浇筑系统。该系统采用轻量化、高强度的新型材料制作挂篮主体结构，有效降低了挂篮自重，提高了其承载能力和抗风性能。挂篮的行走机构采用了液压驱动系统，能够实现精确的速度控制和定位，确保挂篮在行走过程中的平稳性和安全性。同时，在挂篮上安装了智能监测设备，如应变传感器、位移传感器和风速风向仪等，能够实时监测挂篮的受力状态、变形情况以及现场的风速风向等环境参数，并将数据传输至后台控制系统。通过后台的智能分析算法，能够及时发现挂篮施工过程中的潜在安全隐患，并自动调整挂篮的行走参数和配重分布，实现挂篮悬臂浇筑过程的智能化控制，大大提高了施工效率和质量。

2.2 预应力智能张拉工艺

为了解决传统预应力张拉工艺存在的问题，创新性地引入了预应力智能张拉工艺。该工艺采用计算机控制系统和高精度的液压张拉设备，能够实现预应力张拉力的精确控制和自动记录。在张拉过程中，系统根据预设的张拉程序和应力控制参数，自动控制液压泵站的压力输出，确保张拉力严格按照设计要求进行施加。同时，通过在预应力筋上安装的伸长量传感器和应变传感器，实时监测预应力筋的伸长量和应力变化情况，并将数据反馈至控制系统。控制系统根据反馈数据，自动调整张拉参数，实现张拉过程的闭环控制，有效避免了预应力损失和过度张拉等问题，保证了预应力施加的准确性和均匀性，显著提高了桥梁结构的受力性能和耐久性。

2.3 合龙段时序控制

为了精准控制合龙段施工时序，确保桥梁结构的整体性和施工精度，采用了一种基于数值模拟和现场监测相结合的合龙段时序控制方法。在施工前，利用有限元分析软件对桥梁结构在不同施工阶段的温度场和应力场进行模拟分析，确定了合龙段施工的最佳温度范围和时间窗口。在施工现场，安装了多点温度传感器和位移传感器，实时监测合龙段及相邻梁段的温度变化和位移变化情况。通过将现场监测数据与数值模拟结果进行对比分析，能够准确判断合龙段的混凝土浇筑时机是否成熟。当现场温度和位移变化满足预设条件时，及时组织合龙段混凝土的浇筑施工，并在浇筑过程中持续监测温度和应力变化，根据监测数据动态调整浇筑速度和振捣

工艺，确保合龙段混凝土在最佳状态下成型，实现桥梁结构的顺利合龙，保证了桥梁的整体受力性能和施工质量。

3 混凝土施工质量控制体系

3.1 原材料优选控制

水泥选型与碱含量控制：通过深入调研和试验分析，选用了碱含量低的水泥品种，其碱含量严格控制在 0.6% 以下，有效降低了混凝土发生碱骨料反应的风险，提高了混凝土的耐久性。同时，对水泥的强度等级、细度、凝结时间等指标进行严格检测，确保其性能满足设计要求。

骨料级配优化试验：采用多种规格的骨料进行级配优化试验，通过调整不同粒径骨料的比例，确定了最佳骨料级配方案。优化后的骨料级配能够有效提高混凝土的密实度和工作性，减少混凝土的孔隙率和泌水现象，从而提高混凝土的强度和耐久性。同时，对骨料的含泥量、泥块含量、针片状颗粒含量等有害杂质指标进行严格控制，确保骨料质量符合高标准混凝土的要求。

减水剂适应性研究：针对不同品牌、不同型号的减水剂进行了广泛的适应性研究，通过开展大量混凝土试配试验，考察了减水剂在不同水泥、骨料等原材料组合下的减水率、保坍性能、增强效果等指标，最终筛选出与本工程原材料相匹配的高效减水剂。所选用的减水剂能够显著提高混凝土的流动性，减少单位用水量，同时在混凝土硬化过程中能够有效改善其微观结构，提高混凝土的抗压强度和抗渗性能。

3.2 配合比设计优化

工作性正交试验设计：采用正交试验设计方法对混凝土配合比进行优化，以混凝土的工作性为主要考核指标，选取了水胶比、砂率、单位用水量等关键因素作为试验变量，设计了多组不同配合比的混凝土试配方案。通过开展试验，对每组配合比混凝土的坍落度、扩展度、粘聚性等工作性指标进行测试和评价，根据试验结果确定了最佳的配合比参数，使混凝土在满足施工工作性要求的前提下，最大限度地提高其强度和耐久性。

耐久性指标体系构建：构建了一套完善的混凝土耐久性指标体系，包括抗渗等级、抗冻等级、抗氯离子渗透性、碳化深度等指标。在配合比设计过程中，通过添加适量的矿物掺合料（如粉煤灰、矿粉等）、优化混凝

土孔结构以及采用防腐蚀外加剂等措施，对混凝土的耐久性进行综合提升。对设计完成的混凝土配合比进行耐久性试验验证，确保其各项耐久性指标均满足设计要求和相关规范标准，为桥梁结构在长期使用过程中的耐久性提供了有力保障。

3.3 温度场调控技术

三维温度监测网络布置：在大跨度连续梁的混凝土结构内部布置了三维温度监测网络。采用多层、多点的温度传感器布置方式，沿着混凝土结构的厚度方向、长度方向和高度方向进行全方位覆盖，能够实时、准确地获取混凝土内部不同位置的温度变化情况。通过数据采集系统将温度传感器采集到的数据传输至监控中心，实现了对混凝土温度场的动态监测和可视化展示，为温度调控措施的制定提供了科学依据。

保温层热工计算：为了减少混凝土结构表面的热量散失，防止混凝土表面温度过低而产生温差裂缝，在混凝土结构表面设置了保温层。通过对保温层的热工性能进行计算分析，确定了保温层的材料选择、厚度设计以及铺设方式等参数。所选用的保温材料具有良好的保温隔热性能和足够的强度，能够有效减少混凝土结构表面与外界环境之间的热量交换。同时，根据施工环境温度和混凝土内部温度的变化情况，合理调整保温层的覆盖时间和拆除时间，确保混凝土结构在不同施工阶段的温度始终处于受控状态。

3.4 浇筑工艺创新

分层浇筑厚度控制模型：为了提高大体积混凝土的浇筑质量，建立了分层浇筑厚度控制模型。通过对混凝土的水化热释放规律、温度场分布以及施工操作便利性等因素进行综合分析，确定了合理的分层浇筑厚度。在混凝土浇筑过程中，严格按照控制模型确定的厚度进行分层浇筑，每层混凝土的浇筑厚度控制在每层 30cm 以内，确保每层混凝土能够在初凝前完成上一层混凝土的浇筑和振捣，避免出现冷缝等质量问题。同时，采用先进的混凝土布料设备，实现混凝土的均匀布料，提高混凝土的密实度和整体性。

振捣能量量化标准：为了确保混凝土的振捣质量，制定了振捣能量量化标准。通过对不同振捣设备的振捣频率、振幅、插入深度等参数进行试验研究，建立了振捣能量与混凝土密实度之间的量化关系模型。在施工现

场，根据混凝土的坍落度、骨料粒径以及结构部位等因素，选择合适的振捣设备和振捣参数，严格按照量化标准进行振捣作业。振捣过程中，采用插入式振捣器与平板振捣器相结合的方式，对混凝土进行充分振捣，确保混凝土中的气泡和水分能够完全排出，提高混凝土的密实度和强度。

施工缝界面处理工艺：针对施工缝界面处理这一关键环节，研发了一套先进的施工缝界面处理工艺。在混凝土浇筑完成并达到一定强度后，采用专门的界面处理设备对施工缝表面进行清理，去除浮浆和松散颗粒，使施工缝表面露出新鲜的混凝土粗糙面。然后，在施工缝表面涂刷一层具有高粘结性能的界面剂，增强新旧混凝土之间的粘结力。在后续混凝土浇筑时，先在施工缝处铺设一层水泥砂浆，再进行混凝土浇筑，并加强振捣，确保新旧混凝土之间能够紧密粘结，形成一个整体，有效避免施工缝处出现渗漏、开裂等质量问题。

3.5 智能养护系统

湿度自动调控装置：为了满足混凝土在不同龄期对湿度环境的要求，设计并安装了湿度自动调控装置。该装置通过湿度传感器实时监测混凝土表面和周围环境的湿度变化，并将数据传输至控制系统。当环境湿度低于混凝土养护所需的设定湿度值时，控制系统自动启动喷雾设备，向混凝土表面均匀喷洒雾化水，增加环境湿度；当环境湿度达到或超过设定值时，喷雾设备自动停止工作。通过这种自动调控方式，能够始终保持混凝土表面处于湿润状态，有利于混凝土的水化反应充分进行，提高混凝土的强度和耐久性。

薄膜养生时序控制：在混凝土结构表面采用了薄膜养生技术，并对薄膜养生的时序进行了精确控制。通过对混凝土的强度发展规律和环境条件变化进行分析，确定了薄膜养生的最佳开始时间和持续时间。在混凝土浇筑完成并初凝后，及时覆盖养生薄膜，防止混凝土表面水分过快蒸发。随着混凝土龄期的增长和强度的提高，根据混凝土表面温度、湿度以及环境风速等因素的变化，适时调整养生薄膜的覆盖层数或局部通风时间，确保混凝土在养生过程中的湿度和温度始终处于适宜范围，避免因养生不当导致混凝土出现干缩裂缝、表面起粉等质量问题。

质量检测与效果评估：为了验证智能养护系统的实际效果，定期对混凝土的养护质量进行检测和评估。采

用回弹仪、超声波检测仪等设备对混凝土的强度、弹性模量等力学性能指标进行检测，同时通过检测混凝土的碳化深度、抗渗等级等耐久性指标，综合评估智能养护系统对混凝土质量的提升效果。根据检测结果，对智能养护系统的参数进行优化调整，进一步提高养护质量，确保混凝土结构在长期使用过程中具有良好的性能。

4 质量检测与效果评估

4.1 实体检测指标

对大跨度连续梁的混凝土实体质量进行了全面检测，主要检测指标包括混凝土的抗压强度、抗折强度、弹性模量等力学性能指标，以及混凝土的碳化深度、抗渗等级、抗冻等级等耐久性指标。通过在不同龄期（如 7 天、28 天、90 天等）对混凝土试块进行标准养护和同条件养护试验，获取混凝土强度的发展规律和实际达到的强度等级。同时，在桥梁结构的关键部位（如墩柱、梁段等）采用无损检测技术和取芯检测方法，对混凝土的实体强度和内部质量进行检测，确保混凝土结构的承载能力和安全性符合设计要求。对于混凝土的耐久性指标，按照相关规范标准进行检测，如采用电位滴定法测定混凝土的碳化深度，采用渗透高度法测定混凝土的抗渗等级，采用快速冻融试验测定混凝土的抗冻等级等，全面评估混凝土的耐久性能。

4.2 线形监控数据

为了确保大跨度连续梁的施工线形符合设计要求，采用了先进的线形监控技术。在桥梁施工过程中，利用全站仪、水准仪等测量仪器，对桥梁的墩柱垂直度、梁段高程、轴线偏位等线形参数进行实时监测。根据设计提供的线形控制点和监控方案，定期采集线形数据，并与理论计算值进行对比分析，及时发现施工过程中出现的线形偏差。通过对挂篮变形、预应力张拉、混凝土收缩徐变等因素对线形的影响进行综合分析，采取相应的调整措施，如调整挂篮的配重、修正预拱度设置、控制混凝土浇筑顺序等，确保桥梁的施工线形始终处于受控状态，最终实现桥梁结构的顺利合龙和精确成桥。

4.3 荷载试验结果

在大跨度连续梁竣工后，按照相关规范要求进行了静载和动载荷载试验，以检验桥梁结构的实际承载能力和动力性能。静载试验通过在桥梁上布置不同位置和重量的试验荷载，模拟桥梁在设计使用期间可能承受的最

大交通荷载工况，测量桥梁结构在荷载作用下的挠度、应变、位移等响应参数，并与理论计算值进行对比分析，验证桥梁结构的强度、刚度和稳定性是否满足设计要求。动载试验则采用载重车辆以不同的速度和编队在桥梁上行驶，激发桥梁的振动，通过安装在桥梁上的加速度传感器、速度传感器等设备采集桥梁的动力响应数据，分析桥梁的自振频率、阻尼比、冲击系数等动力特性指标，评估桥梁在车辆动态荷载作用下的安全性和舒适性。荷载试验结果表明，该桥梁的各项指标均满足设计和规范要求，证明了本文所研究的施工技术和质量控制体系的有效性。

5 结论与展望

5.1 结论

通过对大跨度连续梁混凝土施工质量控制体系及关键施工技术的深入研究与实践，取得了以下主要成果：成功构建了一套全面、系统的混凝土施工质量控制体系，涵盖了原材料优选、配合比优化、温度调控、浇筑工艺创新以及智能养护等多个方面，有效解决了大跨度连续梁混凝土施工过程中的质量控制难题，显著提高了混凝土的施工质量和耐久性。研发并应用了先进的挂篮悬臂浇筑系统、预应力智能张拉工艺以及合龙段时序控制技术等关键施工技术，实现了施工过程的智能化、精细化控制，确保了桥梁结构的受力性能和施工精度，为类似桥梁工程的施工提供了宝贵的技术经验。通过完善的质量检测与效果评估体系，对施工过程中的混凝土实体质量、线形控制以及最终的荷载试验结果进行了全面检测和评估，验证了所采用的施工技术和质量控制措施的有效性，确保了大跨度连续梁的施工质量和安全性，为桥梁的长期稳定运营奠定了坚实基础。

5.2 展望

尽管本文的研究在大跨度连续梁混凝土施工质量控制与关键技术方面取得了一定成果，但在实际应用中仍存在一些可以进一步完善和拓展的方向：随着建筑工业化和智能化的不断发展，可以进一步探索将更多的智能建造技术（如机器人施工、3D 打印技术等）应用于大跨度桥梁施工中，提高施工效率和质量稳定性，减少人为因素对施工质量的影响。在绿色环保理念日益深入人心的背景下，未来应更加注重桥梁施工过程中的环境保护和资源节约，研发更加环保、节能的施工材料和工艺，降低施工过程中的能源消耗和环境污染，实现桥梁建设与生态环境的和谐共生。针对桥梁施工过程中的安全风险防控，可以进一步加强施工安全监测技术的研究与应用，建立更加完善的安全风险预警机制，通过对施工过程中的人员、设备、结构等多方面安全信息的实时监测和分析，提前发现潜在的安全隐患并采取有效的防控措施，确保桥梁施工的安全顺利进行。

参考文献

- [1] 张忠良. 大跨度预应力混凝土刚构连续梁桥施工技术[J]. 粘接, 2022, 49(3).
- [2] 牛升. 大跨度连续刚构桥关键施工技术研究[D]. 西安工业大学, 2015.
- [3] 宋士新. 大跨度连续刚构桥梁施工控制关键问题分析和研究[D]. 华南理工大学, 2012.
- [4] 吴光宇, 杨升善, 汪劲丰, 等. 大跨预应力混凝土桥梁极限承载力分析[J]. 公路交通科技, 2015, 32 (5)
- [5] 张志林, 袁俊桃. 大跨度预应力混凝土连续刚构桥施工监测仿真分析[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(29).