

大跨度公路桥梁施工过程中的结构稳定性控制技术研究

李安平

辽宁省交通运输事业发展中心，辽宁 沈阳 110005

DOI:10.61369/ETQM.2025120003

摘要：大跨度公路桥梁施工中的结构稳定性控制技术研究涉及设计标准、施工工艺、监测手段及智能化应用等多维度协同，其核心在于确保施工全过程的结构安全与精度控制。设计标准与材料规范，需严格遵循国家《公路桥梁设计通用规范》等标准，涵盖荷载等级、抗震性能、结构形式及环境协调性要求，同时通过高性能材料（如高强度混凝土、预应力钢束）优化结构自重与承载能力。施工过程动态监控，建立几何变形、应力、稳定性三维控制体系，采用实时监测技术（如传感器网络、无人机巡检）跟踪结构内力与形变，确保偏差在设计允许范围内。

关键词：大跨度；公路桥梁；施工过程中；结构稳定性控制技术

Research on Structural Stability Control Technology in the Construction Process of Long - Span Highway Bridges

Li Anping

Liaoning Transportation Development Center, Shenyang, Liaoning 110005

Abstract : The research on structural stability control technology in the construction of long – span highway bridges involves multi – dimensional coordination including design standards, construction technology, monitoring methods and intelligent applications. Its core lies in ensuring the structural safety and precision control throughout the construction process. Design standards and material specifications need to strictly follow national standards such as the "General Code for Design of Highway Bridges", covering requirements for load grades, seismic performance, structural forms and environmental coordination. Meanwhile, high – performance materials (such as high – strength concrete and prestressed steel strands) are used to optimize the self – weight and load – bearing capacity of the structure. For dynamic monitoring during the construction process, a three – dimensional control system for geometric deformation, stress and stability is established, and real – time monitoring technologies (such as sensor networks and UAV inspection) are adopted to track the internal forces and deformation of the structure, ensuring that deviations are within the allowable design range.

Keywords : long – span; highway bridge; during construction; structural stability control technology

绿色施工技术：推广节能材料（如钢管混凝土拱肋）与模块化预制，减少资源消耗与环境污染。智能预警系统：深化大数据与物联网应用，通过结构健康评估模型预测灾害风险（如风振、地震响应）。

一、结构稳定性在大跨度公路桥梁中的重要性

(一) 保障结构安全与抗灾能力

规避整体失稳风险，大跨度桥梁在施工及运营阶段面临复杂的荷载组合（如风载、车辆动载、地震力），若稳定性不足易引发整体倾覆或屈曲失稳。例如动载作用下支座反力可能变为负值，导致支座脱空并诱发倾覆事故。需通过抗倾覆验算和三维稳定分析确保结构抗倾覆安全系数达标。应对环境侵蚀与材料退化，我国现存桥梁中部分早期建设桥梁已出现混凝土开裂、钢筋锈蚀等问题，直接影响结构稳定性。需结合 JTG 5120-2021《公路桥涵养护规范》，采用预应力碳板等主动加固技术提升承载刚

度，延缓病害发展^[1]。

(二) 施工过程的关键控制点

高墩稳定性控制，高墩大跨刚构桥施工中，混凝土收缩徐变和温度效应易引发墩身偏位。需通过分阶段稳定分析优化墩型设计（如组合式墩体），并严格控制壁厚、系梁布置等参数。大吨位构件安装风险超过5000吨的梁体落梁过程中，机械跟随千斤顶与力均衡控制程序可防止倾覆，辅以限位钢架约束位移。特殊施工挑战，转体拱桥等开口薄壁结构需进行全过程稳定验算，例如化成大桥（150m跨径）通过优化混凝土浇筑顺序提升劲性骨架稳定性。

(三) 抗风抗震等动力稳定性

颤振临界控制，大跨桥梁的风致振动问题突出，需通过三维

颤振分析确定临界风速。钝体截面桥梁（如南浦大桥）更需注重分离流颤振模型的应用。地震响应优化，高墩桥梁在地震作用下的稳定安全系数需满足规范要求，通过材料非线性分析和弹塑性稳定验算提升抗震能力。

二、结构稳定性与结构强度的区别

（一）本质差异

破坏机制，结构强度：关注材料抵抗外力破坏的能力，表现为材料应力超过极限强度时发生断裂或塑性变形。例如钢筋被拉断、混凝土压溃。结构稳定性：关注结构维持平衡状态的能力，表现为微小扰动下结构突然失稳（如屈曲、倾覆），变形急剧增大但材料应力可能未达极限。典型案例为细长柱受压后侧向弯曲倒塌。控制参数，强度控制：以应力（ σ ）为核心指标，需满足 $\sigma \leq [\sigma]$ （许用应力）^[2]。稳定性控制：以临界荷载（ F_{cr} ）为核心指标，需满足实际荷载 $F \leq F_{cr}$ 。

（二）实际工程中的关联性

独立性与共存要求，构件可能强度足够但仍失稳（如细长柱未压溃先弯曲）；反之稳定性合格的材料也可能因局部应力集中而强度失效。因此设计需双重验算。破坏形态差异，强度破坏伴随明显塑性变形或裂缝发展；稳定性破坏表现为结构整体形态突变（如拱桥瞬间侧翻）。案例说明：某5000吨箱梁落梁施工中，千斤顶液压系统强度达标，但因支撑杆长细比过大引发屈曲失稳，导致梁体倾斜——凸显稳定性控制的独特性。

三、影响结构稳定性的主要因素

（一）内在决定性因素

几何特征，长细比（ λ ）：临界荷载随长细比增大呈指数下降，例如高墩桥梁中墩身长细比超限会诱发侧向屈曲。截面刚度分布：箱型截面因闭口特性抗扭刚度显著优于开口截面（如工字钢），但薄壁箱梁需重点验算局部屈曲风险。边界约束条件：支座固接较铰接可提升临界荷载2–4倍，实际设计中需模拟真实约束刚度。材料性能，弹性模量（E）：直接影响抗弯刚度，高强度钢材可减少屈曲变形但需匹配稳定性设计。缺陷敏感性：焊接残余应力、初始挠曲等缺陷会使实际临界荷载低于理论值30%以上。

（二）外部作用因素

荷载特性，作用点位置：偏心荷载产生附加弯矩，大幅降低稳定安全裕度（如拱桥不对称施工荷载）。动力效应：风致振动（颤振/涡振）及地震激励可能引发动力失稳，需进行颤振临界风速分析。环境干扰，温度梯度：混凝土箱梁日照温差超15°C时，温度应力可导致墩梁体系失稳偏移。腐蚀退化：钢材锈蚀截面损失10%可使压杆稳定系数降低20%以上。施工控制，分段浇筑的混凝土收缩徐变、预应力张拉时序错误均会改变结构内力分布，诱发稳定失效。

四、大跨度桥梁施工关键技术

（一）大跨度桥梁预应力混凝土施工关键技术

大跨度桥梁的预应力混凝土施工涉及复杂的技术体系，需综合材料特性、结构受力及环境因素，核心环节包括支撑体系、预应力筋布置、混凝土工艺及张拉控制。高稳定性模板支撑体系，大跨度梁体荷载集中（如35.5m跨梁线荷载达5吨/米），支撑架需满足抗倾覆和变形控制要求：构造设计：高度 ≥ 20 m或高宽比 ≥ 6 时，设置双层水平加强层（间距10–15m），并通过竖向斜杆增强整体刚度。立杆步距控制在0.9–1.5m，高荷载区采用双立杆或变间距布局（仅单向调整以减少应力集中）。剪刀撑布置：支架外立面满设剪刀撑，中部间隔10–15m增设，确保抗扭性能。顶部支撑：立杆顶部设托板（距横杆 ≤ 400 mm），荷载 >12 kN时优先采用顶托而非扣件连接。针对多功能厅等高大模板场景，荷载精细化分配是防失稳关键。预应力筋施工工艺，预应力系统安装精度直接影响结构承载力，主要流程如下：下料与定位：钢绞线（ $\phi 15.24$, 强度1860MPa）按设计长度切割，避免损耗。波纹管依曲线定位，焊钢筋支架固定（间距 ≤ 1.5 m），并预设排气孔防止灌浆堵塞。穿束与端部处理：固定端用QMJ15-1型挤压锚，张拉端用OM15型夹片锚。梁柱节点钢筋密集区需细化排布，防止混凝土浇筑干扰。标准施工流程可参考行业规范。混凝土浇筑与养护控制，大跨度梁体（如截面800mm×2600mm）易因收缩徐变引发裂缝，需重点关注：浇筑时序：分层浇筑避免冷缝，工字梁区域优先振捣腹板再延展至翼缘^[3]。温湿度管理：冬季施工时覆盖保温层，控制内外温差 ≤ 15 °C以防温度应力失稳。湿度维持 $>90%$ 养护7天，减少早期塑性裂缝。缺陷预防：实时监测混凝土性能，重点管控水化热峰值（如掺粉煤灰降低温升）。张拉与灌浆关键技术，预应力张拉是核心环节，需协调时序与应力控制：张拉顺序：采用对称渐进式（先中间后两侧），例如35.5m跨梁分阶段张拉：柱筋→梁筋50%→补强柱筋→梁筋至100%。控制应力为0.75f_pk（f_p为钢绞线极限强度），超张拉风险需通过油压表校准规避。灌浆要求：张拉后48h内完成孔道灌浆（水灰比0.4–0.45），浆体强度不低于30MPa。质量监控：施工中检测预应力损失，结合温度/湿度修正张拉值，确保与设计内力匹配。特殊工况应对措施，深水基础施工：采用钢套箱或钢吊箱隔离水流冲击，保护桩基完整性。大跨连续刚构桥：柔性墩设计需补偿温度变形，监控墩顶负弯矩防开裂。腐蚀防护：锈蚀截面损失 $>10\%$ 时采用碳纤维加固，提升耐久性。大跨度预应力混凝土桥梁施工需以“支撑体系安全优先、预应力精准控制、混凝土完整性保障”为原则。工程中应严格遵循规范（如JTG/T 3650–2020），并结合实时监测动态调整工艺，以攻克高荷载、长跨距带来的技术挑战。

（二）BIM技术在大跨度桥梁施工中的应用

设计阶段的结构优化，三维参数化建模，建立精确的桥梁三维模型，可视化呈现复杂节点（如索塔锚固区、预应力管道布设），支持参数实时调整，快速优化结构设计。碰撞检测与冲突解决，自动检测钢筋与预应力管道、设备预留孔的空间冲突，减

少施工返工率达30%以上，施工过程的关键应用。施工方案模拟与优化，虚拟建造技术模拟架梁、转体等关键工艺（如万吨级梁体转体轨迹预演），验证施工可行性。进度4D模拟精准推算材料需求与机械调度，降低资源浪费。现场协同与实时监控，物联网集成：传感器数据（如应力、温度）联动BIM模型，实时预警支架变形或混凝土温超标风险。移动端协同：施工方通过轻量化模型查看工序要点，提升交底效率。全生命周期数据整合，竣工模型交付：集成材料属性、检测记录等数据，为运营维护提供基础。预防性养护决策：结合传感器监测数据，预测构件退化趋势并制定维护计划。案例：深中通道工程通过BIM实现200米超高索塔施工误差控制在5mm内，钢箱梁合龙精度达毫米级。未来需突破异构系统数据互通瓶颈，深化机器学习在风险预测中的应用^[4]。

五、桥梁结构稳定性控制技术

桥梁结构稳定性控制技术贯穿设计、施工及运维全周期，需综合力学原理、材料性能与实时监测手段。

（一）设计阶段稳定性保障

结构体系优化，避免采用横向稳定性差的独柱墩设计（易引发整体倾覆），优先选用双柱墩或墩梁固结体系。大跨径桥梁需进行三维非线性有限元分析，考虑几何与材料双重非线性效应，精准计算极限承载力。荷载与失效模式模拟，以永久荷载与可变荷载组合为基础，按比例加载模拟失稳过程，验证第二类稳定性安全系数是否达标。针对风振效应，优化气动外形（如导流板）抑制颤振，临界风速需通过三维流体动力学分析确定。

（二）施工过程控制技术

深水基础稳定性，采用钢套箱围堰或气压沉箱法隔离水流，确保桥墩基础施工精度及岩层嵌固深度。松散岩层锚固：通过高强缆绳预张拉（液压千斤顶控制）增强斜坡稳定性，再浇筑混凝土基础。高墩施工安全，超过20m的高墩模板支撑体系需设置双层水平加强层（间距≤15m）及满布剪刀撑，立杆步距≤1.5m。实时监测混凝土水化热，控制内外温差≤15℃，避免温度应力导致墩体开裂。

（三）特殊工况应对

地震响应控制：高墩结构采用弹塑性稳定验算，通过材料

非线性分析提升耗能能力。极端荷载防护：针对军用荷载（如MC120）、特殊荷载（D2系列）优化配筋率及节点构造。技术瓶颈：初始缺陷对失稳模式的影响仍需深化研究，未来需融合机器学习优化稳定性预测模型。

六、桥梁施工中节能降耗材料与技术应用

（一）节能材料应用

再生骨料混凝土：采用建筑垃圾再生骨料（掺量≥45%）替代传统混凝土，减少天然资源消耗和环境污染，同时降低成本18%。铝合金材料：重量仅为钢材的34%，回收率高达95%，可减少建造阶段约1200吨CO₂排放，且抗腐蚀性强，降低长期维护需求。轻质高强建材：如轻质混凝土和碳纤维复合材料（拉伸强度≥18MPa），减轻桥梁自重30%以上，提高抗震性能并缩短施工周期。绿色环保墙板：蒸压陶粒混凝土墙板等装配式材料，减少模板支设和钢筋用量，节省工期并避免空鼓开裂问题^[5]。

（二）减耗技术创新

预制拼装技术：墩柱-盖梁整体模块化安装，减少现场作业面60%，废弃物排放降低40%，噪声下降12dB(A)。节能减排工艺：采用温控技术和节能设备（如液压静力压桩），降低施工能耗；AI水质预警系统确保废水COD≤40mg/L，减少水体污染。减震与资源循环：橡胶垫块（耐温150℃，动静刚度比≤1.3）用于桥梁接缝，吸收振动能量，延长结构寿命并降低维护成本；结合光伏声屏障技术，年发电量可满足运营期30%照明需求。

（三）综合效益实现路径

政策驱动与标准化：严格执行绿色施工导则（如省要求资源循环利用和碳排放强度下降25%），确保材料采购优先本地再生资源以降低运输碳足迹。数字化管理：BIM和北斗监控系统优化施工方案，减少岩土扰动92%以上，避免资源浪费。经济环境双赢：通过轻质高强建材和装配式工法，缩短工期20%，降低总成本15%—30%，同时实现碳减排系数0.32以上。

总之，应用BIM技术构建全生命周期模型，实现设计、预制、装配一体化管控，如无人化梁厂通过智控云平台追踪箱梁生产数据。集成AI视觉分析系统，实时预警施工安全风险（如未佩戴安全装备、高空作业违规）。以工序质量为核心，严控材料检验、设备标定及测量复核，建立开工至竣工的全流程质量管理闭环。

参考文献

- [1] 刘艳. 大跨度公路桥梁施工过程中的结构稳定性控制技术分析. 2023.
- [2] 张浩宇. 大跨度公路桥梁施工过程中的结构稳定性控制技术分析. 2022.
- [3] 王强. 大跨度公路桥梁施工结构稳定性控制要点探究 [J]. 交通科技, 2021(03).
- [4] 陈静. 大跨度公路桥梁施工中结构稳定性控制技术应用 [J]. 工程建设与设计, 2021(12).
- [5] 孙伟. 大跨度公路桥梁施工过程结构稳定性控制研究 [D]. 长安大学, 2022.