

复杂地质条件下桥梁墩柱模板受力特性及快速拼装工艺优化

张 坤

中交路桥南方工程有限公司 北京 100027

摘 要：在复杂地质条件下，桥梁墩柱模板受地质因素影响显著，受力特性复杂且拼装难度大。本文深入分析岩溶发育区、断层破碎带等地质条件对模板受力的影响机制，研究模板结构体系与关键受力特性。提出模块化设计、拼装流程优化及适应性改进等快速拼装工艺优化策略，探讨模板受力与拼装工艺的协同优化方法，通过受力-工艺耦合分析、多目标优化及智能化监控反馈，为复杂地质条件下桥梁墩柱模板施工提供理论与技术支持。

关键词：复杂地质条件；桥梁墩柱模板；受力特性；快速拼装工艺；协同优化

引言：桥梁建设作为交通基础设施的关键部分，其墩柱模板施工至关重要。然而，我国地域辽阔，地质条件复杂多样，岩溶发育区、断层破碎带、软弱夹层及高地震烈度区等广泛存在。这些复杂地质条件给桥梁墩柱模板施工带来诸多挑战，不仅影响模板的受力状态，导致应力集中、不均匀沉降等问题，还增加了模板拼装的难度，降低施工效率与质量。因此，深入研究复杂地质条件下桥梁墩柱模板受力特性及快速拼装工艺优化具有重要的现实意义。

1 复杂地质条件对桥梁墩柱模板的影响

1.1 地质条件分类与特征

桥梁墩柱施工常面临复杂地质条件，这些条件对模板的设计与使用有着关键影响。岩溶发育区地质构造复杂，存在大量溶洞与溶蚀裂隙，这类区域地下水储量丰富且流动性强，岩体内部孔隙率较高，导致地基承载力分布不均^[1]。断层破碎带受构造运动影响，岩体破碎程度显著，完整性大幅降低，节理裂隙发育密集，地下水活动频繁，易形成渗流通道，进一步削弱岩体稳定性。软弱夹层通常由黏土、泥质粉砂岩等低强度岩层构成，具有高压缩性与低抗剪强度特性，在荷载作用下易产生塑性变形，导致地基不均匀沉降现象。高地震烈度区地壳运动活跃，地震动参数如峰值加速度、反应谱特征周期等指标较高，结构在地震作用下的动力响应呈现非线性特征，对模板体系的抗振性能提出更高要求。

1.2 地质条件对模板受力的影响机制

不同地质条件会以不同方式作用于桥梁墩柱模板，影响其受力状态与稳定性。不均匀地基条件下，模板基础与地基接触面存在应力集中现象，局部区域压应力显著高于设计值，可能引发基础板屈曲或连接件失效。地

下水通过渗透作用对模板产生侧向压力，该压力值随地下水水位升高而增大，且与土体有效应力状态密切相关，在饱和软土地区可能达到混凝土侧压力的1.2-1.5倍。地震荷载作用下，模板体系产生惯性力与变形，竖向地震动可能导致模板与已浇筑混凝土界面分离，水平地震动则引发整体滑移或倾覆风险。岩溶发育区施工时，溶洞顶板坍塌或地下水突涌会引发荷载瞬时突变，断层破碎带可能因开挖扰动导致围岩压力重新分布，这两种工况均要求模板具备更高的抗冲击能力与动态适应性。软弱夹层地区的不均匀沉降会使模板产生附加弯矩，连接节点处出现应力重分布，长期作用下可能导致结构疲劳破坏。

2 桥梁墩柱模板受力特性分析

2.1 模板结构体系与受力模型

桥梁墩柱模板的结构体系与受力模型是理解其力学行为的基础，对保障施工安全与质量至关重要。桥梁墩柱模板由面板、背楞、支撑系统及连接件构成完整受力体系^[2]。面板直接承受混凝土浇筑产生的侧压力，并通过背楞将荷载传递至支撑系统；支撑系统通过地脚螺栓或斜撑与基础连接，确保整体稳定性；连接件则实现各部件间的可靠传力。模板受力类型涵盖静载、动载与环境荷载：静载包括混凝土侧压力与模板自重，混凝土侧压力通常在20-60kPa，模板自重根据材质和尺寸不同，一般在5-20kN/m²；动载涉及施工机械振动、人员操作冲击及地震作用，施工机械振动产生的动载可能在5-20kPa；环境荷载主要指风荷载与地下水渗流产生的侧向压力，风荷载根据风速和模板形状不同，可能在1-10kPa。受力分析模型中，有限元分析模型通过离散化单元模拟结构真实应力状态，等效刚度法将复杂体系简化为等效连续梁进行快速计算，动力时程分析则针对地震等动态荷载，

通过输入实际地震波记录求解结构响应历程。

2.2 关键受力特性

桥梁墩柱模板在受力过程中,一些关键部位的特性直接影响着整体结构的性能与安全。面板在混凝土侧压力作用下产生弯曲变形,高应力区集中于连接部位与转角处,这些区域因应力集中效应易出现局部屈曲或开裂。背楞与支撑系统的稳定性直接影响模板整体抗倾覆与抗滑移能力,其中背楞的间距与截面尺寸需满足抗弯强度要求,支撑系统的斜撑角度与锚固深度需通过计算确定以防止失稳。连接件强度是保障模板体系安全的关键,螺栓需同时满足剪切与拉伸承载力要求,销轴连接则需验证抗剪与抗拔性能,尤其在动态荷载作用下,连接件的疲劳寿命需重点评估。动力响应特性方面,地震荷载作用下需通过模态分析确定结构自振频率,避免与场地卓越周期接近引发共振,同时需计算层间位移角以满足抗震规范要求。

2.3 复杂地质条件下的特殊受力问题

在复杂地质条件下,桥梁墩柱模板会面临一些特殊的受力问题,需要采取针对性的措施加以解决。不均匀沉降导致模板基础产生差异变形,引发整体倾斜并使内部应力重新分布,连接部位因附加弯矩作用易发生破坏,差异变形量可能达到10-50mm。地下水渗流改变土体有效应力状态,使模板侧向压力随水位波动呈现动态变化特征,水位波动幅度可能在1-5m,需根据渗流力学原理修正侧压力计算值。岩溶发育区或断层破碎带施工时,溶洞坍塌或围岩失稳会引发荷载瞬时突变,要求模板具备更高的抗冲击能力与荷载调整裕度,施工过程中需实时监测模板变形并动态调整支撑参数以确保安全,变形监测频率一般在1-10次/小时。

3 快速拼装工艺优化策略

3.1 模块化设计原则

模块化设计是提高桥梁墩柱模板快速拼装效率与质量的重要原则,能有效提升施工的便捷性与灵活性。标准化构件设计是快速拼装工艺的基础支撑^[3]。通过统一面板、背楞及连接件的几何参数与接口形式,可实现构件的批量预制与通用化装配,有效减少现场加工环节与适配调整时间。面板尺寸设计需兼顾混凝土浇筑工艺要求与运输单元限制,背楞截面形式则依据抗弯承载需求优化为空心或实心结构,以平衡结构强度与材料用量。轻量化设计以降低模板自重为目标,铝合金材料因其高比强度特性被广泛应用于面板制造,碳纤维复合材料则通过纤维定向排列技术实现背楞的局部加强,二者在减轻重量的同时保持了足够的结构刚度。快速连接技术的创

新聚焦于操作便捷性与连接可靠性,自锁式螺栓通过内置弹簧机构实现自动锁紧功能,磁吸式接头利用永磁体吸附力完成构件的快速定位,这两种连接方式均无需辅助工具即可完成安装,显著提升了拼装效率并降低了对操作人员技能的要求。

3.2 拼装流程优化

合理的拼装流程能够提高桥梁墩柱模板的拼装效率与质量,减少施工过程中的问题与风险。预拼装技术通过工厂化作业模式将现场拼装工作前置,在受控环境下完成构件的组装与调试,可提前发现并解决尺寸偏差或连接问题,从而大幅减少现场施工中的调整时间。分层拼装法根据结构高度将模板划分为若干独立层段,每层拼装完成后立即进行垂直度校正,通过逐层累积的方式控制整体变形,这种分阶段施工方式有效降低了单次拼装的作业难度与安全风险。机械化辅助手段的应用进一步提升了拼装精度与效率,起重机负责大构件的吊运与就位,智能定位系统通过激光或视觉传感器实时反馈构件空间位置,配合液压微调装置实现毫米级对接精度,确保模板体系的整体稳定性与几何尺寸准确性。

3.3 适应性改进措施

针对复杂地质条件,对桥梁墩柱模板进行适应性改进是保障施工安全与顺利进行的关键。可调节支撑系统针对复杂地质条件设计,液压式支撑通过油缸伸缩补偿地基不均匀沉降,油缸行程一般在0.2-1m;机械式支撑则利用螺纹调节机构实现高度微调,螺纹螺距一般在2-5mm,二者均可根据现场实测数据动态调整支撑状态,确保模板在各类地基条件下的水平度与垂直度要求,水平度偏差可控制在 $\pm 2\text{mm/m}$,垂直度偏差可控制在 $\pm 3\text{mm/m}$ 。防水密封设计需充分考虑地下水渗透特性,橡胶止水带通过压缩变形填充拼接缝隙形成第一道防线,橡胶止水带宽度一般在20-50mm,压缩率一般在20%-40%;涂层防护则采用聚脲或环氧树脂等材料在模板表面形成连续防水层,涂层厚度一般在0.5-2mm,二者协同作用可有效阻断地下水对模板结构的侵蚀。抗震加固措施通过增强结构动力稳定性提升模板体系在地震作用下的安全性,斜撑布置可显著增加侧向刚度,抑制地震引发的水平变形,斜撑数量根据结构高度和地震烈度不同,一般在4-12根;阻尼器则通过黏滞耗能或金属屈服机制消耗地震能量,降低结构动力响应幅度,阻尼器阻尼系数一般在10-100kN·s/m,这两种抗震构件的协同工作可确保模板在强震区仍能保持结构完整性与使用功能。

4 模板受力与拼装工艺的协同优化

4.1 受力-工艺耦合分析

桥梁墩柱模板的受力状态与拼装工艺相互影响,进行受力-工艺耦合分析是实现协同优化的关键。拼装顺序对模板受力状态具有显著影响^[4]。若先安装侧模后安装底模,侧模在混凝土侧压力作用下易产生向内倾斜趋势,导致底模就位时需额外施加校正力,这一过程中校正力的大小和作用点若控制不当,可能引发局部应力集中;反之,先安装底模后安装侧模,底模需承受侧模自重及施工荷载,对基础承载力要求更高。施工荷载的动态分配需与模板刚度特性相匹配,在混凝土浇筑阶段,泵送冲击力与振捣棒振动荷载的叠加效应可能使模板产生瞬态变形,若模板刚度不足,变形会通过连接件传递至相邻构件,形成累积损伤。这种累积损伤若长期得不到重视,会逐渐削弱模板的整体性能,降低使用寿命。此外,拼装过程中构件的吊装顺序与临时支撑布置方式直接影响结构整体稳定性,需通过力学分析确定最优施工路径。

4.2 多目标优化方法

为实现桥梁墩柱模板的综合性能提升,需采用多目标优化方法进行协同优化。协同优化需以模板强度、刚度及拼装效率为核心目标。强度目标要求模板在混凝土侧压力、施工荷载及环境荷载作用下不发生破坏;刚度目标需控制变形量满足施工精度要求;拼装效率目标则通过减少构件数量、简化连接方式及缩短单次操作时间实现。这些目标之间相互关联又相互制约,例如减少构件数量可能会在一定程度上影响模板的强度和刚度。多学科优化算法如NSGA-II通过构建包含应力、变形、工时的多维度目标函数,利用遗传算法的非线性搜索能力在解空间中寻找帕累托最优解集,设计人员可根据工程需求从解集中选择兼顾安全性与经济性的方案。优化过程中需考虑约束条件,如构件尺寸需符合运输限制、连接件强度需满足疲劳寿命要求等,确保优化结果具有工程可实施性。只有充分考虑这些约束条件,才能保证优化后的模板在实际施工中能够顺利应用,避免出现因不符合实际条件而无法实施的情况。

4.3 智能化监控与反馈

智能化监控与反馈系统能够实时掌握桥梁墩柱模板的受力与变形情况,为协同优化提供数据支持。传感器网络的部署可实现模板受力与变形的实时监测,光纤光栅传感器可嵌入面板与背楞中,通过波长变化精确测量应力分布;激光位移传感器则安装于支撑系统关键节点,监测垂直度与水平位移。这些传感器能够精准捕捉模板的细微变化,为后续的数据分析提供可靠依据。监测数据通过无线传输至中央控制系统,结合机器学习算法对异常数据进行识别与预警。数字孪生技术通过构建与物理模板完全对应的虚拟模型,输入实时监测数据后,可模拟不同施工阶段模板的受力状态与变形趋势,预测潜在风险点如连接件松动或局部屈曲。基于预测结果,系统可自动生成调整指令,如优化拼装顺序、增设临时支撑或调整混凝土浇筑速度,形成“监测-分析-决策-调整”的闭环控制体系,这种闭环控制体系能够及时发现并做出调整,有效避免事故的发生,显著提升施工安全性与模板周转效率。

结束语

复杂地质条件下桥梁墩柱模板施工面临诸多挑战,通过对模板受力特性的深入分析以及快速拼装工艺的优化研究,能够有效应对地质因素带来的不利影响。模块化设计、拼装流程优化和适应性改进等策略提升了拼装效率与质量,受力-工艺耦合分析、多目标优化和智能化监控反馈实现了模板受力与拼装工艺的协同优化。这些成果为复杂地质条件下桥梁墩柱模板施工提供了全面的解决方案,有助于保障施工安全、提高工程质量与效率。

参考文献

- [1]林东伟,张晓明.装配式混凝土模板在桥梁墩柱的设计与分析[J].建筑与装饰,2023(21):44-46,50.
- [2]孔德顺,孟芳汀,姜会增.高速铁路桥梁墩柱新型塑料模具的优化设计及应用[J].铁道建筑,2024,64(7):90-95.
- [3]冯森.新型方墩柱系梁托架装配技术分析[J].四川建材,2024,50(2):187-189.
- [4]任剑.桥梁墩柱翻模施工中的模板安装、翻升及质量保障措施[J].建材世界,2023,44(01):64-67.