

框架结构抗震设计中节点构造优化对整体性能的影响研究

童志俊

浙江工业大学工程设计集团有限公司 浙江 杭州 310014

【摘要】：在框架结构抗震设计领域，节点构造的优化对于提升整体性能至关重要。节点作为框架结构中梁与柱的连接部位，其构造的合理性直接关系到结构在地震作用下的稳定性与承载能力。通过对节点的钢筋布置、混凝土强度、连接方式等多方面进行优化，可以有效改善节点的受力性能，增强结构的延性与耗能能力，从而提升框架结构的整体抗震性能。研究表明，合理的节点构造优化能够显著降低结构在地震中的破坏程度，减少经济损失与人员伤亡。

【关键词】：框架结构；抗震设计；节点构造；整体性能；优化策略

DOI:10.12417/2811-0536.25.12.030

引言

地震灾害频发，给人类生命财产安全带来巨大威胁。框架结构作为常见建筑结构形式，其抗震性能至关重要。节点是框架结构关键部位，连接梁与柱，传递荷载。在地震作用下，节点受力复杂，易发生破坏，进而影响结构整体稳定性。如何优化节点构造，提升框架结构抗震性能，成为亟待解决的问题。研究节点构造优化对框架结构整体性能的影响，对保障建筑安全、降低地震损失意义重大。

1 框架结构节点在地震中的受力特性剖析

(1) 节点区域应力的复杂构成：地震作用下，框架结构节点成为梁、柱传力的枢纽，承受弯、剪、轴力、扭矩等多种内力的复杂组合作用。水平地震力使梁端产生显著弯矩与剪力，迫使节点核心区抵抗水平方向的错动趋势；竖向地震力则改变柱轴力分布，加剧节点核心区的压力状态。这种剪压复合应力状态下，节点不仅要平衡平面内的弯曲与剪切作用，还可能因地震波的扭转分量承受平面外扭矩。梁、柱刚度的差异进一步放大了应力集中效应，使得节点核心区的混凝土处于复杂的三向应力状态。

(2) 混凝土损伤的力学机制：节点核心区混凝土的破坏过程具有明显的阶段性。初始阶段，剪应力促使混凝土内部微裂缝萌生，裂缝沿骨料与水泥石的界面过渡区扩展。随着地震往复加载，斜向主裂缝贯通形成交叉裂缝网络，混凝土保护层逐渐失去约束作用^[1]。压应力与剪应力的耦合作用导致混凝土抗压强度折减，当剪应力超过临界值时，核心区混凝土发生斜压破坏，表现为对角斜裂缝扩展、混凝土剥落破碎。这种破坏模式严重削弱节点的承载能力，导致结构整体刚度下降。

(3) 钢筋锚固失效的影响因素：钢筋与混凝土的

协同工作性能直接影响节点传力效率。锚固长度不足时，钢筋与混凝土的粘结力无法抵抗拉拔力，导致钢筋滑移甚至拔出；而钢筋间距过小会阻碍混凝土流动，形成浇筑缺陷，降低粘结强度。地震作用下，钢筋反复受拉受压，其与混凝土之间的化学胶着力、摩阻力和机械咬合力相继失效。特别是对于变形钢筋，肋纹与混凝土的咬合破坏将导致锚固性能急剧下降，使节点丧失传力功能，最终引发结构整体失效。

2 现有框架结构节点构造存在的问题探讨

(1) 钢筋布置的设计缺陷：传统节点设计中，钢筋锚固长度不足是普遍存在的隐患。部分工程为满足建筑空间要求，压缩节点区域尺寸，导致钢筋锚固长度无法达到规范要求^[2]。钢筋密集布置同样带来施工难题，过密的间距不仅阻碍混凝土振捣，还可能因钢筋与模板间的气隙形成蜂窝麻面，削弱混凝土对钢筋的握裹力。钢筋连接方式选择不当，如采用绑扎连接替代机械连接，也会降低节点的延性与可靠性。

(2) 混凝土强度匹配的矛盾：节点核心区混凝土强度与梁、柱的匹配关系直接影响结构性能。强度等级过低时，节点将先于梁、柱破坏，形成薄弱环节；强度等级过高则导致节点脆性增加，在地震作用下易发生突然破坏。实际工程中，由于混凝土浇筑顺序不当，节点与梁、柱可能存在强度差异，这种差异在地震作用下将引发应力重分布，加速节点破坏。高强混凝土的收缩开裂问题也会降低节点的耐久性。

3 节点构造优化策略的详细阐述

3.1 钢筋布置的精细化设计

在框架结构抗震设计中，钢筋布置的精细化设计是提升节点性能的关键环节。优化钢筋锚固性能需从多个方面入手。首先，需严格满足规范对梁纵筋在节点内直锚或弯锚（弯折角度 $\geq 15^\circ$ ，水平段长度 $\geq 0.4l_{abE}$ ）

的最小要求。当空间受限时,采用端头焊接锚固板(符合《混凝土结构设计规范》要求)或钢筋端部机械螺纹套筒,缩短锚固长度 20%~30%的同时保障传力效率。这种设计不仅能够显著增加钢筋与混凝土之间的咬合面积,还能通过改变应力的传递路径,有效提升锚固的承载能力。这种优化措施可以确保钢筋与混凝土在地震作用下能够协同工作,从而避免因锚固失效而导致的结构破坏。同时在梁柱节点核心区按规范要求配置封闭箍筋,直径 $\geq 10\text{mm}$,间距 $\leq 100\text{mm}$ (一级抗震)或 150mm (二~四级),形成对核心区混凝土的强约束。箍筋复合箍筋体系:采用螺旋箍、焊接环箍或交叉拉筋,增强混凝土三向受压状态,提高抗剪强度及延性。

与此同时,钢筋间距的优化布置也不容忽视。在满足结构受力需求的基础上,必须为混凝土的浇筑预留出充足的空间。在传统的节点区域,由于钢筋布置过于密集,常常导致混凝土无法充分包裹钢筋,从而形成浇筑缺陷。这些缺陷会削弱混凝土对钢筋的握裹力,进而影响节点的整体性能^[3]。为了解决这一问题,可以采用梁端加腋的方法,提高核心区的抗剪承载力和改善梁钢筋的锚固条件。这两种方法都能有效解决梁钢筋在节点区域交叉拥堵的问题。通过优化钢筋间距,不仅可以提高施工效率,还能保证混凝土的浇筑质量。当混凝土能够充分包裹钢筋时,钢筋与混凝土之间能够形成更紧密的整体,这将显著增强节点的延性和耗能能力。在地震作用下,这种紧密的结合能够使节点更好地抵抗外力,从而提高整个框架结构的抗震性能。

3.2 混凝土性能的协同提升

在框架结构抗震设计中,节点核心区混凝土性能的优化是提升整体抗震性能的重要环节。为了满足抗震设计要求,节点核心区混凝土性能的优化需要兼顾强度与韧性。在选择混凝土强度等级时,应综合考虑梁、柱材料的特性,通常节点核心区的混凝土强度可以比梁、柱构件的混凝土强度高一个等级。然而,需要注意的是,混凝土强度的差异不应过大。例如,若节点混凝土强度显著高于梁、柱(如节点采用 C50 混凝土,而梁、柱采用 C40 混凝土),则会在交界处形成刚度突变,从而导致裂缝集中。为了避免这种情况,应合理选择混凝土强度等级,以提高节点核心区的抗剪能力。

为了增强混凝土的韧性和耗能能力,可以在混凝土中添加钢纤维等增强材料。这些纤维能够均匀地分散在混凝土中,有效抑制裂缝的扩展,延缓裂缝的形

成与发展,从而提高混凝土的抗裂性能和延性。这种增强措施对于提高节点核心区混凝土的抗震性能具有重要意义。

在钢筋密集的复杂节点区域,采用自密实混凝土是保证浇筑质量的有效措施。自密实混凝土具有高流动性、抗离析性和良好的间隙通过性,能够在无需振捣的情况下自行填充模板空间。这一特性确保了钢筋密集区域的混凝土能够充分密实,避免了因振捣不密实而导致的节点强度削弱问题,从而提高了节点的抗震性能。

此外,通过严格控制水胶比和添加高效减水剂等措施,可以进一步改善混凝土的流动性、和易性和耐久性。这些措施不仅能够使混凝土在满足强度要求的同时具备更好的抗疲劳性能和长期服役能力,还能使其更好地适应地震等复杂荷载的反复作用。在地震作用下,梁优先进入塑性状态,通过塑性变形耗散地震能量,避免结构发生脆性破坏。

通过“钢筋精准锚固+核心区强约束+混凝土高韧性+施工零缺陷”四维优化,可实现节点核心区:小震弹性工作(裂缝宽度 $\leq 0.2\text{mm}$),中震轻微损伤(混凝土压碎面积 $< 5\%$);大震塑性变形可控(层间位移角达标),支撑结构“不倒”底线。

4 节点构造优化对结构整体性能提升效果分析

(1) 抗震性能的本质改善:优化后的节点构造通过构建更加高效的传力体系,从根本上提升结构的抗震能力。在传统设计中,节点区域往往因钢筋锚固长度不足、混凝土浇筑密实度欠佳等问题,成为结构抗震的薄弱环节。而经过优化的节点设计,通过精确计算钢筋锚固长度,采用机械锚固、焊接锚固等多种方式相结合,确保钢筋与混凝土之间的协同工作能力。通过调整混凝土配合比、增设约束箍筋等措施,有效抑制裂缝在节点区域的萌生与扩展。当结构遭遇地震作用时,塑性铰在梁端有序形成并发展,使结构能够通过塑性变形耗散地震能量。这种设计理念避免了因节点过早破坏导致的结构整体性丧失,确保结构在进入塑性变形阶段后,仍能维持一定的承载能力和稳定性。在地震模拟过程中,优化后的节点构造使得结构的层间位移角明显减小,结构在地震作用后的残余变形大幅降低,从而显著提升了整体抗震安全性。

(2) 结构刚度与整体性增强:节点构造优化对结构整体刚度的提升具有一定作用。在传统的节点连接方式中,由于连接部位的变形难以有效控制,梁、柱之间的协同工作效率受到限制。优化后的节点设计通

过改进连接工艺,采用更加可靠的连接方式,如型钢混凝土组合节点、预应力连接节点等,有效减少了连接部位的相对变形,使梁、柱能够更好地协同抵抗外部荷载。通过设置型钢暗梁、环梁等加强措施,节点区域的约束作用得到显著增强。这些加强措施不仅提高了节点的抗剪、抗弯能力,还进一步增强了结构的整体性。在水平荷载作用下,结构的侧向位移有效减小,结构的使用性能得到有效改善。这种刚度提升带来的积极影响不仅体现在抗震性能上,在抵御风荷载、偶然荷载等方面同样效果显著,为建筑的安全性提供了更可靠的保障。

(3) 耐久性与可靠性提升:优化后的节点构造对延长结构使用寿命、提升结构可靠性具有重要意义。在传统设计中,钢筋锚固性能不足容易导致钢筋与混凝土之间产生滑移,进而引发节点区域的损伤^[4]。而优化后的节点通过改进钢筋锚固方式,采用机械锚固等技术,有效增强了钢筋与混凝土之间的粘结力,减少了因钢筋滑移导致的节点损伤。通过提高混凝土的抗裂性能,采用高性能混凝土、添加纤维材料等措施,降低了有害物质侵入结构内部的风险。在长期荷载与复杂环境作用下,优化后的节点构造使得结构的损伤累积速率明显降低,结构的可靠性与耐久性得到显著提升,有效减少了后期的维护成本,为建筑的长期安全使用提供了有力保障。

5 节点构造优化在实际工程应用中的案例分析

(1) 高层建筑节点优化实践:在某高层办公楼建设中,原设计方案的节点构造存在钢筋锚固不足与核心区混凝土性能缺陷问题。传统弯钩锚固因空间限制无法满足规范长度,削弱了钢筋与混凝土粘结力;节点核心区混凝土强度与梁、柱不匹配,易引发地震应力集中。优化方案采用机械锚固板技术替代弯钩锚固,利用锚板挤压传力缩短锚固长度,解决空间难题;核心区浇筑掺钢纤维的高性能混凝土,增强韧性与抗裂性;施工时采用自密实混凝土,确保钢筋密集区浇筑密实。项目竣工后,抗震检测显示,在模拟设防烈度

地震下,结构层间位移角安全,节点无裂缝,验证了优化方案的有效性。

(2) 商业综合体复杂节点处理:某大型商业综合体项目由于功能需求,建筑结构形式复杂,多梁交汇节点处钢筋布置极为密集。传统的钢筋混凝土结构在如此复杂的节点构造下,不仅施工难度极大,而且难以保证钢筋的锚固效果和混凝土的浇筑质量。为解决这一难题,设计团队创新性地采用型钢混凝土组合结构体系。在节点区域内置型钢骨架,利用型钢良好的抗拉、抗压性能,分担结构荷载,同时简化了钢筋布置。型钢与混凝土协同工作,形成优势互补,显著提高了节点的承载能力和延性。在节点周边设置加强环,通过环向约束作用,有效限制混凝土的横向变形,延缓裂缝的产生和扩展,增强节点的整体稳定性。在施工阶段,引入 BIM 技术进行精细化管理^[5]。通过建立三维信息模型,对节点部位的钢筋、型钢进行碰撞检查,提前发现并解决设计冲突。基于 BIM 模型优化施工顺序,制定详细的节点施工方案,避免了传统施工中因钢筋交叉碰撞导致的返工问题。施工人员依据可视化模型进行操作,施工效率大幅提升,工程进度得到有效保障。项目建成后,该商业综合体经历多次地震应急演练,并在实际地震影响中经受住考验。结构整体保持完好,节点区域未发生任何破坏,建筑功能正常运行。实践证明,这种优化方案不仅有效解决了复杂节点的技术难题,还通过减少施工难度和返工量,实现了良好的经济效益。

6 结语

框架结构节点构造优化对提升整体性能效果能起到一定效果,优化措施有效改善节点受力性能,提升结构抗震性、刚度及可靠性。未来,应深入研究新型节点构造,结合新材料、新技术,提高节点构造优化水平。加强对节点构造优化的工程应用研究,推广成功经验,制定更完善设计标准与规范,为框架结构抗震设计提供更有有力支持,降低地震灾害损失,保障建筑安全。

参考文献:

- [1] 周云,邓雪松,王威,等.基于自复位耗能支撑的装配式混凝土框架抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2021,42(9):130-140.
- [2] 吕西林,李国强,周德源,等.预制装配式混凝土框架节点抗震性能研究进展与展望[J].土木工程学报,2022,55(7):1-13.
- [3] 郭海山,吴波,潘建荣,等.基于性能的钢筋混凝土框架节点抗震设计方法研究[J].工程力学,2023,40(10):145-156.
- [4] 刘晶波,李彬,王宗纲,等.装配式混凝土框架梁柱节点新型连接方式抗震性能试验研究[J].建筑科学,2024,40(6):35-43.
- [5] 李爱群,丁幼亮,高振峰,等.钢-混凝土组合框架节点抗震性能试验研究与数值模拟[J].工业建筑,2020,50(12):1-8.