

装配式混凝土结构节点抗震性能优化设计研究

赵 杰

天津城建设计院有限公司 天津 300122

【摘 要】：近年来，随着社会的进步与发展，现浇方式已经不能完全适应社会的发展需要，建筑行业迎来了新的发展机遇，逐渐向技术化、节能化以及无污染方向发展。装配式建筑凭借减少施工污染、节约能源、提升劳动生产率等优点，装配式建筑得到大力发展。装配式混凝土框架结构的节点区域是其薄弱部位，节点的连接技术将直接影响整体结构的稳定性和抗震性，决定着装配式建筑的进展程度。装配式混凝土结构因施工高效、环保等优势在建筑领域广泛应用，但节点抗震性能是其关键问题。本文主要探讨装配式混凝土结构节点抗震性能优化设计，对节点连接方式、构造措施等因素对抗震性能的影响深入分析，提出节点抗震性能优化设计策略，优化后的节点显著提升了建筑的承载力、变形能力、耗能能力等方面，能有效抵抗地震作用，保障结构安全，为装配式混凝土结构抗震设计提供理论依据和技术支持。

【关键词】：装配式混凝土结构；节点；抗震性能；优化设计

DOI:10.12417/2811-0536.26.02.071

引言

随着建筑工业化进程的加速，装配式混凝土结构凭借施工高效、质量可控、绿色环保等优势，在建筑工程中得到了广泛应用。然而，装配式混凝土结构节点的抗震性能对于整个结构在地震作用下的安全性有着直接影响，已成为制约其进一步发展的关键问题。因此，开展装配式混凝土结构节点抗震性能优化设计研究具有重要的现实意义。

1 装配式混凝土结构节点类型及特点

1.1 湿式连接节点

湿式连接是装配式混凝土结构中常用的连接方式，主要包括套筒灌浆连接和浆锚搭接连接。套筒灌浆连接通过在预制构件中预留钢筋，将其插入金属套筒，再向套筒内灌注高强灌浆料实现钢筋的连接。这种连接方式能够实现钢筋的可靠传力，连接强度较高，但灌浆质量受灌浆料性能、施工工艺等因素影响较大。若灌浆不密实，会导致连接部位强度降低，影响节点的抗震性能。浆锚搭接连接是在预制构件中预留孔道，将后插钢筋插入孔道，并通过灌注灌浆料实现钢筋的搭接连接。该连接方式不需要使用金属套筒，成本相对较低，但浆锚搭接连接的搭接长度和灌浆质量会直接影响其连接性能。搭接长度不足或灌浆不饱满，会降低节点的承载能力和变形能力。

1.2 干式连接节点

干式连接节点主要通过机械连接或焊接等方式实现预制构件的连接，常见的有螺栓连接和焊接连接。螺栓连接具有安装快捷、可拆卸等优点，将高强螺栓将预制构件连接在一起，让构件间的连接更可靠，可

便于施工过程中的调整。但螺栓连接节点的受力性能较为复杂，螺栓的预紧力、布置方式等因素会影响节点的抗震性能，同时螺栓连接部位在地震作用下可能发生松动或破坏。焊接连接是将预制构件中的钢筋通过焊接方式连接在一起，连接强度较高，但焊工技能、焊接工艺等对焊接质量有较大影响。焊接过程中若出现气孔、夹渣等缺陷，会降低连接部位的强度和韧性，影响节点的抗震性能。

2 影响装配式混凝土结构节点抗震性能的因素

2.1 连接方式的影响

连接方式不同，会直接影响节点的抗震性能，并存在差异性。湿式连接点在静力荷载作用下，常表现出很好的承载力，不过在地震反复荷载作用下，灌浆料与钢筋、套筒间的粘结性能会逐渐退化，节点刚度和承载力会下降。干式连接节点中，螺栓连接节点的抗震性能主要依赖于螺栓的布置和预紧力，相关人员合理布置螺栓，可提升节点抗剪性能和抗弯能力，不过螺栓若发生松动，会大幅降低节点抗震性能。焊接质量好时，焊接连接点则有很高的承载能力，若焊接存在缺陷，则会导致节点在地震作用下出现脆性破坏现象。

2.2 材料特性的影响

装配式混凝土结构节点所用材料的性能直接影响其抗震性能。混凝土强度和延性会影响节点的受力性能。高强度的混凝土有很高的抗压强度，不过其延性相对差些，在发生地震时，其容易出现脆性破坏。使用高延性混凝土，可大幅提升节点变形能力和耗能能力。钢筋强度和塑性会影响节点受力性能。高强度钢

筋显著提升节点承载力, 不过钢筋强度高可能会让节点在地震发生时出现脆性破坏, 因此, 施工中相关人员要合理选择钢筋强度等级和塑性指标。同时, 灌浆性能也会直接影响湿式连接节点抗震性能。高强度灌浆料要有较高的流动性和早期强度, 以确保灌浆的密实性和连接强度。灌浆料收缩性能也会对连接部位的应力状态造成影响。收缩过大则会让连接部位出现裂缝, 让节点抗震性能降低。

2.3 构造措施的影响

节点构造措施会提升其抗震性能。合理配置箍筋可增强节点核心区混凝土约束, 可提升混凝土的抗压强度和变形能力, 增强节点抗剪能力。在节点核心区设置横向钢筋网片或型钢, 可限制混凝土裂缝发展, 以提升节点延性和耗能能力。节点尺寸和形状会影响抗震性能。较大节点尺寸可提供更多的混凝土受压面积, 以提升节点承载能力。合理配置节点形状, 也可提升节点应力分布, 防止出现应力集中现象, 大幅提升节点抗震性能。

3 装配式混凝土结构节点抗震性能优化设计策略

3.1 连接形式改进

对于套筒灌浆连接节点, 可优化设计套筒, 以显著提升抗震性能。采用带肋套筒, 其表面肋状结构能增加与灌浆料、钢筋的接触面积, 增大摩擦力。钢筋受力时, 带肋套筒可更好地传递力, 减少相对滑动, 提高连接强度。对套筒进行喷砂、镀锌等表面处理, 能增强表面粗糙度, 提升与灌浆料的粘结力。改进灌浆工艺方面, 真空辅助灌浆技术有着明显优势, 灌浆前抽真空排除套筒内空气, 让灌浆料在负压下更充分填充套筒, 避免灌浆不密实。对于浆锚搭接连接节点, 增加搭接长度可延长钢筋传力路径, 使应力分布均匀, 提高连接可靠性。采用高性能灌浆料, 其流动性和早期强度更高, 能更好填充预留孔道, 与钢筋、混凝土形成紧密整体。研究新型浆锚搭接方式, 如螺旋筋浆锚搭接, 在预留孔道内设螺旋筋, 钢筋受力时, 螺旋筋可约束周围混凝土, 增强钢筋与混凝土粘结性能, 提高节点承载和变形能力, 使其更好吸收消耗能量。在干式连接节点方面, 优化螺栓连接设计很关键。采用高强螺栓, 其屈服和抗拉强度更高, 能承受更大荷载。合理确定螺栓预紧力, 过大可能损坏螺栓或连接件, 过小无法保证连接紧密。相关设计人员利用有限元分析确定螺栓最佳间距和排列方式, 提高节点抗剪抗弯能力。技术人员可开发自锁式螺栓连接等新型形式, 其自锁结构可在螺栓承受振动或反复荷载时自动

锁紧, 防止出现松动可能, 让节点连接更具可靠性。

3.2 配筋优化

为了提升节点的抗震性能, 相关设计人员合理配置节点箍筋和纵向钢筋。依据节点的受力特点和抗震要求, 精确确定箍筋的直径、间距和配箍率。箍筋直径过小, 无法有效约束混凝土, 直径过大则可能造成施工困难和成本增加。合适的箍筋间距能保证在节点核心区形成均匀的约束力场, 提高混凝土的抗压强度和变形能力。在节点核心区采用加密箍筋, 当节点承受地震作用产生的剪力时, 加密箍筋能紧密包裹混凝土, 限制混凝土裂缝的发展, 增强节点的抗剪能力, 防止节点发生剪切破坏。优化纵向钢筋的布置同样关键, 要保证钢筋在节点核心区的有效锚固。合理设置钢筋的锚固长度和弯钩形式, 使钢筋在地震作用下能与混凝土协同工作, 避免钢筋发生滑移或拔出。若钢筋锚固不足, 在地震反复荷载作用下, 钢筋与混凝土之间的粘结力会逐渐丧失, 导致节点承载能力下降。采用高延性钢筋, 如抗震钢筋, 其具有优异的塑性变形能力。在地震作用下, 高延性钢筋会发生较大的塑性变形, 以自身的变形消耗大量的地震能量, 减轻结构的震动反应。当结构受到强烈地震作用时, 高延性钢筋能先于混凝土发生塑性变形, 保护混凝土不受过度破坏, 提高节点的变形能力和耗能能力, 使结构在地震后仍能保持一定的承载能力和使用功能。相关技术人员可探索研究新型的钢筋连接方式, 如机械连接, 与传统的绑扎连接或焊接连接相比, 机械连接有多种优点, 如连接强度高、质量稳定、施工方便等。它能确保钢筋间的传力连续性, 让钢筋连接可靠性和抗震性能全面提升, 使节点在地震作用下能有效传递内力, 确保结构安全。

3.3 新型耗能机制引入

装配式混凝土结构节点可运用新型耗能装置, 可让节点抗震性能增强, 提升结构的安全性。技术人员常在节点的核心区设置金属阻尼器或摩擦阻尼器。金属阻尼器材料多使用低屈服点钢材。当发生地震时, 当威胁到结构时, 金属阻尼器则会迅速进入塑性变形阶段。基于反复的地震荷载作用, 金属阻尼器可持续性发生塑性变形, 将大量地震能量消耗掉, 迅速分散和吸收将作用于结构或其他关键部件的能量, 让这些关键部位在地震作用下的损伤程度降到最低, 确保整体结构的安全性。引入摩擦阻尼器, 则是让两个接触点间的相对滑动产生的摩擦力, 将能量显著消耗。当地震发生时, 结构则会产生强烈振动, 摩擦阻尼器的接触面也会发生摩擦, 将地震输入的能量迅速转化为

热量,并迅速消失。相关人员引入形状记忆合金(SMA)耗能装置,则可充分利用其独特的超弹性特性来发挥其应用优势。SMA可在经历较大变形后迅速恢复原状,将SMA丝或棒应用于节点中,当地震作用使结构产生变形时,SMA会发生相变,在此过程中产生恢复力。这种恢复力可快速消耗掉地震能量,还可迅速降低结构的残余变形,使结构在地震后能更快地恢复到接近原始的状态,大大提高结构的可恢复性和使用功能,可确保结构在地震后的继续使用能力。

3.4 节点与整体结构协同设计

相关人员在优化设计节点抗震性能时,可将节点与整体结构的协同性进行综合考量。节点设计要将结构的抗震设防目标及所使用的结构体系密切关联。如设计框架结构时,节点是框架结构的核心连接部位,其强度和刚度要足够。若节点强度不变,发生地震时,有可能在构件受损前就会遭到破坏,让整个结构失去稳定性。节点变形能力也要与结构变形需求高度适配。当地震发生时,结构会产生变形,节点也会随之发生变形,这样可让结构迅速形成高效的耗能机制,将地震能量进行合理变形,以分散和消耗地震能量。相关人员可深入分析整体结构,引入先进计算软件和理论方法等,对不同地震作用下各节点的受力状态能精准确定,如所承受的剪力、弯矩等。相关人员可依照这些受力状态信息,可为节点优化设计提供科学而精准的依据。引入性能化设计方法,可依托结构在不同地震强度下的差异性能目标,如小震不坏、中震可修、大震不倒等,可针对性优化设计各节点。这样可让各节点在不同地震作用下皆可发挥出最大性能,让整体结构在地震作用下的安全性、可靠性得以全面提升,确保人员生命安全及财产安全。

4 数值模拟与模型试验验证

4.1 数值模拟

采用有限元软件对装配式混凝土结构节点进行数值模

拟,分析节点在不同地震作用下的受力性能和变形特征。建立合理的有限元模型,考虑材料的非线性、接触非线性等因素。对于混凝土材料,采用合适的本构模型,如混凝土损伤塑性模型,准确模拟混凝土的受力行为和破坏过程。对于钢筋和灌浆料,采用弹性-塑性结构模型,考虑其强度和变形特性。通过数值模拟,可以直观地展示节点的应力分布、裂缝发展等情况,为优化设计提供理论依据。同时,对不同优化设计策略进行数值模拟分析,比较其效果,选择最优的优化方案。

4.2 模型试验验证

制作装配式混凝土结构节点试件,进行低周反复荷载试验,验证数值模拟结果的准确性。在试验过程中,测量节点的荷载-位移曲线、钢筋应变、混凝土应变等参数,分析节点的承载能力、变形能力、耗能能力等抗震性能指标。将模型试验结果与数值模拟结果进行对比,检验数值模拟的可靠性和优化设计策略的有效性。相关部门开展模型试验,及时发现数值模拟中可能存在的问题,可进一步完善数值模型和优化设计方法。

5 结语

总而言之,装配式混凝土结构节点抗震性能优化设计是保障装配式建筑安全的关键。文章分析了不同连接方式,明确其优缺点及对抗震性能的影响,探讨了连接方式、材料特性、构造措施等影响节点抗震性能的因素,提出了改进连接形式、优化配筋、引入新型耗能机制和节点与整体结构协同设计等优化策略。数值模拟和模型试验验证显示,优化后的节点在承载、变形、耗能等方面表现出色,能提高装配式混凝土结构在地震中的安全性与可靠性,可整体提升装配式建筑的抗震水平。

参考文献:

- [1] 王珂.装配式混凝土框架结构梁柱节点的抗震性能研究[J].混凝土世界,2023,(06):81-84.
- [2] 郝进锋.一种新型装配式混凝土结构梁柱节点及其抗震性能分析[J].河南科学,2023,41(04):541-546.
- [3] 王巍.一种装配式混凝土结构外挂墙板连接节点抗震性能分析[J].中华建设,2023,(04):149-151.
- [4] 刘海霞,谷伟,阮雪琴,等.装配式混凝土结构节点抗震性能研究综述[J].四川水泥,2020,(08):43-45.
- [5] 刘立达.新型装配式混凝土框架结构节点抗震性能研究[J].成组技术与生产现代化,2020,37(01):17-24.