

装配式混凝土框架结构连接节点抗震性能研究

赵俊臣 王义茗 李启隆

山西国际电力集团房地产开发有限公司 山西 太原 030000

摘要: 装配式混凝土框架结构连接节点在地震作用下的力学响应直接关系到整体结构安全性。本文围绕干式、湿式及混合式三类连接节点展开,剖析不同构造形式的传力路径与耗能特征,探讨节点构造参数、连接件材质规格、混凝土材料特性及约束条件对抗震性能的影响规律。同时,梳理低周往复荷载下节点损伤的演化过程,揭示核心区开裂变形、连接件疲劳失效以及刚度退化与残余变形的内在机理,为装配式框架节点的抗震设计提供理论支撑。

关键词: 装配式混凝土框架; 连接节点; 抗震性能; 损伤机理; 耗能机制

引言: 装配式混凝土框架结构在抗震设防区域的推广应用对连接节点性能提出了更高要求。节点作为构件间内力传递的枢纽,其受力状态与变形能力决定着框架结构在地震荷载下的整体工作表现。与现浇节点相比,装配式节点因拼接界面的存在,在传力连续性与耗能方式上呈现出明显差异。深入理解不同连接形式的力学特征及损伤演化规律,有助于在设计阶段合理选择节点类型与构造方案,提升装配式框架结构抵御地震作用的能力。

1 装配式混凝土框架连接节点基础理论

1.1 装配式混凝土框架节点基本构造形式

装配式混凝土框架节点依托预制构件拼接成型,整体构造依托工厂预制梁柱构件与现场连接结构组合而成。构件生产阶段完成梁柱主体结构的标准化浇筑成型,现场施工阶段通过专属连接结构完成构件对接固定^[1]。节点构造体系主要分为构件本体与连接构造两大组成部分,不同构造组合方式决定节点的整体结构属性。各类装配式节点依托构件拼接方式的区别形成差异化构造体系,梁柱端部的对接结构、锚固结构以及拼接结构共同构成节点的主体框架。构造布局的差异化设计会改变节点的结构组成方式,直接影响结构整体的受力承载条件与变形适配能力。构件拼接位置的结构设计,以及连接部位的结构配置,均会改变装配式节点的整体构造形态与结构属性。

1.2 装配式节点与现浇节点受力机理差异

整体现浇混凝土框架节点为一体化浇筑成型的整体结构,混凝土基体与内部钢筋形成连续完整的受力体系,结构内部应力可以实现均匀连续传递。装配式节点由多个独立预制构件拼接组成,构件之间存在结构拼接

界面,整体受力体系具备不连续的结构特征。现浇节点的结构整体性可以保障受力传递的完整性,结构内部应力分布更为均匀稳定。装配式节点的拼接界面会改变应力传递的路径,结构受力会在拼接位置产生应力集中现象。两种节点的结构成型方式不同,受力承载的主体结构与传递载体存在本质区别。结构整体性的差异使得两类节点在荷载作用下的内力分布、形变发展状态均呈现不同的变化规律。

1.3 结构抗震基本理论与节点耗能机制

建筑结构抗震设计依托结构动力学与结构弹塑性力学相关理论,依托结构自身的刚度与变形能力抵御地震作用带来的结构荷载。结构在地震荷载作用下会产生往复形变,结构内部通过材料形变与结构形变消耗外部输入的地震能量。框架结构节点作为结构受力的关键部位,耗能能力直接关联整体结构的抗震承载水平。装配式节点的耗能过程依托混凝土形变、钢筋形变以及连接部位的结构形变共同实现。结构在弹塑性形变阶段会持续耗散地震能量,延缓结构损伤的扩散发展。节点部位的结构刚度与形变适配能力,直接决定结构耗能的整体水平与形变发展状态。

1.4 装配式节点传力路径与受力特性原理

装配式框架结构的荷载传递依托梁柱节点完成整体结构的内力传导,竖向荷载与水平荷载均通过节点部位实现构件间的相互传递。预制构件承担的各类荷载会通过端部连接结构传导至相邻构件,形成完整的结构传力体系。节点核心区作为传力的核心载体,承接各类内力的转换与传导工作。拼接界面的结构特性会改变内力传导的效率与分布状态,让装配式节点传力具备分段式的结构特征。节点内部钢筋与混凝土的协同作用方式,决

定结构受力的承载上限与变形特征,也会影响整体结构的受力稳定性。

2 装配式混凝土框架连接节点类型及抗震特性分析

2.1 干式连接节点构造及抗震受力特征

干式连接节点依靠预埋金属配件与机械紧固工艺完成预制梁柱构件的拼装作业,施工流程不涉及现场浇筑与灌浆工序。预制构件在工厂加工阶段完成连接件预埋定位,构件尺寸与连接精度可通过标准化工艺精准把控。拼装成型的结构界面保持清晰分离状态,构件之间依靠机械咬合与摩擦作用传递各类荷载。地震荷载作用过程中,节点刚度主要由金属连接构件承担,预制混凝土主体结构受力状态相对平稳^[2]。外部荷载引发的结构变形集中于连接构件区域,混凝土结构产生的塑性变形范围极小。结构刚度会随荷载往复作用逐步衰减,整体变形以界面滑移与微小转动为主要表现形式,结构损伤发展速度较为缓慢。

2.2 湿式连接节点构造及抗震受力特征

湿式连接节点通过现场灌浆或后浇混凝土填充构件拼接缝隙,让分散的预制构件形成完整的整体受力结构。预制构件端部预留外露钢筋,现场施工对钢筋进行搭接对接处理后浇筑填充材料。固化后的填充介质可以填补构件拼接缝隙,实现节点截面力学性能的连续统一。地震往复荷载作用下,节点区域刚度分布均匀且连续,内力传导路径贴合整体现浇结构的力学规律。塑性变形主要产生于节点核心区混凝土介质,结构塑性发展区间更为充分。地震能量消耗依靠混凝土开裂延展与钢筋塑性变形共同完成,结构整体具备优异的整体性与荷载传递能力。

2.3 混合式连接节点构造及抗震受力特征

混合式连接节点融合机械连接与现浇填充的结构优势,构建复合型装配式节点构造体系。关键受力点位布设金属连接构件保障结构拼装精度与初始整体刚度,构件拼接缝隙填充固化材料强化结构整体性与稳定性。双重结构体系可以兼顾施工便捷性与结构力学性能,弥补单一连接形式的性能短板。地震荷载作用阶段,金属连接构件承担前期主要荷载,维持结构初始刚度稳定。填充固化介质成型后参与后期受力工作,持续承接外部荷载作用。结构变形呈现阶段性发展特点,损伤点位均匀分布于连接构件与填充结构内部,不会出现局部集中破坏的现象。

2.4 不同连接形式节点抗震适配性分析

各类装配式连接节点的构造形式差异,会造就截然

不同的结构刚度、变形能力与耗能特性。干式连接节点结构刚度数值偏低,变形储备空间充足,适配注重施工效率与构件更换灵活性的建筑结构场景。湿式连接节点成型后结构整体性更强,刚度水平更高,能够适配高烈度抗震设防区域的结构建设需求。混合式连接节点可通过调整构件配比与构造布局适配多样化受力工况,性能调节空间更为宽泛。不同连接体系的力学性能特点对应差异化的结构抗震设计需求,可依据建筑结构受力条件与设防标准完成选型适配。

3 装配式框架节点抗震性能影响因素

3.1 节点构造参数对抗震性能的影响

节点构造参数涵盖构件截面尺寸、搭接长度以及核心区构造布局等关键内容,各项参数的变动会直接改变节点力学响应状态。合理的参数设置可以优化节点内部应力分布,提升结构抵抗往复荷载的基础能力^[3]。参数数值的不合理调整会造成结构刚度分布失衡,加剧局部应力集中现象。构造参数的差异化配置能够改变节点塑性变形的发展范围,调控结构刚度衰减速率,直接干预抗震工作全过程。

3.2 连接件材质与规格对抗震性能的影响

连接件作为装配式节点传力的核心载体,材质属性与规格尺寸决定连接体系的承载能力。不同材质具备差异化的强度与塑性指标,直接改变荷载传递的稳定程度。规格尺寸的变动会调整连接件的受力截面,改变结构整体的刚度储备。材质强度不足会造成连接部位过早出现形变损伤,规格配比失衡会让节点受力体系失去平衡,降低结构抵御地震荷载的基础条件。

3.3 混凝土材料特性对节点抗震性能的影响

混凝土材料的强度、韧性与抗裂性能直接作用于节点核心区的抗震工作状态。强度等级的提升可以强化节点承压与抗剪能力,减少结构刚性损伤的出现。材料韧性的优化可以提升结构塑性变形能力,拓展地震能量消耗的区间范围。抗裂性能的提升能够延缓混凝土裂隙的萌生与延展,维持节点结构的完整性,保障内力传递的持续稳定。

3.4 节点约束条件对抗震性能的影响

节点约束条件包含构件端部约束、周边结构限位等力学限制状态,约束强度的变化会重塑节点受力与变形规律。约束作用充足时,节点核心区形变可以得到有效控制,结构整体刚度保持稳定状态。约束作用弱化会放大节点转动与滑移形变,加快结构损伤的扩散速度。合理的约束布局可以均衡节点受力状态,提升结构在往复

地震荷载下的工作稳定性,优化整体抗震表现。

4 装配式混凝土框架节点抗震损伤机理研究

4.1 低周往复荷载下节点损伤演化规律

地震作用带来的低周往复荷载会对装配式混凝土框架节点产生循环性的力学作用,持续改变结构内部的力学状态与材料性能。荷载初次作用阶段,节点整体维持弹性工作状态,结构内部仅产生肉眼无法观测的微细孔隙拓展与微观裂隙,结构承载性能不会出现明显波动。随着荷载循环次数不断累加,微观裂隙持续发育并相互贯通,形成连续的损伤通道,结构内部损伤实现持续性累积^[4]。荷载幅值的不断提升会加快裂隙拓展速率,让隐蔽的微观损伤转化为可视的宏观裂缝,分布于节点核心区与构件拼接界面位置。结构有效承载截面持续缩减,材料力学性能逐步弱化,结构整体工作性能随荷载循环进程稳步下降,形成循序渐进且不可逆的损伤发展过程。

4.2 节点核心区开裂与变形发展机制

节点核心区是框架结构内力传递的核心区域,往复荷载交替产生的剪切应力与正应力会持续作用于混凝土基体材料。反复交替的应力作用会破坏混凝土内部骨料与砂浆的粘结状态,结构表层与内部区域逐步滋生细微裂缝。裂缝会沿着主应力传导方向持续延伸拓展,裂缝分布形态随荷载作用方向的切换发生改变,形成无序交错的裂缝分布形态。核心区混凝土的弹性形变会逐步转化为塑性形变,形变累积量随荷载循环进程持续增加。结构形变逐步脱离弹性恢复范畴,永久性塑性变形不断留存,核心区结构完整性持续受损,整体承载与传力性能出现持续性弱化。

4.3 连接件疲劳损伤与失效机理

装配式节点的连接件长期承受交变荷载的反复作用,金属材料内部会产生持续性的疲劳损耗。交变应力反复作用会让材料内部晶体结构发生滑移错位,催生初始微观缺陷,缺陷会在持续受力过程中不断发育扩张。微观缺陷逐步连通汇聚后会形成结构性损伤,直接缩减连接件有效受力截面面积。连接件抗形变能力与承载性能持续下降,结构受力稳定性逐步降低。当疲劳损

伤累积达到材料承受极限后,连接件无法继续承担设计荷载,受力功能彻底丧失。连接件工作状态的失效会打断节点完整传力体系,造成装配式节点局部结构丧失承载能力。

4.4 节点残余变形与刚度退化机制

往复地震荷载作用过后,装配式节点结构内部会留存大量无法自主恢复的塑性变形,这类永久性变形会长期留存于节点结构之中。塑性变形的持续堆积会改变节点原始几何形态与受力状态,打乱结构固有的内力传递路径。结构内部各类损伤的持续积累会不断削弱构件整体力学性能,引发节点刚度出现持续性退化现象。荷载循环次数与荷载幅值会直接影响刚度退化速率,损伤积累程度越深,节点刚度衰减幅度越大。刚度指标的持续下降会降低结构抵抗形变与外部荷载的基础能力,让节点在后续受力过程中产生更大幅度的形变,持续改变节点全程抗震工作状态。

结束语

装配式混凝土框架节点的抗震性能受构造形式、材料属性、连接件配置与约束条件等多重因素交织影响,干式、湿式与混合式连接在刚度水平、变形能力与耗能特征上各有侧重。低周往复荷载驱动下,节点损伤沿微裂隙萌生、宏观裂缝贯通、连接件疲劳失效的路径逐级推进,残余变形与刚度退化构成结构性能衰减的核心表征。深化节点损伤机理的理论认知,有助于在构造选型与参数优化层面提升装配式框架的抗震安全水平。

参考文献

- [1] 张正极,苗娜.装配式混凝土框架梁柱节点结构设计及连接性能数值模拟分析[J].江西建材,2025(11):100-103.
- [2] 徐其功,陈文东,李娜.装配式混凝土框架结构梁柱节点抗震性能试验研究[J].建筑结构,2022,52(8):53-59.
- [3] 季永康,李子辉,吴逸,等.装配式混凝土框架混合连接节点抗震试验分析[J].安徽建筑,2026,33(4):40-43.
- [4] 高静贤,柴彦凯,李伟龙,等.装配式预应力混凝土框架足尺节点抗震性能试验研究[J].建筑结构,2026,56(2):166-173.