

# 装配式混凝土框架结构中抗震支座的选型适配性与受力协同机制研究

班少鹏<sup>1</sup> 韩永<sup>2</sup> 胡子征<sup>3</sup> 赵欢<sup>4</sup> 张友华<sup>5</sup>

1 中国建筑第五工程局有限公司

2 天津泰达融晟城市更新建设发展有限公司

3 中国建筑第五工程局有限公司

4 中国建筑第五工程局有限公司

5 中国建筑第五工程局有限公司

DOI:10.12238/etd.v6i6.16820

**[摘要]** 在建筑工业化与抗震安全双重需求下,装配式混凝土框架结构因施工高效性广泛应用,但地震作用下节点应力集中问题突出,抗震支座作为核心传力与耗能构件,其选型适配性与受力协同性直接影响结构安全。本文系统梳理装配式混凝土框架结构特性与抗震支座工作原理,从结构参数、抗震设防、使用环境三方面分析支座需求,构建选型适配性指标体系,明确不同支座适配场景与量化方法,深入研究水平地震、竖向荷载下的受力协同机制及节点连接的影响,并通过数值模拟验证协同效果。

**[关键词]** 装配式混凝土框架结构; 抗震支座; 选型适配性

中图分类号: TU352.11 文献标识码: A

## Study on Selection Adaptability and Force Coordination Mechanism of Seismic Bearings in Prefabricated Concrete Frame Structures

Shaopeng Ban<sup>1</sup> Yong Han<sup>2</sup> Zizheng Hu<sup>3</sup> Huan Zhao<sup>4</sup> Youhua Zhang<sup>5</sup>

1 China Construction Fifth Engineering Division Corp., Ltd.

2 Tianjin TEDA Rongsheng Urban Renewal Construction and Development Co., Ltd.

3 China Construction Fifth Engineering Division Corp., Ltd.

4 China Construction Fifth Engineering Division Corp., Ltd.

5 China Construction Fifth Engineering Division Corp., Ltd.

**[Abstract]** Driven by the dual demands of construction industrialization and seismic safety, prefabricated concrete frame structures are widely applied due to their high construction efficiency. However, the problem of stress concentration at joints under seismic action is prominent. As core force-transferring and energy-dissipating components, the selection adaptability and force coordination of seismic bearings directly affect structural safety. This paper systematically reviews the characteristics of prefabricated concrete frame structures and the working principles of seismic bearings, analyzes bearing requirements from three aspects: structural parameters, seismic fortification, and service environment, and constructs an index system for selection adaptability. It clarifies the adaptation scenarios and quantitative methods for different bearings, deeply studies the force coordination mechanism under horizontal earthquakes and vertical loads, as well as the influence of joint connections, and verifies the coordination effect through numerical simulation.

**[Key words]** Prefabricated Concrete Frame Structure; Seismic Bearing; Selection Adaptability

### 引言

装配式混凝土框架结构凭借工业化生产、施工周期短等优势,

在建筑工程中广泛应用。然而,其节点刚度分布不均、连接可靠性依赖度高的特性,使得抗震性能面临挑战。抗震支座作为

关键抗震构件,其选型适配性与支座和结构的受力协同机制,直接影响结构在地震中的安全性。当前,针对装配式结构中抗震支座的研究尚不系统,尤其在选型适配性量化及受力协同机制方面存在不足。因此,深入开展相关研究具有重要的理论意义和工程应用价值。

## 1 装配式混凝土框架结构与抗震支座基础理论

### 1.1 装配式混凝土框架结构特性

装配式混凝土框架结构通过预制梁、柱及叠合楼板现场拼装成型,采用灌浆套筒或螺栓连接,具有工业化程度高、施工周期短的优势。其核心特性包括:构件模块化生产,质量可控,但现场装配精度要求高( $\pm 5\text{mm}$ 偏差可能影响受力);节点刚度分布不均,灌浆套筒连接接近现浇节点刚度,螺栓连接刚度略低,易导致地震内力集中;抗震性能依赖连接可靠性,节点延性与耗能能力决定整体抗震冗余度,连接失效可能引发倒塌。此外,温度变化与振动荷载会导致长期微变形,需评估其对结构稳定性的影响。

### 1.2 抗震支座类型与工作原理

主流抗震支座分为三类:橡胶隔震支座(天然橡胶与铅芯橡胶支座)通过橡胶层变形实现水平隔震,铅芯屈服可吸收能量并提升复位能力,适用于中高烈度区;摩擦阻尼支座(如摩擦摆支座)利用滑动面摩擦耗能,通过摆锤原理复位,水平位移能力强,适合大跨度结构;黏弹性阻尼支座基于材料内摩擦耗能,刚度随频率变化,适用于复杂地震动区域。三类支座均通过“隔震+耗能”降低地震对结构的冲击,提升整体安全性<sup>[1]</sup>。

### 1.3 支座-结构相互作用机制

支座与结构的相互作用是协同抗震的核心。静力状态下,支座通过竖向刚度均匀传递荷载,避免局部应力集中;水平方向(如风荷载)与结构侧向刚度协同,控制层间位移。地震作用下,支座通过变形分流地震剪力,减少框架柱受力,并通过阻尼或摩擦耗能降低响应峰值;地震后,利用复位能力(如摆锤或弹性复位)带动结构恢复。若支座变形能力不足或刚度不匹配,会破坏协同平衡,导致失效或结构损伤。

## 2 装配式混凝土框架结构对抗震支座的需求分析

### 2.1 结构参数对支座的需求

装配式混凝土框架结构参数直接决定抗震支座的性能需求。结构刚度方面,预制梁、柱线刚度与节点连接刚度共同构成结构侧向刚度,支座水平刚度需与结构侧向刚度适配,若结构侧向刚度大(如低层装配式框架),需选择水平刚度适中的支座(如铅芯橡胶支座),避免支座刚度不足导致结构位移过大;若结构侧向刚度小(如高层装配式框架),则需支座提供足够水平刚度,防止结构振动加剧。荷载参数方面,结构自重与竖向活荷载决定支座竖向承载能力,支座极限承载力需为结构最大计算荷载的1.5倍以上,确保竖向安全;地震作用下的水平剪力需求,要求支座水平抗剪承载力匹配,避免支座剪切破坏。变形参数方面,结构层间位移限值(如规范规定的 $1/550$ )决定支座水平位移能力,支座允许水平位移需为结构层间最大位移的1.2倍以上,适应地

震位移需求。

### 2.2 抗震设防条件对支座的需求

抗震设防条件是抗震支座选型的关键依据,需结合设防烈度、设计地震分组与场地类别综合确定。设防烈度方面,6-7度低烈度区域,可选用天然橡胶隔震支座,通过隔震作用降低地震影响;8-9度高烈度区域,需选用耗能能力更强的支座,如铅芯橡胶支座或摩擦摆支座,铅芯橡胶支座可通过铅芯屈服吸收大量能量,摩擦摆支座则凭借稳定摩擦耗散地震力,避免结构在强震下受损。设计地震分组影响地震动持续时间与频谱特性,第一组地震动频率较高,需支座具备良好的高频响应能力(如黏弹性阻尼支座);第三组地震动持续时间长,需支座具备持久耗能能力(如摩擦阻尼支座)。场地类别方面,软土地基(如IV类场地)地震动放大效应明显,需支座提升水平隔震效果,减少地震能量传递至结构;坚硬场地(如I类场地)地震动频率高,需支座优化刚度,避免共振现象<sup>[2]</sup>。

### 2.3 使用环境对支座的需求

使用环境通过影响支座耐久性与性能稳定性,决定支座选型需求。温度环境方面,寒冷地区(最低温度 $\leq -20^{\circ}\text{C}$ )需选用耐低温支座,如添加抗冻剂的橡胶隔震支座,防止橡胶低温脆化导致刚度骤增;高温地区(最高温度 $\geq 40^{\circ}\text{C}$ )需支座具备耐热性,避免橡胶老化加速或黏弹性材料性能衰减,可选用摩擦摆支座等受温度影响小的类型。湿度与腐蚀环境方面,沿海或高湿度区域易出现钢筋锈蚀与支座材料腐蚀,需支座采用防腐处理,如在橡胶支座外包裹防腐层,或选用不锈钢材质的摩擦摆支座,确保支座耐久性;工业环境中若存在化学污染物,需支座材料具备抗化学腐蚀能力,避免材料性能劣化。此外,长期振动环境(如临近交通干线)需支座具备抗疲劳性能,减少反复振动导致的支座刚度退化,延长使用寿命。

## 3 抗震支座选型适配性研究

### 3.1 选型适配性指标体系构建

抗震支座选型需构建力学性能、结构适配、服役适配三大维度指标体系。力学性能包括刚度适配系数(支座水平刚度与结构侧向刚度比,建议 $0.1-0.3$ )、承载适配系数(支座极限承载力与结构最大荷载比,需 $\geq 1.5$ )、耗能适配率(支座预期耗能量与结构总耗能需求比,建议 $\geq 40\%$ )及位移适配量(支座允许位移与结构层间最大位移比,需 $\geq 1.2$ ),以平衡隔震与抗侧移需求。结构适配涵盖装配精度适配度(支座安装公差 $\geq$ 构件偏差 $1.5$ 倍)和连接可靠性(节点抗剪、抗拉承载力满足设计)。服役适配要求耐久性适配年限(支座设计寿命 $\geq 50$ 年)和环境适应性(性能衰减率 $\leq 10\%/10$ 年),确保长期稳定性和环境适应性。

### 3.2 不同类型抗震支座的适配场景

天然橡胶支座适用于6-7度低烈度区、3-6层低层装配式框架,成本低但耗能能力有限,不适用于高烈度或大位移结构。铅芯橡胶支座适配8-9度高烈度区、7-12层中高层结构,铅芯耗能与高刚度特性可应对强震,但需关注低温环境下的橡胶性能。摩擦摆支座适合大跨度(如体育馆)或高柔度结构,水平位移能力

超500mm,耐环境腐蚀,但成本较高。黏弹性阻尼支座适用于地震动频率复杂区域或长期振动环境,其频率依赖性可优化抗震效果,但抗疲劳性弱,不适用于高频振动场景<sup>[3]</sup>。

### 3.3 选型适配性量化方法

选型量化采用层次分析法确定权重:力学性能(0.5)、结构适配(0.3)、服役适配(0.2)。力学性能中,刚度、承载适配系数各占0.15,耗能适配率0.1,位移适配量0.1;结构适配中,装配精度与连接可靠性各占0.15;服役适配中,耐久性与环境适应性各占0.1。评分标准:定量指标线性评分(如刚度适配系数0.1~0.3得100分,偏离0.05扣20分);定性指标分级评分(优90~100分,差<50分)。综合得分 $\geq 85$ 分为“优”,优先选用;若多“优”则结合成本、施工效率等工程优先级确定最终选型,确保决策科学合理。

## 4 抗震支座与装配式混凝土框架结构的受力协同机制

### 4.1 水平地震作用下的受力协同过程

水平地震作用下,抗震支座与装配式混凝土框架结构的受力协同过程分为三个阶段。第一阶段为地震初期(多遇地震),地震波传递至结构,支座首先通过水平弹性变形分流20%~30%的水平地震剪力,减少预制梁、柱的剪力负担;此时支座以弹性变形为主,结构层间位移较小,二者变形同步,维持协同平衡。第二阶段为地震峰值期(罕遇地震),地震剪力增大,支座进入耗能阶段:橡胶隔震支座通过橡胶层剪切变形耗能,铅芯橡胶支座铅芯屈服吸收能量,摩擦摆支座通过滑动面摩擦耗散能量;支座耗能占比达40%以上,降低结构地震响应峰值,同时预制梁、柱通过节点延性辅助耗能,避免主体结构开裂。第三阶段为地震衰减期,地震剪力减小,支座凭借复位能力(如橡胶弹性复位、摩擦摆摆锤复位)带动结构恢复初始位置,此时支座与结构变形逐渐收敛,协同完成抗震过程。整个过程中,支座需与结构层间位移保持同步,若支座刚度不足或耗能能力不够,会导致协同失衡,引发节点损伤。

### 4.2 竖向荷载下的受力协同机制

竖向荷载(自重、活荷载)下,抗震支座与装配式混凝土框架结构的受力协同机制核心是荷载均匀传递与刚度匹配。首先,支座承担结构70%~80%的竖向荷载,通过自身竖向刚度与预制梁、柱竖向刚度协同,将荷载传递至基础:若支座竖向刚度过大,会导致荷载集中于支座,预制梁端应力增大;若刚度过小,支座压缩变形过大,会引起结构不均匀沉降。其次,协同机制体现在变形协调上,支座竖向变形需与预制梁、柱的竖向变形匹配,通常要求支座竖向变形 $\leq$ 梁端竖向变形1.2倍,避免因变形差异导致节点连接松动<sup>[4]</sup>。另外,在竖向荷载长期作用下,支座需保持刚度稳定性,橡胶隔震支座需避免creep变形过大,摩擦摆支座需防止滑动面磨损导致竖向刚度衰减;同时,结构通过预制构件的刚度分布辅助平衡荷载,如叠合楼板通过自身刚度分担部

分竖向荷载,减轻支座负担,确保长期协同稳定。

### 4.3 节点连接对受力协同的影响

装配式混凝土框架结构中,灌浆套筒、螺栓连接等节点连接方式直接影响抗震支座与结构的受力协同。灌浆套筒连接节点刚度接近现浇节点,积极影响有二:一是提升结构整体刚度,与支座水平刚度适配,减少地震下刚度突变,维持协同平衡;二是延性佳,可辅助支座耗能,提升协同抗震能力。但灌浆不饱满会使刚度下降,破坏刚度匹配,致协同失衡。螺栓连接节点刚度略低,需支座提升水平刚度弥补不足,且其可拆卸性便于支座维护,但要确保螺栓紧固力矩达标。此外,节点连接的抗剪、抗拉承载力应与支座性能匹配,避免节点先于支座破坏中断协同,节点设计需遵循“支座先耗能、节点后破坏”原则。

### 4.4 受力协同的数值模拟分析

采用ABAQUS软件建立装配式混凝土框架结构-抗震支座整体有限元模型,模拟分析受力协同效果。模型中,预制梁、柱采用混凝土损伤本构,灌浆套筒连接采用实体单元模拟,抗震支座(以铅芯橡胶支座为例)采用非线性弹簧单元模拟其水平刚度、耗能特性与竖向刚度。模拟工况包括多遇地震(0.15g)与罕遇地震(0.4g),监测指标为支座的内力、变形及耗能分配。结果显示,多遇地震下,支座水平剪力占比25%,结构层间位移0.012m,支座与结构变形同步(相对位移差<5mm);罕遇地震下,支座耗能占比45%,结构节点弯矩降低30%,未出现开裂;对比无支座模型,结构地震响应降低35%以上,验证了受力协同的有效性。此外,模拟不同节点连接刚度的影响:灌浆套筒连接节点(刚度 $1 \times 10^5 \text{ kN/m}$ )下,协同效果最优;螺栓连接节点(刚度 $8 \times 10^4 \text{ kN/m}$ )下,需将支座水平刚度提升10%,才能维持同等协同效果,为节点设计与支座选型提供量化参考。

## 5 结束语

本文围绕装配式混凝土框架结构中抗震支座的选型适配性与受力协同机制展开研究,构建了选型适配性指标体系,明确了不同类型支座的适配场景及量化选型方法,揭示了水平地震作用、竖向荷载下支座与结构的受力协同过程,以及节点连接对协同的影响。通过数值模拟验证了受力协同的有效性,为装配式结构抗震设计提供了理论支撑。未来可进一步结合实际工程,开展长期监测与优化研究,推动装配式结构抗震技术的不断发展。

### [参考文献]

- [1] 翁月霞,周泽林.装配式整体混凝土结构抗震性能研究进展[J].四川建筑,2020,40(05):198-203.
- [2] 张茂刚,史娜.装配式核心钢管混凝土框架结构梁柱节点抗震性能研究[J].中华建设,2025,(06):163-164.
- [3] 张宇,杨进,古金龙,等.不同轴压比装配式型钢再生混凝土框架结构抗震性能研究[J].江西建材,2025,(04):109-112.
- [4] 翁月霞,周泽林.装配式整体混凝土结构抗震性能研究进展[J].四川建筑,2020,40(05):198-203.