

动力荷载下钢筋混凝土框架-核心筒结构抗震性能极限分析

沈高峰

浙江富力诚欣工程顾问有限公司, 浙江 嘉兴 314500

[摘要] 框架-核心筒体系在现代高层建筑中的广泛应用确实是个事实, 但强震作用下非线性响应机制仍然存在许多没有解决的难题。尤其随建筑高度不断增长, 结构动力放大效应与损伤累积过程的空间非均匀性变得越来越明显。导致传统抗震设计方法难以准确捕捉真实极限状态的是这种情况。近年的震害表明现有规范对框架-核心筒协同工作的简化假定可能严重低估关键构件损伤风险。长周期地震动下尤为突出的是此类问题。因此建立考虑非平稳激励特性的精细化分析模型变得很重要。系统揭示结构从弹性阶段至完全失效的性能演化规律成为提升抗震安全性的核心课题。本研究将聚焦动力荷载下该体系的极限性能, 致力填补理论空白, 那些分析工作的事情很必要。

[关键词] 动力荷载; 钢筋混凝土框架; 核心筒结构; 抗震

DOI: 10.33142/ucp.v2i4.17318

中图分类号: TU375

文献标识码: A

Ultimate Analysis of Seismic Performance of Reinforced Concrete Frame Core Tube Structure Under Dynamic Load

SHEN Gaofeng

Zhejiang Fuli Chengxin Engineering Consulting Co., Ltd., Jiaxing, Zhejiang, 314500, China

Abstract: The widespread application of the framework core tube system in modern high-rise buildings is indeed a fact, but there are still many unresolved problems in the nonlinear response mechanism under strong earthquake action. Especially with the continuous increase of building height, the spatial non-uniformity of structural dynamic amplification effect and damage accumulation process becomes increasingly evident. This situation makes it difficult for traditional seismic design methods to accurately capture the true ultimate limit state. The recent seismic damage indicates that the simplified assumptions of the framework core tube collaborative work in existing standards may seriously underestimate the risk of damage to key components. This type of problem is particularly prominent under long-term seismic motion. Therefore, it has become important to establish a refined analysis model that considers non-stationary excitation characteristics. Revealing the performance evolution law of structures from elastic stage to complete failure has become a core issue in improving seismic safety. This study will focus on the ultimate performance of the system under dynamic loads, aiming to fill the theoretical gap, and the analysis work is necessary.

Keywords: dynamic load; reinforced concrete frame; core tube structure; earthquake resistance

高层建筑抗震设计领域长期面临框架-核心筒体系协同工作机制的认知瓶颈。地震动频谱特性、幅值非平稳性与持时效应的复杂耦合显著影响着结构能量输入路径。改变破坏模式的是能量耗散方式的变化。现阶段分析手段存在明显不足的地方: 传统分层壳模型难以表征剪力墙三维滞回特性。纤维模型计算效率制约工程应用的情况很常见。多尺度界面协调机制尚未完善的问题也需要解决。更关键的是楼板平面内变形对剪力传递效率的影响常被忽略。导致协同工作机理认知偏差的是这种忽略。这些缺陷使得构件损伤顺序控制与体系失效进程预测缺乏可靠依据, 亟需发展能统筹精度与效率的评估方法, 咱们做研究的都觉得模型改进很紧迫。

1 动力荷载与结构抗震性能的耦合机制

1.1 地震动三要素对高层结构的作用特征

地震动包含着频谱特性这种要素, 还有幅值非平稳性这种特性以及持时效应这样的因素。这些要素共同改变着

结构体系中的能量输入路径, 也改变着能量的耗散方式, 进而影响着最终的破坏模式。框架-核心筒属于双重抗侧力体系, 高频分量容易引起核心筒剪力墙局部的剪切变形, 长周期分量却更容易激发框架部分的整体弯曲振动。能量分配在频域上的差异造成的结果是, 结构在不同地震激励下会出现完全不同的损伤发展序列。近断层地震动存在速度脉冲效应, 这个效应会增大框架梁柱节点的塑性转角需求, 传统抗震设计往往没有考虑到这种增大的情况, 基于规范设计的结构在实际地震中就会出现非预期的破坏形态, 这个情况让设计人员感到麻烦。

1.2 框架-核心筒体系的动力响应敏感参数

核心筒的高宽比和框架的跨数比影响着结构的耗能能力, 这种影响呈现出非线性的特征。当核心筒高宽比超过 7:1 这个数值的时候, 弯曲变形所占的比重就会明显增加。框架部分对整体刚度的贡献度因此被削弱, 这个削弱的过程是渐进的^[1]。混凝土强度变差的速度和钢筋滑动的

效果混在一起,显著改变着构件层面损伤发展的具体路径。在考虑应变率效应的动力分析中,这种改变表现得更加复杂。框架梁和核心筒连梁的刚度比控制着结构损伤模式,它的最优取值区间受到双重制约。楼板平面内的刚度和竖向荷载比共同形成这种制约,现有的简化设计方法常常没有充分体现这种关系,工程师们需要特别注意这一点。

1.3 非平稳激励下的能量输入与分配规律

非平稳地震动作用下,各楼层的能量输入时程在空间上差异显著。高阶振型参与程度随着激励频率变化而动态调整,这个过程导致了上述差异性。核心筒作为主要抗侧力构件,强震初期承担的地震剪力会超过70%。墙体混凝土开裂和钢筋屈服发生后,框架部分承担的剪力比例逐渐上升到40%-50%的水平^[2]。内力重分布现象直接决定了结构最终的破坏模式,这是公认的事实。楼盖系统的平面内变形显著影响着框架与核心筒之间的剪力传递效率。结构进入非线性阶段后,这种影响变得特别突出。

2 抗震性能极限理论基础

2.1 多水准性能目标的量化准则

基于位移的抗震设计方法将结构性能划分为四个等级:正常使用、暂时使用、生命安全以及防止倒塌这样的等级。这些等级对应的极限状态指标需要考虑层间位移角与构件损伤程度的耦合关系。核心筒剪力墙的受压区混凝土剥落深度和受拉区钢筋断裂应变构成了评估墙体破坏状态的双重控制标准。现有规范中这两项标准的阈值设定可能存在过于保守的问题,这个问题让工程师们感到困扰。框架梁端形成塑性铰后的转动能力应当匹配相邻柱子的抗弯储备。对于防止结构形成软弱层具有决定性意义的是这种匹配关系,但在实际工程中常常被忽视掉,框架梁端的设计需要更加仔细地考虑。

2.2 材料-构件-体系三级极限状态关联性

混凝土受压本构关系的下降段斜率显著地影响着墙肢约束边缘构件的延性发挥程度。通过改变构件层次的损伤累积速率进而作用于整个结构体系的失效进程是这种影响的结果。钢筋在循环荷载下的低周疲劳特性与构件层面塑性铰的转动能力存在着非线性的映射关系。考虑应变硬化效应时这种关系会变得更加复杂,钢筋疲劳这个事情很费时间。体系层面的整体稳定系数应当综合考虑 P-Δ 效应引起的几何非线性和材料损伤导致的刚度退化这两者的协同作用。在超高层结构的抗震性能评估中起着决定性影响的往往是这种协同作用,那些高层建筑的事情需要特别注意。

2.3 动力荷载作用下损伤累积模型

基于 Park-Ang 双参数模型的改进方法能够较好地描述构件在单调加载下的损伤特性。但在处理变幅值循环荷载情况时会高估钢筋混凝土构件的累积耗能能力,这个高估的幅度有时候会很大。核心筒连梁在双向地震作用下的

损伤演化呈现出明显的三维空间效应。传统平面分析模型可能严重低估实际结构的损伤程度是由于这种效应导致的。考虑损伤累积效应的刚度退化矩阵应当反映混凝土裂缝开展引起的瞬时刚度损失,同时也应当反映钢筋屈服导致的长期刚度衰减。对结构在地震持时阶段的动力响应具有重要影响的是这种双重退化机制,咱们得说这个机制很关键。修正的损伤指数公式可用:

$$D_m = \frac{\mu}{\mu_u} + \frac{\beta}{E_y} \int dE \quad (1)$$

其中: μ 为实际延性系数, μ_u 为极限延性系数, β 为经验修正系数,取 0.05~0.15, E_y 为屈服耗能, $\int dE$ 为累积塑性耗能。

3 精细化数值模拟方法

3.1 纤维模型在本构关系中的应用

纤维模型在模拟钢筋混凝土构件非线性行为方面具有显著优势,这种优势源于其核心思想:将构件截面离散为若干纤维单元。每个纤维单元分别采用适当的材料本构关系,从而精确反映截面的弯矩-曲率响应。在框架-核心筒结构的抗震分析中尤为重要得是这种响应。考虑混凝土约束效应时可使用 Mander 模型:

$$f_{cc} = f_{co} \left(-1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94f'_1}{f_{co}} - \frac{2f'_1}{f_{co}}} \right) \quad (2)$$

其中 f_{co} 为无约束混凝土峰值应力, f'_1 为有效侧向约束应力。纤维模型能够考虑混凝土在循环荷载下的受压软化效应和钢筋的包辛格效应。准确预测结构在强震下的延性退化需要这些效应。但由于纤维模型计算成本较高,实际应用中通常在关键受力区域采用精细化纤维划分。次要构件中则采用简化宏观模型,这种权衡策略能够在保证计算精度的同时提高分析效率,咱们做研究时经常这样处理。

3.2 核心筒剪力墙滞回特性建模

核心筒剪力墙是高层建筑的主要抗侧力构件,其滞回特性直接影响整体结构的抗震性能。在双向地震作用下表现得尤为显著的是这种影响。现有的剪力墙模型包括微观有限元模型、多垂直杆元模型和宏观分层壳模型。宏观分层壳模型因其计算效率与精度的平衡而广泛应用于工程实践,这种模型通过将墙体划分为若干层来模拟混凝土开裂、钢筋屈服以及剪切滑移等非线性行为。传统分层壳模型难以准确反映剪力墙在双向地震作用下的耦合效应。混凝土受压损伤累积导致墙体的刚度退化速率显著加快是在高轴压比情况下发生的^[3]。影响结构整体抗震性能的是这种退化。改进的滞回规则应考虑轴向力-弯矩-剪力的三向相互作用,并引入损伤指数来量化墙体在不同受力阶段的累积损伤程度,能够更合理地预测其极限承载能力的是这种改进,那些墙体分析的事情需要更多关注。

3.3 梁柱节点半刚性耦合效应

在框架-核心筒结构中,梁柱节点的力学行为对整体

结构抗震性能具有重要影响。在强震作用下的内力重分布过程中表现得尤为明显的是这种影响。传统的刚接或铰接假设无法准确反映节点区在反复荷载作用下的实际受力特性。核心筒与框架梁连接区域的剪切滑移和弯矩重分布效应会导致实际受力状态与设计假定存在显著差异。半刚性节点模型可以考虑节点区的剪切变形、钢筋黏结滑移以及混凝土局部压碎等因素。更真实地模拟结构在强震作用下的内力传递机制是通过这种方法实现的。对于评估结构整体倒塌性能至关重要是这种模拟。节点区的建模通常采用零长度弹簧单元或精细化实体单元。前者计算效率较高但依赖于经验参数的准确性,后者精度较高但计算量显著增加。工程应用中需要根据分析目的合理选择节点建模方法,这个选择过程很费脑筋。

3.4 多尺度模型验证方法

框架-核心筒结构涉及多种构件和复杂的受力机制,单一尺度数值模型难以兼顾计算精度与效率。在超高层结构抗震分析中表现得尤为突出的是这种局限性。多尺度建模方法在不同区域采用不同精度的模型,例如关键受力部位采用精细化纤维模型,次要构件采用宏观梁壳单元。计算资源的优化分配是通过这种策略实现的。计算效率指标 η 可用公式:

$$\eta = \frac{t_s - t_m}{t_s} \times 100\% \quad (3)$$

其中 t_s 和 t_m 分别为单尺度和多尺度模型的计算时间。当 η 值大于 40% 时表明多尺度建模策略具有显著优势,这个指标很有用。

模型验证通常基于试验数据或高精度有限元分析结果。重点考察刚度退化曲线、滞回耗能能力等关键参数的匹配程度。刚度退化曲线的匹配可采用相关系数 ρ 评价:

$$\rho = \frac{\text{cov}(K_e, K_n)}{\sigma_e \cdot \sigma_n} \quad (4)$$

式中 K_e 和 K_n 分别为试验和数值模拟刚度值, σ 表示标准差。当 $\rho > 0.85$ 时可认为模型可靠性较好,那些数据匹配的事情需要耐心。

多尺度模型的准确性依赖于不同尺度模型间的合理过渡。界面力传递必须满足协调条件:

$$\int_{\Gamma} [\sigma] \cdot n \, d\Gamma = 0 \quad (5)$$

其中 $[\sigma]$ 表示应力间断, n 为界面法向量, Γ 为过渡区域。导致计算结果失真的是不满足该条件的情况。为提高过渡区域力学协调性可引入过渡单元刚度矩阵 K_T :

$$K_T = \alpha K_f + (1 - \alpha) K_c \quad (6)$$

式中 α 为渐变因子 ($0 \leq \alpha \leq 1$), K_f 和 K_c 分别为精细模型和宏观模型的刚度矩阵。通过合理选择 α 值可以确保应力在过渡区域的平滑传递,这个参数选择的过程需要经验。

4 抗震性能极限状态分析

4.1 不同地震动强度下的性能演化规律

框架-核心筒结构在不同强度地震作用下的性能退化过程呈现出明显的三阶段特征。在中小震阶段,结构主要维持在弹性工作状态,此时核心筒承担约 70%~80% 的水平剪力,框架部分则主要发挥刚度补充作用,这种受力分配模式与现行规范的设计假定基本吻合。进入大震阶段后,核心筒剪力墙开始出现明显的塑性变形,其刚度退化导致约 30%~40% 的剪力向框架部分转移,这种内力重分布虽然造成整体刚度下降约 20%~30%,但使得结构的延性性能得到充分发挥。特别值得关注的是极罕遇地震作用下的第三阶段,核心筒可能发生局部压溃或剪切破坏,此时框架体系成为主要的抗侧力系统,结构的整体稳定系数往往降至临界值以下。地震动的频谱特性,尤其是长周期分量,会显著影响高阶振型的参与程度,进而改变结构各楼层的损伤分布模式。

4.2 框架与核心筒协同工作机理

框架与核心筒的协同工作机理是保证结构抗震性能的关键。在弹性工作阶段,核心筒承担主要水平荷载的同时,框架体系通过提供附加刚度有效控制结构的侧向位移。当结构进入非线性阶段后,核心筒的刚度退化导致内力重分布,此时框架的延性能力对防止整体倒塌起到决定性作用。楼板系统在连接框架与核心筒的过程中发挥着关键作用,其平面内刚度的变化会显著影响剪力传递效率。研究表明,当楼板刚度降低 30% 以上时,框架部分承担的剪力比例可能增加 15%~20%,这种变化会加速关键构件的损伤累积^[4]。因此,在抗震设计中需要严格控制框架与核心筒的刚度比,并通过精细化分析验证其协同工作性能。

4.3 关键构件损伤机理

核心筒剪力墙的受压区混凝土剥落、框架梁柱节点的剪切破坏以及连梁的弯剪失效是影响结构极限状态的三种典型损伤模式。核心筒底部损伤会导致结构整体抗侧刚度骤降 40%~50%,并引发显著的 P- Δ 效应。框架节点的破坏会中断竖向传力路径,这在近年来的震害调查中屡见不鲜。连梁的过早失效则会使结构耗能能力降低 25%~35%,导致地震能量无法有效耗散,当关键构件的损伤顺序不符合强柱弱梁原则时,结构更容易形成软弱层破坏机制。

4.4 可靠度评估方法

基于可靠度的概率评估方法为考虑地震动和材料参数的不确定性提供了有效途径。通过建立结构易损性曲线,可以量化不同强度地震作用下的损伤概率。在实际应用中,响应面法等简化方法能在保证计算精度的前提下将分析效率提高 3~5 倍。需要注意的是,极限状态的确定不仅要考虑技术因素,还应当兼顾社会经济影响,这体现了抗震工程的社会责任属性。

5 结语

本研究系统阐释了框架-核心筒结构在动力荷载下的抗震性能极限演化机制,通过建立非平稳地震动与结构响应的耦合模型揭示了频域能量分配差异导致的损伤发展非均匀性规律。证实了楼板刚度退化对协同工作机制的削弱效应的是这些结果。所提出的多尺度建模策略与改进滞回规则为量化关键构件损伤累积进程提供了新途径。研究结果对修正强柱弱梁设计原则具有明确启示,应补充节点抗剪储备控制要求。将楼板传力机制纳入协同工作分析体系也是必要的。未来需进一步探索人工智能驱动的实时震损预测技术,突破传统时程分析的计算瓶颈需要这种探索,唯有将理论成果转化为设计规范修订依据才能真正提升超高层建筑的抗震韧性。

[参考文献]

- [1]熊海贝,陈佳炜,吴颖.高层混凝土框架核心筒-木盒混合结构抗震性能研究[J].建筑结构学报,2018,39(8):62-70.
- [2]黄伟志,王立才,杨洋.杭州西子电梯试验塔项目超限高层结构设计[J].建筑结构,2025,55(6):9-17.
- [3]梁菲菲.基于构件变形与材料损伤的结构抗震性能评估方法对比研究[D].福建:华南理工大学,2021.
- [4]于明君.钢筋混凝土框架核心筒结构隔震性能有限元分析[D].沈阳:沈阳工业大学,2023.

作者简介:沈高峰(1989.5—),单位名称:浙江富力诚欣工程顾问有限公司,毕业学校和专业:浙江科技大学土木工程专业。