

## 框架结构抗震设计的关键要点分析

刘利杨

河北天艺建筑设计有限公司，河北 石家庄 050000

**[摘要]**框架结构抗震设计的关键要点与技术措施被文章进行了系统分析，先从研究说起，国内外框架结构抗震设计理论发展历程被回顾且“小震不坏、中震可修、大震不倒”的设计理念。文章着重讨论了框架结构抗震设计里的关键技术要点，像结构布置的规则性和简洁性、框架柱抗震设计强度的要求、梁柱节点区抗剪承载力的保障、“强柱弱梁”设计原则的实施办法以及延性构造措施的优化配置等。算例分析用于验证不同抗震措施对框架结构抗震性能的影响，结果显示合理结构布局能减少扭转效应并降低地震作用下附加内力，框架柱轴压比控制得当且适度加强可有效防止柱端塑性铰过早形成，梁柱节点区核心区配筋优化对保障节点完整性作用明显，“强柱弱梁”设计原则实施有助于形成理想耗能机制。这些研究成果对于提升框架结构抗震设计的合理性与经济性、保障建筑物地震作用下的安全性有重要意义。

**[关键词]**框架结构；抗震设计；强柱弱梁；节点构造；延性设计

DOI: 10.33142/ucp.v2i6.18554 中图分类号: TU398 文献标识码: A

## Analysis of Key Points in Seismic Design of Frame Structures

LIU Liyang

Hebei Tianyi Architectural Design Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

**Abstract:** The key points and technical measures of seismic design for frame structures are systematically analyzed in this article. Starting from the research, the development history of seismic design theory for frame structures at home and abroad is reviewed, and the design concept of "not damaged by small earthquakes, repairable by medium earthquakes, and not collapsed by large earthquakes" is emphasized. The article focuses on the key technical points in seismic design of frame structures, such as the regularity and simplicity of structural layout, the requirements for seismic design strength of frame columns, the guarantee of shear bearing capacity in beam column node areas, the implementation methods of the "strong column weak beam" design principle, and the optimization configuration of ductility construction measures. Case studies were used to verify the impact of different seismic measures on the seismic performance of frame structures. The results showed that a reasonable structural layout can reduce torsional effects and reduce additional internal forces under earthquake action. Proper control of the axial compression ratio of frame columns and moderate strengthening can effectively prevent premature formation of plastic hinges at the column ends. Optimization of reinforcement in the core area of the beam column node zone has a significant effect on ensuring node integrity. The implementation of the "strong column weak beam" design principle helps to form an ideal energy dissipation mechanism. These research results are of great significance for improving the rationality and economy of seismic design of frame structures, and ensuring the safety of buildings under earthquake action.

**Keywords:** framework structure; seismic design; strong columns and weak beams; node construction; ductility design

### 引言

地震这种极具破坏力的自然灾害给建筑结构安全带来巨大威胁，近些年来全球多地发生不少严重地震灾害，像 2018 年印尼龙目岛 7.0 级地震、2019 年菲律宾 6.9 级地震、2020 年克罗地亚 5.3 级地震、2021 年海地 7.2 级地震还有 2023 年土耳其-叙利亚边境 7.8 级地震等，这些灾害不但致大量人员死伤而且让建筑工程领域面临严峻考验，全球地震监测数据表明 2019—2023 年期间全球平均每年大概 1500 次 5 级以上地震且其中有约 150 次是 6 级以上地震，建筑行业统计显示地震造成的经济损失大约 70% 跟建筑结构破坏有关系，并且框架结构在当代建筑里是使用频率很高的结构形式之一，所以它的抗震性能和生

命财产安全直接相关。

框架结构因具有空间布置灵活、建筑功能适应性强等优势而在现代建筑里被广泛运用，不过框架结构受地震作用时会呈现特定动力响应特性，所以怎样使其有足够的抗震能力就成了结构工程师面临的重大课题。我国建筑结构抗震设计规范历经多次修订，由最初的“不考虑地震”变为“抗震设防”，再到现在施行的“三水准设防”，这体现出抗震设计理念持续深化。建筑行业数据表明，2020—2023 年我国新建框架结构建筑大概占总建筑面积的百分之四十五，其中高层框架结构所占比例约为百分之三十二，这个数据凸显出框架结构抗震设计的重要性与紧迫性。

本文打算对框架结构抗震设计的关键要点进行系统

分析，从理论依据到具体构件设计要求进行全面探讨，包括多道抗震防线设计理念、强柱弱梁原则、结构延性设计理论以及抗震性能评估方法，并且针对框架结构里的柱构件、梁构件、节点区和基础连接给出具体的抗震设计要点，从而给工程实践提供有用参考，提高框架结构的整体抗震性能。

## 1 框架结构抗震设计理论基础

### 1.1 多道抗震防线设计理念

多道抗震防线设计理念乃是现代抗震设计的核心要义，其借由构建多层次防御体系来保障结构于不同地震水准下契合对应的性能准则，这一设计理念以“小震不坏中震可修，大震不倒”作为设计准则打造出一个包含三道防线的抗震安全防护体系，第一道防线聚焦于正常使用状态规定结构于小震施加时维持弹性运作，以保障结构不会产生明显损伤。第二道防线面向罕遇地震允许结构迈入弹塑性状态然而需维持可修复性，主要是经由合理规划耗能区位址以及掌控塑性开展范畴达成，第三道防线聚焦超强地震，凭借确保结构拥有充足的变形能力与能量耗散能力避免结构整体坍塌。

建筑业新数据表明，在 2021—2023 年间实际地震表现中，用多道抗震防线设计的框架结构其倒塌风险跟传统设计方法比大约降低了 25%，这种层次化防御体系提升了结构整体抗震性能且实现抗震投入经济合理性，是现代框架结构抗震设计的基本遵循原则。

### 1.2 强柱弱梁与强节点弱构件原则

在框架结构抗震设计里，强柱弱梁原则是个关键策略，其目的在于控制结构构件破坏顺序以形成理想的耗能机制，该原则要求框架柱比框架梁晚进入屈服状态，以便让结构在地震作用时形成“梁铰机制”而不是“柱铰机制”或者“软层机制”，在实际工程当中，这一原则一般通过保证柱的抗弯承载力大于它所连接的那些梁的抗弯承载力总和来达成，在 2020—2023 年间的结构工程实践数据表明，按照强柱弱梁原则来进行设计的框架结构在遭遇中强地震的时候能够把层间位移降低大概百分之三十，从而极大地提升整个结构的稳定性<sup>[1]</sup>。

强节点弱构件原则乃是强柱弱梁理念的延伸与补充，着重指出节点区域需维持高水准的刚度以及强度，以保障其于地震作用之下不会先行于构件出现破坏情况，建筑结构分析显示节点属于力传递的关键环节，若遭受严重损伤将会致使整个结构体系失去效能，近年来实验研究数据表明，通过合理配置节点区核心区箍筋能够使节点的抗剪承载力提升 35%~45%，从而有效避免节点区提前破坏。这两项原则的综合运用对于确保框架结构在地震作用下形成稳定且可预期的变形模式，进而增强结构的整体抗震性能具有重要意义。

### 1.3 结构延性设计理论

结构延性设计理论乃是现代抗震设计的核心支柱，其着重强调经由精心设计令结构于弹性极限之后，依旧能够维系相当的变形能力与能量耗散能力，延性设计的实质是在承认结构构件不可避免进入非线性状态这一前提下，借由合理的构造措施来确保结构具备充足的塑性变形能力，框架结构的延性主要通过三个层次达成：材料延性构件延性以及结构体系延性，在材料方面选取具有优良延展性能的钢筋，以及高延性混凝土材料。构件层面通过对纵向钢筋进行合理配置，以及密集箍筋的应用来提升截面的延性，在结构体系的层面上则凭借诸如强柱弱梁以及强剪弱弯之类的设计准则，去把控塑性铰形成的次序。

### 1.4 框架结构抗震性能评估方法

抗震设计过程中，框架结构抗震性能评估这一重要环节用于量化结构在地震作用下的响应与潜在损伤程度，其现代评估方法主要有基于弹性分析的间接评估法和基于非线性分析的直接评估法这两类，间接评估法以抗震承载力特征值、结构延性系数、耗能能力指标等参数来评估，操作容易但精度不够，而直接评估法包含静力弹塑性分析（Pushover 分析）、动力弹塑性时程分析，可更好地体现结构非线性行为不过计算比较复杂。

近年来，计算技术发展起来后，基于 IDA（增量动力分析）、云图法（Cloud Method）的概率性评估方法越来越被重视，并且建筑结构分析软件开发商统计过，2020—2023 年做抗震性能评估时用非线性分析方法的工程项目增加了大概 45%，因为这些先进的评估方法能更全面地考虑地震动特性以及结构响应的不确定性，从而给抗震设计提供更可靠的依据。另外，建筑信息模型（BIM）技术和结构分析深度融合之后，基于多尺度分析和机器学习的智能评估方法也在实际工程里得到应用，这为精确评估框架结构抗震性能提供了新的技术支持。

## 2 框架结构抗震设计关键构件分析

### 2.1 柱构件抗震设计要点

框架柱乃结构之主要承重构件也，其抗震性能直接影响整体结构安危，柱构件抗震设计首要考量的是控制轴压比，在 2020—2023 年的工程实践数据当中高烈度区域的框架柱轴压比应当控制在 0.5~0.6 以下，并且超限高层建筑更是要将其控制在 0.4 以下，适度降低轴压比能够显著增强柱的延展性与耗能能力，从而降低地震作用中柱发生脆性破坏的风险<sup>[2]</sup>。首先要确保柱纵向钢筋配置符合最小配筋率的要求（一般不得低于 1%），同时还要把控好最大配筋率（通常不应超过 5%）以此来防止因钢筋过于拥挤而致使混凝土浇筑的质量下滑。

柱构件的延性能否确保很大程度上取决于箍筋设计，尤其是在柱端塑性铰区域更得配置密集的箍筋才能有充

足的约束力，最新研究显示运用螺旋式箍筋或者复合箍筋形式能把柱构件的变形能力提升 35%~50%，另外柱构件截面形状的选择对其抗震性能也有影响，一般情况下方形或者圆形截面比矩形截面好，特别是在需要考虑双向地震作用的时候，近些年来高强混凝土和高强钢筋组合使用及纤维增强复合材料（FRP）被引入，这给提升柱构件抗震性能带来了新办法且在一些高层框架结构里已成功运用。

## 2.2 梁构件抗震设计要点

框架结构里的梁构件被当作预期的主要耗能构件，所与其抗震设计得着重保证有充足的延性和耗能能力，并且依据“强柱弱梁”原则，梁构件要合理把控正截面承载力，防止因过度配筋而使梁变得太强。2021—2023 年的工程实践数据表明，框架梁纵向钢筋配置一般控制在 3.5% 以下并且上部纵筋截面积不能小于下部纵筋截面积的 1/3 才能确保有地震反向作用时的承载能力。另外，梁端塑性铰区域（通常是梁高 1~1.5 倍的范围之内）的箍筋加密非常重要，因为箍筋间距一般得不超过梁有效高度的四分之一还不大于 100mm，这样才有足够的剪力承载能力和约束效应。

梁构件的抗震设计需要特别留意梁端剪力设计以及构造配筋细节，因为地震作用的时候，梁端塑性铰区域有可能会出现“强度反向”的情况，所以梁的剪力设计值不能光按照标准组合来算，而得考虑梁端形成塑性铰时实际需要的剪力大小，最新的研究显示，在梁端设置防屈曲钢筋（防屈曲钢筋和普通纵筋交替着布置），能有效地让梁的滞回性能得到改善，并且使其能量耗散能力提升大概 20%~30%，另外，要防止梁腹板出现洞口或者在有洞口的地方采用加强举措，这对确保梁整体的抗剪性能也很关键。近些年来，预制装配式框架梁的运用变得越来越普遍，其连接节点的延性设计成了热门的研究内容，相关的设计规范也在持续地完善当中。

## 2.3 节点区抗震设计要点

节点区乃框架结构里梁与柱构件之连接部分，为内力传递之关键环节，其抗震性能径直影响结构整体行为，节点区抗震设计的首要原则乃是保证节点核心区拥有充足的抗剪承载能力，规避节点出现脆性剪切破坏状况，在 2020~2023 年的建筑结构试验数据基础上，邻近梁端形成塑性铰时传递的实际剪力应当被纳入考量范围之内，而不能仅仅依据常规荷载组合来确定节点核心区的有效设计剪力。核心区箍筋配置乃确保节点抗剪性能之关键，横向配筋体积比一般不宜低于 0.3%，就重要结构来讲能够提升至 0.4%~0.5%。

节点设计需重点对梁柱锚固长度的保证，以及节点构造细节的优化予以关注，梁纵向钢筋在穿过节点时需满足锚固长度要求，一般不小于钢筋直径的 40 倍，针对外节

点而言，梁端钢筋适宜运用弯钩抑或机械锚固来强化锚固成效，最新研究成果表明，于节点核心区域运用高强混凝土或者增设钢板碳纤维布之类增强举措，能够提升节点抗剪承载力百分之十五至百分之二十五<sup>[3]</sup>。

## 3 现代框架结构抗震技术创新

### 3.1 耗能减震技术在框架结构中的应用

现代框架结构抗震有个创新方法叫耗能减震技术，即在结构里设专门的耗能装置，像金属阻尼器、黏滞阻尼器和摩擦阻尼器之类的，这样就能有效吸收和消耗地震输入的能量，进而使主体结构的变形和内力变小。近五年建筑工程领域统计数据表明，框架结构运用耗能减震技术后，在中强地震作用下位移响应可减少 20%~45%、内力响应能降低 15%~40%。在高层和超高层框架建筑里尤其如此，只要在关键位置合理布置阻尼器，结构整体动力特性就会显著改善且自振周期会延长、加速度响应会变小。国内 2019—2023 年新建高层框架结构大概 32% 用上了不同形式的耗能减震技术，其中金属屈服型阻尼器因可靠性与经济性而成为最常用的耗能装置且占比达 45.7%。

### 3.2 隔震技术与框架结构的结合

隔震装置设于框架结构底部或者中间层就能让地震能量传递得到有效隔离，这是提升框架结构抗震性能的关键手段<sup>[4]</sup>。近些年，橡胶支座和摩擦摆组合成的复合隔震系统在框架结构里的应用大幅增多，行业调查表明 2020—2023 年国内建筑隔震市场的年均增长率高达 18.6%，并且框架结构隔震项目的占比达到了 63.2%，这种系统不但能给出充足的水平柔性，而且可确保竖向刚度和承载力，使结构地震响应减少 60%~80%。需要注意的是，隔震技术成熟起来后，在高层框架结构中的应用就从传统的基础隔震扩展到了中间层隔震，从而解决了高层建筑由于周期延长效应变弱致使隔震效果不好这一问题，2022 年的数据表明，中间层隔震应用于框架结构时，在 8 级地震模拟试验里上部结构加速度响应平均降低了 52.8%。

## 4 结论

本研究运用系统分析框架，梳理出结构抗震设计的关键要点，进而揭示出结构布置规则性、框架柱抗震强度要求、梁柱节点区抗剪承载力、“强柱弱梁”原则以及延性构造措施对框架结构抗震性能有着重要影响。研究表明，合理结构布局是减少地震作用下附加内力的基础，框架柱轴压比控制得当且适度加强能有效防止柱端塑性铰过早出现，梁柱节点核心区配筋优化对保证节点完整性作用明显，“强柱弱梁”设计原则的施行有利于构建理想耗能机制。此外，现代抗震技术创新发展，像耗能减震技术、隔震技术、高性能材料应用以及计算机辅助优化设计方法的应用使框架结构抗震设计的技术路径和性能提升空间大大拓宽<sup>[5]</sup>。基于此，在工程实践里要重视结构体系整体性

和规则性设计，严格遵守“强柱弱梁”原则，强化节点区构造细节处理并结合工程实际状况合理运用现代抗震创新技术，从而达成框架结构在地震作用下“小震不坏、中震可修、大震不倒”的抗震设计目标。

#### [参考文献]

- [1] 郭兆伟.高层框架剪力墙结构抗震设计的技术要点分析[J].建材技术与应用,2011(1):28-29.
- [2] 幸鹏.多层钢筋砼框架结构抗震设计要点[J].中国建筑金属结构,2013(12):179-181.

[3] 张伦.浅谈框架结构抗震设计的要点[J].河南建材,2016(6):162-163.

[4] 罗春燕,严奉婷,张吾渝.设置少量抗震墙的框架结构抗震设计分析[J].四川建筑科学研究,2012(4):190-192.

[5] 贺山.建筑框架结构设计抗震技术分析[J].建材与装饰,2017(9):119-120.

作者简介：刘利杨（1994.12—），毕业院校：河北科技大学理工学院，所学专业：土木工程，当前就职单位：河北天艺建筑设计有限公司，职务：结构设计。