

Seismic design method in civil engineering structure design

Junjie Dou

Guangxi Rongtai Architectural Design Co., Ltd., Nanning, Guangxi, 530001, China

Abstract

The seismic design of civil engineering structures is a critical aspect of ensuring building safety, with the core aim of enhancing the structural safety and stability under earthquake forces through effective design methods. This paper systematically explores the theoretical framework and technical approaches of seismic design for civil engineering structures, focusing on performance-based design concepts, structural seismic calculation methods, and construction measures. It examines how to achieve the seismic performance goals of structures through multidimensional design strategies, from conceptual seismic design and the establishment of calculation models to the optimization of construction details. This paper aims to provide theoretical references and technical guidance for engineering practice, promoting the scientific and standardized development of seismic design methods.

Keywords

civil engineering structure design; seismic design; optimization methods

土木工程结构设计中的抗震设计方法

窦俊杰

广西荣泰建筑设计有限责任公司, 中国 · 广西 南宁 530001

摘要

土木工程结构的抗震设计是保障建筑安全的关键环节, 其核心在于通过合理的设计方法提升结构在地震作用下的安全性与稳定性。本文系统阐述土木工程结构抗震设计的理论体系与技术方法, 重点分析基于性能的设计理念、结构抗震计算方法及构造措施。从抗震概念设计、计算模型建立到构造细节优化, 探讨如何通过多维度设计策略实现结构的抗震性能目标, 为工程实践提供理论参考与技术指导, 推动抗震设计方法的科学化与规范化发展。

关键词

土木工程结构设计; 抗震设计; 优化方法

1 引言

地震属于威胁土木工程结构安全的主要自然灾害范畴, 其随机性以及强破坏力对结构设计形成了严峻挑战, 抗震设计的主要目的是借助科学的理论分析及技术手段, 促使结构在不同烈度地震作用时达成“小震不造成损坏、中震可予以修复、大震不引起倒塌”的性能规格。抗震设计理论由单纯的强度控制阶段, 发展到包含变形能力、能量耗散等多参数的综合性能设计阶段, 设计举措从经验性设计过渡到基于力学原理的精细化设计, 深入探究抗震设计相关方法, 对提高结构抗震本领、守护生命财产安全有显著工程意义。

2 抗震设计的基本理论与原则

2.1 抗震设防目标与性能水准

抗震设防目标的设定应按照“分级设防、分类指导”原则开展, 按建筑使用功能重要性划分出各类不同的抗震设

防类别, 依照我国《建筑抗震设计规范》, 建筑被归为甲、乙、丙、丁四类, 甲类建筑应满足比本地区抗震设防烈度还高的设计要求, 可适度削减丁类建筑的设防标准。性能水准依照结构损伤程度分为完好、轻微损伤、中等损伤、严重损伤、倒塌这五类, 和小震、中震、大震三种地震水准相呼应, 小震(50年超越概率63%)作用下, 结构应当处于弹性工作状态, 若发生中震(50年超越概率10%), 部分构件被允许产生塑性铰, 大震(50年超越概率2%-3%)来临, 必须保证结构不出现倒塌, 该种多水准设防思路表现了抗震设计里安全性与经济性的兼顾^[1]。

2.2 概念设计的核心要素

概念设计成为抗震设计的基础支撑, 着重借助结构设置与体系抉择改善整体抗震性能, 首先要依照“规则性设计”的准则, 防止出现结构平面不规则现象, 从而降低地震作用时的扭转效应与应力集中现象, 框架结构采用双向对称布置为宜佳, 应使剪力墙结构的墙肢刚度均匀分布。结构体系宜具备多道抗震防线, 如同框架-剪力墙结构那样, 第一道防线由剪力墙担当, 承担主要水平力, 框架作为第二道防线,

【作者简介】窦俊杰(1985-), 男, 中国河北丰润人, 本科, 工程师, 从事土木工程结构设计研究。

抵御后续荷载的侵袭，此多重防线设计可明显增强结构的冗余性，还需审视场地条件与结构自振周期的匹配关系，按照不同场地土类型选取刚性基础或者柔性基础，杜绝场地与结构共振效应所引发的震害加剧。

3 抗震计算方法与模型建立

3.1 静力计算方法的应用与局限

典型的静力计算法——底部剪力法登场，将地震作用简化为等效静力荷载进行结构的分析，适合高度不高于40m、质量及刚度沿高度分布均匀的结构，其基本原理是利用结构总重力荷载代表值与场地特征周期计算底部总剪力，接着依据倒三角形分布准则分配到各个楼层。该方法在计算上简便又高效，只是忽略了结构振动高阶振型的效应，针对复杂体型结构，计算误差明显偏大，振型分解反应谱法进一步把多振型的组合效应纳入了考虑范围，在求解结构各阶振型的地震响应后，借助CQC(完全二次项组合)或SRSS(平方和开平方)法则来组合，能应用在多数常规结构上，但反应谱法采用了弹性假定，难以精准体现结构进入塑性阶段后的性能衰退情况^[2]。

3.2 动力时程分析的精细化模拟

动力时程分析借助输入人工合成地震波和实际地震波，对结构实施时域内动力响应的计算，可真切展现结构在地震期间的弹塑性表现，该方法需率先建立考虑材料非线性的结构模型，梁柱构件可采用纤维模型或塑性铰模型，采用考虑刚度退化情况的本构关系描述混凝土，钢材采用的是双线性强化模型。计算时要挑选3条及以上的地震波，且至少1条是实际强震记录，场地特征周期应与地震波的频谱特性相契合，加速度峰值按照设防烈度而定，如8度区发生大震时取400gal，动力时程分析可得出结构于地震过程中位移时程、内力的变化及塑性铰的发展历程，为关键构件的性能测评提供凭据，只是计算量巨大，参数选取也十分复杂，往往用于重要结构或者复杂结构的抗震验算事宜。

3.3 基于性能的设计方法

基于性能的设计(PBD)破除了传统设计一贯的统一设防模式，准许依据业主需求和结构重要性定制性能目标，该办法首先界定结构在不同地震水准下的性能指标，然后凭借迭代设计实现性能目标，就高层办公楼而言，若业主提出中震状态下关键构件保持弹性的要求，设计的时候就需要提升该构件的承载力储备，并采用动力分析对其性能进行验证。PBD方法一般采用能力谱法和位移设计法中的一种，前者以需求谱与能力谱的交点为依据确定结构位移，后者以目标位移为起始点开展构件设计，该方法把抗震设计从“符合规范最低规定”提升至“定制化性能护航”，更贴合现代工程多样化的需求。

4 抗震构造措施与技术创新

4.1 构件抗震设计的关键技术

梁、柱构件抗震构造要围绕“强剪弱弯、强柱弱梁”这一原则去构建，梁端箍筋加密区长度至少为2倍梁高，箍筋间距以不超过100mm为宜，以防梁端出现剪切破坏现象；从柱截面长边尺寸、柱净高1/6和500mm里选出最大值作为柱端加密区长度，箍筋直径应当 $\geq 10\text{mm}$ ，借助约束箍筋提升混凝土的延性。面对混凝土剪力墙，边缘构件需布置充足的纵向、箍筋，造就约束混凝土之区域，提高墙肢抵御弯曲与剪切之力，节点构造应保证达成“强节点弱构件”规格，框架节点核心区内，箍筋间距不得超100mm，而且不能比梁端加密区的箍筋配置少，杜绝节点先于构件出现破坏情形，这些构造措施凭借控制构件的破坏模式，保证结构于地震时展现出延性破坏的特性^[3]。

4.2 减隔震技术的创新应用

减隔震技术依靠在结构底部或层间设置减隔震装置起作用，让结构动力特性改变以降低地震影响，隔震层一般采用橡胶支座和滑移支座，可令结构自振周期得以延长，让结构躲开地震动的主要能量频段，以此降低上部结构对地震的响应，减震装置涉及到阻尼器(如粘滞阻尼器、金属阻尼器)以及消能支撑，凭借消耗地震能量减小结构的振动幅值。拿某采用粘滞阻尼器的框架结构当作例子，阻尼器可把30%~50%的地震能量予以消耗，促使结构层间位移角下降40%以上，减隔震技术应用中，需留意装置耐久性与维护性，对于橡胶支座，老化问题不可忽视，需定期对阻尼器的密封性能开展检查，保证其在长期使用时的可靠性。

4.3 新型抗震结构体系

预制装配式结构抗震设计需处理好节点连接的可靠度问题，依据“等同现浇”的理念设计预制构件连接节点，就如采用灌浆套筒连接的预制柱，节点承载力需达到或超过现浇节点水平，且要利用低周反复荷载试验验证它的延性，钢结构抗震设计聚焦于梁柱节点的韧性，选取狗骨式节点或扩翼式节点，让塑性铰远离节点处，防止出现脆性断裂，可恢复功能结构体系采用引入自复位构件(像预应力筋、形状记忆合金)的方式，让结构于地震结束后能自动归位，降低地震后残余变形，该体系在像医院、通信枢纽这类重要建筑里的应用前景极为可观。

5 抗震设计的发展趋势与挑战

5.1 智能化设计技术的深度融合

5.1.1 BIM技术驱动的全流程设计革新

建筑信息模型(BIM)技术正从三维可视化工具发展成抗震设计全生命周期管理平台，在概念设计这个阶段，参数化建模赋予BIM自动检测结构平面与竖向规则性的能力，

就凹凸不规则、刚度突变这类问题发出警示，进而依靠算法得出优化方案。若输入抗震设防烈度及建筑功能需求，系统可依据规则库自动对柱网布局以及剪力墙分布予以调整，把结构质量中心和刚度中心的偏差把控在合理范围内，在开展计算分析的阶段，BIM模型可径直与有限元软件做对接工作，把材料属性、构件尺寸等参数同步到动力分析模块，避免传统设计当中数据传递的差错，增进模型搭建的效率及精度。

对于施工与运维阶段，BIM应用聚焦抗震构造的精准达成，把节点核心区配筋与梁端箍筋加密区等细节嵌入模型，施工人员可借助AR技术达成可视化交底，保障复杂节点的钢筋绑扎契合设计要求，处在运维阶段里，BIM模型可把地震监测数据进行集成，若结构碰到地震情况时，系统会自主对震前震后模型的位移变化加以对比，即刻定位损伤构件，为地震后评估与修复供给数据支撑，达成从设计开端到运维全流程的抗震性能管控^[4]。

5.1.2 人工智能算法的抗震优化应用

传统抗震设计方案比选模式正被机器学习算法重新塑造，遗传算法可借助模拟自然选择的一系列过程，在诸多结构布置方案里搜索抗震性能的最优解，把结构刚度均匀性、层间位移角方差等当作优化目标，以迭代操作生成契合多目标需求的设计方案，地震动预测这类非线性问题，神经网络处理起来很擅长，经由学习历史强震记录的加速度时程以及场地土特性等参数，生成更精准的地震动峰值预测模型，为抗震设计给予更可靠的荷载数值。

凭借生成式设计技术，抗震设计自动化进一步得以实现，设计师仅需设定抗震性能目标（像大震状态下的位移限值）以及几何约束规则，算法随即生成多组合乎要求的结构方案，经由可视化界面展示各方案的抗震性能相关指标，辅助设计师作出抉择，该智能化设计模式把传统经验性设计转变为数据驱动的精准设计，大幅增进复杂结构抗震方案优化的效率。

5.2 复杂工程问题的理论突破需求

5.2.1 超高层与大跨度结构的抗震挑战

超高层建筑风震耦合效应为抗震设计添新难点，若建筑高度越过一定的阈值，风荷载与地震荷载耦合在一起，会造成结构的非线性振动，以往传统的独立荷载工况设计法不再可行，大跨度结构行波效应归因于地震波传播的时间差，引起各支承点的地震动呈现不同步状态，导致结构内力分布更显复杂，需采用多点激励时程分析方式实施精细化设计，

针对出现转换层、大悬挑等情形的不规则结构，其刚度与质量突变会引起地震剪力的集中，传统反应谱法无法精准模拟该结构塑性发展进程，需借助精细有限元模型开展分析，但计算效率与工程周期的矛盾依旧迫切需要解决。

5.2.2 新型材料与体系的本构关系研究

抗震加固采用纤维增强复合材料（FRP），存在本构模型不完善这一问题，FRP材料体现出高抗拉强度与低弹性模量之特性，该材料与混凝土界面的粘结性能成为影响加固效果的关键要点，可现存模型大多是从单调荷载试验中得出的，未对循环荷载作用下的刚度退化规律进行描述，高性能混凝土（HPC）抗震性能研究也需深化——高强度所带来的延性降低情况，应采用配筋优化与构造举措进行改善，然而相关设计方法依旧没有系统理论作支撑^[5]。

另一技术难题是对可恢复功能结构体系长期性能的验证，自复位节点采用的像形状记忆合金（SMA）、预应力筋等材料，经多次地震作用后凸显的疲劳性能与应力松弛相关问题，直接关乎结构的可恢复能力，应怎样建立考虑材料出现退化的本构模型，实现可恢复功能结构全生命周期性能的设计，依旧是学术界和工程界聚焦点。

6 结论

土木工程结构的抗震设计是把理论与实践结合起来的系统工程，须从概念设计开启，经过计算分析，到构造措施完备，多方面把控，基于性能标准的设计理念及减隔震技术采用，彰显出抗震设计已从传统的强度控制转换为综合性能的优化模式。未来，伴随建筑技术的进步，抗震设计举措会不断出新，但一直都要把“保障生命安全、降低经济损耗”当作核心目标，利用科学设计，让结构在地震灾害时具备充分的安全冗余与恢复能力。

参考文献

- [1] 杨海伟.探讨土木工程结构设计中的抗震研究[J].中华建设, 2024,(02):92-94.
- [2] 张科.土木工程结构设计的抗震设计分析[J].建设科技,2023, (16):74-76.
- [3] 王映雪.探究土木工程结构设计中的抗震问题[J].砖瓦, 2021,(10):106-107.
- [4] 尚天龙,钟春玲.土木工程结构设计中的抗震问题[J].长春师范大学学报,2020,39(08):19-22.
- [5] 高瑞,汤超伟.谈土木工程结构设计中的抗震设计要点[J].居舍,2020,(01):90-91.