

钢筋混凝土建筑结构抗震延性设计

田月平

建设综合勘察研究设计院有限公司 北京 100000

摘要：随着我国经济的快速发展，高层建筑如雨后春笋般涌现，但地震等自然灾害的威胁始终存在。本文围绕钢筋混凝土建筑结构抗震延性设计展开全面论述。先是阐述了抗震延性设计的基本原理，涵盖地震作用下结构响应、延性概念及度量指标、延性与抗震性能关系等内容。接着详细分析结构构件（梁、柱、梁柱节点）的抗震延性设计要点，探讨材料性能、施工质量、使用环境等影响因素，还介绍了结构体系层面选型、冗余度及刚度变形协调等抗震延性设计策略，为优化此类建筑结构抗震设计、增强抗震能力提供了系统参考。

关键词：钢筋混凝土；建筑结构；抗震延性；设计

引言：在地震频发的背景下，钢筋混凝土建筑结构的抗震性能备受关注。抗震延性设计是保障其在地震时安全可靠的关键所在。它基于对地震作用下结构如何响应、延性的科学理解，通过合理设计结构构件以及考量多种影响因素，结合有效的结构体系策略，来提升结构耗能、变形能力，避免脆性破坏。鉴于其重要性与复杂性，深入研究极具现实价值，故本文展开相关探讨。

1 钢筋混凝土结构抗震延性设计基本原理

1.1 地震作用与结构响应

地震发生时，地壳释放的能量以地震波形式传播，引起地面运动。钢筋混凝土结构在地震作用下，基础随地面运动而产生位移与加速度，上部结构则因惯性力作用而受力变形。地震波的频谱特性、幅值及持时等因素均会对结构响应产生显著影响。结构的自振频率、阻尼比以及质量分布等自身特性，也与地震作用相互耦合，决定着结构在地震中的振动形态、内力分布与变形程度，可能导致结构局部破坏或整体失稳，理解此过程是抗震延性设计的基础。

1.2 延性的概念与度量指标

延性是指钢筋混凝土结构或构件在承载能力无显著降低情况下的变形能力。从材料层面到构件再到整体结构，延性均发挥关键作用。常用的延性度量指标包括位移延性系数，即结构或构件极限位移与屈服位移的比值，它直观反映了结构在屈服后能继续变形的程度；还有曲率延性系数，用于衡量截面的转动变形能力，在评估构件如梁、柱的局部延性表现时尤为重要。这些指标为定量分析和设计结构延性提供了依据，有助于精确把握结构在地震中的行为^[1]。

1.3 延性与结构抗震性能的关系

延性与钢筋混凝土结构抗震性能密切相关。具有良

好延性的结构在地震时，可通过塑性变形有效耗散地震能量，避免因能量瞬间积聚而导致脆性破坏。例如，在强震作用下，梁端先出现塑性铰并发生较大转动变形，消耗大量地震能量，从而保护柱等竖向构件。合理的延性设计能使结构在地震过程中形成多道防线，实现“强柱弱梁”“强剪弱弯”等理想破坏机制，保证结构在较大变形下仍具备一定承载能力，维持整体稳定性，显著提高结构抵御地震灾害的能力，减少人员伤亡与财产损失，是抗震设计的核心要点之一。

2 钢筋混凝土结构构件的抗震延性设计

2.1 梁的抗震延性设计

梁在钢筋混凝土结构中承担着重要的荷载传递与耗能作用。为确保梁具有良好的抗震延性，首先需合理控制梁的截面尺寸，避免出现超筋破坏与少筋破坏情况，保证其破坏模式为适筋破坏。配筋率是关键因素，适宜的纵向钢筋配筋率既能提供足够的承载能力，又能保证梁在地震作用下的变形能力。同时，箍筋的配置至关重要，加密区的箍筋能有效约束混凝土，提高梁的抗剪能力与延性，防止剪切破坏先于弯曲破坏发生。此外，纵筋的锚固与搭接长度应满足规范要求，确保在反复地震荷载作用下钢筋与混凝土协同工作，使梁在屈服后能够通过塑性铰的转动充分耗能，从而提升整个结构的抗震性能。

2.2 柱的抗震延性设计

柱作为结构的竖向承重构件，其抗震延性直接影响结构的整体稳定性。柱的破坏形态多样，其中压弯破坏与剪切破坏较为常见。轴压比是影响柱延性的核心因素之一，通过限制轴压比，可以有效防止柱因轴力过大而过早发生脆性破坏，提高其延性。配筋率对柱的约束效果显著，足够的箍筋能够约束混凝土的横向变形，增

强柱的抗剪能力与耗能能力,尤其在柱的端部等关键部位,加密箍筋能更好地保证柱在地震作用下的延性。纵筋配筋率也不容忽视,合理的纵筋配置可提高柱的承载能力与变形能力,并且在纵筋的布置上应遵循均匀对称原则,使柱在各个方向都具备较好的抗震性能,确保结构在强震下的安全性。

2.3 梁柱节点的抗震延性设计

梁柱节点是结构传力的关键部位,受力复杂且在地震作用下承受较大的剪力与压力。其破坏机理涉及混凝土的开裂、钢筋的屈服与锚固失效等。为保证梁柱节点的抗震延性,核心区的箍筋配置极为关键,足够且合理布置的箍筋能有效约束混凝土,提高节点的抗剪承载力与延性,防止节点核心区过早发生剪切破坏。混凝土强度等级的选择应与梁、柱相匹配,既要保证足够的强度,又要兼顾其与钢筋的粘结性能。纵筋在节点内的锚固与连接必须严格按照规范执行,确保纵筋在反复地震荷载作用下能够有效传递内力,不发生滑移或拔出,使节点在地震中能够保持整体性,协同梁、柱共同工作,成为结构抗震的可靠连接枢纽,保障结构整体的抗震延性^[2]。

3 钢筋混凝土建筑结构抗震延性设计的影响因素分析

3.1 材料性能对结构延性的影响

混凝土的强度、弹性模量及本构关系对钢筋混凝土结构延性有显著影响。高强度混凝土虽抗压强度高,但往往脆性较大,延性相对较差;而低强度混凝土在一定程度上更利于结构产生塑性变形,展现较好延性。弹性模量决定了结构在受力时的变形特性,影响着结构刚度与延性的平衡。钢筋的强度、屈服应变和延性指标也至关重要,高强度钢筋能提升结构承载能力,但其延性若不足可能导致结构脆性破坏风险增加;良好延性的钢筋可在地震时通过塑性变形耗能。此外,钢筋与混凝土之间的粘结性能影响二者协同工作程度,粘结力不足会使钢筋滑移,削弱结构延性,进而影响结构在地震中的整体耗能与变形能力。

3.2 施工质量与工艺对结构延性的影响

施工质量与工艺对钢筋混凝土结构延性影响多方面。混凝土浇筑质量决定了其密实度与均匀性,若浇筑不密实,存在空洞或蜂窝麻面,会降低混凝土强度与整体性,削弱结构在地震时的承载与变形能力,影响延性。钢筋加工与安装精度不容忽视,纵筋位置偏差会改变结构受力状态,可能导致局部提前破坏;箍筋间距误差影响对混凝土的约束效果,降低结构抗剪与耗能能力,减少延性储备。施工过程中的损伤如混凝土早期裂缝、钢筋锈蚀等,会随时间发展降低材料性能,在地震

作用下,结构更易发生破坏,难以发挥预期的延性性能,从而危及整个建筑结构在地震中的安全性与稳定性。

3.3 结构使用环境与维护管理对结构延性的影响

结构使用环境与维护管理对其延性有长期且复杂的影响。自然环境因素中,温度变化产生的热胀冷缩应力、湿度循环导致的混凝土干湿变形以及地震作用后的损伤积累,均会使混凝土内部产生微裂缝并逐渐发展,降低材料强度与粘结性能,使结构延性随时间逐渐衰减。当结构使用功能改变,如建筑用途变更带来荷载增加或分布变化,原设计的结构受力状态改变,可能超出结构承载与延性设计范围,影响结构在地震中的响应。若缺乏有效的维护管理策略与定期检测评估,无法及时发现并处理这些影响延性的潜在问题,结构在地震中的耗能与变形能力将不断恶化,难以保障建筑在整个使用寿命期间的抗震安全性^[3]。

4 钢筋混凝土建筑结构体系的抗震延性设计策略

4.1 结构体系选型与布局的抗震延性考虑

在钢筋混凝土建筑结构体系的抗震延性设计中,结构体系选型与布局的考量至关重要。

第一,不同结构体系展现出不同的抗震延性特质。框架结构具有空间布置灵活的优势,其延性主要通过梁、柱的塑性变形来体现,能在地震时有效耗散能量,但侧向刚度相对较小,在高烈度地震区对于较高建筑适用性受限。框架-剪力墙结构融合了框架与剪力墙的长处,剪力墙承担大部分水平力,提供较大侧向刚度,框架则发挥延性优势,二者相互配合使结构在地震中的表现更为出色。剪力墙结构侧向刚度大,抗震性能良好,不过其墙体布置相对固定,对建筑空间的灵活性有一定影响。在选型时,需全面权衡建筑功能需求,比如商场、写字楼等对空间布局要求各异;场地条件,像场地的类别、是否存在液化等;以及抗震设防烈度,高烈度地区对结构体系的抗震能力要求更高等多方面因素。第二,建筑平面布局的规则性直接关联结构抗震延性。规则的平面形状,如矩形、圆形等,能确保质量中心与刚度中心接近重合,有效降低地震时的扭转效应,使结构受力均匀,利于整体延性的发挥。避免平面凹凸不规则或局部突出,防止产生应力集中。竖向布局上,应保证刚度均匀变化,避免楼层刚度突变,例如突然收进或悬挑过大等情况,防止形成薄弱层。对于存在不规则性的建筑,可采用设置防震缝将结构划分为相对规则的单元,或者对薄弱部位进行针对性加强,如增加配筋、提高混凝土强度等级等措施,从而保障结构体系在地震作用下具备良好的抗震延性,最大程度保障建筑安全。

4.2 结构冗余度与多道抗震防线设计

结构冗余度与多道抗震防线设计是钢筋混凝土建筑结构抗震延性策略的核心要素。第一结构冗余度旨在赋予结构在遭受局部破坏后仍能维持整体稳定和一定功能的能力。它犹如一张安全网，当部分构件受损时，其他构件能够承担起额外的荷载并重新分配内力，避免结构发生连续性倒塌。例如，在大型框架结构中，众多的梁柱连接形成了复杂而相互关联的传力路径，即使某几根柱子或梁出现损伤，荷载依然可以通过其他完好的构件传递，确保整体结构不至于瞬间崩塌，从而为人员疏散和后续修复提供可能。第二，多道抗震防线则是基于不同结构构件或结构体系的协同作用构建而成。以常见的框架-核心筒结构为例，核心筒作为第一道防线，由于其较高的刚度和强度，在地震初期承担了绝大部分的水平地震力，有效抵御地震冲击并限制结构的侧向变形。随着地震强度的增加，核心筒可能逐渐进入塑性阶段，此时框架结构作为第二道防线开始发挥作用，梁和柱通过形成塑性铰来耗散能量，进一步吸收和分散地震能量，维持结构的整体稳定性。实现多道抗震防线的关键在于合理设计构件之间的强弱关系，严格遵循“强柱弱梁”原则，确保柱子先于梁发生破坏，使结构的破坏模式更具可控性和延性；同时贯彻“强剪弱弯”理念，提高构件的抗剪能力，避免脆性剪切破坏。通过这样的设计，结构在不同地震水准下都能有序地响应，充分发挥各道防线的的作用，最大限度地减少地震灾害对建筑的破坏，保障人员生命财产安全并降低经济损失。

4.3 结构整体刚度与变形能力的协调设计

结构整体刚度与变形能力的协调设计是钢筋混凝土建筑结构抗震延性设计中的关键环节。第一，结构整体刚度直接影响着地震作用下结构所受的地震力大小。较大的刚度会使结构在地震时承受更大的惯性力，但同时也能在一定程度上限制结构的变形。然而，如果一味追求高刚度而忽视变形能力，一旦地震力超过结构的承

载极限，结构可能因缺乏变形空间而发生脆性破坏。例如，在一些高层建筑中，若采用了过多的剪力墙或柱子截面过大，虽然整体刚度增加，但在强震作用下，结构可能无法通过有效的变形来耗散能量，导致局部应力集中，引发严重破坏。第二，与之相反，若结构变形能力过大而刚度不足，在地震时可能会产生过大的位移，影响建筑的正常使用功能，甚至导致结构失稳。因此，需要在两者之间寻求平衡。合理控制结构的高宽比是协调刚度与变形能力的重要手段之一。高宽比较大的建筑，如高层建筑，其侧向变形相对较大，需要适当增加结构的抗侧力构件来提高刚度，同时通过优化构件的设计，如采用延性较好的材料和合理的配筋构造，保证结构在较大变形下仍能保持一定的承载能力^[4]。

结束语

在对钢筋混凝土建筑结构抗震延性设计的深入探究中，我们明晰了其从基本原理到构件设计，从影响因素剖析到结构体系策略制定的全方位内涵。通过科学地把握地震作用与结构响应、精准定义延性及度量，合理设计构件、全面考量影响因素并精心规划结构体系，能够显著提升建筑在地震中的生存能力。未来，随着技术的进步与研究的深入，钢筋混凝土建筑结构抗震延性设计将持续优化，为构建更安全、更具韧性的建筑环境奠定坚实基础，保障民众生命财产免受地震灾害的严重威胁。

参考文献

- [1] 仲杰. 高层钢筋混凝土建筑结构抗震延性设计[J]. 砖瓦世界, 2024(8):16-18
- [2] 张昱. 高层钢筋混凝土建筑结构抗震延性设计[J]. 河南建材, 2023(4):80-82.
- [3] 李尧. 高层钢筋混凝土建筑结构抗震延性设计[J]. 技术与市场, 2019, 23(7):227-227.
- [4] 隋志松, 赵剑锋. 高层钢筋混凝土建筑结构抗震延性设计[J]. 百科论坛电子杂志, 2019(22):120-128.