

预应力结构抗震设计探讨

聂章博 陈精卫

黄河勘测规划设计研究院有限公司 河南 郑州 450003

摘要: 预应力结构凭借其独特的力学性能,在现代建筑工程中得到广泛应用,但在地震作用下其结构性能面临严峻考验。本文围绕预应力结构抗震设计展开探讨,阐述了概念设计、强剪弱弯、强柱弱梁及多道防线等基本原则;介绍底部剪力法、振型分解反应谱法和时程分析法等设计方法;深入分析预应力筋布置锚固、节点设计、耗能减震技术应用及结构延性设计等关键技术要点;并提出加强结构整体性、优化预应力筋设计、定期检测维护等提高抗震性能的有效措施,旨在为预应力结构的抗震设计提供理论参考与实践指导。

关键词: 预应力; 结构抗震; 设计探讨

引言: 随着建筑技术的不断发展,预应力结构以其节省材料、增大跨度、提高结构刚度等优势,在桥梁、高层建筑等工程中占据重要地位。然而,地震灾害具有突发性和巨大破坏性,预应力结构在地震作用下的安全性和可靠性成为工程领域关注的焦点。目前,传统的预应力结构设计往往侧重于静力性能,对其抗震性能的研究与设计重视不足,导致部分预应力结构在地震中出现破坏甚至倒塌。因此,深入探讨预应力结构抗震设计,明确设计原则,优化设计方法与技术要点,提出有效抗震措施,对保障建筑结构安全、减少地震灾害损失具有重要的现实意义。

1 预应力结构抗震设计的基本原则

1.1 概念设计原则

概念设计原则是预应力结构抗震设计的基石,它强调从结构整体性能出发,运用工程经验与力学概念进行宏观把控。在设计时,需综合考虑建筑场地条件、结构体型与布置等因素。例如,合理规划结构的平面与竖向布置,避免因平面不规则或竖向刚度突变导致地震时产生扭转效应或薄弱层。通过优化结构体系,使结构在地震作用下能形成合理的传力路径,确保各构件协同工作。同时,概念设计还注重对结构抗震性能的定性分析,预判结构在地震中的薄弱环节,提前采取针对性措施,从而提高结构的整体抗震能力,为后续详细设计奠定坚实基础。

1.2 强剪弱弯、强柱弱梁原则

强剪弱弯、强柱弱梁原则是保障预应力结构在地震中安全可靠的关键准则。“强剪弱弯”旨在防止结构构件在受剪破坏前先发生弯曲破坏,因为剪切破坏属于脆性破坏,具有突发性且破坏后修复困难,而弯曲破坏是延性破坏,能让结构在破坏前有明显征兆并消耗大量

地震能量。“强柱弱梁”则要求柱的承载能力高于梁,使结构在地震时梁端先于柱端出现塑性铰,形成梁铰机制,避免因柱破坏导致结构整体倒塌。在预应力结构设计中,通过合理调整构件的截面尺寸、配筋率以及预应力筋配置,实现这两个原则,有效提升结构在地震中的延性与耗能能力,增强结构的抗倒塌能力。

1.3 多道防线原则

多道防线原则是提升预应力结构抗震性能的重要策略,它强调为结构设置多个抵抗地震作用的体系或途径。在地震发生时,若第一道防线构件率先受损,后续防线能够继续承担荷载,保证结构不至于瞬间倒塌。例如,在预应力框架结构中,梁、柱作为第一道防线承受地震力,当梁柱出现一定损伤后,支撑、连梁等可作为第二道防线发挥作用,继续耗散地震能量,维持结构的整体稳定性。通过设置多道防线,不仅能分散地震作用,还能使结构在不同阶段逐步消耗地震能量,延缓结构破坏进程,为人员疏散和抗震救灾争取宝贵时间,显著提高预应力结构在地震中的生存能力^[1]。

2 预应力结构抗震设计方法

2.1 底部剪力法

底部剪力法是一种基于结构动力学的简化抗震设计方法。其原理是将结构等效为单质点体系,先计算结构总水平地震作用(即底部剪力),再按一定规律将其分配到各层。在预应力结构抗震设计中,该方法适用于高度不超过40m、质量和刚度沿高度分布比较均匀、以剪切变形为主的结构。计算时,依据结构的基本自振周期、场地类别等参数确定地震影响系数,进而得到底部剪力。底部剪力法的优势在于计算简便、效率高,能快速为设计提供初步的地震作用数据;但由于其简化程度高,无法精确考虑结构复杂的动力特性,对于体型复

杂、质量刚度分布不均匀的预应力结构, 计算结果准确性受限。

2.2 振型分解反应谱法

振型分解反应谱法是基于结构动力学理论, 将结构的地震反应分解为多个振型的线性组合。对于预应力结构, 该方法首先求解结构的自振频率、振型等动力特性, 然后根据反应谱理论, 确定各振型对应的地震作用效应, 最后通过组合规则(如平方和开方SRSS法等)得到结构总的地震作用效应。此方法适用于大多数常规的预应力结构, 相比底部剪力法, 它能更全面地考虑结构的多振型影响, 有效提高计算精度, 尤其是对于质量和刚度分布不均匀、高度较高的结构。然而, 该方法仍基于线性假定, 对于非线性地震反应显著的预应力结构, 计算结果存在一定偏差。

2.3 时程分析法

时程分析法是一种直接在时间域内对结构进行地震反应分析的方法。在预应力结构抗震设计中, 该方法选取合适的地震波(如实际强震记录或人工合成地震波), 将其作为结构的输入激励, 通过数值计算求解结构在整个地震过程中的动力响应, 包括位移、速度、加速度以及内力等随时间的变化。时程分析法能真实模拟结构在地震作用下的非线性力学行为, 考虑材料非线性、几何非线性等因素, 对复杂体型、特殊结构形式的预应力结构抗震性能评估具有重要意义。但该方法计算量大、耗时长, 且地震波的选取对计算结果影响较大, 需要专业人员进行操作和分析, 在实际工程中通常作为补充分析方法使用^[2]。

3 预应力结构抗震设计的关键技术要点

3.1 预应力筋的布置与锚固

预应力筋的布置与锚固是预应力结构抗震设计的关键环节, 直接影响结构的承载能力和抗震性能。在布置方面, 需综合考虑结构受力特点与地震作用方向, 合理确定预应力筋的走向、间距和数量。例如, 对于受水平地震作用为主的框架结构, 可在梁、柱中采用曲线配筋形式, 使预应力产生的效应能有效抵抗地震引起的弯矩和剪力; 在大跨度预应力板中, 采用双向或多向配筋, 增强结构在不同方向地震作用下的整体性。同时, 应避免预应力筋过度集中, 防止局部应力过大引发脆性破坏。锚固技术是确保预应力筋发挥作用的重要保障。在地震作用下, 锚固区需承受较大的拉拔力和反复应力, 因此锚固装置的选择与设计至关重要。常见的锚固方式有夹片式锚具、墩头锚具等, 设计时需根据预应力筋类型、直径及结构抗震要求合理选用。同时, 要加强锚固

区的构造措施, 如增加箍筋配置、设置局部加强钢筋网片等, 提高锚固区的抗裂性能和锚固可靠性。此外, 还需考虑锚固区与周边混凝土的协同工作性能, 避免因锚固失效导致预应力筋滑移, 影响结构整体抗震性能。

3.2 节点设计

节点是预应力结构中梁、柱等构件连接的关键部位, 其性能直接关系到结构在地震作用下的整体性和稳定性。在抗震设计中, 节点需满足“强节点弱构件”原则, 确保节点在地震时不先于构件破坏, 使结构能有效传递和分配内力。对于预应力混凝土框架节点, 设计时需考虑预应力筋穿过节点对节点区混凝土的削弱影响, 合理布置节点区箍筋, 提高节点核心区的约束程度, 增强其抗剪能力。同时, 优化节点处梁、柱纵筋的锚固长度和方式, 保证纵筋在地震反复荷载作用下可靠锚固, 避免发生锚固破坏。在节点构造上, 可采用加腋、增设水平加劲肋等措施, 改善节点的应力分布, 提高节点的变形能力。此外, 对于预应力钢结构节点, 需保证节点的焊接质量和连接强度, 采用合理的节点形式(如刚性节点、半刚性节点), 确保节点在地震时能有效传递弯矩、剪力和轴力, 维持结构的整体稳定性。节点设计还应考虑施工可行性, 避免因构造复杂导致施工质量难以保证, 影响结构的抗震性能。

3.3 耗能减震技术的应用

耗能减震技术通过在预应力结构中设置耗能装置, 将地震输入的能量转化为热能等其他形式的能量耗散掉, 从而减小结构的地震反应, 提高结构的抗震性能。常见的耗能装置有金属阻尼器、黏滞阻尼器、摩擦阻尼器等。金属阻尼器利用金属材料在屈服后的塑性变形耗散能量, 如软钢阻尼器, 其具有良好的滞回性能, 能在地震作用下通过反复拉压变形消耗大量能量。在预应力结构中布置金属阻尼器时, 可根据结构的薄弱部位和地震反应特点, 将其设置在梁端、柱间或支撑处, 通过合理设计阻尼器的数量和规格, 调节结构的刚度和阻尼比。黏滞阻尼器则依靠黏滞液体的运动产生阻尼力, 其耗能效率高, 对结构的附加刚度小, 适用于对结构刚度要求较高的预应力建筑。在实际应用中, 可将黏滞阻尼器与预应力支撑相结合, 形成黏滞阻尼支撑体系, 有效减小结构的层间位移。摩擦阻尼器利用摩擦面的相对滑动耗散能量, 其耗能性能稳定, 且可通过调整摩擦面的压力控制阻尼力大小。通过合理应用耗能减震技术, 不仅能降低结构在地震中的损伤程度, 还能减少主体结构的截面尺寸和配筋量, 实现经济效益与抗震性能的双赢。

3.4 结构的延性设计

结构的延性是指结构在地震等偶然荷载作用下,进入塑性变形阶段后仍能保持承载能力和变形能力的性能。良好的延性设计能使预应力结构在地震时通过塑性变形耗散能量,避免结构发生脆性破坏,从而提高结构的抗倒塌能力。在预应力结构的延性设计中,首先要合理选择结构体系和构件形式。例如,采用框架-剪力墙结构或筒体结构,相比纯框架结构,能提供更好的抗侧刚度和延性。对于构件设计,需控制构件的轴压比、剪跨比等参数,避免构件因轴压力过大或剪跨比过小发生脆性破坏。在预应力混凝土构件中,可通过增加非预应力钢筋的配筋率,改善构件的延性性能,使构件在受拉区混凝土开裂后,非预应力钢筋能继续承担拉力,延缓构件的破坏进程。此外,加强构件的箍筋配置,对核心区混凝土形成有效约束,提高混凝土的极限压应变,从而增强构件的延性。在预应力钢结构中,可采用塑性耗能铰等构造措施,使结构在地震时能在预定部位产生塑性变形,耗散地震能量^[3]。

4 提高预应力结构抗震性能的有效措施

4.1 加强结构整体性

加强结构整体性是提升预应力结构抗震性能的关键。在设计阶段,需确保结构各部分连接牢固,形成协同工作体系。例如,合理设计楼盖与梁柱的连接构造,采用现浇混凝土楼盖,增强楼盖的水平刚度,使水平地震力能有效传递到竖向抗侧力构件上;对于装配式预应力结构,优化节点连接方式,通过增加预埋件、采用灌浆套筒连接等措施,提高构件间的连接强度和整体性。同时,在结构布置上尽量减少平面和竖向的不规则性,避免因刚度突变导致地震时结构受力不均。此外,设置合理的构造措施,如在墙体中增设构造柱、圈梁,可增强结构的整体稳定性,使结构在地震作用下能更好地协同受力,降低结构因局部破坏引发整体倒塌的风险。

4.2 优化预应力筋设计

优化预应力筋设计对提升预应力结构抗震性能具有重要作用。首先,根据结构的抗震需求和受力特点,合理调整预应力筋的配置。例如,在地震作用较大的部位适当增加预应力筋数量,提高结构的初始刚度和承载能力;同时,优化预应力筋的布置形式,采用曲线配筋与直线配筋相结合的方式,使预应力产生的效应更符合结

构在地震作用下的受力状态。其次,关注预应力筋与普通钢筋的协同工作性能,通过合理设计两者的比例和间距,充分发挥各自优势,提高结构的延性和耗能能力。此外,还需考虑预应力筋的材料性能,选用延性好、疲劳强度高的预应力筋,确保在地震反复荷载作用下预应力筋不易发生断裂,从而保证结构的抗震可靠性。

4.3 定期检测与维护

定期检测与维护是保障预应力结构长期抗震性能的重要手段。随着时间推移和环境因素影响,预应力结构可能出现预应力损失、构件裂缝扩展、材料性能退化等问题,影响结构的抗震能力。因此,需制定科学合理的检测计划,定期对结构进行全面检测。利用先进的检测技术,如超声检测、雷达检测等,对预应力筋的完整性、锚固区的可靠性以及混凝土构件的内部缺陷进行检测;通过应力监测设备,实时掌握结构关键部位的应力变化情况。对于检测中发现的问题,及时采取维护和修复措施,如对预应力损失过大的部位进行补张,对裂缝进行封闭处理等。同时,建立结构健康档案,记录结构的检测和维护情况,为后续结构抗震性能评估和设计优化提供数据支持,确保预应力结构在使用期内始终保持良好的抗震性能^[4]。

结束语

预应力结构抗震设计关乎建筑安全与社会稳定,通过遵循概念设计、强剪弱弯等基本原则,运用底部剪力法等设计方法,把控预应力筋布置锚固等关键技术要点,采取加强整体性等有效措施,能够显著提升结构抗震性能。然而,随着建筑功能多样化与地震环境复杂性增加,预应力结构抗震设计仍面临诸多挑战。

参考文献

- [1]张科科,李志强. 预应力混凝土结构的抗震性能分析[J].建筑科学,2023.135-136
- [2]刁小江,徐颖,陈鹏. 预应力混凝土结构设计要点探讨[J].市政工程,2020.165-167
- [3]张依泽. 预应力混凝土结构设计要点探讨[J].市政工程,2020.210-211
- [4]张凯;田国昌;等. 无粘结预应力抗震性能分析及抗震设计要求[J].建筑设计及理论,2002.245-246