

基于中震正常使用的某混合减震结构设计

周慧芳

河北建筑设计研究院有限责任公司, 河北 石家庄 050000

[摘要]随着我国国民经济和城市化水平的发展,我国对建筑的防灾减灾能力提出了更高的要求,“中震正常使用”作为严苛的量化性能目标应运而生,其核心要求结构在设防地震下最大弹性层间位移角控制在范围内,即当遭受相对于本地区抗震设防烈度地震影响时,应保证能够正常使用要求。为精准实现这一目标,混合减震技术凭借不同减震装置的性能互补性,可通过“1+1>2”的协同效应高效耗散地震能量、控制结构响应。文章提出的一体化协同设计方法,以性能目标为导向,通过性能指标设定,减震方案初设,精细化建模与非线性时程分析等,形成迭代流程,将主体结构与减震元件视为有机整体进行全局优化。

[关键词]中震正常使用;混合减震;性能目标;协同设计;抗震设计

DOI: 10.64635/ja.2026.1104

中图分类号: TU352.1

文献标识码: A

Design of a Hybrid Seismic Control Structure for Normal Operation under Moderate Earthquakes

Zhou Huifang

Hebei Architectural Design and Research Institute Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, Hebei, China

Abstract: With the development of China's national economy and urbanization, higher requirements have been placed on the disaster prevention and mitigation capacity of buildings. "Normal operation under moderate earthquakes" has therefore emerged as a stringent quantitative performance target. Its core requirement is that the maximum elastic interstory drift ratio of a structure under the design fortification earthquake should be controlled within a specified range, that is, when subjected to an earthquake corresponding to the seismic fortification intensity of the region, the structure should remain capable of normal use. To achieve this target precisely, hybrid seismic control technology, by virtue of the complementary performance of different energy dissipation devices, can efficiently dissipate seismic energy and control structural response through a synergistic effect in which "1+1> 2." The paper proposes an integrated collaborative design method oriented toward performance objectives. Through performance index setting, preliminary design of the seismic control scheme, refined modeling, and nonlinear time-history analysis, an iterative process is established in which the main structure and the seismic control components are treated as an integrated whole for global optimization.

Keywords: normal operation under moderate earthquakes; hybrid seismic control; performance objective; collaborative design; seismic design

引言

中国的《建筑抗震设计规范》(GB 50011)采用“小震不坏、中震可修、大震不倒”的三水准设防目标,过去数十年来为保证人们的生命财产安全作出极大贡献。面对城市功能复杂化和社会运行对连续性的高度依赖,只满足“中震可修”——即结构遭到破坏但可以维修恢复正常工作状态——对于重要的公共建筑如医院、学校、交通枢纽、数据中心等而言是远远不够的。其不可抗力强度引起的长

时间停运以及过高的维修费用会对社会经济造成更大的损失,因而,如何把重要的公共建筑的地震需求性能目标从“中震可修”提升至“中震正常使用”或“中震后功能可快速恢复”,已经成为当下发展趋势。这一趋势与国家近年来强调提升基础设施抗灾韧性、推动高质量发展的政策导向高度契合。相关政策不断推动抗震设计标准的更新与完善,鼓励采用隔震、消能等先进技术,以实现超越规范基本要求的更高性能水准。

1 中震正常使用性能目标与混合减震理论

1.1 中震正常使用性能目标

“中震正常使用”高于中国现行抗震设计规范中“中震可修”的性能目标。“中震可修”是规范中使用的定性性能目标，指设防烈度地震（“中震”）下主体结构可能出现开裂等损伤，但是这些损伤处于可控范围并且是可修复的，在完成修复后可继续使用。但是，“中震可修”并没有明确规定“可修”的损伤程度、修复成本和修复时间的具体量化指标。

相比之下，“中震正常使用”意指结构在设防地震作用下主体结构基本保持弹性或者仅出现一些极轻微的损伤，填充墙、幕墙、机电设备等非结构构件也得以较好的控制破坏程度，使得建筑在震后无需修理或仅需极少量非结构性修复即可恢复其预定功能。这一定义更接近于国际上基于性能抗震设计（PBDE）中的“立即使用”性能水准。对其进行量化转化并细化为可在工程设计过程中落地可操作性标准：建筑的层间位移角是用于衡量整个结构以及所有非结构构件是否受到损伤的重要指标，国内外多有专家建议，“中震正常使用”状态下，设防地震的最大弹性层间位移角限值应严格控制在以内。需要特别强调的是，此处所控制的位移角是在中震作用下结构保持弹性工作状态时的变形指标。根据《建筑抗震设计规范》(GB 50011)第5.5.1条，弹性层间位移角是针对多遇地震（小震）的验算指标，而为实现“中震正常使用”这一更高性能目标，需将弹性状态的验算水准提高至设防地震（中震）。

严格限制结构在中震下的弹性层间位移角值，是为了确保主体结构在中震下始终保持弹性，从而最大限度地减小主体结构损伤，并有效保护非结构构件及内部设施，使结构在遭受设防烈度地震后仍能维持预定使用功能。

1.2 混合减震技术的基本原理

混合减震技术是指在同一结构体系中组合使用两种或两种以上不同类型或不同工作机理的减震/隔震装置，以期发挥各装置的优势，实现“1+1>2”的减震效果，从而更经济、高效地实现预设的抗震性能目标。这种技术的理论基础在于不同减震元件在耗散地震能量、控制结构位移或加速度响应方面具有互补性。在工程实践中，最常见的混合减震形式之一是“隔震+消能”的组合，例如在隔震层中同时设置橡胶隔震支座和粘滞阻尼器。其基本工作原理是：橡胶隔震支座通过其水平方向的柔性，显著延长结构的自振周期，将结构从地震动能量集中的高频区域“错开”，从而大幅降低地震作用向上传递的能量。

然而，单纯采用隔震体系会造成隔震层过大的水平位移。此时，叠加在隔震层上的并联粘滞阻尼器，通过粘性流体在结构振动过程中产生的与速度有关的阻尼力，把结构的动能转变成热能消耗掉，达到控制隔震层位移的效果，进而吸收和耗散一部分地震能量，使整个系统更加安全稳定。另一种常见的混合减震形式是在上部结构中组合使用不同类型的消能器，例如“位移相关型”的屈曲约束支撑（BRB）与“速度相关型”的粘滞流体阻尼器（VFD）的组合。屈曲约束支撑在较小的位移下即可屈服，提供稳定且饱满的滞回耗能能力，有效增加结构的刚度和承载力；而粘滞阻尼器则在结构运动速度较大时提供显著的附加阻尼，尤其对控制高阶振型和加速度响应十分有效。

二者的联合使用以在中小地震~大地震整个宽频带范围内有效耗散能量、协调控制结构位移和内力响应，以求达到如“中震正常使用”的高性能目标。

2 面向中震正常使用的混合减震结构设计方法

2.1 总体设计流程

一般情况下，消能减震结构设计过程均采用“两阶段”或“拆分”的设计方法，即先完成主体结构设计，再加装消能装置进行抗震性能校核及加强。但是，在上述过程中，并没有同时考虑主体结构与消能减震元件所形成的系统，不能取得较好的效果，也不能实现最佳的整体性能。针对“中震正常使用”的严苛性能目标，从主体结构和消能减震元件两个方面同时考虑，将其作为一个有机整体来考虑的“一体化”或“协同化”的设计方法更加适宜。因此，基于目标的迭代优化方法可用于实现整体性能最优化。

一般来讲，整个总体设计流程可以分为以下几个步骤。第一步，确定性能目标和设计准则。即明确定义“中震正常使用”的性能目标，分解成具体量化的控制指标，例如设防地震下层间位移角限值（例如1/250）、构件损伤状态、楼层加速度限值等。第二步是进行主体结构和减震方案的设计，根据建筑的功能、结构形式、场地条件等确定主体结构，采用混合减震技术方案，如隔震+阻尼器、BRB+粘滞阻尼器等，确定减震元件的类型、数量以及布置位置等。第三步是建立一体化分析模型，在结构分析软件（ETABS, SAP2000等）中建立考虑主体结构和减震元件非线性特性的精细化的整体计算模型，减震元件的力学模型能准确反应该构件的滞回耗能特性。第四步是进行基于性能的非线性时程分析，取合适的人工或者天然地震波条数（不少于3条），进行弹塑性时程分析，查看结构在设防地震下各项性能指标，包括层间位移角、顶点位移、

基底剪力、楼层加速度、元件耗能等，是否满足前面设定好的性能目标。如果未达到，则调整设计。这是协同设计的一个重点步骤，由于调整的对象除了减震元件参数外，还涉及到了主体结构的构件截面、刚度分布等内容，因此只有通过二者不断进行迭代计算，才能得到主体结构及减震元件之间最优化的匹配效果。第六步，多水准抗震验算及最终设计，在满足“中震正常使用”目标的同时，还需要依据规范要求，分别按小震和大震作用分别对结构的性能进行验算，保证能够达到“小震不坏”、“大震不倒”的基本设防要求，据此完成结构施工图设计。

2.2 关键设计参数的确定

对于面向“中震正常使用”的混合减震结构而言，准确确定各关键设计参数是满足其预期目标的基本保证，其中附加阻尼比和位移限值是两个最为关键的参数。附加阻尼比是衡量消能减震系统耗能能力的指标之一，代表的是消能器所提供的能量耗散量占结构阻尼能量耗散量的比例。在设计之初可通过一些性能目标(如位移降低率)以及规范反应谱法得到相应的附加阻尼比值，在此基础上通过详细的非线性分析反复迭代修正获得合理的附加阻尼比。基于性能的设计允许设计人员按照结构的响应来调节消能器的参数，达到目标附加阻尼比，将结构震后响应控制在所预设的性能范围之内。如改变粘滞阻尼器的阻尼系数或者速度指数、改变屈服约束支撑的个数或者屈服力都可直接影响系统的总耗能能力和附加阻尼比。位移限值，特别是层间位移角限值是实现“中震正常使用”性能目标最直接的控制指标。为了确保结构及非结构构件在设防地震下基本完好，采用比常规设计更为严格的层间位移角限值，例如1/250或更小。该限值的确定应综合考虑建筑的重要性、使用功能、内部装修和设备对变形的敏感程度等因素。所有关于主体结构和减震元件的协同优化调整，最终都必须以确保结构在设防地震下的最大层间位移角不超过此限值为目标。通过基于位移的抗震设计方法，将性能目标直接与位移控制相结合，使得设计过程更加清晰、高效，确保最终成果能够精准达成“中震正常使用”的要求。

3 工程实例分析

为更具体地阐述上述设计方法，本章以某医院综合楼为工程背景，进行基于“中震正常使用”性能目标的混合减震设计。

3.1 工程概况与性能目标

某医院综合楼，地上12层，地下2层，主体结构高度为49.8m，采用钢筋混凝土框架-核心筒结构体系。建筑

抗震设防类别为重点设防类(乙类)，设防烈度为8度(0.20g)，设计地震分组为第二组，场地类别为III类。鉴于其作为生命线工程的重要地位，业主明确提出高于规范基本要求的抗震性能目标：要求在设防地震(中震)作用下，结构最大弹性层间位移角不大于1/250，主体结构构件基本保持弹性，非结构构件损坏轻微，确保震后建筑能够立即恢复正常使用功能。

3.2 混合减震方案设计

初步分析表明，纯抗侧力结构在中震下的最大弹性层间位移角约为1/180，远超1/250的目标限值。为此，采用混合减震技术进行加强。

BRB为位移型阻尼器，主要用以提供附加刚度，并在地震中率先屈服耗能，保护主体结构；VFD为速度型阻尼器，主要用以提供附加阻尼，抑制结构的地震响应，特别是控制楼层的加速度反应。经多轮协同优化迭代，最终确定在结构的楼梯间及设备井道周边共布置32根BRB，其屈服承载力从1500kN~3000kN不等；在结构的两个主轴方向共布置24套VFD，阻尼系数 $C=400\text{kN}\cdot(\text{s/m})0.3$ ，速度指数 $\alpha=0.3$ 。

3.3 非线性时程分析与性能验核

采用ETABS建立结构整体有限元模型，BRB采用Plastic(Wen)单元模拟，VFD采用Damper单元模拟。选取5条天然波和2条人工波进行设防地震(中震)下的弹性时程分析(结构保持弹性，仅阻尼器体现非线性特性)。分析结果表明，在多条地震波作用下，结构最大弹性层间位移角出现在第8层，平均值为1/278，最大值包络值为1/265，均小于1/250的限值要求。所有主体结构构件(梁、柱、墙)在中震组合下的承载力均满足弹性设计要求。VFD与BRB耗能显著，结构总的等效附加阻尼比达到8.5%，有效控制了结构响应。

3.4 多水准抗震验算

在满足中震性能目标的同时，按规范要求补充了小震(多遇地震)和大震(罕遇地震)下的验算。小震下，结构完全处于弹性，各项指标满足规范要求。大震下，对结构进行弹塑性时程分析，结构最大弹塑性层间位移角为1/135，小于规范1/100的限值，满足“大震不倒”的设防要求。结果表明，该混合减震设计方案全面满足了预设的各水准抗震性能目标。

4 结束语

在当前中国致力于建设韧性城市、追求高质量发展的时代背景下，将建筑抗震性能目标从传统的“中震可修”

提升至“中震正常使用”具有深远的社会和经济意义。这是对人民生命安全保障的深化,对维持社会核心功能在灾后正常运转的关键举措。研究表明,混合减震技术凭借其高效、灵活的能量耗散与响应控制能力,为实现这一高级别性能目标提供了可靠的技术保障。

展望未来,该领域仍有值得深入探索的方向。一方面,需要进一步完善和细化“中震正常使用”性能目标的量化指标体系,特别是针对不同类型的非结构构件建立更精确的损伤评估标准。另一方面,应大力发展高效的协同优化设计平台与智能化算法,简化复杂结构的迭代设计过程,推动协同设计理念在工程实践中的标准化应用。

[参考文献]

[1]魏勇,閻东东,刘谦敏.某高校学生宿舍楼基于保持建筑正常使用功能的隔震设计[J].建筑结构,2025,55(19):141-149.

[2]曾德民,王斌,刘立德.基于满足正常使用要求的钢框架

医疗建筑减震对比分析[J].工程抗震与加固改造,2025,47(04):113-122.

[3]张晔.医疗建筑满足中震正常使用要求的设计分析[C]//中国建设科技集团股份有限公司,中南建筑设计院股份有限公司,湖北省勘察设计协会,湖北省土木建筑学会.第十届建筑结构技术交流会论文集(上册).同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司,;2025:214-218.

[4]林君威.上海某中学混凝土框架宿舍楼满足中震正常使用要求的分析与设计[C]//中国建设科技集团股份有限公司,中国建筑第八工程局有限公司,中国建筑第四工程局有限公司,亚太建设科技信息研究院有限公司,《建筑结构》杂志社.2024年建筑结构技术交流会论文集(第二册).同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司,;2024:198-202.

作者简介:周慧芳(1985.08—),毕业院校:大连理工大学,所学专业:结构工程,当前就职单位:河北建筑设计研究院有限责任公司,职称级别:高级工程师。