

基于中震设计的高烈度区框架结构减隔震方案对比分析

吴国强 杜微笑

云南震研减震科技有限公司 云南 昆明 650500

【摘要】国务院于2021年07月公布了《建设工程抗震管理条例》，该条例规定部分区域一些重要建筑应当按照国家有关规定采用隔震减震等技术，保证发生本区域设防地震时能够满足正常使用要求，这标志着我国减隔震结构设计进入了中震设计阶段。由于目前采用中震设计的减隔震结构较少，经验欠缺，研究不足，本文针对高烈度区的一栋框架结构，采用不同的减隔震方案，在保证结构满足规范各项指标的前提下，对比了上部结构的技术指标、经济指标、施工指标及后期维护指标，以期为其他采用中震设计的减隔震结构设计提供参考价值。

【关键词】中震设计；减震方案；隔震方案；指标对比

DOI:10.12417/2811-0722.26.01.063

引言

《建设工程抗震管理条例》（以下简称条例）于2021年9月1日开始实施。条例第十六条规定建筑工程根据使用功能以及在抗震救灾中的作用等因素，分为特殊设防类、重点设防类、标准设防类和适度设防类。位于高烈度设防地区、地震重点监视防御区的新建学校、幼儿园、医院、养老机构、儿童福利机构、应急指挥中心、应急避难场所、广播电视台等建筑应当按照国家有关规定采用隔震减震等技术，保证发生本区域设防地震时能够满足正常使用要求。基于以上要求，位于高烈度区的学校等建筑在进行设计时，不仅需要采用减隔震技术，还需要进行中震设计，以保证中震正常使用。

在《条例》实施的同年，《建筑隔震设计标准》（GB/T51408-2021）（以下简称《隔标》）也发布实施，其中“中震基本弹性”的设计要求与条例中“保证发生本区域设防地震时能够满足正常使用要求”的规定完美契合。也标志着从那时起，采用隔震设计的高烈度区的学校、医院等建筑，当采用《隔标》设计时，满足中震设计要求。

在《条例》实施的次年，云南省工程建设地方标准《建筑消能减震应用技术规程》（DBJ53/T-125-2021）也颁布实施，其余各省也相继颁布实施了相应技术规程。规程中要求抗震设防烈度8度及以上地区、地震重点监视防御区的新建学校、幼儿园、医院、养老机构、儿童福利机构、应急指挥中心、应急避难场所、广播电视台等采用消能减震技术的建筑，当遭受相当于本地区设防烈度的地震影响时，主体结构基本不受损坏或不需修理即可继续使用，且非结构构件和附属设备满足正常使用要求。该规程的颁布实施，意味着在云南省内高烈度区的学校、医院等建筑，当采用减震设计时，结构本身需进行中震设计。

以上文件逐步实施后，在云南省高烈度区的学校建筑，无论采用减震技术，还是隔震技术，均要进行中震设计。那么当采用不同的减隔震方案，对建筑结构的结果指标是有差别的，但差别具体有多大，当前可供查阅参考的资料甚少，需要进一步的研究及经验积累。

本文选用一栋位于高烈度区（云南省昆明市）的学校建筑，对不同减隔震方案进行分析，通过对比各项结果指标，得出结论以便于工程应用参考。本文采用四种减隔震方案进行对比分析，分别是：屈曲约束支撑方案、黏滞阻尼器方案、屈曲约束支撑和黏滞阻尼器混合方案、橡胶隔震支座方案。

1 工程概况

该建筑功能是教学楼，上部结构6层，无地下室，建筑总面积约8573.44m²。该项目位于8度区，基本地震加速度为0.2g，设计地震分组为第三组，场地类别为III类，特征周期0.65s。由于该建筑为中学教学楼，抗震设防类别为重点设防，安全等级一级，结构重要性系数为1.1。场地处于抗震一般地段，无边坡放大系数；且周边10km以内无发震断裂带，因此不考虑近场效应放大系数。建筑标准层平面如图1所示：



图1 建筑标准层平面图

2 减隔震技术实现方法

本文采用的减隔震技术分别为：屈曲约束支撑减震、黏滞阻尼器减震、屈曲约束支撑与黏滞阻尼器混合减震，以及橡胶支座隔震技术。下边将依次介绍这几种减隔震技术的实现方法。

2.1 屈曲约束支撑减震

屈曲约束支撑是天然拉压稳定的钢支撑，不会发生屈曲，解决了普通钢支撑失稳破坏的问题，使钢支撑在受拉和受压时性能一致，从而提高了钢材的利用率。屈曲约束支撑是一种最经济的抗侧力构件，它既能提高结构的刚度和承载力，又不影响建筑采光和内部空间的分割，且施工方便。

屈曲约束支撑在结构计算模型（YJK/PKPM）中的实现，

主要是通过等代类实心箱型钢撑来体现其刚度的贡献。屈曲约束支撑在小震下可做到不屈服，在大震下进入屈服耗能状态，从而起到耗散地震能量，保护主体结构的作用。

2.2 黏滞阻尼器减震

黏滞阻尼器一般由缸体、活塞和粘性液体所组成，如图2所示。缸体内装有粘性液体，液体常为硅油或其他粘性流体，活塞上开有小孔。当活塞在缸体内做往复运动时，液体从活塞上的小孔通过，对活塞和缸体的相对运动产生阻尼，从而消耗震动能。

黏滞阻尼器不提供刚度，仅为结构提供附加阻尼比，因此如何准确的评估黏滞阻尼器为结构附加的阻尼比大小，就成了黏滞阻尼器减震设计的重中之重。根据《建筑抗震设计规范》（GB50011-2010）（以下简称《抗规》）的第12.3.4条：消能部件附加给结构的有效阻尼比可以通过计算结构应变能、阻尼器耗能，进而求出附加阻尼比。也可以采用能量法，即通过可以统计能量的软件，将结构阻尼耗能和阻尼器耗能提取出来，进行类比，计算得出黏滞阻尼器的附加阻尼比，本文采用规范中的附加阻尼比计算方法。

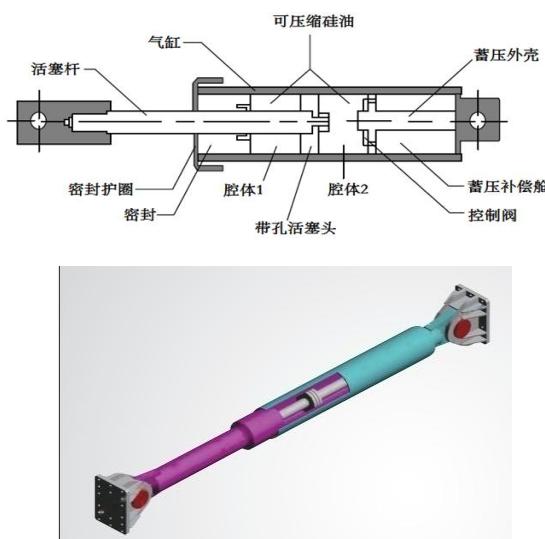


图2 黏滞阻尼器构造组成

2.3 屈曲约束支撑与黏滞阻尼器混合减震

屈曲约束支撑与黏滞阻尼器混合减震形式是近年来出现较多的一种组合形式。由前两节可知，在中震下，屈曲约束支撑为结构提供附加刚度，黏滞阻尼器为结构提供附加阻尼比，两者互不干扰，且能相辅相成，为计算分析提供了方便。在大震下，屈曲约束支撑进入屈服，开始耗能，配合黏滞阻尼器，把大震下减震耗能提到一个很高的水平，从而更好的保护主体结构安全。

由于《云南省建筑消能减震应用技术规程》的实施，针对云南省的减震项目，提出了大震下减震耗能占比的指标要求。而单一采用某一种减震形式，很难满足大震下耗能指标要求，

因此混合减震成为当下云南省减震项目的首选方案。

在结构模型中，采用等代钢支撑模拟屈曲约束支撑，采用提高结构阻尼比的方式模拟黏滞阻尼器对结构的影响。前两节已分别描述，此处不再赘述。

2.4 橡胶支座隔震技术

隔震结构主要是通过改变结构振动特性，延长结构周期来减少水平地震能量的输入，因此要求隔震前结构不能过柔，否则会导致隔震效果减弱。目前常用的隔震支座主要有橡胶隔震支座及滑移摩擦摆支座，本文对比项目采用的为橡胶隔震支座。橡胶隔震支座是由多层橡胶和多层钢板或其他材料交替叠置结合而成的隔震装置，又称叠层橡胶隔震支座，目前常用的橡胶隔震支座有两种：天然橡胶支座和铅芯橡胶支座。隔震支座类型示意详图3。

本文采用的隔震技术设计方法是基于《隔标》的整体分析设计法。整体分析设计法对比传统分部设计法区别在于：整体分析设计法将隔震层及隔震支座全部建入模型中进行分析，一体化的来考虑隔震支座的作用及支墩的设计。在设防地震作用下，采用复振型分解反应谱法迭代计算隔震结构模型，最终确定整体模型。相对于传统的分部设计法，整体分析设计法更能反应隔震结构的实际特性和真实的地震响应。

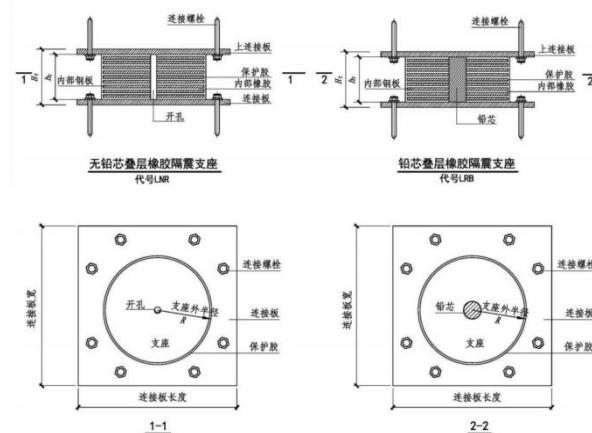


图3 叠层橡胶支座类型

3 方案设计及结果指标

为了便于对比分析，本文中所有减隔震方案的目标统一满足以下几点：①采用减隔震技术后，设防地震作用下，层间位移角满足1/400（I类框架结构）；②结构构件设计基本满足设计要求（超配筋、抗剪等）；③所有构件性能满足相应《隔标》和云南省地标及抗震专审技术要点要求；④所有减震方案，在罕遇地震作用下，减震耗能占比均满足25%的要求；⑤隔震方案，在罕遇地震作用下，满足《隔标》相关的要求（支座位移、拉应力等）。

3.1 屈曲约束支撑方案

在建筑1~5层，每层X向设置12根支撑，Y向设置14根支撑，根据建筑功能，短向多隔墙，布置位置相对简单，长向窗户居多，不可避免的影响一些开窗功能，同时根据跨距大小，大部分位置布置人字撑，少部分位置布置单斜撑，布置位置详见图4，结构三维模型如图

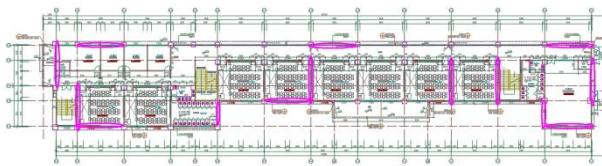


图4 标准层屈曲约束支撑方案布置图

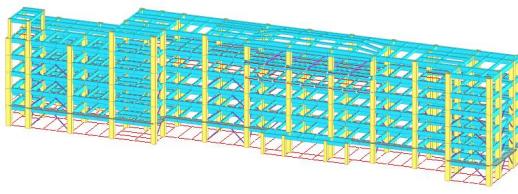


图5 屈曲约束支撑减震结构三维图

经分析计算，此方案最终屈曲约束支撑的吨位在700kN~1200kN，中震下层间位移角为X向1/465，Y向1/472，满足1/400的要求，结构构件配筋无超筋，满足性能目标要求。在罕遇地震下，减震耗能占比为X向26.0%，Y向25.4%，满足云南省地标要求。具体结构指标如表1所示。

表1 屈曲约束支撑方案结构指标

方案	屈曲约束支撑
主要截面-主梁	400×900、400×1100、400×1200
主要截面-柱	1000×1000、1000×900、900×900
钢筋(kg)	612358.8
混凝土(m ³)	2954.76
减震器数量(套)	103
减震器型号	BRB-700~1200
施工周期(工作日)	20
施工难度	难
对建筑功能的影响	大
后期维护	免维护

3.2 黏滞阻尼器方案

本方案采用悬臂墙墩式的黏滞阻尼器，在建筑平面2~5层，每层每向各设置7个阻尼器。根据建筑功能，短向多隔墙，阻尼器可隐藏在墙体里，布置位置相对简单，长向窗户居多，由于阻尼器墙墩长度为1500mm，所以可选用局部窗间墙布置阻

尼器，对建筑功能的影响极小。布置位置详见图6，结构三维模型如图7所示。



图6 标准层黏滞阻尼器方案布置图

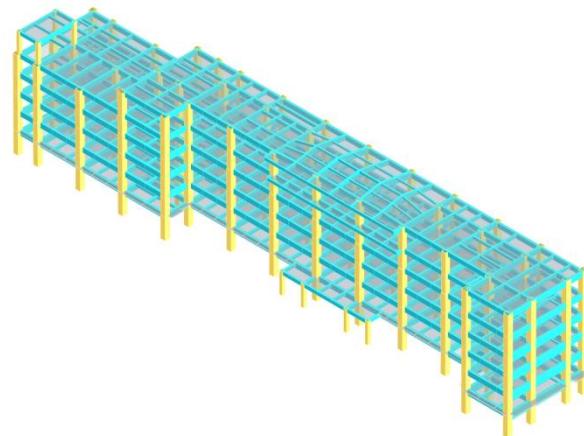


图7 黏滞阻尼器减震结构三维图

经分析计算，此方案最终黏滞阻尼器的吨位在500kN以内，结构附加阻尼比为2.0%。中震下层间位移角为X向1/445，Y向1/442，满足1/400的要求，结构构件配筋无超筋，满足性能目标要求。在罕遇地震下，减震耗能占比为X向28.7%，Y向33.6%，满足云南省地标要求。具体结果指标如表2所示。

表2 黏滞阻尼器方案结果指标

方案	黏滞阻尼器
主要截面-主梁	400×1100、400×1000、400×900
主要截面-柱	1000×1000、900×900
钢筋(kg)	660210
混凝土(m ³)	3087.39
减震器数量(套)	56
减震器型号	VFD500
施工周期(工作日)	10
施工难度	易
对建筑功能的影响	小
后期维护	第30年抽检

3.3 屈曲约束支撑和黏滞阻尼器混用方案

本方案采用屈曲约束支撑和悬臂墙墩式黏滞阻尼器混用的方案。黏滞阻尼器布置在建筑2~4层，每层每向设置4个，共24个；屈曲约束支撑布置在建筑1~3层，每层X向8根，Y向10根，共53个。此方案中屈曲约束支撑为结构提供刚度，

黏滞阻尼器仅为满足在罕遇地震下减震耗能占比要求。阻尼器布置位置详见图8(红色为屈曲约束支撑,蓝色为黏滞阻尼器),结构三维模型如图9所示。



图8 混合减震方案布置图

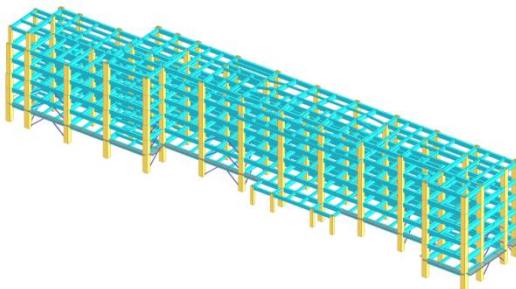


图9 混合减震结构三维图

经分析计算,此方案最终黏滞阻尼器的吨位在500kN以内,屈曲约束支撑吨位在900kN~1200kN;中震下层间位移角为X向1/414, Y向1/411,满足1/400的要求,结构构件配筋无超筋,满足性能目标要求。在罕遇地震下,减震耗能占比为X向29.3%, Y向27.6%,满足云南省地标要求。具体结果指标如表3所示。

表3 屈曲约束支撑和黏滞阻尼器混用方案结果指标

方案	屈曲约束支撑和黏滞阻尼器混用
主要截面-主梁	400×1100、400×1000、400×900
主要截面-柱	1000×1000、900×900
钢筋(kg)	648441
混凝土(m ³)	2941.95
减震器数量(套)	53个BRB、24个VFD
减震器型号	BRB900~1200, VFD500
施工周期(工作日)	15
施工难度	一般
对建筑功能的影响	一般
后期维护	黏滞阻尼器第30年抽检, BRB免维护

3.4 橡胶隔震支座方案

本方案为橡胶隔震支座方案,在基础与首层之间增加一个隔震夹层,层高2m。隔震支座采用一柱一墩,一墩一支座的形式布置,共采用48个支座,隔震支座布置方案详见图9。由于隔震层位于室外地坪以下,对上部建筑功能没有任何影响,

但是由于隔震层对隔震间距的要求,需在建筑周边采用特殊的可复位隔震构造(隔震沟),保证罕遇地震作用下结构在隔震层处能够自由滑动。结构三维模型如图10所示。

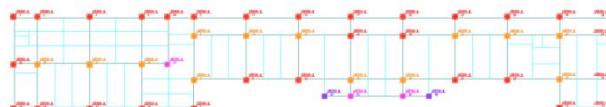


图9 隔震支座布置图

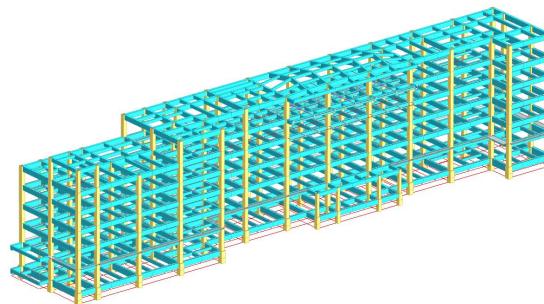


图10 隔震结构YJK三维模型图

经分析计算,此方案隔震支座型号采用型号为: LRB700、LRB800、LNR700;隔震后结构第一周期为2.8323s,中震下层间位移角为X向1/694, Y向1/668,满足1/400的要求,且有较大安全余量,且结构构件配筋无超筋,满足性能目标要求。在罕遇地震下,支座位移为325mm,小于支座位移限值,最大拉应力为0.23MPa,最大压应力为13.03MPa,满足规范要求。其他指标(偏心率、重力荷载代表值下面压等)亦均满足《隔标》要求。具体结果指标如表4所示。

表4 橡胶隔震支座方案结果指标

方案	橡胶隔震支座方案
主要截面-主梁	400×900
主要截面-柱	700×700
钢筋(kg)	414634.0
混凝土(m ³)	3104.469
隔震支座数量(套)	48个(41-〇800; 7-〇700)
隔震支座型号	LRB700、LNR700、LRB800、LNR800
施工周期(工作日)	10
施工难度	易
对建筑功能的影响	无
后期维护	定期巡检

4 经济性对比分析

对于建设方而言,一栋建筑在满足结构安全的前提下,投资成本是其最关注的指标,也是评价结构方案的重要指标。本节针对上述4种方案的最终造价进行同等条件比选,预估钢筋单价每吨5000元,混凝土单价每方400元;屈曲约束支撑单

价按每根2w,黏滞阻尼器单价按1.8w估算,隔震支座直径700的单价2万元,直径800的单价3万元(与现有定额价有一定差异性,此处仅用于方案对比);屈曲约束支撑安装单价每根1500元,黏滞阻尼器安装单价每个800元,隔震支座安装单价800元。结果如表*所示:

方案1: 屈曲约束支撑方案;

方案2: 黏滞阻尼器方案;

方案3: 屈曲约束支撑和黏滞阻尼器混合方案;

方案4: 橡胶隔震支座方案

表5 经济性指标对比表

名目	方案1	方案2	方案3	方案4
钢筋(kg)	612358.8	660210	648441	414634.0
混凝土(m ³)	2954.76	3087.39	2941.95	3104.469
钢筋总价(万)	306	330	324	207
砼造价(万)	118	123	118	124
减震器/隔震支座造价(万)	206	101	149	137
施工费用(万)	16	5	10	4
合计(万)	646	559	601	472

5 结论

本文通过对一栋高烈度区学校教学楼的对比分析,将四种

参考文献:

- [1] GB/T51408-2021 建筑隔震设计标准[S].北京:中国计划出版社,2021.
- [2] DBJ53/T-125-2021 建筑消能减震应用技术规程[S].昆明:云南科技出版社,2021.
- [3] 22G610-1 建筑隔震构造详图[S].北京:中国标准出版社,2023.
- [4] 李晓玮,施卫星,王建峰,虞终军.某框架结构减、隔震方案对比[J].结构工程师,2018,34(4):1-7.
- [5] 陈晓彬,文兴红,潘杰,徐意翔.建筑工程减隔震设计对比分析——基于《建设工程抗震管理条例》[J].价值工程,2022.06(024):74-76.
- [6] 徐芳,赵昕,舒睿彬.高烈度区多单体整体结构减隔震方案选型与集成优化[J].建筑结构,2023,53(S1):930-935.
- [7] 赵昕,杜冰洁,李浩.超高层建筑黏滞阻尼器及屈曲约束支撑混合减振结构系统集成优化设计[J].建筑结构学报,2020,41(3):25-35.

不同减隔震方案的结果进行对比总结,并最终通过经济性指标对比,得出如下结论:

(1) 基于中震设计的高烈区多层框架结构,采用隔震方案比减震方案更节约成本。

(2) 当无法采用隔震方案时,从经济性、建筑功能的影响方面出发,优先采用混合减震方案。

(3) 从施工难易程度来讲,隔震施工集中于隔震层,减震施工分布于上部结构,隔震施工更简单易行,且综合考虑上部结构含钢量的因素,隔震结构上部含钢量低,提高了劳动效率,可达到节约工期的目的。

(4) 从中震作用下的层间位移角结果可看出,隔震结构预留的安全余量更大,当遭遇实际地震时,隔震结构安全度更高。

(5) 由于隔震结构的震害主要集中于隔震层,震后修复更快。减震方案中,减震器分布于上部各个楼层,震后修复工作量大,且修复时间较长。

(6) 针对减震方案中,还应计入消能子结构罕遇地震作用下增加的含钢量,因此在高烈度区框架结构中,减震方案的隐性成本更高。