

文章编号:1000-1301(2022)06-0001-11

DOI:10.13197/j.eeed.2022.0601

从泸定6.8级地震看建筑隔震技术发展亟待解决的问题

戴君武^{1,2},柏文^{1,2},周宝峰^{1,2},刘荣恒^{1,2}

(1.中国地震局工程力学研究所 地震工程与工程振动重点实验室,黑龙江 哈尔滨 150080;

2.地震灾害防治应急管理部重点实验室,黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要:2022年9月5日12时52分,四川省甘孜州泸定县发生6.8级地震,文中以地震震后现场调查获得的7栋隔震建筑震害表现为依据,重点描述了调查所发现的隔震橡胶支座破坏、隔震配套黏滞阻尼器破坏以及隔震构造破坏等3类破坏现象。并以震中附近磨西镇中心烈度台获得的强震动记录特征分析为基础,对上述3类破坏现象产生的原因进行了分析讨论。进一步结合破坏原因分析结果,对目前我国建筑隔震技术发展亟待解决的技术问题给出了建议。

关键词:泸定6.8级地震;震害;隔震橡胶支座;黏滞阻尼器;隔震构造

中图分类号:TU352.1^{·2}

文献标识码:A

Urgent problems need to be solved in the development of seismic base isolation for buildings from the Luding M_s 6.8 earthquake

DAI Junwu^{1,2}, BAI Wen^{1,2}, ZHOU Baofeng^{1,2}, LIU Rongheng^{1,2}

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China; 2. Key Laboratory of Earthquake Disaster Mitigation, Ministry of Emergency Management, Harbin 150080, China)

Abstract: At 12:52 on September 5, 2022, an earthquake of magnitude M_s 6.8 occurred in Luding County, Ganzi Prefecture, Sichuan Province. Based on the seismic performance of 7 base isolation buildings observed during the post-earthquake field investigation, this paper describes 3 typical seismic damage types, which are rubber bearing damage, viscous fluid damper damage and constructional measure damage. Characteristic analyses of the strong ground motions are conducted, which are recorded by the seismic intensity meter located at the center of Moxi town close to the epicenter. The causes of the 3 damage types are discussed. As well, with these analyses and discussion, the suggestions are provided to the urgent problems need to be solved in the development of base isolation for buildings in China.

Key words: the Luding M_s 6.8 earthquake; seismic damage; seismic base isolation rubber bearing; viscous fluid damper; construction measure for seismic isolation

收稿日期:2022-10-25; 修订日期:2022-11-29

基金项目:中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项资助项目(2021EEEVLO312);国家自然科学基金项目(52078471,52008382)

Supported by: Scientific Research Fund of Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration(2021EEEVLO312); National Natural Science Foundation of China(52078471,52008382)

作者简介:戴君武(1967-),男,研究员,博士,主要从事地震工程研究. E-mail:junwu@iem.ac.cn

通讯作者:柏文(1990-),男,副研究员,博士,主要从事减隔震技术研究. E-mail:baiwen@iem.ac.cn

引言

自20世纪90年代初第一座隔震建筑落成以来,以叠层橡胶支座应用为标志的现代建筑隔震技术在我国已有近30年的发展历程^[1-5]。据不完全估计,截止到2022年9月,我国已经建成和在建的隔震建筑,包括住宅、学校、医院、办公、博物馆等各类隔震建筑总数应该已超过12 000栋,居世界领先地位。尤其是在2021年《建设工程抗震管理条例》(中华人民共和国国务院令第744号)发布实施以来^[6],隔震建筑建设总量更是突飞猛进,2021年下半年到2022年,尽管受疫情反复等不确定性因素的影响,全国新开工建设隔震建筑总量保守估计至少也在2 000栋以上。建筑隔震技术本身也经历了从实验室到实用化^[7-10],从普通橡胶支座^[11-12]、铅芯橡胶支座^[13-14]到高阻尼橡胶支座^[15-16],再到摩擦摆^[17-20]以及复合三维隔震装置^[21-25]的发展壮大,并走向为工程界和大众所接受的相对成熟技术的发展历程^[26-30]。

然而,建筑隔震技术的发展也并非一帆风顺,也要经历地震的严酷考验。在2008年汶川8.0级特大地震、2013年芦山7.0级地震中^[31-33],当地隔震建筑成功地经受了破坏性地震的考验,成为过去十多年来推动隔震技术迅速发展并广泛应用的重要因素。与汶川特大地震、芦山地震中隔震建筑的关键隔震装置完全未遭受破坏不同,2022年9月5日发生的四川泸定6.8级地震,成为自20世纪90年代我国第1栋隔震建筑落成以来,第1次发现隔震支座和配套阻尼器装置在2栋不同隔震建筑中分别遭受破坏的案例。虽然汶川地震震级更大,但实际上,当时完全没有遭受破坏的甘肃陇南市武都区北山邮电局隔震住宅楼距震中较远,震中距约300 km。与之相比,2013年芦山地震中的芦山县人民医院隔震门诊楼距震中则相对较近,震中距约20 km,地震中主体结构虽保持基本完好但隔震构造遭到破坏。而此次泸定6.8级地震中,隔震支座和配套阻尼器分别位于磨西镇和燕子沟镇与磨西镇的交界处,震中距分别仅约为6.9 km和8.9 km,距震中更近。

1 泸定6.8级地震影响区内隔震建筑震害现象

地震发生以后,笔者参加了由中国地震局组织的工程震害科学考察工作,考察了此次地震6~9度影响区范围内泸定、康定两市共7栋隔震建筑,7栋隔震建筑的基本信息见表1。现场调查发现,其地震表现总体可以归纳为橡胶隔震支座破坏(表1中的1#楼)、隔震配套阻尼器破坏(表1中的2#楼)以及隔震构造破坏等3类现象。

表1 泸定6.8级地震6~9度影响区内7栋隔震建筑基本信息及地震表现

Table 1 Basic information and seismic performance of the 7 isolated buildings during the Luding M_s 6.8 earthquake

编号	建筑名称	层数	建成时间(年)	结构类型	设防烈度	影响烈度	震中距(km)	破坏状态描述
1	磨西镇某办公宿舍	4	2016	RC框架	9(0.4 g)	9	6.9	隔震支座破坏,上部结构完好。
2	甘孜某校行政楼	6	2020	RC框剪	9(0.4 g)	8	8.9	阻尼器破坏,上部结构近完好。
3	泸定人民医院住院部楼	7层8	2013	RC框剪	8(0.2 g)	7	38.2	基本完好,装修及设备微损。
4	甘孜检察院办公楼	5层6	2017	RC框架	9(0.4 g)	6	46.6	完好。
5	甘孜疾控中心办公楼1	5层6	2016	RC框架	9(0.4 g)	6	47.1	完好。
6	甘孜疾控中心办公楼2	4	2016	RC框架	9(0.4 g)	6	47.1	完好。
7	康定某高层住宅楼	17	2014	剪力墙	9(0.4 g)	6	52.6	完好。

1.1 橡胶隔震支座破坏

建成于2016年的1#楼,是此次泸定6.8级地震影响区内靠震中最近的一栋隔震建筑,也是国内外首次发现隔震支座在地震中遭到严重破坏的隔震建筑。该建筑位于此次地震影响9度区,属典型的钢筋混凝土框架结构,按照第五代地震动参数区划图^[34],其设防烈度应为9度0.4 g,功能上既有办公又有宿舍,上部结构4层,未设电梯,隔震层设置于上部结构和基础之间,柱网布置为横4×纵8,每个柱底设置一只橡胶支座,全部采用橡胶隔震支座共计32只,包括布置在结构四周柱底直径Φ600的橡胶支座20只、布置在内走廊柱底直径Φ700的橡胶支座12只。

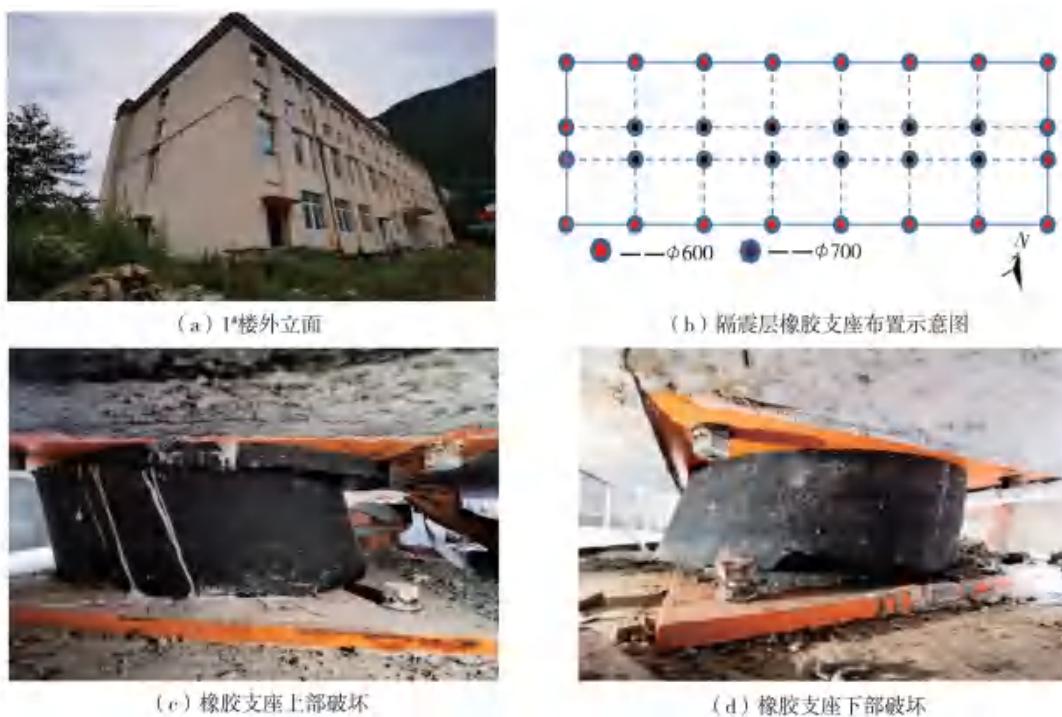


图1 表1中的1#楼隔震层橡胶支座破坏状态

Fig. 1 The damage details of the rubber bearings in the 1# building

总体看,设置于建筑四周的 $\phi 600$ 支座的失效破坏率高达80%以上,破坏程度明显重于 $\phi 700$ 的支座(破坏率约20%)。 $\phi 600$ 支座的破坏型式以支座上或下连接板与支座本体叠层钢板之间的橡胶层粘结面失效破坏为主,如图1所示。从支座保护层橡胶破裂面来看,破坏以水平剪切为主,角部支座剪切破坏的同时还伴随一定的不规则拉、扭撕裂,破坏造成的支座本体永久残余变形最大可达约80~110 mm,走向总体呈与结构弱轴向即横轴向(近南北向)大约一致的方向。如果忽略因上部结构与周边散水预制盖板碰撞引起的瞬时惯性滑移变位,从未设置固定连接约束的浮放散水盖板的震后位移来看,上部结构位移存在明显的不对称现象,总体上向前(南)位移大,向后(北)位移不明显,隔震层以上的上部结构沿横轴(南北)向的南向水平位移平均可达约200 mm,结构西南角局部散水盖板受主体结构碰撞单向残余水平位移可达420 mm,这充分说明上部结构位移反应呈明显的方向不对称性,且以横轴向为主,同时从结构西南角部位移明显偏大也可以断定,地面运动引起上部结构产生了一定的转动位移。值得庆幸的是,虽然隔震层遭到了严重破坏,1#楼的上部结构只发生了填充墙周边裂缝、墙皮脱落、家具移位轻微损伤,主体结构保持在基本完好状态。

1.2 隔震配套阻尼器破坏

此次泸定地震中,表1中的2#楼隔震层中与橡胶支座配套使用的黏滞阻尼器遭到严重破坏,成为减隔震建筑发展30年来国内外第一个地震导致隔震层配套阻尼器严重破坏的案例。该建筑位于燕子沟镇靠近磨西镇的交界处,位于此次地震影响的8度区内,其上部主体结构属典型的钢筋混凝土框剪结构,抗震设防烈度9度0.4 g,平立面较为规则,隔震层以上主体结构6层,标准层柱网布置为横4×纵12,隔震层柱网布置为横4×纵14,共设置54只直径 $\phi 1100$ 的橡胶隔震支座(LRB型46只,LNR型8只),沿结构2个主轴方向各布置黏滞阻尼器6只(VFD,设计阻尼力700 kN,设计位移600 mm),共12只。

调查发现,该建筑隔震层中的所有54只橡胶隔震支座震后全部保持基本完好状态,除少量边缘带铅芯LRB型支座存在一定的震后侧向残余变形外,未发现支座外观不均匀残余变形或裂缝。而隔震层中与橡胶隔震支座配套使用的所有12只黏滞阻尼器却遭到不同程度的破坏,如图2所示。其中沿结构横轴向布置的6只阻尼器中,有2只发生了阻尼杆屈曲破坏,其中1只阻尼器发生中部向下的受弯屈曲破坏,并致两端锚耳均发生向下翘曲变形。另1只阻尼器发生上端部连接板锚固破坏的同时,还在靠近上端位置发生了阻尼杆屈曲破坏。沿结构横向布置的另外4只和沿结构纵向布置的所有6只阻尼器,即所有12只阻尼器中的10只,均因端部连接板发生了不同程度的锚固破坏而失效。值得注意的是,所有发生锚固失效破坏的11只阻尼器的破坏位置,均发生在阻尼器上端与上部结构连接的锚固墩下端。与此形成鲜明对比的是,阻尼器与橡胶隔震支座基础墩台连接的下端连接均保持完好状态。

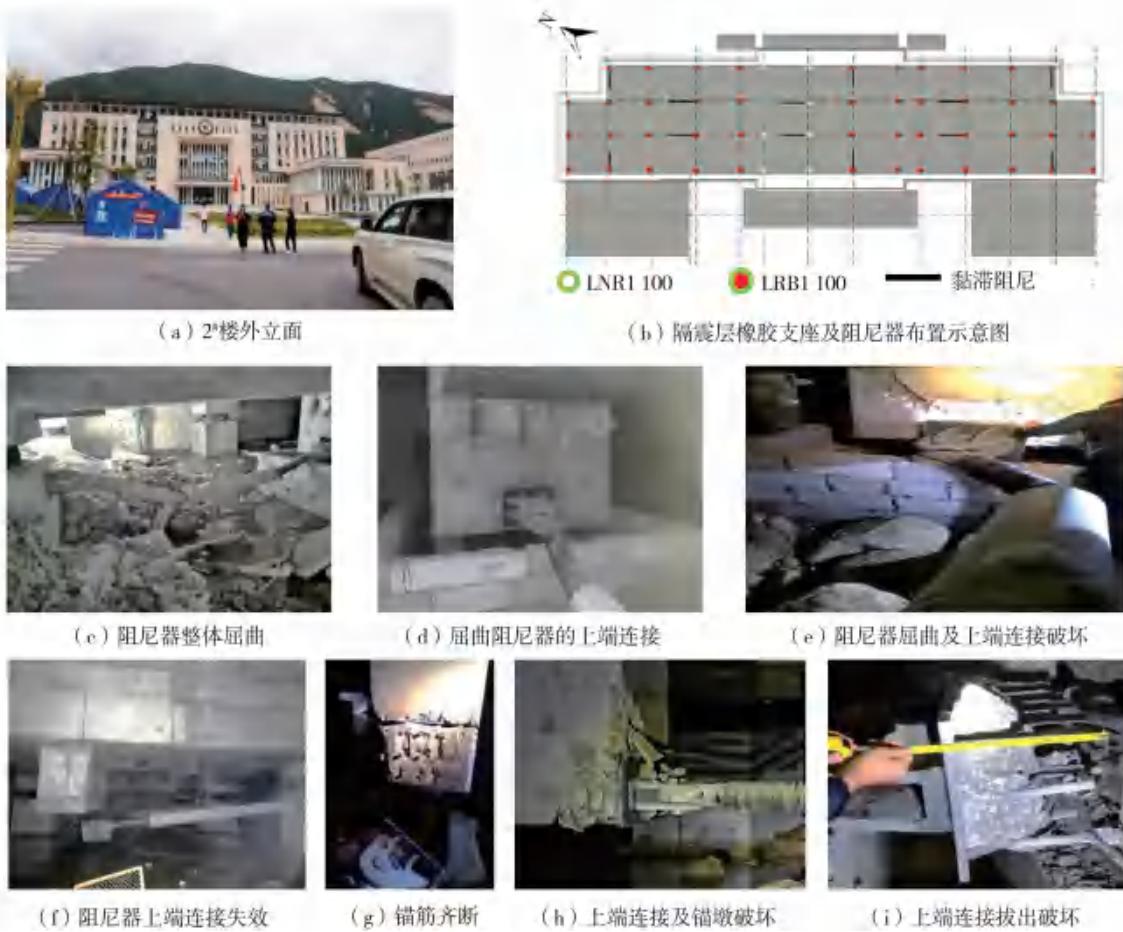


图2 表1中的2#楼隔震层配套阻尼器破坏状态

Fig. 2 The damage details of the rubber bearings in the 2# building

从11只阻尼器的上连接端板锚固破坏特点来看,大致分为3种形式:一是以每个上端板所属的所有15根锚筋根部与阻尼器连接端板之间的整齐断裂脱离为主,应属锚筋根部与端板之间的焊缝失效破坏;二是端板锚筋裹挟锚固区混凝土整体拔出脱离锚墩的失效破坏,应属锚墩端部混凝土约束不足失效破坏;三是上述2种破坏形式的过度状态,即锚墩下端在阻尼器的往复推拉作用下,发生了混凝土的正面局部拉压碎裂和锚墩在推力作用下的侧面斜向剪切裂缝。但所有10只未发生阻尼杆屈曲失稳的阻尼器上端连接的锚固失效破坏有一个共同特点,那就是与其下锚墩和发生了阻尼杆屈曲失稳破坏的2只沿结构横轴向布置的阻尼器的上锚墩尺寸相比,这10只上端连接板锚固失效的阻尼器的上锚墩截面尺寸明显偏小,横向尺寸仅约比阻尼器上端连接板略宽。较小的上锚墩尺寸一方面会导致因锚固不足产生的阻尼器端部连接破坏,并由于连接破坏塑性变形缓冲,使得不足以产生导致阻尼器屈曲的较大压力和速度条件;另一方面即使端板锚固虽然没有完全失效,但也因上锚墩本身侧向刚度较小,难以产生足够大到致使阻尼器发生屈曲失稳的压力和速度条件。这或许正是这10只阻尼器仅发生端板锚固连接失效破坏,而阻尼器本体并未发生屈曲失稳破坏的主要原因。同样的原因,另外2只发生屈曲失稳破坏的阻尼器中,1只中部失稳的阻尼器则因上下两端锚墩的侧向刚度均足够大且锚固足够强,致使在阻尼杆发生拉伸变形后,上部结构反向运动时,阻尼器两端锚墩的相对运动产生了足以导致阻尼杆来不及回缩的速度和压力,致使阻尼杆瞬间发生中部屈曲;剩余1只既发生了端部连接板锚固失效破坏、又产生了阻尼杆靠近端部屈曲的阻尼器,原因则是上连接端板首先因锚固不足,在上部结构产生较大侧向变形过程中,致使发生锚固受拉失效破坏且未完全脱离锚墩,而在随后的结构反向运动时,由于阻尼杆两端的锚墩刚度仍足够大,产生了足以导致阻尼杆来不及回缩的速度和压力,并超过了阻尼器的受压临界失稳条件,令其不得不发生屈曲破坏。

1.3 隔震构造破坏

应该说,隔震构造破坏问题早在10年前就已经暴露出来,典型的案例是芦山县人民医院门诊楼。该楼

是汶川地震以后设计建造并于2012年投入使用的隔震建筑,位于芦山县城所在地芦阳镇,在2013年芦山7.0级地震中,该楼处于地震影响8度区边缘并靠近9度区的过渡地带,震中距约20 km,地震中其上部结构基本保持完好,与该医院内未采用隔震技术并在地震中完全丧失使用功能的其它5栋传统抗震建筑形成鲜明对比,成为我国隔震建筑接受地震检验的成功案例。然而当时该建筑所暴露出来的主体结构撞击周边散水盖板、隔震支座周边撞击围护墙、隔震沟挡墙等隔震构造破坏,以及由于瞬间撞击引起的建筑内墙装修局部瓷砖脱落、个别办公家具倾倒等没有导致严重破坏的问题,并未引起工程界足够的重视。此次泸定地震中磨西镇附近的2#楼,再一次暴露出较为突出的相邻建筑分隔缝封板连接撕裂、出入口台阶结构碰撞、散水盖板地面碰撞撕裂等隔震构造破坏问题,引起了多方关注。

实际上,通过对此次泸定地震灾区共7栋使用减隔震技术的建筑调查发现,如表1和图3所示,7栋隔震建筑均存在不同程度的影响隔震层功能正常发挥的隔震构造设计施工不当问题,如:(1)隔震层内隔墙或外维护墙沿隔震支座所在的柱边砌筑至梁底或板底、以致完全挡死隔震支座的自由活动空间;(2)周边散水盖板地面硬化未预留伸缩隔离缝;(3)隔震沟局部宽度不足或完全回填;(4)穿越或进入地下隔震层的楼梯未设置上下隔离缝;(5)室外后装疏散楼梯紧贴主体结构并固定于室外地坪且未设置足够的隔震层自由变形空间;(6)与相邻非隔震建筑或建筑出入口的台阶分隔缝设置不当;(7)穿越隔震层的各类管道均未设置可适应隔震层水平变形的柔性连接等问题普遍存在,导致地震时隔震装置不能正常启动、隔震功能难以得到完全充分发挥,当地震作用导致的上部结构产生较大反应时,即首先需要突破周边不当构造措施的束缚,以冲击碰撞的方式,迫使发生不应出现的隔震建筑周边地坪破坏、墙体和屋面连接破坏,甚至在较大的瞬间撞击作用下,导致建筑内部分填充墙裂缝、装修破坏,以及走廊内消防栓柜门、配电柜柜门打开,室内办公桌抽屉滑出,浮置在桌面的玻璃镜框摔落地面,浮置的消防气瓶水平移位,甚至室内精密敏感的医疗设备功能故障或破坏问题。可以说,因隔震构造措施不当,使得隔震建筑能够保证设防地震条件下正常使用功能设防目标的实现大打折扣。



图3 表1中的3#~7#楼存在的隔震构造问题

Fig. 3 The constructional problems of buildings 3# ~ 7# in Table 1

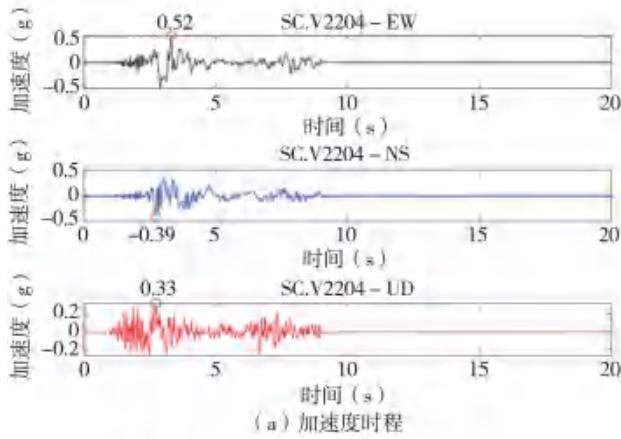
2 震害原因

从客观的角度看,上述分别出现在2栋不同隔震建筑中的橡胶隔震支座、隔震配套阻尼器严重破坏问题的发生,既与2栋建筑距震中较近(<10 km),场地地形较为特殊,对地震动有明显的放大作用,地震动较为强烈有关,也与分属2栋不同建筑的橡胶支座和黏滞阻尼器本身的产品实际性能和质量有关。

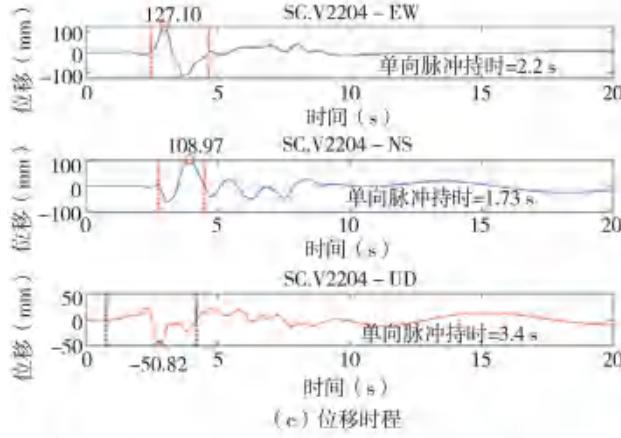
2.1 地震动特征

此次地震在2栋受损严重的隔震建筑附近的磨西镇中心,恰好有一个隶属于国家地震预警与烈度速报

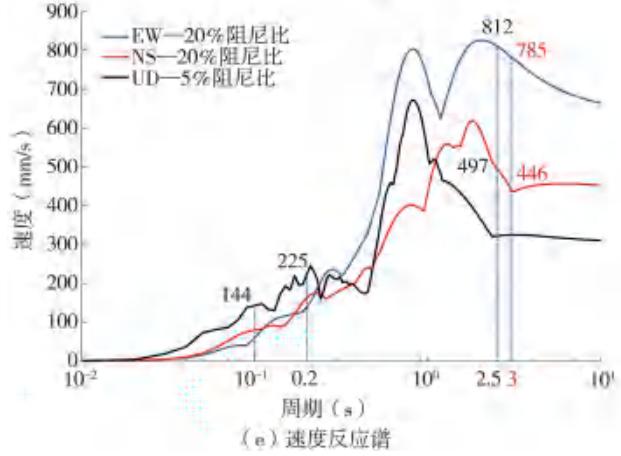
台网的烈度观测台,该烈度台震中距约7.3 km,位于表1中的1#楼和2#楼之间,基本上3点可连为一直线。1#楼位于该烈度台西南方向更靠近震中的位置,二者直线距离约1 km;2#楼位于该烈度台的东北方向更远离震中的位置,二者直线距离约3 km。该烈度台的加速度记录数据(表2)可以作为1#和2#这2栋隔震建筑震害原因量化分析的基本依据。



(a) 加速度时程



(c) 位移时程



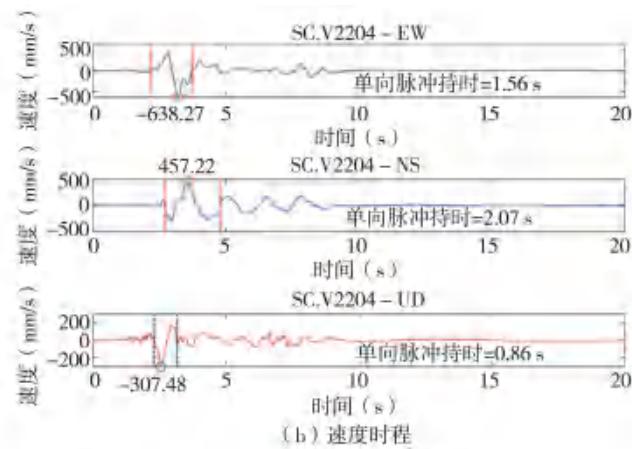
(e) 速度反应谱

表2 磨西镇中心烈度观测台地震动记录基本信息

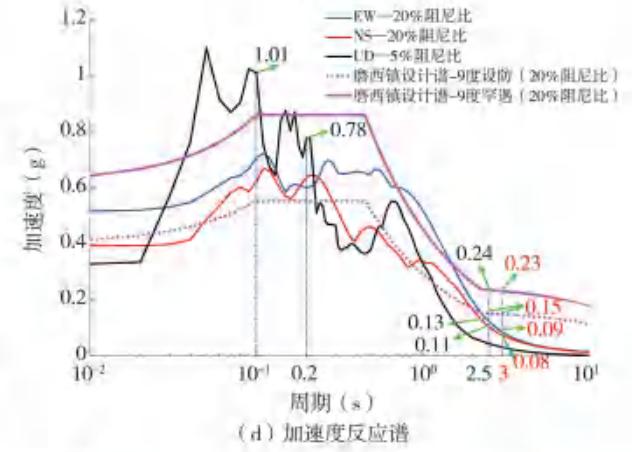
Table 2 Basic information of ground motion records observed in Moxi town

参数	EW(东西向)	NS(南北向)	UD(竖向)
峰值地面加速度 PGA(g)	0.52	0.39	0.32
峰值地面速度 PGV(mm/s)	638	457	307
峰值地面位移 PGD(mm)	127	109	51

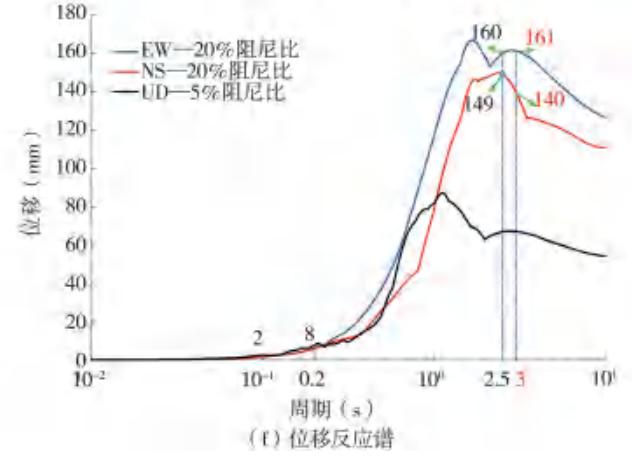
注:表中PGV和PGD系由加速度记录积分计算得到。EW、NS方向大致分别与1#楼的长轴向、短轴向平行,与2#楼的短轴向、长轴向平行,即1#楼和2#楼的长轴向大致呈正交关系。



(b) 速度时程



(d) 加速度反应谱



(f) 位移反应谱

图4 磨西镇中心烈度观测台记录时程与反应谱

Fig. 4 Time histories and related spectra of the ground motion records observed in Moxi town

从表2可见,该烈度台记录到的EW向PGA达0.52 g,假设在此强度的地震动作用下结构隔震层已进入较强非线性耗能状态,系统水平向一阶振型的等效阻尼比假设为20%,在约<2.5 s的中短周期段上,EW向加

速度反应谱值已大幅超过本地设防地震加速度反应谱值甚至达到罕遇地震反应谱的水平,如图4(d),但在2.5 s以后的较长周期段上3个分量的加速度反应谱值均迅速衰减;EW向PGV达638 mm/s,如图4(b),速度时程呈明显的不对称脉冲特征,且其谱值在约0.7 s左右达到峰值后的较长周期段上一直维持较高水平,如图4(e);EW向PGD达127 mm,如图4(c),且3个方向记录分量的位移时程也均表现出非常突出的不对称单向脉冲特征,其反应谱值也分别都在1.5 s左右达到峰值后的长周期段上一直维持较高水平(如图4(f))。同时,从图4(d)所示的地震动UD向加速度反应谱(5%阻尼比)可以看出,在约0.04~0.1 s的短周期段上,加速度反应谱值达到了超过1.0 g的较高水平。

根据经验,假设表1中1#楼(上部结构4层)的水平向基本自振周期为2.5 s,2#楼(上部结构6层)的水平向基本自振周期为3 s,由该烈度台的速度和位移反应谱图可以判定,如果不考虑离震中更远的2#楼(震中距约8.5 km)所处场地的地震动衰减,也不考虑更靠近震中的1#楼(震中距约6.5 km)场地的地震动加强效应,1#楼和2#楼的上部结构EW向速度反应将分别高达812 mm/s和785 mm/s(如图4(e)),最大位移反应将分别达到约160 mm和161 mm(如图4(f))。

2.2 橡胶支座震害原因

1#楼橡胶支座尤其是直径为Φ600的橡胶支座遭到严重破坏的原因,大致可以归结为一个外在原因和2个内在原因,外在原因是结构遭受的地震动作用大,内在原因是支座自身实有的抗变形能力或强度不足以抵抗所遭遇的地震动作用,即如下3个方面原因:

一是地震动的强烈作用结果,是外在原因。位于磨西镇中心的烈度台地震动记录分析结果表明,虽然此次地震产生的地震动强震持续时间较短,仅约不足8 s,EW向地面加速度峰值0.52 g也仅略超当地的抗震设防加速度9度(0.4 g)水平,但却在启动瞬间即分别在EW和NS这2个水平方向产生了单循环持时分别为1.56 s和0.86 s、PGV高达638 mm/s和457 mm/s的速度脉冲,以及持时分别为2.2 s和3.4 s、PGD达127 mm、109 mm的位移脉冲,这样的脉冲持时已经非常接近1#楼的结构基本自振周期,较大的EW向和NS向脉冲联合作用促使结构产生较大的水平位移和一定的转动位移,引起上部结构摇晃,并在橡胶支座内产生较大的快速弱扭转-剪切变形;从加速度、速度和位移时程均可看出,地面UD向位移脉冲会引起结构的快速上下垂向位移,伴随而来的水平向EW、NS向脉冲,将进一步加剧上部结构摇晃,并有可能在分布于结构四周的边缘支座内产生较不利的拉应力。如果按经验假设该隔震结构的竖向一阶振型周期在0.1~0.2 s(5~10 Hz)之间,且假设其竖向振型阻尼比为5%,从图4所示反应谱可见,结构竖向加速度和位移反应谱值将分别达到1.0 g和2~8 mm;如果设定Φ600橡胶支座的竖向刚度为2 000~3 000 kN/mm,那么在结构自重静载作用下(面压一般控制在5~12 MPa之间)支座的压缩变形仅约为1 mm左右,地震作用产生的2~8 mm竖向位移必然引起支座内出现>5 MPa的较大竖向拉应力,显然该值已远超规范要求的支座设计拉应力<1.0 MPa限值的要求,使得边缘橡胶支座产生弱扭-强拉-剪切耦合破坏。如前所述,现场调查结果证明了这种破坏形式在靠近建筑平面端部和角部橡胶支座中的普遍存在。

二是Φ600橡胶支座的实际抗剪变形能力不足。1#楼隔震层中的20只Φ600橡胶支座均布置于结构四周柱底,相较于布置于内走廊柱底的12只Φ700橡胶支座而言,由于地震动的不对称性和方向性,以及上部结构水平运动产生的倾覆力矩,边缘支座将不得不承担更大的上部结构不对称位移反应和附加扭转变形。如前所述,现场震害调查实测发现的1#楼西南角局部散水盖板的斜向残余位移达420 mm,显然该值包含了因主体结构撞击散水盖板时可能导致盖板产生的瞬间非接触惯性滑移。但从磨西镇烈度台记录的位移反应谱图(图4(f))2.5 s周期点对应的双水平分量谱值合成结果(平方和开平方)来看,地震中1#楼的计算合成斜向最大水平位移反应大概只有220 mm,距规范要求的Φ600橡胶支座的设计极限位移330 mm(按0.55 D计算)仍有很大空间。说明1#楼中使用的80%以上遭到破坏的Φ600橡胶支座的抗剪变形能力实际上远达不到规范0.55 D值的要求,从而在地震中发生了不该发生的不同程度破坏的问题。

三是Φ600橡胶支座实际的抗扭-强拉-剪切耦合“快速”作用强度不足。如前所述,如果假设1#楼的结构水平向一阶基本自振周期约为2.5 s,其上部结构EW向速度反应峰值极有可能会高达812 mm/s。可以说,这个值已经大大超过了1#楼建成时即2016年以前的国内几乎所有生产厂家用于橡胶隔震支座性能检测的压剪试验机的加载能力。换言之,即使国内个别单位的压剪试验机能够达到单向加载速度峰值834 mm/s的检测能力,1#楼所用的Φ600橡胶支座也不太可能接受过812 mm/s的双向快速压剪测试,更不用说实际地震反应所不可回避的快速扭-拉-剪耦合测试。现场调查发现的破坏状态也恰好反映了1#楼Φ600橡胶支座

实际的抗扭-拉-剪耦合“快速”作用强度不足问题。退一步讲,即使不考虑水平向的大速度脉冲作用,如前所述,结构竖向一阶振型0.1~0.2 s对应的竖向位移反应谱值可高达2~8 mm,将引起支座内产生远超设计限值的较大拉应力,单独这一项竖向地震动作用即可导致支座发生受拉破坏,更不用说实际存在的扭-拉-剪耦合“快速”作用了。

2.3 隔震配套阻尼器震害原因

对高烈度区尤其是9度0.4 g设防区的近断层(距发震断层10.0 km以内)隔震建筑而言,单纯依靠橡胶隔震支座往往难以有效控制地震作用下的隔震层位移和减震效果,因此需要在隔震层中增加黏滞阻尼器以增大隔震系统附加阻尼,以有效降低上部结构地震反应,2#楼隔震层中所布置的12套黏滞阻尼器正是为此而设。遗憾的是,此次泸定地震中,这12套阻尼器均遭到了不同形式不同程度的破坏,现将破坏原因简析如下:

一是地震动的大速度脉冲作用。由图4(b)磨西烈度台记录的地面运动速度时程可见,EW向PGV高达638 mm/s,如果还是假设2#楼的上部结构2个水平主轴向自振周期均为3.0 s左右,如图4(e),其对应的反应谱值(20%阻尼比)即上部结构EW向速度反应峰值将高达785 mm/s,EW向即结构横轴向阻尼器将随之以最大785 mm/s的速度运动;同时,NS向即结构纵轴向阻尼器将以最大446 mm/s的速度运动,如图4(e)。双水平向快速运动的结果是使上部结构分别在其横轴向、纵轴向产生幅值达161 mm和149 mm的位移反应并附加一定幅度的扭转位移反应。虽然12套黏滞阻尼器的设计位移均为600 mm,表面上完全可以满足上部结构侧向变形的需求,但从实际破坏模式来看,在上述峰值高达785 mm/s的速度脉冲作用下,其中11套阻尼器的锚固连接破坏证明,阻尼器在运动过程中产生的受拉阻尼力已超过端部连接板的实有极限锚固强度,致使锚墩截面较小的上端连接板锚固连接破坏;同时,从结构横轴向的2套阻尼器屈曲破坏模式来看,在上部结构反向运动时引起的阻尼器受压过程中,上下端刚度足够大的较大尺寸锚墩使得这2套阻尼器受压变形得不到释放、实际产生的受压阻尼力超过了阻尼杆的受压屈曲失稳临界条件,而致其发生屈曲失稳破坏。

二是全部12套阻尼器的实有速度能力不足。如前所述,其中11套阻尼器的受拉过程引起的端部连接锚固破坏和2套阻尼器受压过程导致的阻尼杆受压屈曲破坏充分说明,2#楼隔震层所配套的这12套阻尼器的实际拉、压速度能力均达不到此次地震引起的上部结构速度反应需求。这在一定程度上说明,这12套阻尼器在安装前很有可能未进行过峰值800 mm/s级别的快速试验测试,而即使进行过相关测试,也是按照常规试验做法,从小速度做起、逐级加载至大速度,而绝非是直接以800 mm/s级别的大速度进行测试。实际上这种由小到大加载的测试方法与直接进行大速度级别的快速试验存在明显差别,那就是在前期的多组小速度级别的试验当中,已经通过反复摩擦润滑,把阻尼器的加工组装误差和阻尼介质引起的阻尼杆初始运动随机阻滞消除掉,而不经小速度试验直接进行的快速试验,则通常在前1、2个循环或前几个循环中需要首先克服上述随机阻滞误差,才能使阻尼器进入正常稳定工作状态。实际上这是阻尼器的标准测试方法,为获得阻尼器的稳定工作性能参数,通常需要舍弃快速试验前2个循环的数据,而从第3个循环开始作为其正常性能试验数据。但这样做的可能隐患在于,实际地震的发生,通常并不会给阻尼器从小到大逐级加载的“试验”机会,尤其是此次泸定地震产生的大速度脉冲作用特点,如图4(b)所示地面速度时程和图4(e)所示地面位移时程,更是直接将结构由静止加载到最大速度反应,没有给从2020年出厂到此次地震发生已经静置了2年之久的12只配套阻尼器留出足够“热身”的机会,导致其设计工作性能还没有来得及正常发挥、在其初始性能不稳定状态下即遭破坏失效。

3 隔震技术发展亟待解决的问题

综上所述,30年来,我国建筑隔震技术经历了从2008年汶川地震到2013年芦山地震、再到2022年泸定地震,震中距也是由远及近的3次大地震考验,既表现出了应有的减隔震效果,使得影响区内隔震建筑的上部结构都得以保持基本完好和正常的使用功能,肯定了隔震技术的良好减震性能;同时,却也暴露出承担消能减震关键功能的隔震装置构件本身不应出现的严重破坏、隔震构造关联破坏等一些负面问题。从前述震害原因分析结果来看,固然不可避免地存在产品质量、管理监管等方面的问题,但从技术角度出发,主要还是应该从有关标准规范着手,以如何更有针对性地去适应随机发生却有规律可循的震动作用特征的需求、如何更为合理可行地去约束产品和设计施工质量开展研究工作。

如前所述,此次泸定地震所暴露出来的橡胶隔震支座和黏滞阻尼器严重破坏问题,实际本质上都反映出具备大速度脉冲特征的地震动作用下装置的可靠性问题。周知,地震的发生具有非常显著的突然性和随机性,而大速度脉冲是大量近断层地面运动的一个共性特征,从著名的1940年美国帝谷7.1级地震的El Centro记录到此次泸定地震的强震动记录,都表现出近断层附近地面运动几乎由短时微振突然快速进入大速度冲击剧烈振动状态的典型特征,如图4(b)、(c)。这种作用特征将促使结构构件尤其是承担主要消能减震作用的隔震装置来不及“热身”,而直接进入大速度耗能工作状态。而目前减隔震装置的形式检验、出厂检验以及施工现场安装前的抽样检验测试方法,都似乎没有专门针对性措施,这对事关能否在脉冲型近场地震动作用下正常发挥减震效能的减隔震装置各环节测试提出了新要求。

《橡胶支座 第一部分:隔震橡胶支座试验方法》(GB/T 20688.1-2007)中,“最小加载频率为0.001 Hz”^[27]的要求虽然可以满足大多数隔震装置生产厂家自有试验装置的加载能力目标,为出厂检验提供方便并降低检验成本,但却容易给工程实际应用留下隐患,并不适用于地震作用下的结构反作用对隔震装置快速反应性能的需求;“基准加载频率宜为0.5 Hz”的要求对于大多数隔震橡胶支座而言又明显偏高,因为实际上除少数早期建造的砖混或砌体结构隔震建筑以外,近年来以多高层钢筋混凝土框架、框剪以及剪力墙结构为主的隔震建筑的基本自振周期基本都控制在2.5~4.5 s(0.2~0.4 Hz)之间,显然把0.5 Hz作为基准检验频率也不够理想。而以“基准值宜取第3次循环的测试值”作为产品“实测”性能的要求,对上述大速度脉冲型近场地震动作用的适用性显然也值得商榷。实际上,《建筑消能阻尼器》(JG/T 209-2012)中关于黏滞阻尼器的试验方法虽然明确规定以结构基频为基准试验频率是合理的^[28],但也同样存在基准性能试验须由小位移到大位移逐级加载、以“第3个循环所对应的阻尼系数、阻尼指数作为实测值”的局限性,难以满足地震动脉冲作用特征需求的类似问题。

为解决上述问题,建议:(1)在隔震设计分析中,除不同设防水平对应的加速度、层间位移参数需要关注外,尚须给出隔震装置对应不同设防地震动加速度水平的最大速度反应,为隔震装置产品研发、生产、检验提供依据;(2)同时,在有关标准中研究尝试增补隔震橡胶支座产品应用的目标建筑基频、速度2项参数作为基准检指标的测试方法是更为合理可行的;(3)为适应近场地震动普遍存在的突然性大速度脉冲作用对隔震橡胶支座和黏滞阻尼器产品的快速反应需求,特别是针对近断层减隔震项目,十分有必要研究考虑将“第1次循环的测试值”而非“第3次循环的测试值”直接作为产品“实测”性能的可行性;(4)从前述橡胶支座破坏原因的分析可知,也十分有必要将隔震橡胶支座的扭-拉-剪耦合试验检测方法纳入有关产品检验标准。

另外,为解决已建成多数在役隔震建筑中存在的隔震橡胶支座和配套黏滞阻尼器实有性能与设计参数的匹配性、隔震构造不当并存在影响隔震功能正常发挥的问题,应尽快开展专项调查整改;为避免未来新建隔震建筑的隔震装置质量、隔震构造设计施工不当所可能带来的不必要的地震破坏损失及影响隔震建筑正常使用功能的问题,也十分有必要尽快细化完善相关隔震配套装置生产、设计、施工及验收标准规范,为建筑隔震技术的健康快速发展提供技术依据。

参考文献:

- [1] 苏经宇,曾德民. 我国建筑结构隔震技术的研究和应用[J]. 地震工程与工程振动,2001,21(增刊1): 94-101.
SU Jingyu, ZENG Demin. Research and application of seismic isolation of buildings in China [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2001, 21(S1): 94-101. (in Chinese)
- [2] 周锡元,阎维明,杨润林. 建筑结构的隔震、减振和振动控制[J]. 建筑结构学报,2002,23(2): 2-12,26.
ZHOU Xiyuan, YAN Weiming, YANG Runlin. Seismic base isolation, energy dissipation and vibration control of building structures [J]. Journal of Building Structures, 2002, 23(2): 2-12,26. (in Chinese)
- [3] 薛彦涛. 建筑结构隔震技术现状与应用[J]. 建筑结构,2011,41(11): 82-87.
XUE Yantao. Status and application of base-isolation technique of buildings [J]. Building Structure, 2011, 41(11): 82-87. (in Chinese)
- [4] 尚守平,崔向龙. 基础隔震研究与应用的新进展及问题[J]. 广西大学学报(自然科学版),2016,41(1): 21-28.
SHANG Shouping, CUI Xianglong. New progress and problems in research and application of base isolation [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2016, 41(1): 21-28. (in Chinese)
- [5] 朱宏平,周方圆,袁涌. 建筑隔震结构研究进展与分析[J]. 工程力学,2014,31(3): 1-10.
ZHU Hongping, ZHOU Fangyuan, YUAN Yong. Development and analysis of the research on base isolated structures [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(3): 1-10. (in Chinese)
- [6] 国务院. 建设工程抗震管理条例[Z]. 中华人民共和国国务院公报,2021(23):13-19.

- The State Council of the People's Republic of China. Regulations on the Administration of Earthquake Resistance of Construction Projects [Z]. The Bulletin of the State Council of the People's Republic of China, 2021(23): 13 - 19. (in Chinese)
- [7] 刘文光. 橡胶隔震支座力学性能及隔震结构地震反应分析研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2003.
- LIU Wenguang. Mechanics Properties of Rubber Bearings and Earthquake Response Analysis of Isolated Structure[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2003. (in Chinese)
- [8] 谭平, 周福霖. 隔震技术的研究与工程应用[J]. 施工技术, 2008, 37(10): 5 - 8, 42.
- TAN Ping, ZHOU Fulin. Research and application of seismic isolation system for civil engineering structures[J]. Construction Technology, 2008, 37(10): 5 - 8, 42. (in Chinese)
- [9] 徐忠根, 周福霖. 我国首栋橡胶垫隔震住宅楼动力分析[J]. 世界地震工程, 1996, 12(1): 38 - 42.
- XU Zhonggen, ZHOU Fulin. Dynamic analysis of the first rubber bearing isolated dwelling of our country[J]. World Earthquake Engineering, 1996, 12(1): 38 - 42. (in Chinese)
- [10] 曹万林, 戴租远, 叶炜, 等. 村镇建筑低成本隔震技术研究现状与展望[J]. 自然灾害学报, 2014, 23(6): 38 - 46.
- CAO Wanlin, DAI Zuyuan, YE Wei, et al. Research and prospect of low-cost isolation techniques for rural buildings[J]. Journal of Natural Disasters, 2014, 23(6): 38 - 46. (in Chinese)
- [11] 张敏政, 孟庆利, 裴强. 叠层橡胶隔震支座的动力稳定性和力学特性研究[J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(5): 85 - 91.
- ZHANG Minzheng, MENG Qingli, PEI Qiang. Dynamic stability and mechanical behaviors of laminated rubber bearings [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2002, 22(5): 85 - 91. (in Chinese)
- [12] 许斌, 唐家祥. 基础隔震叠层橡胶支座耐久性试验研究[J]. 工程抗震, 1995, 17(4): 41 - 44.
- XU Bin, TANG Jiaxiang. Experimental study on durability of base isolation laminated rubber bearings [J]. Earthquake Resistant Engineering, 1995, 17(4): 41 - 44. (in Chinese)
- [13] 郑文智, 王浩, 谭平, 等. 考虑退化效应的滑移铅芯橡胶支座力学性能精细建模与模型验证[J]. 土木工程学报, 2022, 55(10): 11 - 21, 61.
- ZHENG Wenzhi, WANG Hao, TAN Ping, et al. Numerical simulation and model validation of sliding-lead rubber bearing considering cyclic degradation effect[J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(10): 11 - 21, 61. (in Chinese)
- [14] 韩森, 刘祥辉, 杜红凯, 等. 小型铅芯橡胶支座剪切性能试验研究[J/OL]. 振动工程学报, 2022: 1 - 10. [2022 - 11 - 20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1349.TB.20220920.1801.004.html>.
- HAN Miao, LIU Xianghui, DU Hongkai, et al. Experimental study on shear behavior of small lead rubber bearings [J/OL]. Journal of Vibration Engineering, 2022: 1 - 10. [2022 - 11 - 20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1349.TB.20220920.1801.004.html> (in Chinese)
- [15] 沈朝勇, 周福霖, 崔杰, 等. 高阻尼隔震橡胶支座的相关性试验研究及其参数取值分析[J]. 地震工程与工程振动, 2012, 32(6): 95 - 103.
- SHEN Chaoyong, ZHOU Fulin, CUI Jie, et al. Dependency test research of mechanical performance of HDR and its parametric value analysis[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2012, 32(6): 95 - 103. (in Chinese)
- [16] 薛素铎, 高佳玉, 姜春环, 等. 高阻尼隔震橡胶支座力学性能试验研究[J]. 建筑结构, 2020, 50(21): 71 - 75.
- XUE Suduo, GAO Jiayu, JIANG Chunhuan, et al. Experimental research on mechanical performance of high damping isolation rubber bearings [J]. Building Structure, 2020, 50(21): 71 - 75. (in Chinese)
- [17] 左浩朋, 尚庆学, 周博威, 等. 摩擦摆隔震高层框架 - 剪力墙结构振动台试验研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(11): 11 - 19.
- ZUO Haopeng, SHANG Qingxue, ZHOU Bowei, et al. Shaking table test study of high-rise frame-shear wall structure isolated by friction pendulum bearings[J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(11): 11 - 19. (in Chinese)
- [18] 李雄彦, 单明岳, 薛素铎, 等. 摩擦摆隔震单层柱面网壳地震响应试验研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(6): 68 - 75, 98.
- LI Xiongyan, SHAN Mingyue, XUE Suduo, et al. Experimental study on seismic response of single-layer cylindrical latticed shell with FPS[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(6): 68 - 75, 98. (in Chinese)
- [19] 陈鹏, 周颖. 摩擦摆支座隔震结构实用设计方法[J]. 地震工程与工程振动, 2017, 37(1): 56 - 63.
- CHEN Peng, ZHOU Ying. The applicable design method of isolated structure using friction pendulum system [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2017, 37(1): 56 - 63. (in Chinese)
- [20] 龚健, 邓雪松, 周云. 摩擦摆隔震支座理论分析与数值模拟研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2011, 31(1): 56 - 62.
- GONG Jian, DENG Xuesong, ZHOU Yun. Study on theoretical analysis and numerical simulation of friction pendulum bearing [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2011, 31(1): 56 - 62. (in Chinese)
- [21] 魏陆顺, 周福霖, 任珉, 等. 三维隔震(振)支座的工程应用与现场测试[J]. 地震工程与工程振动, 2007, 27(3): 121 - 125.
- WEI Lushun, ZHOU Fulin, REN Min, et al. Application of three-dimensional seismic and vibration isolator to building and site test[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2007, 27(3): 121 - 125. (in Chinese)
- [22] 熊世树. 三维基础隔震系统的理论与试验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.
- XIONG Shishu. Theoretical and Experimental Research of Three-Dimensional Seismic Base Isolation System[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2004. (in Chinese)
- [23] 贾俊峰, 欧进萍, 刘明, 等. 新型三维隔震装置力学性能试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2012, 34(1): 29 - 34, 53.
- JIA Junfeng, OU Jinping, LIU Ming, et al. Mechanical performance tests of a novel three-dimensional isolation bearing [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2012, 34(1): 29 - 34, 53. (in Chinese)

- [24] 张永山,颜学渊,王焕定,等.三维隔震抗倾覆支座力学性能试验研究[J].工程力学,2009,26(增刊1): 124 – 129.
ZHANG Yongshan, YAN Xueyuan, WANG Huanding, et al. Experimental study on mechanical properties of three-dimensional base isolation and overturn resistance device[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(S1): 124 – 129. (in Chinese)
- [25] 陈兆涛.竖向变刚度三维隔震单层球面网壳隔震性能分析[D].天津:天津大学,2019.
CHEN Zhaotao. Analysis on Isolation Performance of Single-Layer Spherical Reticulated Domes Using Three Dimensional Isolation with Vertical Variable Stiffness[D]. Tianjin: Tianjin University, 2019. (in Chinese)
- [26] GB/T 20688. 3 – 2006 橡胶支座 第3部分:建筑隔震橡胶支座[S].北京:中国质检出版社,2007.
GB/T 20688. 3 – 2006 Rubber Bearing – Part 3: Elastomeric Seismic-Protection Isolators for Buildings [S]. Beijing: China Zhijian Publishing House, 2006. (in Chinese)
- [27] GB/T 20688. 1 – 2007 橡胶支座 第1部分:隔震橡胶支座试验方法[S].北京:中国质检出版社,2007.
GB/T 20688. 1 – 2007 Rubber Bearings – Part 1: Seismic-Protection Isolators Test Methods [S]. Beijing: China Zhijian Publishing House, 2007. (in Chinese)
- [28] JG/T 209 – 2012 建筑消能阻尼器[S].北京:中国标准出版社,2012.
JG/T 209 – 2012 Dampers for Vibration Energy Dissipation of Buildings[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012. (in Chinese)
- [29] GB50011 – 2010 建筑抗震设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
GB50011 – 2010 Code for Seismic Design of Buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [30] GB/T 51408 – 2021 建筑隔震设计标准[S].北京:中国计划出版社,2021.
GB/T 51408 – 2021 Standard for Seismic Isolation Design of Building [S]. Beijing: China Planning Press, 2021. (in Chinese)
- [31] 李红培.汶川地震房屋建筑震害分析及重建隔震设计研究[D].成都:西南石油大学,2010.
LI Hongpei. Research on Seismic Damage Analysis and Reconstruction Isolation Design of Buildings in Wenchuan Earthquake [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2010. (in Chinese)
- [32] 周云,吴从晓,张崇凌,等.芦山县人民医院门诊综合楼隔震结构分析与设计[J].建筑结构,2013,43(24): 23 – 27.
ZHOU Yun, WU Congxiao, ZHANG Chongling, et al. Analysis and design of seismic isolation structure in outpatient building of the Lushan County People's Hospital[J]. Building Structure, 2013, 43(24): 23 – 27. (in Chinese)
- [33] 熊立红,兰日清,王玉梅,等.芦山7.0级强烈地震建筑结构震害调查[J].地震工程与工程振动,2013,33(4): 35 – 43.
XIONG Lihong, LAN Riqing, WANG Yumei, et al. Earthquake damage investigation of structures in 7.0 Lushan strong earthquake[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2013, 33(4): 35 – 43. (in Chinese)
- [34] GB 18306 – 2015 中国地震动参数区划图[S].北京:中国标准出版社,2015.
GB 18306 – 2015 Seismic Ground Motion Parameters Zonation Map of China[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015. (in Chinese)