



建筑钢结构进展
Progress in Steel Building Structures
ISSN 1671-9379, CN 31-1893/TU

《建筑钢结构进展》网络首发论文

题目： 2022 年泸定地震某隔震建筑铅芯橡胶支座地震反应分析
作者： 陶思宇，曲哲
网络首发日期： 2022-11-10
引用格式： 陶思宇，曲哲. 2022 年泸定地震某隔震建筑铅芯橡胶支座地震反应分析 [J/OL]. 建筑钢结构进展.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1893.TU.20221109.1529.004.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

2022年泸定地震某隔震建筑铅芯橡胶支座地震反应分析

陶思宇^{1,2}, 曲哲^{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, 哈尔滨 150080; 2. 地震灾害防治应急管理部重点实验室, 河北 三河 065201)

摘要: 在2022年9月5日四川泸定6.8级地震中, 位于震中附近的一栋地上4层的隔震建筑的隔震层正常启动, 上部结构和非结构构件均基本完好, 但是隔震层中的铅芯橡胶支座、排水管线和隔震缝附属非结构构件等发生了不同程度的破坏。在介绍该建筑主要震害的基础上, 通过基于简化分析模型和邻近烈度仪实际强震记录的非线性地震反应分析, 推测该建筑的地震反应, 并重点考察铅芯橡胶支座的竖向应力在地震中可能发生的变化。结果表明, 尽管该场地附近的强震记录表现出明显的近断层脉冲特性, 但在其作用下, 该建筑上部结构的最大层间位移角小于设防地震下混凝土框架结构1/400的限值, 隔震层也有效地减小了上部结构的楼面水平加速度反应。受比较显著的竖向地震作用影响, 绝大多数隔震支座均可能短暂地处于拉剪耦合受力状态, 但其最大拉应力水平远低于根据既有试验得到的相应水平剪应变下的极限拉应力。该建筑隔震层中橡胶隔震支座的大量破坏不能简单地归因于竖向地震作用。

关键词: 橡胶支座; 剪切破坏; 拉应力; 竖向地震动; 近断层地震动

中图分类号: TU352.1²

文献标志码: A

Seismic Response Analysis of the Lead Rubber Bearings in a Base-Isolated Building in the 2022 Luding Earthquake, China

TAO Siyu^{1,2}, QU Zhe^{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, Sanhe 065201, China)

TAO Siyu: 627020118@qq.com

Abstract: During the M6.8 Luding earthquake in Sichuan Province, China, on September 5, 2022, a 4-story base-isolated building near the epicenter sustained extensive damage to its lead rubber bearings, sewage pipes in the isolation layer, and the nonstructural elements of the isolation joint, while its superstructure successfully slid on the isolation layer and exhibited only minimum, if not no, damage. Following an introduction to the typical damage to the building, this paper summarizes the results of nonlinear time history analyses of the building under the excitation of two strong ground motion records obtained during the earthquake near the site. The results show that the maximum inter-story drift ratios of the superstructure under the two input motion records are below 0.25%, which is the limit for reinforced concrete frame superstructures of base-isolated buildings under design basis earthquakes. The isolation layer effectively reduces the horizontal acceleration response of the superstructure. Because of the significant vertical component of the ground motion, most rubber bearings would sustain a combined shear-tensile load. However, the maximum tensile stress is much lower than the ultimate tensile stress under a combined shear-tensile load as per existing experimental tests. This suggests that it would be misleading to attribute the fracture of the rubber bearings in this building solely to the vertical component of the ground motion.

Keywords: rubber bearing; rubber fracture; tensile stress; vertical ground motion; near-fault ground motion

基金项目: 国家自然科学基金优秀青年科学基金项目 (52122811)

作者简介:

陶思宇 (1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事结构减震方面的研究。E-mail: 627020118@qq.com。

通信作者:

曲哲 (1983—), 男, 博士, 研究员, 主要从事建筑地震损伤控制方面的研究。E-mail: quz@iem.ac.cn。

据中国地震台网测定，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，震中位置北纬29.59度，东经102.08度，震源深度16 km^[1]。截止9月11日17时，地震已经造成93人遇难。此次地震的最高烈度为IX度（9度），等震线长轴呈北西走向，IX度（9度）区面积约280 km²，主要涉及甘孜藏族自治州泸定县磨西镇、得妥镇、燕子沟镇等7个乡镇^[2]。山体滑坡等地质灾害和房屋建筑倒塌造成的人员伤亡主要分布在震中附近的山区村落，房屋倒塌也多发生在未经抗震设防的乡村自建房屋。

尽管如此，现场建筑震害调查表明，震中附近不同类型的抗震设防类建筑也在本次地震中遭受了不同程度的破坏^[3]。其中，位于本次地震IX度区范围内的两栋隔震建筑的震害尤为引人注目。本文针对其中一栋位于磨西古镇的隔震建筑（图1），在介绍其典型震害的基础上，利用估计的结构信息和该场地周边获取的磨西和海螺沟等两组强震记录，建立简化的数值分析模型，推测其在泸定地震中的最大地震反应，并重点考察其隔震层中的铅芯橡胶支座的竖向应力和水平剪应变关系。



图1 所考察隔震建筑与震中和周边强震记录位置的关系
Fig.1 Relationship between isolated building, epicenter, and location of the surrounding strong motion records

该隔震建筑距离震中约7 km，断层距不大于5 km，属于典型的近断层区域。对于隔震建筑而言，近断层区域的强震动有以下两方面特征尤其值得关注。（1）显著的竖向分量^[4]。一方面，目前通用的建筑隔震技术只对水平地震作用有“隔离”和减震效果，而无法减轻竖向地震作用的影响；另一方面，竖向地震作用可能使橡胶支座受拉或使摩擦摆支座

抬离^[5-6]，对支座的性能提出更大的挑战。（2）方向性效应引起的长周期速度脉冲^[7]。建筑隔震技术的主要工作原理之一在于延长结构周期以避开地震地面运动中相对比较卓越的频谱成分，而近断层区域由波在传播过程中的开普勒效应产生的长周期速度脉冲可能削弱甚至消除延长周期带来的隔震效果^[5,8-9]。

1 隔震建筑概况、强震记录和主要震害

该隔震建筑建成于2016年。按2015年颁布的我国第五代地震动参数区划图^[10]，当地设计基本加速度为0.4g，特征周期为0.45 s。对应于我国抗震设计规范中的抗震设防烈度为9度，设计地震动分组为第三组，II类场地^[11]。建筑的上部结构为混凝土框架结构，地上4层，无地下室。一、二层用于办公，三、四层用于住宿。建筑长轴方向为七等跨，短轴方向三跨，含内走廊，其轴网布置如图2所示。每个框架柱下均设置隔震支座。采用20个直径为600 mm(LRB600)和12个直径为700 mm(LRB700)的铅芯橡胶支座，其平面布置如图2所示。隔震层中未设置其他阻尼器。根据现场实测，隔震缝宽度约为600 mm。此外，建筑长轴方向（图2中的x方向）大致与正北方向（N方向）呈45°夹角。

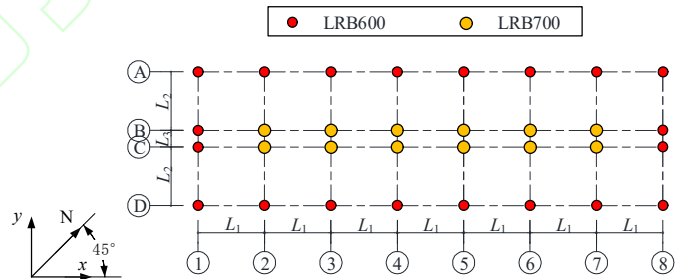


图2 本文所考察隔震建筑的隔震层平面布置（推测）
Fig. 2 Plan layout of isolation layer of the base-isolated building of concern (estimated)

本次地震中，在该隔震建筑所在的磨西古镇和几千米外的海螺沟景区均利用烈度仪获取了三分量的地面强震记录。表1给出了经过滤波并旋转至该建筑主轴方向上的这两组强震记录的峰值加速度（ A_{PG} ）和峰值速度（ V_{PG} ），其三分量的加速度时程如图3所示。

表1 地震记录的峰值地面加速度(A_{PG})和峰值地面速度(V_{PG})

记录位置	A_{PG}/g			$V_{PG}/(cm \cdot s^{-1})$			滤波频段
	x	y	z (UD)	x	y	z (UD)	
磨西	0.50	0.42	0.41	43.5	45.0	44.9	0.15~30 Hz 带通
海螺沟	0.61	0.43	0.56	27.8	26.5	14.3	0.35 Hz 高通

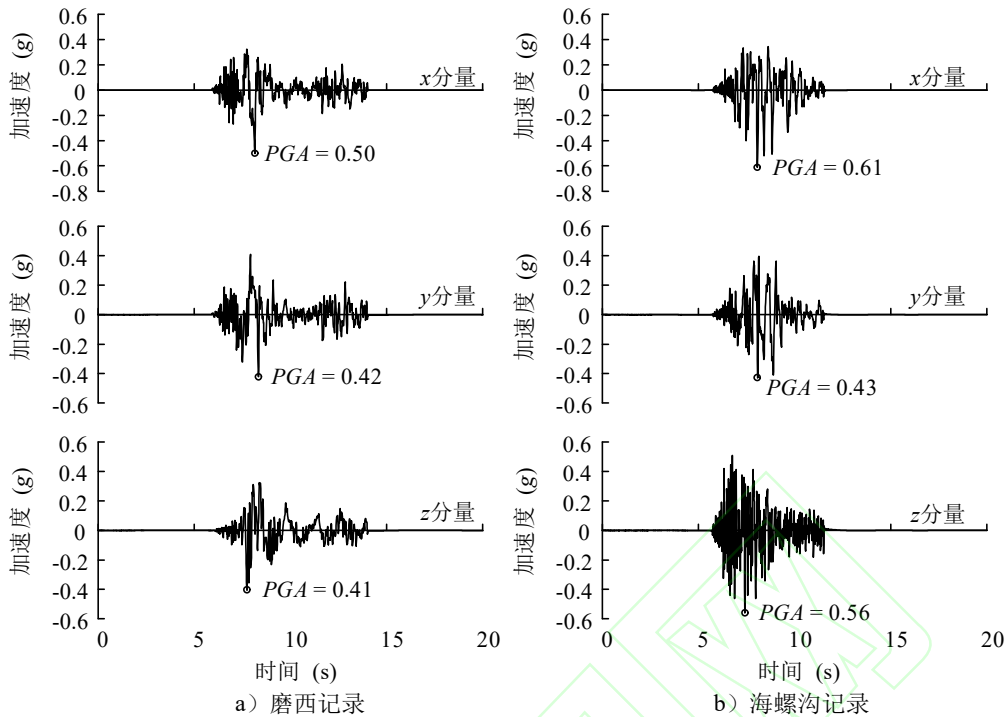


图3 旋转至建筑主轴方向的三分量地面运动加速度时程

Fig.3 Three components of the rotated acceleration time histories of the ground motions

其中，磨西记录与该隔震建筑同处磨西古镇，虽然场地条件、局部地形、烈度仪所在结构特性等因素可能使磨西记录与该建筑实际遭受的强震作用有所不同，但磨西记录仍是目前掌握的最能代表该建筑所受地震作用的强震记录。磨西记录旋转至 x 和 y 分量的 A_{PG} 分别为 $0.5g$ 和 $0.42g$ ， V_{PG} 分别为 $43.5 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $45 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ，均接近日本抗震设计实践中在第二阶段设计（弹塑性验算）中采用的 $50 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 的地面峰值速度。相应地，该记录在 1 s 周期附近表现出明显的峰值（图 4a）。根据文献[11]建议的基于峰值速度、峰值速度比和能量比的速度脉冲识别方法，磨西记录的最大脉冲指标 $PI=14.4$ ，最大脉冲方向上的脉冲周期为 $T_p=1.62 \text{ s}$ （图 5a），为典型的近断层脉冲型地震动。根据文献[7]的建议，从磨西记

录中提取出的速度脉冲的累积速度平方（CVS，式（1）的空间分布如图 5b）所示，其最大脉冲方向大致位于北偏西 86 度方向，与建筑 y 轴呈 41 度夹角。此外，磨西记录的竖向分量也十分显著，其 A_{PG} 和 V_{PG} 分别为 $0.41g$ 和 $44.9 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ，与水平分量相当。除磨西记录外，下文在地震反应分析中同时采用海螺沟记录作为补充。该记录的震中距仅约 2 km ，三个分量均由短周期成分主导（图 4b），该记录被识别为非脉冲型地震动。值得注意的是，其竖向分量的 A_{PG} 高达 $0.56g$ ，是磨西记录竖向分量的 1.37 倍，可能对隔震支座产生更加不利影响。

$$CVS = \int_0^{t_0} \dot{x}_p^2 dt \quad (1)$$

式中： \dot{x}_p 为脉冲速度时程； t_0 为地震动结束的时刻。

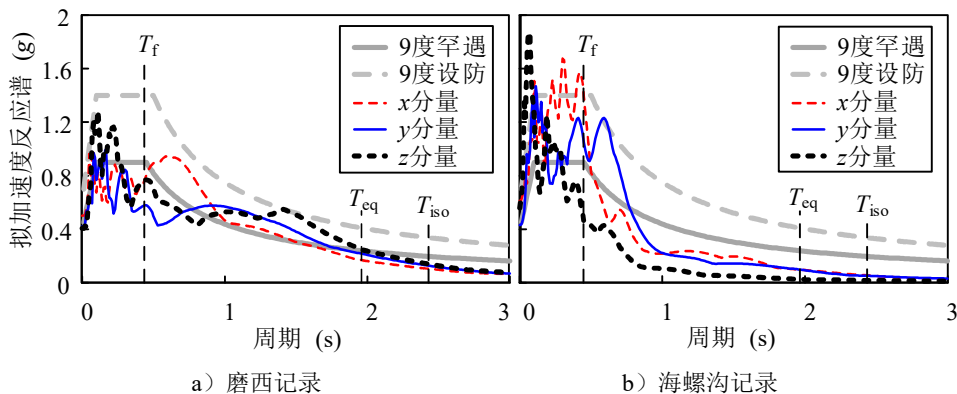


图4 周边强震记录的拟加速度反应谱（5%阻尼比）

Fig.4 Pseudo-acceleration response spectra of nearby strong motion records (5% damping ratio)

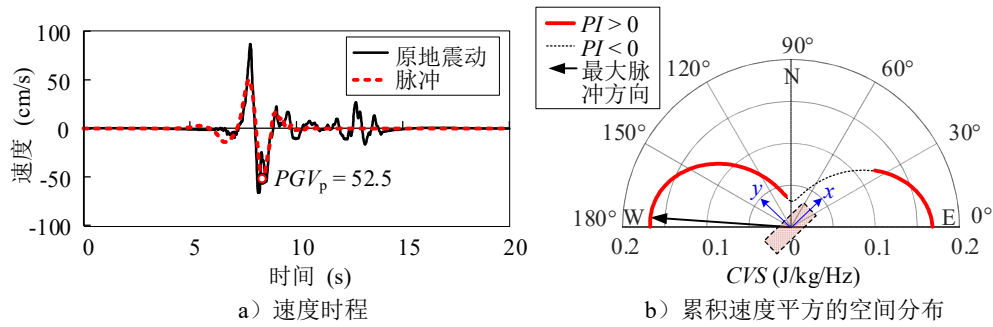


图5 磨西记录的速度脉冲特性
Fig.5 Pulse-like characteristics of the Moxi record

现场震害调查表明，该建筑上部结构基本完好，震害仅限于个别饰面瓷砖脱落。然而，隔震层中多个铅芯橡胶支座受损严重，甚至有隔震支座在上封板底面或下封板顶面完全断裂，同时表现出很大的

残余变形（图6）。除了隔震支座破坏之外，覆盖隔震缝的预制混凝土盖板和隔震层中的排水管线也在地震中发生了不同程度的破坏（图7）。



图6 铅芯橡胶支座的残余变形和断裂（拍摄：柏文）

Fig.6 Residual deformation and fracture of lead rubber bearings (photos by Wen Bai)

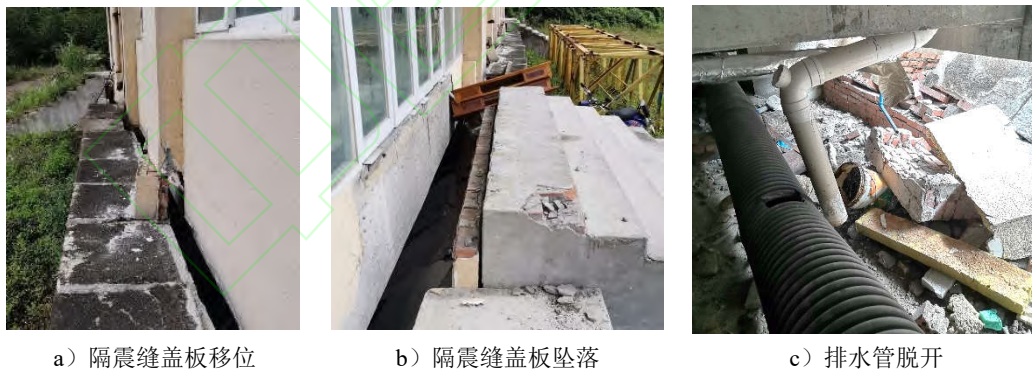


图7 隔震缝盖板和隔震层排水管线震害

Fig.7 Damage to the cover panels of isolation gap and sewage pipes in the isolation layer

值得注意的是，根据下文的估算，该隔震建筑对应于隔震支座 100%剪应变的等效周期 T_{eq} 和对应于 LRB 屈服后刚度的隔震周期 T_{iso} 分别约为 1.96 s 和 2.43 s。尽管磨西记录表现出明显的近断层脉冲特性，但其加速度谱对应于上述等效周期和隔震周期的谱值均小于 9 度设防地震水平的设计反应谱（图 4a）。若假设以磨西记录代表，则该隔震建筑在本次地震中实际遭遇的水平地震地面运动大致相当于 9 度设防地震水平。

地震发生后，该隔震建筑虽然在应急评估中被判定为“可以使用”，但由于其处于闲置状态，并未实际使用。上述破坏现象虽未影响上部结构的地震安全，但实际上对其正常使用有很大影响，在余震中也存在安全隐患。由此可见，该隔震建筑未能达到我国《建设工程抗震管理条例》^[13]规定的设防地震下“满足正常使用”的要求。以下结合非线性地震反应分析进一步考察该隔震建筑的地震反应。

2 结构分析模型

在 OpenSees^[14]中建立如图 8 所示的数值模型以模拟该隔震建筑的地震反应。文献[15]的研究表明,沿高度方向的刚度分布对整体结构的动力特性影响不大。本文所考察的隔震结构体形规则,且本文主要着眼于隔震层反应,故采用层质量和层刚度都均匀分布的集中质量模型模拟上部结构,并假设上部结构在两个水平主轴方向上的动力特性相同。隔震层以上的 4 个楼层和隔震层顶板由 5 个集中质量 m 表示,质点间通过刚杆和三向正交弹簧相连,弹簧采用 twoNodeLink 单元模拟,两个正交水平弹簧的刚度均为 K_h ,竖向弹簧的刚度为 K_z 。

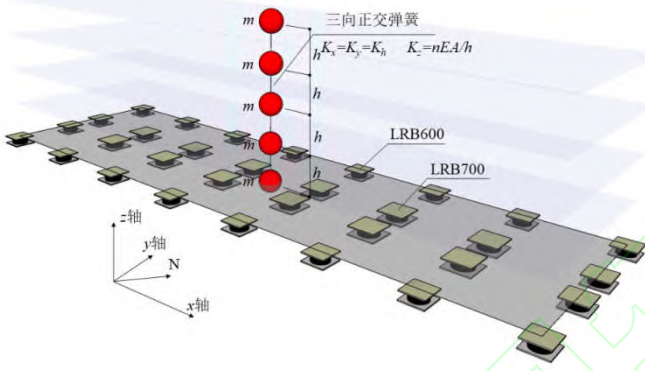


图 8 隔震结构简化分析模型

Fig.8 Simplified numerical model of the base-isolated structure

由于未掌握设计图纸,对结构布置作以下假设:
(1) 在上文图 2 所示的平面布置中,建筑长轴方向 (x 方向) 跨度 $L_1=8$ m,短轴方向 (y 方向) 外跨跨度 $L_2=7$ m,内走廊跨度 $L_3=2$ m;(2) 上部结构总高 $H=14$ m,各层层高 $h=3.5$ m;(3) 上部结构各层重力荷载代表值为 10 $\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$,相应的各层质量 $m=910$ t;(4) 所有框架柱截面均为 500 $\text{mm}\times 500$ mm 。

根据以上假设,利用文献[16]中的经验公式(式(2))估算上部结构的基本周期 $T_f=0.32$ s。根据估算的结构基本周期和各层质量,求得上部结构各层的水平刚度 $K_h=2800$ $\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1}$ 。

$$T_f = C_1 F^x \quad (2)$$

式中: C_1 和 x 是与地区和结构形式有关的经验系数,根据文献[17]和[18]针对中国混凝土结构的建议,取 $C_1=0.03$, $x=0.9$ 。

另一方面,根据各层框架柱的数量 n 、层高 h 、截面积 A 和混凝土弹性模量 $E=30$ $\text{kN}\cdot\text{mm}^{-2}$,利用式

(3) 近似地估算各层的竖向刚度 $K_z=68600$ $\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1}$ 。相应的上部结构的竖向自振周期为 $T_z=0.067$ s。

$$K_z = nEA/h \quad (3)$$

此外,假设上部结构 1 阶自振周期 T_f 对应的阻尼比为 2%,在 OpenSees 模型中为上部结构定义刚度比例型阻尼。

该隔震建筑结构布置规则,假设代表上部结构的集中质量模型的底部质点位于隔震层平面的形心位置。按照图 2 所示的平面布置,在隔震层中设置两种型号的铅芯橡胶支座 LRB600 和 LRB700。两种支座均采用 elastomericBearingPlasticity 单元模拟,采用理想双线性模型模拟其水平向的滞回行为(图 9a),采用拉压刚度不同的双线性弹性模型模拟其竖向力学行为(图 9b)。根据文献[19]给出的建议,在缺乏详细实验数据时,支座的拉压刚度比值可取为 $1/8\sim 1/10$,本文中取 $1/10$ 。参考我国《建筑隔震橡胶支座》(JG/T 118—2018)^[20]的附表确定两类支座的性能参数,如表 2 所示。所有 32 个铅芯橡胶支座的总屈服力为 2340 kN ,约为上文估算的上部结构总重的 5.2%,接近于文献[21]总结的日本隔震建筑 3%~5%的隔震层阻尼器屈服力与上部结构总重的比值范围的上限。隔震支座受压时隔震层的总竖向刚度约为 79000 $\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1}$,与上文估算的上部结构各层的竖向刚度相当。

假设隔震层顶板为刚性楼板,采用刚性杆将集中质量模型的底部质点与各隔震支座单元的顶部节点连接,使隔震层顶板可以发生 6 自由度的刚体运动。对上述简化模型进行特征值分析可得,当 LRB 的水平刚度取为初始刚度 K_0 、100%橡胶剪应变对应的等效刚度 K_{eq} (以 LRB600 为准)和屈服后刚度 K_{iso} 时,隔震结构在水平向的 1 阶自振周期分别为 $T_0=0.73$ s、 $T_{eq}=1.96$ s 和 $T_{iso}=2.43$ s。当所有隔震支座受压和受拉时,隔震结构在竖向的 1 阶自振周期分别为 0.079 s 和 0.164 s。

在进行地震反应分析时,首先对上述简化分析模型施加重力荷载,然后分别输入旋转至建筑主轴方向的磨西记录和海螺沟记录的三分量加速度时程。在重力荷载作用下,隔震层中的 LRB600 和 LRB700 支座的压应力绝对值分别为 4.8 MPa 和 3.8 MPa,均远小于我国《建筑隔震设计标准》(GB/T 51408—2021)(以下简称《隔标》)^[22]规定的压应力限值。

表 2 铅芯橡胶支座 LRB 性能参数

Tab.2 Properties of lead rubber bearings

型号	有效直径 D/mm	第二形状系数 S_2	竖向刚度 $k_v/(\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1})$	初始刚度 $k_0/(\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1})$	屈服后刚度 $k_{iso}/(\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1})$	100%剪应变水平等效刚度 $k_{eq}/(\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1})$	屈服力 Q_d/kN	橡胶层总厚度 nT_R/mm
LRB600	600	5.00	2 400	11.48	0.88	1.40	63	122
LRB700	700	5.45	2 600	15.19	1.17	1.87	90	129

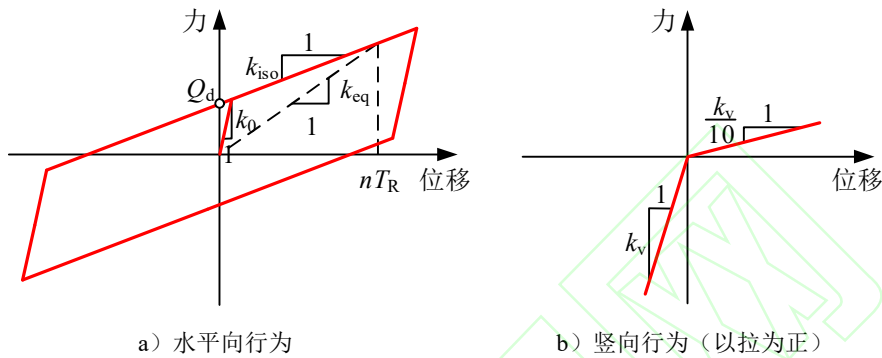


图 9 铅芯橡胶支座 LRB 的滞回模型

Fig.9 Hysteresis model of lead rubber bearings

3 地震反应分析结果和与实际震害的对比

利用上述简化模型，图 10 给出了该隔震建筑的上部结构在两组地震动作用下的最大反应。其两个主轴方向的最大层间位移角均小于我国《隔标》^[22]规定的钢筋混凝土框架结构在设防地震下 1/400 的层间位移角限值（图 10a）。这与主体结构在地震中基本完好的情况相符。上部结构的楼面水平峰值

加速度反应仅为相应的地面水平峰值加速度的 29% 至 41%，可见隔震层有效地减小了上部结构的水平地震反应（图 10b）。另一方面，与地面的竖向峰值加速度相比，上部结构的竖向加速度反应放大了约 3.4 倍。在磨西和海螺沟记录作用下，在上部结构中分别有 3 层和 4 层楼面的竖向峰值加速度超过 1g（图 10c）。这意味着即使不考虑上部结构的倾覆力矩引起的轴力变化，竖向地震作用已有可能导致橡胶支座受拉。

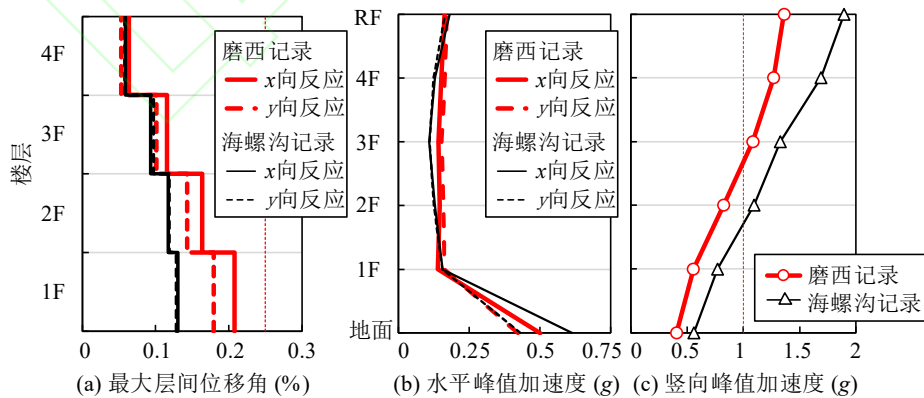


图 10 上部结构的最大地震反应

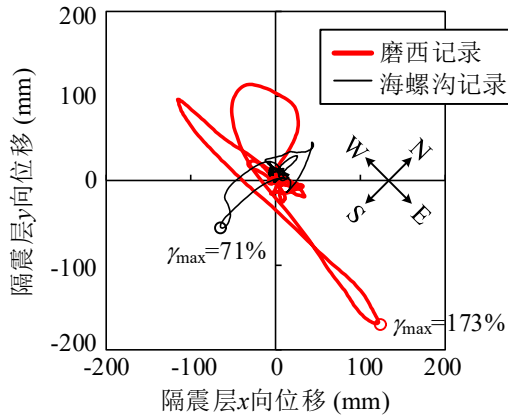
Fig.10 Maximum seismic response of superstructure

以磨西记录为输入时，隔震层在 x 和 y 方向的最大水平位移分别为 121 mm 和 169 mm；以海螺沟记录为输入时，分别为 65 mm 和 56 mm（图 11a）。

从隔震层水平运动的轨迹可见，这两组强震记录均表现出明显的方向性。磨西记录在东西方向的地震作用远强于南北方向，海螺沟记录则相反。

根据现场实测，隔震缝盖板与主体结构之间在沿 y 方向残留有约 200 mm 宽的缝隙（图 11b），可推断在该方向上隔震层最大水平位移不小于此数值。以磨西记录为输入得到的 y 向最大水平位移仍小于此数值，相对误差约为-15.5%，但误差远小于以海螺沟记录作为输入时的结果。数值分析得到的隔震

层最大位移小于实测估算的最大位移下限的原因，一方面可能在于磨西记录与该场地实际遭受的地震作用之间仍存在差异；另一方面可能在于实际建筑的隔震支座刚度明显小于本文数值模型中按相关规范采用的数值。



a) 分析得到的隔震层水平运动轨迹



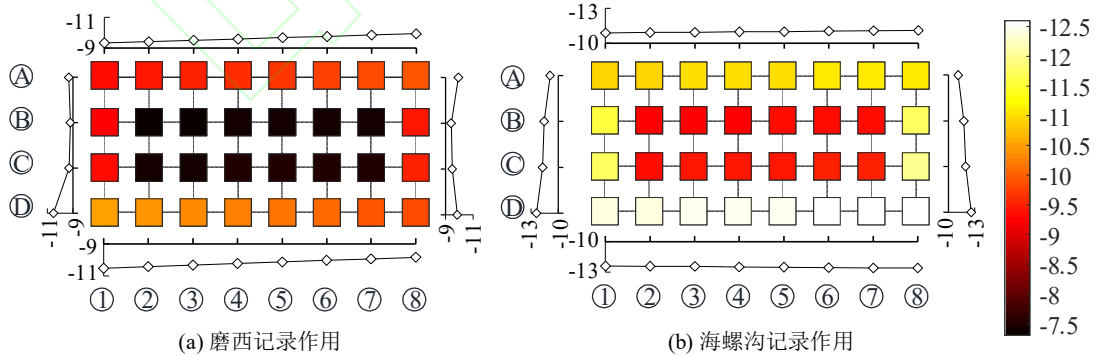
b) 隔震缝盖板沿 y 方向残留的缝隙

图 11 隔震层的水平位移反应

Fig.11 Horizontal displacement responses of isolation layer

如上文所述，磨西记录和海螺沟记录均具有显著的竖向分量，对隔震层不利。图 12 和图 13 分别给出了以这两组强震记录为输入时隔震层中各个橡胶支座的最大压应力和最大拉应力分布。其中，布置在中部的 LRB700 支座的最大压/拉应力的绝对值均明显小于布置在周边的 LRB600 支座。在磨西和海螺沟记录作用下，中部支座的最大压应力绝对值由自重时的 4.8 MPa 分别增大为约 7.5 MPa 和 9.4

MPa。同时，受上部结构倾覆力矩的影响，周边 LRB600 支座的最大拉/压应力分布不均匀。在磨西记录作用下，最大拉/压应力均出现在角部 D1 支座，最大压应力和拉应力分别为-10.5 MPa 和 0.78 MPa；在海螺沟记录下，最大拉/压应力均出现在角部 D8 支座，最大压力应和拉应力分别为-12.6 MPa 和 1.49 MPa。由倾覆力矩引起的支座轴力不均匀的程度远小于由竖向地震动引起的支座轴力变动的幅度。



(a) 磨西记录作用

(b) 海螺沟记录作用

图 12 橡胶支座最大压应力（以拉为正，单位：MPa）

Fig.12 Maximum compressive stresses in rubber bearings (Unit: MPa)

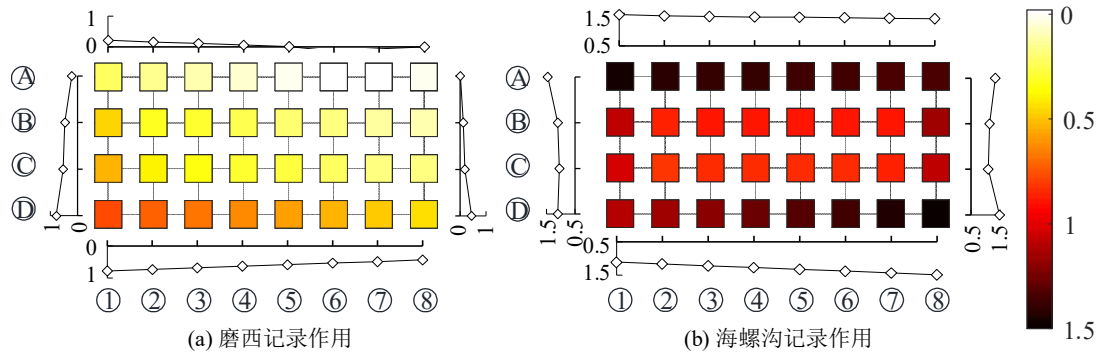


图 13 橡胶支座最大拉应力（以拉为正，单位：MPa）

Fig.13 Maximum tensile stresses in rubber bearings (Unit: MPa)

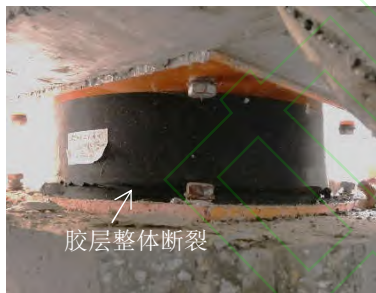
文献[23]通过以我国橡胶支座进行试验研究指出，橡胶支座在纯拉作用下的极限抗拉强度高达 6.4MPa，但是随水平剪应变的增大，极限抗拉强度迅速减小，并在此基础上提出了极限拉剪强度的经验公式（式（4））。

$$\sigma_{tu} = 0.3\gamma^2 - 3.0\gamma + 6.4 \quad (4)$$

式中： σ_{tu} 为橡胶支座的极限拉应力，单位为 MPa； γ 为胶层的水平剪应变。

图 14 给出了本文考察的隔震建筑中 D1、C4 和 A8 等三个不同位置的橡胶支座在震后的照片以及它们在上述地震反应分析中的竖向应力-水平剪应变关系，图中剪应变的正方向为图 11a) 所示的最大

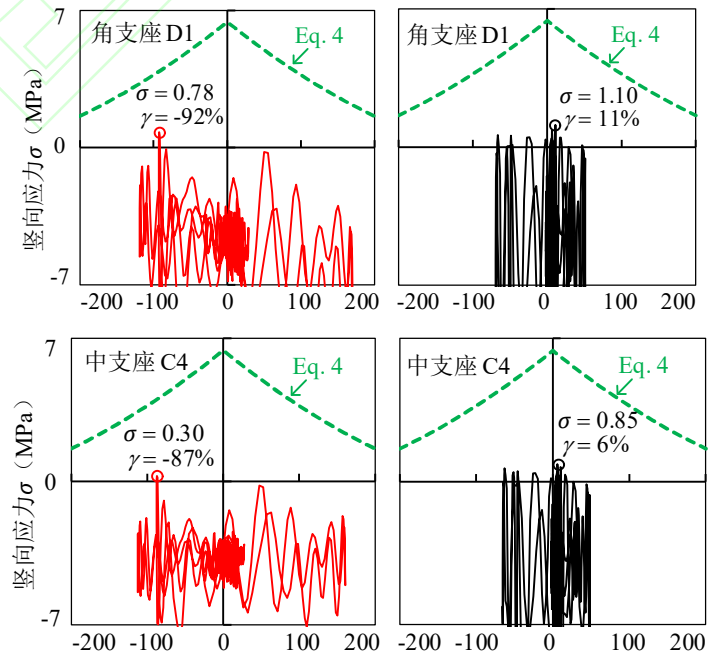
剪应变方向。当以磨西记录为输入时，角部 D1 支座在水平剪应变为 92%左右时短暂受拉，最大拉应力为 0.78 MPa；对角的 A8 支座在剪应变约为 166%时短暂受拉，但相应的拉应力仅为 0.01 MPa。相比之下，当以海螺沟记录为输入时，尽管支座的拉应力更大，但是出现最大拉应力时的水平剪应变则较小。图 14 同时画出了式（4）的极限拉剪强度包络线。上述拉剪反应均与该包络线相距甚远，并不至于引起橡胶支座的整体断裂失效。可见，该隔震建筑中橡胶支座的断裂破坏不能简单归因于竖向地震作用的影响，而是另有原因。



角支座 D1（拍摄：朱柏洁）



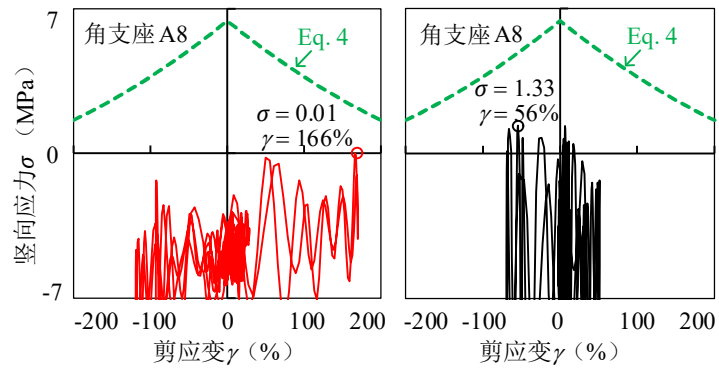
中支座 C4（拍摄：朱柏洁）





角支座 A8 (拍摄: 柏文)

a) 震害照片



b) 磨西记录作用

c) 海螺沟记录作用

图 14 不同位置橡胶支座的破坏照片和竖向应力-水平剪应变关系

Fig.14 Photos of seismic damage and vertical stress-horizonal shear strain relationships of rubber bearings at different locations

4 结论

本文结合 2022 年四川泸定 6.8 级地震后一栋距离震中 7 km 的 4 层隔震建筑的震害调查结果和该场地附近获取的强震记录, 通过非线性有限元分析估算其地震反应, 并着重考察了橡胶隔震支座的竖向应力反应, 可以得出以下结论。

(1) 该隔震建筑中的隔震层在地震中正常启动工作, 对降低上部结构地震反应发挥了积极作用。根据基于简化数值模型和磨西强震记录的分析结果, 隔震层在建筑短边方向的最大位移接近 170 mm, 与现场实测的约 200 mm 的隔震缝盖板残余位移比较接近。

(2) 尽管磨西记录表现出明显的近断层脉冲特性, 最大脉冲方向上的脉冲周期为 1.62 s, 但是从反应谱的对比可见, 磨西记录对于该隔震建筑而言大致相当或低于该地区的设防地震作用水平。在该地震作用水平下, 该隔震建筑出现橡胶支座断裂、隔震层排水管线接头脱开、隔震缝附属非结构构件破坏等震害, 未能满足我国《建设工程抗震管理条例》中的正常使用要求。

(3) 磨西记录和附近的海螺沟记录均具有显著的竖向分量, 且竖向加速度在上部结构中被显著放大, 使绝大多数橡胶支座均可能短暂处于拉剪状态。尽管如此, 分析结果表明, 支座中的最大拉应力远低于基于既有试验数据的极限拉剪强度包络线。可见, 该隔震建筑中橡胶支座的断裂破坏不能简单归因于竖向地震作用的影响。

本文地震反应分析的局限性包括但不限于: (1) 磨西记录与该场地实际遭受的地震作用之间仍可能存在差异; (2) 由于未掌握设计资料, 橡胶隔震支座的力学参数选取我国相关规程的建议值, 上部结构的跨度、框架柱尺寸、重力荷载等参数也仅为估

计值, 与实际情况可能存在差异; (3) 用于模拟隔震支座的简化分析模型未考虑支座的断裂, 无法模拟现场观察到的橡胶支座上很大的残余变形, 也无法模拟支座突然破坏可能对隔震层和上部结构地震反应的影响。本文分析结果仅供专业技术讨论参考, 不作为对实际震害现象的结论性解释。

致谢:

感谢国家强震动台网中心提供宝贵的强震动记录数据。感谢国家自然科学基金委 (项目号: 52122811) 的资助。

参考文献:

- [1] 中国地震台网. 四川甘孜州泸定县发生 6.8 级地震. [EB/OL]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1743104766556137980>.
- [2] 中国应急管理部. 应急管理部发布四川泸定 6.8 级地震烈度图. [EB/OL]. https://www.mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt/202209/t20220911_422190.shtml.
- [3] QU Z, ZHU B J, CAO Y T, et al. Rapid report of seismic damage to buildings in the 2022 M6.8 Luding earthquake, China[J]. Earthquake Research Advances, 2022: 100180. DOI: 10.1016/j.eqrea.2022.100180.
- [4] PAPAZOGLU A J, ELNASHAIA A S. Analytical and field evidence of the damaging effect of vertical earthquake ground motion[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1996, 25(10): 1109-1137. DOI: 10.1002/(SICI)1096-9845(199610)25:103.3.CO;2-S.
- [5] MAZZA F, VULCANO A. Effects of near-fault

- ground motions on the nonlinear dynamic response of base-isolated R.C. framed buildings[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2011, 41(2): 211-232. DOI: 10.1002/eqe.1126.
- [6] FURUKAWA S, SATO E, SHI Y D, et al. Full-scale shaking table test of a base-isolated medical facility subjected to vertical motions[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2013, 42(13): 1931-1949. DOI: 10.1002/eqe.2305.
- [7] 曲哲, 师晓. 汶川地震和鲁甸地震的脉冲型地震动比较研究[J]. *工程力学*, 2016, 33(8): 150-157.
QU ZHE, SHI Xiao. Comparative study on the pulse-like ground motions in the Wenchuan and the Ludian earthquakes[J]. *Engineering Mechanics*, 2016, 33(8): 150-157. (in Chinese)
- [8] PANT D R, WIJEYEWICKREMA A C. Influence of near-fault ground motions on the response of base-isolated reinforced concrete buildings considering seismic pounding[J]. *Advances In Structural Engineering*, 2014, 16(12): 1973-1988. DOI: 10.1260/1369-4332.16.12.1973.
- [9] MALHOTRA P K. Response of buildings to near-field pulse-like ground motions[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1999, 28(11): 1309-1326. DOI: 10.1002/(SICI)1096-9845(199911)28:11<1309::AID-EQE868>3.0.CO;2-U.
- [10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 中国地震动参数区划图: GB 18036—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. *Seismic Ground Motion Parameters Zonation Map of China: GB 18036—2015*[S]. Beijing: China Standards Press, 2015. (in Chinese)
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 2016 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. *Code for Seismic Design of Buildings: GB 50011—2010*[S]. 2016 ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016. (in Chinese)
- [12] SHAHI S K, BAKER J W. An efficient algorithm to identify strong-velocity pulses in multicomponent ground motions[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2014, 104(5): 2456-2466. DOI: 10.1785/0120130191.
- [13] 中华人民共和国国务院. 建设工程抗震管理条例: 中华人民共和国国务院令 第 744 号[A/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-08/04/content_5629341.htm.
State Council of the People's Republic of China. *Regulation on the Administration of Earthquake Resistance of Construction Projects: Order of the State Council of the People's Republic of China, No. 744*[A/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-08/04/content_5629341.htm. (in Chinese)
- MCKENNA F. OpenSees: a framework for earthquake engineering simulation[J]. *Computing in Science and Engineering*, 2011, 13(4): 58-66. DOI: 10.1109/mcse.2011.66.
- [14] MIRANDA E, TAGHAVI S. Approximate floor acceleration demands in multistory buildings. I: formulation[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2005, 131(2): 203-211. DOI: DOI 10.1061/(asce)0733-9445(2005)131:2(203).
- [15] ASCE. *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures: 7-16*[S]. America: American Society of Civil Engineers, 2017.
- [16] GAO Y Q, LIU W F. Statistical analysis of fundamental periods of frame-shear wall structures[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 174-177: 2071-2078. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.174-177.2071.
- [17] XIONG C, LU X Z, GUAN H, et al. A nonlinear computational model for regional seismic simulation of tall buildings[J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2016, 14(4): 1047-1069. DOI: 10.1007/s10518-016-9880-0.
- [18] 罗佳润, 马玉宏, 沈朝勇, 等. 隔震设计中橡胶隔震支座拉压刚度取值的研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2013, 33(5): 232-240. DOI: 10.13197/j.eeev.2013.05.232.luojr.030.
LUO Jiarun, MA Yuhong, SHEN Chaoyong, et al. Research on the ratio of tensile and

compressive stiffness of rubber isolators in the isolation design[J]. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2013, 33(5) : 232-240. DOI : 10.13197/j.eeev.2013.05.232.luojr.030. (in Chinese)

[19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑隔震橡胶支座: JG/T 118—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Rubber Isolation Bearings for Buildings: JG/T 118—2018[S]. Beijing: China Standards Press, 2018. (in Chinese)

[20] PAN P, ZAMFIRESCU D, NAKASHIMA M, et al. Base-isolation design practice in Japan: Introduction to the post-Kobe approach[J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2005, 9(1): 147-171. DOI: 10.1142/S1363246905001943.

[21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑隔震设计标准: GB/T 51408—2021[S]. 北京: 中国计划出版社, 2021.

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for Seismic Isolation Design of Building: GB/T 51408—2021[S]. Beijing: China Planning Press, 2021. (in Chinese)

[22] 刘琴. 隔震橡胶支座型检评价与拉剪性能研究 [D]. 广州: 广州大学, 2015.

LIU Qin. The type test evaluation and the study on tension-shear behavior of isolated rubber bearings[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2015. (in Chinese)