

# Summary of research on disaster prevention of mid-story isolation buildings caused by long period ground motion disasters

Yafei Zhang<sup>1</sup>, Tingshun Dong<sup>2</sup>, Sitong Fang<sup>1</sup>, Jie Zhao<sup>1</sup>, Yufeng Ning<sup>1</sup>, Jibing Zhao<sup>1</sup>, Wangwang Zhou<sup>1</sup>, Dewen Liu<sup>1</sup>

<sup>1</sup> College of Civil Engineering, Southwest Forestry University

<sup>2</sup> Kunming XZDY Architectural & Engineering Design Co., Ltd

Kunming, China

1165638944@qq.com

## 长周期地震动作用下层间隔震建筑防灾研究综述

张亚飞<sup>1</sup>, 董廷顺<sup>2</sup>, 房思彤<sup>1</sup>, 赵洁<sup>1</sup>, 宁宇峰<sup>1</sup>, 招继炳<sup>1</sup>, 周旺旺<sup>1</sup>, 刘德稳<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 西南林业大学土木工程学院

<sup>2</sup> 昆明新正东阳建筑工程设计有限公司

昆明 650000, 中国

1165638944@qq.com

**Abstract**—This paper summarizes the definition and characteristics of long-period ground motion and the research results of long-period ground motion monitoring in the region where earthquakes occur, summarizes the research status of disaster prevention of mid-story isolated buildings under long-period earthquake excitation. Through the simulation of finite element software and shaking table test under long-period ground motion, it can be concluded that the story isolation structure has good disaster prevention ability under long-period ground motion, it is pointed out that under the action of long-period ground motion, various factors such as velocity pulse, different isolation layers and different isolation bearings should be considered for isolation design; it will be a new direction of design and research to use protective measures to effectively limit protection and to explore energy dissipation measures with remarkable effect in story isolation design.

**Keywords**— long-period ground motions; monitor; mid-story isolation; disaster prevention capability; research summary

**摘要**—总结了长周期地震动的界定、特性及在地震发生区域监测的长周期地震动的研究成果, 综述了长周期地震动作用下的层间隔震建筑防灾研究现状。通

过在长周期地震动作用下有限元软件的模拟、振动台试验的模拟得到层间隔震结构在长周期地震动作用下具有良好的防灾能力, 指出在长周期地震动作用下需要考虑速度脉冲、不同隔震层位置以及不同隔震支座等各项因素进行隔震设计; 在层间隔震设计中使用保护措施进行有效限位保护以及探寻效果显著的消能减震措施将成为设计研究的新方向。

**关键词**—长周期地震动, 层间隔震, 防灾能力

### I. 引言

近几十年, 世界各国发生过多次特大地震, 具有毁灭性, 如 1999 年台湾集集地震、2008 年中国汶川地震、2015 年尼泊尔地震和 2016 年日本熊本地震, 均监测到大量的关于长周期地震动的记录。根据众多专家及学者的研究成果表明, 与普通地震动相比, 长周期地震动给建筑带来的影响远远大于普通地震动。

建筑结构在长周期地震动作用下的设计与普通地震动作用下的设计与也是迥然不同。对于一般的普通地震动作用时, 建筑结构自身的抗震性能在一般情况下时足够支撑的, 但是长周期地震动作用时, 地震响应往往会出现不同。隔震技术在国内外的建筑设计中广泛应用, 隔震分为基础隔震与层间隔震, 基础隔震技术现已得到充分发展, 其在地震灾害中的表现得到高度认可。

层间隔震是近些年来又一个新颖的隔震技

术,值得我们进一步深入研究,在对长周期地震动的充分认识中,层间隔震的研究值得学习。本文对国内外专家学者的相关研究成果进行系统的归纳和总结,重点对长周期地震动的界定、特性,发生过地震区域监测到的实际长周期地震动,长周期地震动作用下的层间隔震的研究现状进行综述,并对长周期地震动灾害下的层间隔震性能需要做哪些研究的问题进行探讨。

## II. 长周期地震动的界定

长周期地震动一般分为近断层脉冲型地震动和远场类谐波地震动两种,长周期地震动的分析方法有经验统计方法和地震学中的震源模型方法两类<sup>[1]</sup>,俞言祥<sup>[2]</sup>提出在这两种方法的基础上,应结合地震学方法和宽频带数字地震仪记录,这样对于研究长周期地震动才是较为有效的,Koketsu<sup>[3]</sup>等提出可以通过储罐在液体晃动产生的破坏中来识别长周期地震动。党育<sup>[4]</sup>在对长周期地震动的界定方面提出了大致的两种方法,分别是定性和定量两类,下面就这两种方法进行长周期地震动的界定方法进行简单总结。

### II.1 定性分类

赵艺<sup>[5]</sup>等提出了界定长周期地震动的有效公式。赵晨晓<sup>[6]</sup>通过大量分析提出参考 Baker 界定脉冲型地震动的方法,用长周期分量为基础,运用逻辑回归来确定长周期地震动的界定指标;其中将长周期分量能量比和长周期分量峰值比为因变量进行逻辑回归也可以得到界定指标。陈清军<sup>[7]</sup>等提出长周期地震动累积滞回耗能比值谱的计算公式与弹塑性时程计算结果接近

### II.2 定量分类

李雪红<sup>[8]</sup>等、赵艺<sup>[5]</sup>等提出的界定长周期地震动的有效公式:

$$\beta_L = \frac{\sum T_i^2 \left( \frac{S_a(T_i)}{PGA} \right)}{\sum T_i^2} \quad (1)$$

其中 $T_i$ ——阻尼比为5%时加速度反应谱等间距离散周期,取值范围为[2s,10s]; $S_a(T_i)$ —— $T_i$ 对应的加速度反应谱值(gal);PGA——加速度峰值(gal)。

而党育等<sup>[4]</sup>定义一个参数 a:

$$a = \frac{PSD[2s,10s]}{PSD[0s,10s]} \quad (2)$$

其中结构的周期范围取 $[0s,10s]$ ;

$PSD[2s,10s]$ 表示2~10s范围内的功率谱密度的面积, $PSD[0s,10s]$ 表示功率谱密度总面积。

上述都对长周期地震动的界定给出了明显的定量区分, $\beta_L > 0.4$ ;  $a \geq 30\%$ 时为长周期地震动。

火明讓<sup>[9]</sup>等对长周期地震动特性进行了详细叙述,长周期地震动灾害具有:方向性效应、滑冲效应、竖向地震动及上盘效应等特性。

## III. 实际监测的长周期地震动灾害

从近些年世界各国的地震中均监测到长周期地震动,那么基于长周期地震动的监测,研究人员就各个地区的地震监测到不同的长周期地震动。日本处于板块之间,地震频发,Ibrahim<sup>[10]</sup>等提出长周期地震动的预测方程,在实际地震中已验证其有效性。Miyake<sup>[11]</sup>等、Furumura<sup>[12-13]</sup>等、Yamada<sup>[14]</sup>等对日本2004年发生的地震中观测到长周期地震动,从此次地震中发现,日本南开地区附近将来会出现长周期地震动的破坏。Takewaki<sup>[15]</sup>等对日本东北地震中诱发的长周期地震动进行研究,表明了在设计中需考虑地震输入能量和约束;而Takemura<sup>[16]</sup>等运用三维有限差分法对日本关东盆地长周期地震动进行模拟,能够准确再现长周期地震动,观测到了盆地长周期地震动发生的缘由。Hatayama<sup>[17]</sup>、Koketsu<sup>[18]</sup>等对日本东京发生地震中发现长周期地震波对结构产生严重影响;谢俊举<sup>[19]</sup>就日本熊本地震的研究中指出结构设计中要重视长周期地震动对结构产生的影响。

兰晓雯<sup>[20]</sup>和邱立珊<sup>[21]</sup>基于汶川地震,对四川长周期地震动反应谱进行研究,前者研究得出目前四川地区的确存在长周期地震动问题,并建立长周期衰减关系;后者为长周期地震动的输入提供了有力的参考。李永义<sup>[22]</sup>等认为对川滇地区长周期地震动的衰减关系研究是有必要的。董晓燕<sup>[23]</sup>等认为辽河平原及周边地区长周期地震动可能会发生,对该地进行预测和防护进行研究。

很多国家都可能会受到长周期地震动的灾害,对于就各个地方发生地震的监测中收获的长周期地震动,各国研究人员进行对长周期地震动的预测及设计,包括我国台湾地区及沈阳市的长周期地震动设计的探讨<sup>[24-25]</sup>,徐龙军<sup>[26]</sup>等认为在设计谱中还需考虑软土地面波效应对长周期地震动灾害下的影响。

## IV. 长周期地震动作用下层间隔震研究现状

### IV.1 长周期地震动灾害下层间隔震理论研究

目前,层间隔震结构正在急速发展中,其中我国内蒙古包头的华发新天地项目运用的就是带层间隔震的框架剪力墙结构。聂宗笙<sup>[27]</sup>等初步查明包头地区坐落于当地山前断裂西段的全新世地震活动断层上,根据历史发现包头地区的将来可能会有强震发生,而往往强震中带有长周期地震波,华发新天地项目运用的层间隔震结构在将来能够验证层间隔震结构的有效隔震性能。

对于长周期地震动作用下的层间隔震,现今国内有很多专家学者进行了大量研究。对于长周期地震动作用下的层间隔震结构的地震响应,昌海林<sup>[28]</sup>、韩徐扬<sup>[29]</sup>以及荣强<sup>[30]</sup>等对其进行了研究分析,表明了长周期地震动的作用下结构的地震响应明显,且不同脉冲类型的地震带给结构的地震响应是不同的,中间隔震层宜设置在中下部。通过上述知道长周期地震动给结构带来的地震响应明显,给结构会带来怎样的动力响应。韩淼<sup>[31-33]</sup>团队对长周期地震动作用下层间隔震的动力响应做了很多研究,得出在不同位置的层间隔震在不同长周期地震动的作用下的动力响应是不同的,以及隔震支座的最大位移相关程度也不同,在对结构进行层间隔震设计时要考虑合适的长周期地震动参数作为设计控制参数,进行综合考虑。孙一林<sup>[35]</sup>也验证了在长周期地震动作用下不同隔震装置不同层隔震结构的动力响应是不同的,对于不同的长周期地震动,在进行层间隔震设计时需要综合考虑。包超<sup>[36]</sup>、李慧<sup>[37]</sup>等表明了近场地震作用下层间隔震的动力响应明显,地震反应也被放大,较大的脉冲分量是结构破坏的因素之一。

长周期地震动作用给结构带来的影响是很大的,尤其是近断层地震动的脉冲给结构的层间位移、层间位移角超出安全值,也使得层间剪力会明显增大以及会产生倾覆的可能性。对于这些问题,如何进行设计解决这些问题。颜桂云<sup>[38-42]</sup>等对上述问题进行了大量研究及分析,得出在近场脉冲型地震灾害下,层间隔震的非线性响应影响显著,不但是上述问题显著出现,支座变形也超过变形容许值,导致隔震支座破坏是的上部结构发生倒塌,通过设置参数合适的粘滞阻尼器、限位保护系统和层间混合隔震能够有效的控制出现的这些问题。另外在远场长周期地震作用下层间隔震的效果不显著,而组合隔震能够较为有效的控制远场长周期地震灾害下结构的非线性反应及减小隔震支座的最大位移。方艺文<sup>[43]</sup>、谭平<sup>[44]</sup>的研究中也表明了阻尼器的是增设能够有效控制支座的最大变形,这样的组合隔震

对于长周期地震作用下的减震和控制具有实用性。韩淼<sup>[45]</sup>等还提出了采用软碰撞限位器来保护隔震结构。

#### IV.2 长周期地震动作用下层间隔震的振动台研究

关于长周期地震动作用下层间隔震的发展迅速,根据研究人员的研究了解到,远场长周期地震动和近场地震动对于层间隔震的影响是不同的,层间隔震不一定是最好的隔震方式,另外近断层地震动作用下的层间隔震结构在有无速度脉冲时也是不同的。根据研究人员的结果可知,在运用有限元软件的模拟与振动台的模拟对比,得出在限位保护措施的运用下能够保证其安全性,尽管依然存在缺陷,但是通过大量的试验对比得出的结论依然具有一定的说服力。

Zheng<sup>[46]</sup>等、Jin<sup>[47]</sup>等以及祁皓<sup>[48]</sup>等对层间隔震结构进行了振动台试验研究,结果表明了振动台试验显示的结果与有限元模拟得出的结果基本是相同的,在普通地震动灾害下,隔震层在结构中下部相比于结构上部隔震效果明显。Zhang<sup>[49]</sup>等运用振动台实时混合仿真技术,具有更加良好的离线和在线加速度跟踪性能,更能准确显现层间隔震在实际振动情况下的各种响应。对于原有建筑的加固,进行加层隔震能够有效减小地震响应<sup>[50]</sup>。

以上是在没有输入长周期地震动情况下层间隔震结构的振动台模拟,颜桂云<sup>[51-52]</sup>对近断层地震动和远场类谐和地震动作用下层间隔震结构进行振动台试验模拟,表明了远场地震下隔震结构不如抗震结构,而在近断层地震动作用下隔震结构需考虑长周期速度脉冲对减震的不利影响;韩淼<sup>[53-54]</sup>等也验证了速度脉冲对层间隔震的影响很大,隔震层的位置很重要;罗楚雄<sup>[55]</sup>表明隔震限位器具有良好的隔震效果。

#### V. 结论与展望

国内外地震调查表明出现长周期地震动灾害的可能性很大。现研究成果表明层间隔震对于长周期地震动的隔震效果显著,所以对于长周期地震动作用下层间隔震结构地震反应的研究需要更加深入。目前对于长周期地震动作用下层间隔震的理论研究以及有限元软件模拟充分发展,而国内外对于长周期地震动作用下层间隔震结构的振动台试验研究甚少。

对于长周期地震动作用下的层间隔震的研究还需以下方面进行深入研究:

- 1.关于偏心结构在长周期地震动作用下层间隔震结构设计研究较少,由于偏心结构与正常结构



在长周期地震动作用下的地震反应是不同的,这是接下来研究人员将要深入的一个方面:

2.层间隔震结构在长周期地震动作用下的振动台研究不够充分,对于在振动台试验中使用不同装置的保护限位措施进行有效对比,选取最有效的措施运用到实际工程中是需要研究人员进一步深入研究;

3.现研究对象基本都是新建建筑在长周期地震动作用下的结构设计研究,而对于已有建筑的加固中研究甚少,经过分析这样的结构设计对于减小地震响应是有效的,所以对于可能发生长周期地震动灾害的地区房屋的加固需深入了解。

### 致谢

感谢本文通讯作者刘德稳副教授悉心指导,本项目受国家自然科学基金项目“长周期地震下高层建筑层间隔震体系损伤机制”(编号:51808467)、云南省农业基础基金项目(编号:2017FG001-097)和云南省博士后基金(编号:2019)联合资助。

### 参考文献

- [1] 吴迪,罗奇峰,罗永峰,“长周期地震波的研究进展,”地震研究, issue 3, pp. 296-302+304, 2007.
- [2] 俞言祥,“长周期地震动研究综述,”国际地震动态,vol. 7, issue 1,pp. 5, 2004.
- [3] Koketsu K, Miyake H, “A seismological overview of long-period ground motion.,” *Journal of Seismology*, vol. 12, issue 2,pp.133-143,2008.
- [4] 党育,李连峰,“长周期地震动的界定及对应场地发生概率,”兰州理工大学学报,vol. 44, issue 6, pp. 112-117,2018.
- [5] 赵艺,于建杰,“远场长周期地震动选取及界定,”山西建筑, vol. 44, issue 4, pp. 38-39,2018.
- [6] 赵晨晓,“基于 HHT 的地震动长周期分量提取与长周期地震动界定方法,”重庆:重庆大学,2017.
- [7] 陈清军,袁伟泽,“基于长周期地震动记录的 SDOF 体系能量谱探讨,”振动与冲击,vol. 32, issue 10, pp. 36-42+54, 2013.
- [8] 李雪红,王文科,吴迪,等. “长周期地震动的特性分析及界定方法研究,”振动工程学报, vol. 27, issue 5, pp. 685-692,2014.
- [9] 火明譔,赵亚敏,陆鸣,“近断层地震作用隔震结构研究现状综述,”世界地震工程, vol. 28, issue 3, pp. 161-170,2012.
- [10] R. Ibrahim, H. J. Si, K. Koketsu, H. Miyake, 李梦莹, “日本大地震震级估计的长周期地震动预测方程,”世界地震译丛, vol. 49, issue 2, pp.93-118,2018.
- [11] Miyake H, Koketsu K, “Long-period ground motions from a large offshore earthquake: The case of the 2004 off the Kii peninsula earthquake,” *Japan. Earth, Planets and Space*, vol. 57, issue 3, pp.203-207,2005.
- [12] Furumura T, Hayakawa T, Nakamura M, et al. “Development of Long-period Ground Motions from the Nankai Trough, Japan, Earthquakes: Observations and Computer Simulation of the 1944 Tonankai (Mw 8.1) and the 2004 SE Off-Kii Peninsula (Mw 7.4) Earthquakes,” *Pure and Applied Geophysics*, vol. 165, issue 3-4, pp.585-607,2008.
- [13] Furumura T, Hayakawa T, “Anomalous Propagation of Long-Period Ground Motions Recorded in Tokyo during the 23 October 2004 Mw 6.6 Niigata-ken Chuetsu, ” *Japan, Earthquake. Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 97, issue 3, pp.863-880,2007.
- [14] Yamada N, Iwata T, “Long-period ground motion simulation in the Kinki area during the MJ7.1 foreshock of the 2004 off the Kii peninsula earthquakes, ” *Earth, Planets and Space*, vol. 57, issue 3, pp.197-202,2005.
- [15] Takewaki I, Fujita K, Yoshitomi S, “Uncertainties in long-period ground motion and its impact on building structural design: Case study of the 2011 Tohoku (Japan) earthquake,” *Engineering Structures*, vol. 49, issue 2, pp.119-134,2013.
- [16] Takemura S, Akatsu M, Masuda K, et al. “Long-period ground motions in a laterally inhomogeneous large sedimentary basin: observations and model simulations of long-period surface waves in the northern Kanto Basin,” *Japan. Earth, Planets and Space*, vol. 67, issue 1, pp. 33,2015.
- [17] Hatayama K, “Lessons from the 2003 Tokachi-oki, Japan, earthquake for prediction of long-period strong ground motions and sloshing damage to oil storage tanks,” *Journal of Seismology*, vol. 12, issue 2, pp. 255-263,2008.
- [18] Koketsu K, Hatayama K, Furumura T, et al. “Damaging long-period ground motions from the 2003 Mw 8.3 Tokachi-oki, Japan earthquake,” *Seismological Research Letters*, vol. 76, issue 1, pp. 67-73,2005.
- [19] 谢俊举,李小军,温增平,“日本熊本 M<sub>w</sub> 7.0 地震的长周期地震动,”地球物理学报, vol. 60, issue 11, pp.4431-4446,2017.
- [20] 兰晓雯,“基于汶川地震动衰减特征的四川长周期地震动反应谱研究,”北京:中国地质大学,2013.
- [21] 邱立珊,“基于汶川地震记录的远场长周期地震动设计反应谱研究,”重庆:重庆大学,2016.
- [22] 李永义,周正华,“川滇地区基岩长周期地震动衰减关系

- 研究的迫切性,” 第三届防灾减灾工程学术会议论文集. 南京工业大学, pp. 58-63,2015.
- [23] 董晓燕, 范晓军, 索锐, “辽宁地区长周期地震灾害预测及防灾对策,” 防灾减灾学报, vol. 29, issue 3, pp. 5-8,2013.
- [24] 陈奕信, 甘锡滢, “台湾长周期地震动之设计探讨,” 上海: 同济大学, pp. 115-121,2013.
- [25] 靳超宇, 肖遥, 臧磊, “沈阳金融中心超高层写字楼项目不同阻尼比长周期地震动参数的确定,” 防灾减灾学报, vol. 31, issue 1, pp. 5-9,2015.
- [26] 徐龙军, 胡进军, 谢礼立, “特殊长周期地震动的参数特征研究,” 地震工程与工程振动, vol. 28, issue 6, pp.20-27,2008.
- [27] 聂宗笙, 任云, 刘志明, 等. “内蒙古包头市区大青山山前断裂地震活动断层初步研究,” 现代地质, vol. 25, issue 5, pp. 938-957,2011.
- [28] 昌海林, “近断层脉冲型地震作用下层间隔震结构的地震响应分析,” 武汉: 华中科技大学,2011.
- [29] 韩徐扬, “长周期地震动作用下层间隔震结构的地震响应分析,” 成都: 西南交通大学,2015.
- [30] 荣强, 吴东, 盛严, “近断层地震动作用下双层隔震体系的地震响应分析,” 工程抗震与加固改造, vol. 37, issue 3, pp. 32-37,2015.
- [31] 韩淼, 张文会, 朱爱东, 等. “不同层隔震结构在近断层地震作用下动力响应分析,” 振动与冲击, vol. 35, issue 5, pp.120-124,2016.
- [32] 韩淼, 张文会, 朱爱东, “近断层地震动对层间隔震结构动力响应影响分析,” 世界地震工程, vol. 31, issue 2, pp. 1-7,2015.
- [33] 韩淼, 孙一林, 孙薇, 等. “层间隔震支座最大位移与近断层地震动相关性分析,” 广州: 广州大学, pp. 30-35,2015.
- [34] 韩淼, 崔明珠, 杜红凯, 等. “近断层地震下层间隔震结构及其试验模型动力响应分析,” 建筑科学, vol. 33, issue 3, pp. 100-106,2017.
- [35] 孙一林, “近断层地震作用下层间隔震结构动力响应分析,” 北京: 北京建筑大学,2016.
- [36] 包超, “近场地震下不规则层间隔震结构响应分析,” 兰州: 兰州理工大学,2012.
- [37] 李慧, 包超, 杜永峰, “近场地震作用下不规则层间隔震结构的动力响应分析,” 地震工程学报, vol. 35, issue 1, pp. 51-55,2013.
- [38] 颜桂云, 吴应雄, 陈福全, “近场脉冲型地震动下层间隔震的非线性反应与隔震层限位分析,” 应用基础与工程科学学报, vol. 23, issue 6, pp. 1185-1197,2015.
- [39] 颜桂云, “近场脉冲型地震下层间隔震减震分析与层间混合隔震控制,” 建筑科学, vol. 31, issue 1, pp. 115-121,2015.
- [40] 颜桂云, 陈福全, 付朝江, “近场脉冲型地震下层间隔震结构的隔震层限位减震分析,” 应用基础与工程科学学报, vol. 24, issue 1, pp. 90-102,2016.
- [41] 颜桂云, 方艺文, 吴应雄, “远场长周期地震下层间隔震结构的非线性减震分析,” 振动与冲击, vol. 37, issue 4, pp. 208-218,2018.
- [42] Yan G, Chen F, “Seismic performance of midstory isolated structures under near-field pulse-like ground motion and limiting deformation of isolation layers,” Shock and Vibration, 2015.
- [43] 方艺文, “多类型长周期地震作用下隔震结构减震性能与失效控制,” 福州: 福建工程学院,2018.
- [44] 谭平, 殷伟希, 张颖, “近场地震下层间隔震偏心结构的减震控制,” 振动与冲击, vol. 30, issue 11, pp. 281-286,2011.
- [45] 韩淼, 朱爱东, 张文会, “近断层地震作用下层间隔震结构弹簧软限位分析,” 工程抗震与加固改造, vol. 37, issue 1, pp. 70-76,2015.
- [46] Zheng G C , Xu H L, “Research on Shaking Table Test of Base and Story Isolation Structures,” Applied Mechanics and Materials, issue 580-583, pp. 1776-1781,2014.
- [47] Jin J M , Tan P , Zhou F L , et al. “Shaking Table Test Study on Mid-Story Isolation Structures with Viscous Damper,” Applied Mechanics and Materials, issue 226-228, pp. 1149-1152,2012.
- [48] 祁皓, 郑国琛, 阎维明, “考虑参数优化的层间隔震结构振动台试验研究,” 建筑结构学报, vol. 30, issue 2, pp.8-16,2009.
- [49] Zhang R , Phillips B M , Taniguchi S , et al. “ Shake table real - time hybrid simulation techniques for the performance evaluation of buildings with inter - story isolation ,” Structural Control & Health Monitoring, 2016.
- [50] 刘鑫, 刘伟庆, 王曙光, 等. “加固加层隔震结构阻尼比特性的振动台试验,” 东南大学学报(自然科学版), vol. 42, issue 6, pp. 1151-1156,2012.
- [51] 颜桂云, 肖晓菲, 吴应雄, 等. “近断层地震动作用下大底盘单塔楼隔震结构振动台试验研究,” 振动工程学报, vol. 31, issue 5, pp. 799-810,2018.
- [52] 颜桂云, 方艺文, 吴应雄, 等. “远场类谱和地震动下大底盘单塔楼隔震结构振动台试验研究,” 振动与冲击, vol. 37, issue 18, pp. 86-94,2018.
- [53] 韩淼, 孟令帅, 杜红凯, “近断层地震速度脉冲对层间隔震结构响应影响的振动台试验研究,” 工程抗震与加固改造, vol. 39, issue 6, pp.68-73+17,2017.
- [54] 韩淼, 崔明珠, 杜红凯, 等. “近断层地震下层间隔震结构及其试验模型动力响应分析,” 建筑科学, vol. 33, issue 3,

pp. 100-106,2017.

设计,”北京:北京建筑大学,2016.

[55] 罗楚雄,“近断层地震下的层间隔震限位机构试验与模型