第 42 卷 第 5 期
2020 年 9 月

地 震 工 程 学 报
CHINA EARTHQUAKE ENGINEERING JOURNAL

Vol. 42 No.5
September, 2020

张克纯,李凝志.复杂地震激励下隔震结构地震响应研究进展[J].地震工程学报,2020,42(5):1270-1275.doi:10.3969/j.issn.1000－0844.2020.05.1270

ZHANG Kechun,LI Ningzhi.Research Progress in Seismic Response of Base-isolated Structures under Complex Earthquake Excitation[J].China Earthquake Engineering Journal,2020,42(5):1270-1275.doi:10.3969/j.issn.1000－0844.2020.05.1270

复杂地震激励下隔震结构地震响应研究进展

张克纯[1,2], 李凝志[3]

(1. 江苏信息职业技术学院, 江苏 无锡 214153; 2. 河海大学, 江苏 南京 210098; 3. 同济大学, 上海 200092)

摘要: 隔震技术作为当前最有效的结构减震控制技术之一,在世界各国高烈度地区广泛建造。随着隔震技术的大范围推广,建造工况更为复杂的隔震工程随之不断涌现。系统深入研究复杂地震激励下隔震结构地震响应,是隔震工程长期安全服役的重要保障,也是隔震技术能够不断完善和推广的坚实基础。本文从复杂地震激励涵盖的多维地震、近场和近断层地震、行波效应以及土与结构相互作用四个主要方面入手,依据国内外相关文献开展综述,探讨了复杂地震激励下隔震结构研究存在的问题,并对此进行展望。

关键词: 隔震工程; 多维地震; 近场地震; 近断层地震; 行波效应; 土与结构相互作用; 地震响应

中图分类号: TU313; U412 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000－0844(2020)05－1270－07

DOI:10.3969/j.issn.1000－0844.2020.05.1270

Research Progress in Seismic Response of Base-isolated Structures under Complex Earthquake Excitation

ZHANG Kechun[1,2], LI Ningzhi[3]

(*1.Jiangsu Vocational College of Information Technology, Wuxi 214153, Jiangsu, China;*
2.Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China;
3.Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: As one of the most effective structural shock absorption control technologies, seismic isolation technology is widely used in high-intensity regions in various countries. With the widespread promotion of isolation technology, isolation projects with more complicated construction conditions have emerged. The systematic study of isolated structures seismic response under complex earthquake excitation is an important guarantee for the long-term safe service of isolated projects and a solid foundation for the continuous improvement and promotion of isolation technology. First, this paper addresses the four main aspects of multi-dimensional earthquakes, including complex seismic excitation, near-field and near-fault earthquakes, traveling wave effects, and soil-structure interaction. Then, a review of relevant literature is presented to discuss existing problems in isolated structures under complex seismic excitation.

收稿日期: 2020-07-10

基金项目: 江苏省青蓝工程中青年学术带头人资助项目(苏教师〔2016〕15 号);国家自然科学基金面上项目(51778497)

第一作者简介: 张克纯(1973－),男,安徽芜湖人,副教授、高级工程师,研究方向:BIM 技术、抗震、加固。
E-mail:275565964@qq.com。

通信作者: 李凝志(1980－),男,湖南平江人,博士,副教授,研究方向:钢筋混凝土结构抗火、抗震与加固技术研究。

Keywords：isolation project；multi-dimensional earthquake；near-field earthquake；near-fault earthquake；traveling wave effect；soil-structure interaction；seismic response

0　引言

中国地处环太平洋地震带与欧亚地震带之间，超过 1/3 的国土以及约 1/2 的城市位于Ⅶ度以上的高地震烈度区，是世界上地震活动最频繁和地震灾害最严重的国家之一。面对地震造成的巨大人员伤亡和财产损失，国内外学者研究了多种应对措施，这其中就包括可以同时实现降低震害损失和震后功能不中断的隔震技术[1]。随着国内建设主管部门的大力推广[2]，隔震技术在新疆、陕西、甘肃、云南等省区得到积极推广，大量隔震结构应运而生。在应用推广过程中，隔震结构形式日趋多样化和复杂化，加之地震动本身随机性极强，原有计算方法已无法完全满足。为了得到更为准确、合理、可靠的计算结果，确保隔震结构地震作用下的安全性，国内外学者针对隔震结构真实地震中潜在的各种复杂工况进行了大量研究。

1　多维地震

地震是一个复杂的多维随机振动过程，通常会引起地面在多个方向出现平动和扭转效应。在计算分析时，结构地震响应也因是否考虑多维地震输入而存在较大差异[3]。齐杰，孙建琴[4]通过计算 9 度区高层 RC 剪力墙基础隔震结构地震响应，发现多向地震动输入对隔震结构层间位移、楼层加速度、支座面压和支座滞回均有显著影响。颜学渊等[5]指出隔震后的子框架可以对主结构三维地震响应起到明显的调谐减震作用，三维隔震支座对各类场地地震动作用下的子框架三维地震响应具有显著的隔震作用。王曙光等[6]结合等价线性化方法，将随机因子法拓展应用到非线性多自由度结构中，采用结构随机因子法建立大跨隔震结构的四个随机变量与结构刚度和质量之间的关系，结构表明随着隔震支座各参数的变异系数增大，结构位移响应均方值的离散性亦增大。此外，该团队与固定基础模型相比，基础隔震模型的水平周期和阻尼比可以得到明显改善[7]，降低了上部结构的水平动力响应，且随着隔震系数的增加，水平隔震效果得到改善；并建议通过抑制水平地震分量引起的网格屋顶的竖向动力响应，实现三向地震作用下的垂直减震效果。刘德稳等[8]研究了双向地震作用下双向偏心结构地震响应规律，指出层间隔震可以减小整体结构扭转耦联效应，但下部结构存在双向偏心时会对隔震层和下部结构扭转反应带来不利影响。

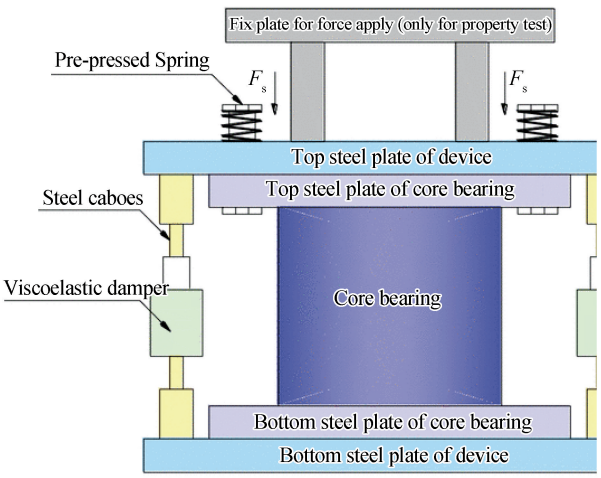


图 1　配置原理图[9]

Fig.1　Schematic diagram of configuration principle[9]

除了研究结构地震响应，针对三向地震作用下结构地震响应的特殊性研发三向隔震装置也始终是国内外研究热点。XU 等[9]提出一种新型的多维减隔震装置，通过三层钢框架结构的水平和垂直振动台测试对比分析，发现该隔震装置具有良好的三维隔震性能。ZHANG 等[10]提出了一种三向隔震系统，该系统可以大幅延长结构周期，并从三个方向上耗散地震能量。SHANG 等[11]提出了一种可用于低层住宅的低成本的弹簧沥青三向基础隔震支座，试验结果表明该支座可以有效降低上部结构水平和竖向加速度。

常见的叠层橡胶隔震支座、摩擦摆隔震支座等隔震支座减震效果良好，并在历次实际地震中得以验证。尽管不少学者提出了大量形式各异的三维隔震装置，但普遍处于研发阶段，尚未得到广泛接受和实际工程验证。

2　近场/近断层地震

近场地震动多指与断层破裂面距离小于 20 km，且震中烈度 6.5 度以上，地面加速度峰值不小于 0.15g 的地震动记录[12]。由于震源距过小，近场地震动通常具有高能量脉冲运动、方向性效应和竖

向加速度较大等特点[13]，进而造成有别于中远场地震所引起的结构响应。由于结构形式特殊，已有的大量关于近场地震作用下传统抗震结构地震响应研究成果无法完全适用。

李慧等[14]指出近场地震作用下基础隔震结构、层间隔震结构与抗震结构顶层将出现鞭梢效应，层间隔震结构地震响应介于其余两种结构之间，并建议对层间隔震结构中裙楼顶部予以加强。颜桂云等[15]同样指出近场脉冲型地震作用下层间隔震结构非线性响应显著增大，对此，建议对在隔震层增设限位保护系统，从而防止强震作用下隔震失效而引起上部结构倾覆[16-17]。BHANDARI 等[18]指出由于滑冲效应影响，在近场强震作用下基础隔震极有可能进入非线性状态。

对于大量建造于高烈度区的实际隔震工程，需要重点研究其在近场地震下的结构响应。张战书等[19]对比分析了规范中近场系数的三种使用方法，提出将地震加速度峰值进行放大处理需要重点关注罕遇地震下隔震支座变形问题。邢珏蕙等[20]按照近场影响系数 1.5 对Ⅸ度区高层剪力墙结构地震响应进行研究，结果表明中震作用下隔震结构表现出良好的减震效果，并能满足“大震不倒”设防目标。丁万鹏，虞庐松等[21]以西北大温差地区某曲线连续梁桥为工程实例，研究了近断层脉冲地震作用下结构地震响应规律和碰撞效应，结果表明近断层脉冲地震作用下结构地震响应显著增大，结构碰撞不仅取决于地震特性还与气温相关。

除此以外，不少学者针对近场地震作用下结构地震响应的控制问题展开研究。考虑到近场地震作用时隔震层位移较大结构易倾覆，韩淼等[22]隔震层限位装置及其参数，以及潜在的限位工况展开了系统性研究。TAGHIZADEH 等[23]指出磁流变弹性支座可以有效控制近场地震作用下隔震层位移和加速度响应。颜学渊等[24]设计制作了一种由 3 个巨型结构层构成的巨－子结构模型，试验发现子结构中组合隔震层可以对主结构起到质量调谐作用，但近断层地震脉冲效应影响下结构地震响应大于远场地震。

3 行波效应

对于平面投影尺度很大的空间结构，应根据结构形式和支承条件，分别按单点一致、多点、多向单点或多向多点输入进行抗震计算[25]，因此，考虑空间变化的地震多点输入比一致输入更符合实际[26]。薛素铎等[27-28]通过振动台试验研究了行波效应对隔震网壳地震响应，结果表明行波效应造成部分隔震支座剪切变形显著增大，按照一致激励地震动输入将导致设计结果不安全。顾镇媛等[29]指出视波速达到或超过 500 m/s 时多点输入效应即可以忽略不计；跨度小于 60 m 时多点输入效应亦可不计，而跨度大于 120 m 时则必须考虑多点输入效应。李亚娥，张丁等[30]对比分析了一致激励与非一致激励作用下高位连体结构地震响应，结果显示行波效应引起非隔震连体结构中间层响应增大，引入隔震技术则可以有效消除行波效应引起的不利影响。

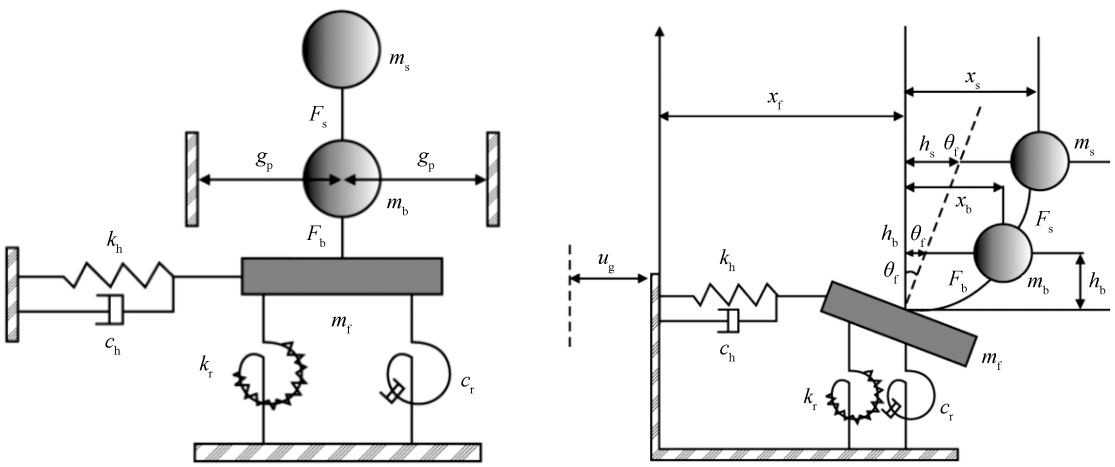
对于跨度较大的桥梁结构，由于其个各支点距离较大极易引起地震动传播时滞现象，采用不考虑各支点地震动差异的一致激励方法，显然，并不符合工程实际，因此大跨度桥梁结构通常也必须考虑行波效应。闫磊等[31]指出行波效应容易造成非规则桥梁中的矮墩弯矩和板式橡胶支座位移增大，建议在进行非规则桥梁设计时考虑行波激励及支座摩擦。周波等[32]基于地震易损性分析方法，对比分析了采用不同减隔震装置的桥梁设计方案，指出高烈度地区大跨度高速铁路桥梁需借助减隔震设计方能满足设计目标。李喜梅等[33]针对多维地震动输入方向引起曲线梁桥响应差异问题，提出了双质点六自由度简化分析模型，通过数值模拟发现该模型计算准确且高效。

此外，其他大型隔震结构同样可能受到波效应影响，LIU 等[34]探讨了将隔震技术应用于大型冷却塔，结果表明隔震技术可以大幅降低罕遇地震下结构基底剪力，保护冷却塔免收行波不利影响。

4 土与结构相互作用

地震时结构振动主要受结构自身参数、地震波特性、场地条件和土与结构相互作用等因素影响，其中，结构自身参数和场地条件相对容易确定，多维地震、近场/近断层地震和行波效应均属于地震波特性。由于土与结构相互作用十分复杂，在工程设计计算时大都不予考虑。然而，越来越多研究表明忽略土与结构相互作用将造成计算结果偏于不安全。张馨圆等[35]指出软土地基对隔震结构地震响应存在放大效应，建于坚硬地基土上的隔震结构可以不考虑土－结构相互作用。翁大根等[36]针对罕遇地震下建于软土地基的隔震结构隔震层位移难以控

制，提出了采用隔震支座和阻尼器配合使用的组合隔震方案。罗翔等[37]研究发现建于硬土场地的基础隔震结构隔震效果优于软土场地隔震结构，需选用一定规格的铅锌橡胶隔震支座来达到隔震目标。SHOURESTANI 等[38]也有类似的发现，即使对于主动控制隔震结构，土与结构相互作用效应对控制器的设计会产生较大影响，忽略土与结构相互作用会降低结构减隔震效果。谢云飞等[39]研究了考虑碰撞效应的图-单层隔震结构弹塑性地震响应，结果表明地震过程中当结构发生碰撞时土与结构相互作用效应将更为显著。利用土与结构相互作用还可以实现某些特殊结构的减震控制。尹志勇等[40]将砂垫层应用于农居工程防震减震，通过试验研究发现借助地基砂垫层可以有效减小上部结构地震响应。综上可见，考虑土与结构相互作用对于获取更为准确的隔震结构地震响应十分必要。



(a) 模型　　(b) 变形示意

图 2　土-单层隔震结构模型示意[39]

Fig.2　Schematic diagram of soil-single-storey isolated structure[39]

5　结论

本文对复杂地震激所涵盖的四个主要方面多维地震、近场和近断层地震、行波效应以及土与结构相互作用展开综述和讨论。从国内外研究现状来看，

（1）地震维度的增加使地震动及其引起的结构响应更为复杂，现有成果主要集中于结构地震响应研究与三维减震装置的开发。防止竖向地震作用下支座受拉破坏是研究隔震结构多维地震响应的落脚点，因此研发切实有效的三维减隔震仍将是今后研究热点之一。

（2）近场地震和近断层地震因其特殊属性对工程结构损伤破坏尤为严重，当前大量高烈度区隔震结构尚未经历实际强震尤其是近场强震的考验，隔震结构抗倾覆问题还处于理论分析阶段，十分有必要针对极端状况下结构倾覆问题开展系统研究。

（3）地震动行波效应多出现在支点距离较大的大跨空间结构或桥梁结构，行波效应的影响主要取决于结构属性和视波速。现有研究多集中于行波效应对结构地震响应的影响机制和规律，如何通过构造设计或引起控制装置降低行波效应尚有待研究。

（4）大量研究成果表明，由于土与结构相互作用导致建于软土地基的隔震结构地震响应出现放大现象，因此隔震结构在设计选址初期就需要避开软土场地。

参考文献（References）

[1]　王志恒，商怀帅，魏磊，等.振动控制及减隔震技术的发展与应用[J].建筑结构，2017，47（增刊 1）：625-628.
WANG Zhiheng，SHANG Huaishuai，WEI Lei，et al.Development and Application of Vibration Control and Reduction of Isolation Technology[J].Building Structure，2017，47（Suppl）：625-628.

[2]　中华人民共和国住房和城乡建设部.关于房屋建筑工程推广应用减隔震技术的若干意见（暂行）[EB/OL].（2014-02-21）.http://www.mohurd.gov.cn/wjfb/201402/t20140226_217207.html.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China.Several Opinions on the Promotion and Application of Seismic Reduction and Isolation Technology for Housing Construction Projects（Provisional）[EB/OL].（2014-02-21）.http://www.mohurd.gov.cn/wjfb/201402/t20140226_217207.html.

[3]　李宏男.结构多维抗震理论与设计方法[M].北京：科学出版社，1998.

LI Hongnan. Multidimensional Seismic Theory and Design Method of Structure[M].Beijing:Science Press,1998.

[4] 齐杰,孙建琴.多向地震动输入对高层隔震结构抗震性能影响[J].工程抗震与加固改造,2019,41(2):43-49,66.
QI Jie,SUN Jianqin.Influence of Multi-directional Ground Motion Input on Seismic Performance of High-rise Isolated Structures[J].Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting,2019,41(2):43-49,66.

[5] 颜学渊,祁皑,毛会敏,等.基于三维隔震的巨子结构多维地震反应分析[J].土木工程学报,2017,50(5):36-46.
YAN Xueyuan,QI Ai,MAO Huimin,et al.Multi-dimensional Seismic Response Analysis of Three-dimensional Seismic-isolation Mega-sub Structure[J].China Civil Engineering Journal,2017,50(5):36-46.

[6] 王曙光,杜东升,李威威,等.大跨隔震结构基于结构随机因子法的响应分析[J].振动与冲击,2017,36(10):154-158.
WANG Shuguang,DU Dongsheng,LI Weiwei,et al.Response Analysis of Large-span Isolated Structures Based on the Random Factor Method[J].Journal of Vibration and Shock,2017,36(10):154-158.

[7] XU W Z,DU D S,WANG S G,et al.ShakingTable Tests on the Multi-dimensional Seismic Response of Long-span Grid Structure with Base-isolation[J].Engineering Structures,2019,201:109802.DOI:10.1016/j.engstruct.2019.109802.

[8] 刘德稳,孙毅,齐荣庆,等.层间隔震偏心结构双向地震耦合响应研究[J].地震工程学报,2019,41(6):1440-1447.
LIU Dewen,SUN Yi,QI Rongqing,et al.Coupling Seismic Response of Inter-story Isolated Eccentric Structures under a Bidirectional Earthquake[J].China Earthquake Engineering Journal,2019,41(6):1440-1447.

[9] XU Z D,GAI PP,ZHAO H Y,et al.Experimental and Theoretical Study on a Building Structure Controlled by Multi-dimensional Earthquake Isolation and Mitigation Devices[J].Nonlinear Dynamics,2017,89(1):723-740.

[10] ZHANG H D,LIANG X,GAO Z Y,et al.Seismic Performance Analysis of a Large-scale Single-layer Lattice Dome with a Hybrid Three-directional Seismic Isolation System[J].Engineering Structures,2020,214:110627.DOI:10.1016/j.engstruct.2020.110627.

[11] SHANG S P,WANG Z,XIAO Y F,et al.Experimental and Numerical Study of the Spring-asphalt 3D Isolation Structures under Multi-component Ground Motions[J].Bulletin of Earthquake Engineering,2020,18(5):2461-2496.DOI:10.1007/s10518-019-00778-y.

[12] 张莹,孙广俊,李鸿晶.近断层强地震地面运动特征参数分析[J].南京工业大学学报(自然科学版),2017,39(1):85-92.
ZHANG Ying,SUN Guangjun,LI Hongjing.Characteristic Parameters Analysis of Near-fault Eart Hquake-i Nduced Ground Mot I Ons[J].Journal of Nanjing University of Technology,2017,39(1):85-92.

[13] 谭平,谈忠坤,周福霖.近场地震动特性及其弹性与塑性谱的研究[J].华南地震,2008,28(2):1-9.
TAN Ping,TAN.Zhongkun and ZHOU Fulin.Investigation on Characteristics of Near-field Ground Motion and Its Elastic and Inelastic Response Spectra[J].South China Journal of Seismology,2008,28(2):1-9.

[14] 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[J].地震工程学报,2013,35(1):51-55.
LI Hui,BAO Chao,DU Yongfeng.Dynamic Response Analysis of Irregular Story Isolation Structures under Near-field Earthquake Conditions[J].China Earthquake Engineering Journal,2013,35(1):51-55.

[15] 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[J].应用基础与工程科学学报,2015,23(6):1185-1197.
YAN Guiyun,WU Yingxiong,CHEN Fuquan.Analysis on Nonlinear Responses of Mid-story Isolated Structures and Limiting Deformation of Isolation Layers under Near-field Pulse-like Ground Motion[J].Journal of Basic Science and Engineering,2015,23(6):1185-1197.

[16] 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[J].应用基础与工程科学学报,2016,24(1):90-102.
YAN Guiyun,CHEN Fuquan,FU Chaojiang.Limiting Deformation of Isolation Layers and Reducing Seismic Response for Mid-story Isolated Structures Subjected to Near-field Pulse-like Ground Motion[J].Journal of Basic Science and Engineering,2016,24(1):90-102.

[17] 颜桂云,项洪,张铮,等.近场脉冲型强震下基础隔震结构的非线性反应与限位分析[J].建筑结构,2016,46(11):96-101.
YAN Guiyun,XIANG Hong,ZHANG Zheng,et al.Nonlinear Responses of Base-isolated Structures and Limiting Deformation of Isolation Layers under Near-field Pulse-like Strong Ground Motions[J].Building Structure,2016,46(11):96-101.

[18] BHANDARI M,BHARTI S D,SHRIMALI M K,et al.The-Numerical Study of Base-Isolated Buildings under Near-Field and Far-Field Earthquakes[J].Journal of Earthquake Engineering,2018,22(6):989-1007.DOI:10.1080/13632469.2016.1269698.

[19] 张战书,孙柏锋,张龙飞,等.近场地震作用下隔震结构分析方法探讨[J].建筑结构,2017,47(增刊1):644-648.
ZHANG Zhanshu,SUN Baifeng,ZHANG Longfei,et al.Analysis Methods Discussion of Isolated Structures on Near-filed Ground Motions[J].Building Structure,2017,47(Suppl):644-648.

[20] 邢珏蕙,閤东东,卜龙瑰,等.西昌市某高层剪力墙结构隔震设计与分析[J].地震工程学报,2019,41(2):332-339.
XING Juehui,GE Dongdong,BU Longgui,et al.Design and Analysis of the Isolated Bearings for a High-rise Shear Wall Structure in Xichang City[J].China Earthguake Engineering Journal,2019,41(2):332-339.

[21] 丁万鹏,虞庐松,王力,等.近断层地震作用下考虑温度和碰撞效应的曲线梁桥地震响应分析[J].中国安全生产科学技术,2020,16(6):5-10.

DING Wanpeng, YU Lusong, WANG Li, et al. Seismic Response Analysis of Curved Girder Bridge Under Near-Fault Earthquake Considering Temperature and Collision Effect[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2020, 16(6): 5-10.

[22] 韩淼，孙文童，韩蓉，等.近断层地震动作用下隔震限位的限位器受力分析[J].建筑结构，2019，49(S1)：479-483.
HAN Miao, SUN Wentong, HANRong, et al. Stress Analysis of Soft Limit of Story Isolation Structure Under Near-Fault Ground Motions[J]. Building Structure, 2019, 49(S1): 479-483.

[23] TAGHIZADEH S, KARAMODIN A. Comparison of AdaptiveMagnetorheological Elastomer Isolator and Elastomeric Isolator in Near-Field and Far-Field Earthquakes[J]. Scientia Iranica, 2019: 0.

[24] 颜学渊，毛会敏，吴应雄，等.近断层激励下子结构组合隔震的巨-子结构试验[J].湖南大学学报(自然科学版)，2017，44(11)：23-30.
YAN Xueyuan, MAO Huimin, WU Yingxiong, et al. Experimental Study on Mega Sub Structures with Combined Isolation under near Fault Ground Motion[J]. Journal of Hunan University (Natural Science), 2017, 44(11): 23-30.

[25] 中华人民共和国住房和城乡建设部，中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.中华人民共和国国家标准：建筑抗震设计规范：GB 50011—2010[S].北京：中国建筑工业出版社，2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. National Standard (Mandatory) of the People's Republic of China: Code for Seismic Design of Buildings: GB 50011—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.

[26] 李玉刚，支旭东，范峰.单层球壳结构地震空间相关性效应的影响因素研究[J].空间结构，2013，19(3)：9-13.
LI Yugang, ZHI Xudong, FAN Feng. Study of Influence Factors on Seismic Spatial Correlation Effect for Single-layer Reticulated Domes[J]. Spatial Structures, 2013, 19(3): 9-13.

[27] 薛素铎，单明岳，李雄彦，等.多点激励的高位隔震单层柱面网壳振动台试验[J].世界地震工程，2017，33(3)：24-33.
XUE Suduo, SHAN Mingyue, LI Xiongyan, et al. Shaking Table Experiment for High Position Seismically Isolated Single-layer Latticed Cylindrical Shell under Multi-support Excitations[J]. World Information on Earthquake Engineering, 2017, 33(3): 24-33.

[28] 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.

[29] 顾镇媛，唐天栎，徐益康，等.罕遇地震下大跨隔震结构随机地震响应[J].科学技术与工程，2019，19(30)：281-287.
GU Zhenyuan, TANG Tianyue, XU Yikang, et al. Random Seismic Response Analysis of Large Span Isolated Structures Subjected to Rare Earthquake[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(30): 281-287.

[30] 李亚娥，张丁.考虑行波效应的层间隔震高位连体结构动力响应分析[J].工程抗震与加固改造，2018，40(6)：45-50，73.
LI Ya'e, ZHANG Ding. Dynamic Response Analysis of the Story Isolation High Level Connected Structure Considering Traveling Wave Effects[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2018, 40(6): 45-50, 73.

[31] 闫磊，李青宁，赵花静，等.行波激励下考虑结构碰撞的非规则桥梁抗震性能研究[J].地震工程学报，2018，40(6)：1243-1251.
YAN Lei, LI Qingning, ZHAO Huajing, et al. Seismic Performance of Irregular Bridges Considering Structural Pounding under Traveling Wave Excitation[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(6): 1243-1251.

[32] 周波，魏鲡軻，宋新龙.基于地震易损性的连续梁桥减隔震方案研究[J].中国安全生产科学技术，2019，15(11)：118-122.
ZHOU Bo, WEI Liyun, SONG Xinlong. Study on Schemes of Seismic Mitigation and Isolation for Continuous Beam Bridge Based on Seismic Vulnerability[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019, 15(11): 118-122.

[33] 李喜梅，杜永峰，母渤海.多维地震激励下曲线梁桥简化模型及最不利输入方向研究[J].地震工程学报，2020，42(2)：304-310.
LI Ximei, DU Yongfeng, MU Bohai. A Simplified Model of and Critical Angles for Curved Bridges Under Multi-Dimensional Earthquake Excitation[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(2): 304-310.

[34] LIU Y, ZENG G, DAI J, et al. Study on the Application of Base Isolation for the Ultra Large Cooling Tower Structure [M]. International Collaboration in Lifeline Earthquake Engineering 2016. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2017: 186-193.

[35] 张馨圆，葛楠，富腾，等.土-结构相互作用对隔震结构减震效果影响研究[J].建筑科学，2020，36(1)：26-33.
ZHANG Xinyuan, GE Nan, FU Teng, et al. Influence of Soil-structure Interaction on Seismic Response of Isolated Structures[J]. Building Science, 2020, 36(1): 26-33.

[36] 翁大根，刘帅，李霄龙，等.软土地基结构隔震方案及其工程应用[J].建筑结构学报，2015，36(2)：41-50.
WENG Dagen, LIU Shuai, LI Xiaolong, et al. Research and Application of Structural Seismic Isolation in Soft Ground[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(2): 41-50.

[37] 罗翔，戴靠山，吕洋，等.软土场地基础隔震建筑减震性能研究[J].地震工程与工程振动，2020，40(1)：213-222.
LUO Xiang, DAI Kao-shan, LV Yang, et al. Seismic Response Reduction of Base-Isolated Buildings Located on Soft Soil Sites[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2020, 40(1): 213-222.

(下转第 1336 页)

World Seismology,2000(12):1-4.

[2] 郭增建,郭安宁.从灾害链角度讨论 1920 年海原 8.5 级地震[J].地震工程学报,2019,41(6):1394-1395,1481.
GUO Zengjian,GUO Anning.Discussion on the Haiyuan M8.5 Earthquake of 1920 from the View Point of Disaster Chain[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41 (6): 1394-1395,1481.

[3] 宁夏回族自治区地震局,中共海原县委,海原县人民政府.海原大地震 1920[M].北京:阳光出版社,2010.
Earthquake Bureau of Ningxia Hui Autonomous Region, CPCHaiyuan County Committee, Haiyuan County People´s Government.Haiyuan Earthquake 1920[M].Beijing: Sunshine Press,2010.

[4] 邓起东.在科学研究的实践中学习和进步:纪念海原大地震 90 周年,为地震预测和防震减灾事业而努力[J].地震地质,2011,33(1):1-14.
DENG Qidong.Learning and Progress through Scientific Practices: Commemorating the 90th Anniversary of the Tragic Haiyuan Earthquake, Striving to Advance our Abilities of Earthquake Prediction and Seismic Hazard Reduction[J].Seismology and Geology,2011,33(1):1-14.

[5] 张会仙,左双英,李洪建,等.某高陡型牵引式滑坡群形成机理及治理效果评价[J].贵州大学学报(自然科学版),2019,36(1):21-28.
ZHANG Huixian,ZUO Shuangying,LI Hongjian,et al.Formation Mechanism and Governance Effect Evaluation of the High-steep Type of Traction of Landslide Group[J].Journal of Guizhou University (Natural Science Edition) ,2019,36(1):21-28.

(上接第 1275 页)

[38] SHOURESTANI S, SOLTANI F, GHASEMI M, et al. SSI Effects on Seismic Behavior of Smart Base-Isolated Structures [J].Geomechanics and Engineering,2018,14(2):161-174.

[39] 谢云飞,刘阳,何文福.考虑碰撞效应的土-单层隔震结构的损伤性能分析[J].四川建筑科学研究,2017,43(2):88-93.
XIE Yunfei, LIU Yang, HE Wenfu. Damage Performance Analysis of Soil-single-story Isolated Structure System Considering Impact[J]. Building Science Research of Sichuan, 2017,43(2):88-93.

[40] 尹志勇,孙海峰,景立平,等.农居工程地基砂垫层隔震体系性能试验研究[J].地震工程学报,2019,41(1):101-107.
YIN Zhiyong,SUN Haifeng,JING Liping,et al.Experimental Study on the Performance of Sand Cushion Isolation System in the Foundation of a Rural Residential Project[J]. China Earthguake Engineering Journal,2019,41(1):101-107.