

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201912054

地震作用下结构的提离摇摆效应研究现状及进展*

郑年文¹, 王国波^{1,2}

(1. 武汉理工大学道路桥梁与结构工程湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430070;
2. 温州大学建筑工程学院, 浙江 温州 325000)

摘要: 在强烈的地震作用下土-基础-结构相互作用体系不可避免地发生基础与地基接触面分离的非线性行为。已有研究表明这种基础提离摇摆行为有利于结构抗震, 利用地基与基础接触面处的非线性及地基土的塑性变形等消耗大部分地震能量, 使原本在上部结构形成的塑性铰转移到地基土, 减小上部结构的塑性变形并防止其倒塌, 从而确保上部结构的安全。首先介绍经典的考虑基础提离摇摆的结构地震响应计算模型和研究方法, 从不同结构类型角度分别介绍结构提离摇摆响应的研究, 并将得到的主要结论进行总结。建议加强大震下结构提离摇摆非线性行为精细化计算方法、结构摇摆响应谱以及相应的大比例结构模型试验验证等关键环节的研究, 以更准确地确定摇摆结构地震响应规律, 并将其推广应用用于工程实际。

关键词: 基础提离; 摇摆隔震; 地震响应; 摇摆谱

中图分类号: TU31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)06-1395-13

State-of-the-art on Uplift and Rocking Effect of Structure under Earthquakes

ZHENG Nianwen¹, WANG Guobo^{1,2}

(1. Hubei Key Laboratory of Roadway Bridge & Structure Engineer, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Wenzhou University, Wenzhou 325000, China)

Abstract: Under the action of strong earthquakes, the nonlinear behavior of separation between the foundation and the subsoil inevitably occurs in the soil-foundation-structure interaction system. Previous studies have shown that this kind of foundation uplift and rocking behavior is conducive to the earthquake resistance of the structure. The nonlinearities at the interface and the plastic deformation of the foundation soil consume most of the seismic energy, so that the plastic hinge originally formed in the superstructure is transferred to the foundation soil. It reduces the plastic deformation of the superstructure and prevents structures from collapsing, thereby ensures the safety of the superstructure. This paper first introduces the classical seismic response calculation model and research method for structure considering the foundation uplift and rocking, then refers the study on the structural uplift and rocking response from the perspective of different structure types, and finally summarizes the main conclusions of the studies. Suggestions on strengthening the research on the key aspects including refined calculation method for uplift and rocking nonlinear behavior of structures under large earthquakes, structural rocking response spectrum and corresponding large-scale structural model test veri-

* 收稿日期: 2019-12-20; 修回日期: 2020-01-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878529; 51678465)资助

作者简介: 郑年文(1995—), 男, 硕士研究生。主要从事土-结构相互作用分析方面的研究。E-mail: 923407649@qq.com

fication are recommended, so as to determine the seismic response law of rocking structures more accurately, and apply it to engineering practice.

Keywords: foundation uplift; rocking isolation; seismic response; rocking spectrum

引言

通常认为基础与土体发生分离会给建筑物带来倾覆倒塌的危险,不利于结构抗震,因此我国抗震设计规范中对在地震作用下基础底面出现脱离区的面积限值作出相关规定。然而在实际的强烈地震作用下往往会出现基础与地基土发生一定分离、结构摇摆的情况,地基与基础的相互作用不可避免地造成塑性变形、非线性行为。

对提高摇摆非线性现象的观察最早起源于人们对残存历史古建筑物的思考,如历史悠久的古希腊神庙石柱在强震时柱底发生滑移(Sliding)和脱离(Uplift),有效地避免石柱发生倒塌,使得它们能够留存至今^[1-2];我国古代的木结构建筑中,柱平摆浮搁在基石上,柱架依靠自重水平地震作用下会产生反复抬升和回位,并通过木结构的柔性榫卯、斗拱等特殊连接构造来减少结构的地震响应^[3]。研究人员从地震震害调查中也发现这种提高摇摆现象的存在,G. W. Housner^[4]观察到1960年智利大地震中不经意弱化处理的高位水塔没有发生破坏,而周围看似坚固的结构却发生严重破坏这一现象,对此进行研究并提出刚性地基上刚性体摇摆模型,分析结果表明,在地震作用下摇摆结构具有较好的抗震性能;1999年土耳其地震中一个位于软弱地基上的细长结构发生倾斜,地基土发生局部破坏,但上部结构保存完好,保证了建筑物内人员的生命安全^[5]。

随着研究的深入,土-结构相互作用效应(SSI: Soil-Structure Interaction)已得到广泛认可,但对于允许结构基础与地基土发生分离理念的接受程度还远远不够。对土-基础-结构相互作用体系表现出的提高摇摆非线性行为,已有许多理论分析、数值模拟及试验研究^[5-12],并在此基础上逐渐提出“摇摆隔震(Rocking Isolation)”的新理念。该理念的基本原理是有意弱化结构基础,允许结构基础在地震时发生脱离,利用地基与基础接触面处的非线性及地基土的非线性、塑性变形等消耗大部分地震能量,

使原本在上部结构形成的塑性铰转移到地基土,减小或避免上部结构的塑性变形并防止其倒塌。图1将传统承载力设计与新的摇摆隔震设计理念进行比较^[5]。两种设计理念的不同之处在于设计的结构基础宽度(B),传统设计理念偏安全地设计基础、上部结构设计相对过刚,强震时易在上部结构产生塑性铰;而新的理念中将基础宽度适当减小,使地基土在结构发生脱离摇摆时产生局部变形,吸收地震动能量的同时,也可阻碍地震能量传到上部结构从而保护上部结构。

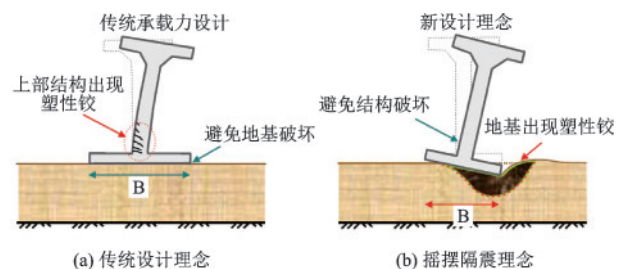


图1 摇摆隔震示意^[5]

Fig.1 Rocking isolation diagram^[5]

摇摆隔震理念主张整个上层建筑发生摇摆响应而不是柱的弯曲变形,通过有意弱化结构基础的设计引导塑性铰转移到地基土。摇摆结构可作为一种实现“大震不倒”目标的结构形式;在小震与中震下,则希望通过常规的设计理念来保证结构安全,此时可不考虑提高摇摆效应。熊建国^[13]、俞载道等^[14]较早地研究了基础脱离、滑移对结构地震响应的影响。随后诸多学者开展了针对各类工程结构形式,如储液罐、桥墩、桩基、框架与大型复杂结构的土-结构相互作用的计算理论分析和试验研究。近年来随着“韧性城市”概念的提出,可恢复性结构越来越受到关注,以同济大学吕西林院士团队为代表,在可恢复性结构方面进行了大量工作^[15-16],其主要偏重于在结构中通过放松节点约束使构件发生摇摆,还未涉及到土体以及土-结构相互作用。而本文关注的摇摆则是考虑土-结构相互作用效应的整个结构的摇摆响应。

本文首先介绍摇摆结构地震响应的计算模型和研究方法的发展历史,然后阐述提高摇摆效应与

摇摆隔震理念的研究现状,最后总结关于提高摇摆结构研究的成果与不足,并对提高摇摆问题研究的发展方向进行展望。

1 摇摆结构计算模型和研究方法

考虑基础提高的理论分析模型主要包括四种:刚性块体+刚性地基模型^[17-18]、刚性块体+柔性地基模型^[19]、柔性结构+刚性地基模型^[20]和柔性结构+柔性地基模型^[21],如图2所示。

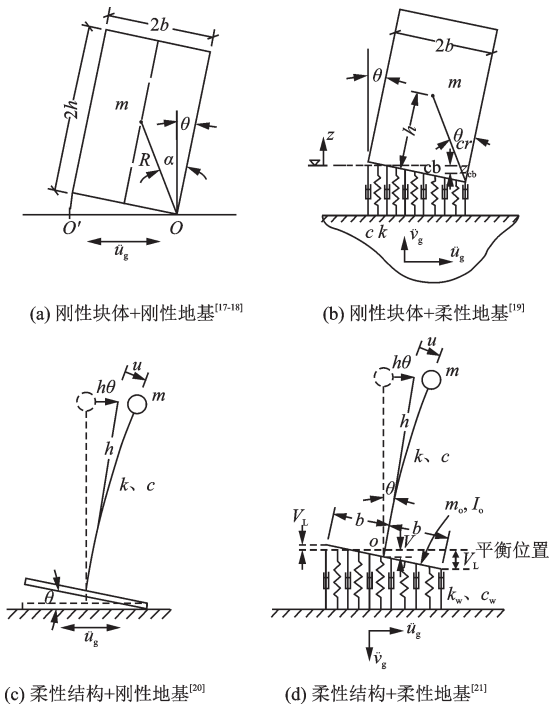


图2 基础提高分析模型

Fig.2 Foundation uplift analysis model

较早期对摇摆结构的研究主要是刚性块体在刚性地基与柔性地基上的摇摆地震响应分析,然后逐步过渡到更接近实际情况的柔性结构在柔性地基上的摇摆地震响应分析。上部结构由简单的刚性块体逐步过渡到单自由度结构、多自由度结构及其它更复杂的结构形式。不仅结构在不断地变复杂,而且结构基础底面与土表接触面的接触算法也在不断地改进。早期针对柔性地基主要采用分布弹簧或者两弹簧,通过设置弹簧刚度考虑基础的提高。而后,随着计算理论的发展,形成了以接触面单元来模拟基础与土体接触面的非线性行为。基于成熟的商业有限元软件可编制针对土与结构接触面特性的土体本构模型程序,以模拟土与结构界

面剪切滑移过程,同时还可将简化的二维模型扩展到能考虑空间效应的三维模型进行相应的数值模拟。随着数值计算理论与计算机的快速发展,目前大型三维计算是可行的,已有许多学者将理论分析与数值模拟相结合来进行地震作用下结构提高摇摆响应的分析。弹簧单元法和接触单元法对比:基于Winkler模型的弹簧单元法来模拟土-结构相互作用体系的动力响应在设计实践中更受青睐,因为它们易于使用、计算简单,且物理意义明确,但弹簧单元法不能完全考虑土体的非线性特性及有效地反映基础的非线性提高摇摆行为;接触单元法可以通过点对点、点对面或面对面的方式来模拟结构基础与土体的接触面的非线性行为,设置接触的切向属性考虑摩擦的作用、法向属性考虑基础与土体的分离,但其往往算法复杂、模型庞大导致计算效率较低和不易收敛。

大量学者对上述经典的分析模型进行过改进以考虑更为复杂的情况,特别是对柔性地基上柔性结构的摇摆模型,如C. W. Harden等^[22]采用非线性Winkler地基梁模型对浅基础结构系统进行提高摇摆响应分析;H. Masaeli等^[23]采用刚度沿基础长度方向变化的垂直分布弹簧,研究基础提高对浅基础上剪切型结构抗震性能的影响;M. A. Ghannad等^[24]考虑土体的垂直和旋转刚度将地基土简化为均匀分布在基础下的无长度、不提供拉力的Winkler弹簧-阻尼器单元,分析基础提高对土-结构相互作用体系中结构位移响应的影响。这些模型虽然比较简单,但能反应体系的主要动力特性,在定性、初步分析结构动力特性和地震响应方面仍有广泛应用。

2 摇摆结构地震响应的研究

下面从不同结构类型角度分别介绍结构提高摇摆响应的研究现状和进展,结构从简单到复杂依次为刚性块、简化单自由度结构、桥墩、框架结构、大型复杂结构,分析各结构类型与土体形成的相互作用体系的地震响应特点,并将提高摇摆效应分析研究的主要结论进行总结,最后还对摇摆谱的研究进行简单介绍。

2.1 刚性块提高摇摆效应

G. W. Housner^[4]首先分析刚性块体在刚性地

基的自由摇摆,推导其运动方程,在此基础上研究输入恒定水平加速度、简谐波和地震波情况下倒立摆结构的摇摆倾覆行为,结果表明:两个几何相似的刚性块中尺寸较大的刚性块比较小的更稳定;地震作用下越高越细的刚性块的稳定性远大于其在恒定水平力作用下的稳定性。随后 P. D. Spanos 等^[17]、C. S. Yim 等^[18]和 A. S. Koh 等^[19]研究刚性块在刚性地基和柔性地基上的提高摇摆响应,通过理论分析得到刚性块的稳定性与激励的频率、幅值之间的关系。N. Makris 等^[11]研究由一系列自由独立柱支撑刚性梁形成的平面框架的摇摆响应,发现平面框架发生摇摆所需输入的加速度幅值只与柱的长细比有关,顶部梁重的摇摆框架较轻的更稳定。N. Makris^[11]总结前人对刚性体摇摆响应的研究成果,得出摇摆结构在地震作用下的稳定性源自结构构件的转动惯量,细长独立柱发生提高摇摆可以明显地限制其底部产生的弯矩和剪力。M. F. Vassiliou^[25]将平面摇摆框架改进为三维摇摆框架(图3),该三维摇摆框架模型可用于探索利用摇摆作为桥梁的隔震技术。I. E. Kavvadias 等^[26]研究古代摇摆柱在不同地震下的响应,发现地震动的速度和频率成分与独立式摇摆柱的抗震性能有很强的相关性。R. Ceravolo 等^[27]提出一种半主动控制方法来控制艺术品和结构的摇摆响应。A. Dar 等^[28]研究核电站中未锚固设备的摇摆响应和倾覆性,对比 ASCE/SEI 43-05 中提供的近似方法与非线性时程分析下设备的最大摇摆角结果,并建议从非线性动力时程分析中获得转动响应。I. E. Kavvadias 等^[29]以博物馆建筑中的文物保护为背景,研究放置在楼层板上刚性体文物的摇摆地震响应,比较建筑物基础隔震与直接在刚性体底部设置隔震这两种方式的效果。

国内有学者将刚性块摇摆理论运用到研究非锚固的室内浮放物体的运动及设备—结构相互作用,可对室内物体或设备的抗倾覆性能进行检验,

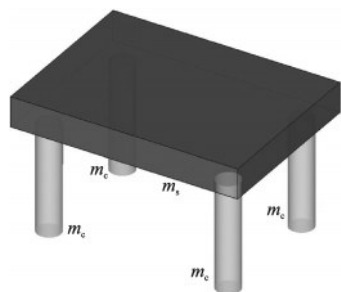


图3 三维摇摆框架模型^[25]

Fig.3 Three-dimensional rocking frame model^[25]

如郭恩栋等^[30]以经典的刚性块摇摆理论来分析浮放设备在地震作用下的摆动特性;周乾等^[31]以博物馆浮放文物为研究对象,将文物简化为一方形块体来研究其在地震作用下的摇摆和滑移响应,并运用 Simulink 仿真技术对摇摆运动进行时程分析;陈科等^[32]通过振动台试验来研究不同高宽比和质量的浮放文物在不同地震动作用下的响应特征,得出文物的地震响应与地震动特性和文物自身特性显著相关;高潮等^[33]以考虑边缘尖角钝化的圆角木柱为对象建立对应的二维模型,研究木柱不同运动状态下地震能量的转化与耗散情况,结果表明:柱顶荷载对木柱抵抗倾覆有明显效果;低频地震加速度更易导致柱脚钝化的木柱倾覆。

综上所述,对刚性体的提高摇摆效应研究主要是通过推导运动方程并进行求解,假设简化的平面刚性体绕底部两个角点发生摇摆并不会发生弹跳,研究接触面摩擦系数、刚性体的高宽比、输入激励的频率和幅值等参数对刚性体滑移、摇摆、倾覆的影响,分析滑移、倾覆的临界条件,可用于检验物体或设备的抗倾覆性能,并提出相应的保护策略。以上研究表明:刚性体的提高摇摆受到输入激励频率的影响显著;当刚性体在刚性地基上发生提高摇摆时碰撞冲击效应会增大其动力响应;刚性体组成的摇摆框架具有隔震的效果可运用到桥梁隔震。

2.2 土-单自由度结构体系中的提高摇摆效应

对简单的柔性地基上柔性摇摆结构模型,通常将上部结构简化为单自由度体系进行初步分析,考虑结构的柔性及阻尼作用,基础假设为刚性且无质量。

A. K. Chopra 等^[21]根据地震反应谱计算出发生基础提高时结构的最大基础剪力和变形情况,结果表明:在很宽的结构自振周期内基础板提高会减小最大基础剪力;但对短周期的结构位于非常硬的地基上时,结构的响应可能会因基础提高而增加。A. H. Jafarih 等^[34]定义提高系统的最大位移与弹性系统最大位移的比值为位移比,分析提高对结构位移的影响,结果表明:基础提高会降低结构的位移响应,对位于相对较软的地基土上的细长结构在受到强烈地面运动时能减少约 35%;但该分析是从全局来考虑基础提高对结构响应的影响,无法解释局部响应的增加和考虑提高时基础与土体的碰撞。S. Acikgoz 等^[20]利用拉格朗日公式得出柔性摇摆结

构大旋转下的非线性运动方程,分析结构柔性和摇摆之间的相互作用,并将柔性摇摆系统的基本动力特性与类似的线弹性振子及刚性摇摆结构进行比较,揭示柔性摇摆结构的特性。S. Acikgoz等^[35]使用简化的结构模型来分析大型柔性结构在脉冲型地面运动下的最大摇摆响应,结果表明:脉冲波的脉冲形状参数会显著影响柔性摇摆结构的最大摇摆响应。方英杰^[36]建立一个空间耦合的基础提高模型(图4),其可以同时考虑水平、摇摆、竖向及扭转,研究表明:基础提高会显著影响地基的阻抗特性;由于空间效应的作用,基础单边提高时对未提高方向的结构动力响应也有影响。

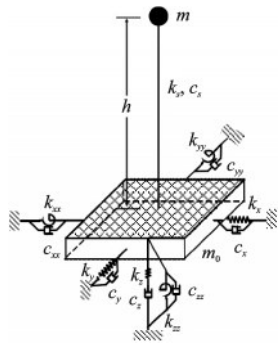


图4 空间耦合的基础提高模型^[36]

Fig.4 Spatially-coupled foundation uplift model^[36]

注: m 是上部质点的质量, I_x, I_y 是两个方向的转动惯量, m_0 是基础板的质量, I_o, I_x, I_y 是两个方向的转动惯量, k_x, k_y, k_z 和 c_x, c_y, c_z 是柱子的刚度和阻尼, $k_x, k_y, k_z, c_x, c_y, c_z$ 是基础板水平运动时地基土对基础板的约束, k_z, c_z 是基础板竖向运动时地基土对基础板的约束, $k_{xz}, c_{xz}, k_{yz}, c_{yz}$ 是基础板发生摇摆时地基土对基础板在摇摆方向上的约束, k_{zz}, c_{zz} 是基础板扭转时地基土对基础板在扭转方向上的约束

为评判结构在地震时到底是以摇摆响应为主还是弯曲变形和沉降为主,部分学者引入竖向静态安全因子FSv (the vertical static factor of safety)的概念^[37-38],它是地基土承受由上部结构传来的竖向荷载的安全系数,决定结构在地震作用下是以沉降为主还是摇摆为主的关键性因素。有研究表明^[39-40]:当 $FSv < 3$ 时,结构体系为重载情况,其响应以沉降为主;当 $FSv > 5$ 时,结构体系为轻载情况,其响应以提高摇摆为主。

由于简单自由度体系比较简单,假设基础为刚性、用弹簧阻尼器模拟地基与基础接触面的相互作用,研究方法主要通过建立运动方程并编制相关程序求解以获得整个时程的摇摆响应。但是弹簧阻尼器模拟地基与基础接触面的相互作用无法考虑土体非线性特性,为了克服传统的弹簧单元无法

考虑土体非线性特性的不足,有学者提出采用等价线性化方法来考虑土体的非线性特性^[41-42]。但到目前为止依然没有一个统一的精确方法来反映柔性摇摆结构的主要动力特性。

2.3 土-基础-桥墩体系中的提高摇摆效应

X. C. Chen等^[43]利用改进的弹塑性Winkler模型模拟桥墩与土体之间的相互作用,进行线性与非线性时程分析,结果表明:考虑提高和地基土屈服时,非线性效应非常显著;与线性分析相比,考虑提高和土体屈服时土-桥墩系统的刚度会有所降低,桥墩的旋转角度更大、弯矩更小,说明允许基础提高和土体塑性变形可以减小桥墩所受的地震作用。A. Zafeirakos等^[44]对一个沉井基础支撑的桥墩体系的抗震性能进行模拟分析,分析静态安全因子(FSv)和地震安全系数(FSe, the seismic factors of safety)的4种不同组合,结果表明:对轻载体系,地震弱化设计对体系的抗震性能是有利的,能显著降低上部结构的地震作用并减小基础的沉降位移;对于重载体系,过度和弱化设计下体系的抗震性能是相似的。A. Agalianos等^[45]建立一个高速公路桥梁结构整体有限元模型,对传统结构系统、摇摆桥墩系统和摇摆基础系统等3种不同设计方案的抗震性能进行比较评估(图5),用10个超出设计限制的非常强烈的地震记录检查3个系统的性能,结果表明:摇摆基础在所有的工况中都能避免倒塌,提供最大的安全储备,不会产生残余变形,但地基的变形不可避免地导致沉降增加;两个摇摆系统都可以使基础设计弯矩明显减小。

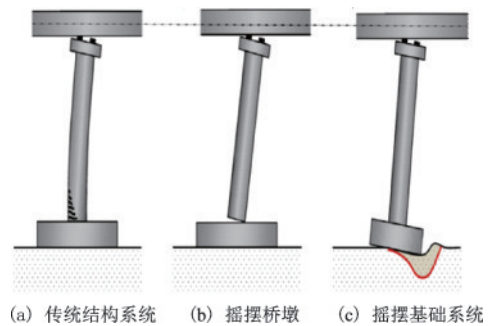


图5 3种设计方案^[45]

Fig.5 Three types of design scheme^[45]

郑越等^[46]采用能考虑基础提高效应的弹塑性Winkler地基模型,分析双柱式桥墩的地震响应规律,结果表明:考虑基础提高与地基非线性对减小

桥墩震害是有利的。夏修身等^[47]采用两弹簧法模拟桥墩的脱离摇摆并研究近场地震动下桥墩的摇摆反应,结果表明:近场地震动对高墩的摇摆反应有不利影响。王礼武^[48]建立宏单元理论模型来模拟土与结构的分离、塑性等非线性行为,结果表明:考虑桥梁的脱离摇摆以及土的滞回特性能极大地耗散地震能量,但会使得桥的位移响应有所增大;土体性质与桥梁基础尺寸都会大大影响桥梁的脱离摇摆地震响应。仲浩然等^[49]建立典型两跨高架桥数值模型来分析脱离式基础对城市高架桥抗震性能的影响,重点对比分析了脱离桩和普通桩基础下高架桥的地震响应。结果表明:相比普通桩基础,脱离桩不仅能改善桩基的受力还能有效减小水平残余位移,表现出更好的震后自恢复性。

由上述研究成果可知,对桥墩结构的脱离摇摆效应研究包括两种情况:一是桥墩基础在土体上的摇摆,二是桥墩本身在基础上的摇摆。总的来说,两个摇摆系统都可以使桥墩的弯矩明显减小。

2.4 土-基础-框架结构体系中的脱离摇摆效应

目前对框架结构的脱离摇摆效应研究主要是针对采用浅基础的较细长的中、高层建筑。H. Masaeli等^[50]建立一个浅筏基础上的中高层建筑结构模型,研究固定基础、线性和非线性土-结构相互作用等3种不同条件下结构在近断层脉冲作用下的响应特点,结果表明:脉冲周期是控制非线性SSI效应的关键参数;更细长的建筑物受到短、中周期指向性脉冲时基础脱离和土体屈服的益处更加显著。K. Faramarz等^[51]研究结构在地震作用下考虑 $p-\delta$ 效应时的脱离摇摆反应,研究表明:基础脱离使结构层间剪力和基础剪力减小,同时结构柱弯曲变形减小,对结构抗震性能是有利的; $p-\delta$ 效应会增加基础脱离时结构的侧向位移响应;两个水平向输入时基础脱离效应比单向水平输入时更明显。R. Kourkoulis等^[40]建立单跨和两跨框架平面模型分析摇摆隔震效应,结果表明:当强烈的地震作用时,基础弱化设计对保护上部结构有积极作用;当FSv减少时会不可避免地导致较大的地基土沉降变形,但脱离摇摆下结构的抗震性能仍然比传统设计优越;当框架同时受到水平和竖向输入时,其摇摆隔震的效果可能会受到限制。I. Anastasopoulos等^[10]建立一个两层两跨非对称框架平面模型进行分析,比较基础按传统规范设计和弱化设计两种情况下

结构的地震响应,提出3种改进方法解决基础沉降问题(图6):加入常规拉梁来连接基础、在每个基脚处铰接拉梁、允许其旋转但限制轴向变形、前两种方法结合的混合系统,结果表明:弱化设计系统的抗震性能更好,但弱化设计的基础尺寸减小不可避免地导致地基土沉降;混合式解决方案能有效地减小基础的残余旋转变形和不均匀沉降,同时不会限制有利的摇摆隔离的发展。Q. V. Nguyen等^[52]以一浅基础上的十五层框架结构模型为例,研究基础尺寸对系统固有频率和结构响应谱的影响,结果表明:考虑SFSI效应会增大上部结构的侧向位移;结构地震作用下的侧向变形与层间位移会随着基础尺寸的增大而有所减小;结构的摇摆直接影响结构的最大侧向位移和层间位移;基础剪力随着基础尺寸的减少而减少。曲哲等^[53]采用摇摆墙体系对框架结构进行抗震加固,得到摇摆墙的刚度需求,分析其改善结构抗震性的模式,并指出运用摇摆墙体系进行加固设计时的要点。

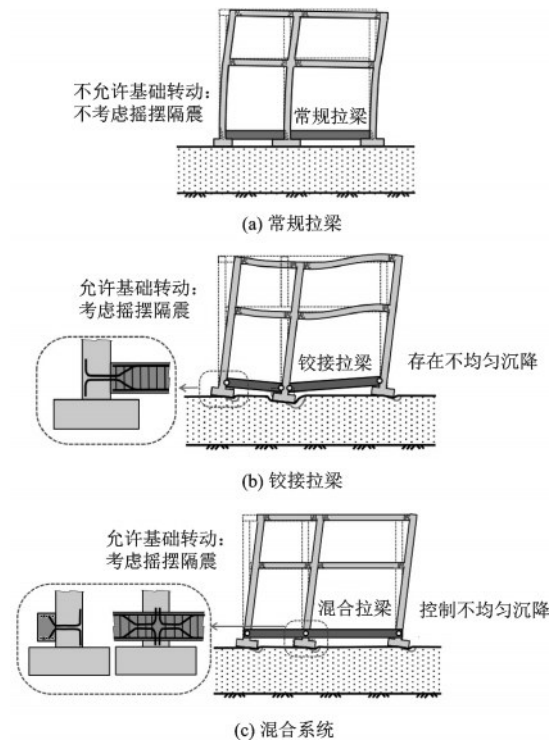


图6 3种减小沉降的改进方法^[10]

Fig.6 Three advanced methods to reduce settlement^[10]

综上所述,对当前大量采用的一般框架结构考虑土-基础-结构相互作用下的脱离摇摆效应不容忽视,同样也分为两种摇摆模式:基础摇摆与结构摇摆。基础的脱离摇摆使结构层间剪力和基础剪力

减小,结构柱弯曲变形减小,对结构抗震性能是有利的,但会产生较大沉降。将结构摇摆与消能减震技术相结合,形成摇摆自复位结构,可有效地提高结构的抗震性能,这已成为国内外许多学者的研究热点。

2.5 土-复杂结构体系中的提高摇摆效应

N. Nakamura等^[54]考虑核电站结构基础提高和结构自身的非线性行为,分析其在单向和多向地震动输入下核电站的动力响应,结果发现:仅在水平向输入时与同时水平向和竖向输入时建筑物的水平响应差异不大;竖向地面运动对显示基底提高行为的土与结构接触率的影响也较小。A. G. Sextos等^[55]建立了一个典型核电站结构的精细化三维有限元模型,分析输入具有不同频率成分的地面运动下基础与土体分离行为特点,土体选择砂土和岩石来考虑不同土-结构刚度比的影响,结果表明:输入低频成分显著的地面运动更易导致几何非线性现象的发生;软土上的刚性核电站结构更容易发生基础提高,而核电站发生提高摇摆时可能会对其内部设备造成损害。钱德玲等^[56]建立一箱型基础高层建筑有限元模型,分析考虑土-结构动力相互作用对箱型基础高层建筑抗震性能的影响,结果表明:箱形基础的提高摇摆对高层建筑抗倾覆是十分不利的。刘毅等^[57]通过试验研究与数值模拟分析土-独立基础-单层柱面网壳结构体系地震响应的规律,发现随着振动次数增加,基础与土体的滑移、提高等非线性行为更加显著。王国波等^[58]利用有限元软件ANSYS中的接触面功能和弹簧单元来模拟核电站结构与土体的相互作用,结果表明:对位于较坚固地基上的核电站结构,基础提高主要影响其竖向地震响应。

由此可见,不论是对大跨、高层结构或是核电站结构,基础提高效应的影响不容忽视。

2.6 摇摆谱的研究

摇摆结构的摇摆谱可分为刚性体的摇摆谱与柔性结构的摇摆谱。M. J. Dejong等^[2]与N. Makris等^[6]在对比分析常规钟摆和倒立摆动力特性的基础上,给出刚性体摇摆谱的定义,并指出其与传统反应谱的差异,结果表明该两类体系的动力特性完全不同,其中单自由度结构反应谱与刚性体摇摆谱对比见表1^[6]。刚性体的摇摆谱是反映在不同激励下

刚性体最大摇摆响应的旋转角度和转动角速度与刚性体自身特性(尺寸、高宽比、摇摆频率)的关系。

表1 单自由度结构反应谱与刚性体摇摆谱对比^[6]

Table 1 Comparison between the response spectrum of single-degree-of-freedom structure and rocking spectrum of rigid body^[6]

参数	单自由度体系反应谱	刚性体摇摆谱
特征	m, k, c	b, h, g
恢复力	结构弹性	结构自重
频率	无阻尼时: $\omega_0 = \sqrt{k/m}$	$P = \sqrt{3g/4R}$
阻尼	阻尼比: $\xi = c/2m\omega_0$	$\alpha = \tan^{-1}(b/h)$

对柔性结构的摇摆谱,由于摇摆结构在摇摆过程中刚度在变化,导致体系周期随之变化,即周期始终是一个变值,因而不能像传统反应谱一样给出反应量与周期的谱曲线。从已有研究中可以发现将基础的转动与基础的弯矩、沉降等联系起来建立的关系曲线能较好地反映摇摆结构的摇摆特性^[5,7]。因为基础转角是摇摆结构中的一个关键性参数,如果结构和地基土参数不变,则每一个转角均对应确定的弯矩、剪力、地基反力等反应量,因而可建立各反应量与基础转角的关系曲线。其中,基础的弯矩(M)与转角(θ)曲线不仅决定结构在摇摆运动时地基土所能提供的摇摆刚度,也决定结构摇摆的幅度;沉降(w)与转角(θ)的关系曲线决定了地基所能承受的最大沉降。故将 $M-\theta$ 及 $w-\theta$ 关系曲线二者称作反映摇摆结构响应特性的基本摇摆谱曲线,其对于摇摆结构的设计至关重要。虽然目前已有部分关于这些关键关系曲线的研究成果,但大多研究依然是基于传统的弹簧单元计算参数,并且没有统一的评判标准。所以对柔性结构的摇摆谱仍需进行大量分析研究,确定不同地基土类型、基础尺寸、结构高宽比、竖向静态安全因子及地震波特性等关键影响因素下基础弯矩与转角关系、沉降与转角关系,以到达期望的摇摆隔震结构的理想运动状态(结构先发生摇摆运动,而不是基础下沉)。

3 摇摆结构地震响应的试验研究

A. Saraswat等^[59]通过试验和数值模拟分析激

励频率及接触面摩擦系数不同组合下独立块体的滑动、摇摆运动规律(图7),结果表明:激励频率对刚性块的稳定性影响显著;摇摆运动时冲击频率的增加,使得结构顶部响应发生放大;通过摩擦滑动耗散输入能量比通过摇摆运动中的冲击更有效。P. D. Spanos等^[60]研究刚性块在非线性柔性地基上的摇摆运动,用大理石作为刚性体与刚性地基,同时把用于抗震的弹性材料(labeled Aerstop CN20)作为柔性地基进行摇摆试验,得到地基材料对摇摆响应的影响显著,试验验证了其提出的考虑土与基础相互作用的非线性阻尼器与分布垂直弹簧模型。



图7 刚性体摇摆试验^[59]

Fig.7 Rocking test for rigid body^[59]

I. Anastasopoulos等^[39]对一个方形基础上的单自由度系统进行一系列单调和循环加载试验(图8),结构体系考虑两种情况即轻载结构(相对较大的FSv)和重载结构(相对较小的FSv),重点讨论浅层土壤不同深度改良的有效性,结果表明:浅层土体改良的深度等于基础的宽度时对减小基础沉降确实非常有效。D. K. Kim等^[61]通过离心机试验来研究浅基础上单自由度结构模型的摇摆动力响应,试验结果表明:土体强度和基础摇摆运动引起的阻尼效应能限制结构受到的侧向力;基础摇摆引起的旋转阻尼效应能增加结构的抗倾覆能力。X. Qin等^[62]设计了一个允许提离的小尺度模型的振动台试验,通过在模型柱底安装人造塑性铰链来模拟结构的塑性行为,结果表明:基础提离与土体的局部变形可以减小结构塑性铰的发展。

Y. Chen等^[63]对一单跨桥梁小比例模型进行振动台试验,研究近断层垂直和水平地面运动对桥梁的影响,结果表明:垂直地面运动会在桥墩上产生较大的轴向力,并在桥面产生较大的弯矩;同时输入水平和垂直激励时基础提离比单独水平激励时更频繁发生。H. H. Hung等^[64]对采用扩展基础的

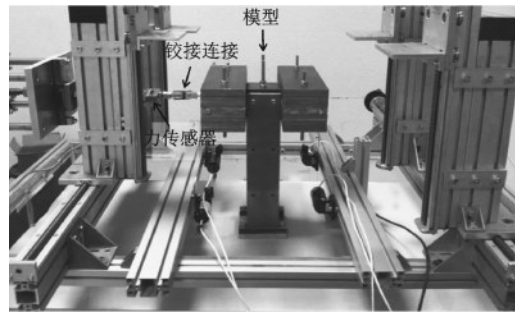
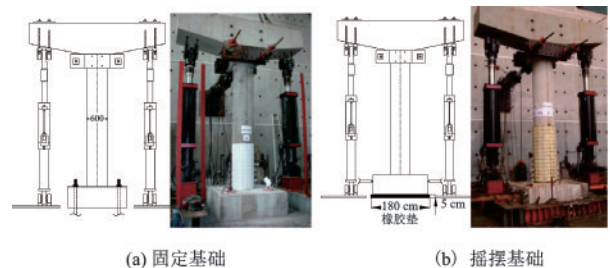


图8 简化单自由度结构模型提离摇摆试验^[39]

Fig.8 Uplift and rocking test for simplified single-degree-of-freedom structure model^[39]

桥墩结构进行一系列伪动力和循环加载试验(图9),结果表明:基础的摇摆会明显增加桥墩顶部水平位移;允许提离可以减小墩底的弯矩,从而降低桥墩的强度和延性要求。Y. L. Zhou等^[65]制作一个比例1/10的单跨桥模型进行振动台试验,研究加入无粘结预应力筋后摇摆桥墩结构体系的地震响应规律,结果表明:设计合理的无粘结筋可以提高摇摆桥的抗震稳定性,在不严重降低隔震效果的同时显著减小桥墩的震后残余变形。



(a) 固定基础 (b) 摇摆基础

图9 桥墩摇摆试验^[64]

Fig.9 Bridge rocking test^[64]

S. Gajan等^[7]通过侧向循环加载试验和动态离心机试验研究在砂土和粘土地基上浅基础的摇摆行为,结果表明:当 A/A_c (A 为实际基础面积、 A_c 为承受竖向荷载所需的基础面积)越大时基础的沉降越小,能量耗散越小;基础提离摇摆改善了地震作用下结构的性能。I. Anastasopoulos等^[12]通过试验研究分析加固剪力墙按弱化设计时对提高框架抗震性能的有效性,专门设计人造塑性铰链来模拟结构节点形成塑性铰后的转动能力,结果表明:相比按传统方法改造加固的结构体系,弱化设计得到的摇摆隔震结构体系能更好地改善结构的抗震性,并且其具有自恢复能力。I. Pelekis等^[66]首次将两种类型的摇摆结构(结构在基础上

摇摆和基础在土表摇摆)统一在一个共同的试验中进行研究(图10),结果表明:当输入激励频率接近结构基频时,基础摇摆隔离效应非常显著;基础

摇摆与结构摇摆都能起到隔震的作用,基础摇摆与地基土的屈服变形相关,而结构摇摆与其摇摆产生的碰撞冲击相关。

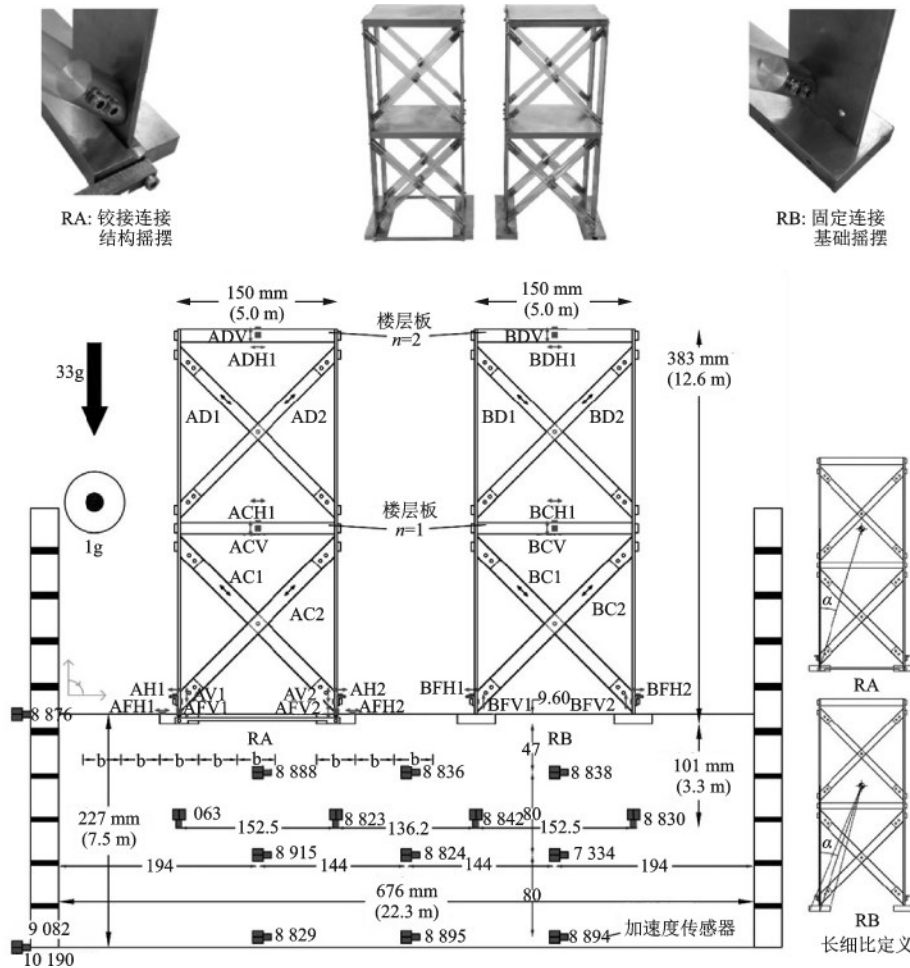


图10 框架结构的提离摇摆试验^[66]

Fig.10 Uplift and rocking test of frame structure^[66]

国内学者也进行了许多土-结构相互作用的试验研究,如尚守平等^[67]完成了一个大比例结构模型考虑桩-土-框架动力相互作用的野外试验,建立能考虑基础提离效应和桩-土相互作用中能量耗散的接触模型并将其用于模拟试验。

由上可得,尽管已有较多学者针对各种不同结构的提离摇摆响应进行试验研究,试验类型主要包括低周往复拟静力试验、振动台试验和离心机试验等,但试验对象多为简单的构件或单自由度模型,这些都过于简化,难以反映真实结构在摇摆时动力响应特点。同时由于试验涉及到结构与土体的非线性、塑性变形等多重非线性导致试验难度很大,所以在试验方面仍需进行全面的研究以充分验证摇摆隔震的理念。

4 结论与展望

主要介绍摇摆结构地震响应的计算模型和研究方法,阐述各类结构形式的提离摇摆效应,并总结摇摆隔震结构地震响应的特点与主要结论。由上述各类结构的提离摇摆响应的分析结果与试验研究可得:

(1)地基与基础的相互作用会显著改变上部结构的振动特性和动力响应,结构的刚度、周期、频率和阻尼等重要动力特性指标均随基础提离量的变化而变化,土-基础-上部结构相互作用体系实际上是一个时变体系。

(2)基础提离会减小基础剪力与弯矩,降低结

构弯曲变形,并且在自身重力作用下具有自复位能力以减小残余变形,对结构抗震性能是有利的;但这些优点是以土体的局部大变形为代价,因此在地基设计时应考虑其抗冲切能力。

(3)基础在土体上的摇摆与上部结构在基础上的摇摆这两种摇摆模式都具有有效的隔震效果。其中基础在土体上摇摆隔震的方式在对桥墩的抗震性中较多,而对通常使用较多的浅基础框架结构的民用建筑相对较少;对上部结构在基础上摇摆隔震的方式已被研究人员将其与消能减震元件相结合形成摇摆及自复位结构,减小结构破坏并且在震后能快速自复位。

土-基础-结构相互作用体系涉及到材料非线性(土体和混凝土的本构性质)、几何非线性(基础脱离、滑移、碰撞、回弹等行为)等,非常复杂,并且考虑土-结构相互作用对结构抗震性是否有利,学者们持有不同观点,所以针对基础脱离摇摆效应的研究仍有待进一步完善。对目前的研究存在的不足仍需改进:

(1)在目前常规的计算分析方法中,采用弹簧和阻尼器考虑地基土的影响,其参数一般依据土体阻抗理论确定,但结构基础发生脱离后,由于接触面积的改变而发生“应力重分布”现象,因此体系理论上是一个时变系统,弹簧和阻尼器参数随接触面积的改变而改变,但目前的分析方法并没有考虑这一现象,因此建立考虑土-基础-上部结构相互作用体系时变特性的精细化地震响应计算方法势在必行,这是其他研究的基础。

(2)目前对结构基础脱离的影响是有害还是有害仍存在争论,一方面是上述提及的计算方法存在不足,另一方面是研究还不够系统,因此应系统地分析地震波特性、土体性质、基础形式、上部结构特性等关键参数的影响,总结脱离摇摆过程非线性地震响应规律,确定在何种条件下考虑结构基础脱离有利于结构抗震性能提升,何种条件不利于结构抗震,同时保证结构不会发生倾覆。

(3)目前对结构基础脱离的试验研究也显得不足,仍以拟静力试验为主,辅以少量的振动台和离心机试验,而振动台和离心机试验涉及到的多为简单的结构或构件,难以全面反映摇摆结构的地震响应特点。因此,发展针对大比例的摇摆结构试验研究以验证理论分析和数值计算也势在必行。

(4)由于摇摆结构是一个时变系统,因而目前

的反应谱理论并不适用于摇摆结构,需要基于上述的大量参数分析,确定合适的参数,建立摇摆结构的摇摆响应谱分析理论,便于工程设计。

(5)结构在大震下发生脱离摇摆时,整个过程包括基础脱离、滑移、碰撞、回弹等行为,但目前主要的关注点在于结构基础是否脱离以及脱离量对结构地震响应的影响,而当地震动峰值过后,结构在重力作用下回到原来状态对地基土的冲击以及回弹效应关注不够,如核电站结构等质量较大的结构,这种冲击力是巨大的,对基础和地基的要求都较高。因此开展摇摆过程中考虑撞击和回弹效应的研究也不容忽视。

(6)摇摆结构抗震性能的提升是以地基土的大变形为代价,如果局部地基变形过大从而引发大范围的地基土破坏,可能导致结构的倾覆。而目前针对地基土变形量以及结构摇摆幅度指标方面的研究还未见报道,这是涉及到摇摆结构能否推广的关键因素,亟待进一步深入研究。

参考文献:

- [1] Makris N, Vassiliou M F. Planar rocking response and stability analysis of an array of free-standing columns capped with a freely supported rigid beam [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2013, 42(3):431-449.
- [2] Dejong M J, Dimitrakopoulos E G. Dynamically equivalent rocking structures [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2014, 43(10):1543-1563.
- [3] 赵鸿铁,张凤亮,薛建阳,等.古建筑木结构的结构性能研究综述[J].*建筑结构学报*, 2012, 33(8):1-10. Zhao H T, Zhang F L, Xue J Y, et al. Research review on structural performance of ancient timber structure [J]. *Journal of Building Structures*, 2012, 33(8):1-10. (in Chinese)
- [4] Housner G W. The behavior of inverted pendulum structures during earthquakes [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1963, 53(2):403-417.
- [5] Anastasopoulos I, Gazetas G, Loli M, et al. Soil failure can be used for seismic protection of structures [J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2010, 8(2):309-326.
- [6] Makris N, Konstantinidis D. The rocking spectrum and the limitations of practical design methodologies [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2003, 32(2):265-289.

- [7] Gajan S, Kutter B L. Capacity, settlement, and energy dissipation of shallow footings subjected to rocking[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2008,134(8):1129-1141.
- [8] Makris N, Vassiliou M F. Sizing the slenderness of free-standing rocking columns to withstand earthquake shaking[J]. *Archive of Applied Mechanics*, 2012, 82(10/11):1497-1511.
- [9] Gazetas G, Anastasopoulos I, Garini E. Geotechnical design with apparent seismic safety factors well-below 1[J]. *Soil Dynamics & Earthquake Engineering*, 2014, 57(2):37-45.
- [10] Anastasopoulos I, Gelagoti F, Spyridaki A, et al. Seismic rocking isolation of an asymmetric frame on spread footings[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2013,140(1):133-151.
- [11] Makris N. A half-century of rocking isolation[J]. *Earthquakes and Structures*, 2014,7(6):1187-1221.
- [12] Anastasopoulos I, Drosos V, Antonaki N. Three-storey building retrofit: rocking isolation versus conventional design[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2015,44(8):1235-1254.
- [13] 熊建国. 基础脱离对结构动力特性影响的研究综述[J]. *世界地震工程*, 1988,1(3):3-10.
Xiong J G. Review of research on the influence of foundation uplift on structural dynamic characteristics[J]. *World Earthquake Engineering*, 1988, 1(3):3-10. (in Chinese)
- [14] 俞载道, 职洪涛, 曹国敖. 基础脱离、滑移对结构地震反应影响的探讨[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 1997, 25(2):141-146.
Yu Z D, Zhi H T, Cao G A. Study on the effects of base uplifting and sliding on earthquake responses of structures[J]. *Journal of Tongji University (Science and Technology)*, 1997,25(2):141-146. (in Chinese)
- [15] 吕西林, 全柳萌, 蒋欢军. 从16届世界地震工程大会看可恢复功能抗震结构研究趋势[J]. *地震工程与工程振动*, 2017,37(3):5-13.
Lyu X L, Quan L M, Jiang H J. Research trend of earthquake resilient structures seen from 16 WCEE[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2017,37(3):5-13. (in Chinese)
- [16] 周颖, 吕西林. 摇摆结构及自复位结构研究综述[J]. *建筑结构学报*, 2011,32(9):1-10.
Zhou Y, Lyu X L. State-of-the-art on rocking and self-centering structures[J]. *Journal of Building Structures*, 2011,32(9):1-10. (in Chinese)
- [17] Spanos P D, Koh A S. Rocking of rigid blocks due to harmonic shaking[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1984, 110(11):1627-1642.
- [18] Yim C S, Chopra A K, Penzien J. Rocking response of rigid blocks to earthquakes[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1980,8(6):565-587.
- [19] Koh A S, Spanos P D, Roesset J M. Harmonic rocking of rigid block on flexible foundation[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1986,112(11):1165-1180.
- [20] Acikgoz S, DeJong M J. The interaction of elasticity and rocking in flexible structures allowed to uplift[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2012, 41(15):2177-2194.
- [21] Chopra A K, Yim S C S. Simplified earthquake analysis of structures with foundation uplift[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1985,111(4):906-930.
- [22] Harden C W, Hutchinson T C. Beam-on-nonlinear-winkler-foundation modeling of shallow, rocking-dominated footings[J]. *Earthquake Spectra*, 2009, 25(2):277-300.
- [23] Masaeli H, Khoshnoudian F, Musicians S. Incremental dynamic analysis of nonlinear rocking soil-structure systems[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2018,104:236-249.
- [24] Ghannad M A, Jafarieh A H. Inelastic displacement ratios for soil-structure systems allowed to uplift[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2014, 43(9):1401-1421.
- [25] Vassiliou M F. Seismic response of a wobbling 3D frame[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2018,47(5):1212-1228.
- [26] Kavvadias I E, Vasiliadis L K, Elenas A. Seismic response parametric study of ancient rocking columns[J]. *International Journal of Architectural Heritage*, 2017, 11(6):791-804.
- [27] Ceravolo R, Pecorelli M L, Fragonara L Z. Semi-active control of the rocking motion of monolithic art objects[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2016, 374:1-16.
- [28] Dar A, Konstantinidis D, El-Dakhkhni W W. Evaluation of ASCE 43-05 seismic design criteria for rocking objects in nuclear facilities[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2016,142(11):1-13.
- [29] Kavvadias I E, Vasiliadis L, Elenas A, et al. Seismic analysis of free standing museum contents[C]//*Proceedings of the 16th Conference on Earthquake Engineering*. Thessaloniki: [s.n.], 2018:1-8.
- [30] 郭恩栋, 王滔, 吴伟, 等. 地震作用下浮放设备摆动反应研究[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2008,24

- (2):252-255.
- Guo E D, Wang T, Wu W, et al. Study on seismic oscillation response of free-standing equipments[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2008, 24(2):252-255. (in Chinese)
- [31] 周乾, 闫维明, 纪金豹. 地震作用下浮放文物滑移及摇晃响应仿真[J]. 华北地震科学, 2016, 34(1):13-20.
Zhou Q, Yan W M, Ji J B. Simulation of oscillation and sliding responses of free-standing cultural relics under earthquakes[J]. North China Earthquake Sciences, 2016, 34(1):13-20. (in Chinese)
- [32] 陈科, 刘彤, 盛鹰. 展陈浮放文物振动台试验[J]. 西南科技大学学报, 2019, 34(1):60-65.
Chen K, Liu T, Sheng Y. Experimental study on shaking table test of floating cultural relics[J]. Journal of Southwest University of Science and Technology, 2019, 34(1):60-65. (in Chinese)
- [33] 高潮, 杨庆山, 王娟, 等. 受水平地震作用的古建筑木结构柱非线性响应研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(增2):214-221.
Gao Ch, Yang Q Sh, Wang J, et al. Nonlinear response study on columns in traditional timber structure under horizontal earthquake action[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(Sup 2):214-221. (in Chinese)
- [34] Jafarieh A H, Ghannad M A. The effect of foundation uplift on elastic response of soil-structure systems[J]. International Journal of Civil Engineering, 2014, 12(2):244-256.
- [35] Acikgoz S, DeJong M J. The rocking response of large flexible structures to earthquakes[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2014, 12(2):875-908.
- [36] 方英杰. 基础脱离对上部结构动力反应的影响分析[D]. 武汉:华中科技大学, 2016.
Fang Y J. The impact caused by uplift phenomenon on dynamic response of superstructure[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- [37] Panagiotidou A I, Gazetas G, Gerolymos N. Pushover and seismic response of foundations on stiff clay: Analysis with P-delta effects[J]. Earthquake Spectra, 2012, 28(4):1589-1618.
- [38] Deng L, Kutter B L. Characterization of rocking shallow foundations using centrifuge model tests[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2012, 41(5):1043-1060.
- [39] Anastasopoulos I, Kourkoulis R, Gelagoti F, et al. Rocking response of SDOF systems on shallow improved sand: An experimental study[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2012, 40:15-33.
- [40] Kourkoulis R, Gelagoti F, Anastasopoulos I. Rocking isolation of frames on isolated footings: design insights and limitations[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2012, 16(3):374-400.
- [41] Gazetas G, Anastasopoulos I, Adamidis O, et al. Non-linear rocking stiffness of foundations[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2013, 47:83-91.
- [42] Adamidis O, Gazetas G, Anastasopoulos I, et al. Equivalent-linear stiffness and damping in rocking of circular and strip foundations[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2014, 12(3):1177-1200.
- [43] Chen X Ch, Lai Y M. Seismic response of bridge piers on elasto-plastic Winkler foundation allowed to uplift[J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 266(5):957-965.
- [44] Zafeirakos A, Gerolymos N. On the seismic response of under-designed caisson foundations[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2013, 11(5):1337-1372.
- [45] Agalianos A, Psychari A, Vassiliou M F, et al. Comparative assessment of two rocking isolation techniques for a motorway overpass bridge[J]. Frontiers in Built Environment, 2017, 3(1):47-65.
- [46] 郑越, 陈兴冲. 考虑基础脱离与塑性的桥墩地震反应[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(4):125-131.
Zheng Y, Chen X Ch. Seismic response of double-column bridge piers considering uplift and yield of foundation[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29(4):125-131. (in Chinese)
- [47] 夏修身, 李建中. 近场地震动对桩基础高墩摇摆反应的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2014, 46(4):82-86.
Xia X Sh, Li J Zh. Effect of near-field ground motion on the rocking response of tall pier with pile foundations[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2014, 46(4):82-86. (in Chinese)
- [48] 王礼武. 地震作用下土-结构相互作用对浅基础桥结构响应的影响[D]. 北京:北京交通大学, 2017.
Wang L W. Effects of soil-structure interaction on structural response of shallow foundation bridges subjected to earthquake loads[D], Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017. (in Chinese)
- [49] 仲浩然, 管仲国. 脱离式桩基础用于城市高架桥抗震之适用性分析[J]. 振动与冲击, 2018, 37(10):117-122.
Zhong H R, Guan Zh G. Applicability of rocking pile-group foundations in the seismic design of urban viaducts[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(10):117-122. (in Chinese)

- [50] Masaeli H, Khoshnoudian F, Ziaei R. Rocking soil-structure systems subjected to near-fault pulses [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2015, 19 (3) : 461-479.
- [51] Faramarz K, Mehdi S, Farzane P. P-delta effects on earthquake response of structures with foundation uplift [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2012, 34(1):25-36.
- [52] Nguyen Q V, Fatahi B, Hokmabadi A S. The effects of foundation size on the seismic performance of buildings considering the soil-foundation-structure interaction [J]. *Structural Engineering and Mechanics*, 2016, 58 (6):1045-1075.
- [53] 曲哲,和田章,叶列平. 摇摆墙在框架结构抗震加固中的应用[J]. *建筑结构学报*, 2011,32(9):11-19.
Qu Zh, Wada A, Ye L P. Seismic retrofit of frame structures using rocking wall system [J]. *Journal of Building Structures*, 2011, 32(9):11-19. (in Chinese)
- [54] Nakamura N, Yabushita N, Suzuki T, et al. Analyses of reactor building by 3D nonlinear FEM models considering basemat uplift for simultaneous horizontal and vertical ground motions [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2008, 238(12):3551-3560.
- [55] Sextos A G, Manolis G D, Athanasiou A, et al. Seismically induced uplift effects on nuclear power plants. Part 1: Containment building rocking spectra [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2017, 318:276-287.
- [56] 钱德玲,李英超. 某超限高层建筑箱形基础抗震性能分析[J]. *建筑结构*, 2018,48(1):77-82.
Qian D L, Li Y Ch. Seismic performance analysis of box-shaped foundation of an out-of-code high-rise building [J]. *Building Structure*, 2018,48(1):77-82. (in Chinese)
- [57] 刘毅,薛素铎,王国鑫,等. 土-结构相互作用下单层柱面网壳振动台试验及数值分析[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2017, 48(1):223-232.
Liu Y, Xue S D, Wang G X, et al. Shaking table test of single-layer latticed cylindrical shell considering soil-structure interaction and its numerical analysis [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2017, 48(1):223-232. (in Chinese)
- [58] 王国波,王亚西,于艳丽,等. 基础脱离对核电站结构地震响应的影响分析[J]. *振动与冲击*, 2015, 34(7): 228-233.
Wang G B, Wang Y X, Yu Y L, et al. Analysis on the influence of foundation uplift on structure seismic response [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, 34 (7):228-233. (in Chinese)
- [59] Saraswat A, Reddy G R, Ghosh A K, et al. Effects of base excitation frequency on the stability of a freestanding rigid block [J]. *Acta Mechanica*, 2016, 227 (3) : 795-812.
- [60] Spanos P D, Di Matteo A, Pirrotta A, et al. Rocking of rigid block on nonlinear flexible foundation [J]. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2017, 94: 362-374.
- [61] Kim D K, Lee S H, Kim D S, et al. Rocking effect of a mat foundation on the earthquake response of structures [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2014, 141(1):1-13.
- [62] Qin X, Chen Y, Chou N. Effect of uplift and soil non-linearity on plastic hinge development and induced vibrations in structures [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2013, 16(1):135-147.
- [63] Chen Y, Kun C, Larkin T, et al. Impact of vertical ground excitation on a bridge with footing uplift [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2016, 20(7):1035-1053.
- [64] Hung H H, Liu K Y, Ho T H, et al. An experimental study on the rocking response of bridge piers with spread footing foundations [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2011, 40(7):749-769.
- [65] Zhou Y L, Han Q, Du X L, et al. Shaking table tests of post-tensioned rocking bridge with double-column bents [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2019, 24(8) : 1-14.
- [66] Pelekis I, Madabhushi G S P, DeJong M J. Seismic performance of buildings with structural and foundation rocking in centrifuge testing [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2018, 47(12):2390-2409.
- [67] 尚守平,卢华喜,王海东,等. 大比例模型结构-桩-土动力相互作用试验研究与理论分析[J]. *工程力学*, 2006, 23(增2):155-166.
Shang Sh P, Lu H X, Wang H D, et al. Test investigation and theoretical analysis of large-scale model on dynamic soil-pile-structure interaction [J]. *Engineering Mechanics*, 2006, 23(Sup 2):155-166. (in Chinese)

(本文责编:周小潭)