

王文明, 易思银, 田利, 等. 跨越断层地震动对结构地震反应的研究进展[J]. 地震工程学报, 2017, 39(3): 0578-0586. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2017.03.0578

WANG Wen-ming, YI Si-yin, TIAN Li, et al. Research Progress of Seismic Responses on Engineering Structures Crossing Faults[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(3): 0578-0586. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2017.03.0578



跨越断层地震动对结构地震反应的研究进展^①

王文明¹, 易思银², 田利², 王彦明²

(1. 山东电力工程咨询院有限公司, 山东 济南 250013; 2. 山东大学土建与水利学院, 山东 济南 250061)

摘要: 地下管道、交通、电力系统等是重要的生命线工程, 跨越断层的结构地震时具有较大的破坏风险, 确保它们在地震时安全可靠的运行具有重要的意义。本文首先介绍了跨越断层地震动的基本特征, 然后从跨越断层地震动模拟、跨越断层地震动对结构的影响以及振动台试验等几个方面进行论述, 总结了跨越断层地震动对结构地震反应的研究现状和存在的问题。最后针对大跨空间结构需要研究的重点问题进行了展望。

关键词: 跨越断层地震动; 地震动模拟; 结构反应; 振动台试验; 大跨空间结构

中图分类号: TU352

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2017)03-0578-09

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2017.03.0578

Research Progress of Seismic Responses on Engineering Structures Crossing Faults

WANG Wen-ming¹, YI Si-yin², TIAN Li², WANG Yan-ming²

(1. Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Corp. Ltd., Jinan 250013, Shandong, China;

2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China)

Abstract: Underground pipelines, transportation, and power systems are important lifelines in engineering and often disrupted during earthquakes. Thus, ensuring the safety and reliable operation of these system is of extreme importance. First, this paper introduces the basic characteristics of cross-fault ground motion through ground motion simulation, structural responses, and shaking-table tests, among others. The current research situation and problems related to the seismic responses of different cross-fault structures in earthquakes are then summarized. Finally, important research problems of the seismic response of cross-fault large span space structures are discussed.

Key words: cross-fault ground motion; ground motion simulation; structural response; shaking table test; large span space structure

① 收稿日期: 2016-01-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578325)

作者简介: 王文明(1987—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事输电线路设计方法研究。

通信作者: 田利(1982—), 男, 博士, 副教授, 主要从事结构抗震研究。E-mail: tianli@sdu.edu.cn。

0 引言

地震断层会给桥梁、地下管线、隧道、大跨输电塔-线等重要生命线工程带来巨大的破坏,这种结构一旦失效或遭到破坏,将会给国民经济和社会生活造成巨大的损失,同时造成的间接损失也是无法估量的,因此人们对跨断层结构的地震反应给予较大的关注。为避免这种风险,许多国家和地区都出台了相关的规范和条例,如禁止在活动断层上新建结构或者要求与活动断层之间设置一定的避让距离等。然而由于地质、成本等客观条件的限制,往往不可避免地跨越活动断层。

国内外大量震害表明,跨越断层对结构的破坏时有发生。如 1999 年集集地震、1999 年土耳其 Kocaeli 地震及 2008 年汶川地震,总计二十余座跨越活动断层的桥梁发生了严重破坏甚至垮塌^[1]。断层活动对城市埋地管线也会造成巨大的破坏,而埋地管线的破坏会直接导致交通、通讯、供暖、供水和供气等重要城市基础设施的服务中断,甚至可能引发次生灾害,造成严重后果,如 Managua 地震、Kern County 地震、唐山地震及阪神地震,大量的跨断层管道由于受拉、受压或屈曲破坏^[1]。地震时跨越断层对地下隧道以及输电线路同样会造成严重破坏,如集集地震等。由此可见,地震时跨越断层的结构易损性较高。

我国是一个多地震的国家,大跨空间结构不可避免穿越活动断层附近,甚至直接跨越断层地表破碎带,故积极开展针对跨断层大跨空间结构的抗震研究,制定相应防御措施,具有重要的现实意义。本文结合国内外的研究成果,介绍了跨越断层地震动的基本特征,然后总结了跨越断层地震动模拟研究、对跨断层结构的影响研究以及振动台试验研究的现状,最后针对跨断层大跨空间结构需要研究的重点问题进行了展望。

1 跨断层近场地震动的基本特征

断层是引发地震的主要原因,当震源距较小时,跨断层近场地震动与远场地震动显著不同,其存在巨大的破坏潜力。目前为止,近断层区域没有一个统一的具体定义,通常指距离断层破裂面 20 km 以内的范围。工程建设与防灾减灾迫切需要知道跨断层近场地震动的基本特征,国内外学者对近断层地震动进行了深入的研究。主要研究如下:

Abrahamson^[3]通过对 1999 年台湾集集地震观

测资料总结,提出由破裂方向性导致的双向速度脉冲主要在垂直断层面的方向发生,而地面永久位移引起的速度脉冲表现在与断层滑动方向一致的分量上。

俞言祥等^[4]通过回归分析台湾集集地震的加速度峰值数据,得出了集集地震水平和竖向的加速度峰值衰减关系,断层上盘的地表加速度峰值大于下盘,上盘衰减较慢而下盘衰减较快,且加速度峰值的分布不对称。

毛建猛等^[5],根据上盘下盘相对运动趋势将断层分为正断层、逆断层、滑移断层,同时提出我国大陆的地震多为滑移断层引起的。

徐龙军等^[6]以集集地震近断层记录资料为数据基础,用等效速度脉冲周期和拟速度谱卓越周期来表征近断层地震动的频谱特性。地震动的幅值分布特征较好地反映了上盘效应和破裂的方向性效应,且上盘地震动的高频分量较为丰富。沿断裂带走向,长周期速度脉冲地震动的三分量平均频谱周期在震中表现为上倾断层的方向性作用。

刘启方等^[7]通过对近断层强震观测资料分析、地震震源过程的反演和断层附近地震动的数值模拟发现断层附近基本特征主要有:(1)强地震动的集中性:近断层地震动随着断层距的增加衰减很快,强地震动主要集中在以断层在地表的投影为中心的一个狭窄范围内;(2)地表破裂和永久位移;(3)破裂方向性效应:断层面朝着观测点传播,且破裂的传播速度接近于剪切波速时,导致断层面辐射的大部分能量几乎同时到达这个观测点,在该点记录开始部分形成一个明显的长周期脉冲;(4)速度大脉冲:主要存在两种形式:①由破裂方向性效应引起的一个双向速度脉冲,②由地面永久位移引起的单向速度脉冲;(5)上盘效应:距离断层迹线距离相同的两点,上盘的地震动比下盘的大,同时其衰减也要比下盘要慢。

王海云等^[8]在前人工作的基础上,全面地总结了近断层强地震动特点,近断层地震动与远场地震不同。对于倾滑断层,存在上盘效应,且破裂方向性效应和滑移效应分别引起了双向和单向长周期脉冲。对于走滑断层,破裂方向性效应使地震动产生强烈的空间变化。

贾俊峰等^[9]通过统计分析 1952—1999 年世界范围内的 18 次地震 1 009 条竖向地震记录,发现在断层距 0~40 km 范围很大部分的竖向与水平向加速度峰值比值大于一般设计规范规定的 2/3,比值与震级有关,震级越大比值越大,震级越小比值越

小,而对于走滑地震来说可能有很大的比值。

谢俊举等^[10]选取分布在北川—映秀中央断裂两侧 40 个强震动台站的记录,通过统计分析,表明在近断层区域内加速度峰值东西向比南北向大,且加速度和速度峰值东西向和南北向的平均比值分别为 1.19 和 2.25,说明了近断层水平地震动存在明显的方向差别。竖向与水平向加速度峰值比值较大,有些地区接近 1.5,上盘的比值大于下盘的一侧,说明上盘的竖向地震动比下盘剧烈。

赵国臣等^[11]基于小波理论的多尺度分析方法对近期 12 次大地震中 53 条典型近断层地震动进行分解:近断层长周期地震动主要由周期为 0.2~2 s 的分量组成;近断层土层场地地震动中的长周期分量比岩石场地多;在 0~15 km 的近断层区域,随断层距的增加,地震动中长周期分量的比重明显减小。

综上所述,跨断层地震动存在显著的破裂方向性效应、滑移效应、上盘效应、速度大脉冲等特征,与远场地震动存在显著差别,对结构的地震响应和失效破坏较大。目前对跨断层地震动研究主要集中在跨断层某一侧的法向和切向,而对竖向地震动特性研究相对比较少。

2 跨越断层地震动模拟研究

跨断层地震动是地震动中最为复杂的一种,主要表现为断层的破裂方向性效应和滑移效应。近年来近断层的地震动脉冲效应引起了各国学者的关注,由于工程结构分析需要与实际脉冲型地震记录有限,有必要建立一套针对工程设计人员的近断层脉冲型地震动的模拟方法。

张晓志等^[12-13]在模拟近倾滑断层地面运动时,采用有限断层运动学模型,通过显示有限元数值模拟获得近断层地震动,其中断层上盘和下盘的运动大小相等方向相反。计算结果表明倾滑断层也不同程度的存在上盘效应、滑移效应、速度大脉冲效应。

潘波等^[14]利用 1679 年三河—平谷 8 级地震的有关资料和北京地区地下三维结构的研究成果建立了相应的震源模型和传播介质模型,通过近断层强地震动三维有限差分程序,模拟计算得到了北京地区震后地面峰值速度场,并获得了近断层地震动的基本特征。

田玉基等^[15]模拟近断层脉冲型地震动加速度时程时,将小于 1 Hz 的低频成分与大于 1 Hz 的高频成分分开模拟,然后将二者叠合在一起。其中低频脉冲型速度时程模拟,根据脉冲周期的统计公式

确定脉冲周期 T_p ;根据脉冲峰值统计公式确定脉冲峰值 v ;根据具体的脉冲型记录确定 3 个形状参数,然后由等效速度模型即可生成等效速度脉冲时程,求导得到等效加速度时程。高频时程分量,根据潜在的矩震级和场地条件,按照 Boore^[16]等基于相位差谱的人工地震动合成法模拟大于 1 Hz 频率成分的加速度时程,同时在模拟时程的傅里叶幅值谱中,频率小于 1 Hz 的幅值设定为零。

樊剑等^[17]对近断层脉冲地震人工模拟时,根据场地特征选取某远场实际地震波或者人工合成的远场地震动作为底波,实行基于 S 变换的时频滤波,只在速度脉冲发生的时间段对低频进行滤波,再与等效速度脉冲叠加,生成能反映场地局部特征和近断层脉冲地震特点的时程。

常莹等^[18]基于确定性震源模型方法,采用分级离散断层面和分解断层面破裂单元上升时间的方法,增加震源时间函数中的高频信号,模拟了汶川地震近断层宽频强地面运动,模拟结果显示加速度和持续时间与观测记录数据基本上在 50% 精度范围内。

杨怀宇等^[19]在对跨断层强地震动模拟时,基于跨断层地震动的方向性效应和滑移效应,分别模拟出方向性脉冲和滑移脉冲,其中方向性脉冲采用 Dabaghi^[20]提出的方向性脉冲进行模拟;滑移脉冲采用 Vaez^[21]提出的滑冲模型进行模拟;余下的高频部分基于太平洋地震工程研究中心的强地震数据库,根据震级选取相应的不含脉冲的远场地面运动。上述两种脉冲式同时发生,合成垂直断层和平行断层的运动分量,垂直断层方向地震动一致,平行断层方向上大小相等,方向相反。竖向地震动采取远场的竖向地震动。

惠迎新等^[22]研究跨断层桥梁地震响应规律时,以走滑断层为例,模拟跨断层地面运动时程时,高频部分(>1 Hz)采用 Thraínsson 等^[23]基于相位差谱的人工地震动合成法模拟,低频脉冲部分(<1 Hz)的破裂方向性效应和滑移效应脉冲分别采用 Makris 等^[24]提出双半波速度脉冲模型和单半波速度脉冲模型模拟。滑冲效应引起的断层两侧地面相对错动,采用大小相同、方向相反的地震动时程以模拟断层相对错动,地震动竖向分量采用高频时程模拟。

国外一些学者 Rodriguez 等^[25]和 Park 等^[26]在研究跨断层桥梁地震动响应时,通过混合方法分别模拟出低频和高频部分时程,然后进行叠加生成跨

断层地震动。Mavroeidies^[27]提出了简化的跨断层地震动合成方法,将解析式表示的脉冲和生产的低频部分的时程进行时域上的叠加。Goel 等^[28]针对走滑断层,认为在平行断层方向的地震动时程具有比例特性,即断层左右两侧的地震动位移大小相等,方向相反。

综上所述,对于跨越断层地震动的模拟,研究人员往往采用不同的震源、波传播、场地反应模型,从而形成了不同的模拟方法,但总体上可分为三类:确定性方法、随机方法和混合方法。目前研究中,主要集中在近断层的模拟,对于跨断层的模拟,往往只是在滑移方向输入大小相同的方向相反的地震动。

3 跨越断层地震动对结构的影响研究

目前国内外学者逐渐重视研究具有显著的近场效应的地面运动对结构的动力响应和破坏模式的影响,主要研究如下:

杨迪雄等^[29]考察了近断层破裂方向性与滑冲效应两种不同速度脉冲运动对单自由度体系和长周期隔震建筑结构地震响应的影响。单自由度体系的反应谱分析表明,破裂向前方向性与滑冲效应对工程结构地震响应随结构周期而变化,而滑冲效应脉冲地震动对周期较长结构的影响最显著,对长周期结构提出了更高的抗震设计需求。与无脉冲地震动作用相比,近断层地震动作用下隔震结构地震响应显著增大,而且滑冲脉冲对隔震建筑抗震性能的影响更大,滑冲效应引起的速度脉冲使隔震建筑底部的层间变形和楼层剪力明显增大,并使隔震建筑的上部加速度响应有所增加,意味着滑冲效应脉冲比向前方向性效应脉冲对建筑结构的破坏更具危害性。

赵凤新等^[30]在加速度反应谱一致的前提下,采用 IDARC 非线性反应分析程序,研究了近断层速度脉冲对钢筋混凝土框架的地震反应影响。其中第一组时程为实际观察记录含有明显的速度脉冲,第二组通过窄带时程叠加法模拟出地震动时程,分析结果显示:结构处于弹性阶段,速度脉冲对结构弹性地震反应的影响不显著;塑性阶段时含脉冲地震动下结构的层间剪力、层间位移、楼层位移最大值存在明显的增大,增大幅度较大。

王长龙^[31]采用非线性时程分析法,对可代表典型低、中、高层建筑的三个钢框架模型在近断层地震作用下和一般地震作用下的地震响应进行计算,低、中、高层建筑结构在近断层地震动作用下的地震响

应均大于一般地震作用下的响应值。相对于低层建筑结构,中高层建筑结构在近断层地震作用下层间最大位移沿高度变化比一般地震作用下显著,且近断层地震作用下,高层建筑结构中的层间最大位移沿高度增加大体呈减小趋势。结构的近断层地震响应与地震动的 PGA 和 PGV/PGA 有关系,一般而言, PGA 接近时, PGV/PGA 越大,结构的响应越大,反之越小; PGV/PGA 接近时, PGA 越大,结构的响应越大,反之越小。

江义等^[32]利用 SAP2000 对一座 20 层的钢框架进行非线性时程分析,选取具有方向性效应、滑冲效应和无速度脉冲的近断层地震动输入,结果表明,含滑冲效应和向前方向性效应的脉冲地震动主要激励结构基本振型反应,而无速度脉冲的地震动能够激起结构的高阶振型反应,而且脉冲型地震动的结构破坏作用远强于无速度脉冲地震动。

周靖等^[33]研究了大跨带腋撑框架结构在近断层竖向地震动作用下弹塑性动力响应,时程分析结果表明:与非脉冲地震动相比,主梁挠度和柱底轴力增大,其中对主梁竖向位移反应的影响更显著,随竖向振动周期增大,柱底轴力和主梁挠度增大。

王维一^[34]利用 Opensees 数值模拟,研究了一 8 层钢筋混凝土框架在近断层水平和竖向地震动共同作用下的响应。结果表明:竖向地震动增大了结构的竖向位移,使框架柱出现了受拉变形,拉力的出现使压弯和压剪构件变成拉弯和拉剪构件。

陶连金等^[35]用有限差分程序 FLAC 对北京市拱形断面结构形式的单层三跨典型地铁车站进行了水平向弹塑性动力时程分析,研究方向性效应与滑移效应两种不同形式的脉冲地震动对结构的影响。结果表明:地震动的破裂向前方向性效应造成结构上端动力响应较大,而滑冲效应地震动会使得结构底部动力响应较大,其中滑冲效应对结构的破坏更具有破坏性。

武钢等^[36]研究了大跨越输电塔一线体系的近场脉冲型地震反应,结果表明在同幅值的近场脉冲地震动下,结构的动力反应大于其在一般地震动下的反应,且近场脉冲型地震反应幅值随地震动脉冲周期增大而增大。同时采用正弦等效脉冲模型进行近场响应分析,结果表明结构响应与实际地震动相似,等效脉冲模型能够弥补近场脉冲地震数目的不足。

陈令坤等^[37]利用 ANSYS 分析了高速铁路多跨桥梁在近、远断层地震动作用下的弹塑性地震响

应,结果表明,含有方向性脉冲效应的地震作用下墩底梁体位移、墩顶位移及墩底弯矩增大,出现了更大的塑性变形,对墩底提出更高的延性需求。在地震动一段时间内对结构起破坏控制作用的因素是速度或位移。竖向地震动作用下竖向挠度比远场地震大得多。

赵卫锋等^[38]研究了近断层竖向速度脉冲对 RC 柱抗剪性能的影响,采用台湾集集地震脉冲型地震动进行非线性动力时程分析,结果表明:抗剪性能系数随反应谱比值增大而减小,中等初始轴压比与断层距、以及剪跨比与近断层距对柱抗剪性能有显著影响。

李慧等^[39-40]研究了不规则层间隔震结构在近场地震作用下的动力响应,结构上部塔楼在脉冲分量作用下产生了鞭梢放大效应,说明了较大的脉冲分量是结构在近场地震中破坏的主要因素。同时采用宽频分量与速度脉冲分量相结合的方法,拟合出近场地震波,分析了组合结构在近场地震动作用下的动力响应,结果表明增设黏滞阻尼器可以有效地控制结构地震响应,改善结构受力,减小隔震层位移。

罗致等^[41]研究了垂直跨越断层斜拉桥在含有滑移脉冲的位移时程横向非一致地震动作用下的响应,其中地震动的高频部分根据相关参数选取远场不含脉冲地震动,然后叠加滑冲滑冲效应脉冲时程,断层两侧施加大小相等方向相反基底位移时程。时程分析结果显示:地震内力增大明显,平均约为普通远场地震响应的二倍,其中桥塔塔顶位移增加明显,由于永久地面位移产生较大的地震轴力。

惠迎新等^[42-43]分析了国内外历次地震中跨越断层的震害资料,总结了跨断层桥梁的震害特征,断层破裂产生过大的相对位移是发生结构损伤破坏的主要原因,其中倾滑断层类型地震动破坏程度比走滑型严重,桥墩的破坏形式为剪切破坏和倾斜倒塌。同时以一座跨走滑断层桥梁为例,通过混合方法模拟地面运动时程,数值模拟使输入位移时程比较了跨断层和近断层桥梁的破坏特征。跨断层桥梁 FP 方向采用空间非一致激励、FN 方向一致激励,近断层采用空间一致激励,分析结果显示跨断层桥梁桥墩扭矩显著大于近断层桥墩扭矩,垂直断层方向位移和内力响应规律基本一致,平行断层方向跨断层桥梁两侧位移和内力响应方向相反且地震动结束后存在较大的参与内力和变形。

综上所述,跨断层地震动对结构的影响研究主要集中在考虑近断层破裂方向性效应与滑移效应一

致激励下对结构的作用,对跨断层竖向地震动响应研究较少,很少涉及跨越断层地震动非一致激励对结构的影响。

4 跨断层振动台试验研究

振动台可以很好地再现地震过程,是真正意义上的地震模拟试验。振动台试验能够直接观察结构的地震响应,是研究结构的地震反应和破坏机理最直接的方法。目前关于跨断层振动台试验研究较少,仅有的研究如下:

王峥峥^[44]开展了跨断层隧道振动台模型试验,研究了跨断层隧道在人工波下的动力反应规律、破坏形态及抗震层的减震效果。

张志超等^[45-46]通过振动台试验研究了跨断层地下管线在走滑断层错动时的振动响应,将模型箱分成独立两个部分,一端固定地面、一端置于台面,利用台面施加位移时程模拟断层错动,研究了管线应变分布规律和周围土压力变化,并考察与断层夹角的影响。

方林等^[47]开展了穿越断层隧道在单向和多向地震作用下振动台模型试验,研究了隧道动力响应规律和特征。结果表明:断层对地震波在岩体传播存在一定的影响。

韩淼等^[48]开展了近断层地震动对一座相似比为 1:7 的基础隔震钢框架结构响应的振动台试验研究,选取了 6 条近断层天然波,分析了相同地震动强度下隔震层动力响应规律。结果表明:含有速度脉冲的地震波对结构影响较大,上盘地震波影响较下盘大,体现出近断层地震动的上盘效应。

耿萍等^[49]开展了穿越断层破碎带隧道设置减震层的振动台模型试验,研究结果表明:减震层能够降低衬砌的内力峰值,提高隧道的抗震性能。

信春雷等^[50]通过振动台试验研究了在断层错动和强震共同作用下跨断层隧道地震响应与破坏形态。结果表明:跨断层隧道设置减震缝可以有效地减小结构的内力值和应变值。

易谊^[51]研究了近断层脉冲型单向地震作用下的隧道动力响应规律,并进行数值模拟进行验证,针对隧道结构,横断面的上拱顶位置是抗震设防的重点区域,边坡较高位置由于地震的放大效应,设计上予以重视。

何川等^[52]通过振动台模型试验对跨断层破碎带隧道动力响应进行了研究,结果表明:断层破碎带段隧道震害破坏主要以错动及各种开裂为主。

综上所述,跨断层振动台试验研究主要集中于地下管线、隧道等生命线工程,试验时均在地震动一致激励下研究结构的响应,且主要考虑断层对地震波传播的影响,均未涉及到发震断层对结构的影响。

5 结语与展望

本文从跨断层地震动对结构的地震反应的4个方面,即跨断层地震动特征、地震动模拟、对结构的影响和振动台试验进行了讨论和综述。已有震害表明,跨断层结构具有极大的脆弱性,且大跨空间结构不可避免跨越断层带,因此对这类结构的抗震性能提出更高要求。笔者认为有以下几个方面有待深入研究:

(1) 基于大跨空间结构特征和断层特点及地震波的传递特性,考虑行波效应、断层倾角、宽度及复杂场地对地震波传播的影响,建立一种可以合理有效地模拟跨断层复杂场地上的非一致地震动方法,为跨越断层结构地震分析提供保证。

(2) 针对跨断层不同大跨空间结构,对比加速度、速度和位移输入模型,提出一种适用于跨断层不同大跨空间结构非一致地震动输入方法,总结跨越断层结构的动力反应规律。

(3) 对跨断层大跨空间结构开展地震作用下的倒塌分析,探讨非一致地震动、活动断层穿越角度等因素对结构倒塌过程的影响,研究结构的倒塌模式及主要破坏特点、探索其倒塌破坏机理,将成为未来研究的热点。

(4) 地震模拟振动台试验是地震模拟和理论成果检验的有效手段,目前关于跨越断层的结构振动台试验研究甚少。由于大跨度空间结构不可避免地跨越断层,开展跨断层的振动台试验研究具有重要的意义。

参考文献(References)

- [1] 惠迎新,王克海,李冲.跨断层地表破裂带桥梁震害研究及抗震概念设计[J].公路交通科技,2014,31(10):145-151.
HUI Ying-xin, WANG Ke-hai, LI Chong. Study of Seismic Damage and Seismic Conceptual Design of Bridges across Fault Surface Rupture Zones[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31(10): 145-151. (in Chinese)
- [2] 孙绍平,韩阳.生命线地震工程研究述评[J].土木工程学报,2003,36(5):97-104.
SUN Shao-ping, HAN Yang. State of the art of the Research on Lifeline Earthquake Engineering[J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(5): 97-104. (in Chinese)

- [3] Abrahamson N A. Near-fault Ground Motions from the 1999 Chi-Chi Earthquake[C]//Proc. of US-Japan Workshop on the Effects of Near-field Earthquake Shaking San Francisco, California, 2000: 11-13.
- [4] 俞言祥,高孟潭.台湾集集地震近场地震动的上盘效应[J].地震学报,2001,23(6):615-621.
YU Yan-xiang, GAO Meng-tan. Effects of the Hanging Wall and Footwall on Peak Acceleration During the Jiji (Chi-Chi), Taiwan Province, Earthquake [J]. Acta Seismologica Sinica, 2001, 14(6): 654-659. (in Chinese)
- [5] 毛建猛,李鸿晶.跨越断层地下管线震害因素分析[J].国际地震动态,2005(4):27-31.
MAO Jian-meng, LI Hong-jing. Analysis of Seismic Damage on Buried Pipeline Crossing a Fault [J]. Recent Developments in World Seismology, 2005(4): 27-31. (in Chinese)
- [6] 徐龙军,谢礼立.集集地震近断层地震动频谱特性[J].地震学报,2005,27(6):656-665.
XU Long-jun, XIE Li-li. Characteristics of Frequency Content of Near-fault Ground Motions During the Chi-Chi Earthquake [J]. Acta Seismologica Sinica, 2005, 27(6): 656-665. (in Chinese)
- [7] 刘启方,袁一凡,金星,等.近断层地震动的基本特征[J].地震工程与工程振动,2006,26(1):1-10.
LIU Qi-fang, YUAN Yi-fan, JIN Xing, et al. Basic Characteristics of Near-fault Ground Motion [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(1): 1-10. (in Chinese)
- [8] 王海云,谢礼立.近断层强地震动的特点[J].哈尔滨工业大学学报,2006,38(12):2070-2072.
WANG Hai-yun, XIE Li-li. Characteristics of Near-fault Strong Ground Motions [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006, 38(12): 2070-2074. (in Chinese)
- [9] 贾俊峰,欧进萍.近断层竖向地震动峰值特征[J].地震工程与工程振动,2009,29(1):44-49.
JIA Jun-feng, OU Jin-ping. Peak Amplitude Characteristics of Vertical Seismic Ground Motions in Near-fault Regions [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29(1): 44-49. (in Chinese)
- [10] 谢俊举,温增平,高孟潭,等.2008年汶川地震近断层竖向与水平向地震动特征[J].地球物理学报,2010,53(8):1796-1805.
XIE Jun-ju, WEN Zeng-ping, GAO Meng-tan, et al. Characteristics of Near-fault Vertical and Horizontal Ground Motion from the 2008 Wenchuan Earthquake [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(8): 1796-1805. (in Chinese)
- [11] 赵国臣,徐龙军,谢礼立.基于多尺度分析方法的近断层地震动特性分析[J].地球物理学报,2013,56(12):207-217.
ZHAO Guo-chen, XU Long-jun, XIE Li-li. on Near-fault Ground Motion Characteristics Through Multi-scale Method [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(12): 207-217. (in Chinese)
- [12] 张晓志,谢礼立,王海云,等.某正倾滑断层引起的近断层强地面运动的有限元数值模拟[J].地震工程与工程振动,2006,26

- (6):11-16.
- ZHANG Xiao-zhi, XIE Li-li, WANG Hai-yun, et al. Models and Methods for Simulating Near-fault Ground Motion Field of a City by Explicit Finite Element Method[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(6): 11-16. (in Chinese)
- [13] 张晓志, 谢礼立, 王海云, 等. 近断层强地面运动影响场显式有限元数值模拟的示意性算例[J]. 地震工程与工程振动, 2005, 25(6): 5-11.
- ZHANG Xiao-zhi, XIE Li-li, WANG Hai-yun, et al. Illustrative Example in Simulating Near-fault Ground Motion Field by Explicit Finite Element Method[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2005, 25(6): 5-11. (in Chinese)
- [14] 潘波, 许建东, 关口春子, 等. 北京地区近断层强地震动模拟[J]. 地震地质, 2006, 28(4): 623-634.
- PAN Bo, XU Jian-dong, HUAN Sekigguchi, et al. Simulation of the Near-fault Strong Ground Motion in Beijing Region[J]. Seismology and Geology, 2006, 28(4): 623-634. (in Chinese)
- [15] 田玉基, 杨庆山, 卢明奇. 近断层脉冲型地震动的模拟方法[J]. 地震学报, 2007, 29(1): 77-84.
- TIAN Yu-ji, YANG Qing-shan, LU Ming-qi. Simulation Method of Near-fault Pulse-type Ground Motion[J]. Acta Seismologica Sinica, 2007, 29(1): 77-84. (in Chinese)
- [16] Boore D M. Simulation of Ground Motion Using the Stochastic Method[J]. Pure and Applied Geophysics, 2003, 160(3/4): 635-676.
- [17] 樊剑, 涂家祥, 吕超, 等. 采用时频滤波技术的近断层脉冲地震人工模拟[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2008(11): 116-119.
- FAN Jian, TU Jia-xiang, LV Chao, et al. Generation of Artificial Near-fault Ground Motions Based on Time-frequency Filtering[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2008(11): 116-119. (in Chinese)
- [18] 常莹, 周红, 俞言祥. 汶川地震强地面运动模拟[J]. 地震学报, 2012, 34(2): 224-234.
- CHANG Ying, ZHOU Hong, YU Yan-xiang. Strong Ground-motion Simulation of the Wenchuan Earthquake[J]. Acta Seismologica Sinica, 2012, 34(2): 224-234. (in Chinese)
- [19] 杨怀宇, 李建中. 断层地震动对隔震桥梁地震响应的影响[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2015, 43(8): 1144-1152.
- YANG Huai-yu, LI Jian-zhong. Response Analysis of Seismic Isolated Bridge under Influence of Fault-crossing Ground Motions[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2015, 43(8): 1144-1152. (in Chinese)
- [20] Dabaghi M, Der Kiureghian A. Stochastic Model and Simulation of Near Fault Ground Motions for Specified Earthquake Source and Site Characteristics[J]. Report to California Department of Transportation, 2011.
- [21] Vaez S R H, Sharbatdar M K, Amiri G G, et al. Dominant Pulse Simulation of Near Fault Ground Motions[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 12(2): 267-278.
- [22] 惠迎新, 王克海, 吴刚, 等. 跨断层桥梁地震响应分析及合理跨越角度研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(13): 6-11.
- HUI Ying-xin, WANG Ke-hai, WU Gang, et al. Seismic Responses of Bridges Crossing Faults and Their Best Crossing Angles[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(13): 6-11. (in Chinese)
- [23] Thráinsson H, Kiremidjian A S. Simulation of Digital Earthquake Accelerograms using the Inverse Discrete Fourier Transform[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2002, 31(12): 2023-2048.
- [24] Makris N, Chang S P. Effect of Viscous, Viscoplastic and Friction Damping on the Response of Seismic Isolated Structures[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2000, 29(1): 85-107.
- [25] Goel R K, Qu B, Rodriguez O, et al. Bridge Design for Earthquake Fault Crossings: Synthesis of Design Issues and Strategies[J]. Civil & Environmental Engineering Cal Poly, 2012.
- [26] Park S W, Ghasemi H, Shen J, et al. Simulation of the Seismic Performance of the Bolu Viaduct Subjected to Near-fault Ground Motions[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2004, 33(13): 1249-1270.
- [27] Mavroeidis G P, Papageorgiou A S. A Mathematical Representation of Near-fault Ground Motions[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2003, 93(3): 1099-1131.
- [28] Goel R K, Chopra A K. Simplified Analysis of Bridges Crossing Fault-rupture Zones[C]//Sixth National Seismic Conference on Bridges and Highways. 2008.
- [29] 杨迪雄, 赵岩. 近断层地震动破裂向前方向性与滑冲效应对隔震建筑结构抗震性能的影响[J]. 地震学报, 2010, 32(5): 579-587.
- YANG Di-xiong, ZHAO Yan. Effects of Rupture Forward Directivity and Fling Step of Near-fault Ground Motions on Seismic Performance of Base-isolated Building Structure[J]. Acta Seismologica Sinica, 2010, 32(5): 579-587. (in Chinese)
- [30] 赵凤新, 韦韬, 张郁山. 近断层速度脉冲对钢筋混凝土框架结构地震反应的影响[J]. 工程力学, 2008(10): 180-186.
- ZHAO Feng-xin, WEI Tao, ZHANG Yu-shan. Influence of Near-fault Velocity Pulse on the Seismic Response of Reinforced Concrete frame[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(10): 180-186. (in Chinese)
- [31] 王长龙. 近断层地震动作用下钢框架结构的地震响应分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
- WANG Chang-long. Seismic Response Analysis of Steel Framed Structures Subjected to Near Fault Ground Motions[D]. Beijing: Journal of Beijing Jiaotong University, 2008. (in Chinese)
- [32] 江义, 杨迪雄, 李刚. 近断层地震动向前方向性效应和滑冲效应对高层钢结构地震反应的影响[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(9): 103-110.
- JIANG Yi, YANG Di-xiong, LI Gang. Effects of Forward

- Directivity and Fling Step of Near-fault Ground Motions on Seismic Responses of High-rise Steel Structure[J].Journal of Building Structures,2010,31(9):103-110.(in Chinese)
- [33] 周靖,周飞,蔡健,等.脉冲型竖向地震作用下大跨度 RC 带腋撑框架结构弹塑性动力响应分析[J].工程力学,2010(6):113-119.
- ZHOU Jing,ZHOU Fei,CAI Jian,et al.Seismic Elastic-plastic Response of Long-span RC Frame Structure with Haunched Members Subjected to Pulse-like Vertical Ground Motions[J].Engineering Mechanics,2010,27(6):113-119.(in Chinese)
- [34] 王维一.近场区竖向地震对钢筋混凝土框架结构抗震性能影响分析[D].长沙:湖南大学,2010.
- WANG Wei-yi. Effect of the Near-field Vertical Ground Motion on the Seismic Response of R/C Frame[D].Changsha:Hunan University,2010.(in Chinese)
- [35] 陶连金,王文沛,张波,等.近断层地震动破裂向前方向性与滑冲效应对典型地铁车站结构动力响应的影响[J].地震工程与工程振动,2011,31(6):38-44.
- TAO Lian-jin,WANG Wen-pei,ZHANG Bo,et al.Effects of Rupture Forward Directivity and Fling Step of Near-fault Ground Motions on Dynamic Responses of Representative Subway Station Structure[J].Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2011,31(6):38-44.(in Chinese)
- [36] 武钢,翟长海,李爽,等.大跨越输电塔-线体系的近场脉冲型地震反应分析[J].工程力学,2013,30(6):77-82.
- WU Gang,ZHAI Chang-hai,LI Shuang,et al. Seismic Response of Large Crossing Transmission Tower-line System Subjected to Near-fault Ground Motions[J].Engineering Mechanics,2013,30(6):77-82.(in Chinese)
- [37] 陈令坤,张楠,胡超,等.近断层地震方向脉冲效应对高速铁路桥梁弹塑性反应的影响[J].振动与冲击,2013,32(15):149-155.
- CHEN Ling-kun,ZHANG Nan,HU Chao,et al.Effects of Near-fault Directivity Pulse-like Ground Motion on Elastic-elastic Seismic Response of High-speed Railway Bridge[J].Journal of Vibration and Shock,2013,32(15):149-155.(in Chinese)
- [38] 赵卫锋,田淞午,周靖.近断层竖向速度脉冲地震作用对 RC 柱抗剪性能的影响[J].重庆大学学报:自然科学版,2013,36(6):17.
- ZHAO Wei-feng,TIAN Song-wu,ZHOU Jing.Shear Resistant Performance of RC Columns Subjected to Vertical Near-fault Velocity Pulse-like Earthquake Actions[J].Journal of Chongqing University:Natural Science Edition,2013,36(6):17.(in Chinese)
- [39] 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 Yong-feng.Dynamic Response Analysis of Irregular Story Isolation Structures under Near-field Earthquake Conditions[J].China Earthquake Engineering Journal,2013,35(1):51-55.(in Chinese)
- [40] 李慧,刘迪,杜永峰.近场多脉冲地震动作用下组合隔震结构抗震性能分析[J].地震工程学报,2013,35(3):563-568.
- LI Hui,LIU Di,DU Yong-feng.The Seismic Behavior Analysis of Near-field Multi Pulse Ground Motion on Composite Isolated Structure[J].China Earthquake Engineering Journal,2013,35(3):563-568.(in Chinese)
- [41] 罗致,李建中.跨断层斜拉桥地震响应特征研究[C]//2014 全国公路养护技术学术年会论文集桥隧卷.2014.
- LUO Zhi,LI Jian-zhong.Study on Seismic Response Characteristics of Cross Fault Cable Stayed Bridge[C]//2014 Proceedings of the National Conference on Highway Maintenance Technology.2014.(in Chinese)
- [42] 惠迎新,王克海,李冲.跨断层地表破裂带桥梁震害研究及抗震概念设计[J].公路交通科技,2014,31(10):145-151.
- HUI Ying-xin,WANG Ke-hai,LI Chong.Study of Seismic Damage and Seismic Conceptual Design of Bridges Across Fault Surface Rupture Zones[J].Journal of Highway and Transportation Research and Development,2014,31(10):145-151.(in Chinese)
- [43] 惠迎新,王克海.跨断层桥梁地震响应特性研究[J].桥梁建设,2015(3):70-75.
- HUI Ying-xin,WANG Ke-hai.Study of Seismic Response Features of Bridges Crossing Faults[J].Bridge Construction,2015(3):70-75.(in Chinese)
- [44] 王峥峥.跨断层隧道结构非线性地震损伤反应分析[D].成都:西南交通大学,2009.
- WANG Zheng-zheng.Nonlinear Seismic Damage Response of Tunnel Structure Across Fault[D].Chengdu:Journal of Southwest Jiaotong University,2009.(in Chinese)
- [45] 张志超,王进廷,徐艳杰.跨断层地下管线振动台模型试验研究(I):试验方案设计[J].土木工程学报,2011,44(11):93-98.
- ZHANG Zhi-chao,WANG Jin-ting,XU Yan-jie.Shaking Table Test for Cross-fault Buried Pipelines (I):Model Design[J].China Civil Engineering Journal,2011,44(11):93-98.(in Chinese)
- [46] 张志超,王进廷,徐艳杰.跨断层地下管线振动台模型试验研究(II):试验成果分析[J].土木工程学报,2011,44(12):116-125.
- ZHANG Zhi-chao,WANG Jin-ting,XU Yan-jie.Shaking Table Test of Fault-crossing Buried Pipelines II:Test Results[J].China Civil Engineering Journal,2011,44(12):116-125.(in Chinese)
- [47] 方林,蒋树屏,林志,等.穿越断层隧道振动台模型试验研究[J].岩土力学,2011,32(9):2709-2713.
- FANG Lin,JIANG Shu-ping,LIN Zhi,et al.Shaking Table Model Test Study of Tunnel Through Fault[J].Rock and Soil Mechanics,2011,32(9):2709-2713.(in Chinese)
- [48] 韩森,孙欢,段燕玲.近断层地震作用下基础隔震层弹簧限位振动台试验研究[J].工程抗震与加固改造,2013,35(5):127-131.
- HAN Miao,SUN Huan,DUAN Yan-ling.Shaking Table Test

Study on Spring Limiting Deformation to Base Isolation Layer under Near-field Ground Motion[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2013, 35(5): 127-131. (in Chinese)

[49] 耿萍,唐金良,权乾龙,等.穿越断层破碎带隧道设置减震层的振动台模型试验[J].中南大学学报:自然科学版,2013,44(6):2520-2526.

GENG Ping, TANG Jin-liang, QUAN Qian-long, et al. Shaking Table Test for Tunnel With Shock Absorption Layer Though Fault Zone[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2013, 44(6): 2520-2526. (in Chinese)

[50] 信春雷,高波,周佳媚,等.跨断层隧道设置常规抗减震措施振动台试验研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(10):2047-2055.

XIN Chun-lei, GAO Bo, ZHOU Jia-mei, et al. Shaking Table Tests of Conventional Anti-seismic and Damping Measures on Fault-crossing Tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(10): 2047-2055. (in Chinese)

[51] 易谊.近断层脉冲型地震动下隧道动力响应规律研究[D].重庆:重庆交通大学,2014.

YI Yi. Study on Dynamic Response Rules of Tunnels under Near-fault Pulse-type Ground Motions[D]. Chongqing: Journal of Chongqing Jiaotong University, 2014. (in Chinese)

[52] 何川,李林,张景,等.隧道穿越断层破碎带震害机理研究[J].岩土工程学报,2014,36(3):427-434.

HE Chuan, LI Lin, ZHANG Jing, et al. Seismic Damage Mechanism of Tunnels Through Fault Zones [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(3): 427-434. (in Chinese)

(上接 570 页)

[12] 张肇诚.中国震例(1989—1991)[M].北京:地震出版社,2000.

ZHANG Zhao-cheng. Chinese Case(1989—1991)[M]. Beijing: Seismological Press, 2000. (in Chinese)

[13] 蒋海昆,代磊,侯海峰,等.余震序列性质判定单参数判据的统计研究[J].地震,2006,26(3):17-25.

JIANG Hai-kun, DAI Lei, HOU Hai-feng, et al. Statistic Study on the Criterion Index for Classification of Aftershock Sequences[J]. Earthquake, 2006, 26(3): 17-25. (in Chinese)

[14] 沈建文,邱瑛,赵志贺.震级—破裂关系与断层破裂模型[J].地球物理学报,1990,33(2):242-248.

SHEN Jian-wen, QIU Ying, ZHAO Zhi-he. Rupture Length Magnitude Relationship and Fault-Rupture Model[J]. Chinese J Geophys, 1990, 33(2): 242-248. (in Chinese)

[15] 吴开统,焦远碧,吕培苓,等.地震序列概论[M].北京:北京大学出版社,1990.

WU Kai-tong, JIAO Yuan-bi, LV Pei-ling, et al. Introduction to Earthquake Sequences [M]. Beijing: Beijing University Press, 1990. (in Chinese)

[16] 杨立明,王振亚,程建武,等.祁连—海原地震带中强地震序列类型分布及其应用[J].西北地震学报,2001,23(2):137-141.

YANG Li-ming, WANG Zhen-ya, CHENG Jian-wu, et al. The Distribution of Types of Mid-strong Earthquake Sequences in Qilian—Haiyuan Seismic Zone and Their Application[J]. North-western Seismological Journal, 2001, 23(2): 137-141. (in Chinese)