

近断层地震动的特点及其对结构地震反应影响研究进展

钱辉¹, 洪陈凯¹, 董立伟²

(1. 郑州大学土木工程学院, 河南郑州 450001;

2. 中国建筑第八工程局有限公司大连分公司, 辽宁大连 116021)

摘要: 近年来, 随着近断层强震记录的不断获取和研究的持续深入, 发现近断层地震动与远场地震动相比具有一些明显不同的特征效应, 这些特殊的效应对结构的地震响应产生了显著的影响。本文简要概述了近断层地震的特征, 着重介绍了破裂方向性效应和滑冲效应及其产生机理, 以及由此产生的两种不同类型的速度大脉冲。系统总结和分析了破裂方向性效应和滑冲效应作用对多种典型工程结构的地震响应影响, 最后讨论了目前研究中存在的主要问题和今后的研究发展方向。

关键词: 近断层地震; 破裂方向性效应; 滑冲效应; 速度大脉冲; 地震响应

中图分类号: P315.916

The Characteristics of near-fault ground motion and the Influence on the seismic response of Structures: State of the art and future directions

Qian Hui¹, Hong Chenkai¹, Dong Liwei²

(1. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001;

2. Dalian Branch China Construction Eighth Engineering Division Crop Ltd, Dalian 116021)

Abstract: In recent years, with the increasing acquisition of the near-fault ground motion records and increasing deepening of the research work, it is found that near fault ground motions have some distinct different characteristics compared with the far-field earthquakes and these special effects have significant influences on the seismic response of structures. This paper firstly briefly introduced the characteristics of near-fault ground motions, emphasizing on the rupture directivity effect and the fling-step effect as well as relative mechanisms and the formation of two different large velocity pulses. And then, the influences of the rupture directivity effect and fling-step effect on the seismic response of several typical civil engineering structures were systematically summarized and reviewed. Finally, the main problems existing in the current research and the future directions were discussed.

Key words: Near-fault ground motion; rupture directivity effect; Fling-step effect; Large velocity pulse; Seismic response

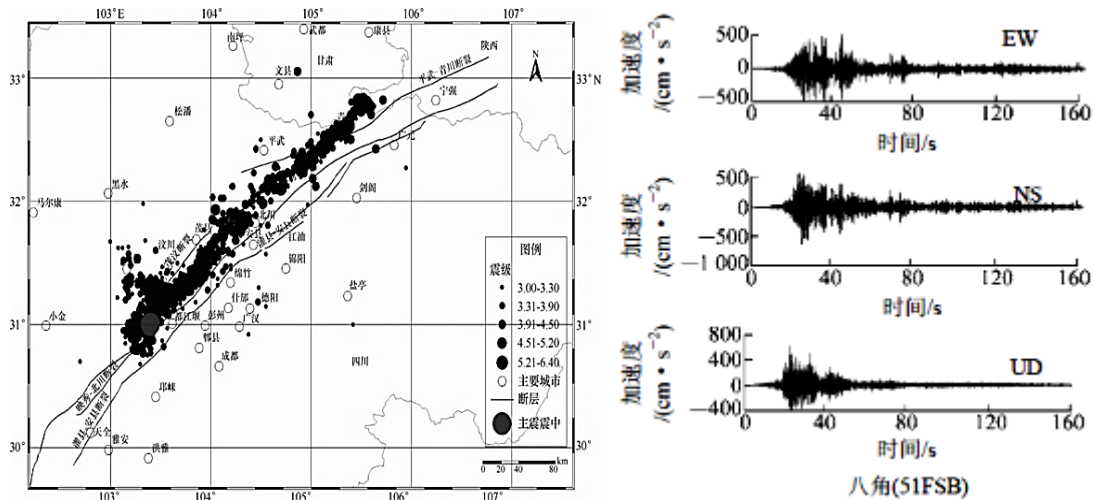
0 引言

在同一次地震当中, 近断层区域获得的地震记录与远场区域获得地震记录相比具有众多显著的不同特征, 因其较大的破坏危害性, 使其成为近二十年地震工程领域内的研究热点。人们第一次意识到近断层地震效应的特殊性是在 1957 年的美国 Port Hueneme 地震中, 很多建筑物出现了超出设计预期的严重破坏, 而且破坏形式与远场地震明显不同。针对这种情况, Housner 和 Hudson (1958) 首先发现了近场地震波中包含有很高的脉冲能量, 即使在震级

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51108426), 中国博士后科学研究基金项目 (20100471004), 教育部高等学校博士学科点专项科研基金 (20104101120009) 和河南省高等学校青年骨干教师资助计划项目 (2013GGJS-006)。

作者简介: 钱辉 (1978-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 结构工程. E-mail: qianhui@zzu.edu.cn

和地面加速度较小的情况下，仍然具有很强的破坏性。上世纪八十年代以来，大地震时有发生，如1989年的美国 Loma Prieta 地震、1992年的美国 Landers 地震、1994年的美国 Northridge 地震、1995年的日本阪神地震、1999年的中国台湾集集地震、1999年的土耳其 Kocaeli 地震、2008年的汶川地震和2011年的日本 3.11 大地震等，从这些大地震的近断层区域获得了大量的近断层强震记录，为近断层地震动的震源机理和震动特征研究提供了大量的数据。图1为汶川地震中主震和余震分布以及八角台站（51FSB）三向地震加速度记录^[1,2]。



50 图1 汶川 Ms8.0 级地震主震和余震分布以及八角台站（51FSB）加速度时程曲线特征

Fig. 1 Epicenter distribution of main shock and aftershock of Ms8.0 Wenchuan earthquake, and Acceleration time-history curves recorded by station Bajiao (51FSB)

近断层地震动最显著特征是地震波记录中包含丰富的大幅值、长周期速度大脉冲，其产生的原因主要是向前破裂方向性效应和滑冲效应，前者产生垂直于断层的双向速度脉冲，而后者产生平行于断层滑动方向的单向速度脉冲，进而产生脉冲型地面震动。两者都对结构地震反应具有严重影响，但是由于产生机理和频谱特性不同，对结构地震响应的影响也具有各自不同的特点。

55 本文首先对近断层地震概念和基本特点进行了简单介绍，着重阐述了近断层地震的破裂方向性效应和滑冲效应，及由两者产生的两种各具特点的不同速度脉冲；然后，对近断层地震破裂方向性效应和滑冲效应作用下典型土木工程结构的地震响应做了系统总结和评述；最后，指出了目前近断层地震特征及破裂方向性效应和滑冲效应激励下结构地震响应的研究中存在的问题，并对今后研究的发展方进行了探讨。

1 近断层地震动的特点

65 自上世纪五十年代，人们意识到近断层地震动的特殊性并开始研究以来，对近断层地震动的基本定义和特征有了初步了解；而近二十年来，通过对近断层地震动震害调研及观测资料的分析、地震震源过程的反演和近断层地震动的数值模拟，国内外众多学者，于海英^[1]、刘启方^[3]、谢礼立^[4,5]、杨迪雄^[6]、Mortezaei^[7]、Bray^[8]、Mavroeidis^[9]、Somerville^[10]等对近断层效应基本特性的研究取得了重要的成果。近断层地震动的主要特征有：（1）近断层强地震动的集中性；（2）地表破裂和永久地面位移；（3）破裂的方向性效应；（4）近断层的速度大脉冲；（5）上盘效应；（6）竖向效应。

1.1 近断层地震动的定义

近断层地震动，通常是指断层距较小时（一般认为不超过 20km），近断层地震动的特点显著，震源辐射地震波中的近场和中场项不能忽略的区域的地震动^[3]。从国内外学者的研究中可以发现^[3-12]，到目前为止，关于近断层区域的界限定义并不完全统一，究其原因主要在于近断层地震各显著效应在距离断层一定距离后已经明显减弱，此时受震级和场地条件等因素的影响逐渐明显，随着断层距的增加，地震动特点趋向于远场地震动，很难给定一个合理的固定震源距界限值作为划定近断层地震区域的标准。大部分研究人员将距离破裂面小于 20km 的区域作为近断层区域；但随着对近断层地震动基本定义和特点研究的深入，目前研究者对近断层区域界限的取值集中在 20~60km^[4]，且在该范围内近断层地震动记录的基本特征明显，在研究中应用较多，取得的研究成果中具有显著的近断层地震动特征和地震响应的影响，学者对于这种近断层区域的判定界限趋于认同。

近断层地震动强烈依赖于震源机制、断层破裂方向与场地的关系和断裂面相对滑动方向等因素^[13]，使近断层地震动表现出与一般的远场地震动明显不同的性质。近断层地震动中，往往包含显著的破裂方向性效应和滑冲效应引起的脉冲型地震动，通常表现为速度脉冲的形式。这种速度脉冲型地震动具有类似脉冲的波形，低频分量丰富，较长的特征周期和丰富的中长周期分量；地震动的加速度、速度和位移幅值以及速度峰值与地面加速度峰值的比值 (PGV/PGA) 较大，容易引起大尺度永久地面位移。另外，近断层地震动的具体表现形式容易受到震级大小和断层尺寸、类型、埋深、破裂过程等诸多因素的影响^[3,8,11,14]。

1.2 破裂方向性效应

破裂方向性效应是目前研究最为广泛的近断层地震动特性。当满足以下两个条件：（1）破裂朝着场地或者与场地夹角较小方向传播；（2）地震波以接近场地剪切波速的速度传播，使断层破裂过程辐射的能量几乎在同一时间到达目标场地，产生一个地震前期明显的长周期脉冲，这就是破裂方向性效应^[3,7,15]。破裂方向性效应可以用类似声学多普勒效应的原理解释，如图 2 所示^[7]，破裂前方和后方地震波谱的密度相差很大，沿着破裂传播方向趋密，地震能量在短时间内几乎同时到达场地 A，使该处产生脉冲型地震动，振幅显著增加；逆破裂传播方向出现相反的效应，场地 B 处能量分布均匀，不出现脉冲型地震动，振幅明显减小。

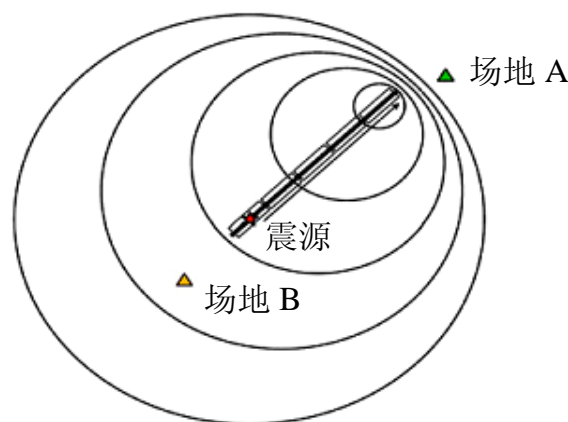


图 2 破裂方向性效应示意图

Fig. 2 Schematic diagram of rupture directivity effect

刘启方^[3]、Mavroeidis^[9]、Somerville^[10]等研究发现，破裂的方向性的具体表现为破裂前方的地震动长周期成分加强，地震动峰值大、持时短，垂直于断层面的分量的速度时程中有明显的长周期脉冲，因此该方向的地震动明显大于平行于断层方向的地震动。图3为1992年 Landers 地震中破裂前方的 Lucerne Valley (LUC)台站和后方的 Joshua (JSH)台站的垂直于断层走向的速度和位移时程记录，具有典型的破裂方向性效应^[16]。

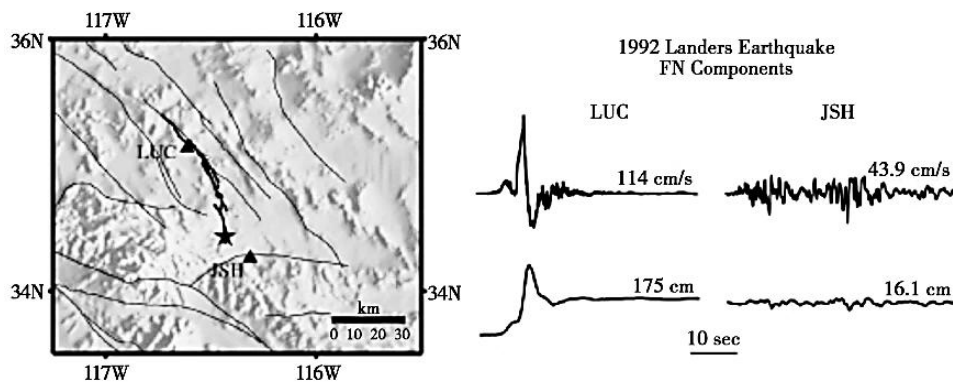


图3 1992年 Landers 地震中破裂前方的 Lucerne Valley (LUC)台站和后方的 Joshua (JSH)台站的垂直于断层走向的速度和位移时程

Fig. 3 Velocity and displacement time-history curves of Landers 1992 , perpendicular to the strike of the fault , recorded by station Lucerne Valley (LUC) and station Joshua (JSH)

张冬丽^[17]、Pischiutta^[18]等对近断层地震动破裂方向性效应的发生规律进行了研究，其主要受破裂方向、破裂速度、断层面的滑动方向、场地的位置等因素影响。破裂前方垂直断层方向的方向性效应最明显；另外，破裂方向性效应与断层的倾角有关，当断层倾角很大时，破裂方向性效应主要表现在垂直断层走向方向上；当断层倾角很小时，破裂方向性效应主要表现在垂直地震动的方向，一般断层在垂直断层走向和地震动两个方向上都存在方向性效应。

1.3 滑冲效应

滑冲效应是另一个研究较为广泛的近断层地震效应^[3-5,8,19]。滑冲效应由地震过程中断层两盘相对运动，出现静力位移而造成的。弹性位错理论描述为，在板块构造中断层两侧弹性应变能不断积聚，当达到断层破裂强度后突然破裂，弹性应变能瞬间释放且伴随有弹性回跳，引起地震动和静力位移。滑冲效应中，由于静力位移场（弹性回跳）的存在，容易产生单方向半速度脉冲，使地面出现阶跃式永久位移。这种静力位移对结构的破坏力极强，在1999年的台湾集集地震和土耳其 Izmit 地震中，近断层区域的建筑物和构筑物在巨大的水平静力位移下几乎摧毁^[20]。因断层的走向不同，滑冲效应的表现形式也有所不同，在倾滑断层中，主要发生在垂直于断层的分量上；在走滑断层中，主要发生在平行于断层的分量上。

1.4 速度大脉冲

速度大脉冲是近断层破裂方向性效应和滑冲效应的主要表现形式，指在近断层地震速度时程中包含较长周期的高能脉冲型地震动，并且脉冲的幅值大、持时短。近断层的速度大脉冲主要有两种形式（图4，图5）^[3,21]：

（1）破裂方向性效应脉冲，指破裂方向性效应产生的双向速度脉冲，通常发生在与震中有一定距离的场地，主要表现在垂直于断层面的方向；

135 (2) 滑冲效应脉冲, 指滑冲效应引起的单向速度脉冲, 通常发生在近断层场地, 与震中无关, 主要表现在平行于断层面滑动的方向。

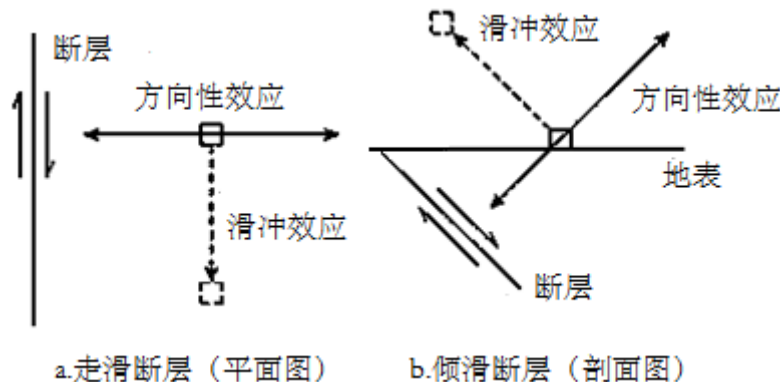
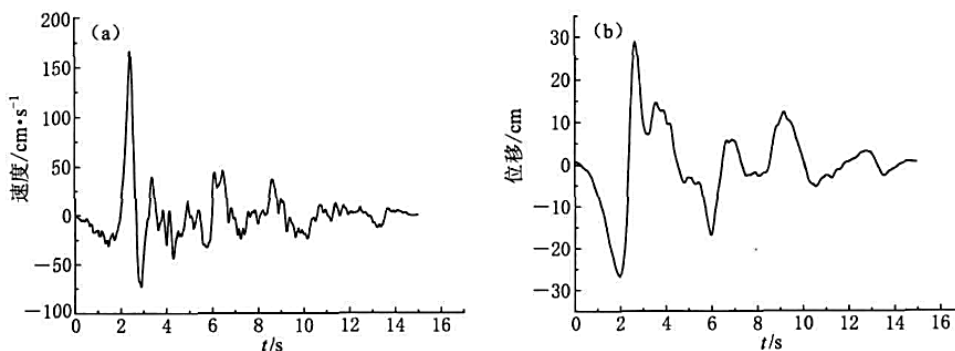


图 4 近断层破裂方向性效应脉冲和滑冲效应脉冲

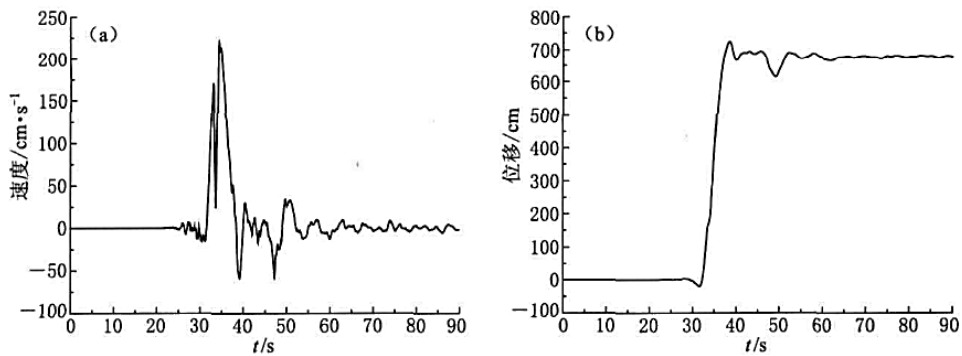
140 Fig. 4 Near-fault rupture directivity effect and pulse slip effect pulse

从振幅、频谱和持时三方面来看, 近断层脉冲型地震动在断层走向的法向分量和平行分量的地震特征和强度差别显著。如图 3, 对于倾滑断层, 破裂方向性效应脉冲和滑冲效应脉冲都发生于垂直断层面的方向上, 在场地同一剖面内发生两个方向速度脉冲的叠加, 使地震动加强; 对于走滑断层, 破裂方向性效应脉冲发生在垂直断层方向, 而滑冲效应脉冲发生在平行断层滑动方向, 地震动向着各自方向发展。在这种情况下, 倾滑断层的地震破坏往往比走滑断层更为严重。图 5 所示, 分别为美国 Northridge 地震中包含破裂方向性效应脉冲的 RRS-228 台站速度和位移时程和台湾集集地震滑冲效应脉冲的 TCU052-NS 台站速度和位移时程, 前者为双向脉冲, 持时长; 而后者为单向脉冲, 持时短, 特别是位移时程中存在显著的阶跃式单向脉冲, 导致地面产生严重的永久性位移, 最终使滑冲效应脉冲的破坏力明显强于破裂方向性效应脉冲, 对位于地震影响范围内的建筑物、构筑物造成更大的危害^[22]。



(a) 含破裂方向性效应脉冲的近断层地震动 RRS-228 台站的速度和位移时程

155 (a) Velocity and displacement time-history curves of station RRS-228 with rupture directivity pulse



(b) 含滑冲效应脉冲的近断层地震动 TCU052-NS 的速度和位移时程

(b) Velocity and displacement time-history curves of station RRS-228 with fling-step pulse

160

图 5 近断层地震动破裂方向性效应脉冲 (a) 和滑冲效应脉冲 (b) 速度位移时程

Fig. 5 Velocity and displacement time-history of near-fault ground motion with rupture directivity pulse (a) or fling-step pulse (b)

1.5 其他效应

165

近断层强震动的集中性,指的是近断层地震动的强度随着断层距的增加而呈现较快衰减的趋势,具体表现在地震动加速度峰值、速度峰值、地震烈度的快速衰减等方面,极震区往往是沿着断层迹线的狭长区域^[3,9,23]。

170

地表裂缝,在强烈的近断层地震中,往往形成长度和宽度很大的地表裂缝。如 1999 年的台湾集集地震和土耳其 Kocaeli 地震中产生的地表裂缝长度都超过了 100km^[24,25];汶川地震中,测得的大量地表裂缝宽度超过 10cm^[26],严重的地表裂缝对破裂经过之处的建筑结构造成了毁灭性破坏。

175

上盘效应,一方面,在倾滑断层破裂中,相同断层距的上、下盘场地,上盘比下盘距震源更近;另一方面,上盘场地与断层界面之间存在地震波的循环反射过程,以上两点都使上盘的地震动比下盘更加剧烈。1999 年的台湾集集地震和 2008 年汶川地震中均表现出明显的上盘效应^[26-29],随断层距的增加,上盘场地比下盘场地峰值加速度、烈度等衰减要慢得多,上盘的地震动破坏性更强。

竖向效应^[30],近断层区域的竖向地震动也较为剧烈,竖向加速度峰值和水平加速度峰值的比值 (PGA_V/PGA_H) 明显大于远场地震动,包含更多高频分量,使竖向地震动在设计中不能被忽略。

180

2 破裂方向性效应和滑冲效应对结构地震响应的影响

大量地震灾害调查研究表明,近断层地震动的破裂方向性效应和滑冲效应使结构的地震响应与远场地震作用下显著不同,这主要是由于近断层地震波中包含了明显的速度脉冲,低频分量丰富,特征周期长,幅值大。在研究近断层地震动破裂方向性效应和滑冲效应机理及基本特征的基础上,众多国内外专家学者研究了其对结构地震反应的影响。

185

2.1 钢筋混凝土框架结构

钢筋混凝土框架结构是目前多、高层结构采用的主要结构形式,研究其在近断层地震动破裂方向性效应和滑冲效应作用下结构的地震响应,有助于揭示近断层强震动下结构的抗震性能与破坏机理。赵新风等^[31]选用了台湾集集地震和美国 Northridge 地震中包含显著速度脉冲的 5 组地震记录,通过 6 个不同自振周期钢筋混凝土模型,研究了脉冲型地震动对结构的

- 190 地震反应增大效应,指出在结构弹性阶段,结构的速度脉冲型地震响应和非脉冲型地震响应相差不大;但随着震动强度的提高,在结构进入弹塑性阶段后,破裂方向性效应和滑冲效应速度脉冲型地震响应比非脉冲型地震响应显著得多,结构延性需求大幅增加。叶昆等^[32]根据规范设计了三种楼层数的平面框架混凝土结构模型,对比研究了近断层脉冲型地震动和一般远场地震动作用下结构的动力响应,分析结果表明随着结构高度的增加,近断层脉冲型地震动对结构地震响应影响趋于显著,高层框架结构层间位移和顶层位移均无法满足规范限值。Alav B 等^[33]通过研究单自由度和多自由度结构体系在近断层地震动响应,发现周期长于脉冲周期的结构和周期较短结构的反应差异很大,对于周期大于脉冲周期的结构,早期的屈服发生在较高楼层,但随着地震动的加剧,高延性需求向结构的底部楼层迁移;对于周期较短的结构,最大的延性需求总是出现在结构底部楼层。在此基础上,杨迪雄和陈波等^[34,35]
- 195 利用具有破裂方向性效应脉冲、滑冲效应脉冲和无脉冲近断层地震记录,对高层框架结构模型的层间变形特征和机理进行了对比数值模拟分析。结果表明,在近断层地震动的破裂方向性效应和滑冲效应脉冲型地震动激励下,高层框架结构的最大加速度和最大位移发生在顶层,而对结构最大层间剪力和最大层间位移及转角的放大作用往往发生在接近底部的几个楼层;同时,对于高层框架结构,滑冲效应脉冲主要激发结构的基本振型,导致结构的最大层间变形发生在较低楼层;而破裂向前方向性脉冲能激发高阶振型的响应,使长周期框架结构的最大层间变形发生在比前者稍高的楼层。Ventura C E 等^[36]进行了近断层滑冲效应脉冲作用下高层混凝土结构的地震非线性响应模拟研究,证实结构基本周期滑冲效应脉冲周期与滑冲效应脉冲周期之比是结构地震响应的敏感参数。Wen-I Liao 等^[37]对近断层脉冲型地震动作用下结构非线性地震反应的敏感因素进行了探索。
- 200
- 205
- 210 近断层脉冲型地震动对混凝土框架结构的地震反应有显著的放大效应,而破裂方向性效应脉冲和滑冲效应脉冲对结构地震反应的影响具有各自特点。

2.2 高层钢框架结构

- 钢结构由于自重较轻、延性较好,抗震性能优于普通钢筋混凝土结构^[38];然而,近断层脉冲型地震动作用又使高层钢框架结构地震反应和破坏机理具有鲜明特点。卢明奇等^[39]
- 215 选取了 13 条具有显著近断层脉冲型地震动记录应用于 ASCE 给出的 Benchmark 20 层钢框架结构模型数值模拟研究,结果表明,结构的地震响应与 PGA 和 PGV/PGA 有很大关系,当 PGA 相同时,随着地震波的 PGV/PGA 值增大,结构的顶层最大位移和基底剪力最大值均增大,且高层建筑的高阶振型影响作用要比远场地震情况下更为显著。江义和杨迪雄等^[40]研究了高层钢框架结构 Benchmark 分别在近断层地震破裂方向性效应和滑冲效应脉冲激励
- 220 下结构的非线性地震响应,采用破裂方向性效应脉冲、滑冲效应脉冲和无速度脉冲近断层地震动激励。得到了如下结论:破裂方向性效应脉冲和滑冲效应脉冲地震动主要激发结构的基本振型反应,而无速度脉冲则主要激发结构的高阶振型反应;并且和无速度脉冲地震动相比,脉冲型地震动对结构的地震响应有明显放大和增强作用。同时,对于周期较长的高层钢结构,脉冲型地震动使其具有较高的能量吸收和能量耗散系数,且结构的滞回特性表现为较少的往复作用,特别是在破裂方向性效应脉冲作用下尤为明显,无速度脉冲激励下的滞回特性存在
- 225 显著差异,使结构破坏更为严重。

2.3 地下结构

陶连金等^[41]研究了近断层地震动破裂向前方向性与滑冲效应脉冲型地震动对典型地铁

230 车站结构动力响应的影响。选取分别具有破裂方向性效应和滑冲效应的脉冲型地震动对地铁
车站结构进行激励,进行水平向弹塑性时程分析,研究发现,滑冲效应地震动较破裂方
235 向性效应地震动对地下结构的破坏更具危害性,在输入破裂方向性效应和滑冲效应脉冲型地
震动的峰值加速度相同的条件下,滑冲效应地震动比破裂方向性效应地震动引起的结构相对
水平位移差、峰值加速度及地震应力幅值更显著。另外,破裂方向性效应地震动对地下结构
顶部的动力响应放大更显著;滑冲效应地震动对地下结构底部的动力响应放大作用更显著。
235 在破裂方向性效应地震动激励下,结构的顶部、中部、底部的加速度峰值依次减小;相反,
滑冲效应地震动激励下,结构的顶部、中部、底部的加速度峰值依次增大。

地下结构与土体相结合,近断层地震动的破裂方向性效应和滑冲效应对其地震反应有直
接的放大作用,并且作用效果存在相对差异。

2.4 长周期结构

240 长周期结构近断层破裂方向性效应和滑冲效应脉冲型地震响应的研究,除了前述高层结
构以外,主要集中在基础隔震结构和大跨桥梁结构两方面。

国外学者更早地开展了近断层地震动作用下长周期结构地震反应特征的研究。Alavi B
等^[33]对长周期多自由度高层框架结构近断层破裂方向性效应和滑冲效应地震响应进行了研
245 究,结果表明,在输入地震动周期从 0.5s 增加到 5.0 秒的过程中,高层结构的地震响应逐渐
加强,而低层结构的地震响应逐渐减弱;从低层结构地震响应强于高层结构,向高层结构地
震响应明显强于低层结构转变。Ghahari S F 等^[42]通过考察多、高层框架结构在破裂方向性
250 效应、滑冲效应和高频成分作用下的地震响应,对长周期结构的定义进行了初步探讨研究,
发现长周期结构是指结构第一振型对应周期与脉冲周期比值大于 0.44 的结构;另外,当结
构自振周期为脉冲周期 0.8 倍时,结构产生顶层最大位移;为长周期结构的定义提供了理论
计算依据。

隔震是一种有效的工程抗震技术措施,然而在隔震装置的作用下使结构的固有周期被放
大,成为长周期结构。R.S. Jangid 等^[43]对隔震结构进行了系统的分析研究,发现近断层地震
的真实速度谱和伪速度谱之间存在显著差异,两种谱的差异随着体系阻尼和时间周期的增加
而增大。此外,隔震支座存在一个最佳阻尼使给定结构在近断层地震作用下上部结构的加速
255 度值达到最小;然而,支座位移随着阻尼增大而减小,因此,支座阻尼增大超过一定值可能
会减小支座变形,但是传递给上部结构更大的加速度。Mazza F 等^[44]对近断层地震作用下基
础隔震钢筋混凝土框架结构的非线性动态响应进行了研究,考察了近断层地震水平分量和竖
直分量共同作用下框架结构采用高阻尼橡胶滚轴支座(HDRBs)基础隔震的有效性,结果
表明近断层地震破裂方向性效应和滑冲效应使长周期水平脉冲和竖向加速度峰值与水平加
260 速度峰值的比值 $\alpha_{PGA} (PGA_V/PGA_H)$ 很大,对基础隔震将结构严重不利,结构的大梁和柱
子的延性需求很大,且随着隔震装置的标准刚度比 $\alpha_{K0} (K_{V0}/K_{H0})$ 增大而增大,造成顶层的
大梁和柱子的延性需求尤其大;但当标准刚度比 α_{K0} 较小时,在较低楼层,脉冲型水平近断
层地震可以在大梁和柱子端部截面产生附加的延性需求,总体剪应变和地震引起的剪应变达
到极值都能使隔震体系失效。杨迪雄等^[21,45]选取台湾集集地震和美国北岭地震中具有破裂方
265 向性效应和滑冲效应脉冲特征及无脉冲特征的地震记录,考察了长周期隔震建筑地震响应,
发现破裂方向性效应和滑冲效应对结构地震响应的影响是随结构周期变化的,在中短周期
段,含破裂方向性效应地震动的谱加速度值大于含滑冲效应地震动的谱加速度值;而在长周
期段,含滑冲效应地震动的谱加速度大于含破裂方向性效应的谱加速度值。此外,与无脉冲

地震作用相比,含破裂方向性与滑冲效应脉冲的近断层地震动作用下隔震建筑的地震响应显著增大。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,表明滑冲效应脉冲比破裂方向性效应脉冲对长周期建筑结构的破坏更具危害性。党育等^[46]从场地土、近断层地震的频谱、加速度峰值、脉冲周期等角度系统地分析了近断层脉冲型地震动对基础隔震结构的影响,结果显示近断层速度型脉冲地震动中包含较多的长周期频谱,在硬场和中等场地条件下,对基础隔震结构输入的能量远大于远场地震作用;且最大瞬时输入能基本对应着隔震结构的最大位移,表明隔震结构的最大变形由长周期脉冲引起,而不是峰值加速度。耿方方、叶昆等^[47,48]对近断层地震动作用下基础隔震结构地震反应进行了研究,发现破裂方向性效应和滑冲效应速度脉冲型地震动作用下,基础隔震结构的隔震支座将产生很大的变形,并有可能超过按常规地震设计的隔震缝,与周围的基坑或挡墙发生碰撞。杜永峰等^[49]关于隔震结构在近断层地震动作用下的基地碰撞及倾覆倒塌的研究发现,碰撞作用对隔震结构层间位移和绝对加速度有显著放大作用,并使倾覆力矩增大,使结构发生倾覆倒塌。

大跨桥梁是另一种典型的长周期结构,近断层地震动破裂方向性效应和滑冲效应速度型脉冲作用使其地震反应与远场地震作用下显著不同。杨迪雄等^[45]建立了桥梁模型对其地震响应进行了研究,得出以下结论:破裂方向性效应和滑冲效应脉冲型地震动都能使大跨桥梁结构的地震响应显著增大,且在破裂方向性效应作用下结构的动力响应幅值更大;另一方面,平均输入能较大的断层法向分量地震动作用下斜拉桥动力响应远大于断层平行分量地震动作用下的效应,破裂方向性效应显著。李勇等^[50]针对近断层地震动的频谱特性对大跨桥梁结构的地震反应进行了分析,结果显示破裂方向性效应和滑冲效应速度脉冲型地震动,其PGV/PGA值明显比远场地震大得多,而大跨桥梁的地震响应随着PGV/PGA的增大而增大,且增大幅度较大,近断层速度大脉冲效应显著。

290 3 目前存在的问题和今后的发展方向

近断层地震及破裂方向性效应和滑冲效应对结构地震响应影响的研究起步较晚,在上世纪中叶才逐渐被人们意识到,国外开展广泛的研究大概自20年前开始,而在国内则是2000年以后才逐渐成为地震工程学领域的研究热点。尽管经过近20年的研究已经取得了初步成果,但目前还处在初步研究阶段,有待更深入的研究和探索。近断层地震的破裂方向性效应和滑冲效应对典型结构地震响应影响的研究中存在的主要问题有以下几点:

3.1 近断层区域和近断层地震特点的定义研究

目前,近断层区域和近断层地震特点的准确定义尚不明确,仍然有待研究确定。没有明确的定量关系或判断准则来确定近断层区域的界线,为确保研究的可靠性和结果的显著性,研究者往往选择离断层较近的地震记录,也因此导致研究不全面。另外,对于近断层地震的特征,尽管已经有了初步的认识,但是各位研究者有不同的理解,采用不同的分类和定义,带来了一定的概念混淆。比如,近断层的速度大脉冲效应是和破裂方向性效应及滑冲效应紧密相关的,有的学者将其分开定义,而有的包含在后两者的含以内;滑冲效应也有学者定义为永久性位移或者Fling-step效应,虽然其基本的含义相近,都是产生单向速度脉冲的因素,但是有各自不同的特点,永久性位移含义更广泛^[3~5,8,10]。

305 3.2 破裂方向性效应和滑冲效应作用下结构地震响应

(1) 由于目前获得的较好的近断层记录有限,破裂方向性效应和滑冲效应明显的地震记录更少,研究者最常用的是台湾集集地震和美国北岭地震的记录,而且过分依赖断层距来

区分近断层和远场记录,忽略了场地与断层相对位置关系,这就造成了研究结果存在偏差的可能性,无法证实研究结果对所有近断层地震的普遍适用性,且存在同类研究所得结果相反的现象。

310

(2) 在众多国内学者的研究中多采用单自由度体系作为研究对象,虽然在远场地震中单自由度体系的地震响应可以用来有效评估多自由度体系的地震响应,而对于具有显著破裂方向性效应和滑冲效应的近断层地震激励下,以单自由度体系近似评估多自由度体系,特别是长周期结构地震响应的适用性有待研究^[21,45,51]。

315

(3) 在不少研究中,存在近断层破裂方向性效应和滑冲效应地震动与远场地震动使用原始记录进行结构地震反应分析,而没有对加速度幅值进行调整,使其地震强度达到同等水平,使研究结果的准确性存在一定疑问,建议采用相同加速度峰值的不同效应地震记录来对研究对象进行分析。

320

(4) 在破裂方向性效应和滑冲效应作用下结构地震响应的研究中,目前仅考虑单一效应的影响,或者两种效应单独作用再进行比较的居多,而没有考虑两种效应的耦合作用,或者其中一种效应与其他近断层地震效应的耦合作用。

(5) 破裂方向性效应和滑冲效应的结构地震响应研究中,主要考虑的结构响应为最大位移、层间位移、层间剪力等,考虑平扭耦合效应的几乎没有;但是在近断层地震破裂方向性效应和滑冲效应速度大脉冲很可能加剧结构的平扭耦合作用,使结构破坏更为严重。

325

(6) 目前研究中所使用的结构大多是传统的钢筋混凝土框架结构、钢框架结构、基础隔震框架结构等,而对其他结构形式,如剪力墙结构、框架剪力墙结构、地下结构等研究较少。

330

(7) 由于破裂方向性效应和滑冲效应对传统结构和隔震结构地震响应严重不利,一方面,对于近断层区域,结构抗震设计应加以考虑;另一方面,更合理、有效的隔震、减震装置有待研究和开发^[52-55]。

4 结论

本文对近断层地震破裂方向性效应和滑冲效应作用对典型结构的地震响应影响进行了系统总结和阐述,提出了目前研究中存在的问题和今后的发展方向。主要得到以下几点结论:

335

(1) 近断层地震破裂方向性效应和滑冲效应使地震动具有明显的长周期、大幅值的高能脉冲,对结构的地震响应有显著放大作用,并呈现出与远场地震明显不同的反应规律。

(2) 破裂方向性效应和滑冲效应主要激发结构的基本振型反应,且破裂方向性效应还可以激发结构的中高阶振型反应;同时,两种效应的速度脉冲型地震动使结构短时间内发生大量的能量输入和耗散,对结构地震反应严重不利。

340

(3) 当结构处于弹性阶段,破裂方向性效应和滑冲效应对结构地震响应的放大作用不明显,但是当结构处于弹塑性阶段时,两种效应的放大作用相当显著,结构的延性需求也显著增加。且从目前的研究结果来看,在大多数情况下,滑冲效应对结构的危害性更大。

[参考文献] (References)

- [1] 于海英,王栋,杨永强等.汶川 8.0 级地震强震动特征初步分析[J].震灾防御技术,2008,3(4):321~336.
- [2] 周荣军,赖敏,余桦等.汶川 Ms8.0 地震四川及邻区数字强震台网记录[J].岩石力学与工程学报,2010,29(9):1850~1858.
- [3] 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.
- [4] 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):2070~2073.

- [5] 李爽, 谢礼立. 近场问题的研究现状和发展方向[J]. 地震学报, 2007, 1 (29): 102~111.
- 350 [6] 张长庚, 杨迪雄. 近断层地震动和单自由度体系地震反应的分形特征分析[J]. 地震工程与工程震动, 2011, 31 (6): 45~54.
- [7] Bray J D, Rodriguez Marek. Characterization of forward-directivity ground motions in the near-fault region [J]. Soil Dynam Earthquake Eng, 2004, 24: 815~828.
- 355 [8] Alireza Mortezaei, Hamid Reza Ronagh. Plastic hinge length of reinforced concrete columns subjected to both far-fault and near-fault ground motions having forward directivity [J]. Struct. Design Tall Spec. Build. 2011, DOI: 10.1002/tal.729.
- [9] Mavroeidis G P, A S Papageorgiou. A mathematical representation of near-fault ground motions [J]. Bull. Seism. Soc. Am. 2003, 93: 1099~1131.
- 360 [10] Somerville P G, Graves R W. Characterization of earthquake strong ground motion [J]. Pure appl. Geophys. 160 (2003), 1811~1828.
- [11] 董娣, 周锡元, 徐国栋等. 9.21 台湾集集地震中场地类别对地震动若干特性的影响[J]. 地震研究, 2005, 28 (4): 365~373.
- [12] Somerville P G, Graves R W, Day S M, et al. Ground motion environment of the Los Angeles region [J]. Struct. Design Tall Spec. Build. 15 (2006), 483~494.
- 365 [13] 王海云, 谢礼立. 近断层地震动模拟现状[J]. 地球科学进展, 2008, 23 (10): 1043~1049.
- [14] Khosrow T. Shabestari, Fumio Yamazaki. Near-fault spatial variation in strong ground motion due to rupture directivity and hanging wall effects from the Chi-Chi, Taiwan earthquake [J]. Earthquake Engng Struct. Dyn. 32 (2003), 2197~2219.
- 370 [15] 赵伯明, 徐锡伟. 汶川 Ms8.0 地震断层与地震灾害初步分析[J]. 地震地质, 2008, 30 (4): 830~845.
- [16] Mavroeidis G P, A S Papageorgiou. Near-source strong ground motion: characteristics and design issues [A]. Proc. of the Seventh U. S. National Conf. on Earthquake Engineering (7NCEE) [C]. Boston, Massachusetts, 2002, 21~25.
- [17] 张冬丽, 徐锡伟, 周正华等. 汶川 Ms8.0 级地震强震记录所揭示的地震断层特征分析[J]. 地学前缘, 2010, 17 (5): 33~42.
- 375 [18] M. Pischiutta, F. Salvini, J. Fletcher, et al. Horizontal polarization of ground motion in the Hayward fault zone at Fremont, California: dominant fault-high-angle polarization and fault-induced cracks [J]. Geophys. J. Int. (2012) 188, 1255~1272.
- [19] 谢俊举, 温增平, 高孟潭. 利用强震数据获取汶川地震近断层地面永久位移[J]. 地震学报, 2013, 35 (3): 369~379.
- 380 [20] Barka A H S. The surface rupture and slip distribution of the August 17, 1999 Izmit earthquake, M7.4, North Anatolian Fault [J]. Bull. Seism. Soc. Am 2001, 92: 43~60.
- [21] 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.
- 385 [22] Casey Champion¹, Abbie Liel. The effect of near-fault directivity on building seismic collapse risk [J]. Earthquake Engng Struct. Dyn. 41 (2012): 1391~1409.
- [23] 吴健, 吕红山, 刘爱文. 汶川地震烈度分布与震源过程相关性的初步研究[J]. 震灾防御技术, 2008, 3 (3): 224~229.
- [24] Shin T C, Ta liang Teng. An overview of the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake [J]. Bull, Seism. Soc. Am, 2001, 91: 895~913.
- 390 [25] Ellen M. Rathje, Kenneth H. Stokoe II, Brent Rosenblad. Strong Motion Station Characterization and Site Effects During the 1999 Earthquakes in Turkey [J]. Earthquake Spectra, 19 (2003), 653~675.
- [26] 李宏男, 肖诗云, 霍林生. 汶川地震震害调查与启示[J]. 建筑结构学报, 2008, 29 (4): 10~19.
- [27] 何仲太, 马保起, 李玉生等. 汶川地震地表破裂带宽度与断层上盘效应[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2012.
- 395 [28] 黄润秋, 李为乐. 汶川大地震触发地质灾害的断层效应分析[J]. 工程地质学报, 2009, 17 (1): 19~28.
- [29] 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.
- [30] 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, 50 (8): 796~1805.
- 400 [31] 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, 25 (10): 180~187.
- [32] 叶昆, 任毅, 赵仕栋等. 钢筋混凝土框架结构在近断层脉冲型地震动作用下的动力响应[J]. 土木工程与管理学报, 2011, 28 (3): 385~390.
- [33] Babak Alavi, Helmut Krawinkler. Behavior of moment-resisting frame structures subjected to near-fault ground motions [J]. Earthquake Engng Struct. Dyn. 33 (2004), 687~706.
- 405 [34] 杨迪雄, 潘建伟, 李刚. 近断层脉冲型地震动作用下建筑结构的层间变形分布特征和机理分析[J]. 建筑结构学报, 2009, 30 (4): 14~24.
- [35] Ventura C E, Archila M, Bebamzadeh A, et al. Large coseismic displacements and tall buildings [J]. Struct. Design Tall Spec. Build. 20 (2011), S85~S99.
- [36] 陈波, 谢俊举, 温增平. 汶川地震近断层地震动作用下结构地震响应特征分析[J]. 地震学报, 2013, 35

- 410 (2) : 250~261.
- [37] Wen-I Liao, Chin-Hsiung Lou, Shiuan Wan. Earthquake responses of RC moment frames subjected to near-fault ground motion [J]. *Struct. Design Tall Build.*10 (2001),219~229.
- [38] 中日联合考察团.东日本大地震灾害考察报告[J].*建筑结构学报*, 2012, 42 (4) : 1~20.
- [39] 卢明奇, 田玉基, 杨庆山.近断层地震作用下高层建筑结构地震响应分析[J].*哈尔滨工业大学学报*, 2007, 39 (2) : 314~317
- 415 [40] 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) : 14~21.
- [41] 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.
- 420 [42] S. Farid Ghahari, Helmut Krawinkler. Considering rupture directivity effects, which structures should be named 'long-period buildings'? [J]. *Struct.Design Tall Spec.Build.* 22 (2013),165~178.
- [43] R.S. Jangid, J. M.Kelly. Base isolation for near-fault motions [J]. *Earthquake Engng Struct.Dyn.*30(2001),691~707.
- [44] Fabio Mazza, Alfonso Vulcano. Effects of near-fault ground motions on the nonlinear dynamic response of base-isolated r.c. framed buildings [J]. *Earthquake Engng Struct.Dyn.* 2012,41:211 ~232.
- 425 [45] 杨迪雄, 赵岩, 李刚.近断层地震动运动特征对长周期结构地震响应的影响分析[J].*防灾减灾工程学报*, 2007, 27 (2) : 133~140.
- [46] 党育, 霍凯.近断层地震各因素对基础隔震结构的影响[J].*武汉理工大学学报*, 2009, 31 (14) : 72~77.
- 430 [47] 耿方方, 丁幼亮, 谢晖等.近断层地震动作用下长周期结构的地震动强度指标[J].*东南大学学报(自然科学版)*, 2013, 43 (1) : 203~208.
- [48] 叶昆, 李黎, 朱宏平等.近断层脉冲型地震作用下基础隔震建筑结构最大位移反应研究[A]. 第四届全国防震减灾工程学术研讨会会议论文集[C], 2009, 523~530.
- [49] 杜永峰, 王小虎, 朱翔.近断层地震作用下隔震结构基底碰撞响应分析及倾覆倒塌模拟[J].*建筑结构*, 2013, 43 (2) : 56~59.
- 435 [50] 李勇, 闫维明, 陈彦江等.大跨斜拉桥的近断层地震响应及减震控制[J].*防灾减灾工程学报*, 2010, 30 (5) : 479~486.
- [51] Faramarz Khoshnoudian, Ehsan Ahmadi. Effects of pulse period of near-field ground motions on the seismic demands of soil-MDOF structure systems using mathematical pulse models [J]. *Earthquake Engng Struct.Dyn.* 42(2013):1565~1582.
- 440 [52] 杨迪雄, 李刚, 程耿东.隔震结构的研究概况和主要问题[J].*力学进展*, 2003, 33 (3) : 302~312.
- [53] 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[J].*世界地震工程*, 2012, 28 (3) : 161~170.
- [54] 包华, 洪俊青.近断层地震作用下基础隔震结构的振动分析[J].*工程抗震与加固改造*, 2011, 33 (6) : 38~44.
- 445 [55] Eiji Sato¹, Sachi Furukawa, Atsuo Kakehi, et al. Full-scale shaking table test for examination of safety and functionality of base-isolated medical facilities [J]. *Earthquake Engng Struct.Dyn.* 40(2011),1435~1453.