

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230312001

不同类型地震动下RC框剪结构协同工作 对比分析*

杨柯, 王博, 王智鹏, 马伟, 刘伯权

(长安大学建筑工程学院, 陕西 西安 710064)

摘要: 确保强震下双重抗侧力结构的协同工作是实现多道抗震防线的关键。基于地震动特性分析,对比了普通地震动、远场长周期地震动、近断层向前方向性地震动及近断层滑冲型地震动作用下RC框架-剪力墙结构的协同工作性能,并分析了刚度特征值及结构周期对其的影响;最后初步提出了特殊地震动作用下RC框架-剪力墙结构考虑内力重分配的框架剪力调整方法,并将其与规范中的调整方法进行了对比。结果表明:三类特殊地震动作用下的框架剪力分担率均大于普通地震动,尤其是远场长周期地震动,在地震动强度较小时也能使框架剪力出现较大增长;周期较大结构的中下部楼层框架剪力增大较快;结构框架剪力分担率随刚度特征值的增大而增大,但内力重分配程度逐渐减小;建议在结构抗震设计时,考虑不同类型地震动特性和刚度特征值对结构内力重分配的影响。

关键词: 远场长周期地震动; 近断层脉冲型地震动; RC框架-剪力墙结构; 协同工作; 内力重分配

中图分类号: TU375 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)04-0826-13

Comparative Analysis on Cooperative Performance of RC Frame-shear Wall Structures under Various Types of Ground Motions

YANG Ke, WANG Bo, WANG Zhipeng, MA Wei, LIU Boquan

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: Ensuring the cooperative performance of dual lateral force-resisting systems under strong earthquakes is key to developing multiple seismic fortification lines. Based on ground motion characteristics analysis, the study compared and analyzed the cooperative performance of RC frame-shear wall structures under various types of ground motions, including ordinary, far-field long-period, near-fault forward, and near-fault fling-step ground motions. It also evaluated the effects of stiffness eigenvalues and structural periods on performance. Additionally, a frame shear force adjustment method considering the internal force redistribution under various types of special ground motions was preliminarily proposed and compared with the adjustment method in the current codes. The results showed that the frame shear force sharing ratio under the three types of special ground motions was higher than that under ordinary ground motions. Especially, far-field long-period ground motions could cause a large increase in frame shear force even at lower seismic intensities. The frame shear force in the middle and

* 收稿日期:2023-03-10;修回日期:2023-08-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51978076)资助

作者简介:杨柯(1995—),女,博士研究生。主要从事工程结构抗震研究。E-mail: yangkechd@163.com

通信作者:王博(1985—),男,教授,博导,博士。主要从事工程结构抗震研究。E-mail: chnwangbo@chd.edu.cn

lower floors of structures with longer periods increased faster. With the increase in stiffness eigenvalue, the frame shear sharing ratio also increased, but the degree of internal force redistribution gradually decreased. It is suggested that the effects of different ground motion types and stiffness eigenvalues on internal force redistribution within structure should be considered in seismic design.

Keywords: far-field long-period ground motion; near-fault pulse-type ground motion; RC frame-shear wall structure; cooperative work; internal force redistribution

0 引言

远场长周期地震动含有丰富的长周期成分,卓越周期可长达几秒至十几秒^[1]。近断层脉冲型地震动具有大的长周期速度和位移脉冲,根据断层的破裂过程和波的传播模式可分为近断层向前方向性地震动和近断层滑冲型地震动^[2]。这两类特殊地震动的时程曲线明显区别于普通地震动,远场长周期地震动的后期振动阶段类似于谐和振动,且振动时间长达几十秒甚至更长^[3];近断层脉冲型地震动波形简单,地震动峰值较大,作用时间较短^[4]。大量震害^[5-8]表明这两类特殊地震动对(超)高层建筑等长周期结构影响较大,结构的内力及变形明显大于普通地震动。对于这两类特殊地震动对高层建筑结构的影响研究已有很多,包括:普通地震动与长周期地震动作用下高层结构的响应特征对比分析^[9-11];近断层脉冲型地震动作用下结构的响应特性研究^[12-13];近断层脉冲型地震动和远场类谐和地震动作用下结构响应的对比分析^[14-15]等。

高层结构多采用双(多)重抗侧力结构体系。对此类结构体系来说,确保其在强震下的协同工作是实现多道抗震防线、提高安全冗余度、避免结构倒塌的关键。但已有研究多集中于结构的整体响应,包括顶点位移、楼层加速度响应、楼层剪力等,甚少关注结构的协同工作。因此,有必要对远场长周期地震动、近断层脉冲型地震动等特殊类型地震动作用下双重抗侧力结构的协同工作进行系统对比分析。

以最具代表性的双重抗侧力体系——RC框架-剪力墙结构作为研究对象,对比分析其在普通地震动、远场长周期地震动、近断层向前方向性地震动和近断层滑冲型地震动作用下的协同工作性能,阐明地震动作用下结构的子结构剪力分布及内力重分配特征,并基于相关理论分析给出考虑不同类型地震动作用的RC框架-剪力墙结构框架剪力调整建议。

1 地震动记录的选取及其特性分析

选取代表性普通地震动、远场长周期地震动、近断层向前方向性地震动和近断层滑冲型地震动记录各6条,其基本信息见表1。数据来源于美国太平洋地震工程研究中心(PEER)地震数据库。

图1给出了四类地震动典型记录的时程曲线、瞬时能量时程曲线及傅里叶幅值谱,结合表1可以看出:远场长周期地震动加速度峰值明显小于其他三类地震动,持时较长,其时程曲线在振动中后期存在多个“类谐和”循环;两类近断层脉冲型地震动存在较大的加速度、速度、位移峰值,其中近断层滑冲型地震动峰值显著大于其他三类地震动。与速度时程对照可知,近断层脉冲型地震动的瞬时能量主要集中在速度脉冲时段,脉冲特性显著。普通地震动傅里叶谱值在频域上较为分散,在0.5~10 Hz多次出现较大峰值;而远场长周期地震动傅里叶谱峰值主要集中在0.1~0.5 Hz,低频特性明显;两类近断层脉冲型地震动傅里叶谱均在0.1 Hz附近出现了较大幅值,近断层向前方向性地震动傅里叶谱值几乎分散在全频域上,而近断层滑冲型地震动相对来说较为集中,主要分布在0.1~1 Hz。

图2给出了表1中各条地震动记录的加速度反应谱、速度反应谱、位移反应谱及四类地震动的平均反应谱对比图。可以看出:远场长周期地震动的各反应谱形态明显区别于其他三类地震动,在5 s附近均存在一个较大峰值(ILA003-EW在3 s附近);近断层脉冲型地震动的反应谱形态与普通地震动类似,但其谱值要大于普通地震动;四类地震动中,普通地震动的反应谱值最小,远场长周期地震动的反应谱值最大(尤其是速度和位移反应谱),两类近断层地震动的反应谱较为接近;当周期大于15 s后,近断层滑冲型地震动的位移反应谱值持续增加,区别于其他三类地震动。

表1 地震动基本信息

Table 1 Basic information of ground motions

地震动类型	地震动编号	地震	年份	震级 M_w	台站-分量	断层距/ km	场地类别	PGA/ ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-2}$)	PGV/ ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	PGD/ cm	记录持时/ s
普通地震动	1	Imperial valley	1940	6.5	El Centro	12.0	D	293.42	30.93	19.51	31.02
	2	Kern Country	1952	7.4	Taft	38.4	C	148.02	15.39	34.04	54.18
	3	Tabas	1978	7.4	Tabas	11.8	B	179.35	11.52	4.64	23.80
	4	Northridge	1994	7.4	Northridge	19.6	C	341.42	28.29	8.85	29.94
	5				Gra074	31.2	C	64.88	6.89	1.78	39.94
	6	Kobe	1995	6.9	Kobe	22.5	C	241.98	18.33	6.10	40.94
远场长周期地震动	7	Chi-Chi	1999	7.6	ILA003-EW	90.6	E	57.13	19.16	19.61	134
	8				ILA004-NS	86.6	E	62.71	25.17	19.57	135
	9				ILA004-EW	86.6	E	71.69	29.01	22.65	135
	10				ILA005-NS	84.9	D	78.81	15.30	11.38	171
	11				ILA056-NS	89.8	E	64.48	30.38	24.26	156
	12				ILA056-EW	89.8	E	69.07	31.98	30.27	156
近断层向前方向性地震动	13	Chi-Chi	1999	7.6	TCU049-NS	3.3	D	235.86	61.28	49.32	90
	14				TCU049-EW	3.3	D	288.18	48.16	66.61	90
	15				TCU051-NS	7.0	D	223.80	38.26	56.99	90
	16				TCU103-EW	2.4	D	133.93	61.84	88.53	90
	17				TCU116-EW	12.5	E	182.78	48.85	46.20	90
	18				TCU122-EW	9.2	D	223.99	63.13	53.01	90
近断层滑冲型地震动	19	Chi-Chi	1999	7.6	TCU052-NS	1.8	D	438.70	216.31	715.33	90
	20				TCU052-EW	1.8	D	348.53	178.20	470.19	90
	21				TCU067-EW	1.1	D	488.81	97.08	186.91	90
	22				TCU068-EW	3.0	D	497.78	273.36	670.01	90
	23				TCU075-EW	3.4	D	325.39	116.16	170.96	90
	24				TCU120-EW	9.2	C	223.01	62.64	108.05	90

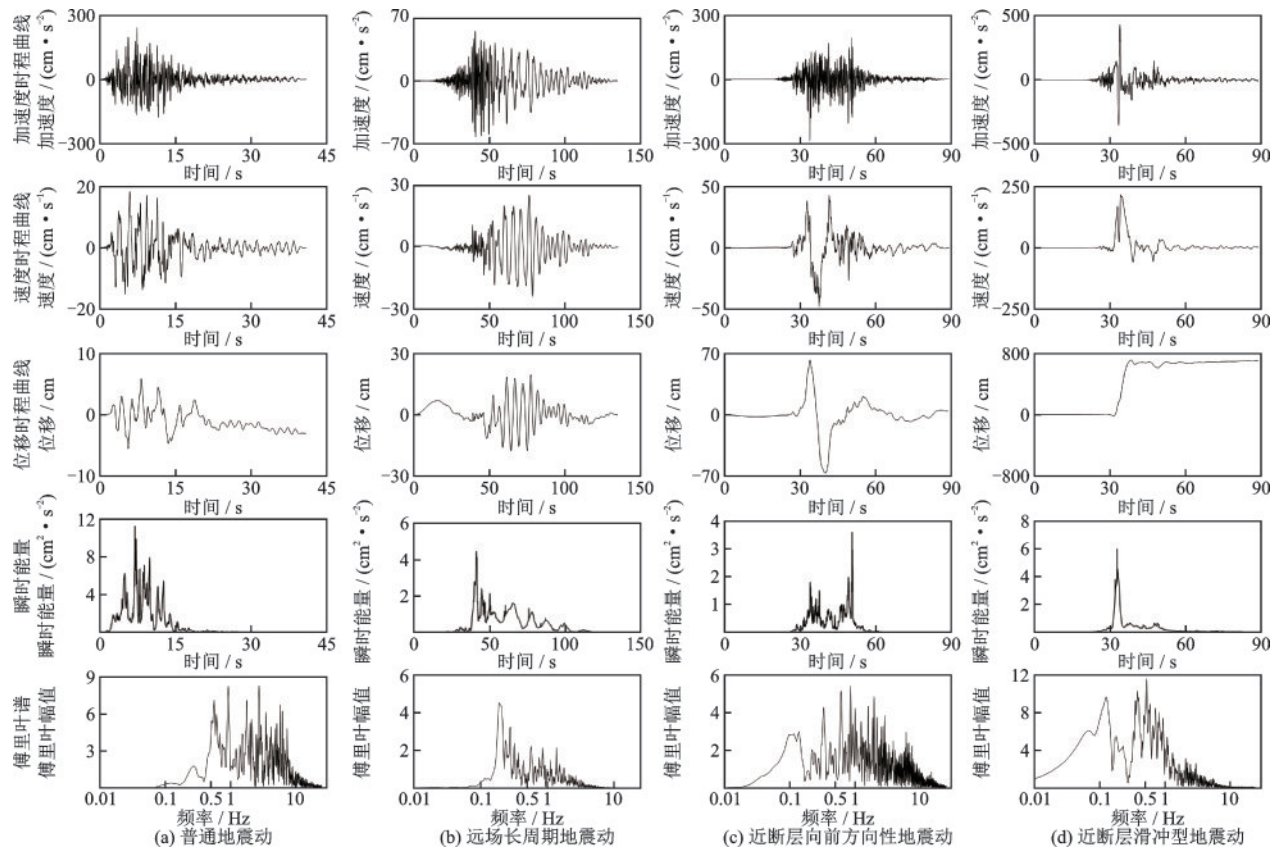


图1 典型地震动时程曲线、瞬时能量时程曲线及傅里叶幅值谱

Fig.1 Time history curves, instantaneous energy time history curves, and Fourier amplitude spectrum in typical ground motions

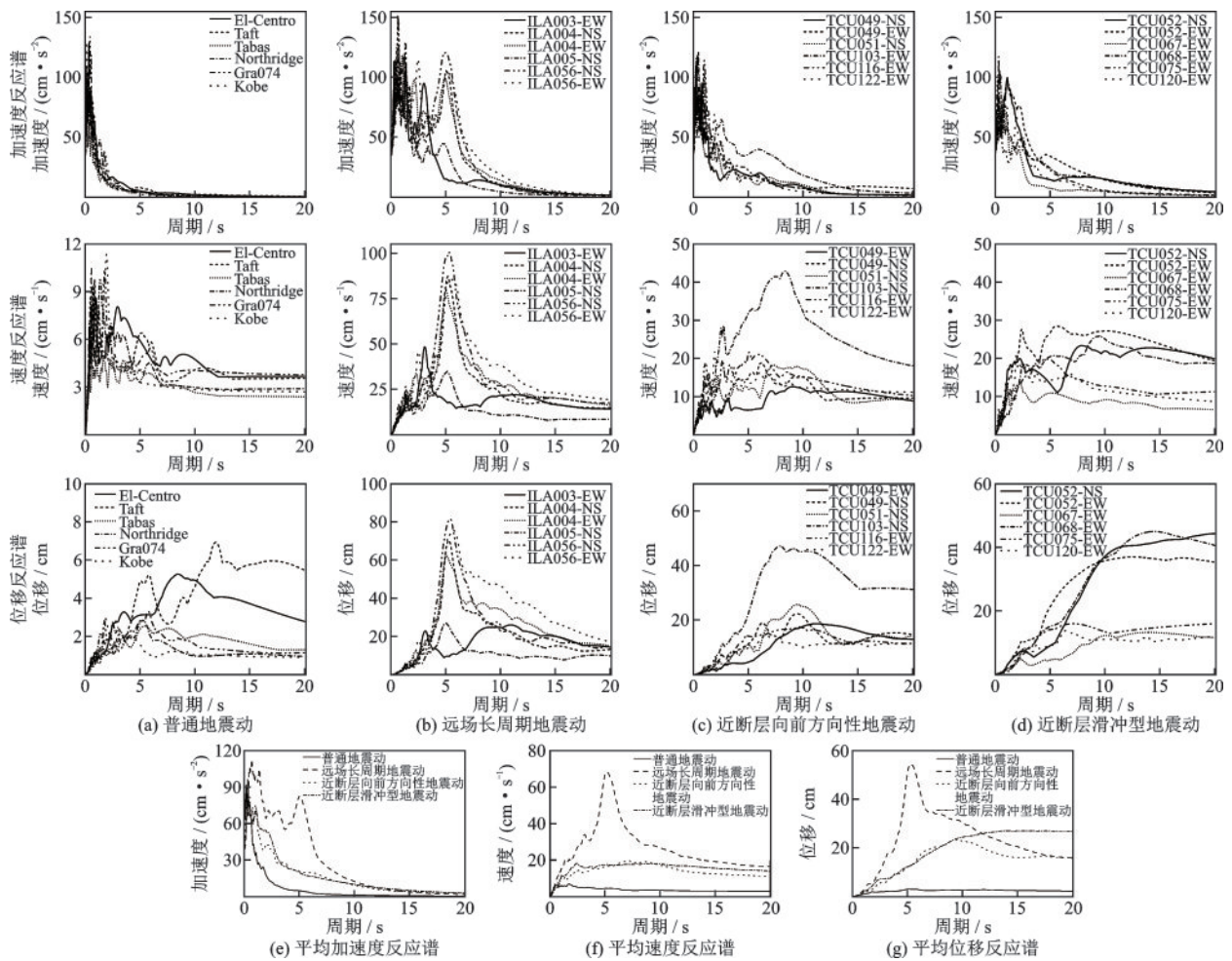


图2 四类地震动的反应谱及平均反应谱

Fig.2 Response spectra and average response spectra of four types of ground motions

为了进一步对比分析四类地震动的频谱特性, 其频谱周期计算结果如图3所示。图中给出了两类频谱周期参数, 一类是反映某一频谱周期成分的局部周期参数, 包括加速度反应谱卓越周期 T_{pa} 和速度反应谱卓越周期 T_{pv} ; 一类是反映整体频段的平滑周期参数, 包括加速度谱平均周期 T_{avg} 和傅里叶幅值谱平均周期 T_m 。其中, 横线表示各类地震

动6条记录的频谱周期均值。从图中可以看出, 远场长周期地震动的 T_{pa} 离散性较大; 两类近断层脉冲型地震动的 T_{pv} 离散性较大; 同类地震动的平滑周期参数 T_{avg} 和 T_m 离散性相对较小。四类地震动的频谱周期大小排序为: 远场长周期地震动 > 近断层滑冲型地震动 > 近断层向前方向性地震动 > 普通地震动。

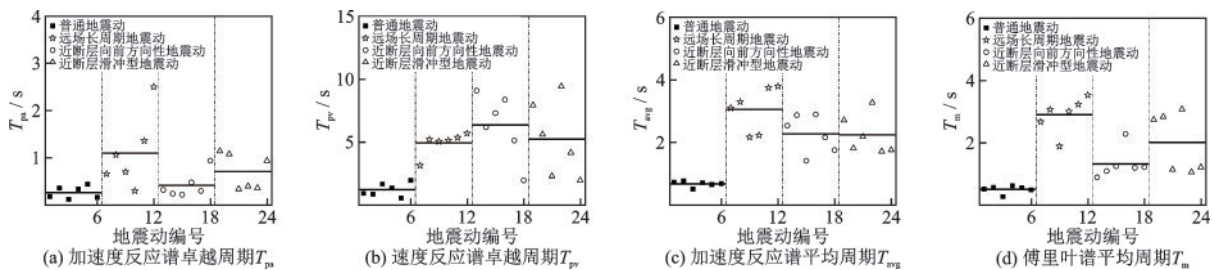


图3 四类地震动的频谱周期参数

Fig.3 Spectrum period parameters for four types of ground motions

2 结构模型的建立与验证

按照现行规范[16-17]设计20层RC框架-剪力墙结构作为基本模型,如图4(b)所示,记为KJ-20(KJ-1.82)。其中,20为结构层数,1.82为结构刚度

特征值。建筑抗震设防烈度为7度,基本地震加速度 $0.1g$,设计地震分组为第二组,场地特征周期为 $0.4s$ 。另外,为考虑结构参数的影响,依据规范调整结构布置,设计并建立刚度特征值变参模型KJ-1.43、KJ-2.28和结构周期变参模型KJ-10、KJ-30,如图4所示。

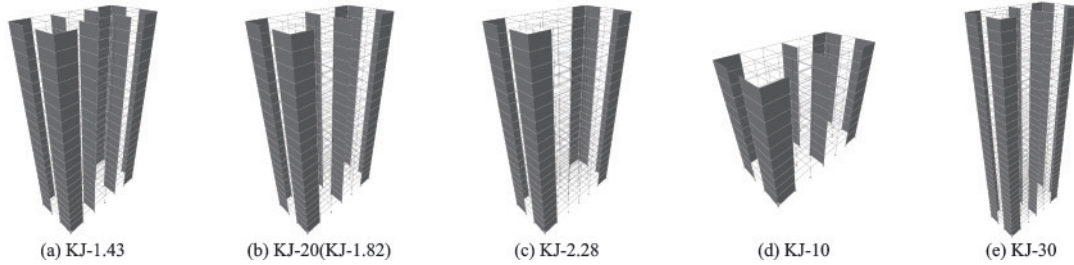


图4 RC框架-剪力墙模型

Fig.4 RC frame-shear wall models

利用OpenSEES进行结构弹塑性模型的建立。其中,混凝土本构(包括约束混凝土本构)选用基于Kent-Park单轴混凝土本构模型的Concrete01^[18],钢筋本构选用基于Giuffré-Menegotto-Pinto模型的Steel02^[19],材料本构模型如图5所示。框架梁、柱选用非线性梁柱纤维单元(Displacement-Based Beam-Column Element)模拟;剪力墙选用林旭川等^[20]开发的分层壳单元(ShellDKGQ)模拟。结构阻尼比取 0.05 ;不考虑 $P-\Delta$ 效应。用已有的试验结果^[21-22]进行RC柱的纤维模型验证及RC剪力墙的分层壳模型

验证;并基于美-日联合7层RC框架-剪力墙结构的拟动力试验结果^[23]进行整体模型验证。因篇幅原因,在此只给出整体结构验证的顶点位移时程曲线对比如图6所示。可以看出:模拟和试验的时程曲线总体吻合较好;峰值位移大小及出现时间与试验基本一致。表2给出了各模型的动力特性分析结果。可以看出:结构前三阶周期的模拟结果误差均在 5% 以内;本文所采用的有限元模拟方法能够较好地模拟RC框架-剪力墙结构的弹塑性地震响应。

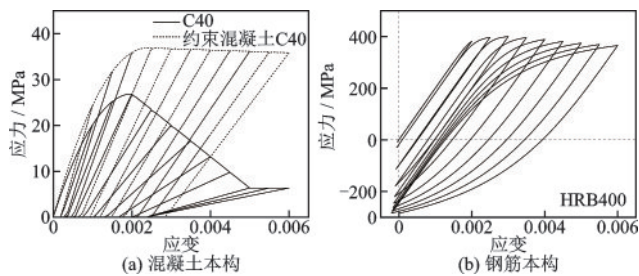


图5 材料本构模型

Fig.5 Material constitutive model

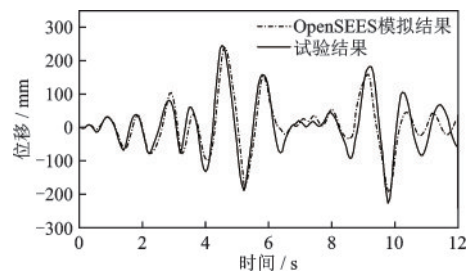


图6 结构顶点位移时程曲线对比

Fig.6 Comparison of top displacement time history curves

表2 各变参模型有限元模拟动力特性分析结果

Table 2 Finite element simulation results of dynamic characteristic for various parametric models

模型	KJ-10			KJ-1.43			KJ-20(KJ-1.82)			KJ-2.28			KJ-30					
振型	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3			
周期/s	ETABS			0.576	0.498	0.344	1.498	1.212	0.907	1.480	1.270	0.910	1.457	1.394	0.909	2.484	2.219	1.556
	OpenSEES			0.595	0.514	0.350	1.535	1.251	0.934	1.501	1.302	0.914	1.476	1.412	0.911	2.559	2.267	1.592
误差/%	3.19	3.11	1.71	2.42	3.12	2.96	1.43	1.23	0.43	1.32	1.28	0.13	2.91	2.13	2.35			

3 RC 框架-剪力墙结构的协同工作对比分析

3.1 结构的协同工作对比分析

本文采用剪力分担率作为协同工作分析指标,其可反映子结构对结构总剪力的分担情况。定义框架剪力分担率为各层框架剪力与结构底部总剪力之比,即 V_f/V_0 ;剪力墙剪力分担率为各层剪力墙剪力与结构底部总剪力之比,即 V_{wi}/V_0 。图 7 和图 8 分别为四类地震动作用下 KJ-20 结构框架剪力分担率与剪力墙剪力分担率随楼层的分布情况,图中结果为不同类型地震动 6 条记录作用下的平均值。

由图 7 可以看出,结构的框架剪力分担率随着

楼层增加先增大后减小;各地震水平四类地震动作用下结构框架剪力分担率大小关系为:远场长周期地震动 > 近断层向前方向性地震动 > 近断层滑冲型地震动 > 普通地震动。我国规范[16-17]中要求各层框架剪力不小于 20% 结构底部总剪力,即框架剪力分担率不小于 0.2。多遇地震下,四类地震动作用下的各楼层框架剪力分担率均小于 0.2,最大框架剪力分担率出现在结构中部楼层;罕遇地震下,普通地震动作用下全楼层框架剪力分担率均小于 0.2,而其他三类特殊地震动下全楼层框架剪力分担率基本均大于 0.2,且最大框架剪力分担率出现在结构底部楼层。也就是说,三类特殊地震动作用下框架承担剪力均大于普通地震动,尤其是远场长周期地震动作用下的结构底部楼层,框架作为第二道防线的抗震安全难以保证,在抗震设计中应引起重视。

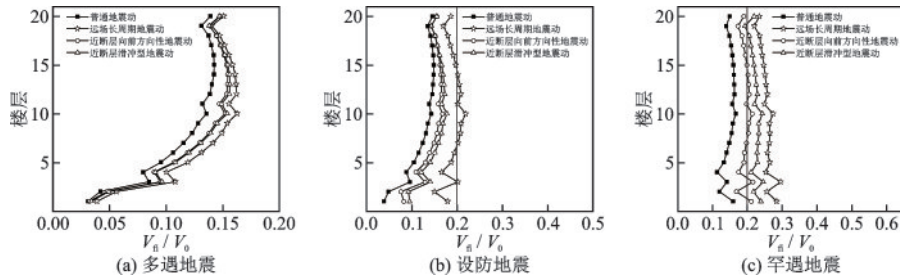


图 7 四类地震动作用下 KJ-20 结构的框架剪力分担率随楼层的分布情况

Fig.7 Distribution of frame shear force sharing ratio with floor levels in KJ-20 structure under four types of ground motions

由图 8 可知,结构的剪力墙剪力分担率随着楼层增加而不断减小,且随着地震强度的增大逐渐减小。多遇地震下四类地震动的剪力墙剪力分担率差别不大;设防地震及罕遇地震下,普通地震动作用下的剪力墙剪力分担率明显大于其他三类特殊地震动,尤其是在设防地震下。结合图 7 可知,三类

特殊地震动作用下框架与剪力墙之间的剪力重分配明显异于普通地震动,框架剪力分担率增加,剪力墙剪力分担率减小。框架-剪力墙结构中子结构剪力一般按刚度分配。因此,这可能与特殊地震动作用下构件的不同刚度退化规律有关,特别是与作为第一道抗震防线的剪力墙刚度退化有关。

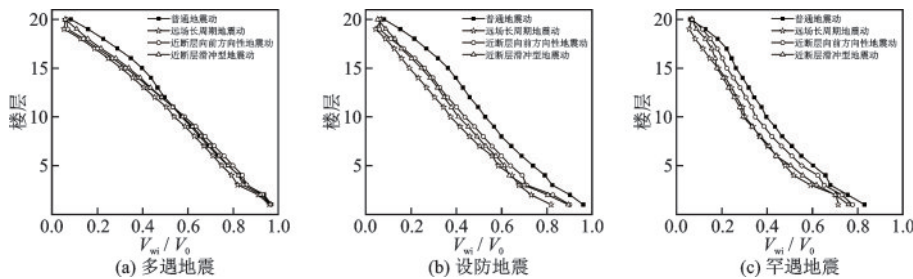


图 8 四类地震动作用下 KJ-20 结构剪力墙剪力分担率随楼层的分布情况

Fig.8 Distribution of wall shear force sharing ratio with floor levels in KJ-20 structure under four types of ground motions

图 9 给出了四类地震动作用下 KJ-20 结构框架剪力分担率随地震强度的变化情况。可以看出,

框架剪力分担率随着地震强度的增大而增大,结构中下部的增大程度要明显大于结构中上部,各

楼层差距逐渐减小,在罕遇地震下接近均匀分布。普通地震动及两类近断层脉冲型地震动作用下,多遇地震到设防地震结构框架剪力分担率的增加要明显小于设防地震到罕遇地震的增加程度;而对于远场长周期地震动作用下的结构来说,多遇地震至设防地震框架剪力分担率的增加要明显更大一点。以结构底层为例,多遇地震到设防地震结构框架剪力分担率的增加程度按大小排序为:远场长周期地震动(+360.2%)>近断层滑冲型地震动(+193.6%)>近断层向前方向性地震动(+156.1%)>普通地震动(+25.5%),与四类地

震动的频谱周期排序相同。设防地震到罕遇地震结构框架剪力分担率的增加程度按大小排序为:近断层滑冲型地震动(+440.9%)>普通地震动(+389.9%)>近断层向前方向性地震动(+376.2%)>远场长周期地震动(+269.9%)。远场长周期地震动作用下,在地震动强度(PGA)较小的情况下也能使框架剪力出现较大增长,这可能与其丰富的低频成分有关。近断层滑冲型地震动作用下设防地震到罕遇地震结构框架剪力分担率的增大幅度最大,这可能与其大幅值的单向速度脉冲有关。

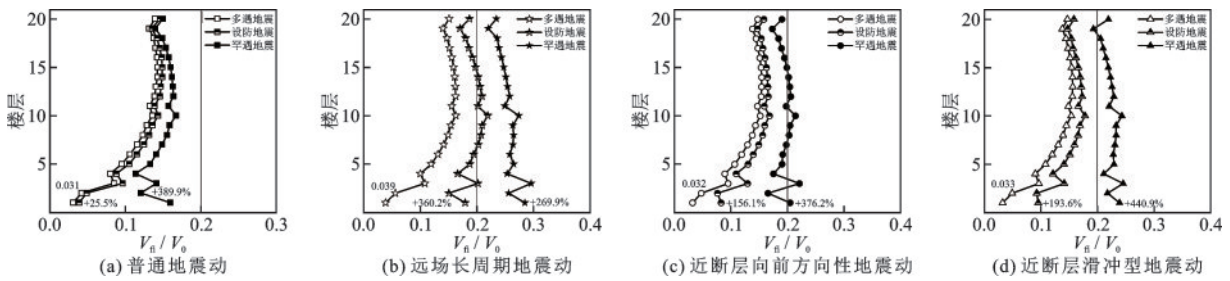


图9 四类地震动作用下KJ-20结构框架剪力分担率随地震强度的变化情况

Fig.9 Variations of frame shear force sharing ratio with seismic intensities in KJ-20 structure under four types of ground motions

3.2 刚度特征值对不同类型地震动作用下结构协同工作的影响分析

图10~12分别给出了不同地震水平时四类地震动作用下不同刚度特征值结构框架剪力分担率随楼层的分布情况。可以看出:在四类地震动作用下,刚度特征值对框架剪力分担率沿楼层的分布形态影响不大,但对其数值大小有显著影响。结构全楼层框架剪力分担率均随着刚度特征值的增大而增大。刚度特征值是反映框架-剪力墙结构中框架与剪力墙子结构刚度比的参数,刚度特征值越大,框架的相对刚度越大,在同样的地震作用下,框架将会承担更多的剪力,且随着地震强度的增大不断增大。在三类特

殊地震动作用下,刚度特征值较大的结构(KJ-2.28)在多遇地震水平下已有部分楼层框架剪力分担率超过0.2;而在罕遇地震水平下全楼层框架剪力分担率均已超过0.2,且各楼层框架剪力分担率的分布与普通地震动作用下相比更为均匀,即结构中下部楼层框架剪力分担率出现了明显增加。

为了对比刚度特征值对结构框架剪力分担率随地震强度变化情况的影响,以底部楼层为例,将多遇地震下框架剪力分担率归一化,给出了设防地震及罕遇地震水平下框架剪力分担率的增大倍数(增大百分比)如图13所示。如果结构一直保持弹性,子结构刚度比为定值,那么随着地震强度的增

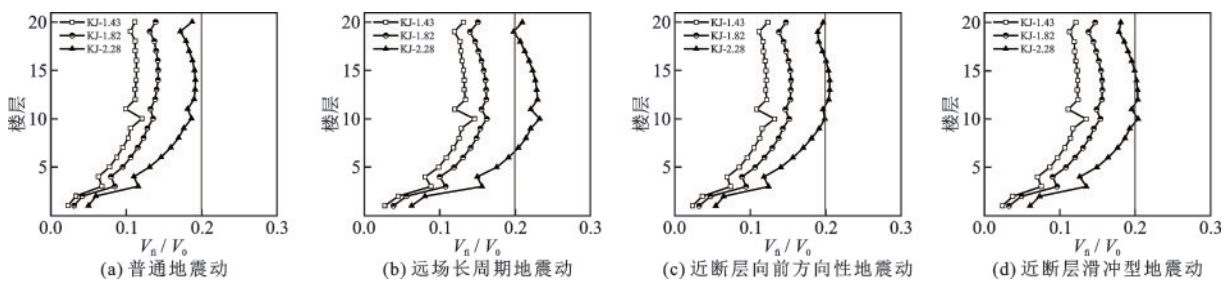


图10 多遇地震水平下不同刚度特征值结构框架剪力分担率随楼层的分布情况

Fig.10 Distribution of frame shear force sharing ratio with floor levels for structures with different stiffness eigenvalues under frequent earthquakes

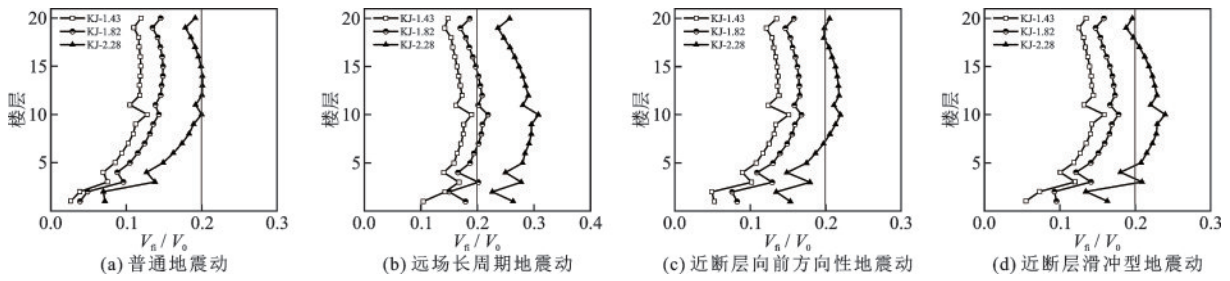


图 11 设防地震水平下不同刚度特征值结构框架剪力分担率随楼层的分布情况

Fig.11 Distribution of frame shear force sharing ratio with floor levels for structures with different stiffness eigenvalues under design basis earthquakes

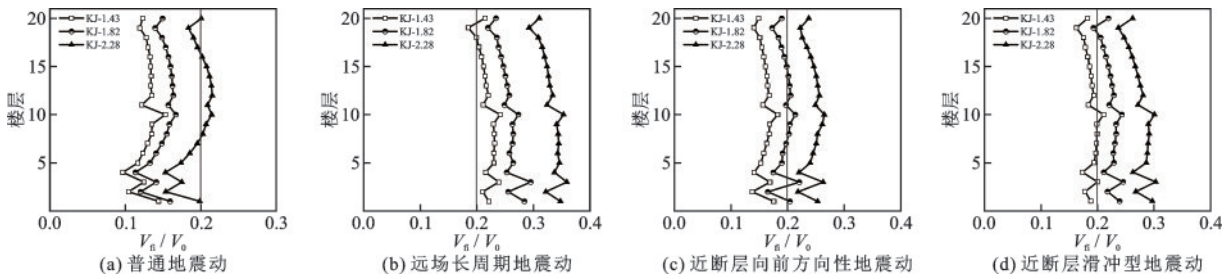


图 12 罕遇地震水平下不同刚度特征值结构框架剪力分担率随楼层的分布情况

Fig.12 Distribution of frame shear force sharing ratio with floor levels for structures with different stiffness eigenvalues under rare earthquakes

大,结构框架剪力分担率应该为一定值。而当剪力墙发生刚度退化、结构进入弹塑性后,子结构间会按照新的刚度比发生内力重分配,原由剪力墙承担的部分剪力转移至框架,框架剪力分担率增大。框架剪力分担率的增大倍数/增大百分比可以反映结构内力重分配的程度,增大倍数越大,结构内力重分配程度越大。

由图 13 可以看出:普通地震动作用下多遇地震至设防地震阶段的框架剪力分担率增大百分比均小于设防地震至罕遇地震阶段,结构内力重分配程度随地震强度的增加递增。两类近断层脉冲型地震动作用下表现出了类似规律,但其内力重

分配程度要明显大于普通地震动。远场长周期地震动作用下,随着刚度特征值的增加,多遇地震至设防地震阶段的增大百分比逐渐增大,甚至超过设防地震至罕遇地震阶段(KJ-1.82 和 KJ-2.28 结构)。结构内力重分配程度与地震强度并不呈现正相关关系,其可能与远场长周期地震动的频谱特性有较大关系。此外,随着刚度特征值的增大,四类地震动作用下的结构内力重分配程度均减小。这是因为刚度特征值较大的结构剪力墙相对较少,剪力墙本身承担剪力要小于刚度特征值较小的结构,在内力重分配过程中转移至框架的剪力也较少。

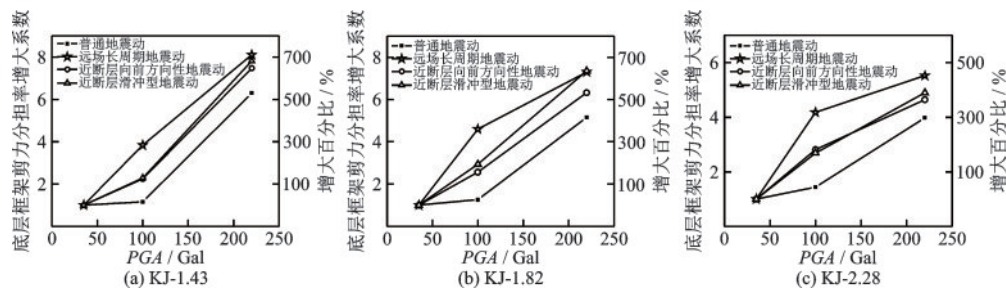


图 13 四类地震动作用下不同刚度特征值结构底层框架剪力分担率随地震强度的变化情况

Fig.13 Variations of frame shear force sharing ratio at bottom floor with seismic intensities for structures with different stiffness eigenvalues under four types of ground motions

3.3 结构周期对不同类型地震动作用下结构协同工作的影响分析

图 14~16 分别为不同地震水平时四类地震动作用下不同周期结构框架剪力分担率随楼层的分布情况。不同周期的结构层数不同,为了进行横向对比,以楼层高度与结构总高度的比值,即楼层高度系数作为纵坐标。可以看出:多遇地震水平时,四类地震动作用下不同周期结构框架剪力分担率沿高度的分布形态相似。随着地震动强度的增大,三类特殊地震动作用下,周期较小的结构(KJ-10)框架剪力分担率沿高度的分布随地震动强度的变化趋势与普通地震动类似。值得注意的是,其底层框架剪力分担率在设防地震水平时已经出现了明显增大,与普通地震动罕遇地震水平时类似。这说明在同等地震动强度水平时,特殊地震动作用下底层剪力墙刚度退化程度明显大

于普通地震动。三类特殊地震动作用下,周期较大的结构(KJ-30)在罕遇地震水平的框架剪力分担率随结构高度的增加而递减,明显区别于KJ-10和KJ-20结构全楼层近似均匀分布的情况。即在特殊类型地震动作用下,周期较大结构中下部的框架剪力增大较快,尤其是远场长周期地震动作用下。

图 17 为四类地震动作用下不同周期结构底层框架剪力分担率随地震强度的增大情况。可以看出,两类近断层脉冲型地震动作用下不同周期的结构内力重分配程度随地震强度的增加递增,且大于普通地震动。远场长周期地震动作用下周期较小结构(KJ-10)的内力重分配程度随地震强度的增加递增;周期较大的结构(KJ-20和KJ-30)多遇地震至设防地震阶段的增大百分比要大于设防地震至罕遇地震阶段。

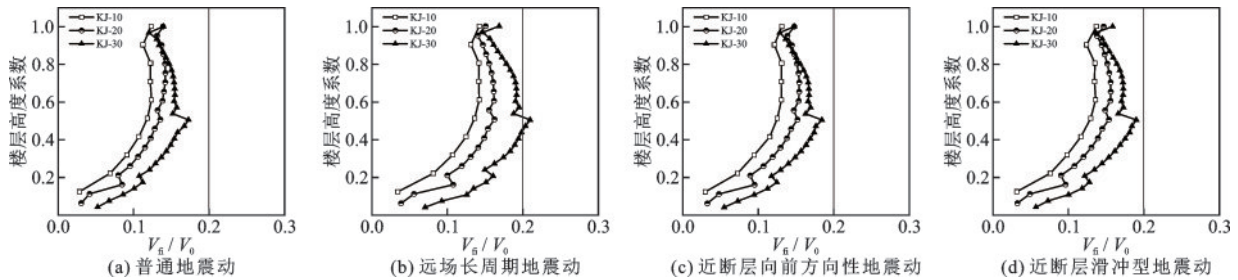


图 14 多遇地震水平下不同周期结构框架剪力分担率随楼层的分布情况

Fig.14 Distribution of frame shear force sharing ratio with floor levels for structures with different periods under frequent earthquakes

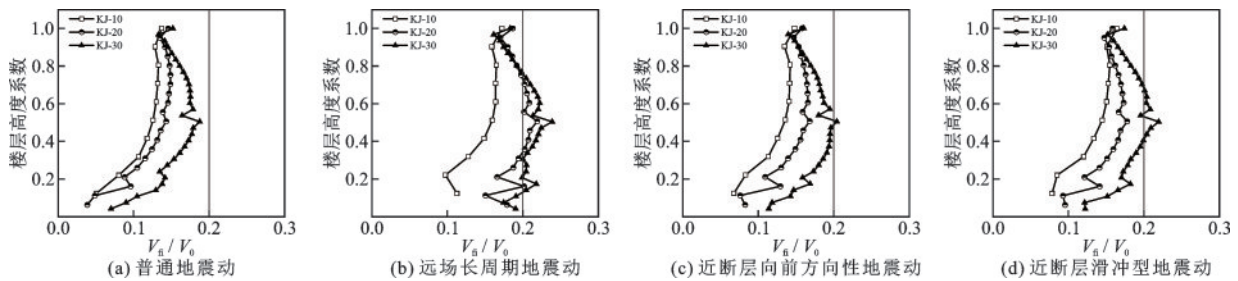


图 15 设防地震水平下不同周期结构框架剪力分担率随楼层的分布情况

Fig.15 Distribution of frame shear force sharing ratio with floor levels for structures with different periods under design basis earthquakes

4 考虑不同类型地震动影响的 RC 框架-剪力墙结构内力调整方法

由上述分析可知,随着地震作用的不断增大,框架部分承担的剪力不断增大。增大的剪力可分为两部分,一是随地震作用增大而增大的部分;二

是剪力墙刚度退化转移至框架的部分。规范中进行框架剪力调整的目的就是提高框架的承载能力以抵抗增加的第二部分剪力,发挥其作为第二道抗震防线的作用。因此,框架设计剪力应在按弹性极限状态计算的框架剪力基础上增加第二部分剪力。而我国现行规范[16-17]中要求各层框架剪力不小于20%结构底部总剪力,否则需按0.2倍结

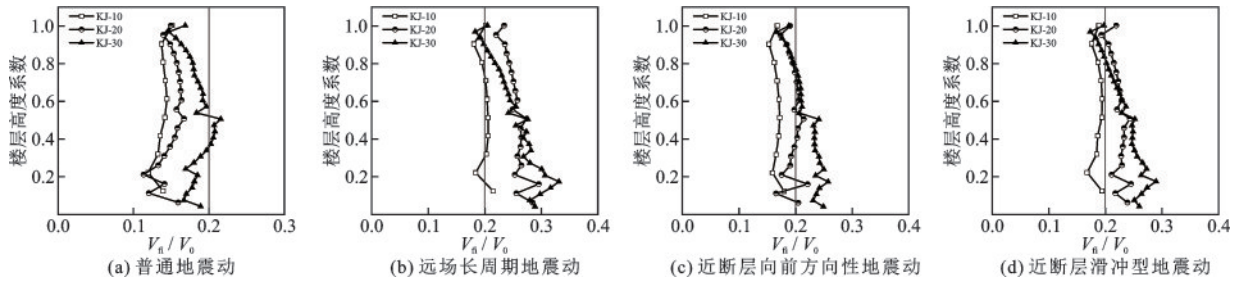


图 16 罕遇地震水平下不同周期结构框架剪力分担率随楼层的分布情况

Fig.16 Distribution of frame shear force sharing ratio with floor levels for structures with different periods under rare earthquakes

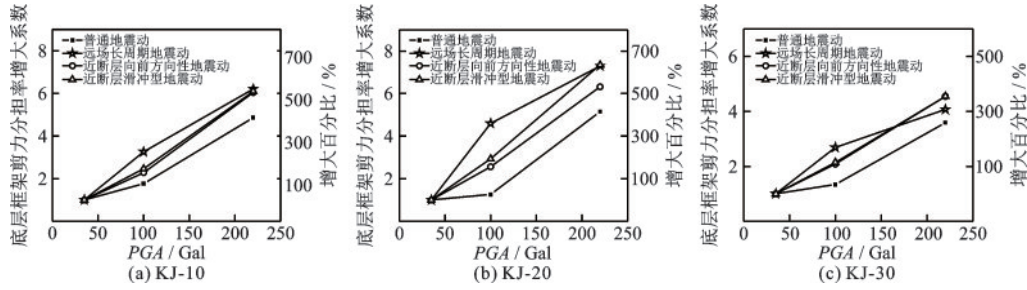


图 17 四类地震动作用下不同周期结构底层框架剪力分担率随地震强度的变化情况

Fig.17 Variations of frame shear force sharing ratio at bottom floor with earthquake intensity for structures with different periods under four types of ground motions

构底部总剪力和 1.5 倍最大框架层剪力的较小值进行调整。此规定基于常规的普通地震动,根据工程及设计经验提出,缺乏相关理论依据且较为笼统。

基于此,本文尝试提出了一种框架剪力调整方法。首先,定义剪力放大系数 α ,以反映地震强度的增大对结构剪力的影响,可用弹塑性基底剪力与弹性基底剪力之比计算得到,见式(1)。框架增大的第一部分剪力即为 $V_{fe}\alpha$ 。 $V_{fp}-V_{fe}\alpha$ 为增大的第二部分剪力,将该部分折算至弹性即为框架设计剪力应该增加的部分,式(2)为框架设计剪力。由此,框架剪力调整系数 k 即为弹塑性框架剪力分担率与弹性框架剪力分担率之比,见式(3)。

$$\alpha = \frac{V_{op}}{V_{0e}} \quad (1)$$

$$V'_{fe} = V_{fe} + \frac{V_{fp} - V_{fe}\alpha}{\alpha} = \frac{V_{fp}}{\alpha} \quad (2)$$

$$k = \frac{V'_{fe}}{V_{fe}} = \frac{V_{fp}}{V_{fe}\alpha} = \frac{V_{fp}}{V_{fe}} \cdot \frac{V_{0e}}{V_{op}} = \frac{V_{fp}}{V_{op}} / \frac{V_{0e}}{V_{fe}} \quad (3)$$

式中, α 为剪力放大系数; V_{fe} 为规范中按连续化协同工作计算得出的框架剪力; V_{fp} 为弹塑性状态下的框架剪力; V'_{fe} 为本文中采用的框架设计剪力。

依据式(3)可得到四类地震动作用下 3 个变刚度特征值结构的框架剪力调整系数如图 18 所示。从图 18 中可以看出,三类特殊地震动作用下的框架剪力调整系数大于普通地震动,其大小排序为:远场长周期地震动>近断层滑冲型地震动>近断层向前方向型地震动>普通地震动;结构中上部楼层的框架剪力调整系数相差不大,结构底部楼层的框架调整系数明显大于结构中上部楼层,且随着刚度

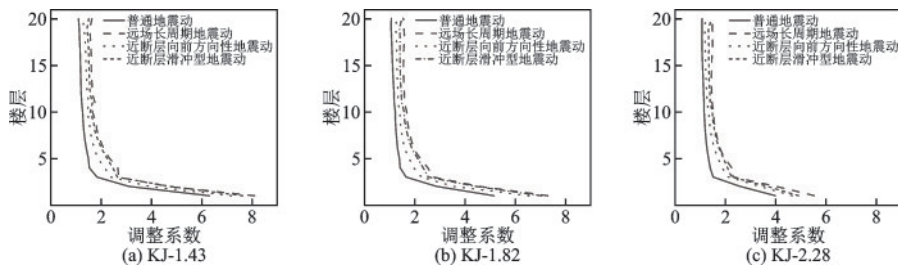


图 18 四类地震动作用下 RC 框架-剪力墙结构的框架剪力调整系数

Fig.18 Frame shear force adjustment coefficients of RC frame-shear wall structure under four types of ground motions

特征值的增大而减小。

图 19 为四类地震动作用下 KJ-1.43、KJ-1.82、KJ-2.28 结构按图 18 调整的框架剪力,图中还给出了按规范[16-17]调整的框架剪力。可以看出,规范中对框架剪力的调整确实一定程度上提高了框架承载力,但其并未考虑到不同类型地震动特性和结构刚度特征值的影响。对于刚度特征值较小的 KJ-1.43 和 KJ-1.82 结构,按规范调整的框架剪力除首层外均大于普通地震动和近断层向前方向性地震动作用下的设计剪力,此时按规范进行框架剪力调整可能存在材料浪费;在结构中下部小于远场长

周期地震动和近断层滑冲型地震动作用下的设计剪力,可能无法保证结构的抗震安全。对于刚度特征值较大的 KJ-2.28 结构,按规范调整的框架剪力在结构中下部均小于四类地震动作用下的框架设计剪力。也就是说,在进行 RC 框架-剪力墙结构抗震设计时,尤其是特殊地震动作用下,需要考虑地震动特性和结构刚度特征值对结构内力重分配的影响。本文提出的框架剪力调整方法仅为初步研究结果,更合理地考虑结构内力重分配的框架剪力调整方法有待后续深入研究。

5 结 论

围绕普通地震动、远场长周期地震动、近断层向前方向性地震动与近断层滑冲型地震,基于地震动特性分析,对比了四类地震动作用下 RC 框架-剪力墙结构的协同工作情况,并初步提出了考虑结构内力重分配的框架剪力调整方法。主要结论如下:

(1)与普通地震动相比,远场长周期地震动加速度峰值较小,持时较长,时程曲线在振动中后期具有明显“类谐和”特征,低频成分丰富,反应谱在 5 s 附近存在另一峰值;两类近断层脉冲型地震动具有较大的低频脉冲,瞬时能量在速度脉冲时段有明显集中,反应谱值大于普通地震动,其中,近断层滑冲型地震动具有较大峰值及反应谱值。

(2)结构的框架剪力分担率随着楼层增加先增大后减小,且随着地震强度的增大不断增大,罕遇地震下接近均匀分布;内力重分配主要发生在结构中下部。三类特殊地震动作用下框架承担剪力均大于普通地震动,尤其是远场长周期地震动作用下,框架作为第二道防线的抗震安全难以保证,在结构抗震设计中应当引起重视。

(3)普通地震动作用下,结构内力重分配程度随地震强度的增加递增;两类近断层脉冲型地震动作用下表现出了类似规律,但其内力重分配程度要明显大于普通地震动;远场长周期地震动作用下,在地震动强度较小的情况下也能使框架剪力出现较大增长,这与其丰富的低频成分有关。

(4)结构的框架剪力分担率随刚度特征值的增大而增大,但内力重分配程度逐渐减小;在特殊类型地震动作用下,周期较大结构中下部的框架剪力增大较快,尤其是远场长周期地震动作用下。

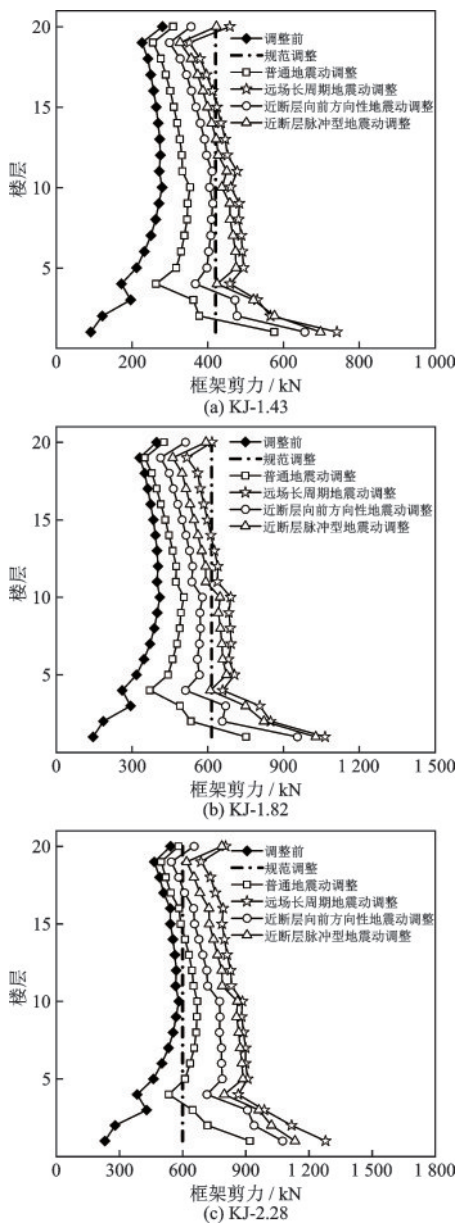


图 19 四类地震动作用下的框架剪力调整

Fig.19 Frame shear force adjustments under four types of ground motions

(5)建议在进行RC框架-剪力墙结构抗震设计时,考虑不同类型地震动特性和刚度特征值对结构内力重分配的影响。

参考文献:

- [1] Koketsi K, Miyake H. A seismological overview of long-period ground motion[J]. Journal of Seismology, 2008, 12(2): 133-143.
- [2] 李明,谢礼立,翟长海,等. 近断层脉冲型地震动重要参数的识别方法[J]. 世界地震工程, 2009, 25(4): 1-6.
Li M, Xie L L, Zhai C H, et al. Identification methods of important parameters for near-fault pulse-type ground motions[J]. World Earthquake Engineering, 2009, 25(4): 1-6. (in Chinese)
- [3] 徐龙军,胡进军,谢礼立,等. 特殊长周期地震动的参数特征研究[J]. 地震工程与工程振动, 2005, 28(6): 20-27.
Xu L J, Hu J J, Xie L L, et al. On characteristics of ground motion parameters for special long-period ground motions[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2005, 28(6): 20-27. (in Chinese)
- [4] 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 Q F, Yuan Y F, Jin X, et al. Basic characteristics of near-fault ground motion[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(1): 1-10. (in Chinese)
- [5] Anderson J G, Bodin P, Brune J N, et al. Strong ground motion from the Michoacan, Mexico earthquake [J]. Science, 1986, 233: 1043-1049.
- [6] Koketsu K, Hatayama K, Furumura T, et al. Damaging long-period ground motions from the 2003 Mw 8.3 Tokachi-oki, Japan earthquake [J]. Seismological Research Letters, 2005, 76(1): 67-73.
- [7] 梁兴文,董振平,王应生,等. 汶川地震中离震中较远地区的高层建筑的震害[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(1): 24-31.
Liang X W, Dong Z P, Wang Y S, et al. Damage to tall buildings in areas with large epicentral distance during M8.0 Wenchuan Earthquake [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29(1): 24-31. (in Chinese)
- [8] 周福霖,崔鸿超,安部重孝,等. 东日本大地震灾害考察报告[J]. 建筑结构, 2012, 42(4): 1-20.
Zhou F L, Cui H C, Shigetaka A B E, et al. Inspection report of the disaster of the East Japan earthquake by Sino-Japanese joint mission [J]. Building Structure, 2012, 42(4): 1-20. (in Chinese)
- [9] Ariga T, Kanno Y, Takewaki I. Resonant behavior of base-isolated high-rise building under long-period ground motions [J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2006, 15: 325-338.
- [10] 杨伟林,朱升初,洪海春,等. 汶川地震远场地震动特征及其对长周期结构影响的分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2009, 29(4): 473-478.
Yang W L, Zhu S C, Hong H C, et al. Characteristics of far-field ground motion of Wenchuan Earthquake and the effect on long-periodic structures [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2009, 29(4): 473-478. (in Chinese)
- [11] 陈清军,袁伟泽,曹丽雅,等. 长周期地震波作用下高层建筑结构的弹塑性动力响应分析[J]. 力学季刊, 2011, 32(3): 403-410.
Chen Q J, Yuan W Z, Cao L Y, et al. Elasto-plastic dynamic response analysis of high rise structures under long period ground motion [J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2011, 32(3): 403-410. (in Chinese)
- [12] 杨迪雄,李刚,程耿东,等. 近断层脉冲型地震动作用下隔震结构地震反应分析[J]. 地震工程与工程振动, 2005, 25(2): 119-124.
Yang D X, Li G, Cheng G D, et al. Seismic analysis of base-isolated structures subjected to near-fault pulse-like ground motions [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2005, 25(2): 119-124. (in Chinese)
- [13] 江义,杨迪雄,李刚,等. 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 Y, Yang D X, Li G, et al. 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)
- [14] 韩建平,石金辉. 特殊长周期地震动作用下超限高层建筑结构地震响应分析[J]. 建筑结构, 2017, 47(5): 72-76.
Han J P, Shi J H. Seismic response analysis of an out-of-code high-rise building structure under special long-period ground motion [J]. Building Structure, 2017, 47(5): 72-76. (in Chinese)
- [15] 王博,代慧娟,吴涛,等. 近场与远场长周期地震动对高层结构作用机理比较分析[J]. 振动与冲击, 2018,

- 37(12):123-130.
- Wang B, Dai H J, Wu T, et al. Comparative analysis of action mechanisms for high-rise structures under near-fault and far-field long-period ground motions[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(12): 123-130. (in Chinese)
- [16] 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [17] 高层建筑混凝土结构技术规程:JGJ3—2010 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [18] Yassin M H M. Nonlinear analysis of prestressed concrete structures under monotonic and cycling loads[D]. Berkeley:University of California, Berkeley, 1994.
- [19] Filippou F C, Popov E P, Bertero V V. Effects of bond deterioration on hysteretic behavior of reinforced concrete joint [R]. Berkeley: Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1983.
- [20] 林旭川,陆新征,缪志伟,等. 基于分层壳单元的RC核心筒结构有限元分析和工程应用[J]. 土木工程学报,2009,42(3):49-54.
Lin X C, Lu X Z, Miao Z W, et al. Finite element analysis and engineering application of RC core-tube structures based on the multi-layer shell elements[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(3): 49-54. (in Chinese)
- [21] 陆新征,叶列平,潘鹏,等. 钢筋混凝土框架结构拟静力倒塌试验研究及数值模拟竞赛 II:关键构件试验[J]. 建筑结构,2012,42(11):23-26.
Lu X Z, Ye L P, Pan P, et al. Pseudo-static collapse experiments and numerical prediction competition of RC frame structure II: key elements experiment[J]. Building Structure, 2012, 42(11): 23-26.(in Chinese)
- [22] 章红梅. 剪力墙结构基于性态的抗震设计方法研究[D]. 上海:同济大学,2007.
Zhang H M. Study on the performance-based seismic design method for shear wall structures[D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese)
- [23] Kabeyasawa T, Shiohara H, Otani S. US-Japan cooperative research on R/C full-scale building test, Part 5: Discussion on dynamic response system [C]//Proceedings of the 8th World Conference on Earthquake Engineering. San Francisco, 1984: 627-634.
(本文编辑:张艺)