

钢筋混凝土框架近断层速度脉冲地震响应分析*

张莹^{1,2}, 孙广俊², 李鸿晶²

(1. 中冶华天工程技术有限公司 南京, 210019) (2. 南京工业大学土木工程学院 南京, 211816)

摘要 采用有限元方法对近断层速度脉冲型地震动引起的钢筋混凝土框架结构的响应行为进行了初步研究。利用 PKPM 软件建立了 3 个不同层数的钢筋混凝土框架模型。使用 SAP2000 有限元软件并采用塑性铰模型, 对框架结构在近断层地震动下的响应进行了数值模拟, 并对对比分析了有、无速度脉冲情况下的动力响应行为。同时, 探究了近断层速度脉冲型地震动引起结构破坏的主要因素。研究表明: 结构损伤或倒塌破坏的程度与速度脉冲型地震动的高频成分和峰值加速度有关; 高频成分丰富的速度脉冲型地震动对结构的破坏更为明显; 当框架结构进入塑性状态后, 含有速度脉冲的地震动会引起结构更大的楼层位移和层间位移角。

关键词 近断层; 速度脉冲; 框架结构; 地震响应; 高频
中图分类号 TU375

引言

地震是一种普遍存在的自然灾害, 对生命安全造成极大的威胁。我国是世界上破坏性地震次数最多、地震危害最严重的国家之一。研究表明, 在近断层强震(断层距不超过 20 km)下, 结构易遭受到严重破坏^[1]。2008 年汶川地震中, 极重灾区的房屋结构基本严重毁坏^[2], 震中映秀镇的钢筋混凝土结构中 40% 完全倒毁, 40% 部分倒塌^[3]。

强震作用下结构的倒塌不仅和结构自身特性有关, 而且地震引起的地面特性运动也是决定结构破坏甚至倒塌的最关键因素。由于早期工程技术的限制, 很难获取近断层地震波数据, 因此结构抗震设计中选用的基本都是非近断层地震波, 然而非近断层地震波特性和近断层地震波特性有着明显的差别^[4]。其中, 强烈的速度脉冲是近断层强震的显著特征之一, 且往往会严重影响结构的地震响应行为^[5-6]。1971 年的 San Fernando 地震中发现了第 1 条对结构具有破坏性的速度脉冲^[7], 此后, 具有速度脉冲的强震记录数量不断增加, 为近断层结构地震

响应行为的研究提供了大量资料^[8-9]。

笔者建立了 3 个不同层数的钢筋混凝土框架结构模型, 分别考察其在含有速度脉冲和不含速度脉冲强震下的响应行为, 探讨了近断层速度脉冲对框架结构的地震响应影响以及速度脉冲型地震动的破坏特征。

1 框架结构模型

为了能较全面地考察速度脉冲对钢筋混凝土框架结构的影响, 分别建立 3 层、9 层和 15 层 3 个钢筋混凝土框架模型, 其场地条件、平面布局及荷载状况等参数均来自于某一实际的办公楼工程。为方便分析, 对其平面及立面布置进行了简化, 使其布局规整。按照我国 2016 年版《建筑抗震设计规范》选取相关设计参数, II 类场地, 抗震设防丙类, 8 度设防烈度。楼面恒载 0.8 kN/m² (不包括楼板自重), 楼面活载 2 kN/m²; 屋面恒载 1.2 kN/m² (不包括屋面板自重), 屋面活载 0.5 kN/m²。运用 PKPM 软件建立框架模型, 得到框架的梁柱配筋结果。设计结果符合规范要求, 其模型参数如表 1 所示。

表 1 框架结构模型参数
Tab. 1 Parameters of frame models

框架模型	层数	层高/m	建筑高度/m	楼板厚度/mm	梁截面尺寸/mm	柱截面尺寸/mm	柱截面配筋	混凝土等级
模型 1	3	3	9	150	500×250	400×400	8Ø22	C30
模型 2	9	3	27	150	600×300	500×500	12Ø22	C30
模型 3	15	3	45	150	600×300	600×600	12Ø25	C30

* 国家自然科学基金资助项目(51478222)
收稿日期: 2018-04-05; 修回日期: 2019-09-27

运用软件 SAP2000 建立的 3 层框架有限元模型如图 1 所示。将钢筋混凝土的梁和柱等效为均质的梁单元,并考虑梁单元的剪切变形和弯曲变形,以及柱单元的轴向变形、剪切变形和弯曲变形。楼板则等效为均质的壳单元,并假设其在自身平面内绝对刚性。结构底部固结,其余边界自由。除了施加梁、板、柱的自重外,考虑结构正常使用下的楼面荷载。

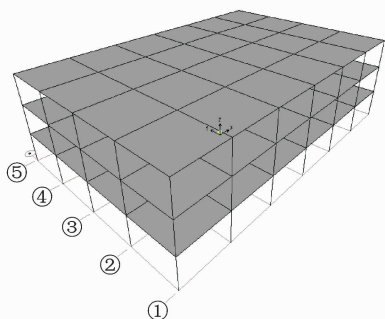


图 1 3 层框架有限元模型

Fig. 1 The frame finite element model of three floors

由于塑性铰模型能够较直观地反映出杆件进入塑性阶段的发展变化,因此有限元模型中选用集中塑性铰本构模型,在梁、柱单元的两端均设置塑性铰并考虑材料的非线性。塑性铰本构关系采用标准的四折线骨架曲线模型。当梁柱截面内的受拉钢筋屈服时,截面开始形成塑性铰,而塑性铰的转角达到最大允许值时截面完全破坏。按照 DOD2016 标准,将塑性铰转角的最大允许值作为构件破坏的指标^[10]。

3 个模型的前 3 阶自振周期见表 2。所有模型的第 1 阶和第 2 阶振型均主要为剪切变形,第 3 阶振型均为扭转变形。

表 2 结构前 3 阶自振周期

Tab. 2 Natural period of the structure

模型编号	1 阶周期/s	2 阶周期/s	3 阶周期/s
模型 1	0.654	0.649	0.611
模型 2	1.369	1.343	1.261
模型 3	2.034	1.975	1.856

2 地震动输入

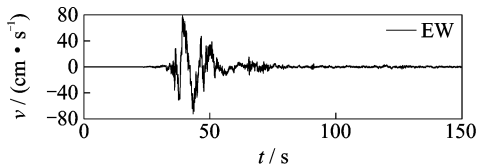
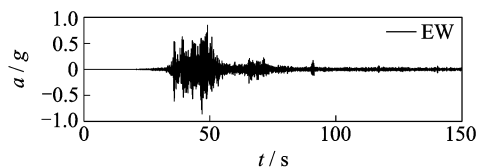
汶川地震中收集到的近断层水平强震记录共 10 条,其中 3 条含有明显的速度脉冲(绵竹清平 EW、绵竹清平 NS 和江油含增 NS)。选取这 3 条速度脉冲型地震记录以及另外 2 条非速度脉冲型记录(汶川卧龙 EW 和江油含增 EW)作为结构的输入地

震动,记录参数如表 3 所示,其部分加速度和速度时程见图 2。上述地震加速度记录均来自中国国家强震动台网中心数据库。

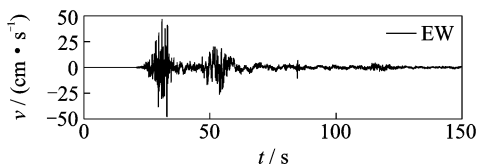
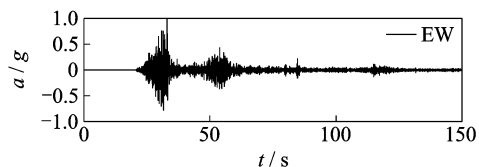
表 3 近断层强震记录参数

Tab. 3 Parameters of near-fault earthquake records

记录名称	断层距/ km	速度 脉冲	脉冲幅值/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	脉冲周期/ s
绵竹清平 EW	3.1	含	78.221	12.25
绵竹清平 NS	3.1	含	53.742	8.62
汶川卧龙 EW	6.0	不含	—	—
江油含增 EW	18.8	不含	—	—
江油含增 NS	18.8	含	30.142	9.48



(a) Mianzhu Qingping motion



(b) Wenchuan Wolong motion

图 2 部分近断层地震动时程

Fig. 2 Partial time histories of near-fault earthquake ground motions

3 速度脉冲对结构地震响应影响

根据《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010)表 5.1.2-2,考虑 8 度多遇地震影响,将 5 条地震波加速度峰值统一调整为 $70g$,对上述 3 个框架结构分别进行非线性动力响应分析。通过对模型的楼层加速度、楼层速度、楼层位移及层间位移等参数的计算,比较结构在含速度脉冲和不含速度脉冲的近断层地震动下的响应差异。

图 3 为 3 个框架结构在不同地震动作用下的楼

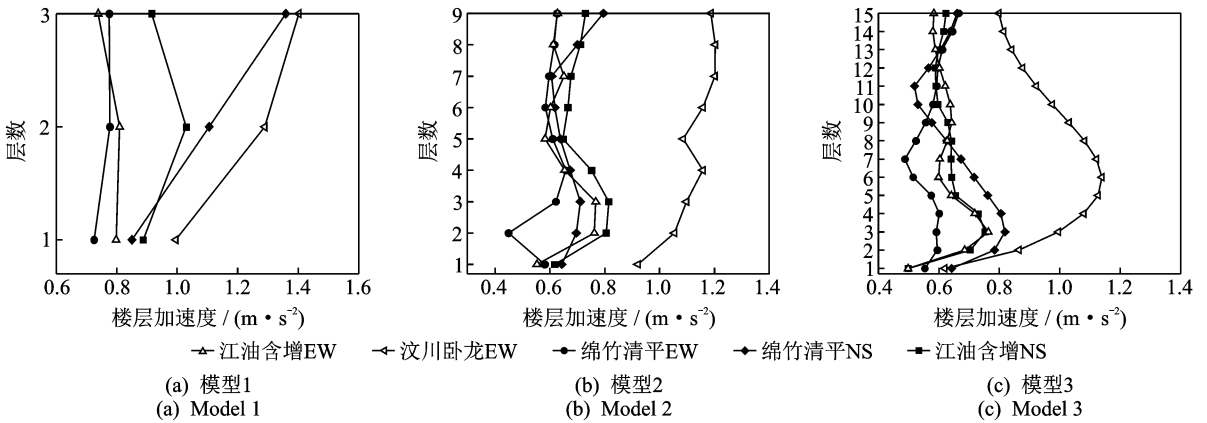


图 3 楼层加速度响应

Fig. 3 Storey acceleration response

层加速度响应,其中:实心图为脉冲波;空心图为非脉冲波。可以看出,在所有模型中,不含速度脉冲的汶川卧龙 EW 波下的楼层加速度值均明显大于其他地震动。无论有、无速度脉冲,楼层加速度在各层间的变化都比较杂乱,且对于不同层高模型其变化趋势均不同,无明显规律可寻。

图 4 为 3 个框架结构在不同地震动作用下的楼层速度响应,其中:实心图为脉冲波;空心图为非脉冲

波。模型 1 中,绵竹清平 NS(速度脉冲)波下的楼层速度最大;模型 2 中,汶川卧龙 EW(非速度脉冲)波下的楼层速度最大;模型 3 中,虽然汶川 EW 波下的楼层速度在 3~13 层中最大,但顶层速度却小于绵竹清平 EW(速度脉冲)波下的响应。可见楼层速度虽然在各层间的变化趋势比较明显,但含与不含速度脉冲的地震动对楼层速度响应的差别不明显,因此不建议作为考察速度脉冲对结构动力响应影响的参数。

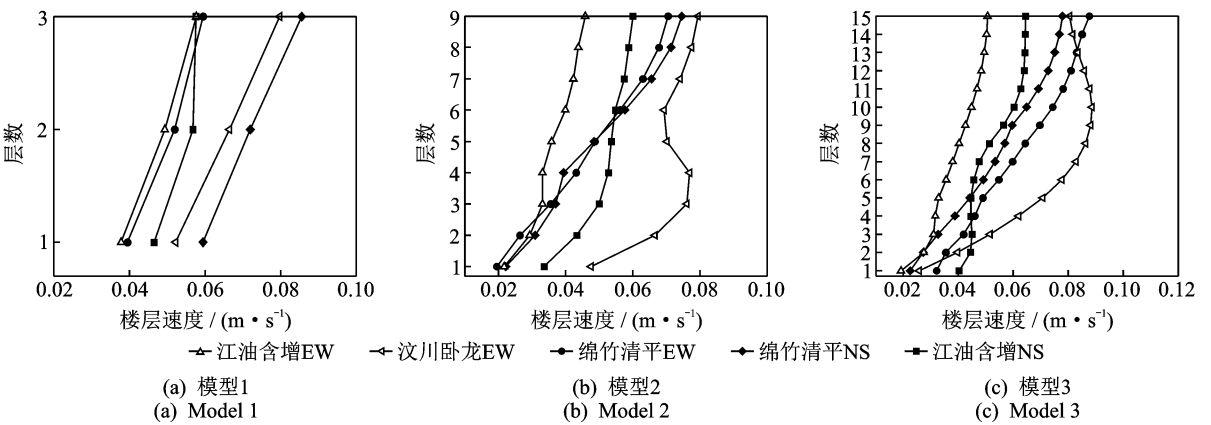


图 4 楼层速度响应

Fig. 4 Storey velocity response

图 5 为 3 个框架结构在不同地震动作用下的楼层位移响应,其中:实心图为脉冲波;空心图为非脉冲波。图中比较发现:

1) 在所有模型中,楼层位移的变化均比较规律,结构底层到顶层的楼层位移均随着层数的增大而增大,其最大值均出现在顶层;

2) 模型 1 中,除了江油含增 NS(速度脉冲)波下的楼层位移小于汶川 EW(非速度脉冲)波下的楼层位移,其余 2 条速度脉冲波下的位移值均大于非速度脉冲波;在模型 2 和模型 3 中,3 条速度脉冲波

下的楼层位移均明显大于非速度脉冲波的情况;

3) 不同模型中,非速度脉冲波下的底层位移变化不大,而速度脉冲波下的底层位移则变化很大,尤其绵竹 EW 波的情况,模型 1 中绵竹 EW 波下的底层位移为 5.81mm,模型 2 中的为 6.39 mm,模型 3 中的为 24.58 mm;

4) 虽然在楼层加速度和楼层速度中,汶川 EW(非速度脉冲)波下的响应值多数大于其他地震动,但在楼层位移中,其值却基本小于速度脉冲波下的响应值,且在层数越高的模型中表现得越明显。

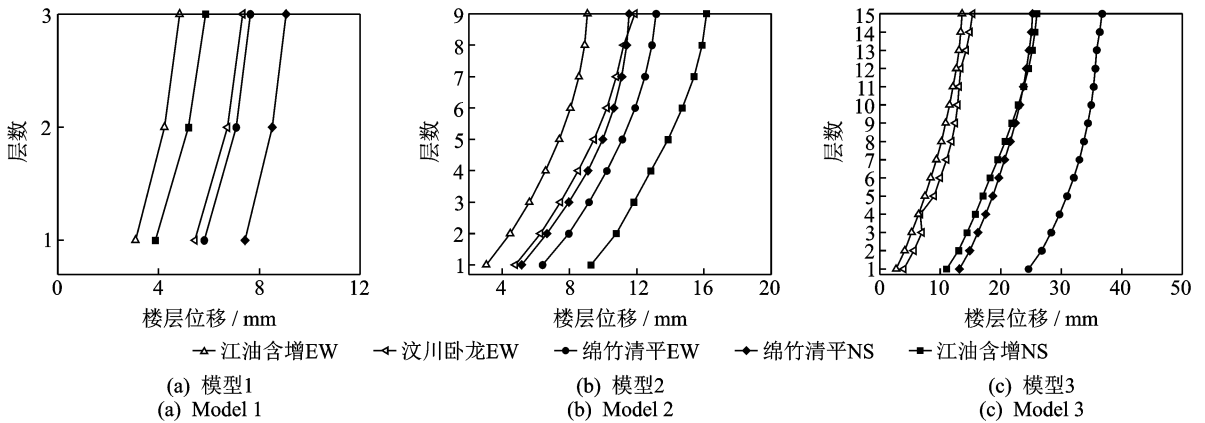


图5 楼层位移响应

Fig. 5 Storey displacement response

由此可见:在结构各楼层分布上,加速度无明显的分布规律;速度虽有增大趋势,但各地震动之间会交织在一起;楼层位移随层高逐渐增大,规律明显;层间位移、层间位移角的最大值基本出现在结构底层;楼层加速度和速度参数不能很好地反映出速度脉冲的作用,而楼层位移则可以较好地反映出该影响。

表4为模型1在含与不含速度脉冲的地震动作用下的结构响应,通过对层间位移进行计算得到地震作用下结构的层间位移角。在含有速度脉冲的3条地震动中,有2条引起的最大层间位移角超过了我国《建筑抗震设计规范》中要求的限值 $1/550$,说明结构进入塑性,发生损伤。不含速度脉冲的地震动中,汶川EW引起的最大层间位移值也超过规范限值,发生损伤。

表5为模型2在含与不含速度脉冲的地震动作用下的结构响应。含有速度脉冲的3条地震动均引

起了最大层间位移角均超过限值,结构损伤;而不含速度脉冲的2条地震动对结构的动力响应仍在弹性阶段。

表6为模型3在含与不含速度脉冲的地震动作用下的结构响应。可以看出,模型3和模型2的结果相同,但是模型3中速度脉冲型地震动引起的层间位移角远大于非速度脉冲型地震动。弹性阶段,含有速度脉冲和不含速度脉冲的地震动对结构的响应无明显区别;当结构进入塑性阶段后,含有速度脉冲的地震动会引起结构更大的楼层位移和层间位移角。

此外,近断层地震动中含有速度脉冲和不含速度脉冲对于低楼层房屋结构的响应影响差别不大,甚至非速度脉冲引起的结构响应会更大。但对于高楼层房屋而言,其之间的差别十分明显,速度脉冲引起结构的响应更大,更容易发生破坏。因此,有必要对速度脉冲地震动中引起结构的破坏因素进行分析。

表4 模型1在含与不含速度脉冲的地震动作用下的结构响应

Tab. 4 Structural responses of model 1 under motion records with/without velocity pulse

地震记录	速度脉冲	顶层位移/mm	最大层间位移/mm	最大层间位移角/%	破坏状态
绵竹清平EW	含	7.64	5.81	0.194	损伤
绵竹清平NS	含	9.06	7.43	0.248	损伤
江油含增NS	含	5.87	3.88	0.129	弹性
江油含增EW	不含	4.84	3.09	0.103	弹性
汶川卧龙EW	不含	7.34	5.45	0.181	损伤

表5 模型2在含与不含速度脉冲的地震动作用下的结构响应

Tab. 5 Structural responses of model 2 under motion records with/without velocity pulse

地震记录	速度脉冲	顶层位移/mm	最大层间位移/mm	最大层间位移角/%	破坏状态
绵竹清平EW	含	13.15	6.39	0.213	损伤
绵竹清平NS	含	11.54	5.15	0.182	损伤
江油含增NS	含	16.15	9.27	0.309	损伤
江油含增EW	不含	9.07	3.05	0.102	弹性
汶川卧龙EW	不含	11.88	4.78	0.159	弹性

表 6 模型 3 在含与不含速度脉冲的地震动作用下的结构响应

Tab. 6 Structural responses of model 3 under motion records with/without velocity pulse

地震记录	速度脉冲	顶层位移/mm	最大层间位移/mm	最大层间位移角/%	破坏状态
绵竹清平 EW	含	36.75	24.58	0.819	损伤
绵竹清平 NS	含	25.26	13.17	0.439	损伤
江油含增 NS	含	25.99	11.04	0.368	损伤
江油含增 EW	不含	13.61	2.70	0.090	弹性
汶川卧龙 EW	不含	15.35	3.95	0.131	弹性

4 速度脉冲型地震动破坏因素分析

4.1 高频成分

为分析速度脉冲型地震动中的高频成分的影响,选用绵竹清平 EW 向地震记录。根据《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010)表 3.2.2,考虑 8 度设防标准,将加速度峰值调整为 0.2g,滤掉频谱中的高频成分,得到不含高频成分的速度脉冲时程,如图 6 所示。同时,保证该条不含高频成分的地震动的速度脉冲峰值和脉冲周期与原地震动(含高频成分)相同。

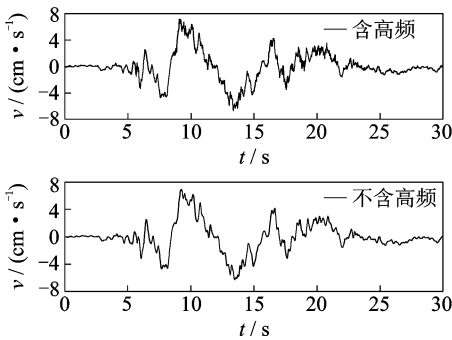


图 6 速度时程曲线

Fig. 6 Time histories of velocity

图 7 为 2 条地震动的傅里叶谱。通过对高频部分的比较发现:当频率低于 5 Hz 时,含与不含高频成分的地震动加速度傅里叶谱完全相同;当频率高于 5 Hz 时,两者的傅里叶谱差别较大。

图 8 分别为 2 条地震动的加速度、速度和位移反应谱。在加速度反应谱中,当周期约小于 0.5 s 时,含有高频成分的脉冲型地震动的谱值明显高于不含高频成分的谱值,最大相差 86%;当周期约超过 0.5 s 时,二者基本相同。在速度响应谱中,当周期小于约 0.5 s 时,含有高频成分的脉冲型地震动的谱值明显较高,最大相差 91%;当周期超过 0.5 s

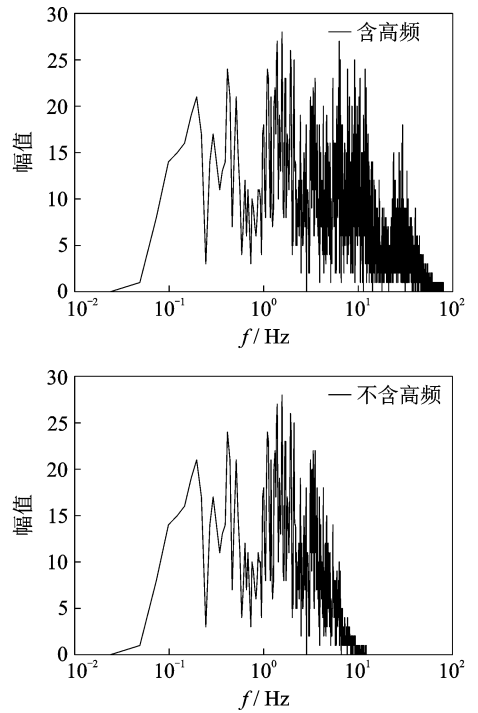


图 7 傅里叶谱

Fig. 7 Fourier spectrum

时,二者基本相同。在位移响应谱中,当周期小于约 0.5 s 时,由于二者谱值均较低,幅值上相差不大;当周期超过 0.5 s 后,二者基本相同。可以发现,短周期的单自由度体系会因为近断层速度脉冲型地震动的高频成分而产生更强烈的加速度、速度和位移响应。但当周期超出该范围后,受到高频成分的影响会很小。根据百分比数据可见,含有与不含高频成分的地震动速度反应谱之间的差别最大,其次是加速度反应谱,而位移反应谱的差别最小,说明高频成分对单自由度体系速度反应的影响更大。

将上述 2 条地震动作为输入对上文中的 3 个模型进行动力响应分析,来比较速度脉冲型地震动中的高频成分对结构的影响。计算的楼层加速度、速度和位移分别如图 9~11 所示。表 7 为含与不含高频成分的速度脉冲地震动作用下的结构响应。

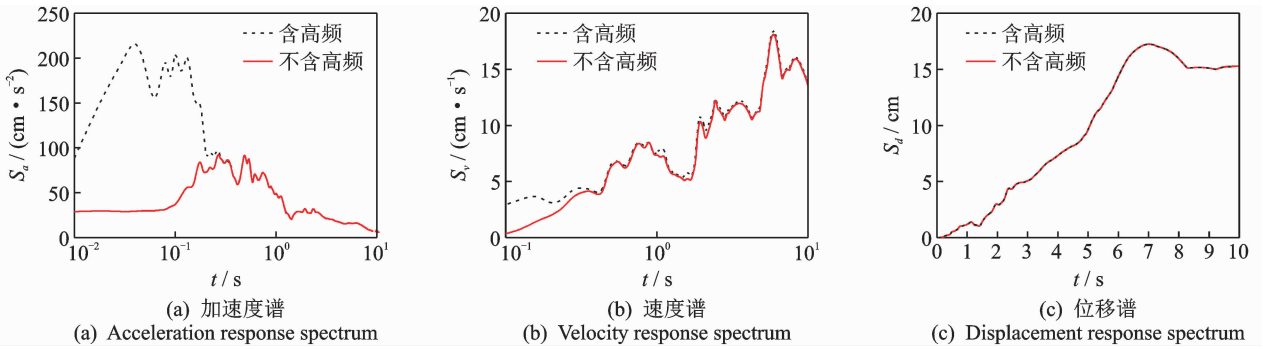


图8 地震动反应谱

Fig. 8 Response spectrum of earthquake ground motions

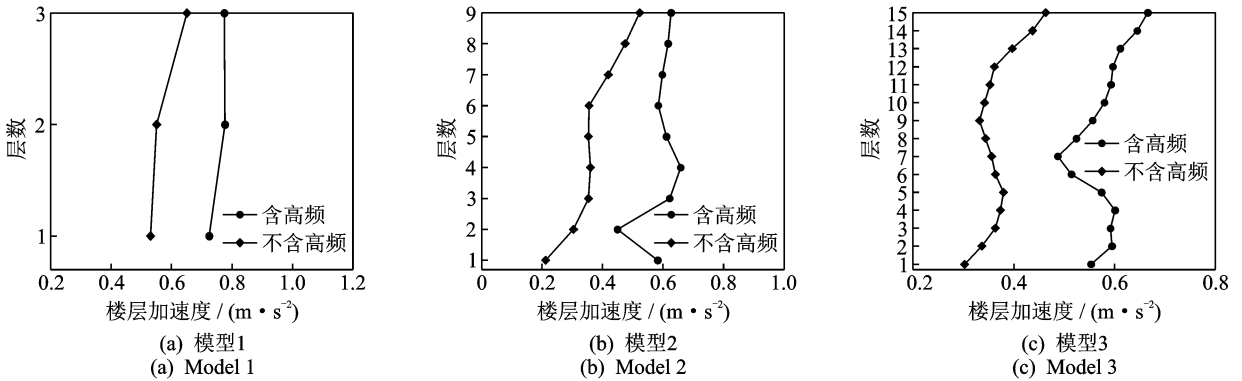


图9 含与不含高频成分的速度脉冲地震下的楼层加速度响应

Fig. 9 Structural acceleration responses under velocity pulse ground motions with/without high frequency content

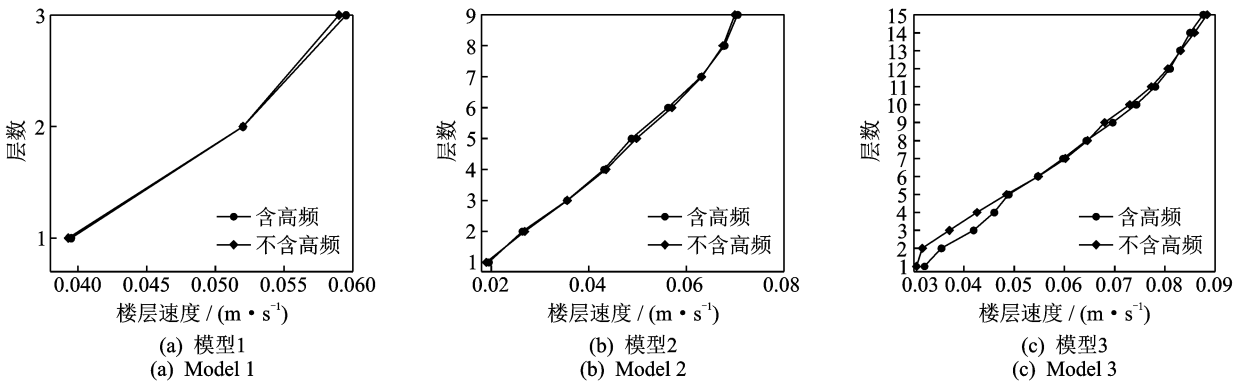


图10 含与不含高频成分的速度脉冲地震下的楼层速度响应

Fig. 10 Structural velocity responses under velocity pulse ground motions with/without high frequency content

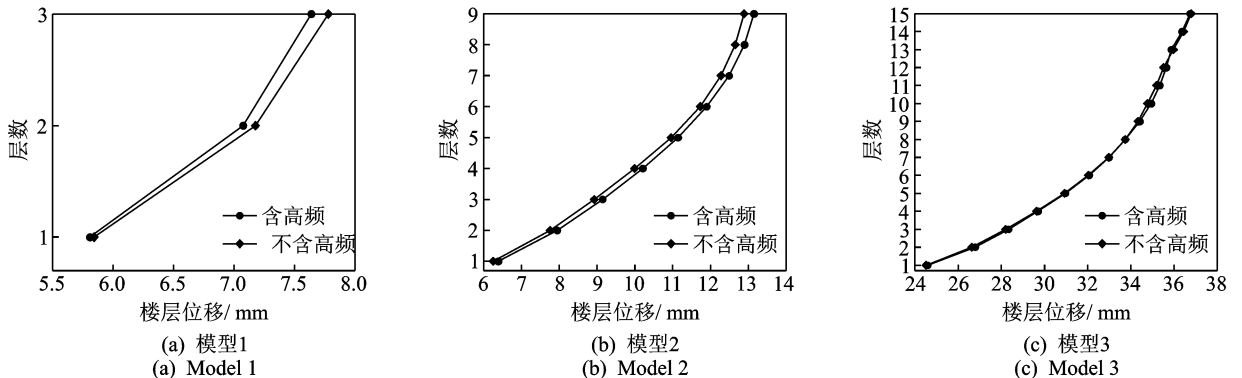


图11 含与不含高频成分的速度脉冲地震下的楼层位移响应

Fig. 11 Structural displacement responses under velocity pulse ground motions with/without high frequency content

表 7 含与不含高频成分的速度脉冲地震下的结构位移响应

Tab. 7 Structural responses under velocity pulse ground motions with/without high frequency content

结构	高频成分	顶层位移/mm	最大层间位移/mm	最大层间位移角/%	破坏状态
模型 1	含	7.78	5.85	0.195	轻微损伤
	不含	7.64	5.81	0.193	轻微损伤
模型 2	含	13.15	6.39	0.213	轻微损伤
	不含	12.89	6.25	0.208	轻微损伤
模型 3	含	36.80	24.58	0.819	中度损伤
	不含	36.75	24.52	0.817	中度损伤

可以看出,含有高频和不含高频的速度脉冲地震动的楼层加速度响应的差别最大,所有结构中含有高频成分的地震动引起的楼层加速度均明显高于不含高频的,最大相差 63.7%(模型 1),平均相差约 35.4%;引起的楼层速度、楼层位移、顶层位移及层间位移角均略高于不含高频成分的速度脉冲地震动,楼层速度最大相差 5%(模型 3),平均相差约 2.1%;楼层位移最大相差 2.4%(模型 1),平均相差约 1%;顶层位移最大相差 1.9%(模型 1);层间位移角最大相差 2.3%(模型 1)。

通过比较发现,速度脉冲地震动的高频成分会使结构响应增大,但对于不同的结构其影响也不同。模型 1 受高频影响的响应最为明显。这是因为模型 1 的第 1 自振周期比较接近或位于受高频影响明显的区域段内,而模型 2 和模型 3 的第 1 自振周期均不在该区域段内。由此可见,高频成分对结构响应增大的影响程度与结构的第 1 周期有很大关系,且高频成分丰富的速度脉冲型地震动对结构的破坏更明显。

4.2 峰值加速度

为分析近断层速度脉冲型强震动的峰值地面加速度(peak ground acceleration,简称 PGA)对反应谱和结构响应的影响,将含有速度脉冲的绵竹清平 EW 向的强震记录的 PGA 分别调整为 70 cm/s²(8 度多遇地震)、140 cm/s²(9 度多遇地震)、220 cm/s²(7 度罕遇地震)和 400 cm/s²(8 度罕遇地震),而脉冲速度峰值均为 40 cm/s,且脉冲周期相同,峰值段速度时程曲线如图 12 所示。

图 13 为该 4 条不同 PGA 的地震动加速度、速度和位移反应谱。可以看出,峰值加速度越高,加速度、速度和位移反应谱的谱值越高。在加速度反应谱中,短周期段(约小于 0.5 s)内不同 PGA 的地震动的谱值差别非常明显,最大相差 72%左右;在速度反应谱中,最大相差 28%左右,对应周期约为

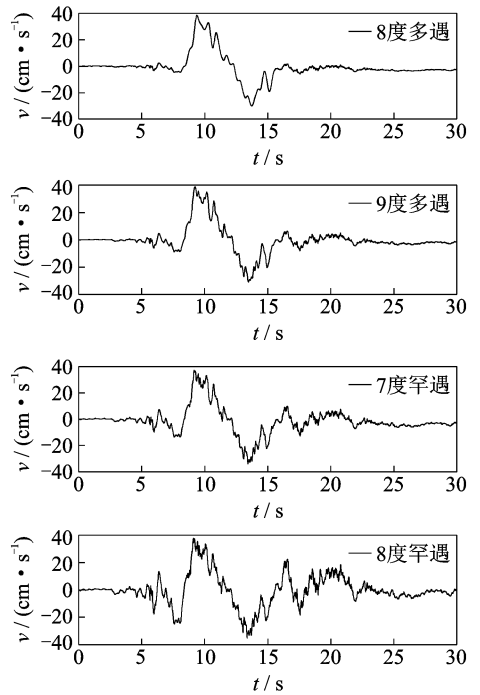


图 12 不同 PGA 的速度时程曲线

Fig. 12 Time histories of velocity with different PGA

6 s;在位移响应谱中,最大相差 25%左右,对应周期约为 6.5 s。

将上述 4 条地震动作为输入对 3 个模型进行动力响应分析。计算的楼层加速度、速度和位移响应分别如图 14~16 所示。限于篇幅,仅列出模型 1 和模型 3 的响应图。

可以看出,模型 1 中,除了峰值加速度为 140 cm/s²的脉冲地震动引起的顶层加速度大于峰值为 220 cm/s²的地震动,其余模型中的地震动峰值加速度越大,引起的楼层加速度也越大。3 个模型的楼层位移均随着 PGA 的增大而增大,在模型 3 中由于 PGA=400 cm/s²的地震动引起结构倒塌,楼层位移和速度过大,因此图中没有绘出。可以看出,近断层速度脉冲型地震动引起的结构楼层速度和楼层位移在 PGA 大于 0.15g 时,会产生极大的

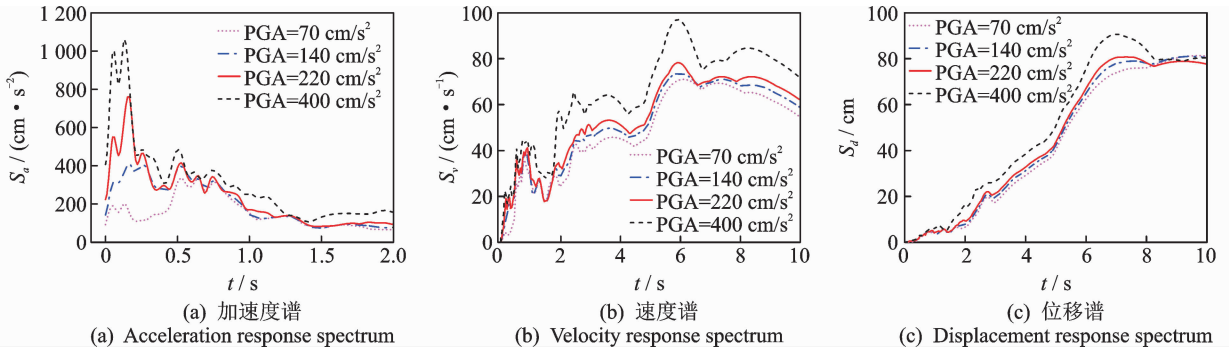


图13 不同PGA的地震动反应谱

Fig. 13 Response spectrum of earthquake ground motions with different PGA

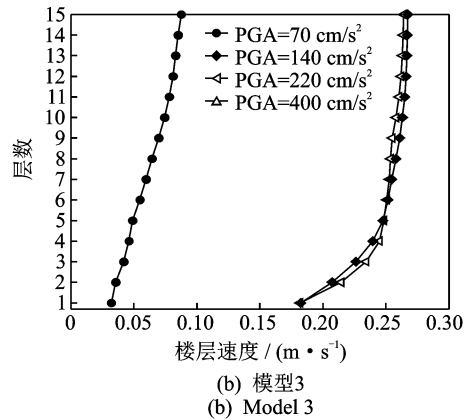
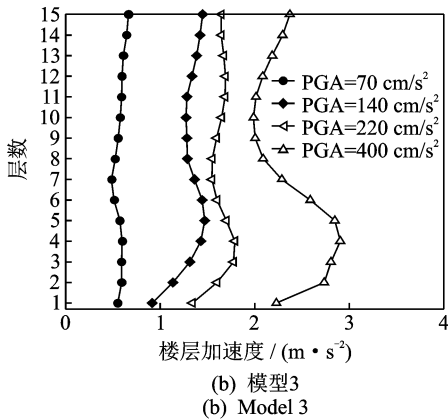
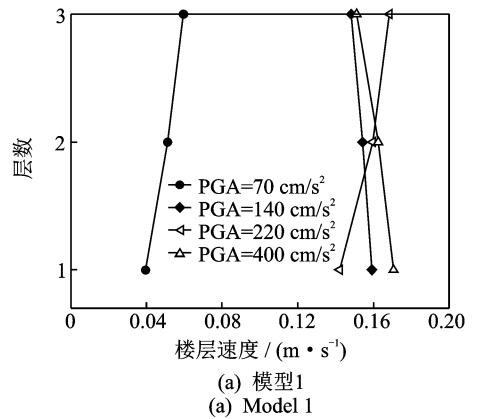
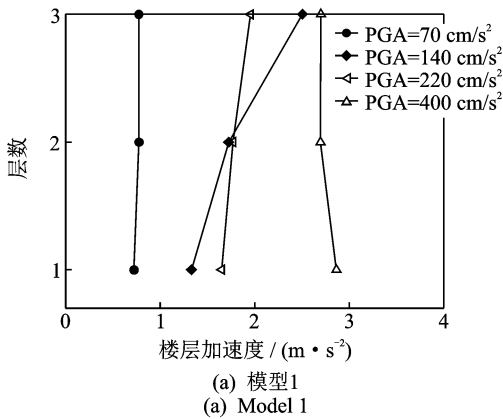


图14 不同PGA速度脉冲地震下的楼层加速度响应

Fig. 14 Structural acceleration responses under velocity pulse ground motions with different PGA

图15 不同PGA速度脉冲地震下的楼层速度响应

Fig. 15 Structural velocity responses under velocity pulse ground motions with different PGA

地震响应。因此,该参数可以作为速度脉冲地震动引起结构破坏的重要因素之一。

5 结论

1) 框架结构总层间位移和层间位移角的最大值基本出现在结构底部。弹性阶段,含有速度脉冲和不含速度脉冲的地震动对结构的响应无明显的区

别;当结构进入塑性阶段后,含有速度脉冲的地震动会引起结构更大的楼层位移和层间位移角。

2) 楼层加速度和速度参数不能很好地反映出速度脉冲的作用,而楼层位移和层间位移角则可以较好地反映出该影响。

3) 速度脉冲地震动的高频成分和峰值加速度是对钢筋混凝土框架结构产生损伤破坏的两个重要因素。

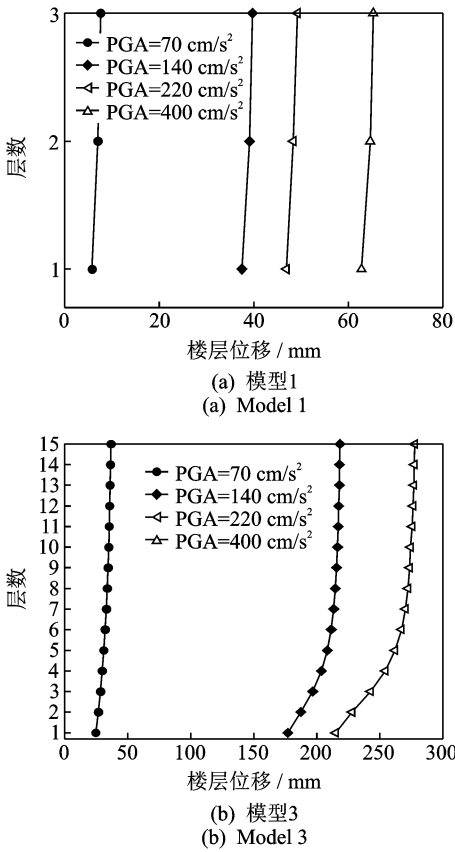


图 16 不同 PGA 速度脉冲地震下的楼层位移响应
Fig. 16 Structural displacement responses under velocity pulse ground motions with different PGA

4) 高频成分对结构响应增大的影响程度与结构的第 1 周期有很大关系,且高频成分丰富的速度脉冲型地震动对结构的破坏更明显。

参 考 文 献

[1] 郭恩,周锡元,彭凌云,等. 近断层地震动记录中速度大脉冲及其影响范围[J]. 北京工业大学学报, 2012, 38(2): 243-249.
GUO En, ZHOU Xiyuan, PENG Lingyun, et al. Big velocity pulses and their influence on near-fault ground motion records[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2012, 38(2): 243-249. (in Chinese)

[2] 温增平,徐超,陆鸣,等. 汶川地震重灾区典型钢筋混凝土框架结构震害现象[J]. 北京工业大学学报, 2009, 35(6): 753-760.
WEN Zengping, XU Chao, LU Ming, et al. Damage features of R. C frame structures in Wenchuan earthquake [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2009, 35(6): 753-760. (in Chinese)

[3] 孙柏涛,闫培雷,胡春峰,等. 汶川 8.0 级大地震极重灾区映秀镇不同建筑结构震害概述及原因简析[J]. 地震工程与工程振动, 2008, 28(5): 1-9.

SUN Baitao, YAN Peilei, HU Chunfeng, et al. Overview on seismic damage to different structures in Yingxiu Town during Wenchuan earthquake [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 28(5): 1-9. (in Chinese)

[4] ZHANG S, WANG G. Effects of near-fault and far-fault ground motions on nonlinear dynamic response and seismic damage of concrete gravity dams [J]. Soil Dynamic and Earthquake Engineering, 2013, 53(10): 217-229.

[5] XIE J, WEN Z, LI X, et al. Analysis of velocity pulses for near-fault strong motions from the Wenchuan earthquake based on wavelet method [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(6): 1963-1972.

[6] 贾俊峰,杜修力,韩强. 近断层地震动特征及其对工程结构影响的研究进展[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(1): 1-12.
JIA Junfeng, DU Xiuli, HAN Qiang. A state of the art review of near-fault earthquake ground motion characteristics and effects on engineering structures [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(1): 1-12. (in Chinese)

[7] HAYDEN C, BRAY J, ABRAHAMSON N. Selection of near-fault pulse motions [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014, 140(7): 1-13.

[8] MORTEZAEI A, RONAGH H, KHEYRODDIN A. Seismic evaluation of FRP strengthened RC buildings subjected to near-fault ground motions having fling step[J]. Composite Structures, 2010, 92(5): 1200-1211.

[9] 张莹,孙广俊,李鸿晶. 开洞填充墙对混凝土框架柱地震损伤影响分析[J]. 振动、测试与诊断, 2014, 34(5): 932-937.
ZHANG Ying, SUN Guangjun, LI Hongjing. Numerical simulation on seismic damage of reinforced concrete frame columns considering the influence of infill walls with opening [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2014, 34(5): 932-937. (in Chinese)

[10] DOD. UFC 4-023-03 Design of buildings to resist progressive collapse, change 3 [S]. Washington DC: Department of Defense, 2016.



第一作者简介:张莹,女,1988 年 10 月生,博士。主要研究方向为工程抗震。曾发表《开洞填充墙对混凝土框架柱地震损伤影响分析》(《振动、测试与诊断》2014 年第 34 卷第 5 期)等论文。
E-mail:edu_zhangying@163.com

