

李青, 邹双凤, 李敏, 等. 近、远场地震动作用下超高层结构抗震性能研究[J]. 华南地震, 2019, 39(4): 92-97. [LI Qing, ZOU Shuangfeng, LI Min, et al. Seismic Behavior of Super High-rise Structures Subjected to Near-field and Far-field Ground Motion[J]. South China journal of seismology, 2019, 39(4): 92-97]

近、远场地震动作用下超高层结构抗震性能研究

李 青¹, 邹双凤², 李 敏¹, 黄天璨^{1,3}

(1. 广州大学工程抗震研究中心, 广州 510405; 2. 广西水利电力职业技术学院, 南宁 530023;
3. 工程抗震减震与结构安全教育部重点实验室, 广州 510405)

摘要: 对超高层结构在近、远场地震动作用下的抗震性能进行了初步的分析。结果表明: 两类典型长周期地震动的低频效应和速度脉冲效应会放大超高层结构的响应, 并且随着地震动长周期成分的丰富和增强, 结构薄弱层有下移动趋势, 结构薄弱层的位置会随着不同类型的地震动发生改变。

关键词: 近、远场地震动; 超高层结构; 动力弹塑性时程分析; 结构损伤演化

中图分类号: TU973.31 文献标志码: A 文章编号: 1001-8662(2019)04-0092-06

DOI: 10.13512/j.hndz.2019.04.013

Seismic Behavior of Super High-rise Structures Subjected to Near-field and Far-field Ground Motion

LI Qing¹, ZOU Shuangfeng³, LI Min¹, HUANG Tiancan^{1,2}

(1. Earthquake Engineering Research & Test Center, Guangzhou University, Guangzhou 510405, China; 2. Key Laboratory of Earthquake Resistance, Earthquake Mitigation and Structural Safety, Ministry of Education, Guangzhou 510405, China; 3. Guangxi Vocational College of Water Resources and Electric Power, Nanning 530023, China)

Abstract: In this paper, the seismic performance of super high-rise structures subjected to near-field and far-field ground motion is analyzed. The results show that the low frequency effect and velocity pulse effect of two kinds of typical long-period ground motions will amplify the response of super high-rise structures, and with the enrichment and enhancement of long-period components of ground motion, the structural weak layer tend to move downward, and the position of the structural weak layer changes with different types of ground motion.

Keywords: Near-field and far-field ground motion; Super high-rise structure; Dynamic elastoplastic time history analysis; Structural damage analysis

收稿日期: 2019-07-15

基金项目: 国家重点研发计划高性能计算重点专项(2016YFB200605)

作者简介: 李 青(1994-), 女, 硕士研究生, 主要从事超高层结构抗震研究。E-mail: liqing_dq@163.com.

通信作者: 邹双凤(1982-), 女, 广西水利电力职业技术学院, 主要从事超高层结构抗震研究。

E-mail: maya_htc@163.com.

0 引言

近年来,高层和超高层建筑的破坏时有发生,多次大地震中近断层区和远震区相继出现了长周期结构震害的案例^[1-2]。相关震害资料和研究表明基本周期较长的结构在地震作用下主要有以下三种类型的破坏:一是由长周期成分充足的远场地震动引起的结构共振破坏^[3-4];二是由近断层脉冲型地震动中的脉冲效应引起的结构损坏^[5-6];三是高频地面运动引起的结构瞬态位移破坏^[7-8]。

1975年 Hanks 首次提出了“长周期地震动”这个概念。远场长周期地震动主要指远场类谐和地震动,近场长周期地震动是指近断层脉冲型地震动。远场类谐和地震动有较长持时、包含有丰富的长周期成分,后期振动阶段类似谐和振动。近断层地震动根据有无速度脉冲效应分为近断层脉冲型地震动和近断层无脉冲型地震动近断层脉冲型地震动具有明显的速度脉冲和较长的脉冲周期,时程曲线有类似脉冲形状。研究表明我国不少发达中心城市都处在长周期地震动影响较大的区域,高层和超高层建筑一般都建立在这些中心城市,我国现行抗震规范由于未考虑长周期地震动的影响使超高层结构的设计可能偏于不安全,需进一步研究超高层结构在不同类型地震动作用下的抗震性能。

本文以实际工程建筑苏州中南中心为研究对象,分别选用7条典型的远场长周期地震动、近断层脉冲型地震动和3条普通地震动对结构进行弹性和弹塑性动力时程分析,对比分析结构的动力响应特征。进一步研究不同类型地震动作用下超限高层结构的损伤演化规律。

1 工程概况

苏州中南中心建筑位于苏州金鸡湖西 CBD 核心区,是集多种用途于一体的现代大型商业综合体项目。建筑主体高度 598 m,结构体系为外框架核心筒结构,是目前国内在建第一高楼。工程设计防烈度为 7 度,设计地震分组为第一组,场地类别为 III 类,场地特征周期为 0.45 s。建筑效果图如图 1,典型结构平面布置图如图 2 所示。

塔楼从底部至顶部共分为 9 个分区,在每个分区顶部设置加强层,加强层用来加强核心筒与周边框架的联系,以此来提高结构的整体刚度,结构分区立面图如图 3 所示。



图 1 中南中心建筑图

Fig.1 Central South Center building map

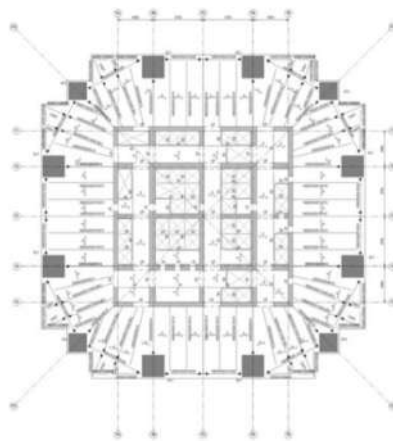


图 2 典型结构平面布置示意图

Fig.2 Schematic diagram of typical structure layout

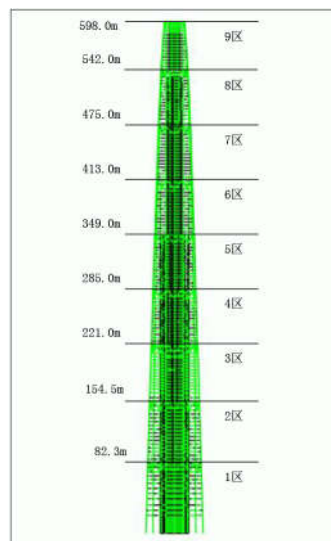


图 3 结构分区立面图

Fig.3 Typical floor plane of structure partition

2 材料模型

(1)混凝土材料本构:通过 ABAQUS 用户自定义子程序接口进行二次开发自定义混凝土弹塑性损伤本构关系,模型中混凝土材料及属性见表 1 和表 2。

表 1 混凝土材料属性

Table 1 Concrete material properties

材料属性	对应参数
弹性模量	31.5–37.5 GPa(用于 C35–C70)
泊松比	0.2
容重	25 kN/m ³

表 2 主要构件混凝土材料

Table 2 Concrete material of main component

构件类型	混凝土强度等级
巨柱	C70
剪力墙、连梁	C60
楼板	C35

(2)结构基本动力特性

在 ABAQUS 平台上对超高层结构进行基本特性分析,根据计算结果看出,结构 1 阶振动模态为沿 X 方向平动,周期为 9.28 s;结构 2 阶振动模态为沿 Y 方向平动,周期为 9.06 s;结构 3 阶振动模态为平面扭转,周期为 4.05 s;结构第一扭转周期与第一平动周期的比值为 0.436,小于规范限值 0.85,结构扭转不明显。结构基本周期达到 9.28 s,属于典型的长周期结构。

3 结构动力时程分析对比

3.1 地震动的选取

选取的三类地震动信息如表 3 所示,其中近断层脉冲和远场类谐波和地震动地震波为台湾集集地震中不同台站测得的地震波。

为了研究近、远场两种类型的地震动对结构基本周期超过 6 s 的超高层结构的内力及变形的影响。根据《建筑抗震设计规范》(GB50011–2010)^[10]规定,将所选的 17 条地震波 PGA 均调幅至 220 ga,然后沿第一阶平动周期方向输入结构进行计算,提取结构各层响应进行对比分析。

表 3 地震波信息

Table 3 The information of seismic waves

近断层脉冲型 台站/分量	远场类谐波和 台站/分量	普通地震动 台站/分量
CHY101NS	ILA004EW	EL Centro
TCU052NS	ILA042EW	Northridge
TCU076EW	ILA055EW	Taft
TCU103NS	ILA055NS	/
TCU120NS	ILA056EW	/
TCU122NS	ILA056NS	/
TCU128NS	TCU010NS	/

3.2 罕遇地震作用下结构地震响应分析

在强震作用下,超限高层这种复杂结构的薄弱环节极易产生较大塑性变形,结构损伤的累积会使超限高层结构有倒塌破坏的可能,对结构进行弹塑性时程分析有利于找出结构存在的薄弱环节。

3.2.1 楼层层间位移角

近断层脉冲型地震动、远场类谐波和地震动和普通地震动作用下结构各楼层位移和层间位移角沿楼层高度的变化情况如图 4~6 所示。

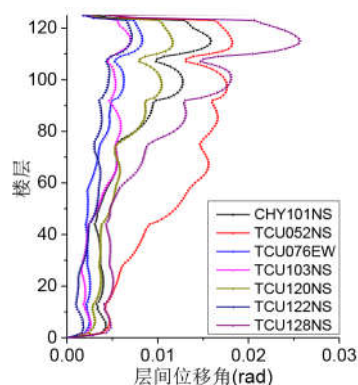


图 4 近断层脉冲型地震动作用下结构响应计算结果
Fig.4 Calculation results of structural response under near-burst pulse type ground motion

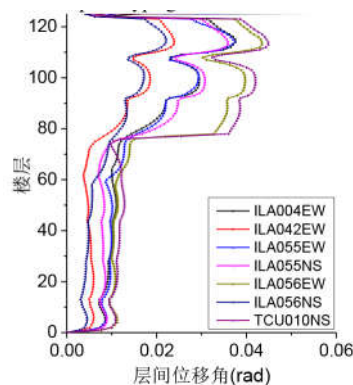


图 5 远场类谐波和地震动作用下结构响应计算结果
Fig.5 Calculation results of structural response under far-field harmonic vibration

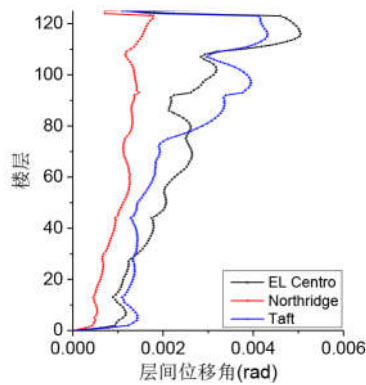


图 6 普通地震动作用下结构响应计算结果
Fig.6 Structural response calculation results under ordinary ground motion

由图 4~6 表明：结构层间位移角上层间位移角变化趋势为先增大后减小，在加强层处有向内缩进的现象。从位移角大小来看，远场类谐和地震动作用下结构的层间位移角最大。在结构上部楼层，远场类谐和地震动作用下层间位移角变化最剧烈，近断层地震动作用下结构层间位移角变化趋势比普通地震动作用下剧烈。

由表 4~6 表明：在远场类谐和地震动作用中，七条地震波计算得到的最大层间位移角均超过了规范限值 0.01。TCU010NS 波作用下结构层间位移角最大，达到 0.0449；ILA056NS 地震波作用下结构层间位移角最小，为 0.0221。近断层脉冲型地震动中，四条地震动作用下结构层间位移角超过了规范限值，其中 TCU128NS 作用下结构层间位移角最大，达到 0.0256；TCU103NS 作用下结构层间位移角最小，为 0.0070；普通地震动作用下结构层间位移角都没有超过规范限值。远场长周期地震动作用下结构最大层间位移角是普通地震动作用下结构最大层间位移角的 9.72 倍；近断层脉冲型地震动作用下结构最大层间位移角是普通地震动作用下结构最大层间位移角的 3.72 倍。

分析三类地震动作用下结构最大层间位移角出现的位置可以发现，随着地震动长周期成分的丰富，结构最大层间位移角出现的位置有向楼层下部移动趋势。

3.2.2 结构内力分析

七条远场类谐和地震动中，ILA056NS 波作用下结构基底剪力最大，达到 7.93×10^8 N，基底剪力平均值为 6.57×10^8 N。近断层脉冲型地震动作用下，TCU128NS 作用下结构基底剪力最大，为 5.21×10^8 N，七条近断层脉冲波作用下最大基底剪

力平均值为 3.81×10^8 N。普通地震动中 Taft 波作用下结构基底剪力最大，为 2.25×10^8 N，普通地震动作用下基底剪力平均值为 1.69×10^8 N。

表 4 近断层脉冲型地震动作用下结构最大层间位移角
Table 4 Maximum interlaminar displacement angle of structures under near-burst impulse ground motion

近断层脉冲型地震动	所在楼层	最大层间位移角	平均值
CHY101NS	115	0.0159	0.0134
TCU052NS	114	0.0182	
TCU076EW	115	0.0083	
TCU103NS	115	0.0070	
TCU120NS	114	0.0116	
TCU122NS	117	0.0071	
TCU128NS	115	0.0256	
规范限值		0.0100	

表 5 远场类谐和地震动作用下结构最大层间位移角
Table 5 Maximum interlaminar displacement angle of structures under far-field harmonic vibration

远场类谐和地震动	所在楼层	最大层间位移角	平均值
ILA004EW	114	0.0376	0.0350
ILA042EW	114	0.0239	
ILA055EW	114	0.0374	
ILA055NS	114	0.0358	
ILA056EW	113	0.0434	
ILA056NS	115	0.0221	
TCU010NS	113	0.0449	
规范限值	0.0100		

表 6 普通地震动作用下结构最大层间位移角
Table 6 Maximum inter-layer displacement angle of structure under ordinary ground motion

普通地震动	所在楼层	最大层间位移角	平均值
EL-Centro	116	0.0051	0.0036
Northridge	123	0.0018	
Taft	116	0.0043	
规范限值			0.0100

综合对比各类地震作用下结构最大基底剪力平均值可以看出,远场类谐和地震作用下结构最大基底剪力平均值最大,是普通地震作用下结构最大基底剪力平均值的 3.89 倍;近断层脉冲型地震作用下结构基底剪力平均值是普通地震作用下结构基底剪力平均值的 2.25 倍;三类地震中,普通地震作用下结构基底剪力平均值最小。

4 不同类型地震作用下超高层结构地震损伤演化规律

从三类地震中各选取一条地震波进行结构地震损伤演化分析,选取的三条地震波分别为 TCU052NS、ILA056EW 和 EL-Centro 波。

4.1 普通地震作用下超高层结构损伤演化过程

图 7 为 EL-Centro 地震波作用下超高层结构损伤发展过程,从图中可以看出,在地震动整个加载过程中,结构损伤主要分布在结构顶部八区和九区处,结构构件大部分都处于弹性工作状态。

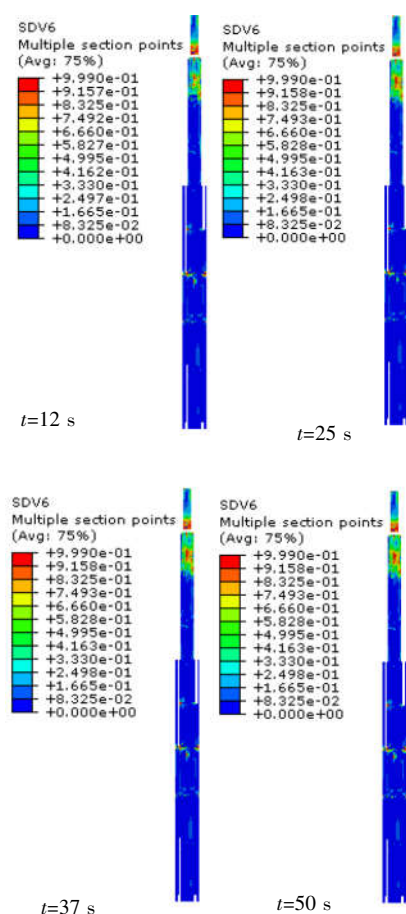


图 7 剪力墙受拉损伤云图

Fig.7 Shear wall tensile damage cloud map

4.2 远场类谐和地震作用下超高层结构损伤演化过程

图 8 为 ILA056EW 地震波作用下超高层结构损伤发展过程,从图中可以看出,在远场类谐和地震作用下,结构顶部出现了倒塌的情况。剪力墙初始损伤发生在结构顶部和转换层处, $t=12$ s 时,结构主要损伤集中在八区和九区。 $t=25$ s 时,顶部外伸臂桁架和环带桁架开始屈服,结构六区和七区也出现集中损伤带。 $t=37$ s 时,剪力墙在八区顶部裂缝贯穿,结构九区已经严重倾斜。 $t=50$ s 时,结构八区顶薄弱层部位主要竖向支撑构件断裂失效,结构顶部九区发生局部坍塌。

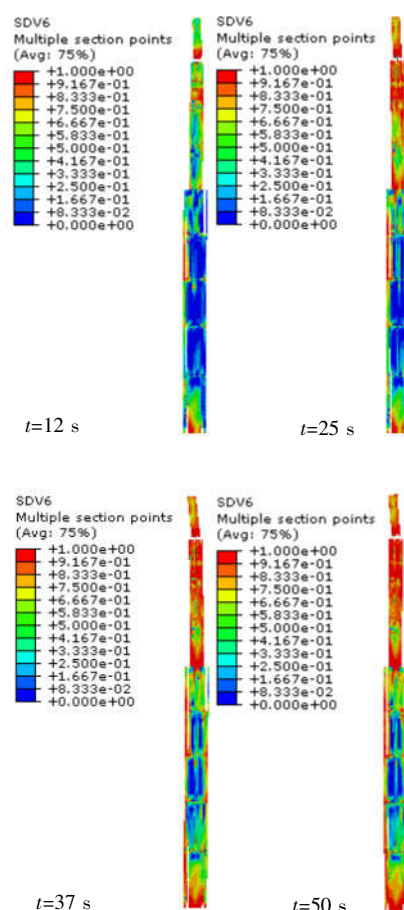


图 8 剪力墙受拉损伤云图

Fig.8 Shear wall tensile damage cloud map

4.3 近断层脉冲型地震作用下超高层结构损伤演化过程

图 9 为 TCU052NS 地震波作用下超高层结构损伤发展过程,从图中可以看出, $t=12$ s 时,结构损伤主要出现在结构顶部, $t=25$ s 和 $t=37$ s 时结构损伤部位情况类似,转换层处和结构八区九区出

现集中损伤,剪力墙损伤向结构七区延伸。 $t=50\text{ s}$ 时,结构九区出现明显倾斜现象。

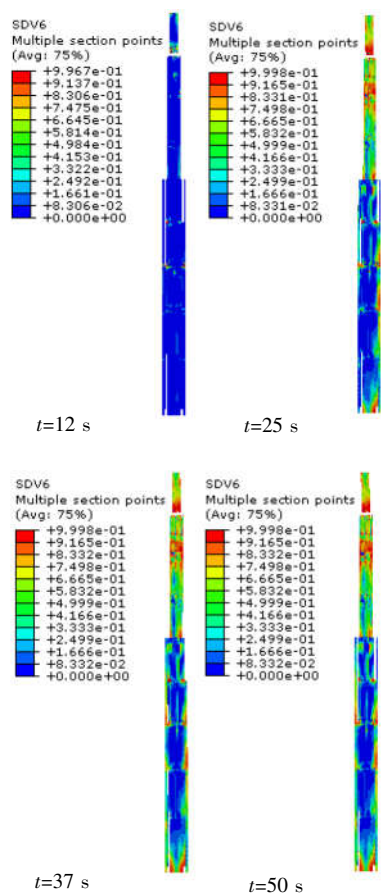


图9 剪力墙受拉损伤云图

Fig.9 Shear wall tensile damage cloud map

上述损伤分析结果表明,罕遇地震作用下,普通地震动对本文中所用超限高层结构没有造成明显的威胁。这类地震动作用下超限高层结构的损伤主要集中在结构顶部,结构整体依然处于弹性工作状态。在近断层脉冲型地震动作用下超限高层结构损伤主要集中在结构顶部和转换层处,结构顶部出现集中损伤带,结构顶部出现了明显的倾斜。在远场类谐和地震动作用下,结构损伤从八区和九区向下延伸,剪力墙裂缝贯穿使结构顶部出现了局部倒塌的现象。

5 结语

使用不同类型地震动对自振周期超过 6 s 的超高层结构进行大震弹塑性时程分析,得到以下结论:

(1)与普通地震动相比,两类典型长周期地震动的低频效应和速度脉冲效应放大了结构的响应。

(2)超高层结构总体上层间位移角变化趋势为

先增大后减小,在加强层处有向内缩进的现象。罕遇水准下,两类长周期地震动作用下层间位移角超出规范限值的现象比较严重。

(3)随着地震动长周期成分的丰富,结构最大层间位移角出现的位置有向楼层下部移动趋势,且结构薄弱层的位置会随着不同的地震动发生改变。

由于我国现行抗震规范中地震影响系数曲线只有 6 s 以内的参数,建议在对自振周期超过 6 s 的超高层结构设计时应考虑长周期地震动的影响。

参考文献:

- [1] 李明. 近断层地震动对结构抗震设计的影响研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2010.
- [2] 钱志超, 陈洋洋, 谭平. 长周期地震动对广州塔TMD减震控制性能的影响[J]. 华南地震, 2018, 38(04): 96-104.
- [3] 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.
- [4] 中日联合考察团, 周福霖, 崔鸿超等. 东日本大地震灾害考察报告[J]. 建筑结构, 2012(4): 1-20.
- [5] 李春锋. 近断层脉冲型地震动的长周期效应[J]. 国际地震动态, 2010(2): 33-34.
- [6] 张莹, 孙广俊, 李鸿晶. 近断层速度脉冲对RC框架的地震反应影响[J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(3): 368-373.
- [7] 吴琛, 周瑞忠. 长周期结构地震瞬态反应研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(5): 123-126.
- [8] 刘强, 周瑞忠, 袁文君. 高耸结构地震瞬态反应计算与动力特性研究[J]. 土木工程学报, 2010(5): 63-69.
- [9] Hanks T C. Strong ground motion of the San Fernando, California, earthquake: Ground displacements[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1975, 65(1): 193-225.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB5011-2010: 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.