

基于长周期作用的大底盘基础隔震 结构地震响应分析

王林建¹, 李飞燕², 刘静³, 吴应雄⁴

(1. 云南省地震工程研究院, 云南 昆明 650000; 2. 厦门大学嘉庚学院土木工程系, 福建 漳州 363105;
3. 福建省建筑设计研究院有限公司, 福建 福州 350000; 4. 福州大学土木工程学院, 福建 福州 350108)

摘 要: 收集了 273 条地震动信息并进行滤波处理, 筛选了近场普通、近场脉冲、远场普通和远场谐和 4 类地震动, 利用 ETABS 软件建立了一个大底盘基础隔震结构的有限元模型, 进行隔震和抗震模型在双向地震动作用下的时程分析。结果表明: 长周期作用下基础隔震结构减震效果比普通地震动差; 大底盘楼层的减震效果在长周期地震动下, 较塔楼明显降低, 设防烈度下层间位移角超限, 罕遇烈度下隔震层位移超限; 普通地震动下, 隔震结构能够降低大底盘结构的平-扭耦合效应, 但长周期地震动下, 扭转响应增大, 尤其在大底盘顶层; 隔震结构与长周期地震动产生共振, 导致隔震结构响应的增长幅度大于抗震结构。

关键词: 长周期地震动; 大底盘结构; 基础隔震; 地震响应

中图分类号: TU352.12

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2019)04-0204-08

Seismic Response Analysis of Base Isolation Structures with Large Chassis Based on Long-period Action

WANG Linjian¹, LI Feiyan², LIU Jing³, WU Yingxiong⁴

(1. Yunnan Institute of Earthquake Engineering, Kunming, Yunnan 650000, China;

2. Department of Civil Engineering, Xiamen University Tan Kah College, Zhangzhou, Fujian 363105, China;

3. Fujian Provincial Institute of Architectural Design and Research Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 350000, China;

4. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China)

Abstract: In this paper, 273 pieces of ground motion information have been collected and filtered to select two kinds of special long-period ground motions and near-field and far-field ordinary ground motions. A finite element model of base isolation structure with large chassis is established by using ETABS software, and the time history analysis of the isolation and seismic models under bidirectional ground motion is carried out. The results show that the shock absorption effect of the base isolation structure under the long period is worse than that of the ordinary ground motion. The shock absorption effect of the large chassis floor is significantly worse than that of tower building under long-period ground motion. The inter-story displacement angle under fortification intensity exceeds the limit value, and the displacement of isolation layer under rare intensity exceeds the limit value. Under ordinary ground motion, the isolated structure can reduce the flat-torsional coupling effect of the large chassis structure, but the torsional response increases under long-period ground motion, especially on the top of the large chassis; the isolated structure and the long-period ground motion resonate, resulting in a larger increase in the response of the isolated structure than the seismic structure.

收稿日期: 2019-04-20

修稿日期: 2019-06-06

基金项目: 福建省住建厅科研开发项目(2017-K-23); 云南省青年地震科学基金资助项目(2017K02)

作者简介: 王林建(1984—), 女, 河南南阳人, 硕士, 工程师, 主要从事建筑结构减震隔震技术与工程应用方面的研究工作。

E-mail: 309688476@qq.com

通讯作者: 李飞燕(1981—), 女, 福建厦门人, 硕士, 副教授, 主要从事工程结构减震隔震理论与工程应用方面的教学与研究工作。

E-mail: 29636720@qq.com

Keywords: long-period ground motion; large chassis structure; base isolation; seismic response

基础隔震结构延长了结构自振周期,减小了输入上部结构的地震作用^[1-4]。目前针对隔震理论的研究大多基于普通地震动,我国《建筑抗震设计规范》^[1](GB 50011—2010)(以下简称《抗规》)中的抗震设计反应谱主要依据也是短周期分量为主的普通地震动,忽略长周期地震动的影响。然而,在汶川地震与东日本大地震中,许多高层结构出现剧烈晃动的现象^[2-3],灾后调查表明由于此类结构自振周期较长,与地震动长周期分量产生类共振效应,增大结构的位移响应。

已有学者针对隔震结构在长周期地震动下的动力响应及减震效果开展研究。王亚楠等^[7-8]对隔震模型进行数值分析,表明远场长周期地震动下隔震结构的位移响应明显大于远场普通地震动。叶昆^[9]对近场脉冲地震动与普通地震动作用下隔震结构的动力响应进行分析,发现近断层脉冲型地震下的隔震层最大位移和顶层最大加速度增大。吴应雄等^[10]进行长周期地震动下隔震结构振动台试验,结果表明远场长周期地震动下隔震结构的响应明显大于普通地震动;近场脉冲长周期地震动下结构的减震效果较差,隔震层位移大于容许值。上述研究均表明隔震结构在长周期地震动下将产生较大地震响应或发生类共振破坏。大底盘结构由于上部体型收进刚度突变,塔楼质心与大底盘质心偏离,塔楼在刚度突变处引起的扭转效应远大于大底盘自身。新发展的隔震技术,可以降低结构扭转效应并提高结构安全。在大底盘隔震结构理论研究方面,江宜城等^[11]以偏心隔震结构为对象,研究表明了隔震结构可以降低上部结构的扭转响应。赵楠等^[12]、杜永峰等^[13]探讨多塔基础隔震结构的抗震性能,分析地震动下的结构层间位移、剪力和位移角等参数。结果表明,基础隔震结构减震效果良好,能有效抑制结构扭转。在试验研究方面,李诚凯等^[14]对大底盘单塔楼隔震结构模型进行振动台试验,结果表明,大底盘单塔楼基础隔震的减震效果良好。

上述已有的研究基本掌握了长周期地震动下规则隔震结构地震响应和减震效果,但是对于不规则隔震结构的研究较少。本文收集了 273 条地震动信息并进行滤波处理,筛选了近场普通、近场脉冲、远场普通和远场谐和 4 类地震动共 12 条,在大底盘基础隔震结构振动台试验基础上建立有限元模型,分别进行隔震和抗震模型在双向地震动下的时程分析,通过对比顶层加速度、层间剪力、层间位移角等指标,探究隔震结构在长周期地震动下的减震效果,分析长周期地震动下隔震结构的平-扭耦合效应。

1 地震动选取

从 PEER 强震数据库中获取 273 条地震动记录,主要来自 Chi-Chi 地震、Landers 地震、Northridge 地震和 Kobe 地震这四个场地。参考文献[15-16]结论,选取地震动每类各 3 条,分别是:近场普通地震动、近场脉冲地震动、远场普通地震动及远场谐和地震动。将近场地震动加速度峰值调幅至 200 gal,远场地震动加速度峰值调幅至 100 gal。选用的地震动信息如表 1 所示。

表 1 地震动信息

类型	序号	地震名	台站	断层距/km	震级	PGA/g
近场普通	1	Chi-Chi	CHY028E	3.12	7.6	0.64
	2	Imperial Valley	ELC180	6.09	7.0	0.28
	3	Chi-Chi	TCU053E	5.95	7.6	0.23
近场脉冲	1	Chi-Chi	TCU068E	0.32	7.6	0.50
	2	Chi-Chi	TCU052E	0.66	7.6	0.36
	3	Chi-Chi	TCU102E	1.49	7.6	0.30
远场普通	1	Landers	H05000	68.66	7.3	0.08
	2	Chi-Chi	ILA007N	84.07	7.6	0.09
	3	Landers	PLC000	94.48	7.3	0.04
远场谐和	1	Chi-Chi	ILA004N	88.89	7.6	0.06
	2	Chi-Chi	ILA055N	90.30	7.6	0.07
	3	Chi-Chi	ILA056N	92.04	7.6	0.07

2 大底盘隔震结构动力分析模型

采用层间串联刚片模型来模拟大底盘基础隔震结构,分析模型见图 1。结构各层楼板假定为刚性,地震动作用为双向水平。

结构的运动方程可写为:

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = -ME\ddot{u}_g \tag{1}$$

式中: $U = \begin{Bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{Bmatrix}$ 为位移, $\ddot{u}_g = \begin{Bmatrix} \ddot{u}_g^x \\ \ddot{u}_g^y \\ 0 \end{Bmatrix}$ 为加速度, $E =$

$\begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix}$ 为单位矩阵; $M = \begin{bmatrix} m_x & & \\ & m_y & \\ & & J \end{bmatrix}, m_x = m_y =$

$\begin{bmatrix} m_0 & & & \\ & m_1 & & \\ & & \ddots & \\ & & & m_n \end{bmatrix}, J = \begin{bmatrix} J_0 & & & \\ & J_1 & & \\ & & \ddots & \\ & & & J_n \end{bmatrix}, m_i \setminus J_i$

为各楼层质量与转动惯量; $K = \begin{bmatrix} K_{xx} & 0 & K_{x\theta} \\ 0 & K_{yy} & K_{y\theta} \\ K_{\theta x} & K_{\theta y} & K_{\theta\theta} \end{bmatrix}$,

K_{xx}, K_{yy} 分别为结构在 x, y 方向的平动刚度, $K_{x\theta}$ 与 $K_{y\theta}$ 分别为结构 x, y 向的平扭刚度, 并考虑各层质心与刚心的偏心距和质心之间的偏心距。 $K_{\theta x} = K_{x\theta}^T$, $K_{\theta y} = K_{y\theta}^T, K_{\theta\theta}$ 为结构的扭转刚度矩阵。

$$C = C_0 + C_d \tag{2}$$

式中: C_0 为上部结构的阻尼矩阵; C_d 为隔震层的附加阻尼。

$C_0 = \alpha M + \beta K$, 其中: $\begin{Bmatrix} \alpha \\ \beta \end{Bmatrix} = \frac{2\xi}{\omega_i + \omega_j} \begin{Bmatrix} \omega_i \omega_j \\ 1 \end{Bmatrix}$,

$\begin{Bmatrix} \alpha_0 \\ \beta_0 \end{Bmatrix} = \frac{2\xi_b}{\omega_i + \omega_j} \begin{Bmatrix} \omega_i \omega_j \\ 1 \end{Bmatrix}$, ξ, ξ_b 分别表示上部结构的阻尼比和隔震层的阻尼比, ω_i, ω_j 为结构的第 i, j 阶圆频率。

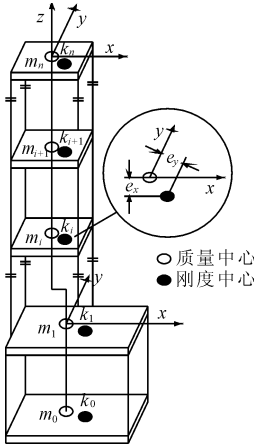


图 1 大底盘结构分析模型

3 隔震分析模型和合理性验证

3.1 隔震分析模型

选取一个典型的塔楼偏置的大底盘结构,其大底盘长向为 6 跨,短向为 4 跨,4 层,层高为 4.9 m;塔楼长向为 4 跨,短向为 2 跨,8 层,层高为 3.5 m,柱网尺寸如图 2 所示,总高度为 47.6 m。主要设计信息有:设防烈度 8 度(0.2g),场地类别 II 类,特征周期 0.35 s,各楼层楼面恒荷载 3.5 kN/m²,活荷载 2.5 kN/m²;主要框架柱尺寸 700 mm × 700 mm(大底盘),500 mm × 500 mm(塔楼);框架梁 300 mm × 700 mm;混凝土强度等级 C35;隔震层楼板厚度 160 mm,其余为 120 mm。

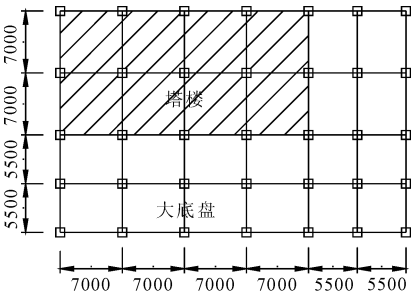


图 2 典型结构柱网平面图

为了延续作者所在课题组对大底盘隔震结构的研究,后期将进行模拟振动台试验,受振动台尺寸限制,试验模型采用 1/7 的缩尺模型,大底盘 4 层简化为 2 层,塔楼 8 层简化为 4 层,缩尺后的基础隔震结构模型尺寸如图 3 所示,图 3(a)分为 6 层是表示模型实际楼层数;图 3(b)分为 8 层,目的是为了表示试验测试结果所划分的层数。隔震支座布置如图 4 所示。隔震支座设计参数如表 2 所示。

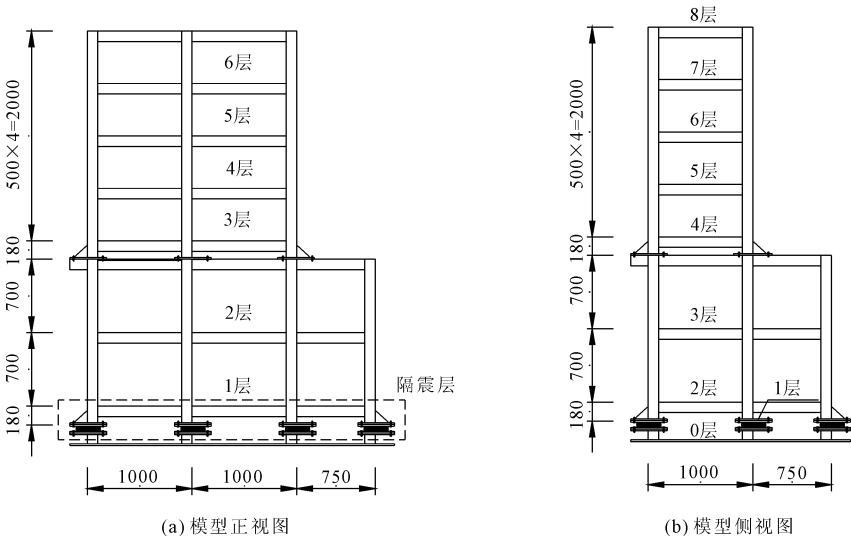


图 3 试验用缩尺模型

表 2 隔震支座参数

型号	剪切模量 /MPa	有效直径 /mm	第一形状 系数 S_1	第二形状 系数 S_2	支座有效 面积 /mm ²	竖向压缩 刚度 /(kN·mm ⁻¹)	屈服前 刚度 (kN·mm ⁻¹)	水平等效 刚度 $\gamma=100\%$ /(kN·mm ⁻¹)	屈服力 /kN	屈服后 刚度 /(kN·mm ⁻¹)
LNR100	0.45	100	12.5	5.6	7850	174.4	—	0.16	—	—
LRB100	0.45	100	12.5	5.6	7850	199.4	1.658	0.21	2.03	0.166

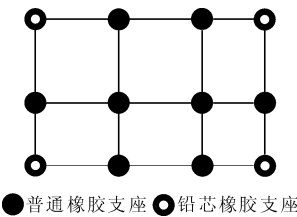


图 4 隔震支座布置

采用 ETABS 软件建立结构数值分析模型见图 5。混凝土楼板采用分层壳单元模拟,混凝土梁、柱采用空间杆系单元模拟,隔震支座采用 Isolator1 连接单元模拟。LNR 采用线弹性模型,水平向控制参数用等效刚度描述;LRB 采用空间双向简化 Bouc – Wen 模型,水平向控制参数有屈服前、后刚度和屈服力;取两种支座竖向拉压刚度相等。

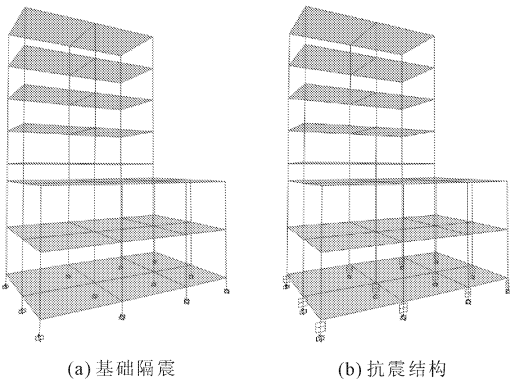


图 5 有限元分析模型

3.2 模型合理性验证

进行振动台试验时输入白噪声(0.10g)测试两种结构自振周期,表 3 为试验与数值分析结果的对比。

表 3 试验和数值分析的自振周期对比

特征值	抗震模型 自振周期/s	基础隔震模型 自振周期/s
试验值	0.255	0.683
模拟值	0.276	0.706
误差/%	7.60	3.30

从表 3 得出抗震模型试验与数值结果误差为 7.60%,隔震模型试验与数值结果误差为 3.30%,说明两种模型的吻合度较好。数值模型合理可进行后续分析。

4 结构非线性响应分析结果

由于远场地震动加速度峰值普遍较小,因此有限元分析时将远场地震动峰值设置为 0.1 g 和 0.2 g,近场地震动设置为 0.2 g 和 0.4 g,地震波双向输入, x 、 y 向加速度峰值比例为 0.85: 1。由于篇幅有限,且 x 向和 y 向结构非线性响应规律一致,因此仅列出峰值加速度 0.2 g 时结构 y 向的分析结果。

4.1 顶层加速度响应

图 6 是基础隔震结构和抗震结构分别在近场普通地震动 ELC180、近场脉冲地震动 TCU052、远场普通地震动 H05000 和远场谐和地震动 ILA056N 下的 y 向顶层加速度对比。

由图 6 可知,普通地震动下基础隔震结构减震效果良好,顶层加速度响应大幅度降低。但近场脉冲地震动下,前段隔震结构顶层加速度虽有降低,但脉冲效应增大,后期与抗震结构没有差别;远场谐和地震动下,前期隔震结构顶层加速度也有所降低,但后期反而比抗震结构增大不少。说明在长周期地震动下,隔震结构在长周期分量高的时间段产生明显共振响应,增大加速度响应,降低减震效果。

4.2 层剪力响应

图 7 和图 8 分别是近场地震动和远场地震动下层剪力响应对比图。表 4 是远场地震动和近场地震动下层剪力减震率。

以下所有图形的楼层表达如图 3(b)所示,分为 8 层,0 代表基础固端(振动台台面);1 代表隔震层隔震支座顶面;2 代表第 1 层;3 ~ 7 分别代表第 2 ~ 6 层;8 代表顶层。

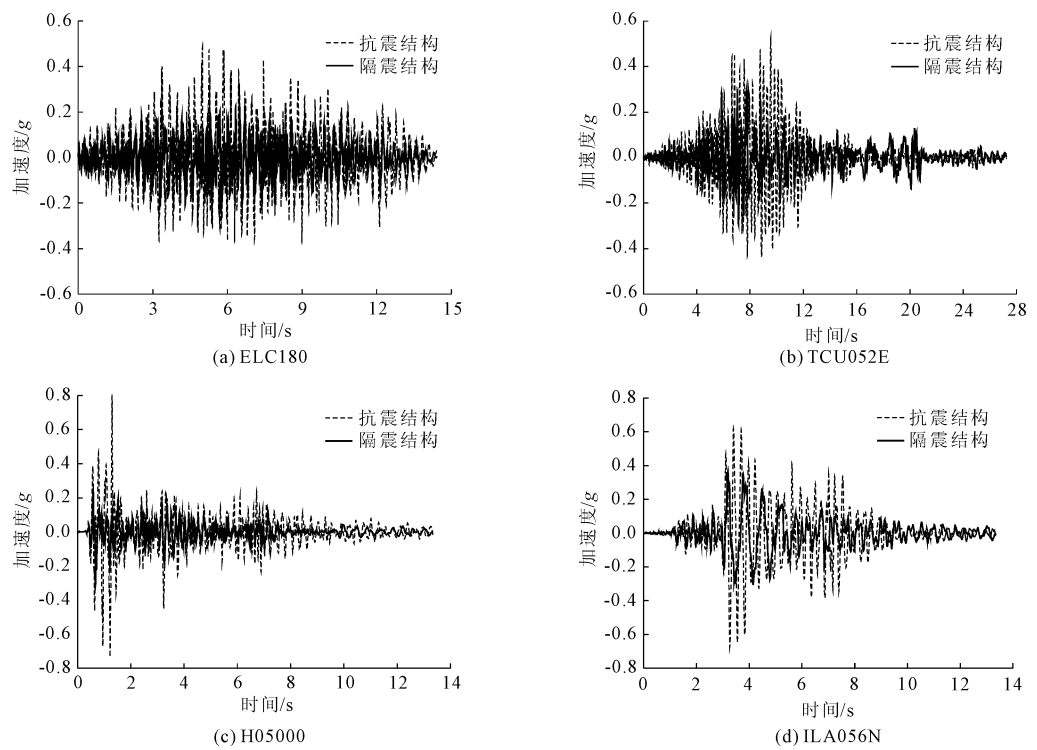


图 6 顶层加速度对比

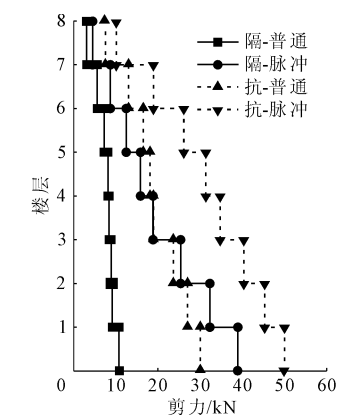


图 7 近场地震动下楼层剪力对比

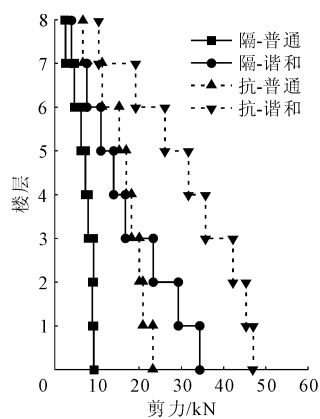


图 8 远场地震动下楼层剪力对比

表 4 层剪力减震率

地震类型	层剪力减震率/%							
	1 层	2 层	3 层	4 层	5 层	6 层	7 层	8 层
近场普通	64.11	66.24	62.40	55.75	55.14	56.26	57.35	58.83
近场脉冲	22.15	28.70	37.22	45.85	49.52	52.27	54.13	55.46
远场普通	60.17	57.40	54.03	56.42	57.13	59.21	58.47	61.49
远场谐和	26.94	35.43	44.71	53.21	55.92	58.07	60.44	61.98

由图 7、图 8 和表 4 可知,不管是在近场脉冲或远场谐和地震动下,隔震结构和抗震结构的底层剪力均远大于普通地震动,约为普通地震动下的 2 倍左右。在近场普通和远场普通地震动下,隔震结构减震效果良好,减震率均达到 55% ~ 70%,但近场脉冲和远场谐和地震动下隔震效果下降,尤其在大

底盘楼层减震率仅为 30% 左右。

4.3 楼层位移响应

图 9 和图 10 分别是近场地震动(0.4 g)和远场地震动(0.2 g)下 y 向楼层位移对比图。由图 9 和图 10 可知,抗震结构的楼层位移随楼层缓慢增长,在底盘与塔楼交界处出现较大幅度增长;在普通地

震动下,基础隔震结构减震效果良好,楼层位移主要集中在隔震层,上部结构几乎为平动;不管是在近场脉冲或在远场谐和地震动下,隔震结构楼层位移均大于普通地震动;远场谐和地震动($0.2g$)下,隔震层 y 向位移约为普通地震动下位移的 7 倍。近场脉冲地震动($0.4g$)下,隔震层 y 向位移超限,约为普通地震动位移的 6 倍,远大于《抗规》中的近场影响系数 1.5。说明长周期地震动对隔震层造成极大影响。而现有规范缺乏对长周期地震动的考量。

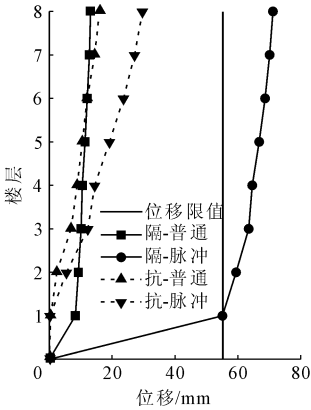


图 9 近场地震动下楼层位移对比

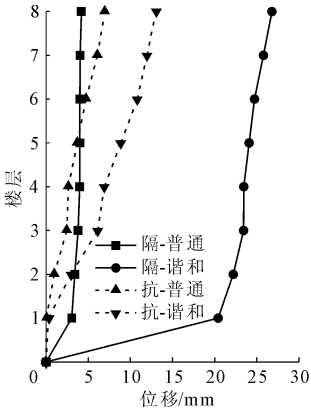


图 10 远场地震动下楼层位移对比

为突出长周期地震动对结构响应的影响,图 11 和图 12 分别是 8 度设防脉冲地震动工况(峰值加速度为 $0.2g$)与 8 度罕遇普通地震动工况(峰值加速度为 $0.4g$)、8 度多遇普通地震动工况(峰值加速度为 $0.1g$)与 8 度设防谐和地震动工况(峰值加速度为 $0.2g$) y 向位移对比。

由图 11 和图 12 得,抗震结构在脉冲地震动下的结构位移(8 度设防)与普通地震动下(8 度罕遇)响应接近。基础隔震结构在 8 度设防脉冲地震动下的位移响应为 8 度罕遇普通地震动下位移响应的 3.4 倍左右。抗震结构在谐和地震动的结构位移(8 度多遇)与普通地震动下(8 度设防)响应接近。基础隔震结构在 8 度多遇谐和地震动下的位移响应为

8 度设防普通地震动下位移响应的 2.5 倍左右。说明长周期地震动的能量巨大,对结构安全十分不利。规范对于地震烈度的划分不适用于长周期地震动,尤其对于基础隔震结构来说,按照传统设计方法进行隔震设计的结构,在长周期地震动下,会造成隔震层超限、隔震结构整体倒塌破坏。

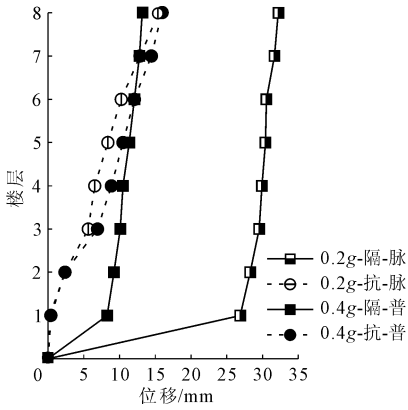


图 11 近场地震动下层间位移角对比

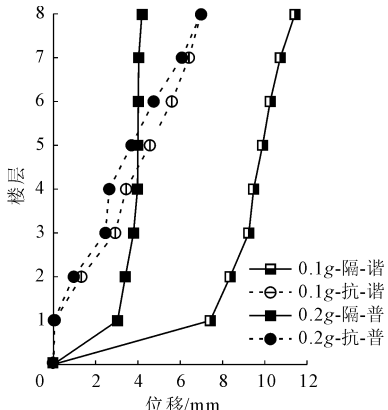


图 12 远场地震动下层间位移角对比

4.4 层间位移角响应

图 13 和图 14 分别是近场地震动和远场地震动下层间位移角响应对比图。考虑到由于隔震层位移较大,且隔震层高度较小,导致隔震结构底层层间位移角较大,无实际对比意义。因此从 2 层开始进行对比。

由图 13 和图 14 得,两种结构在近场脉冲和远场谐和地震动下的层间位移角均大于普通地震动。普通地震动下基础隔震结构隔震效果良好,能有效降低层间位移角,使其小于《抗规》限值。但在近场脉冲和远场谐和地震动下,抗震结构层间位移角基本超限,而隔震结构减震效果降低,层间位移角同样超限,尤其大底盘楼层层间位移角较大,存在安全隐患。

4.5 楼层扭矩分析

图 15 和图 16 分别是近场地震动和远场地震动下楼层扭矩对比图。

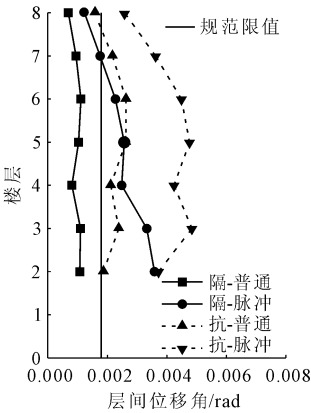


图 13 近场地震动下层间位移角对比

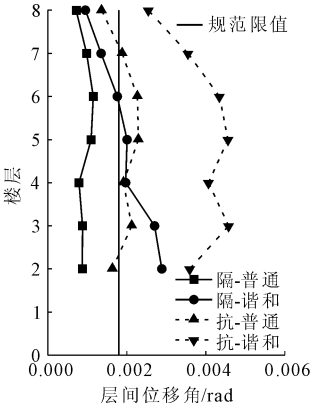


图 14 远场地震动下层间位移角对比

由图 15 和图 16 可知,结构扭矩由底部向上部结构逐渐减小。普通地震动下,基础隔震结构能较好降低结构扭矩,但是在近场脉冲或远场谐和地震动下,结构的扭矩均大于普通地震动,说明长周期地震动下,大底盘扭矩减震效果差。

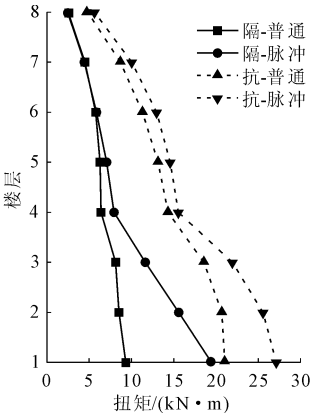


图 15 近场地震动下楼层扭矩对比

4.6 楼层位移比

根据《高层建筑混凝土结构技术规程》^[17] (JGJ3—2010)规定,高层建筑位移比不宜大于该楼层 1.2 倍(均值),且应小于 1.5 倍(均值),因此对楼层位移比的控制可达到降低结构扭转效应。图

17 和图 18 分别是近场地震动和远场地震动下楼层位移对比图。由于抗震结构没有隔震层将其舍去,只取上部结构楼层进行对比。

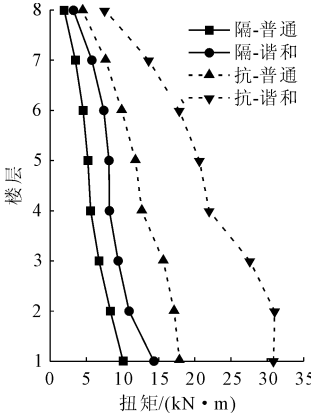


图 16 远场地震动下楼层扭矩对比

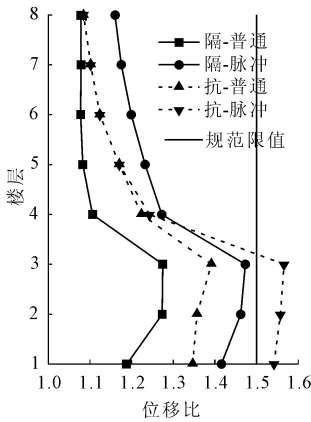


图 17 近场地震动下楼层位移比

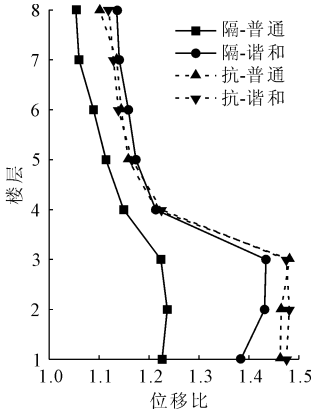


图 18 远场地震动下楼层位移比

由图 17 和图 18 可知,抗震结构塔楼质量中心与大底盘质量中心存在偏心,基础隔震结构质量中心与隔震层刚度中心也存在偏心,因此大底盘结构底部存在明显的扭转效应。普通地震动下基础隔震结构减震效果良好,在一定程度上能够降低大底盘的平扭耦合效应,使楼层位移比在 1.2 左右。但是不管是近场脉冲或远场谐和地震动下,隔震结构减

震效果降低,使得底部扭转效应有所放大,大底盘楼层位移比在1.5左右,扭转效应明显。

5 结 论

(1) 长周期作用下基础隔震结构减震效果比普通地震动下差。长周期地震动下,大底盘楼层的减震效果较塔楼明显降低,设防烈度下层间位移角超限,罕遇烈度下隔震层位移超限。

(2) 基础隔震结构能够降低大底盘结构的平-扭转耦合效应。长周期地震动相比较于普通地震动下,扭转响应增大。大底盘扭转响应大于塔楼,扭转响应最大处在大底盘顶层。

(3) 基础隔震结构与长周期地震动产生共振效应,使得基础隔震结构响应的增长幅度大于抗震结构。建议我国抗震规范针对建筑结构增加长周期地震动影响系数的取值。

(4) 隔震结构楼层位移均大于普通地震动,特别是隔震层位移超限严重,应考虑采取限位装置和措施。

参考文献:

- [1] 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [2] 潘 毅,时胜杰,常志旺,等. 近断层脉冲地震动对基础隔震结构放大效应的量化分析[J]. 土木工程学报,2018,51(11):8-16.
- [3] 韩 森,张文会,朱爱东,等. 不同层隔震结构在近断层地震作用下动力响应分析[J]. 振动与冲击,2016,35(5):120-124.
- [4] 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.
- [5] Koketsu Kazuki, Miyake Hiroe. A seismological overview of long-period ground motion[J]. Journal of Seismology,

2008,12(2):133-143.

- [6] Chung Y, Nagae T, Fukuyama K, et al. Seismic resistance capacity of high-rise buildings subjected to long-period ground motions: E-defense shaking table test[J]. Journal of Structural Engineering, 2010,136(6):637-644.
- [7] 王亚楠,杜永峰,胡高兴. 远场长周期地震动作用下隔震结构的抗震性能及控制措施研究[J]. 特种结构,2017,34(5):110-115.
- [8] 王亚楠,杜永峰,胡高兴,等. 远场地震动长周期特性对基础隔震结构地震响应影响研究[J]. 世界地震工程,2017,33(4):68-75.
- [9] 叶 昆. 近断层脉冲型地震作用下 LRB 基础隔震结构地震响应研究[D]. 武汉:华中科技大学,2008.
- [10] 吴应雄,颜桂云,石文龙,等. 长周期地震动作用下高层隔震结构减震性能试验研究[J]. 振动工程学报,2017,30(5):806-816.
- [11] 江宜城,唐家祥. 单轴偏心的单层隔震框架结构地震扭转反应分析[J]. 世界地震工程,1999(4):57-61.
- [12] 赵 楠,马 凯,李 婷,等. 大底盘多塔高层隔震结构的地震响应[J]. 土木工程学报,2010,43(S1):255-258.
- [13] 杜永峰,徐天妮,洪 娜. 不同震源机制的近断层脉冲型地震动频谱特性及强度指标研究[J]. 土木工程学报,2017,50(5):81-87.
- [14] 李诚凯. 大底盘单塔楼隔震结构振动台试验研究[D]. 福州:福州大学,2016.
- [15] 吴应雄,陆剑峰,赵 欣,等. 大底盘层间隔震模型试验与平-扭转耦合效应分析[J]. 工程科学与技术,2018,50(6):48-55.
- [16] 李英民,赵晨晓,谭 潜. 基于 HHT 地震动分量分离的长周期地震动界定方法[J]. 振动与冲击,2018,37(7):164-171,219.
- [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.