

基于地震动加速度反应谱的三维隔震结构 摇摆性能研究

石运东^{1,2}, 王宇辰¹, 王旋¹, 丁阳^{1,2}, 李忠献^{1,2}

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300350; 2. 天津大学滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300350)

摘要: 三维隔震结构在地震作用下存在显著的摇摆现象, 影响三维隔震技术的隔震效果。而不同类型的地震动作用对三维隔震结构的摇摆特性影响不同。由此提出一种基于地震动竖向与水平向加速度反应谱谱值之比对三维隔震结构摇摆性能进行评估的方法, 并利用有限元模拟进行验证。基于 1567 条不同类型的地震动记录, 分析不同震源机制、震中距、场地类型对三维隔震结构摇摆特性的影响规律。结果表明, 震源机制、震中距、场地条件对三维隔震结构摇摆的影响显著。当不同地震动作用调幅后结构竖向加速度响应相同时, 在典型三维隔震结构隔震周期范围内(水平向 2.0~5.0 s, 竖向 0.3~1.0 s), 逆断层和走滑断层地震动相比正断层地震动所造成的三维隔震结构摇摆角更大; 远场地震动相比近场地震动所造成的三维隔震结构摇摆角更大; 地震动在软土地场条件下相比其在硬土地场条件下所造成的三维隔震结构摇摆角更大。

关键词: 三维隔震; 摇摆角; 加速度反应谱; 震源机制; 场地条件

中图分类号: TU352.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2023)02-0400-10

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2023.02.011

引言

传统建筑结构抗震观点认为, 对结构造成破坏的主要因素是水平地震作用, 竖向地震作用对结构的破坏程度远弱于水平地震作用, 因此传统的结构隔震研究主要关注水平隔震。然而, 研究表明在某些条件下竖向地震的作用往往是不可忽略的。如逆断层、正断层地区以及软土地场地的地震竖向峰值加速度与水平向峰值加速度之比均有较大概率大于 2/3^[1-2]。强震观测记录表明, 部分地震的竖向加速度幅值甚至超过其水平加速度幅值^[3], 如 1995 年的 Kobe 地震以及 2010 年的 Darfield 地震。另外, 理论与实际震害调查发现, 地震中某些结构虽然并未发生严重破坏, 但竖向地震作用可能造成内部非结构物的严重损坏, 从而导致结构重要功能缺失并引发进一步的损失, 甚至阻碍地震中人类的逃生^[4]。因此, 对结构竖向震动的控制十分重要。

为了进一步降低结构竖向响应, 近些年来学者们研发了多种三维隔震支座, 并在部分实际工程中进行了应用。三维隔震支座一般由水平和竖向隔震支座组合而成, 多应用于结构基础。研究表明,

三维隔震技术具有优异的三维隔震效果^[5-7]。然而, 由于三维隔震支座的竖向刚度较低, 在地震作用下其上部结构将发生摇摆。结构摇摆现象将增加三维隔震结构隔震层的倾覆力矩, 进而导致隔震支座产生过大的拉伸变形, 甚至导致隔震支座的整体破坏。因此, 三维隔震结构在地震作用下的摇摆对三维隔震技术的发展和影响造成了较大的限制和影响。三维隔震结构的摇摆响应一方面与结构自身参数有关, 另一方面也与地震动特性密切相关。目前, 国内外学者对三维隔震结构摇摆性能的研究工作主要集中于抗摇摆装置的研发^[8-9], 以及结构高宽比、隔震周期、结构水平和竖向刚度比等隔震结构自身的参数与特性对结构摇摆性能的影响^[10-12], 而关于地震动特性对三维隔震结构摇摆性能影响的理论分析及研究相对较少。此外, 由于三维隔震装置构造复杂且造价较高, 开展地震动特性对三维隔震结构摇摆性能的影响研究有利于合理、经济、高效地应用三维隔震技术以及制定相应的摇摆控制策略。

与三维隔震结构摇摆性能相关的地震动特性较为复杂, 包括地震动幅值、频率、持时以及三向地震分量的相互关系等, 受到震源机制、场地类型以及震中距等多种地震动参数的影响。郭明珠等^[13]指出,

收稿日期: 2021-08-09; **修订日期:** 2021-12-31

基金项目: 土木工程防灾国家重点实验室开放课题基金资助项目(SLDRCE18-03); 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项资助项目(2019EEVL0302); 国家自然科学基金资助项目(51978463)。

正断层地震相较于走滑断层地震具有更高的卓越频率。王海云等^[14]的研究结果表明,断层距在 20 km 以内的近断层地震具有较大的竖向地震动幅值,远场地震动竖向分量较小。Ambraseys 等^[15]指出,与远场竖向地震动相比,近断层竖向地震动含有更多的低频成分,但相对于近断层水平地震动,近断层竖向地震动具有相对较高的频率。李新乐等^[16]指出,震源机制、震中距和场地条件的不同将造成地震动竖向与水平向加速度峰值比的差异,逆断层相较于走滑断层、近场地震动相较于远场地震动的竖向和水平向加速度峰值比更大。杜永峰等^[17]的研究表明,震源机制、震中距以及场地条件对地震动频谱特性存在显著影响,并且不同条件下影响规律不同。

本文结合三维隔震结构二维刚体运动模型,基于不同地震动参数条件下共计 1567 条地震动记录的加速度反应谱,研究并归纳了震源机制、震中距以及场地类型三类地震动参数对三维隔震结构摇摆性能的影响规律。

1 地震动记录及分类

分析中所采用的地震动记录均选自太平洋地震工程研究中心(Pacific Earthquake Engineering Research Center)的地面运动数据库^[18]。根据本文的研究目标,并依据美国地质勘探局(USGS)规定的场地划分标准,按照以下地震动分类规则进行地震动分类:

(1)震源机制划分:正断层、逆断层、走滑断层。逆斜断层和正斜断层分别归入逆断层和正断层。

(2)断层距划分:断层距 $R_b \leq 20$ km 的地震动为近场地震动,断层距 $R_b > 20$ km 的地震动则为远场地震动。

(3)场地划分: $V_{30} \leq 260$ km/s 的场地为软土地, $260 \text{ km/s} < V_{30} \leq 510$ km/s 的场地为中硬土地, $V_{30} > 510$ km/s 的场地为硬土地。其中, V_{30} 为 30 m 覆盖层平均剪切波速。

一共选取了 1567 条不同震源机制、震中距和场地条件下的地震动记录。表 1 给出了不同分类的地震动数量。

2 三维隔震二维刚体运动模型

在对三维隔震结构摇摆特性进行分析时,考虑到结构高阶模态以及水平扭转对结构摇摆特性的影响较小,为了提高分析效率,采用如图 1 所示的简化二维刚体运动模型进行分析^[11,19-20]。既有研究表明,三维隔震结构二维刚体模型能较好地反映三

表 1 选取的地震动记录及分类情况

Tab. 1 Ground motions recording and classification

震中距	震源机制	场地类型	地震动数量
近场	逆断层	软土	26
		中硬土	100
		硬土	95
	正断层	软土	12
		中硬土	97
		硬土	82
	走滑断层	软土	100
		中硬土	100
		硬土	100
	逆断层	软土	99
		中硬土	99
		硬土	100
近场	正断层	软土	72
		中硬土	94
		硬土	98
	走滑断层	软土	97
		中硬土	99
		硬土	97

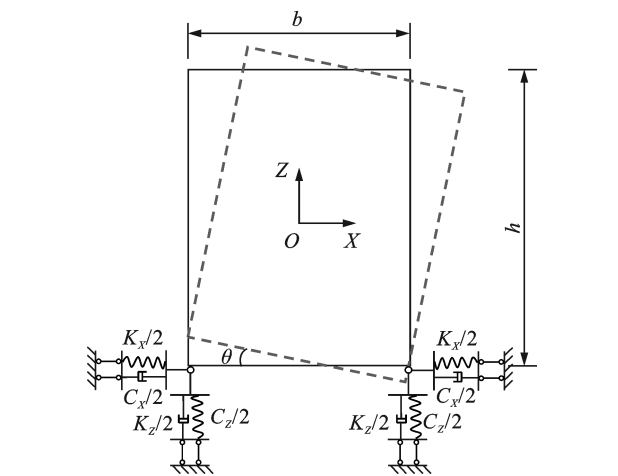


图 1 三维隔震结构二维刚体运动模型

Fig. 1 Motion model of 2D rigid body of 3D isolated structure

维隔震结构动力响应。

该刚体模型的质量为 m ,转动惯量为 I_θ ,质量及转动惯量中心均设于模型几何中心处。隔震支座具有线性刚度以及黏滞阻尼特性。模型设置 2 个水平隔震支座,左右两侧底部角点处分别布置 1 个,其刚度与阻尼元件只在水平向变形。模型设置 2 个竖向隔震支座,左右两侧底部角点处分别布置 1 个,其刚度与阻尼元件只在竖向变形。水平向总刚度、总阻尼分别用 K_x 和 C_x 表示,竖向总刚度、总阻尼分别用 K_z 和 C_z 表示。该二维刚体运动模型为三自由度体系,分别为水平位移 U_x ,竖向位移 U_z 以及结构转角

θ 。根据水平与竖向隔震支座分别只在水平与竖向产生变形的假定,水平与竖向地震动作用下二维刚体模型的运动方程可推导如下式所示:

$$\begin{aligned} m\ddot{U}_X + C_X\dot{U}_X + C_X(h/2)\dot{\theta} + K_X U_X + \\ K_X(h/2)\theta = -m\ddot{U}_{gX}, \\ m\ddot{U}_Z + C_Z\dot{U}_Z + K_Z U_Z = -m\ddot{U}_{gZ}, \\ I_\theta\ddot{\theta} + C_X(h/2)\dot{U}_X + (C_X h^2/4 + C_X b^2/4)\dot{\theta} + \\ K_X(h/2)U_X + (K_X h^2/4 + K_X b^2/4)\theta = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $U_X, \dot{U}_X$ 与 $\ddot{U}_X$ 分别为模型水平向相对位移、相对速度与相对加速度; $U_Z, \dot{U}_Z$ 与 $\ddot{U}_Z$ 分别为模型竖向相对位移、相对速度与相对加速度; $\theta, \dot{\theta}$ 与 $\ddot{\theta}$ 分别为模型转动角度、角速度与角加速度; $\ddot{U}_{gX}$ 与 $\ddot{U}_{gZ}$ 分别为地震动水平和竖向加速度; h 与 b 分别为二维刚体运动模型的高度与宽度。

由式(1)可知,结构的竖向响应独立,与其他两个方向无耦合,而水平响应与摇摆响应存在耦合。对式(1)利用状态空间方法进行求解,得到结构摇摆角 θ 与结构水平绝对加速度响应 $\ddot{U}_X + \ddot{U}_{gX}$ 的关系如下式所示:

$$\left| \frac{\theta}{\ddot{U}_X + \ddot{U}_{gX}} \right| = \left| \frac{mA}{Bs^3 + Cs^2 + Ds + E} \right| \quad (2)$$

式中 s 为拉普拉斯变换中的复参变量。 A, B, C, D, E 如下式所示:

$$\begin{cases} A = C_X(h/2)s + K_X(h/2) \\ B = C_X I_\theta \\ C = C_X^2(b^2/4) + K_X I_\theta \\ D = C_X K_X(b^2/2) \\ E = K_X^2(b^2/4) \end{cases} \quad (3)$$

由式(2)可知,同一地震动输入时结构摇摆角 θ 与结构水平向绝对加速度响应 $\ddot{U}_X + \ddot{U}_{gX}$ 成正比,即结构水平向绝对加速度响应越大时,结构的摇摆角越大。

3 基于地震动加速度反应谱的三维隔震结构摇摆特性分析方法

由前节可知,三维隔震结构的摇摆角响应与结构水平向绝对加速度响应成正比例关系。因此可通过评价地震动作用下结构在水平向的绝对加速度响应代替对结构摇摆角的评价。在传统抗震设计分析中,一般用地震动的水平向加速度反应谱表示结构在水平向的绝对加速度响应。然而,由于三维隔震结构存在摇摆运动,并且摇摆运动与水平平动存在耦合,结构的水平向加速度响应受水平平动和摇摆运动的共同影响。因此,根据单自由度模型计算得到的地震动水平向加速度反应谱可能不能准确模拟考虑摇摆运动的三自由度二维刚体运动模型的水平

向绝对加速度响应。

既有研究表明,在典型的三维隔震结构隔震周期范围内(水平向 2.0~5.0 s, 竖向 0.3~1.0 s^[20-21]), 竖向和水平向隔震周期的比值接近或小于 1/3, 三维隔震结构水平平动和摇摆运动的耦合较弱^[11,20]。此时,可通过地震动水平向加速度反应谱近似表示结构水平向绝对加速度响应。因此,在典型的三维隔震结构隔震周期范围内,二维刚体运动模型的竖向与水平绝对加速度响应可以由结构竖向与水平基础自振周期所对应的地震动加速度反应谱分别评价,而结构的摇摆角响应可以通过地震动的水平向加速度反应谱进行评价。

地震动调幅时以结构的竖向或者水平向模态周期所对应的竖向或水平向地震动加速度反应谱谱值相同作为条件进行地震动调幅^[22-23]。

为了避免大量调幅,本文将基于地震动的竖向和水平向加速度反应谱谱值之比进行研究。针对同一地震动,其竖向和水平向加速度反应谱谱值之比为定值,不随地震动幅值的调幅而发生改变。图2给出了地震动竖向和水平向加速度反应谱谱值之比 S_{az}/S_{ax} 随结构水平和竖向自振周期 T_X 与 T_Z 的分布示意图。值得注意的是,由于结构的摇摆特性影响结构的水平向模态周期,图2所示 T_X 实际为考虑水平与摇摆运动耦合的结构第一阶模态周期。

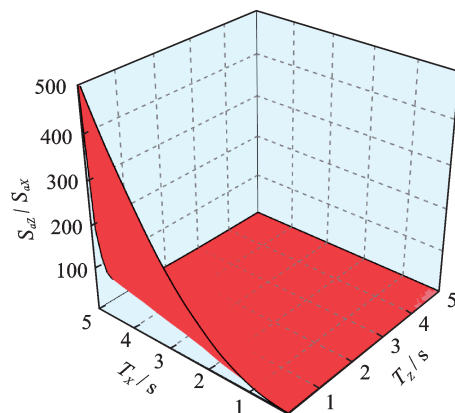


图2 地震动竖向和水平加速度反应谱谱值之比三维曲面
Fig.2 3D surface of vertical and horizontal acceleration response spectra ratio of a ground motion

将不同类型地震动(如不同震源机制)的竖向和水平加速度反应谱谱值之比随结构两向自振周期的分布曲面绘于同一个三维空间坐标系内时,不同类型地震动谱值之比的分布曲面可能存在相交的情况。假设存在三种不同类型的地震动,三类地震动的谱值之比分布曲面如图3所示。

图3中不同颜色代表不同类型的地震动,在一定的竖向与水平向隔震周期时,不同类型之间,竖向坐标值(S_{az}/S_{ax})越大的地震动,在竖向加速

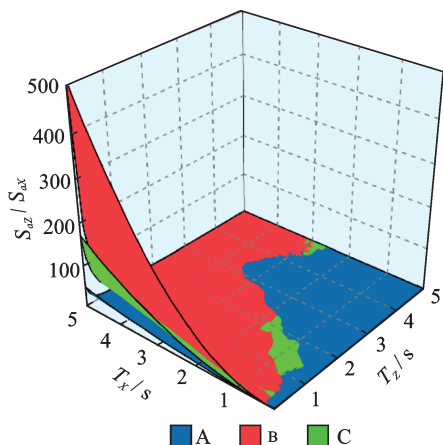


图3 不同类型地震动竖向和水平向谱值之比三维曲面

Fig. 3 3D surface of vertical and horizontal acceleration response spectra ratio of different types of ground motions

度反应谱谱值(S_{az})相同时,水平加速度反应谱谱值(S_{ax})越小,此时结构的摇摆角越小。为了便于判断,图4(a)给出了图3所示三维图形的俯视图。当只存在两种类型的地震动时,三维图中两个曲面存在上下之分。俯视图可见三维图中反应谱谱值较大的曲面。图4(a)中不同颜色区域分别表示该颜色所代表的地震动类型在该颜色所覆盖的结构自振周期范围内具有较大的 S_{az}/S_{ax} 比值,而另一类型地震动的 S_{az}/S_{ax} 比值则在该自振周期范围内较小。然而,当存在两种以上分组的地震动时,三维图中三个曲面存在上中下之分。俯视图只能反映不同类型地震动竖向和水平向加速度反应谱谱值之比最大值的分布情况,而无法反映最小值的分布情况。因此,当地震动类型数量超过两类时,需同时给出竖向和水平加速度反应谱谱值之比的俯视图和仰视图,如图4(a)与(b)所示。仰视图上的不同颜色区域分别表示该颜色所代表的地震动在该颜色所覆盖的结构自振周期范围内具有较小的 S_{az}/S_{ax} 比值。

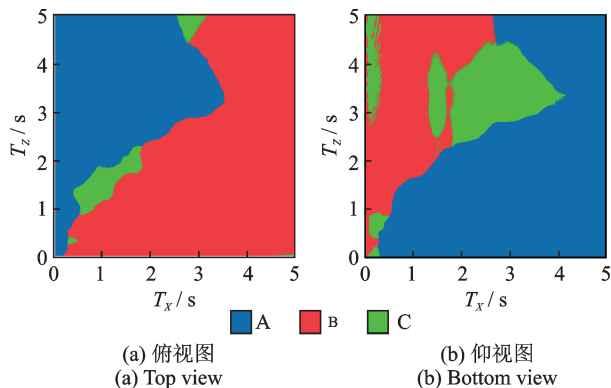


图4 竖向和水平向加速度反应谱谱值之比三维曲面俯视图及仰视图

Fig. 4 Top views and bottom views of the 3D surface of vertical and horizontal acceleration response spectra ratio

4 不同地震动特性对结构摇摆性能的影响分析

针对不同地震动参数对三维隔震结构摇摆角的影响规律进行分析。取结构水平和竖向的阻尼比均为 $0.05^{[24]}$,对所收集的不同震源机制、震中距、场地条件的1567条地震动记录进行了不同结构自振周期时竖向和水平向加速度反应谱谱值之比的计算。分为三组工况:(1)相同震中距、场地,不同震源机制;(2)相同场地、震源机制,不同震中距;(3)相同震源机制、震中距,不同场地条件。绘制了不同分组条件下的平均竖向和水平向加速度反应谱谱值之比的三维分布曲面的俯视图和仰视图。考虑三维隔震结构的典型隔震周期为水平向 $2.0\sim 5.0$ s,竖向 $0.3\sim 1.0$ s,将此周期范围标于图中。

4.1 震源机制对结构摇摆性能的影响

相同震中距、场地,不同震源机制时地震动竖向和水平向加速度反应谱谱值之比曲面的俯视图和仰视图如图5,6所示。

由图5,6可知,在典型三维隔震周期范围内(如图中虚线框所示),当结构竖向响应相同时,在不同震中距和场地条件下,正断层地震动所造成的三维隔震结构摇摆角均为最小(仰视图,红色);逆断层地震动在软土和近场中硬土条件下造成的摇摆角较大(俯视图,蓝色)。随震中距的增加以及场地剪切波速的提高,走滑断层地震动所造成的结构摇摆角逐渐超过逆断层,成为最大(仰视图,绿色)。这是因为正断层地震动相较于走滑断层和逆断层地震动具有更大的竖向分量^[25],从而导致正断层地震动具有较大的竖向和水平向加速度反应谱谱值之比,而逆断层和走滑断层地震动则具有相对较小的谱值之比。

4.2 震中距对结构摇摆性能的影响

相同震源机制、场地,不同震中距时地震动竖向和水平向加速度反应谱谱值之比三维曲面的俯视图如图7所示。由于此时只有近场远场之分,因此只需要通过俯视图即可辨别影响。由上述不同震中距条件下地震动的竖向和水平向加速度反应谱谱值之比的俯视图可知,在典型三维隔震结构的隔震周期范围内,不同震源机制和场地条件下,当结构的竖向响应相同时,由于近场地震动具有较大的竖向和水平向加速度反应谱谱值之比,因此近场地震动所造成的结构摇摆角一般小于远场地震动(俯视图,浅灰色)。这是因为地震动在传播过程中,由于场地对较高频率的竖向地震动存在滤波作用,导致近场地震动相较于远场

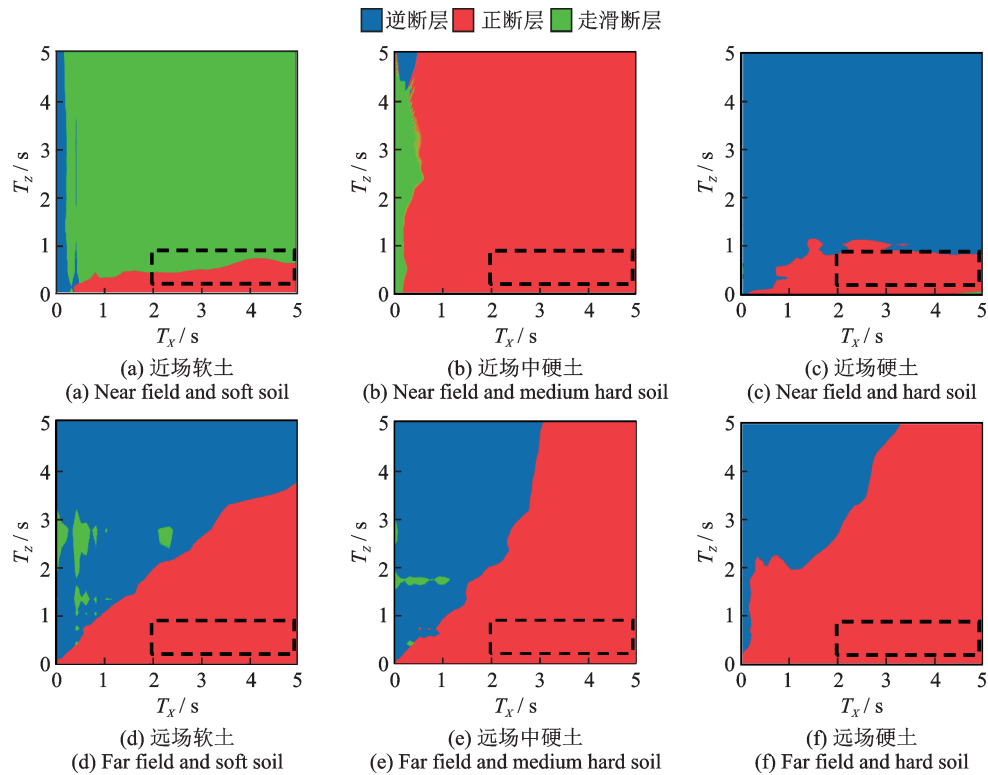


图 5 不同震源机制条件下竖向和水平向加速度反应谱谱值之比俯视图

Fig. 5 Top view of the vertical and horizontal acceleration response spectra ratio under different focal mechanism conditions

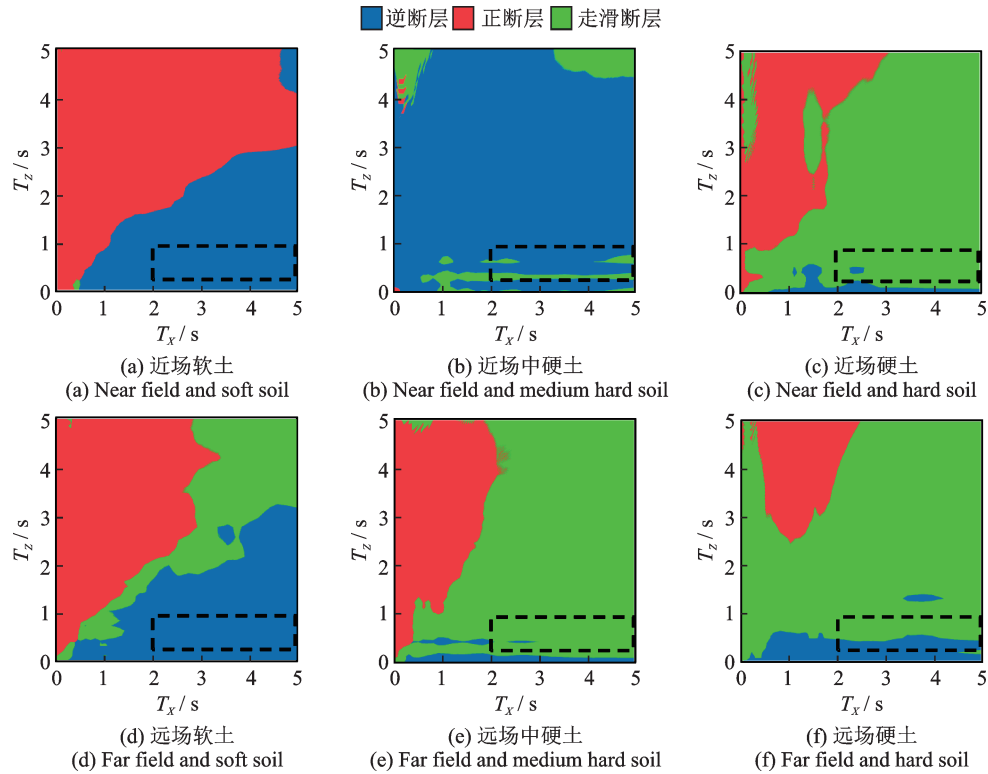


图 6 不同震源机制条件下竖向和水平向加速度反应谱谱值之比仰视图

Fig. 6 Bottom view of the vertical and horizontal acceleration response spectra ratio under different focal mechanism conditions

地震动往往具有更大的竖向分量。因此,近场地震动具有较大的竖向和水平向加速度反应谱谱值之比,而远场地震动则具有较小的谱值之比。

4.3 场地条件对结构摇摆性能的影响

相同震源机制、震中距条件下,不同场地条件时

地震动的竖向和水平向加速度反应谱谱值之比三维曲面的俯视图和仰视图如图 8,9 所示。由图 8,9 可知,在典型三维隔震结构隔震周期范围内,当结构的竖向响应相同时,除了近场正断层和走滑断层,其他条件下硬土地场地震动所造成的结构摇摆角小于场地剪切波速较小的其他两类场地的地震动(图 8,深蓝色、

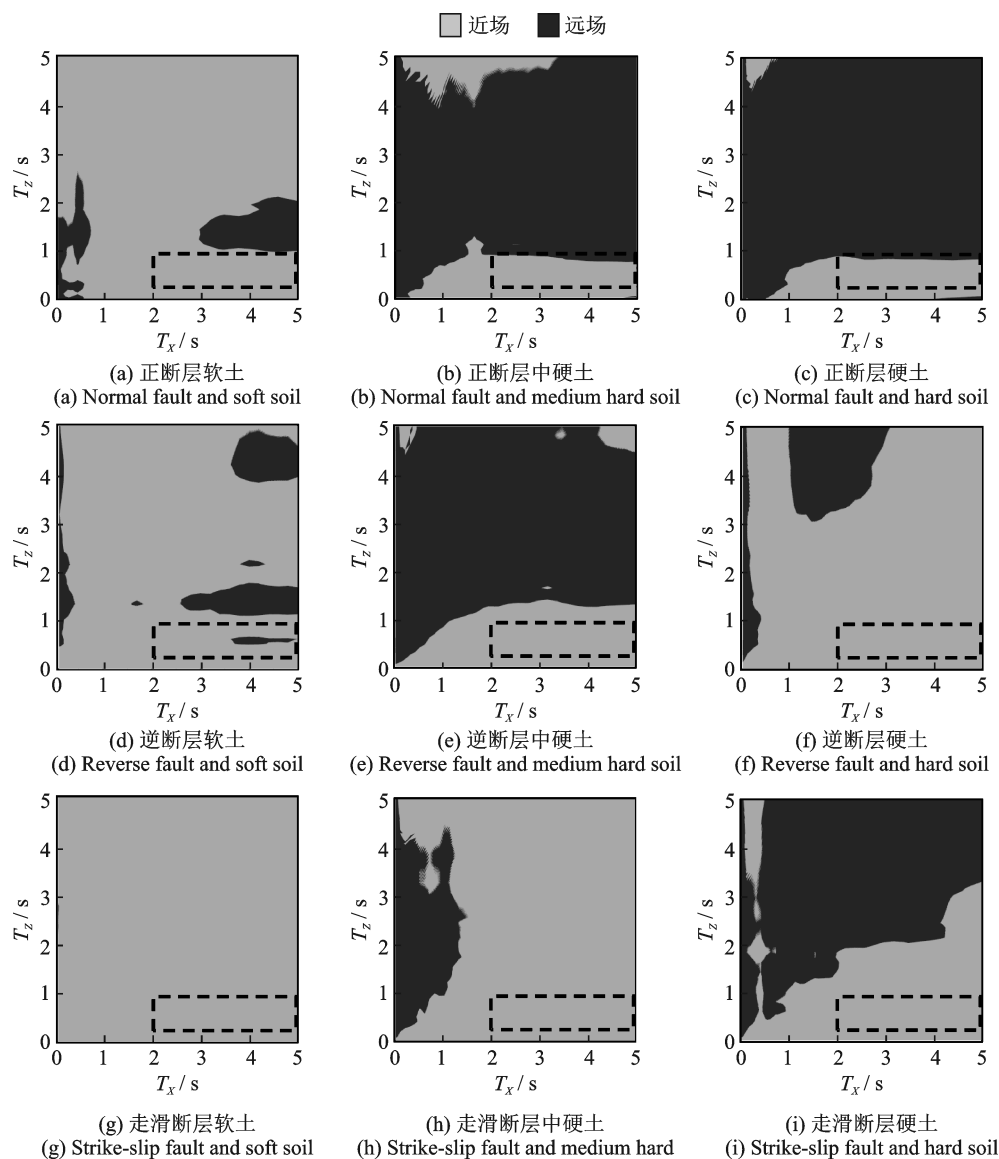


图7 不同震中距条件下竖向和水平向加速度反应谱谱值之比俯视图

Fig. 7 Top view of the vertical and horizontal acceleration response spectra ratio with different epicentral distances

蓝色),软土地地震动所造成的结构摇摆角最大(图9,灰白色)。这是因为软土地对具有较高卓越频率的竖向地震动的滤波作用较大,而硬土地对竖向地震动的滤波作用较小,从而导致硬土地地震动相较于软土地地震动具有更大的竖向分量。因此,硬土地地震动具有较大的竖向和水平向加速度反应谱谱值之比,而软土地地震动具有较小的谱值之比。

5 算例验证

5.1 模型概况

上述方法以及研究结果均是基于刚体简化模型。为进一步验证研究结果在工程结构中的适用性,本文以日本E-Defense在2007年建造测试的两榀四层全尺寸钢结构试验模型^[26]作为无隔震结构原型,设计了三维隔震层并在ABAQUS中进行了有限元建模分析。

原试验结构由空心方钢管柱、H型钢梁以及混凝土板建造而成,实测结构前两阶频率分别为1.25和1.32 Hz^[26]。模拟时,混凝土材料、钢材以及隔震支座均采用弹性本构模型,混凝土和钢材的杨氏模量分别取为30和210 GPa。针对此结构(无隔震)的有限元模拟显示,模型前两阶频率分析结果分别为1.17和1.27 Hz,和实测结果的误差分别为5.0%和3.8%。

在无隔震模型的基础之上,通过在各框架柱底增加三维隔震支座,建立了三维隔震框架结构模型。隔震层的高度取为1 m。三维隔震结构在水平向与竖向的隔震周期设计值分别为3与0.5 s。隔震支座刚度由结构质量与三向隔震设计周期计算得到。隔震层在三向的阻尼比均取为0.2。结构材料阻尼采用瑞利阻尼进行模拟,阻尼比 $\zeta=0.05$,以无隔震结构的第一和第二阶频率计算瑞利阻尼参数。增设三维隔震层后结构总高15.375 m,短边长6 m,长边长

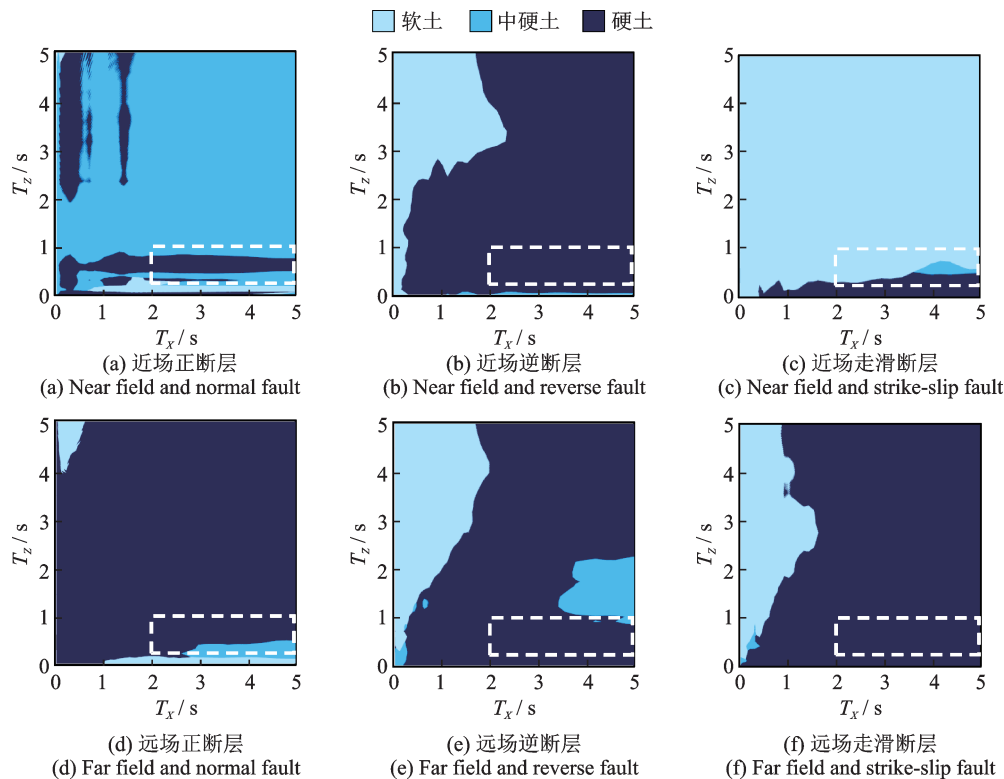


图 8 不同场地条件下竖向和水平向加速度反应谱谱值之比俯视图

Fig. 8 Top view of the vertical and horizontal acceleration response spectra ratio with different soil conditions

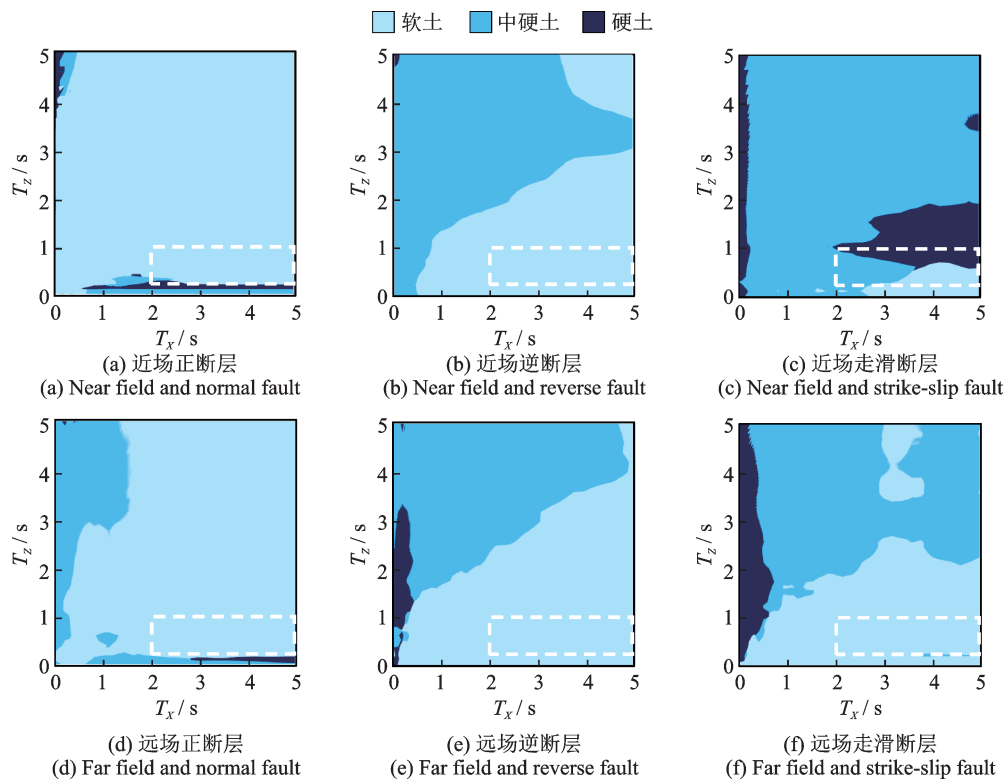


图 9 不同场地条件下竖向和水平向加速度反应谱谱值之比仰视图

Fig. 9 Bottom view of the vertical and horizontal acceleration response spectra ratio with different soil conditions

10 m。三维隔震结构的有限元模型如图 10 所示。X 向为结构的长边方向,Y 向为结构的短边方向,Z 向为结构的竖向。

经过有限元频率分析,三维隔震框架结构在水平向和竖向的实际隔震周期分别为 3.3 和 0.51 s。

5.2 地震动选取及调幅

在近场软土条件下分别选取了震源机制为正断层、逆断层、走滑断层的地震动各 10 条进行有限元计算。分析时,不同地震动在结构竖向自振周期处



图10 三维隔震框架结构有限元模型(单位:m)

Fig. 10 Finite element model of 3D isolated frame structure (Unit: m)

的竖向加速度反应谱谱值设为 1 m/s^2 。调幅后,不同震源机制的地震动的水平向和竖向平均加速度反应谱如图11所示。

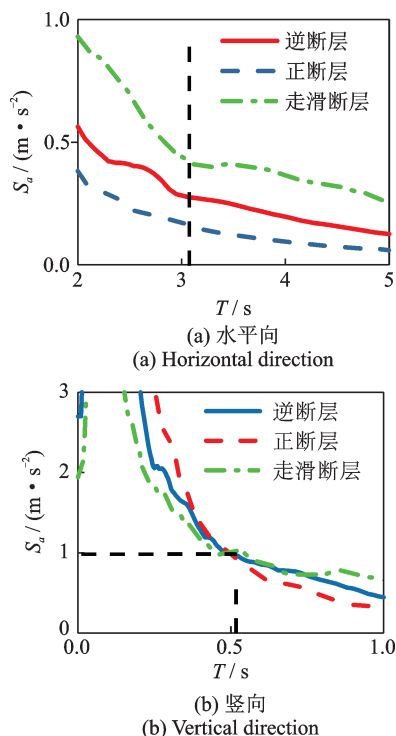


图11 所选地震动水平和竖向加速度反应谱

Fig. 11 The vertical and horizontal acceleration response spectra of selected ground motions

所选取三类地震动的平均竖向和水平向加速度反应谱谱值之比三维曲面的俯视图和仰视图如图12所示,结构自振周期在图中以虚线标出。

5.3 结构摇摆性能分析

根据前述三维隔震结构摇摆性能评估方法,由图12可判断走滑断层地震动导致的结构摇摆角较大,逆断层地震动次之,正断层地震动导致的摇摆角最小。

在利用有限元方法对结构摇摆性能进行直接分

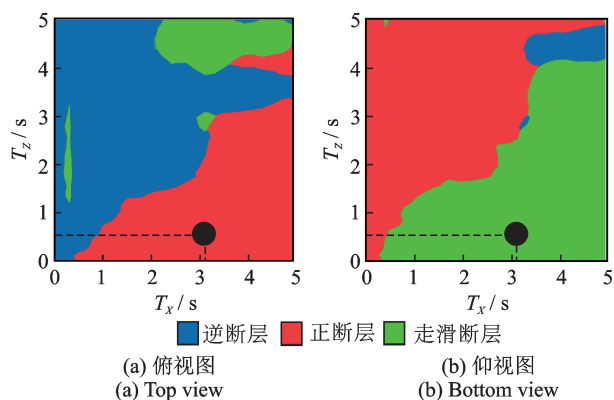


图12 所选地震动竖向和水平向加速度反应谱谱值之比

Fig. 12 The vertical and horizontal acceleration response spectra ratio of selected ground motions

析时,三维隔震结构的摇摆由隔震层处所产生的摇摆角表示。当摇摆角较小时,可近似由三维隔震结构位于结构两端的两个隔震支座的竖向位移差与两个隔震支座之间的距离的比值来表示。提取有限元计算结果并进行计算后,得到不同震源机制的地震动作用下,隔震层的平均摇摆角大小及其对比情况如图13所示。

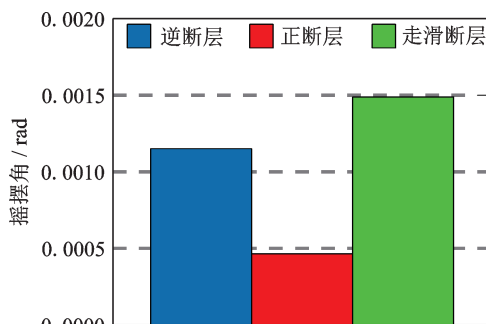


图13 不同震源机制地震动作用下隔震层平均摇摆角

Fig. 13 The average rocking angle of isolation layer under different focal mechanism conditions

由图13可知,走滑断层地震动作用下结构摇摆角最大,逆断层地震动次之,正断层地震动作用下最小,这与图12由所选取地震动竖向和水平向加速度反应谱谱值之比三维曲面的俯视图和仰视图所反映的规律相吻合,验证了基于二维刚体运动模型的三维隔震结构摇摆性能评估方法的适用性。

6 结论

本文提出了一种通过地震动竖向和水平向加速度反应谱谱值之比对三维隔震结构摇摆性能进行评估的方法。基于1567条地震记录及其竖向和水平向加速度反应谱谱值之比,对不同震源机制、震中距、场地类型的地震动作用下三维隔震结构的摇摆性能进行了对比和分析。当不同地震动作用调幅后

结构的竖向加速度响应相同时,在典型三维隔震结构隔震周期范围内(2.0~5.0 s,竖向 0.3~1.0 s),获得了以下结论:

(1)正断层地震动对三维隔震结构所造成的摇摆角最小,逆断层地震动在近场和软土条件下造成的结构摇摆角较大,随着震中距和场地剪切波速的上升,走滑断层地震动对三维隔震结构摇摆响应造成的影响逐渐增加。

(2)近场地震动造成的三维隔震结构摇摆角普遍小于远场地震动。

(3)除了近场正断层和近场走滑断层,软土地条件下地震动所造成的三维隔震结构摇摆角普遍大于硬土地条件下地震动所造成的结构摇摆角。

本文通过有限元方法对所提出的结构摇摆角判断方法进行了验证,有限元结果与所提方法得到的结果相吻合。

参考文献:

- [1] 贺秋梅,闫维明,董娣,等.震源机制和场地条件对近场强震地面运动特性的影响[J].地震研究,2006,29(3):256-263.
He Qiumei, Yan Weiming, Dong Di, et al. Effects of focal mechanism and site condition on ground motion characteristics of strong earthquakes in near field[J]. Journal of Seismological Research, 2006, 29(3): 256-263.
- [2] 贾俊峰,欧进萍.近断层竖向与水平向加速度反应谱比值特征[J].地震学报,2010,32(1):41-50.
Jia Junfeng, Ou Jinping. Vertical to-horizontal acceleration response spectrum ratio of near fault ground motion[J]. Acta Seismologica Sinica, 2010, 32(1): 41-50.
- [3] Bozorgnia Y, Mahin S A, Brady A G. Vertical response of twelve structures recorded during the Northridge Earthquake[J]. Earthquake Spectra, 1998, 14(3): 411-432.
- [4] Shi Yundong, Kurata Masahiro, Nakashima Masayoshi. Disorder and damage of base-isolated medical facilities when subjected to near-fault and long-period ground motions[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2014, 43(11): 1683-1701.
- [5] 卢立恒,徐赵东,潘毅,等.多维地震激励下工程结构隔减震技术研究进展[J].土木工程学报,2013,46(S1):1-6.
Lu Liheng, Xu Zhaodong, Pan Yi, et al. State of structural isolation and mitigation technology under multi-dimensional excitations[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(S1): 1-6.
- [6] 何文福,霍达,刘文光,等.高层隔震结构振动台试验及数值分析[J].北京工业大学学报,2010,36(3):334-339.
He Wenfu, Huo Da, Liu Wenguang, et al. Experimental study and numerical analysis of high rise isolated structure[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2010, 36(3): 334-339.
- [7] 魏陆顺,刘雷斐,梁欢文.三维隔震振动台试验研究[J].土木工程学报,2014,47(3):33-38.
Wei Lushun, Liu Leifei, Liang Huanwen. Experimental study on three-dimensional seismic isolation[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(3): 33-38.
- [8] 颜学渊,张永山,王焕定,等.三类三维隔震抗倾覆支座力学性能试验研究[J].振动与冲击,2009,28(10):49-53.
Yan Xueyuan, Zhang Yongshan, Wang Huanding, et al. Experimental study on mechanical properties of three kinds of three-dimensional base isolation and overturn-resistance devices[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(10): 49-53.
- [9] 颜学渊,张永山,王焕定,等.高层结构三维基础隔震抗倾覆试验研究[J].建筑结构学报,2009,30(4):1-8.
Yan Xueyuan, Zhang Yongshan, Wang Huanding, et al. Experimental study on high-rise structure with three-dimensional base isolation and overturn resistance devices[J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(4): 1-8.
- [10] 余欣欣.三维隔震结构的摇摆效应及控制策略[D].上海:上海大学,2019.
Yu Xinxin. Rocking effect and control strategy of three dimensional isolated structure[D]. Shanghai: Shanghai University, 2019.
- [11] 王旋.长周期三维隔震抗摇摆装置设计及抗震性能研究[D].天津:天津大学,2021.
Wang Xuan. Investigation on design and seismic performance of long period three-dimensional vibration isolation and rocking constraint devices[D]. Tianjin: Tianjin University, 2021.
- [12] 何文福,刘科,许浩,等.高层隔震结构支座受拉界限理论及地震响应分析[J].振动工程学报,2020,33(4):643-652.
He Wenfu, Liu Ke, Xu Hao, et al. Theoretical analysis of bearings in tension and seismic response analysis of high-rise isolation systems[J]. Journal of Vibration Engineering, 2020, 33(4): 643-652.
- [13] 郭明珠,毛志清,魏秀丽,等.伽师强震群地震动特点与震源机制关系的研究[J].地震工程与工程振动,2002,22(1):28-31.
Guo Mingzhu, Mao Zhiqing, Wei Xiuli, et al. Characteristics of Jiashi strong ground motion and its relation to focus mechanism[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, 22(1): 28-31.
- [14] 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):2070-2072.
Wang Haiyun, Xie Lili. Characteristics of near-fault strong ground motions[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006, 38(12): 2070-2072.
- [15] Ambraseys N N, Douglas J. Near-field horizontal and

- vertical earthquake ground motions[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2003, 23(1): 1-18.
- [16] 李新乐,朱晞.考虑场地和震源机制的近断层地震动衰减特性的研究[J].工程地质学报,2004,12(2): 142-147.
- Li Xinle, Zhu Xi. Attenuation characteristics of near-fault ground motions based on site and focal mechanism [J]. Journal of Engineering Geology, 2004, 12(2): 142-147.
- [17] 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.
- Du Yongfeng, Xu Tianni, Hong Na. Spectral and intensity indices of near-fault ground motions based on different focal mechanisms[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(5): 81-87.
- [18] Pacific Earthquake Engineering Research Center. PEER ground motion database[DB/OL]. (2013-3-31) [2019-3-16]. <https://ngawest2.Berkeley.edu>.
- [19] American Society of Civil Engineers (ASCE). Minimum design loads for buildings and other structures: ASCE Standard-ASCE/SEI 7-16 [S]. Reston, VA: American Society of Civil Engineers (ASCE), 2016.
- [20] Eltahawy W M G, Ryan K L, Cismeci S, et al. Parameters affecting dynamics of three-dimensional seismic isolation[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2018, 25(4): 730-755.
- [21] Eltahawy W M G. Fundamental dynamics and performance assessment of three-dimensional seismic isolation [D]. Reno, NV: University of Nevada, Reno, 2018.
- [22] 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): 180-186.
- Zhao Fengxin, Wei Tao, Zhang Yushan. Influence of near-fault velocity pulse on the seismic response of reinforced concrete frame[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(10): 180-186.
- [23] 李玉刚,范峰,洪汉平.基于小样本记录的柱面网壳结构地震响应评估[J].工程力学,2020,37(5): 228-236.
- Li Yugang, Fan Feng, Hong Hanping. Evaluating the seismic effects on a cylindrical lattice shell using a small number of records[J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(5): 228-236.
- [24] 曲哲,叶列平,潘鹏.高层建筑的隔震原理与技术[J].工程抗震与加固改造,2009,31(5): 58-63.
- Qu Zhe, Ye Lieping, Pan Peng. Theory and techniques of seismic isolation in high-rise buildings [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2009, 31(5): 58-63.
- [25] 董娣,桑向国,刘锐,等.震源机制对近场地震动反应谱的影响[J].西北地震学报,2008,30(1): 6-10.
- Dong Di, Sang Xiangguo, Liu Rui, et al. Effects of focal mechanism on near field response spectrum of ground motion [J]. Northwestern Seismological Journal, 2008, 30(1): 6-10.
- [26] Lignos D G, Hikino T, Matsuoka Y, et al. Collapse assessment of steel moment frames based on E-Defense full-scale shake table collapse tests[J]. Journal of Structural Engineering, 2013, 139(1): 120-132.

Rocking performance of three-dimensional base isolated structures based on acceleration response spectra

SHI Yun-dong^{1,2}, WANG Yu-chen¹, WANG Xuan¹, DING Yang^{1,2}, LI Zhong-xian^{1,2}

(1.School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2.Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: Significant rocking behavior appears in three-dimensional (3D) base isolated structures under earthquake ground motions and it affects the isolation effect of the 3D isolation technology. Different types of earthquake ground motions result in different influence effects to the rocking performance of 3D base isolated structures. 1567 earthquake ground motions with different characteristics are selected and classified. A method to evaluate the rocking performance of 3D base isolated structures is proposed based on the ratio of the vertical and horizontal acceleration response spectrum values and it is verified by finite element method. The influences of different focal mechanism, epicenter distance and site type on the rocking performance of 3D isolated structure are analyzed. The results show that the influences of different focal mechanism, epicenter distance and site type on the rocking of three-dimensional isolated structure are significant. Different types of earthquake ground motions are adjusted to have the same vertical acceleration response of the structures. In the typical isolation range (i.e., 2.0~5.0 s for horizontal isolation, and 0.3~1.0 s for vertical isolation), the rocking angle of the 3D isolated structure is larger under reverse fault and strike slip fault earthquakes than that under normal fault earthquakes. It is larger under far-field earthquakes than that under near-field earthquakes, and it is generally larger under the earthquakes in soft soil site than that in hard soil site.

Key words: three-dimensional isolation; rocking angle; acceleration response spectrum; focal mechanism; site condition

作者简介: 石运东(1983—),男,博士,副教授。电话: 13820996563; E-mail: yundong@tju.edu.cn。