

层间隔震地震响应分析

张彬,苏鹏,于冬冬

(辽宁工程技术大学 土木与交通学院 辽宁 阜新 123000)

摘要:为了研究层间隔震结构的减震效果和变化规律,通过运用 SAP2000 大型有限元分析软件,在建立层间隔震结构的三维模型基础上,设置所在不同的隔震层位置,对所建隔震结构模型进行仿真分析。输入选定的不同地震波,通过结构模型进行分析对比,得出层间隔震结构的变化规律和减震效果,同时讨论不同位置的隔震层对结构变化规律和减震效果的影响,从而验证层间隔震的有效性。

关键词:层间隔震;地震反应;时程分析;水平位移

文章编号:1003-8035(2014)03-0121-06

中图分类号:P315. 69

文献标识码:A

0 引言

在已有的建筑结构的抗震设计和研究中,传统抗震设计方法的不确定性将带来不可预测的风险。传统抗震技术有着很多的不足,所以人们开始对结构的隔震、减震进行较为深入的研究,因此一种新的抗震结构体系概念和机理应时而生。层间隔震结构能够将大部分地震能量吸收,在隔震层结构上产生大量的形变,并较少的能量传递给结构,能够起到保护建筑结构的作用,并且能够有效的加固了建筑,使建筑物损坏程度降低,这使得层间隔震框架结构的发展更加迅速应用更加广泛。大量工程实践证明,工程结构隔震设计是工程结构减震防灾的有效手段。

1 层间隔震模型

层间隔震动力分析计算模型^[1-3]:

(1) 两质点结构模型。两质点模型是把相对于隔震层之上的结构和相对于隔震层以下的结构简化为一个质点,这样就可以得到两质点的计算结构模型。两质点结构模型形式比较简单,适用于结构的参数分析。

(2) 三质点结构模型。三质点模型是将相对于隔震层以上的结构和相对于隔震层本身以及相对隔震层以下的结构分别简化,作为一个质点,进而得出三个质点的计算结构模型。

(3) 多质点结构模型。多质点模型是把整体结构的每一层视为一个质点,进而得到多个质点计算结构模型。多质点结构模型能够比较直观并且相对准确地反映出整体结构的地震反映,多质点结构模型在

层间隔震的结构设计中相对比较适用,更特别适用于整体结构在地震作用下的动力时程分析。

橡胶支座的竖向刚度在地震作用的情况下远远大于橡胶支座的水平刚度,因此可以见到的假设结构只作水平运动,进而可以忽略不计结构的竖向刚度所引起的摆动。在工程实践中,多质点结构模型和两质点结构模型的简化如图 1 所示。

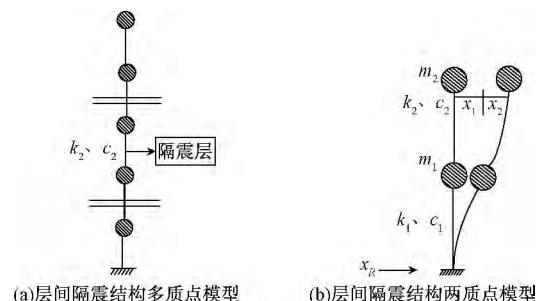


图 1 多质点和两质点的简化模型

Fig. 1 Simplified model of multi-particle and two-particle

层间隔震结构以隔震层作为整体结构的分界线,将整体结构分为上下 2 个子结构(图 2)。设 $\{X_1\}$ 为整体结构的下部子结构的位移, $\{X_2\}$ 作为整体结构的上部子结构的位移, x_s 作为下部子结构的顶层位移 x_b 作为上部子结构的底层位移,结构 1 的位移矢量为 $X_1 = [x_1 x_s]^T$ 。

收稿日期:2013-07-41; 修订日期:2013-10-07

作者简介:张彬(1960—)男,辽宁丹东人,大学教授,博士生导师,研究方向为岩土工程。

E-mail: zhangbin3351888@126.com

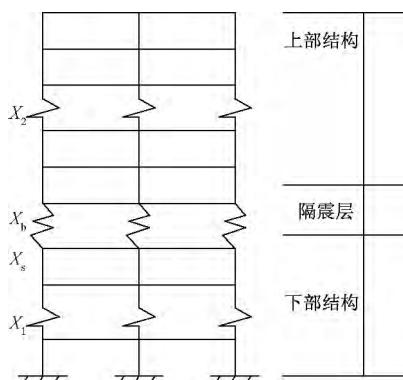


图 2 结构计算简图

Fig. 2 Calculation diagram of structural

2 地震波的调整

在选取地震波时,需要考虑三个地震动的要素,并对这三个要素进行调整,根据场地的具体情况对所选取的地震波进行调整。

(1) 地震动强度。具体的地震动强度的调整公式如下:

$$\bar{a}(t) = \frac{A_{max}}{\bar{A}_{max}} \bar{a}(t)$$

式中: $\bar{a}(t)$ —— 地震波的记录加速度;

\bar{A}_{max} —— 地震波的记录峰值;

$a(t)$ —— 地震波经调整以后的加速度

A_{max} —— 地震波经调整后的峰值。

根据《抗震规范》地震记录中所进行的调解峰值得

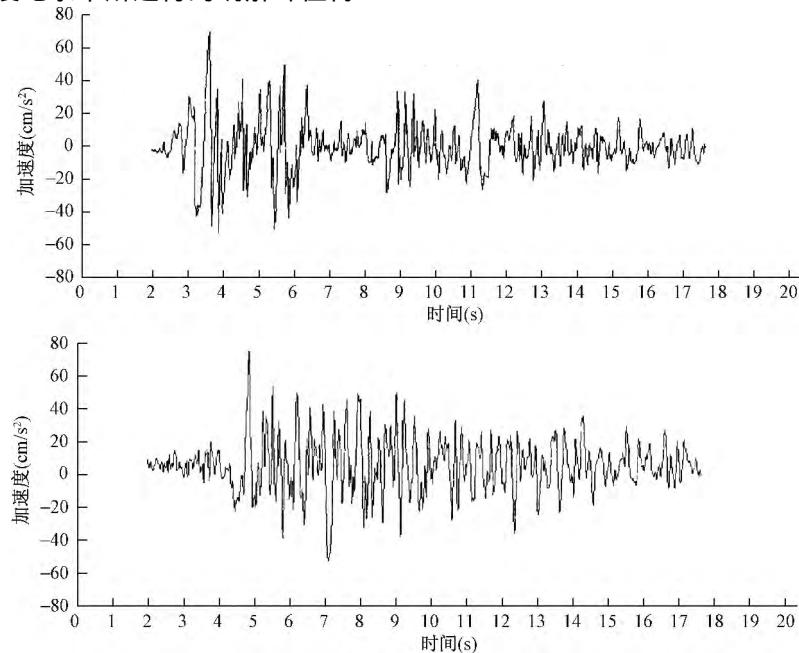


图 3 调整后地震波的加速度时程曲线
Fig. 3 Adjusted seismic acceleration time curve

出的地震动的最大加速度时程按表 1 选用^[4]。

表 1 加速度峰值的地震时程曲线(cm/s²)Table 1 Seismic peak acceleration time curve(cm/s²)

| 地震影响 | 6 度 | 7 度 | 8 度 | 9 度 |
|------|-----|-----------|-----------|-----|
| 多遇地震 | 18 | 35(55) | 70(110) | 140 |
| 罕遇地震 | — | 220(310) | 400(510) | 620 |

(2) 地震动的谱特征。在强烈的地震作用下,场地的地表面运动的卓越周期相对来说比较接近该场地的特征周期,所以,在选取地震波时,地震波的傅里叶谱、特征周期和谱形状要与所选场地的谱特征保持一致。

场地的特征周期的选用(表 2)。

表 2 特征周期表(s)

Table 2 Characteristics Periodic Table(s)

| 设计地震 分组 | 场地分类 | | | |
|------------|------|------|------|------|
| | I | II | III | IV |
| 第一组 | 0.25 | 0.35 | 0.45 | 0.65 |
| 第二组 | 0.30 | 0.40 | 0.55 | 0.65 |
| 第三组 | 0.35 | 0.45 | 0.65 | 0.90 |

(3) 地震动的持续时间。在选取的地震动持续时间时要遵循两个原则:①记录中最强的部分必须包括在所选择的持续时间中;②持续的时间为 $t \geq 10T_1$, T_1 是结构基本周期,其数值不能小于 12s。

本文选用 EL-Centro 波和 Taft 波(图 3),这将此两种地震波作用于二类场地,符合要求。

3 计算模型

采用 SAP2000 有限元软件,模拟一个五层的现浇钢筋混凝土框架结构模型,分别在结构的不同位置建立五个隔震层的结构计算模型和一个普通结构的抗震结构模型,对设置有层间隔震的结构计算模型和普通的抗震结构模型进行模态分析,比较分析在设置不同位置隔震层时,对振型周期和参考系数的影响(图4)。

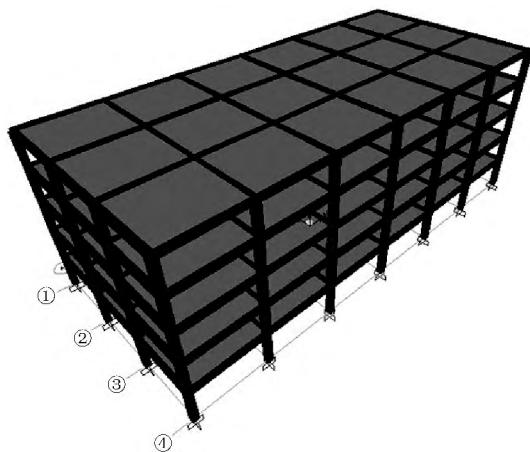


图4 三维结构模型

Fig. 4 Three-dimensional structural model

3.1 结构模态分析

通过 SAP2000 的软件的模拟分析,在前两阶模态下普通抗震结构的振型为下部结构有较小的变形,然而上部变形则相对较大。在前两阶段模态下,层间隔震结构的振型主要是两个水平方向的平移,在隔震层之上的结构近似整体平移,第三阶模态的振型则主要表现为扭转。

假设 m_u 为隔震层以上的结构质量, m_d 为隔震层以下的结构质量, $\mu = m_u/m_d$ 为质量比。根据质量比得出结构的变化规律:当在一层柱底设置隔震层时,质量比则为无穷大,普通抗震结构则认为隔震层的位置在屋顶,并且普通抗震结构的质量比为0,层间隔震结构和普通抗震结构的质量比(表3)。

表3 隔震结构和普通抗震结构的质量比

Table 3 Seismic isolation structure and the general structure of the mass ratio

| 隔震层位置 | 一层 | 二层 | 三层 | 四层 | 五层 | 无隔震层 |
|-------|-----|----|----|----|-----|------|
| 质量比 | 无穷大 | 4 | 2 | 1 | 0.3 | 0 |

根据《抗震规范》,不设置隔震层时,主轴方向所

要求的基本周期小于1.0s。本文的结构所选取的两个方向的自振周期均小于0.91s和0.89s,符合规范要求。普通抗震模型在X方向的前三阶数据变化(表4)。

表4 X方向模型前三阶数据

Table 4 The first three data models of X direction

| 模态 | 一阶 | 二阶 | 三阶 |
|--------|---------|---------|---------|
| 自振周期 | 0.90243 | 0.34457 | 0.21009 |
| 质量参与系数 | 85.27 | 9.77 | 3.94 |

3.2 层间隔震的剪力分析

结构的层间剪力是建筑结构的抗震性能重要衡量指标,各层所承受的地震剪力值直接影响着层间隔震结构的减震效果。在既有的两条地震波下进行地震时程分析,分别得出普通抗震结构的最大剪力值和层间隔震结构五个模型的各层的最大剪力值。验证后得出,两个水平方向的地震反应有相同的地震规律。所以本文中只列出了X方向的分析数据。EI-Centro 波作用下,X方向的普通抗震结构模型的剪力值(表5),EI-Centro 波在强度等级为7的多遇地震作用下,X方向的各隔震结构模型的剪力值(表6)。

表5 EI-Centro 波 X 方向剪力值数据表

Table 5 EI-Centro wave X direction shear value data table

| 抗震结构(质量比为0) | | | | | |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 厚层 | 一层 | 二层 | 三层 | 四层 | 五层 |
| 最大剪力值 | 5535.2 | 4983.8 | 3852.9 | 2547.2 | 1894.5 |

Taft 波在强度等级为7的多遇地震作用下,X方向的普通抗震结构模型的剪力值和减震率如表7,Taft 波在多遇地震作用下,X方向的各层间隔震结构模型的剪力值和减震率如表8。

表6 EI-Centro 波 X 方向剪力值和减震率数据表

Table 6 EI-Centro wave X direction shear force values and the damping rate data table

| 隔震层位置 | 各楼层最大剪力值(kN) | | | | |
|-------|--------------|--------|--------|--------|-------|
| | 一层 | 二层 | 三层 | 四层 | 五层 |
| 一层柱底 | 1625.4 | 1483.5 | 1206.9 | 872.4 | 724.2 |
| 二层柱底 | 1592.6 | 1465.8 | 1189.2 | 853.5 | 682.7 |
| 三层柱底 | 1552.4 | 1336.5 | 1303.8 | 897.1 | 636.7 |
| 四层柱底 | 1584.9 | 1398.1 | 1354.6 | 947.5 | 769.8 |
| 五层柱底 | 1692.4 | 1598.3 | 1395.8 | 1064.7 | 805.2 |

表7 Taft 波 X 方向剪力值数据表

Table 7 Taft wave X direction shear value data table

| 抗震结构(质量比为0) | | | | | |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 楼层 | 一层 | 二层 | 三层 | 四层 | 五层 |
| 最大剪力值 | 3782.5 | 3174.9 | 2763.3 | 2385.6 | 2042.5 |

由表 8 的数据看出,在地震作用下的层间隔震结构与普通抗震结构相比,各层的剪力都明显的减小了,层间隔震结构中第一层的剪力值有最明显减小,多遇地震作用下的普通抗震结构剪力值为 4658.85kN,隔震结构中的最大剪力值为 1951kN,大大减小了结构楼层的受力,提高结构抗震效果。

表 8 Taft 波 X 方向剪力值和减震率数据表

Table 8 Taft wave X direction shear values and damping rate data table

| 隔震层位置 | 各楼层最大剪力值(KN) | | | | |
|-------|---------------|--------|--------|--------|--------|
| | 一层 | 二层 | 三层 | 四层 | 五层 |
| 一层柱底 | 1418.4 | 1401.8 | 1289.1 | 998.5 | 817.2 |
| 二层柱底 | 1583.6 | 1399.4 | 1276.3 | 964.7 | 792.7 |
| 三层柱底 | 2395.9 | 1993.0 | 1418.5 | 1107.9 | 1047.2 |
| 四层柱底 | 2264.0 | 2015.3 | 1459.2 | 1173.7 | 985.8 |
| 五层柱底 | 2093.1 | 1834.8 | 1408.5 | 1348.0 | 1148.1 |

对于不同的层间隔震结构而言,减震效果也不同,当隔震层设置在 1~3 层时,所受的剪力值没有明显的差别,当隔震层上移到 4 层和 5 层时,减震率明显的下降。通过对分析得出,当隔震层设置在 3 层以下时具有较好的抗震效果,而且它们的减震效果也非常接近。当隔震层在 4 层以上时比 3 层以下的减震效果相对差一些。为了更好的进行对比,层间所受的最大剪力值和减震率绘制成包络图(图 5)。

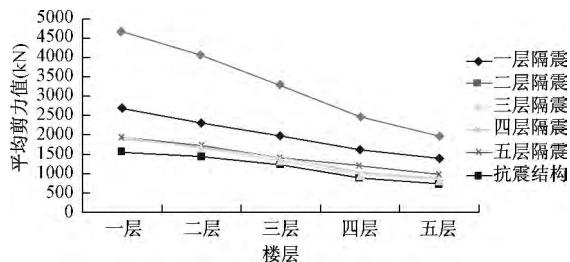


图 5 各楼层在地震作用下的最大剪力值

Fig. 5 Each floor under earthquake of maximum shear force values

设置不同位置的隔震时各结构层间剪力减震率曲线如图 6 所示。

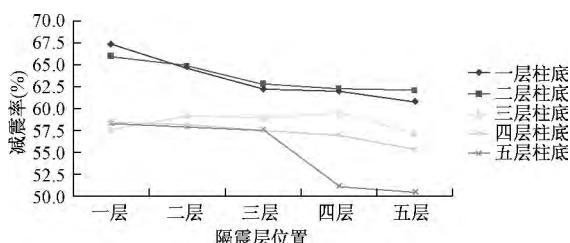


图 6 各结构层间剪力减震率曲线

Fig. 6 Each structural damping interlayer shear rate curve

从图 6 中可以看出,当隔震层向上移时,楼层的剪力则会降低,当隔震层设置在四,五层时有明显下降趋势。说明当隔震层位置设置越低,结构有越好的减震效果。隔震层设置在 1~5 层时,隔震层所在楼层的减震率增大,说明隔震层所在楼层有特殊的减震作用。

3.3 层间隔震结构位移变化分析

由楼层剪力分析可知,隔震层设置位置的不同,结构的减震效果有明显的差异。隔震层的设置位置越低,则楼层所受的剪力越小,减震率就越大,减震效果就越好。根据材料特性可知,当抗震构件的数量一定,构件的截面面积不变时,抗剪构件就有越小的剪切变形。通过对结构的地震时程分析,对最大层间位移进行分析,分析得出的在强度等级为 7 多遇地震时,位移数据如表 9,减震率如表 10。

表 9 多遇地震作用下 X 方向各结构模型的最大层间位移

Table 9 Under frequent earthquake structural model of the X-direction maximum story drift

| 隔震层位置 | 地震波 | 层间的最大位移(mm) | | | | |
|-------|-----------|--------------|-------|-------|-------|------|
| | | 一层 | 二层 | 三层 | 四层 | 五层 |
| 抗震结构 | EI-Centro | 7.24 | 7.39 | 6.93 | 4.97 | 3.55 |
| | Taft | 4.01 | 4.51 | 4.09 | 3.87 | 2.19 |
| 一层柱底 | EI-Centro | 17.41 | 2.87 | 1.83 | 1.06 | 0.78 |
| | Taft | 15.92 | 2.35 | 1.78 | 1.19 | 0.82 |
| 二层柱底 | EI-Centro | 1.43 | 12.98 | 1.86 | 1.20 | 0.88 |
| | Taft | 1.72 | 14.81 | 2.42 | 1.59 | 0.95 |
| 三层柱底 | EI-Centro | 1.67 | 1.81 | 11.24 | 1.92 | 1.02 |
| | Taft | 2.57 | 2.79 | 12.93 | 1.97 | 0.84 |
| 四层柱底 | EI-Centro | 1.80 | 2.11 | 2.09 | 9.84 | 1.09 |
| | Taft | 2.28 | 2.75 | 1.98 | 11.22 | 1.07 |
| 五层柱底 | EI-Centro | 2.99 | 4.08 | 4.22 | 2.85 | 7.27 |
| | Taft | 3.07 | 3.12 | 2.89 | 2.55 | 8.24 |

表 10 多遇地震作用下 X 方向各结构模型的楼层减震率

Table 10 Under frequent earthquake structural model of the X-direction of the damping rate of the floor

| 隔震层位置 | 隔震结构各层的减震率(%) | | | | |
|-------|-----------------|---------|---------|---------|---------|
| | 一层 | 二层 | 三层 | 四层 | 五层 |
| 一层柱底 | -195.91 | 56.13 | 65.64 | 74.66 | 72.12 |
| 二层柱底 | 72.11 | -133.44 | 59.16 | 68.55 | 68.29 |
| 三层柱底 | 62.34 | 61.34 | -130.53 | 71.04 | 67.59 |
| 四层柱底 | 63.76 | 59.15 | 61.25 | -183.48 | 62.36 |
| 五层柱底 | 46.18 | 39.49 | 32.25 | 38.91 | -239.72 |

注:当表中的数值为负值时表示隔震层位移比不设置隔震层的结构大。

由表 9 可知,隔震层所在楼层产生的剪切位移很

大,而其它楼层的位移则都非常小,小于普通抗震结构的位移。这说明隔震层吸收地震所产生的大部分能量,不但减小了下部结构的层间位移,也阻碍了由于地震产生的能量传递给结构的上部结构,有明显的保护作用。当隔震层设置的位置改变时,每个结构模型的位移反应也不同,隔震层随着位置不断上移时,隔震层的位移明显的下降,除隔震层外的层间位移有规律的发生变化。隔震层设置的位置越高,隔震层之外的其它楼层的层间位移也就越大。因此可以总结为,隔震层的设置位置越高,质量比越小,隔震层所在楼层的位移也就减小,除隔震层以外楼层的位移相应增大。

不同结构计算模型的屋顶的位移变化如图7,在地震作用下,当隔震层设置在建筑的中间位移时,屋顶的位移会变小,特别是在第三层柱底时,结构屋顶的位移最小。

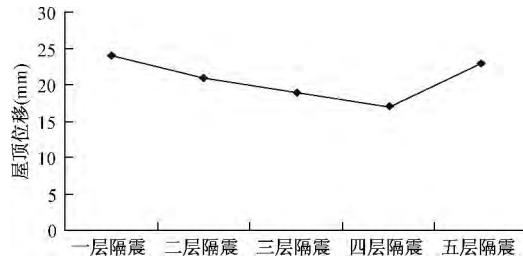


图7 各结构模型屋顶位移的变化

Fig. 7 The roof of the structure model of change of displacement

4 结论

(1) 层间隔震结构可以隔震结构的基本周期增大,使结构的减震效果提高,并且随着隔震层设置的位置增高,结构的振动周期也随之减小。

(2) 层间隔震结构与普通抗震结构相比,无论隔震层设置在结构的位置如何,都会延长结构的第一周期。隔震层设置的位置越低时,隔震结构的基本周期就越大,所以结构的减震效果就会越好。

(3) 当隔震层的设置位置向上移动时,各楼层的减震效果有所降低,这就说明了层间隔震结构在设置较低的隔震层时,结构具有越好的减震效果。但是,当隔震层的位置较低时,隔震装置所在的楼层的位移就最大,随着隔震层位置的向上移动,隔震层的层间位移则相应的减小,与此同时,除隔震层以外的其它楼层的层间位移随之不断增加。

参考文献:

- [1] 干洪,张德玉.框架隔震结构简化设计方法研究与应用[J].安徽工程科技学院学报:自然科学版,2009(3):1-4.
GAN Hong, ZHANG Deyu. Frame isolated structure simplifies the design force method research and application [J]. Journal of Anhui University of Technology: Natual Science Editon 2009(3):1-4.
- [2] 沈聚敏,周锡元,高小旺等.抗震工程学[M].北京:中国建筑工业出版社 2000.
SHEN Jumin, ZHOU Xiyuan, GAO Xiaowang, et al. Earthquake engineering [M]. Beijing: China Building Industry Press 2000
- [3] 庞云鹏.建筑基础隔震设计与分析[J].科技创新导报. 2010(09):34.
PANG Yunpeng. Architectural design and analysis of base isolation [J]. Technology Innovation Herald. 2010 (09):34.
- [4] 中华人民共和国建设部. GB50011-2001. 建筑抗震设计规范[S]. 中国建筑工业出版社 2008.
Ministry of Construction. GB50011-2001. Seismic Design of Buildings [S]. China Building Industry Press 2008.
- [5] 樊长林,张善元,张文芳.隔震体系基于双质点模型的参数分析比较[J].太原理工大学学报,2008(3):320-323.
FAN Changlin, ZHANG Shanyuan, ZHANG Wenfang. Isolation system based on dual-mass model parameter analysis and comparison [J]. Taiyuan University of Technology, 2008(3):320-323.
- [6] 付伟庆.智能隔震与高层隔震的理论与试验[M].哈尔滨:黑龙江大学出版社 2008.
FU Weiqing. Smart isolation with high-level theoretical and experimental isolation [M]. Haerbin: Heilongjiang University Press 2008.
- [7] 赵鸿铁,徐赵东,张兴虎.耗能减震控制的研究、应用与发展[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2001 23(1):1-5.
ZHAO Hongtie, XU Zhaodong, ZHANG Xinghu. Energy damping control research, application and development [J]. Xi'an University of Architecture and Technology (Natual Science Editon) 2001 23(1):1-5.
- [8] 白举科,陈龙珠,赵荣欣.中间层减震结构地震影响实例分析[J].工程抗震与加固改造,2007(3):54-58.
BAI Juke, CHEN Longzhu, ZHAO Rongxin. The middle layer damping structure earthquake case study [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2007

(3) :54-58.

[9] 李宏男,李忠献,祁皓等.结构振动与控制[M].北京:中国建筑工业出版社 2005.

LI Hongnan, LI Zhongxian, QI Ai, et al. Vibration and control [M]Beijing: China Building Industry Press 2005

[10] Xiao J, Mu Zaigen, Bu L G. et al. Study on the performance of compound foundation isolation system in large complex structures [J]. Proceeding of Shanghai International Conference on Technology of Architecture and Structure (ICTAS 2009) .

The earthquake response analysis of layer interval shock

ZHANG Bin, SU Peng, YU Dong-dong

(School of Civil Engineering and Transportation, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: In order to study the layer damping effect and the change rule of interval structure. By using the large finite element analysis software SAP2000, base on three-dimensional model of interlayer seismic structure, set the location of different isolation layer, simulation analysis was carried out on the model of isolation structures. Input different seismic wave which was selected, through the comparative analysis of the structural model, obtained interlayer seismic structure variation and damping effect, discuss effects of structural changes and damping effect of isolation layer in different position to verify the validity of interlayer seismic.

Key words: layer interval shock; damping effect; seismic response time history analysis; horizontal shift.

关于为《中国地质灾害与防治学报》征集照片的启事

为了使本刊论文内容更加形象、生动,便于读者清晰地识别地质灾害的各种地质作用及现象,反映治理措施及治后效果,我刊每期另附彩版照片。凡为彩版或封面提供照片者,每版应附 100~500 字说明,每张照片也应有相应说明。为保证出版效果,请提供原照片;若用数码相机拍摄,请采用 200 万像素以上的模式拍照。照片的分辨率应在 1600×1200dpi 以上(Fine 或 High 模式);如照片文件为扫描版,请采用 600dpi 以上的设置扫描。如用电子邮件发送,请提供照片的原电子文档 JPG 格式(勿自行用 Photoshop 或 ACDsee 等软件处理),以保证照片的清晰度。另请提供 1 份 Word 文档,但其仅供排版时参考,不能作为印刷、排版的原始稿件。提供的照片采用刊登后,付稿酬。欢迎各地、各界同仁踊跃选送各种典型照片(含国外照片)。

感谢您的支持与合作!

本刊网址: <http://zgdzzhyfz.paperopen.com>

电子信箱: zgdh@chinajournal.net.cn zgdh@mail.cigem.gov.cn

《中国地质灾害与防治学报》编辑部