

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.02.009



# 考虑三维地震动作用下振动台试验隔震层简化

邵一凡, 赖正聪, 潘文, 吴克川, 兰香, 于诗歌, 马健

(昆明理工大学 工程抗震研究所, 昆明 650500)

**摘要:**基于等效原则、相似理论,考虑三维地震动作用下振动台试验中原型结构隔震层的简化,并对模型结构隔震层进行系统研究。针对不同高宽比隔震结构,提出完全等效简化方法和部分等效简化方法,包括隔震垫等效、模型支座参数及坐标确定、相似关系确定等。利用不同高宽比隔震结构振动台试验,结合有限元数值模拟,进行方法验证。理论推导与数值模拟证明简化方法具有良好的准确性,且在误差允许范围内,简化后的隔震层所获得的加速度、速度、位移等动力特性与简化前相同,可以用于振动台试验模型设计。

**关键词:**等效原则;隔震层;简化;相似理论;振动台

**中图分类号:**TU352.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2017)02-0065-10

## Simplified method of isolation layer in shaking table test considered three-dimensional seismic effect

Shao Yifan, Lai Zhengcong, Pan Wen, Wu Kechuan, Lan Xiang, Yu Shige, Ma Jian

(Institute of Earthquake Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, P. R. China)

**Abstract:** The method of that isolation layer of prototype structure simplified to model structure in shaking table test was systematically researched based on equivalent principle, similarity theory, and considered three-dimensional seismic effect. Aimed at isolated structure in different aspect ratio, complete equivalent and part of equivalent simplified method were proposed. Equivalent of isolation layer, model's parameters of isolation bearings, coordinate certainty, similarity theory and so on were included in the method. the method was verified with shaking table tests of isolated structure with different aspect ratio, and combined with finite element numerical simulation, Theoretical derivation and numerical simulation were certified that the simplified method possessed well accuracy. And within the error allowed, the same dynamic characteristics of acceleration, velocity, displacement of isolation layer before simplification could be obtained. Therefore, the method could be used in shaking table test of model design.

**Keywords:** equivalent principle; isolation layer; simplification; similarity theory; shaking table test

振动台试验是分析建筑物抗震性能的重要手段,其步骤是通过向振动台输入地震波,激励台面上

部结构的反应,再现地震过程。由于台面尺寸和设备能力所限,现阶段中国大部分振动台仅能进行缩

**收稿日期:**2016-06-28

**基金项目:**国家自然科学基金(51168024)

**作者简介:**邵一凡(1991-),男,主要从事工程抗震研究,(E-mail)415478320@qq.com。

潘文(通信作者),男,教授,博士生导师,(E-mail)13888242032@139.com。

**Received:**2016-06-28

**Foundation item:**National Natural Science Foundation of China(No. 51168024)

**Author brief:**Shao Yifan(1991-), main research interest:earthquake engineering,(E-mail)415478320@qq.com.

Pan Wen(corresponding author), professor, doctoral supervisor,(E-mail)13888242032@139.com.

尺模型的模拟地震振动台试验<sup>[1]</sup>。缩尺模型振动台试验核心是按照等效原则、相似理论设计出与原型结构具有相似工作状态的模型结构<sup>[2-4]</sup>。

隔震结构是通过在基础结构和上部结构之间设置隔震层,使上部结构与地震动的水平成分绝缘。目前中国隔震建筑数量日益增多,其中90%以上采用叠层橡胶支座的隔震技术<sup>[5]</sup>。为了判明采用叠层橡胶支座的隔震结构在地震作用下的动力特性、损伤机理及破坏模式,对其进行振动台试验研究是最为直接的办法。

在隔震结构振动台试验研究方面,文献[6]提出摩擦摆隔震结构振动台模型设计方法,研究摩擦摆数量等效、隔震层的相似设计以及隔震层周期和刚度的相似。文献[7]分析高层隔震结构振动台试验模型设计,提出隔震支座等效的数量问题。文献[8-9]对复杂形式的结构进行振动台试验,研究此类构筑物采用隔震技术的意义。文献[10-11]考虑三维地震动作用,对一般框架结构模型进行振动台试验研究。文献[12-14]对隔震结构振动台试验相似理论进行阐述。文献[15-17]对不同特点隔震结构进行振动台试验,对振动台试验应用于隔震结构进行深入研究。

在对采用叠层橡胶支座的隔震结构进行缩尺模型振动台试验研究中,如何对该隔震结构隔震层进行简化及相似设计是不可忽略的关键步骤。本文将上部结构高度与隔震层短边长度之比作为高宽比<sup>[18]</sup>,在考虑三维地震动作用下,以高宽比为主要指标,按照等效原则、相似理论<sup>[1]</sup>,对采用叠层橡胶支座的的不同高宽比隔震结构提出隔震层简化方法。

## 1 简化方法基本理论

### 1.1 简化步骤

设计隔震结构缩尺模型时,重点之一在于将原型结构隔震层设计为模型结构隔震层。理论上应将隔震层中每个隔震垫按照对应的相似比例缩小,缩尺隔震垫组成模型结构隔震层,使得模型隔震层与原型隔震层具有相同隔震垫数量。但由于现有试验水平,隔震垫缩小比例有一定限制,不能实现每个原型隔震垫按照对应的相似比例缩小为小尺寸隔震垫。因此,合理步骤:1)按照等效原则,将原型结构隔震层简化前的 $n$ 个隔震垫简化为 $m$ 个隔震垫,确定简化后 $m$ 个隔震垫布置位置及参数;2)考虑振动

台的实际承载能力,按照相似理论,将隔震垫参数缩小,并把简化后 $m$ 个隔震垫位置对应至模型结构隔震层。

### 1.2 等效平衡方程

步骤1对整个振动台试验效果起着重要作用,由 $n$ 个隔震垫简化为 $m$ 个隔震垫需满足等效原则,才能实现简化前与简化后隔震支座的等效。等效原则需满足4个平衡条件。

1)刚度中心相同。假设水平力集中作用于下部隔震层刚度中心,此时隔震层不产生扭转,水平移动单位位移1。简化前和简化后隔震层刚度中心应处于同一位置,以刚度中心为原点建立刚度中心相同方程为

$$\frac{\sum_{i=1}^n (K_{i,eq} \times x_i)}{K_{EQ}} = \frac{\sum_{j=1}^m (K_{eq,j} \times X_j)}{K_{EQ}} \quad (1)$$

$$\frac{\sum_{i=1}^n (K_{i,eq} \times y_i)}{K_{EQ}} = \frac{\sum_{j=1}^m (K_{eq,j} \times Y_j)}{K_{EQ}} \quad (2)$$

式中: $n$ 、 $K_{i,eq}$ 、 $x_i$ 、 $y_i$ 分别为简化前隔震垫个数、等效水平刚度、距 $Y$ 轴距离及距 $X$ 轴距离; $m$ 、 $K_{eq,j}$ 、 $X_j$ 、 $Y_j$ 分别为简化后隔震垫个数、等效水平刚度、距 $Y$ 轴距离及距 $X$ 轴距离; $K_{EQ}$ 为隔震层等效水平总刚度。

2)质量中心相同。将上部结构质量中心投影至下部隔震层一点,假设竖向力集中作用于隔震层这一点,此时隔震层不产生倾覆,竖向移动单位位移1,将隔震层这一点同样称为质量中心。简化前和简化后隔震层质量中心应处于同一位置,以质量中心为原点建立质量中心相同方程为

$$\frac{\sum_{i=1}^n (K_{i,v} \times x_i)}{K_V} = \frac{\sum_{j=1}^m (K_{v,j} \times X_j)}{K_V} \quad (3)$$

$$\frac{\sum_{i=1}^n (K_{i,v} \times y_i)}{K_V} = \frac{\sum_{j=1}^m (K_{v,j} \times Y_j)}{K_V} \quad (4)$$

式中: $K_{i,v}$ 、 $K_{v,j}$ 分别为简化前竖向总刚度及简化后竖向总刚度; $K_V$ 为隔震层竖向总刚度。

3)抗倾覆矩等效。假设由于任意竖向力作用,隔震层围绕质量中心所在坐标轴沿垂直方向转动单位角度1,产生抗倾覆矩抵抗竖向力作用。对相同竖向力作用,简化前和简化后隔震层应产生相同抗倾覆矩,以质量中心为原点建立抗倾覆矩等效方程为

$$\sum_{i=1}^n (K_{i,v} \times x_i^2) = \sum_{j=1}^m (K_{v,j} \times X_j^2) \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^n (K_{i,v} \times y_i^2) = \sum_{j=1}^m (K_{v,j} \times Y_j^2) \quad (6)$$

4) 抗扭转矩等效。假设由于任意水平力作用,隔震层围绕刚度中心水平转动单位角度 1,产生抗扭转矩抵抗水平力作用。对相同水平力作用,简化前和简化后隔震层应产生相同抗扭转矩,以刚度中心为原点建立抗扭转矩等效方程为

$$\sum_{i=1}^n [K_{i,eq} \times (x_i^2 + y_i^2)] = \sum_{j=1}^m [K_{eq,j} \times (X_j^2 + Y_j^2)] \quad (7)$$

### 1.3 相似关系

由相似理论可知,动力相似问题的关键在于模拟惯性力、恢复力、重力以及边界条件<sup>[1]</sup>。由量纲协调原理,可得方程<sup>[19]</sup>为

$$\frac{S_E}{S_\rho S_a S_L} = 1 \quad (8)$$

式中: $S_E$ 、 $S_\rho$ 、 $S_a$ 、 $S_L$  分别为弹性模量、密度、加速度、几何尺寸的相似比例系数(模型/原型)。

采用似量纲分析法求取其余系数较为便捷,可避免传统求解线性代数方程组的复杂步骤<sup>[19]</sup>。现已知弹性模量、加速度、几何尺寸的相似关系方程,则可将待求量刚度相似比例系数与该 3 个量通过似量纲分析法建立联系,可得方程为

$$S_\rho S_a S_L^2 = S_K \quad (9)$$

式中: $S_K$  为刚度相似比例系数。

结合等效原则,在得出几何尺寸和刚度相似比例系数之后,即可在步骤 2 实现原型结构隔震层向模型结构隔震层的简化。

## 2 隔震垫刚度参数分析

以往多数振动台试验设计通常将简化后  $m$  个隔震垫设置为相同刚度参数,方便将原型隔震层简化为模型隔震层。

假设简化后隔震垫具有相同竖向刚度  $K_v$  及等效水平刚度  $K_{eq}$ ,按照等效原则的条件,隔震层简化需首先满足(1)~(4)方程,化解、合并方程得

$$\frac{\sum_{i=1}^n (K_{i,eq} \times x_i)}{K_{eq}} = \frac{\sum_{i=1}^n (K_{i,v} \times x_i)}{K_v} = \sum_{j=1}^m X_j \quad (10)$$

$$\frac{\sum_{i=1}^n (K_{i,eq} \times y_i)}{K_{eq}} = \frac{\sum_{i=1}^n (K_{i,v} \times y_i)}{K_v} = \sum_{j=1}^m Y_j \quad (11)$$

要使方程(10)、(11)成立,进一步化解得

$$\frac{K_{eq}}{K_v} = \frac{K_{1,eq}}{K_{1,v}} = \frac{K_{2,eq}}{K_{2,v}} = \dots = \frac{K_{n,eq}}{K_{n,v}} \quad (12)$$

分析可知,简化前原型结构隔震垫刚度参数很难满足方程(12)。因为,隔震设计受规范约束等因素影响,通常会灵活设置不同型号的隔震垫以满足设计要求,隔震层中不同型号隔震垫的竖向刚度与其等效水平刚度之比难以相等。所以,将原型隔震层简化为模型隔震层,更为合理的做法是将简化后隔震垫设置为不同刚度参数。

## 3 完全等效简化方法

在遭受地震作用时,高宽比适中的建构筑物既受到扭转力矩作用又受到倾覆力矩作用。对于该类型隔震结构隔震层的简化,隔震层抗倾覆矩等效及抗扭转矩等效都应作为主要因素考虑在简化方法内,方程(1)~(7)都必须满足。以下针对高宽比适中的隔震结构,提出完全等效简化方法。

所有方程建立在以质量中心为原点的坐标系中,对方程组进行简化。假设待定第 1 个、第 2 个、第 3 个简化后隔震垫坐标  $(X_1, Y_1)$ 、 $(X_2, Y_2)$ 、 $(X_3, Y_3)$ ,其余简化后隔震垫坐标根据实际情况自定;待定第 1 个、第 2 个简化后隔震垫竖向刚度  $K_{v,1}$ 、 $K_{v,2}$ ,其余简化后隔震垫具有相同竖向刚度  $K_v$ ,则  $K_v = K_v \div m$ ,  $K_{v,2} = 2K_v - K_{v,1}$ ;简化后隔震垫具有相同等效水平刚度  $K_{eq}$ ,则  $K_{eq} = K_{EQ} \div m$ 。将以上 7 个未知量及其余已知量代入方程(1)~(7)化解,把已知量统一移至方程左端,方程左端已知量表达式用  $A_i$  表示

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= X_1 + X_2 + X_3 \\ A_2 &= Y_1 + Y_2 + Y_3 \\ A_3 &= K_{v,1} X_1 + K_{v,2} X_2 + K_v X_3 \\ A_4 &= K_{v,1} Y_1 + K_{v,2} Y_2 + K_v Y_3 \\ A_5 &= K_{v,1} X_1^2 + K_{v,2} X_2^2 + K_v X_3^2 \\ A_6 &= K_{v,1} Y_1^2 + K_{v,2} Y_2^2 + K_v Y_3^2 \\ A_7 &= (X_1^2 + X_2^2 + X_3^2) + (Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2) + \\ &2\Delta x(X_1 + X_2 + X_3) + 2\Delta y(Y_1 + Y_2 + Y_3) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中: $\Delta x$ 、 $\Delta y$  为质量中心坐标系中刚度中心距  $Y$  轴距离及距  $X$  轴距离。

根据已知条件,利用 MATLAB 中 SOLVE 函数自编程序可解出七元二次方程组(13)。限于篇幅,待定隔震垫坐标及刚度参数具体代数解不详细列出。

在方程组(13)的自变量中,仅除第 1 个、第 2 个、第 3 个外的其余简化后隔震垫坐标需人为拟定,刚度参数不需自定。考虑振动台尺寸与施工条件,人为拟定的简化后隔震垫宜分散分布<sup>[1]</sup>。在求解过程中发现,若将自定的简化后隔震垫设置过于集中,可能出现方程组(13)无解或有解但超出隔震层边界的情况。

原型隔震结构同时包含铅芯橡胶支座和普通橡胶支座时,较为简便的方法是将简化后隔震垫全部等效为铅芯橡胶支座<sup>[19]</sup>。已知简化后铅芯支座具有相同等效水平刚度  $K_{eq}$ ,可由下式求得简化后隔震垫屈服前刚度  $K_q$ 、屈服后刚度  $K_h$

$$K_Q = \sum_{i=1}^a (a \times K_{i,eq}) + \sum_{j=1}^b (b \times K_{j,q})$$

$$K_q = K_Q \div m \quad (14)$$

$$K_H = \sum_{i=1}^a (a \times K_{i,eq}) + \sum_{j=1}^b (b \times K_{j,h})$$

$$K_h = K_H \div m \quad (15)$$

式中: $K_Q$ 、 $K_H$  为隔震层屈服前和屈服后总刚度; $a$ 、 $b$  为简化前普通支座、铅芯支座个数; $K_{j,q}$ 、 $K_{j,h}$  为简化前铅芯支座屈服前和屈服后刚度。

求出简化后隔震垫坐标和刚度参数,根据方程(8)、(9),即可求出振动台模型结构隔震垫相应坐标和刚度参数。

## 4 部分等效简化方法

建构筑物类型不同,影响结构破坏机理不同。如对于低矮隔震结构,应重点考查扭转破坏,隔震层

以抵抗扭转为主;而对于高层隔震结构,应重点考查倾覆破坏,隔震层以抵抗倾覆为主。因此,在将原型隔震层设计为模型隔震层时,简化方法可忽略次要影响因素。以下针对特点显著、大高宽比及小高宽比的隔震结构,提出部分等效简化方法,并用实际算例加以说明。

### 4.1 抗扭转为主简化方法

4.1.1 方法概述 小高宽比隔震结构,尤其是不规则结构,在地震作用下的扭转变形较为明显,隔震层产生抗扭转矩抵抗扭转变形,而倾覆变形对结构影响较小。因此,在抗扭转为主简化方法中,等效原则可忽略抗倾覆矩等效方程。

以刚度中心为原点建立坐标系,假设待定第 1、2 个简化后隔震垫坐标  $(X_1, Y_1)$ 、 $(X_2, Y_2)$ ,自定其余简化后隔震垫坐标;待定第 1 个、第 2 个简化后隔震垫竖向刚度  $K_{v,1}$ 、 $K_{v,2}$ ,其余简化后隔震垫具有相同竖向刚度  $K_v$ ,则  $K_v = K_v \div m$ ,  $K_{v,2} = 2K_v - K_{v,1}$ ;简化后隔震垫具有相同等效水平刚度  $K_{eq}$ ,则  $K_{eq} = K_{EQ} \div m$ 。将以上 5 个未知量及其余已知量代入方程(1)~(4)、(7)化解,把已知量统一移至方程左端,方程左端已知量表达式用  $B_i$  表示

$$\left. \begin{aligned} B_1 &= X_1 + X_2 \\ B_2 &= Y_1 + Y_2 \\ B_3 &= K_{v,1} X_1 + (2K_v - K_{v,1}) X_2 \\ B_4 &= K_{v,1} Y_1 + (2K_v - K_{v,1}) Y_2 \\ B_5 &= (X_1^2 + Y_1^2) + (X_2^2 + Y_2^2) \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

由方程组(16)解得

$$K_{v,1} = K_v + \frac{2(B_3 - K_v B_1)^2 + 2(B_4 - K_v B_2)^2}{(K_v B_1^2 + K_v B_2^2) \pm [(B_3 - K_v B_1)^2 + 2(B_4 - K_v B_2)^2]} \times \sqrt{\frac{2A_5 - A_1^2 - A_2^2}{(B_3 - K_v B_1)^2 + (B_4 - K_v B_2)^2} + \frac{(K_v B_1^2 + K_v B_2^2)^2}{4[(B_3 - K_v B_1)^2 + (B_4 - K_v B_2)^2]^2}}$$

由  $K_{v,1}$  解得

$$K_{v,2} = 2K_v - K_{v,1}$$

由  $K_{v,1}$ 、 $K_{v,2}$  解得

$$X_1 = \frac{B_3 - B_1 K_{v,2}}{2K_{v,1} - 2K_v}, Y_1 = \frac{B_4 - B_2 K_{v,2}}{2K_{v,1} - 2K_v}$$

由  $X_1$ 、 $Y_1$  解得

$$X_2 = B_1 - X_1, Y_2 = B_2 - Y_1$$

由以上求解,可得所有待定未知量,确定所有简化后隔震垫坐标以及刚度参数。在方程组(16)的自变量中,仅除第 1、2 个外的其余简化后隔震垫坐标需人为拟定,刚度参数同样不需自定。人为拟定简

化后隔震垫的原则同完全等效简化方法。在求解方程组(16)过程中同样发现,若将自定的简化后隔震垫设置过于集中,也会出现方程组无解或有解但超出范围的情况。

求出简化后隔震垫坐标和刚度参数后,根据方程(8)、(9),即可求出振动台模型结构隔震垫相应坐标和刚度参数。

4.1.2 实际算例 云南省澄江化石博物馆采用隔震设计,隔震层共计 83 套叠层橡胶支座,主楼层数为 5 层,总高度为 31.8 m,高宽比为 0.29,属于小高宽比结构。设计振动台试验模型相似比为 1:30,模

型结构隔震层采用 6 个铅芯隔震支座。结构三维模型、隔震垫平面布置见图 1、2,支座参数见表 1、2。

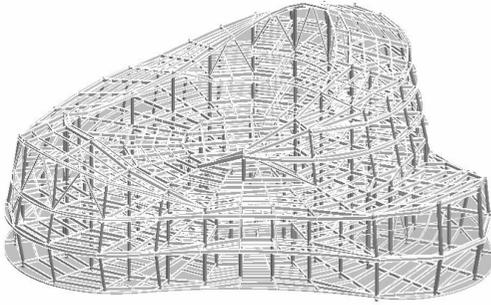


图 1 结构三维模型

Fig. 1 Three-dimensional model

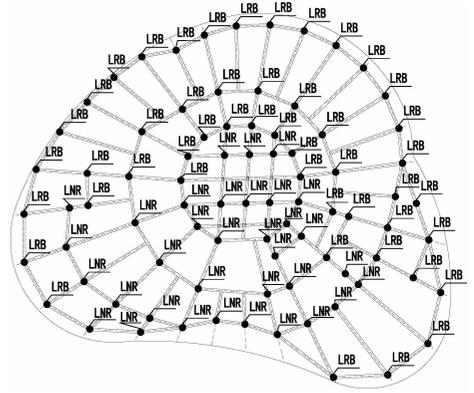


图 2 隔震垫平面布置

Fig. 2 Arrangement of isolation bearings

表 1 铅芯隔震支座参数

Table 1 Parameters of lead rubber bearing

类别	使用数量	竖向刚度/ (kN · mm <sup>-1</sup> )	等效水平刚度/ (kN · mm <sup>-1</sup> )	屈服前刚度/ (kN · mm <sup>-1</sup> )	屈服后刚度/ (kN · mm <sup>-1</sup> )	屈服力/kN
LRB1000	48	4 400	2.30	16.90	1.30	190

表 2 普通隔震支座参数

Table 2 Parameters of general rubber bearing

类别	使用数量	竖向刚度/ (kN · mm <sup>-1</sup> )	等效水平刚度/ (kN · mm <sup>-1</sup> )
LNR1000	35	4 000	1.25

表 4 未知量解

Table 4 Unknown quantity

隔震垫编号	坐标/mm		竖向刚度/ (kN · mm <sup>-1</sup> )
	X <sub>i</sub>	Y <sub>i</sub>	
1	668	-7 143	82 101.00
2	19 332	32 143	34 965.67

依照该简化方法概述,以刚度中心为原点建立坐标系,待定(X<sub>1</sub>,Y<sub>1</sub>),(X<sub>2</sub>,Y<sub>2</sub>)及K<sub>v,1</sub>、K<sub>v,2</sub>,其余已知量坐标结合振动台尺寸与施工条件自定,刚度参数按照 4.1.1 方法确定,见表 3。

表 3 自定已知量

Table 3 Known quantity

隔震垫 编号	坐标/mm		等效水平刚度/ (kN · mm <sup>-1</sup> )	竖向刚度/ (kN · mm <sup>-1</sup> )
	X <sub>i</sub>	Y <sub>i</sub>		
1	X <sub>1</sub>	Y <sub>1</sub>	25.69	K <sub>v,1</sub>
2	X <sub>2</sub>	Y <sub>2</sub>	25.69	K <sub>v,2</sub>
3	-20 000	-25 000	25.69	58 533.33
4	-50 000	-10 000	25.69	58 533.33
5	20 000	25 000	25.69	58 533.33
6	30 000	-15 000	25.69	58 533.33

将已知量代入方程组(16),各未知量解的表达式得出结果,见表 4。简化后隔震垫布置见图 3。

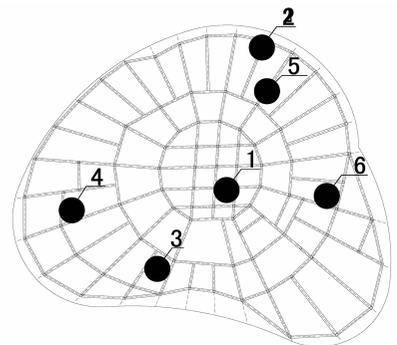


图 3 简化后隔震垫布置

Fig. 3 Arrangement of isolation bearings after simplification

#### 4.1.3 对比分析

1)等效平衡方程对比。根据等效原则条件,将以上求得解代入方程(1)~(4)、(7),与简化前结果进行对比,见表 5。结果表明方程右端与左端基本相等,所求得解满足等效原则条件。

表 5 方程误差对比

Table 5 Error comparison in equation

方程编号	左端	右端	误差/%
1	0	0	0
2	0	0	0
3	$-4.3987 \times 10^{11}$	$-4.3987 \times 10^{11}$	0.13
4	$-9.2590 \times 10^{11}$	$-9.2588 \times 10^{11}$	0.18
5	$1.8584 \times 10^{11}$	$1.8584 \times 10^{11}$	0.03

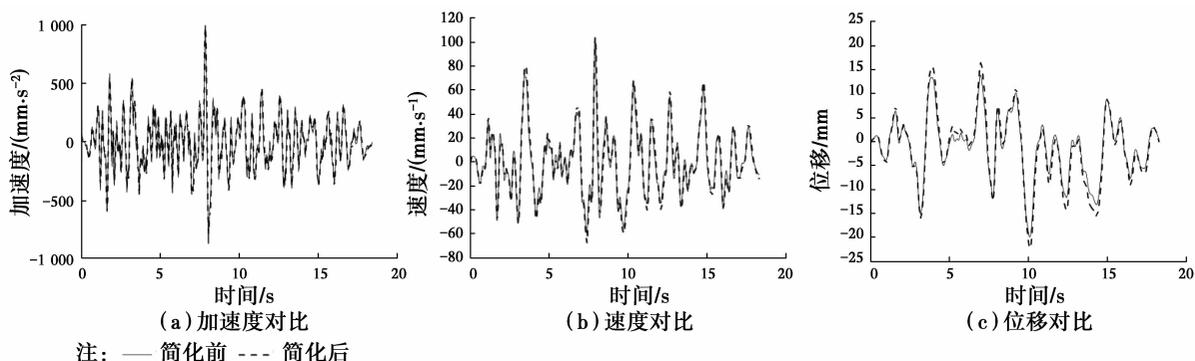


图 4 X 向地震波输入结构 X 向响应对比

Fig. 4 Response comparison of structure's X direction in seismic wave

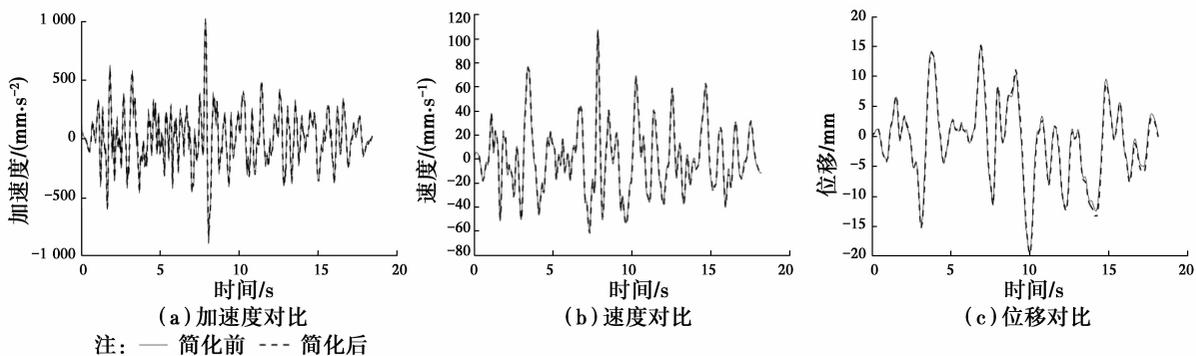


图 5 Y 向地震波输入结构 Y 向响应对比

Fig. 5 Response comparison of structure's Y direction in seismic wave

据图 4、5 分析,简化前后上部结构响应曲线基本一致,与等效平衡方程对比结果吻合。

4.1.4 相似比例系数及最终解确定 该振动台试验中,弹性模量相似比例系数  $S_E$  为 1,密度相似比例系数  $S_\rho$  为 20,加速度相似比例系数  $S_a$  为 1.5,几何尺寸相似比例系数为 1/30。

由方程(9)解得刚度相似比例系数

$$S_K = S_\rho S_a S_l^2 = 1/3$$

由几何尺寸及刚度相似比例系数,代入表 3、4,得出振动台模型结构隔震垫相应坐标和刚度参数,见表 6。

2) 数值模拟对比。利用有限元分析软件 SAP2000,任选一条地震波作为输入激励,对实际结构模型进行地震响应分析,将简化前后的结构加速度响应、速度响应、位移响应进行对比。输入地震波为 1980 年墨西哥维多利亚州地震 Victoria hospital satano 台站记录,得出上部结构任意一点响应对比见图 4、5。

表 6 振动台模型结构隔震垫坐标和刚度参数表

Table 6 Coordinates and parameters of rubber bearing in shaking table test model

隔震垫编号	坐标/mm		等效水平刚度/ (kN · mm <sup>-1</sup> )	竖向刚度/ (kN · mm <sup>-1</sup> )
	$X_i$	$Y_i$		
1	22	-238	0.86	2 736.70
2	644	1 071	0.86	1 165.52
3	-667	-833	0.86	1 951.11
4	-1 667	-333	0.86	1 951.11
5	667	833	0.86	1 951.11
6	1 000	-500	0.86	1 951.11

### 4.2 抗倾覆为主简化方法

4.2.1 方法概述 在地震作用下,大高宽比隔震结构的倾覆变形较为明显,隔震层产生抗倾覆矩抵抗倾覆变形,而扭转变形对结构影响较小。因此,在抗倾覆为主简化方法中,等效原则条件可主要考虑抗倾覆矩等效方程,忽略抗扭转矩等效方程。

以质量中心为原点建立坐标系,假设待定第 1、2 个简化后隔震垫坐标  $(X_1, Y_1)$ 、 $(X_2, Y_2)$ , 自定其余简化后隔震垫坐标; 待定第 1 个、第 2 个、第 3 个简化后隔震垫等效水平刚度  $K_{eq,1}$ 、 $K_{eq,2}$ 、 $K_{eq,3}$ , 其余简化后隔震垫具有相同等效水平刚度  $K_{eq}$ , 则  $K_{eq} = K_{EQ} \div m$ ,  $K_{eq,3} = 3K_{eq} - K_{eq,1} - K_{eq,2}$ ; 简化后隔震垫具有相同竖向刚度  $K_v$ , 则  $K_v = K_v \div m$ 。将以上 6 个未知量及其余已知量代入方程(1)~(6)化解, 把已知量统一移至方程左端, 方程左端已知量表达式用  $C_i$  表示

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= K_{eq,1} X_1 + K_{eq,2} X_2 + K_{eq,3} X_3 \\ C_2 &= K_{eq,1} Y_1 + K_{eq,2} Y_2 + K_{eq,3} Y_3 \\ C_3 &= X_1 + X_2 \\ C_4 &= Y_1 + Y_2 \\ C_5 &= X_1^2 + X_2^2 \\ C_6 &= Y_1^2 + Y_2^2 \end{aligned} \right\} (17)$$

由方程组(17)解得

$$X_1 = \frac{C_3 \pm \sqrt{2C_5 - C_3^2}}{2}, X_2 = \frac{C_3 \mp \sqrt{2C_5 - C_3^2}}{2}$$

$$Y_1 = \frac{C_4 \pm \sqrt{2C_6 - C_4^2}}{2}, Y_2 = \frac{C_4 \mp \sqrt{2C_6 - C_4^2}}{2}$$

由  $X_1, X_2, Y_1, Y_2$  解得

$$K_{eq,2} =$$

$$\frac{(C_1 - 3K_{eq} X_3)(Y_1 - Y_3) - (C_2 - 3K_{eq} Y_3)(X_1 - X_3)}{(X_2 - X_3)(Y_1 - Y_3) - (X_1 - X_3)(Y_2 - Y_3)}$$

由  $X_1, X_2, Y_1, Y_2, K_{eq,2}$  解得

$$K_{eq,1} = \frac{C_1 - K_{eq,2}(X_2 - X_1) - 3K_{eq} X_3}{X_1 - X_3}$$

由  $K_{eq,1}, K_{eq,2}$  解得

$$K_{eq,3} = 3K_{eq} - K_{eq,1} - K_{eq,2}$$

由以上求解, 可得所有待定未知量, 确定所有简化后隔震垫坐标以及刚度参数。在方程组(17)的自变量中, 仅除第 1、2 个外的其余简化后隔震垫坐标

需人为拟定, 刚度参数同样不需自定。人为拟定简化后隔震垫的原则及拟定坐标对方程组求解的影响同抗扭转为主简化方法。

求出简化后隔震垫坐标和刚度参数后, 根据方程(8)、(9), 即可求出振动台模型结构隔震垫相应坐标和刚度参数。

4.2.2 实际算例 文献[20]对基础隔震高层剪力墙结构进行振动台试验。原型结构为云南省玉溪市某公租房高层结构, 隔震层共计 56 套叠层橡胶支座, 上部结构共计 31 层, 总高度为 90.35 m, 高宽比为 3.97, 属于大高宽比结构, 设计振动台试验模型相似比为 1:12.5, 模型结构隔震层采用 6 个铅芯隔震支座。结构平面布置、隔震垫平面布置见图 6、7, 支座参数见表 7、8。

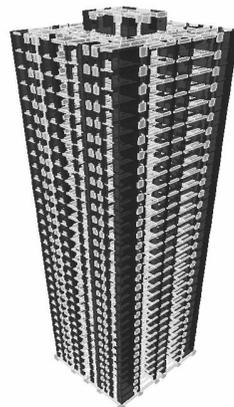


图 6 结构三维模型

Fig. 6 Three-dimensional model

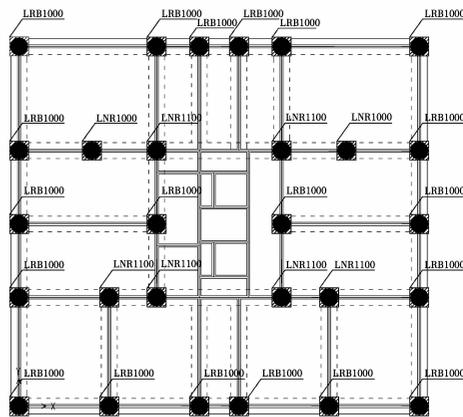


图 7 隔震垫平面布置

Fig. 7 Arrangement of isolation bearings

表 7 铅芯隔震支座参数

Table 7 Parameters of lead rubber bearing

类别	使用数量	竖向刚度/(kN · mm <sup>-1</sup> )	等效水平刚度/(kN · mm <sup>-1</sup> )	屈服前刚度/(kN · mm <sup>-1</sup> )	屈服后刚度/(kN · mm <sup>-1</sup> )	屈服力/kN
LRB1000	20	4 400	2.20	17.55	1.35	250

表 8 普通隔震支座参数

Table 8 Parameters of general rubber bearing

类别	使用数量	竖向刚度/ (kN·mm <sup>-1</sup> )	等效水平刚度/ (kN·mm <sup>-1</sup> )
LNR1000	2	4 000	1.20
LNR1100	6	5 000	1.45

依照该简化方法概述,以质量中心为原点建立坐标系,待定 $(X_1, Y_1)$ 、 $(X_2, Y_2)$ 及 $K_{eq,1}$ 、 $K_{eq,2}$ 、 $K_{eq,3}$ ,其余已知量坐标结合振动台尺寸与施工条件自定,刚度参数按照 4.2.1 方法概述确定,见表 9。

表 9 自定已知量

Table 9 Known quantity

隔震垫编号	坐标/mm		等效水平刚度/ 度/(kN·mm <sup>-1</sup> )	竖向刚度/ (kN·mm <sup>-1</sup> )
	$X_i$	$Y_i$		
1	$X_1$	$Y_1$	$K_{eq,1}$	20 200
2	$X_2$	$Y_2$	$K_{eq,2}$	20 200
3	-10 667	-9 412	$K_{eq,3}$	20 200
4	-10 817	4 788	9.18	20 200
5	6 933	-10 412	9.18	20 200
6	3 933	9 458	9.18	20 200

将已知量代入方程组(17),由各未知量解的表达式得出结果,见表 10;得出简化后隔震垫布置见图 8。

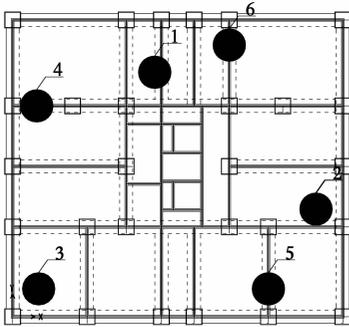


图 8 简化后隔震垫布置

Fig. 8 Arrangement of isolation bearings after simplification

表 10 未知量解

Table 10 Unknown quantity

隔震垫编号	坐标/mm		等效水平刚度/ (kN·mm <sup>-1</sup> )
	$X_i$	$Y_i$	
1	-1 143	7 926	9.30
2	11 762	-2 349	9.09
3	-10 667	-9 412	9.16

#### 4.2.3 对比分析

1) 等效平衡方程对比。同样根据等效原则条件,将求得解代入方程(1)~(6),所得结果与简化前结果进行对比,见表 11。结果对比表明,方程右端与左端基本相等,所求得解满足等效原则条件。

表 11 方程误差对比

Table 11 Error comparison in equation

方程编号	左端	右端	误差/(%)
1	$-9.456 1 \times 10^5$	$-9.402 8 \times 10^5$	56.71
2	$1.325 3 \times 10^6$	$1.332 5 \times 10^6$	-53.33
3	0	0.058 9	0
4	0	-0.004 1	0
5	$8.766 3 \times 10^{15}$	$8.766 4 \times 10^{15}$	-0.11
6	$7.629 7 \times 10^{15}$	$7.629 7 \times 10^{15}$	0

2) 数值模拟对比。同样利用有限元分析软件 SAP2000,任选一条地震波作为输入激励,对实际结构模型进行地震响应分析,将简化前与简化后结构加速度响应、速度响应、位移响应进行对比。输入地震波为 1940 年 El Centro-imp vall lrr 地震 El Centro 台站记录,得出上部结构任意一点响应对比见图 9、10。

据图 9、10 分析,简化前与简化后上部结构响应曲线基本一致,与等效平衡方程对比结果吻合。

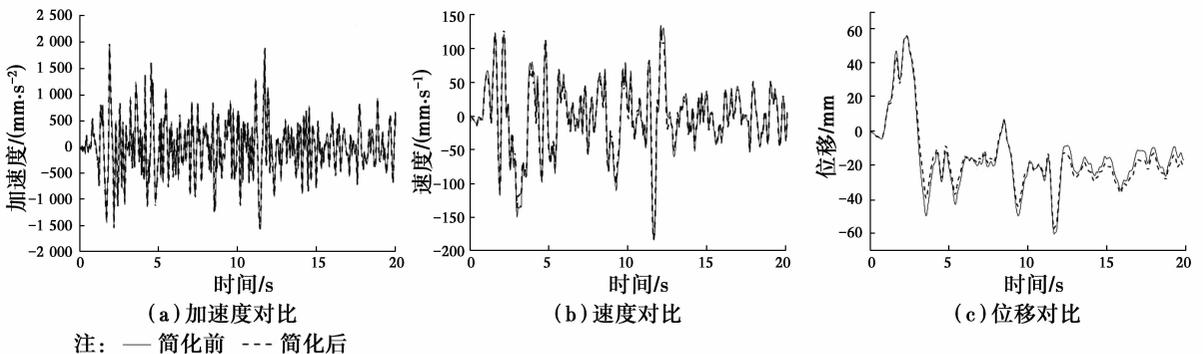


图 9 X 向地震波输入结构 X 向响应对比

Fig. 9 Response comparison of structure's X direction in seismic wave

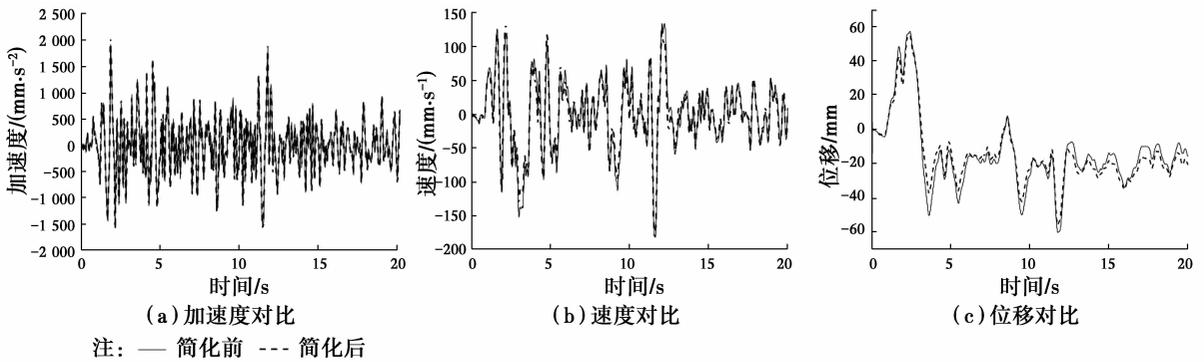


图10 Y向地震波输入结构Y向响应对比

Fig. 10 Response comparison of structure's Y direction in seismic wave

4.2.4 相似比例系数确定及求出最终解该振动台试验中,弹性模量相似比例系数  $S_E$  为 0.25,密度相似比例系数  $S_\rho$  为 2.18,加速度相似比例系数  $S_a$  为 1.4315,几何尺寸相似比例系数为 1/12.5。

由方程(9)解得刚度相似比例系数

$$S_K = S_\rho S_a S_L^2 = 1/50$$

由几何尺寸及刚度相似比例系数,代入表 9、10,得出振动台模型结构隔震垫相应坐标和刚度参数,见表 12。

表 12 振动台模型结构隔震垫坐标和刚度参数表

Table 12 Coordinates and parameters of rubber bearing in shaking table test model

隔震垫 编号	坐标/mm		等效水平刚度/ (kN·mm <sup>-1</sup> )	竖向刚度/ (kN·mm <sup>-1</sup> )
	$X_i$	$Y_i$		
1	-91	634	0.19	404.00
2	941	-188	0.18	404.00
3	-853	-753	0.18	404.00
4	-865	383	0.18	404.00
5	555	-833	0.18	404.00
6	315	757	0.18	404.00

## 5 结论

利用完全等效简化方法和部分等效简化方法,对原型隔震层简化为模型结构隔震层分析,并结合实例对比,得出结论如下:

1)建议将简化后隔震垫设置为不同刚度参数,使简化前与简化后隔震垫布置更易满足等效原则。

2)简化方法得出简化后布置方案在等效平衡方程中成立。

3)在相同地震波激励下,简化前与简化后上部结构响应曲线基本一致。

4)简化方法中已设定量对未知量解的影响有待进一步深入研究,如何通过设定已知量找到最优解

方便振动台模型施工是下一步研究重点。

## 参考文献:

- [1] 周颖,吕西林. 建筑结构振动台模型试验方法与技术[M]. 北京:科学出版社,2012.
- [2] 蒋欢军,刘老二. 某型钢混凝土框架-混凝土核心筒结构的抗震性能评估[J]. 土木建筑与环境工程,2013,35(1):96-103.  
JIANG H J, LIU L E. Seismic performance evaluation of a steel reinforced concrete frame-concrete tube structure [J]. Journal of Civil, Architectural and Environment Engineering, 2013, 35 (1): 96-103. (in Chinese)
- [3] 阙泽利,李哲瑞,张贝贝,等. 明角直天王殿松木斗拱振动台试验研究[J]. 土木建筑与环境工程,2015,37(3):26-34.  
QUE Z L, LI Z R, ZHANG B B, et al. Experimental analysis on shaking table tests of Dougong in Tianwang Hall, Luzhi, Ming dynasty [J]. Journal of Civil, Architectural and Environment Engineering, 2015, 37 (3):26-34. (in Chinese)
- [4] 连鸣,苏明周. Y形偏心支撑高强钢框架结构抗震性能[J]. 土木建筑与环境工程,2016,38(4):86-95.  
LINA M, SU M Z. Finite element analysis on seismic performance of high strength steel frames with Y-type eccentrically braces[J]. Journal of Civil, Architectural and Environment Engineering, 2016, 38(4): 86-95. (in Chinese)
- [5] 党育,杜永峰,李慧. 基础隔震结构设计及施工指南[M]. 北京:中国水利水电出版社,知识产权出版社,2007.
- [6] 周颖,胡程程,周广新,等. 摩擦摆隔震结构振动台模型设计方法研究[J]. 结构工程师,2015,31(5):6-11.  
ZHOU Y, HU C C, ZHOU G X, et al. Model design method for shaking table test on isolated structures

- using friction pendulum bearings [J]. *Structural Engineers*, 2015, 31(5): 6-11. (in Chinese)
- [7] 刘璐, 周颖. 高层隔震结构振动台试验模型设计的几个特殊问题[J]. *结构工程师*, 2015, 31(4): 108-113.  
LIU L, ZHOU Y. Significant problems in the shaking table test model design of high-rise isolated structures [J]. *Structural Engineers*, 2015, 31(4): 108-113. (in Chinese)
- [8] 刘阳, 刘文光, 何文福, 等. 复杂博物馆隔震结构地震模拟振动台试验研究[J]. *振动与冲击*, 2014, 33(4): 107-112.  
LIU Y, LIU W G, HE W F, et al. Shaking table tests for a complex museum's isolated structure [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(4): 107-112. (in Chinese)
- [9] 蒋欢军, 王斌, 吕西林, 等. 上海世博会中国馆抗震分析与振动台模型试验研究[J]. *土木建筑与环境工程*, 2011, 33(3): 13-18.  
JIANG H J, WANG B, LU X L, et al. Seismic analysis and shaking table test of China Pavilion for EXPO 2010 Shanghai [J]. *Journal of Civil, Architectural and Environment Engineering*, 2011, 33(3): 13-18. (in Chinese)
- [10] 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 L S, LIU L F, LIANG H W. Experimental study on three-dimensional seismic isolation [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2014, 47(3): 33-38. (in Chinese)
- [11] 颜学渊, 张永山, 王焕定, 等. 三维隔震抗倾覆结构振动台试验[J]. *工程力学*, 2010, 27(5): 91-96.  
YAN X Y, ZHANG Y S, WANG H D, et al. Shaking table test for the structure with three-dimensional base isolation and overturn resistance devices [J]. *Engineering Mechanics*, 2010, 27(5): 91-96. (in Chinese)
- [12] GRIGORIOS A, MARIOS P. Seismic response of bridges with rocking foundations compared to fixed-base bridges at a near-fault site [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2014, 19(5): 04014007.
- [13] ALIREZA M, HAMID R R. Plastic hinge length of reinforced concrete columns subjected to both far-fault and near-fault ground motions having forward directivity [J]. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 2013, 22(12): 903-926.
- [14] LU X L, CHEN L Z, ZHOU Y, et al. Shaking table model tests on a complex high-rise building with two towers of different height connected by trusses [J]. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 2009, 18(7): 765-788.
- [15] WEIL S, ZHOU F L, TAN P, et al. Research and application on three-dimensional seismic and vibration isolation for building [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology (New Series)*, 2011, 18(1): 76-82.
- [16] NAKAZAWA A, KOIZUMI T, SHALLOW N O. City tower kobe sannomiya [C]//Tokyo: The Japan Society of Seismic Isolation, 2013: 3-7.
- [17] CALUGARU V, PANAGIOTOU M. Seismic response of 20-story base-isolated and fixed-base reinforced concrete structural wall buildings at a near-fault site [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2014, 43(6): 927-948.
- [18] 王栋, 吕西林, 刘中坡. 不同高宽比基础隔震高层结构振动台试验研究及对比分析[J]. *振动与冲击*, 2015, 34(16): 109-118.  
WANG D, LV X L, LIU Z P. Shaking table test and comparison analysis for base-isolated high-rise buildings with different aspect ratios [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, 34(16): 109-118. (in Chinese)
- [19] 赖正聪, 白羽, 潘文, 等. 高烈度地区高层隔震剪力墙结构抗震性能地震模拟振动台试验[J]. *建筑结构*, 2016, 46(11): 72-76.  
LAI Z C, BAI Y, PAN W, et al. Earthquake simulating shaking table test on seismic performance of high-rise isolated shear-wall structure in high seismic intensity region [J]. *Building Structure*, 2016, 46(11): 72-76. (in Chinese)
- [20] 王经纬. 高层剪力墙基础隔震结构振动台试验抗震性能的分析与研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2015.

(编辑 郭飞)