

# 基于分层壳单元的 RC 核心筒三维全过程有限元分析

林旭川 陆新征 缪志伟 叶列平

清华大学土木工程系, 清华大学结构工程与工程振动教育部重点实验室, 北京, 100084

**摘要:** 钢筋混凝土 (RC) 核心筒是高层建筑中最为常见的抗侧力结构, 其空间受力行为明显, 构件形状多样, 故准确模拟其非线性受力全过程是结构抗震分析的一个重要课题。本文基于分层壳单元, 对一钢筋混凝土核心筒拟动力实验进行了全过程模拟。通过对墙体、连梁等关键部位合理建模, 较好的反映了核心筒的空间受力行为, 以及连梁屈服和剪切破坏、筒体开裂、筒体钢筋屈服等复杂非线性行为。计算结果和实验结果吻合良好, 体现了较高精度, 本文建议的有限元模型可用于各种结构体系中的核心筒的抗震性能的分析, 对实际高层 RC 筒体结构的大震弹塑性计算具有一定的参考意义。

**关键词:** 核心筒, 有限元, 分层壳, 弹塑性计算, 抗震分析

## Spatial Finite Element Analysis for the Whole-process of RC Core Tubes Based on the Layered Shell Element

Lin Xu-Chuan, Lu Xin-Zheng, Miao Zhi-Wei, Ye Lie-Ping

(Department of Civil Engineering, Key Laboratory of Structural Engineering and Vibration of China Education Ministry, Tsinghua University, Beijing, 100084)

**Abstract :** As the most widely used lateral resistant structures, RC core tubes consist of various members and perform spatial mechanical behaviors. Therefore, how to accurately simulate the RC tubes for the whole process of nonlinear behaviors is a significant subject in seismic analysis of structures. Based on the layered shell element the whole process simulation of a pseudo-dynamic testing on RC core tubes is presented in the paper. By correct modeling of the key structural elements (such as walls, coupling beams, reinforcements), the model is able to reflect the spatial behavior of the tube as well as the complicated nonlinear behaviors of the yielding and shear failure of coupling beams, cracking of the tube and so on. Furthermore, results from the simulation match well with those from the tests, which show the finite element model is of some help on elasto-plastic calculation of high-rise RC tubes in severe earthquakes.

**Keywords :** Core tube, Finite element, Layered shell, Elasto-plastic calculation, Seismic Analysis

## 1 引言

钢筋混凝土核心筒是高层及超高层结构中常见的抗侧力构件, 甚至一些结构体系将钢筋核心筒作为主要的抗侧力构件, 以钢框架 - 钢筋混凝土核心筒结构为例, 在水平地震作用下, 钢筋混凝土核心筒承受了绝大部分的地震剪力, 核心筒的抗震性能好坏将直接影响整个结构的安危。然而, 与

\*基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划(2006BAK01A02-09)和清华大学校基础研究基金(JC2007003)

一般的剪力墙抗侧力模式不同, 核心筒空间受力行为明显, 构件形状多样, 地震作用下筒体的受力与变形非常复杂, 因此准确模拟其非线性全过程是结构抗震分析的一个重要课题。本文基于可以考虑面内弯曲 - 面内剪切 - 面外弯曲之间耦合作用的分层壳单元, 提出了两种可以准确模拟剪力墙模型: 1) 钢筋弥散-分层壳剪力墙模型; 2) 离散钢筋-分层壳剪力墙模型。本文基于第二种剪力墙模型, 对钢筋混凝土核心筒的抗震性能试验进行了有限元模拟。模拟结果表明, 体现了较高精度。本文建议的有限元模型对实际高层 RC 筒体结构的大震弹塑性计算具有一定的参考意义。

## 2 分层壳单元在剪力墙模型中的应用

分层壳单元基于复合材料力学原理, 将一个壳单元划分成很多层(图 1), 各层可以根据需要设置不同的厚度和材料性质(混凝土、钢筋等)。在有限元计算时, 首先得到壳单元中心层的应变和曲率, 然后根据各层材料之间满足平截面假定, 由中心层应变和曲率得到各层的应变, 进而由各层的材料本构方程得到各层相应的应力, 并积分得到整个壳单元的内力。分层壳单元考虑了面内弯曲 - 面内剪切 - 面外弯曲之间的耦合作用, 比较全面的反映了壳体空间的力学性能。

采用分层壳单元模拟钢筋混凝土剪力墙有以下两种方法:

1) 钢筋弥散 - 分层壳剪力墙模型: 在分层壳单元中, 钢筋材料被弥散到某一层或某几层中(图 2)。各种钢材本构模型均可在分层壳模型中使用, 对于纵横配筋率相同的墙体, 可设为各向同性钢筋层; 对于纵横配筋率不同的墙体, 可分别设置不同材料主轴方向的正交各向异性的钢筋层来模拟<sup>[1]</sup>。另外, 在分层壳剪力墙模型中, 边缘约束构件和中间墙体的混凝土可以分别采用不同的本构模型, 以考虑边缘约束构件受到的约束作用。

与已有的剪力墙计算模型相比, 分层壳剪力墙单元可以直接将混凝土和钢筋的本构行为与剪力墙的非线性行为联系起来, 可以考虑面内弯曲 - 面内剪切 - 面外弯曲之间的耦合, 因而在描述实际剪力墙复杂非线性行为方面有着明显的优势。

2) 离散钢筋 - 分层壳剪力墙模型: 这种剪力墙模型的特点是, 剪力墙中钢筋和混凝土采用不同的单元分别建模后组成共同作用的整体。采用分层壳单元模拟剪力墙混凝土部分行为, 混凝土材料层按照各项同性设置; 采用空间梁单元或杆单元模拟剪力墙中所有钢筋的行为。有一些有限元软件提供了将建好的“钢筋网”直接埋入混凝土墙体的功能, 且无需钢筋单元与混凝土分层壳单元节点耦合即可实现二者共同作用, 如通用非线性有限元软件 MSC.Marc 中的“Inserts”功能。

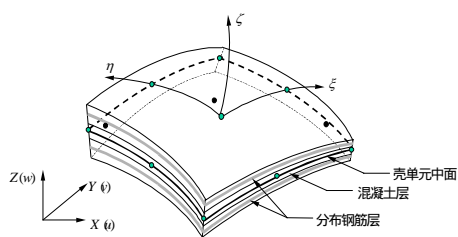


图 1 分层壳单元

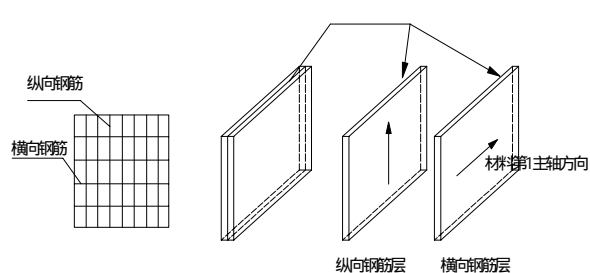


图 2 分层壳模型中钢筋层设置示意图

此模型不仅吸收了第一种模型中采用分层壳单元的优点, 而且精细的模拟了剪力墙中各种钢筋的力学行为, 较第一种方法的模拟结果更接近剪力墙的实际行为。此模型的计算量大于第一种, 对计算机的要求更高, 因此过去人们往往倾向于采用第一种模型计算复杂剪力墙或核心筒的力学行为。然而, 随着计算机性能的不断提高, 第二种模型在现阶段配置稍高的计算机上使用已经不成问题。

### 3 材料本构的选取与剪力墙算例

在大型复杂结构计算中, 为了简化起见, 采用有限元软件自带的弹塑性混凝土本构模型, 以下主要对钢筋的本构模型进行讨论。

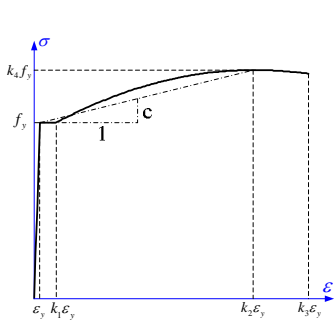


图 3 “汪训流模型”普通钢筋单调受拉加载曲线

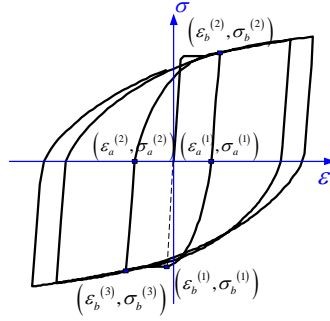


图 4 “汪训流模型”普通钢筋往复加载曲线

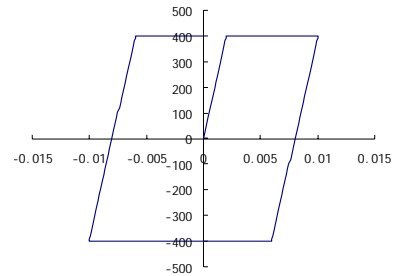


图 5 理想弹塑性双线性滞回模型

一般钢筋的本构模型采用的是理想弹塑性双线性滞回模型, 这也是目前钢筋混凝土结构有限元分析通常所采用的模型。这一本构模型简单通用, 便于有限元计算处理。但是在反复荷载作用下, 钢筋混凝土剪力墙表现出较为复杂的受力性能, 此时的分析计算若仍然采用这一模型就会存在一定的缺陷, 特别是不能全面准确的反映往复加载过程中会出现的诸如 Bauschinger 效应等复杂的受力特性。

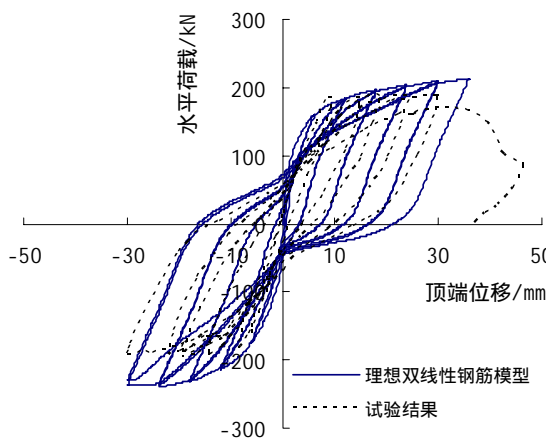


图 6 力—位移计算结果 (理想弹塑性模型)

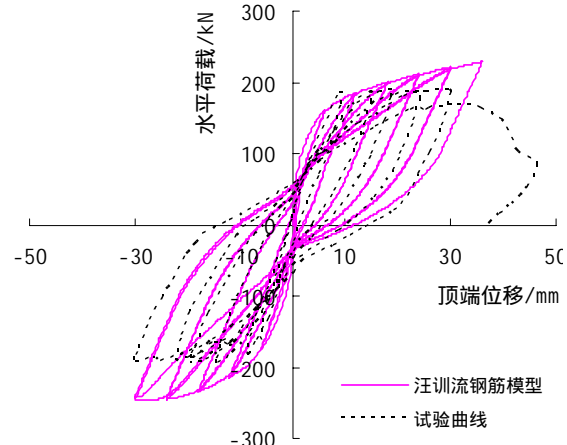


图 7 力—位移计算结果 (汪训流模型)

因此, 为了更准确的进行剪力墙结构的有限元模拟计算, 本文课题组汪训流博士等开发了一个新型钢筋本构模型 (以下称之为“汪训流模型”) [2]。该钢筋本构基于 Légeron 等人的工作 [3], 在再加载路径上合理考虑了钢筋的 Bauschinger 效应, 并与钢筋的材性试验结果吻合良好 [3]。此外, 为反映钢筋单调加载时的屈服、硬化和软化现象, 并使钢筋本构更加通用, “汪训流模型”在 Légeron 等模型 [3] 的基础上分别引入钢筋的屈服点、硬化起点、应力峰值点和极限点, 并且将钢筋本构扩展为可以分别模拟拉压等强的具有屈服台阶的普通钢筋和拉压不等强的没有屈服台阶的高强钢筋或钢绞线的通用模型 (图 3, 图 4)。

为了验证这一钢筋本构模型的有效性, 本文利用同一个算例分别应用两种钢筋本构模型进行了有限元模拟计算。其中钢筋本构模型分别采用理想弹塑性模型 (图 5) 和汪训流模型, 而混凝土模型均采用 MSC.Marc 自带混凝土本构模型。本算例模型取自清华大学所做的混凝土高墙试验 [4], 试

件高 1900mm, 宽 1000mm, 厚 100mm, 剪跨比为 1.9, 其它参数详见文献[4]。有限元计算结果表明, 采用汪训流钢筋模型的卸载段与试验吻合较好, 曲线的形态与试验更接近, 见图 6、图 7。

#### 4 钢筋混凝土核心筒模型

与剪力墙模型相比, 钢筋混凝土 (RC) 核心筒空间受力行为明显, 构件形状多样, 故准确模拟其非线性受力全过程是结构抗震分析的一个重要课题。一般情况下, 建立比较准确的核心筒模型需要考虑一下问题:

1) 选择合适的材料本构模型。对于材料力学性能复杂的钢筋混凝土材料, 这个问题变得更为关键。有限元软件 MSC.Marc 中自带的混凝土模型可以考虑混凝土材料开裂及压碎的影响, 基本上可以反映混凝土材料的特点。

2) 建立能够与核心筒空间力学行为相适应的剪力墙模型, 比如选择合适的单元模拟剪力墙平面外的力学特性。本文基于分层壳单元的两种剪力墙模型的提出正是针对这个问题, 可以在比较准确模拟剪力墙和筒体的空间非线性行为。

3) 准确的模拟连梁的力学性能, 这是在准确模拟剪力墙基础上需进一步解决的问题。在水平地震作用下, 连梁一般首先发生开裂、屈服、刚度退化, 对墙肢间共同作用的效果产生很大的影响, 进而影响到整个核心筒的抗侧力刚度, 因此需要采用合适的模型准确的模拟连梁。剪力墙高跨比一般较大, 剪切影响明显, 简单用梁单元模拟很多时候不甚准确。为了准确模拟连梁的力学特性, 本文同样采用分层壳单元模拟连梁, 这样可以较好考虑连梁的弯 - 剪耦合非线性行为。另外, 在后面的算例中除采用更加精细的汪训流钢筋模型外, 还采用上文提到的第二种方法建模, 按照实际的配筋量和空间位置设置钢筋。

另外, 也可用 Fiber 模型粗略的模拟核心筒, 但这种模型将整个核心筒看作长杆, 需满足平截面假定, 忽略墙体内部的剪切变形, 无法准确的模拟核心筒的力学特性, 特别是在非现行阶段精度不够。

#### 5 算例

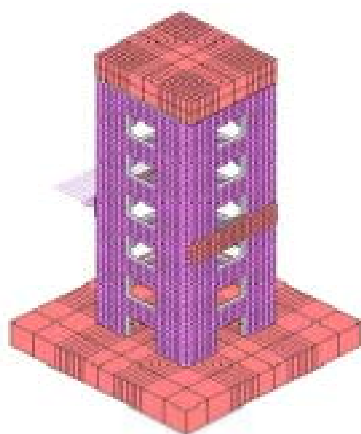


图 8 混凝土单元划分

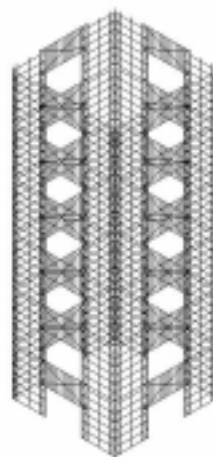


图 9 钢筋单元空间分布

本文对最近国内的 2 个较大比例、大高宽比的钢筋混凝土核心筒 (TC1 与 TC2) 的抗震性能试验<sup>[5]</sup>进行有限元模拟。两个核心筒尺寸、配筋相同, 核心筒以某大厦钢筋混凝土核心筒为原型按照 1:6.5 缩尺比例进行设计, 核心筒为 6 层, 高宽比 2.68, 筒身净高 3690mm, 筒体水平截面轮廓尺寸为 1380×1380mm, 墙体厚度 70mm, 连梁为钢筋混凝土交叉暗撑连梁, 更具体参数见文献[5]。TC1 与

TC2 按混凝土实际强度计算的轴压比分别为 0.15 和 0.36, 试验开始后先在试件顶部施加竖向荷载, 然后在顶层和三层处施加水平低周反复荷载, 按倒三角模式加载。

本文根据试件实际材料强度建立有限元模型, 剪力墙与连梁模型采用离散钢筋单元埋入分层壳的方法建立, 混凝土分层壳单元见图 8, 整个核心筒的钢筋布置见图 9, 将图 9 中的钢筋网埋入图 8 的混凝土分层壳中即建立了混凝土与钢筋共同作用的筒体有限元模型。钢筋采用汪训流钢筋模型, 混凝土采用 MSC.Marc 自带的混凝土模型。

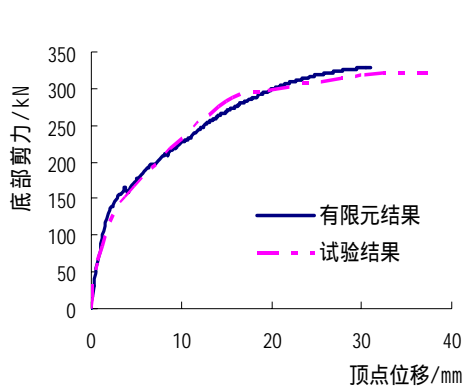


图 10 底部剪力-顶点位移骨架线对比 (实际轴压比=0.15)

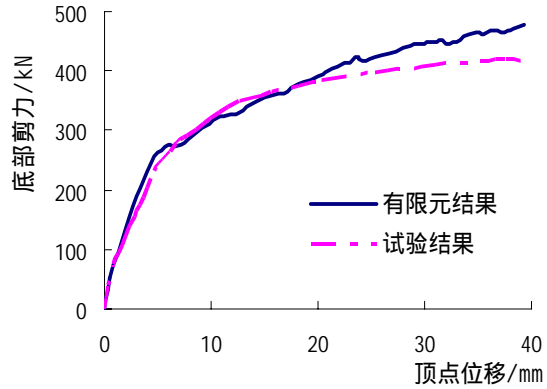


图 11 底部剪力-顶点位移骨架线对比 (实际轴压比=0.36)

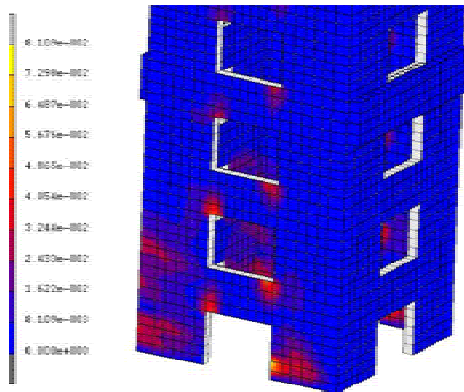


图 12 墙肢底部开裂应变分布 (有限元)

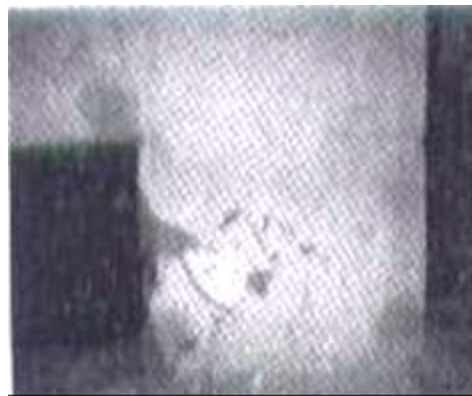


图 13 墙肢开裂状况(试验照片)<sup>[5]</sup>

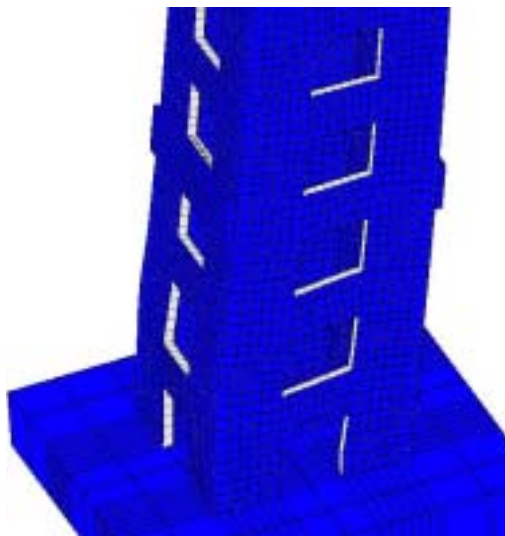


图 14 墙体变形放大图

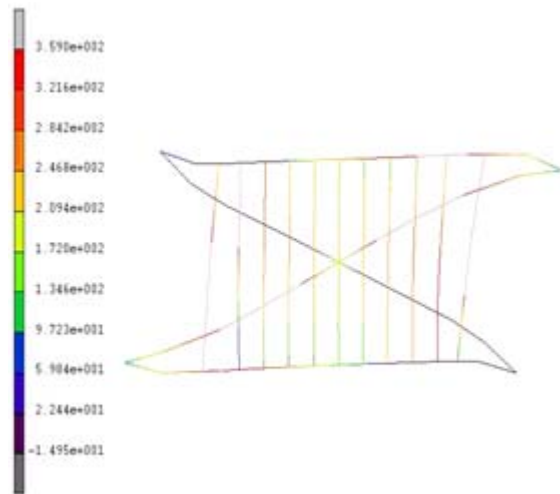


图 15 连梁钢筋应力分布

计算结果表明, 基于分层壳的钢筋混凝土核心筒模型与试验吻合良好。由于文献中中往复加载试验具体的加载制度未知, 因此有限元分析无法完全按照试验过程进行往复加载, 本文仅给出模型计算的底部剪力-顶点位移加载骨架线与试验结果的对比, 二者吻合较好, 核心筒模型具有较高的精度, 如图 10、图 11。模型对核心筒底部及连梁的开裂进行了较好的模拟, 图 12 为核心筒在水平力作用下墙肢底部的开裂状况, 图 13 为试验实际观察到的底部墙肢开裂情况, 二者同样吻合较好。另外, 通过模型可以观察到各处钢筋的应力应变情况、墙体平面外变形情况以及剪力滞后现象等, 图 14 展示了为有限元计算结果中墙体平面外变形的状况, 图 15 反映了连梁各钢筋的应力分布状况, 可以看出受拉的交叉钢筋与部分箍筋已屈服 (屈服应力  $360\text{N/mm}^2$ )。

## 6 结论

- 1) 提出了两种基于分层壳单元的剪力墙模型, 这两种剪力墙模型均考虑了面内弯曲 - 面内剪切 - 面外弯曲之间的耦合作用, 可以比较准确、全面的反映剪力墙的力学特性。
- 2) 为了更准确的模拟剪力墙的特性, 本文引入考虑钢筋往复加载过程复杂的受力特性的汪训流钢筋模型, 基于这种钢筋模型的剪力墙滞回曲线与试验吻合良好。
- 3) 在离散钢筋-分层壳剪力墙模型基础上, 对两个大比例核心筒在不同轴压比作用下的抗震性能试验进行了有限元模拟, 结果较好的反映了核心筒的空间受力行为, 以及连梁屈服和剪切破坏、筒体开裂、筒体钢筋屈服等复杂非线性行为, 体现较高精度。
- 4) 本文建议的核心筒有限元模型可用于各种结构体系中的核心筒的抗震性能的分析, 对实际高层 RC 筒体结构的大震弹塑性计算具有一定的参考意义。

## 致谢

本文感谢国家“十一五”科技支撑计划(2006BAK01A02-09)和清华大学校基础研究基金(JC2007003)的支持。感谢清华大学土木水利学院数字防灾与虚拟工程实验室提供高性能计算环境。

## 参考文献

- [1] 门俊, 陆新征, 宋二祥, 陈肇元. 分层壳模型在剪力墙结构计算中的应用 [J]. 防护工程 28(3), 2006, 9-13  
Men J, Lu XZ, Song EX, Chen ZY, Application of multi-layer model in shell wall computation. [J] Protective Structure., 2006, 28(3), 9~13.
- [2] 汪训流, 陆新征, 叶列平, 往复荷载下钢筋混凝土柱的数值模拟 [J], 工程力学 (已录用), 2006  
Wang XL, Lu XZ, Ye LP, Numerical simulations for RC columns under cyclic loading [J], Engineering Mechanics (Accepted), 2006
- [3] Légeron, F., Paultre, P., and Mazar, J.(2005). "Damage Mechanics Modeling of Nonlinear Seismic Behavior of Concrete Structures," J. Struct. Eng., ASCE, 131(6), 946-954.
- [4] 陈勤. 钢筋混凝土双肢剪力墙静力弹塑性分析[D]. 北京: 清华大学, 2003.  
Chen Q. Static Inelastic Analysis of Reinforced Concrete Coupled Shear Wall. [D] Beijing: Tsinghua University, 2003.
- [5] 杜修力, 贾鹏, 赵均. 钢筋混凝土核心筒不同轴压比作用下抗震性能试验研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, Vol.39, Sup.2: 567-572