

石雄. 地震动竖向分量对铁路房屋的地震响应性能影响[J]. 华南地震, 2019, 39(2): 142–146. [SHI Xiong. Effect of Vertical Components of Ground Motion on Seismic Response of Railway Buildings[J]. South China journal of seismology, 2019, 39(2): 143–146]

## 地震动竖向分量对铁路房屋的地震响应性能影响

石 雄

(国家能源集团神朔铁路分公司, 陕西 神木 719316)

**摘要:** 为了提高铁路房屋的抗震能力, 分析地震动竖向分量对铁路房屋的地震响应性能, 提出基于荷载—变形关系联合评估的地震动竖向分量对铁路房屋的地震响应评估模型。构建地震动竖向分量的力学响应评估模型, 识别铁路房屋的地震屈服响应参数, 采用荷载—变形关系和极限荷载结合的方法进行铁路房屋的地震屈服响应应力评估, 分析地震动竖向分量对铁路房屋的响应。建立动量平衡方程和弯矩平衡方程, 构建铁路房屋的地震响应的三阶段荷载—变形模式, 实现地震动竖向分量对铁路房屋的地震响应性能评估模型的优化设计。测试结果表明, 采用该模型能有效分析地震动竖向分量对铁路房屋的地震响应性能影响, Simulink 仿真结果和有限元模拟结果的准确性较高, 力学参数辨识性能优越, 计算结果准确可靠。

**关键词:** 地震动竖向分量; 铁路; 房屋; 地震响应

**中图分类号:** TU352.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-8662(2019)02-0142-05

**DOI:** 10.13512/j.hndz.2019.02.021

## Effect of Vertical Components of Ground Motion on Seismic Response of Railway Buildings

SHI Xiong

(Shenshuo Railway Branch of CHN Energy, Shenmu 719316, China)

**Abstract:** In order to improve the seismic capacity of railway buildings, effect of vertical components of ground motion on seismic response of the buildings is analyzed, and an evaluation model of seismic response of railway buildings based on joint assessment of load–deformation relation is proposed. The mechanical response evaluation model of vertical component of ground motion is constructed, the seismic yield response parameters of railway buildings are identified, and the seismic yield response stress of railway buildings is evaluated by the combination of load–deformation relation and limit load. The response of vertical component of earthquake ground motion to railway building is analyzed. The momentum equilibrium equation and bending moment equilibrium equation are established to construct the three–stage load–variation of earthquake response of railway buildings and to optimize the evaluation model of seismic response performance of railway buildings with vertical components of ground motion. The test results show that the model can effectively analyze the effect of vertical

**收稿日期:** 2018-05-30

**作者简介:** 石 雄(1981–), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事: 铁路房建工程, 工程建设。

**E-mail:** shixiong785389@163.com.

component of ground motion on seismic response of railway buildings. Simulink simulation results and finite element simulation results have higher accuracy, superior identification performance of mechanical parameters and accurate and reliable calculation results.

**Keywords:** Vertical components of ground motion; Railway; Building; Seismic response

## 0 引言

地震动竖向分量作用下的铁路房屋在受到地震作用冲击下,容易受到地震波动的影响,导致房屋容易受损,需要对地震动竖向分量作用下的铁路房屋进行抗震性能设计,研究地震动竖向分量对铁路房屋的地震响应性能影响模型,在提升房屋的抗震能力以及实现地震响应的量化评估分析方面具有重要意义<sup>[1]</sup>。

地震动竖向分量对铁路房屋的地震响应性能影响分析的研究是建立在对力学参数分析的基础上,采用受力评估模型和复杂应力作用评估模型,建立地震动竖向分量对铁路房屋的地震响应性能的量化评估模型<sup>[2]</sup>,响应的力学评估模型被广泛应用。文献[3]研究将超高性能混凝土(Ultra-High Performance Concrete, UHPC)用于对物质文化遗产的建筑砖砌体承重墙的巩固成效,利用建筑原始位置的砖,并且按历史资料配制固定比例原建筑所需的水泥砂浆材料,按原砌筑方法设计了两片低强度砖墙样品。但压剪破坏方式产生变化,都在底部相接处产生水平通缝损害;在使用 UHPC 材料进行加固时,低强度砖墙的受剪承载力不宜采用规范中钢筋混凝土加固的方法。文献[4]中提出基于复杂曲面抗拉应力评估的地震动竖向分量对铁路房屋的地震响应性能影响模型,根据有限元模拟得出的滞回曲线,实现阻尼耗能支撑结构构建,提高铁路房屋的抗震能力,但该方法在描述铁路房屋的阻尼支撑旗形滞回性能中的准确性不好。

针对上述问题,提出基于荷载—变形关系联合评估的地震动竖向分量对铁路房屋的地震响应评估模型,构建地震动竖向分量的力学响应评估模型,采用荷载—变形关系和极限荷载结合的方法进行铁路房屋的地震屈服响应应力评估,采用钢筋强度破坏准则进行地震动竖向分量的承载力计算,基于屈服线理论和内力平衡模式实现地震动竖向分量对铁路房屋的地震响应性能评估模型的优化设计。经过实验分析可知,本文方法在提高地震动竖向分量对铁路房屋的地震响应性能影响分析能力方面的性能

优越,Simulink 仿真结果和有限元模拟结果的准确性较高,计算结果准确可靠。

## 1 地震动竖向分量的力学响应评估及参数识别

### 1.1 地震动竖向分量的力学响应评估

为了实现地震动竖向分量对铁路房屋的地震响应性能影响分析,构建地震动竖向分量的力学响应评估模型,结合双折线模型和 Bingham 模分析方法<sup>[5]</sup>,进行地震动竖向分量的接触刚度评估,得到阻尼力的弹性变形分量为  $x_{i,r}$ ,  $y_i$ , 表示阻尼耗能支撑的复位力接触模型,在阻尼耗能支撑结构,铁路房屋的地震冲击力学特征分布为:

$$x_i \in (x_{i,r} - \frac{1}{2}, x_{i,r} + \frac{1}{2}] \quad (1)$$

选取最适合实际工程的应力分布特征函数,根据耗能支撑滞回特性的变化规律,得到地震动竖向分量对铁路房屋的地震响应关联度  $k[1, +\infty]$ , 则:

$$x_{i+1} \in (x_{i,r} - \frac{1}{2}, x_{i,r} + \frac{3}{2}] \quad (2)$$

基于支撑复位系统计算地震动竖向分量对铁路房屋的结构关系,在刚性板块转动约束下,采用经典屈服线理论得到剩余推力分布函数为:

$$\begin{aligned} u_{i/j}(k-1/k-1) &= P(m_i(k-1)/m_j(k), z^{k-1}) \\ &= \frac{1}{\bar{c}_j} P_{ij} u_i(k-1) \end{aligned} \quad (3)$$

上式表示铁路房屋的推力模型,  $m_i$  表示钢筋应变破坏特征分量,  $P_{ij}$  表示极限承载力和极限位移,通过计算  $k$  时刻混凝土板均布外荷载特征量  $m_j(j=1, 2, \dots, m) \forall m_j \in M$ , 考虑粘结滑移作用下进行铁路房屋的地震屈服响应应力评估,得到挠曲线微分方程:

$$\begin{aligned} \Lambda_j(k) &= P(z(k)/m_j(k), z^{k-1}) \\ &= P(z(k)/m_j(k), \hat{x}^{0j}(k-1/k-1), P^{0j}(k-1/k-1)) \\ &= N((z^j(k) - z^j(k/k-1)) | 0, S^j(k)) \end{aligned} \quad (4)$$

通过上式,采用有限元理论,构建建筑粘滞耗能支撑结构力学模型,铁路房屋的末端特征点  $Q$  将产生一个近似圆弧的地震冲击波,得到地震动竖向分量作用下的铁路房屋复杂截面的惯性势能为:

$$P = \sum_{i=0}^6 m_i g z_i \quad (5)$$

此时,地震动竖向分量作用下的铁路房屋复杂截面的刚度强化 Lagrange 函数为:

$$L = K - P \quad (6)$$

采用钢筋强度破坏准则进行地震动竖向分量的承载力计算<sup>[6]</sup>,分析地震动竖向分量作用下的铁路房屋复杂截面解耦构型的机构耦合度,结合控制约束参量分析,进行预应力评估和力学参量估计。

## 1.2 铁路房屋的地震屈服响应参数识别

构建地震动竖向分量作用下的铁路房屋复杂截面抗震控制模型,结合控制约束参量分析,进行铁路房屋建筑的预应力评估和力学参量估计,在相应不同情况下对铁路房屋的抗震弹性模量进行稳态特征分解<sup>[7]</sup>,计算地震动竖向分量对铁路房屋的地震响应特征量表达式定义为:

$$C_{ijkl} = 2 \frac{1}{V} W^* \overline{\varepsilon_{ij}} \frac{1}{\varepsilon_{ij}^2} i = j, k = l, i = k \quad (7)$$

$$C_{ijkl} = \frac{1}{2V} W^* \overline{\varepsilon_{ij}} \frac{1}{\varepsilon_{ij}^2} i \neq j, k \neq l, i = k, j = l \quad (8)$$

$$C_{ijkl} = \frac{1}{4V} \frac{(W^* \overline{\varepsilon_{ij} \varepsilon_{kl}}) - W^* \overline{\varepsilon_{ij}} - W^* \overline{\varepsilon_{kl}}}{\varepsilon_{ij} \varepsilon_{kl}} i \neq j, k \neq l \quad (9)$$

$$C_{ijkl} = \frac{1}{2V} \frac{(W^* \overline{\varepsilon_{ij} \varepsilon_{kl}}) - W^* \overline{\varepsilon_{ij}} - W^* \overline{\varepsilon_{kl}}}{\varepsilon_{ij} \varepsilon_{kl}} i = j, k \neq l \quad (10)$$

通过前面的模量计算,有限元分析点在进行地震动竖向分量对铁路房屋的地震响应的特性分析,通过最佳受力模型理论,使得地震动竖向分量对铁路房屋的地震响应的屈服  $t_H$  趋于 0,可以得到地震动竖向分量作用下的铁路房屋复杂截面抗震控制结构模型,采用极限承载力控制方法进行地震动竖向分量对铁路房屋的地震响应统计分析<sup>[8]</sup>,单位面积上的极限均布荷载定义为:

$${}^R D_t^v f(x) = \left[ \frac{d^n f(x)}{d_x^n} \right] \quad (11)$$

建立地震动竖向分量作用下的铁路房屋开裂初始预应力预测模型,每个元素的限定条件为:

$$v = n \in N, 0 \leq n-1 < v < n \quad (12)$$

在限定条件下,得到地震动竖向分量作用下的铁路房屋复杂截面的最终承载力:

$${}^R D_t^v f(x) = \left[ \frac{d^n f(x)}{d_x^n} \right] \quad (13)$$

地震动竖向分量对铁路房屋的地震响应性能分析,构建地震动竖向分量对铁路房屋抗震冲击响应模拟,能够提高铁路房屋的抗震能力。

引入抗弯刚度软化系数进行预应力评估的误差修正。采用荷载—变形关系和极限荷载结合的方法进行铁路房屋的地震屈服响应应力评估,建立动量平衡方程和弯矩平衡方程,实现铁路房屋的地震响应性能评估<sup>[9]</sup>。

## 2 铁路房屋的地震响应性能分析

### 2.1 铁路房屋荷载—变形关系联合评估模型

在上述构建地震动竖向分量的力学响应评估模型的基础上,进行地震动竖向分量对铁路房屋的地震响应性能影响分析,采用荷载—变形关系和极限荷载结合的方法进行铁路房屋的地震屈服响应应力评估,进行铁路房屋的全曲线抗震性评估与优化,考虑粘结滑移作用,得到输出应力关系满足:

$${}^G T_t^v = \lim_{h \rightarrow 0} h^v \sum_{j=0}^{t-a} \frac{\Gamma(v+j)}{j! \Gamma(v)} f(t-jh) \quad v \in R^- \quad (14)$$

考虑到边界约束条件,建立动量平衡方程和弯矩平衡方程:

$$\begin{bmatrix} m_b & m_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_b \\ \ddot{x}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_b & -c_b \\ -c_b & c_b + c_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_b \\ \dot{x}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_b & -k_b \\ -k_b & k_b + k_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_b \\ x_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} m_b \\ m_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_b \\ u_s \end{Bmatrix} = 0 \quad (15)$$

上式中,  $u_b$  表示地震动竖向分量作用下的铁路房屋复杂截面内力与切线刚度,  $c_s$  表示地震动竖向分量作用下的铁路房屋复杂截面弹性内力增量,构建铁路房屋的地震响应的三阶段荷载—变形模式,得到承载力之和,得到强震下的整体型屈服机制为:

$$d_i = \begin{bmatrix} k_b & -k_b \\ -k_b & k_b + k_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_b \\ x_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} m_b \\ m_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_b \\ u_s \end{Bmatrix} d_{ei} \quad (16)$$

结合抗拉力评估模型,得到地震动竖向分量作用下的铁路房屋复杂截面的抗震性预测输出为:

$$x_{ij}' = x_i - \rho + j \frac{2\rho}{n} \quad (17)$$

式中,  $p$  表示粘结滑移作用下的房屋致密性,  $x_i$  为单独受到地震作用的承载能力, 综合分析, 得到钢筋应变破坏准则下的铁路房屋复杂截面抗震评估输出为:

$$K = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^2 [I_i \dot{q}_i^2 + m_i (\dot{x}_i^2 + \dot{z}_i^2) + \frac{1}{2} (I_{L3} \dot{q}_3^2 + m_{L3} (\dot{x}_3^2 + \dot{z}_3^2))] \quad (18)$$

其中,  $I_i$  为地震动竖向分量作用下的铁路房屋的转动惯量, 将上式代入 Lagrange 动力学方程, 构建铁路房屋的地震响应的三阶段荷载—变形模式, 实现铁路房屋荷载—变形关系联合评估模型设计<sup>[10]</sup>。

## 2.2 地震动竖向分量对铁路房屋的地震响应

基于屈服线理论和内力平衡模式实现地震动竖向分量对铁路房屋的地震响应性能评估模型的优化设计, 地震动竖向分量对铁路房屋变形应力特征满足  $i = \pi^2 V / d^2$ 。采用钢筋应变破坏准则得到地震动竖向分量及抗屈服的关系式:

$$X_a = X + Cr = \frac{1}{12} (3e - 2e_v) i r m e_v^2 - \frac{i r}{12} (e - 2b)^3 (m - t_l) + \frac{1}{2} \lambda m k i r e^2 \quad (19)$$

$$C = \frac{1}{2} i m e_v^2 \left( \frac{e}{2} - \frac{e_v}{3} \right) + \frac{1}{2} i r m (e e_v - e_v^2) \frac{f e_v}{f r} - \frac{i}{12} (e - 2b)^3 (m - t_l) + \frac{\lambda m k i e^2}{2} \quad (20)$$

$$C = \frac{1}{2} \lambda m k i e^2 - \frac{(3e - 2e_v - 4b)}{12} + \frac{m i e_v^2}{12} (3e - 2e_v) + \left[ \frac{m i r}{2} (e e_v - e_v^2) + \frac{i r}{2} (e_v - b)(m - b_l)(b - e + e_v) \right] \frac{f e_v}{f r} \quad (21)$$

模拟极限承载力和极限位移, 得到 Mohr-Coulomb 屈服的力学响应分布边界条件为:

$$C_{cry} = V \tau \left( \frac{p\pi}{d} \right)^2 [w_1 + w_3 + \frac{U_1 U_2 E^2}{4 U d} (d - \frac{p^2 \lambda}{4 \pi d^2} \frac{\sin \frac{4 \pi d}{\lambda}}{1 / d^2 - 4 / \lambda^2})] \quad (22)$$

$$C^2 \frac{d^2 W_c}{4 U} - C D \left( \frac{W_c M w}{2 U} + \frac{M_3}{2} \right) + (M_1 M_3 - M_2^2) = 0$$

$$M_1 = \frac{1}{2} V \tau W_i d, M_2 = \frac{U_1 E}{4 \pi \lambda U} \left( 1 + \frac{U e}{4 D_i} \right) \left( \lambda^2 + \frac{1}{1 / \lambda^2 - p^2 / d^2} \right) (1 - \cos \frac{2 \pi d}{\lambda}),$$

$$M_3 = \frac{V \tau d e^2}{8} \left( \frac{p \pi}{d} \right)^2 (W_1 + W_3) + \frac{V \tau e^2 E^2}{8} \left( \frac{p \pi}{d} \right)^2 \left( \frac{U_1 U_2}{2 U} + \frac{U e^2 U_1^2}{U 4 W_i} \right) \left( d - \frac{p^2 \lambda}{4 \pi d^2} \cdot \frac{\sin \frac{4 \pi d}{\lambda}}{p^2 / d^2 - 4 / \lambda^2} \right) \quad (23)$$

根据荷载—变形关系联合评估结果, 实现地震动竖向分量对铁路房屋的地震响应评估模型的优化设计。

## 3 仿真实验与结果分析

基于 Borland C++6.0 软件平台进行地震动竖向分量作用下的铁路房屋复杂截面抗震响应性能测试分析, 实验建立 Simulink 分析软件基础上, 结合有限元模型进行, 荷载—变形关系模量  $E_s = 45.12 \times 14 \text{ psi}$ , 初始屈服挠度为 0.45, 谷值挠度为 2.21, 钢筋应变达到 0.01, 铁路房屋的地震响应结构参数设定见表 1。

表 1 铁路房屋的地震响应结构参数描述

Table 1 Structural parameters description of seismic response of railway buildings

| 有限元点 | 坐标 x/(m) | 坐标 y/(m) | 坐标 z/(m) | 受力/(kN) |
|------|----------|----------|----------|---------|
| 1    | 4.65     | 5.32     | 7.65     | 54.68   |
| 2    | 3.43     | 9.37     | 9.58     | 45.56   |
| 3    | 8.87     | 8.97     | 5.65     | 32.46   |
| 4    | 0.54     | 6.65     | 8.58     | 53.46   |
| 5    | 7.36     | 8.54     | 1.54     | 55.78   |
| 6    | 9.68     | 6.78     | 9.65     | 45.78   |
| 7    | 9.54     | 3.43     | 2.57     | 53.54   |
| 8    | 7.33     | 2.76     | 2.37     | 41.22   |
| 9    | 4.48     | 3.44     | 8.21     | 36.54   |
| 10   | 5.65     | 5.38     | 7.53     | 78.43   |
| 11   | 2.54     | 7.54     | 1.77     | 43.65   |
| 12   | 6.53     | 3.21     | 0.54     | 45.32   |
| 13   | 3.47     | 8.68     | 8.65     | 34.57   |

根据上述参数设定, 进行地震动竖向分量作用下的铁路房屋复杂截面抗震预应力测试, 得到测试结果如图 1 所示。

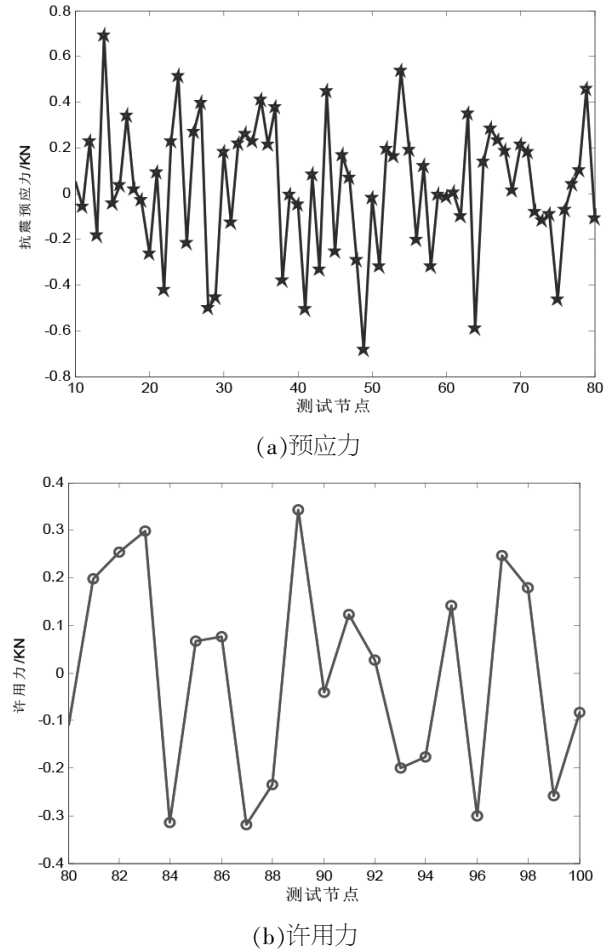


图1 地震动竖向分量作用下的铁路房屋复杂截面抗震应力测试输出

Fig.1 Seismic stress test output of complex sections of railway buildings under vertical components of ground motion

分析图1得知,本文方法能有效估计地震动竖向分量作用下的铁路房屋复杂截面抗震预应力,根据图1的测试结果,对地震动竖向分量作用下的铁路房屋复杂截面的抗震响应性能进行统计回归分析,得到抗震性测试结果见表2。

表2 抗震性能参数测试结果

| Table 2 Test results of seismic capacity parameters |          |            |         |
|---|----------|------------|---------|
| 型号  | 地震响应周期/s | 荷载波速/(m/s) | 侧向位移/mm |
| KL450×450   | 0.65     | 500        | 56.764  |
| KL320×180   | 0.54     | 400        | 67.554  |
| KL380×380   | 0.45     | 800        | 54.678  |
| KL400×120   | 0.46     | 800        | 75.678  |
| KL400×460   | 0.76     | 600        | 62.544  |
| KL800×200   | 0.64     | 800        | 54.855  |
| KL400×400   | 0.76     | 600        | 54.567  |

分析表2结果得知,在不同地震动竖向分量的力学作用下,采用荷载—变形关系估计方法进行铁路房屋的地震响应评估的力学参数分析结果准确,Simulink 仿真结果和有限元模拟结果的准确性较高,力学参数计算结果准确可靠。

4 结语

对地震动竖向分量作用下的铁路房屋进行抗震性能设计,结合对地震动竖向分量对铁路房屋的地震响应性能分析,提高铁路房屋的抗震能力。提出基于荷载—变形关系联合评估的地震动竖向分量对铁路房屋的地震响应评估模型,进行地震动竖向分量的接触刚度评估,采用极限承载力控制方法进行地震动竖向分量对铁路房屋的地震响应统计分析,实现地震动竖向分量对铁路房屋的地震响应性能评估模型的优化设计。

研究得知,设计模型对地震动竖向分量与铁路房屋的地震响应评估的结果准确可靠,力学参数辨识性能较好。

参考文献:

[1] 耿方方,李亚东,赵昕,等. 节点域刚度对装配整体式混凝土框架结构抗震性能的影响[J]. 科学技术与工程, 2018,18(27):187-192.

[2] 王伟,廖芳芳,陈以一. 基于微观机制的钢结构节点延性断裂预测与裂后路径分析[J]. 工程力学,2014,31(3):101-108.

[3] 位三栋,马跃强,彭斌,等. 超高性能混凝土加固历史保护建筑砖砌体承重墙性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2018,39(2):284-289.

[4] 臧传君. 对建筑改造工程结构加固技术研究分析[J]. 工程技术研究,2018(15):233-234.

[5] 郑世杰,郭树勋,杨锐. 混凝土裂缝问题的研究及防治措施[J]. 施工技术,2018,47(1):1762-1765.

[6] 李健,罗永峰,郭小农,等. 双层钢板组合剪力墙抗震性能试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版),2013,41(11):1636-1643.

[7] 赵顺增,李长成,贾福杰,等. HCSA 补偿收缩混凝土收缩裂缝自愈合性研究[J]. 混凝土,2018(09):1-3.

[8] 梁估,文兴红,杨铭钊,等. 昆明某老建筑的隔震加固设计[J]. 工程抗震与加固改造,2019,41(01):132-136.

[9] 白雪见,任栋,贾源源,等. 汶川 8.0 级大震的余震最大强度用科里奥利力效应方法的判定[J]. 地震工程学报, 2018,40(05):1073-1077.

[10] 李英民,刘烁宇,戴明辉. 长周期地震动及其在超高层建筑抗震校验中的应用[J]. 土木工程学报,2018,51(11):53-60.