

隔震结构中最小地震剪力系数合理取值研究

关洪成^{1,2} 唐曹明^{1,3,*} 罗开海¹ 黄世敏^{1,3} 魏明杰^{1,2} 吴乐乐⁴

(1. 中国建筑科学研究院, 北京 100013; 2. 国家建筑工程技术研究中心; 北京 100013;

3. 住房和城乡建设部防灾研究中心, 北京 100013; 4. 天津城建大学, 天津 300384)

摘要 为探讨隔震结构中最小地震剪力系数的合理取值, 采用2自由度简化隔震模型, 运用振型分解反应谱法和时程分析法, 推导、计算其底部剪重比, 与《建筑隔震设计标准》中所规定的最小地震剪力系数限值进行对比, 并通过实际工程对最小地震剪力系数取值进行了分析验证。结果表明: [2.0~5.2)s等效周期范围内, 上述两种分析方法得出的剪重比均大于《建筑隔震设计标准》中的最小地震剪力系数限值, 等效周期在[5.2~6.0)s时小于《建筑隔震设计标准》中限值; 在较宽的等效周期范围内, 现行《建筑隔震设计标准》中的最小地震剪力系数限值不起控制作用; 故建议适当提高《建筑隔震设计标准》中最小地震剪力系数限值, 确保结构具有一定的抗震安全性。

关键词 隔震结构, 最小地震剪力系数, 振型分解反应谱法, 时程分析法, 等效周期

中图分类号: TU375 **文献标志码:** A **DOI:** 10.15935/j.cnki.jggcs.20240921.001

Study on the Rational Range of the Minimum Seismic Shear Force Coefficient in Seismically Isolated Structures

GUAN Hongcheng^{1,2} TANG Caoming^{1,3,*} LUO Kaihai¹ HUANG Shimin^{1,3}
WEI Mingjie^{1,2} WU Lele⁴

(1. China Academy of Building Research, Beijing 100013, China; 2. National Engineering Research Center of Building Technology, Beijing 100013, China; 3. Research Center for Disaster Prevention, Ministry of Housing and Urban-Rural Development, Beijing 100013, China; 4. Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China)

Abstract To ensure the rational range of the minimum seismic shear force coefficient in seismically isolated structures, this study adopts a simplified two-degree-of-freedom seismically isolated model. Using both the Modal Decomposition Response Spectrum Method and Time-History Analysis, the base shear-weight ratio is derived and calculated. The research compares the base shear-weight ratio with the minimum seismic shear coefficient specified in the *Standard for Seismic Isolation Design of Building*. Through practical engineering cases, the selection of the minimum seismic shear coefficient is analyzed and verified. The study shows that within an equivalent period range of 2 to 5.2 seconds, both analytical methods yield consistent results, indicating that the shear-weight ratios satisfy the minimum seismic shear coefficient limit requirements. However, within the equivalent period range of 5.2 to 6 seconds, the results do not meet the limits specified in the design standard. The research clarifies that across a wide equivalent period range, the minimum seismic shear coefficient limit stipulated in the current design standard does not exert a controlling effect. It is recommended to raise the standard limit value of the minimum seismic shear coefficient in the design standard to ensure sufficient seismic safety of structures.

Keywords seismically isolated structures, minimum seismic shear force coefficient, modal decomposition response spectrum method, time history analysis method, equivalent period

收稿日期: 2024-08-02

作者简介: 关洪成(1983-), 男, 博士, 主要从事工程抗震研究。E-mail: 304143650@qq.com

* 联系作者: 唐曹明(1966-), 男, 研究员, 博士, 主要从事工程抗震研究。E-mail: tangcaomin@163.com

0 引言

在抗震结构设计中,最小地震剪力系数作为关键控制参数,对确保结构抗震安全性和经济合理性具有重要意义^[1]。由于地震影响系数在长周期段下降较快,对于基本周期大于3.5 s的结构,由此计算所得的水平地震作用下的结构效应可能太小。而对于长周期结构,地震动态作用中的地面运动速度和位移可能对结构的破坏具有更大影响,但是规范所采用的振型分解反应谱法尚无法对此作出估计。出于结构安全的考虑,我国有关规范、标准均对结构总水平地震剪力及各楼层水平地震剪力最小值提出了要求。国际上,美国、加拿大、欧洲、新西兰和日本等国家和地区的相关规范对此也都进行了规定^[2-6]。隔震作为一种有效的抗震技术,已在现代建筑领域中得到了广泛应用。《建筑隔震设计标准》(GB/T 51408—2021)^[7](以下简称“隔标”)规定了最小地震剪力系数的控制指标,但该指标直接采用《建筑抗震设计标准》(GB 50011—2010)(以下简称“抗规”)中的最小地震剪力系数限值,其规定的最小地震剪力系数是否起到控制作用有待进一步深入研究。

国内有关学者对剪力系数的控制问题也有一定研究。蒋海军等^[8]认为现行抗震设计规范中最小地震剪力系数限值未考虑场地特征周期,导致I、II类场地长周期结构常难以满足要求,进而提出了一种基于场地特征周期的最小地震剪力系数限值方法,为改进长周期建筑结构抗震设计提供了一种思路和实用工具。郝安民^[9]通过现行规范和工程案例的分析,探讨了场地类别和阻尼比对高层及超高层建筑基地剪力系数的影响,发现基底剪力系数随特征周期增长而增大,并提出考虑阻尼比的重要性和具体建议,为高层建筑抗震设计提供了指导。扶长生等^[10]研究了中美规范中对最小地震剪力系数的要求,指出场地条件对剪力系数的影响,并对规范提出了修正建议。王亚勇^[11]研究了建筑抗震设计中最小地震剪力系数的重要性,通过理论分析和工程实例论证了我国规范规定的科学性和可行性。汪大绥等^[12]对超高层结构地震剪力系数限值进行了探讨,分析了影响超高层结构地震剪力系数的主要因素,并提出调整地震剪力系数限值的建议。周丽芳等^[13]研究了不同阻尼力比对黏滞阻尼减震结构减震性能的影响,

发现适当的阻尼力比可有效降低结构的剪重比,显著提升结构的安全性能。王维等^[14]基于多遇地震作用探讨了地震影响系数对隔震结构中剪重比的影响,分析了在不同抗震设防烈度下不满足最小地震剪力系数的等效周期范围。左琼等^[15]研究了我国抗规中的基底剪力系数,指出剪力系数应与反应谱形状和高阶振型相关。

综上所述,现有的研究大都是针对一般抗震结构中剪力系数,而对隔震结构中最小地震剪力系数的合理取值及其对结构抗震性能的影响,研究尚不充分。本文采用2自由度简化隔震模型,运用振型分解反应谱法和时程分析法对隔震结构中最小地震剪力系数取值进行理论研究和数值分析,并结合实际工程进行验证,所得成果可为隔震结构设计标准的进一步修订及隔震工程实践提供理论支撑。

1 振型分解反应谱法剪重比计算与分析

1.1 剪重比公式的推导

剪重比一般由隔震结构中上部结构的首层控制,上部结构若为多自由度体系,可通过周锡元等^[16-17]建议的简化方法转化为单自由度体系,隔震层简化为一个自由度,因此本文选用2自由度隔震结构简化模型进行研究,如图1所示,图中 m_1 、 k_1 、 c_1 、 u_1 和 m_2 、 k_2 、 c_2 、 u_2 分别为隔震层质量、刚度、阻尼、隔震系统相对于地面的位移和上部结构的等效质量、等效刚度、阻尼、上部结构相对于隔震层的位移, u_g 为地面位移。隔震支座采用双线性滞回模型,上部结构假定为弹性状态。故隔震结构的动力学运动方程为^[18]:

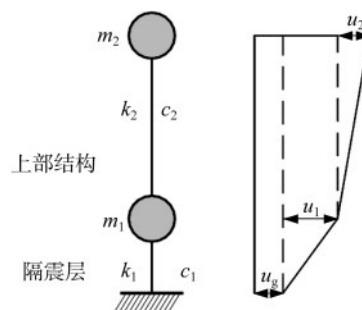


图1 隔震系统2自由度模型

Fig.1 2-DOFs model of isolated system

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = -M\ddot{u}_g \quad (1)$$

式中: $M = \begin{bmatrix} m_1 + m_2 & m_2 \\ m_2 & m_2 \end{bmatrix}$ $C = \begin{bmatrix} c_1 & 0 \\ 0 & c_2 \end{bmatrix}$

$$K = \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{bmatrix} \quad u = \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} \quad I = \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

进行以下参数设置。

隔震结构和上部结构的自振频率:

$$\omega_1 = \sqrt{k_1/(m_1 + m_2)} \quad (2a)$$

$$\omega_2 = \sqrt{k_2/m_2} \quad (2b)$$

隔震结构和上部结构频率比的平方以及上部结构和隔震结构的质量比:

$$\varepsilon = (\omega_1/\omega_2)^2 \quad (3a)$$

$$\gamma = m_2/(m_1 + m_2) \quad (3b)$$

隔震结构和上部结构的阻尼比:

$$\beta_1 = c_1/2(m_1 + m_2)\omega_1 \quad (4a)$$

$$\beta_2 = c_2/2m_2\omega_2 \quad (4b)$$

1) 求无阻尼下的特征值

$$\begin{vmatrix} k_1 - (m_1 + m_2)\omega_n^2 & -m_2\omega_n^2 \\ -m_2\omega_n^2 & k_2 - m_2\omega_n^2 \end{vmatrix} = 0 \quad (5)$$

将式(2)一式(4)代入式(5),解得:

$$\omega_{n1}^2 = \begin{cases} \omega_1^2 \\ \frac{\omega_2^2}{(1-\gamma)} \left[1 + \gamma \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^2 \right] \end{cases} \quad (6)$$

2) 根据自振频率求振型向量

$$\begin{bmatrix} k_1 - (m_1 + m_2)\omega_n^2 & -m_2\omega_n^2 \\ -m_2\omega_n^2 & k_2 - m_2\omega_n^2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \end{pmatrix} = 0 \quad (7)$$

将 ω_{n1}^2 、 ω_{n2}^2 分别代入式(7),可得归一化振型:

$$\frac{X_1^1}{X_2^1} = \frac{1}{\varepsilon} \quad (8a)$$

$$\frac{X_1^2}{X_2^2} = \frac{1}{1 - (1-\gamma)\varepsilon} \quad (8b)$$

振型如图 2 所示。

3) 求位移

根据上述两阶振型,可求出 u_1 和 u_2 的相对位移:

$$u_1 = q_1 X_1^1 + q_2 X_1^2 \quad (9a)$$

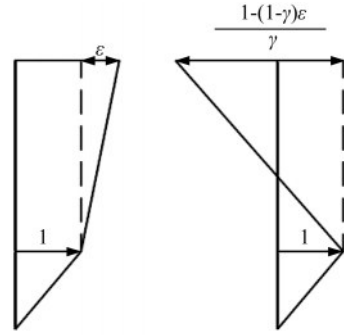
$$u_2 = q_1 X_2^1 + q_2 X_2^2 \quad (9b)$$

将式(9a)、式(9b)代入式(1),仅考虑对角项的模态阻尼得:

$$\ddot{q}_1 + 2\omega_{n1}\bar{\beta}_1\dot{q}_1 + \omega_{n1}^2 q = -L_1\ddot{u}_g \quad (10a)$$

$$\ddot{q}_2 + 2\omega_{n2}\bar{\beta}_2\dot{q}_2 + \omega_{n2}^2 q = -L_2\ddot{u}_g \quad (10b)$$

式中:



(a) 第1振型 (b) 第2振型

图 2 隔震系统 2 自由度振型图

Fig.2 2-DOFs modal shapes of isolated system

$$L_1 = 1 - \gamma\varepsilon \quad (11a)$$

$$L_2 = \gamma\varepsilon \quad (11b)$$

$$\bar{\beta}_1 = \beta_1 \left(1 - \frac{3}{2}\gamma\varepsilon \right) \quad (11c)$$

$$\bar{\beta}_2 = \left[\frac{\beta_2}{(1-\gamma)^{\frac{1}{2}}} + \frac{\gamma\beta_1\varepsilon^{\frac{1}{2}}}{(1-\gamma)^{\frac{1}{2}}} \right] \left(1 - \frac{1}{2}\gamma\varepsilon \right) \quad (11d)$$

基于振型分解反应谱法,在给定的设计加速度反应谱作用下,隔震系统的最大位移和上部结构的最大层间位移可以表示为如下公式:

$$|u_1|_{\max} = \sqrt{(X_1^1 q_{1\max})^2 + (X_1^2 q_{2\max})^2} \quad (12a)$$

$$|u_2|_{\max} = \sqrt{(X_2^1 q_{1\max})^2 + (X_2^2 q_{2\max})^2} \quad (12b)$$

式中:

$$q_{1\max} = \frac{L_1 S_A(\omega_{n1}, \bar{\beta}_1)}{\omega_{n1}^2} \quad (13a)$$

$$q_{2\max} = \frac{L_2 S_A(\omega_{n2}, \bar{\beta}_2)}{\omega_{n2}^2} \quad (13b)$$

$S_A(\omega, \beta)$ 为设计加速度反应谱。

对于隔震结构,其上部结构的最大层间剪力:

$$V_2 = k_2 |u_2|_{\max} \quad (14)$$

剪重比:

$$\lambda = \frac{V_2}{G_2} = \frac{\sqrt{S_A^2(\omega_{n1}, \bar{\beta}_1) + \varepsilon^2 (1-\gamma)^2 (1-2\varepsilon) S_A^2(\omega_{n2}, \bar{\beta}_2)}}{g} \quad (15)$$

式(15)即为基于振型分解反应谱法的剪重比公式。

1.2 剪重比计算与结果分析

采用上述简化计算模型,将某 11 层^[19]的隔震体系中上部结构等效为一刚性的单自由度体系,隔震层等效为自由度体系,等效后隔震层的质量为 $m_1=2\ 000\ t$,上部结构的等效质量和等效刚度分

别为 $m_2=12\ 000\ \text{t}$ 、 $k_2=7\ 826\ \text{kN/mm}$ ，如图 3 所示。隔震层采用双线性的恢复力模型，如图 4 所示，其中 K_0 、 K_d 和 K_{eq} 分别为初始刚度、屈服后刚度和等效刚度， $K_0=13K_d^{[20]}$ ； F_y 、 U_y 、 F_{max} 和 U_{max} 分别为屈服荷载、屈服位移、极限荷载和极限位移。

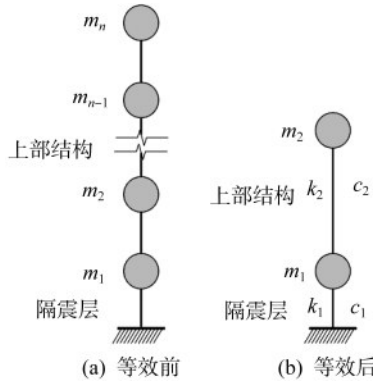


图 3 等效前后 2 自由度隔震模型

Fig.3 Pre-and post-equivalent 2-DOFs isolation mode

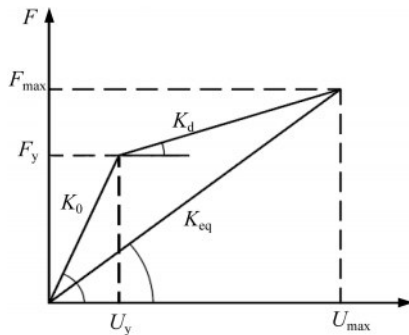


图 4 隔震层双线性恢复力模型

Fig.4 Bilinear restoration force model of the isolation layer

对隔震结构等效周期取 2.0~6.0 s，等效刚度取屈服后的刚度 K_d ，屈重比按 2% 控制，分别进行 6 度 (0.05g)、7 度 (0.10g)、7 度 (0.15g)、8 度 (0.20g)、8 度 (0.30g)、9 度 (0.40g) 设防地震作用下地震剪力系数分析，2 自由度隔震结构参数见表 1。

$$T_{eq} = 2\pi \sqrt{\frac{m_1 + m_2}{K_{eq}}} \quad (16)$$

$$K_d = K_{eq} = 4\pi^2 \frac{m_1 + m_2}{T_{eq}^2} \quad (17)$$

隔标中规定的各楼层最小地震剪力系数 λ_{min} 见表 2。按式 (15) 计算出隔震结构的最小地震剪力系数 λ ，并与规范限值 λ_{min} 比较，结果如图 5 所示，在 6 度—9 度抗震设防地震作用下，小于规范最小地震剪力系数限值的等效周期范围见表 3。

从图 5 和表 3 可以看出，当采用简化 2 自由度

表 1 2 自由度隔震结构参数

Table 1 2-DOFs parameters of isolated structures

编号	T_{eq}/s	$K_d/(kN \cdot mm^{-1})$	$K_0/(kN \cdot mm^{-1})$
1	2.0	138.03	1 794.45
2	2.2	114.08	1 483.01
3	2.4	95.86	1 246.14
4	2.6	81.68	1 061.80
5	2.8	70.43	915.53
6	3.0	61.35	797.53
7	3.2	53.92	700.96
8	3.4	47.76	620.92
9	3.6	42.60	553.84
10	3.8	38.24	497.08
11	4.0	34.51	448.61
12	4.2	31.30	406.90
13	4.4	28.52	370.75
14	4.6	26.09	339.21
15	4.8	23.96	311.54
16	5.0	22.09	287.11
17	5.2	20.42	265.45
18	5.4	18.93	246.15
19	5.6	17.61	228.88
20	5.8	16.41	213.37
21	6.0	15.34	199.38

表 2 楼层最小地震剪力系数值

Table 2 Minimum earthquake shear force coefficients

抗震设防烈度	6 度	7 度	8 度	9 度
扭转效应明显或基本周期小于 3.5 s 的结构	0.008	0.016 (0.024)	0.032 (0.048)	0.064
基本周期大于 5.0 s 的结构	0.006	0.012 (0.018)	0.024 (0.036)	0.048

表 3 $\lambda < \lambda_{min}$ 隔震结构等效周期 T_{eq} 区间

Table 3 Equivalent period for isolated structures ($\lambda < \lambda_{min}$)

抗震设防烈度 (设计基本地震加速度)	T_g/s	
	0.2	0.25~0.9
6 度 (0.05g)	[5.4~6.0]	不起控制作用
7 度 (0.10g)	[5.4~6.0]	不起控制作用
7 度 (0.15g)	[5.4~6.0]	不起控制作用
8 度 (0.20g)	[5.2~6.0]	不起控制作用
8 度 (0.30g)	[5.2~6.0]	不起控制作用
9 度 (0.40g)	[5.2~6.0]	不起控制作用

隔震模型的振型分解反应谱计算最小地震剪力系数时，仅特征周期 $T_g=0.2\ \text{s}$ ，抗震设防烈度为 6 度、7 度等效周期在 [5.4~6.0]s；以及抗震设防烈度为

8 度、9 度等效周期在 [5.2~6.0]s 时计算结果小于
隔标中最小地震剪力系数限值,其他均大于标准
中的限值。

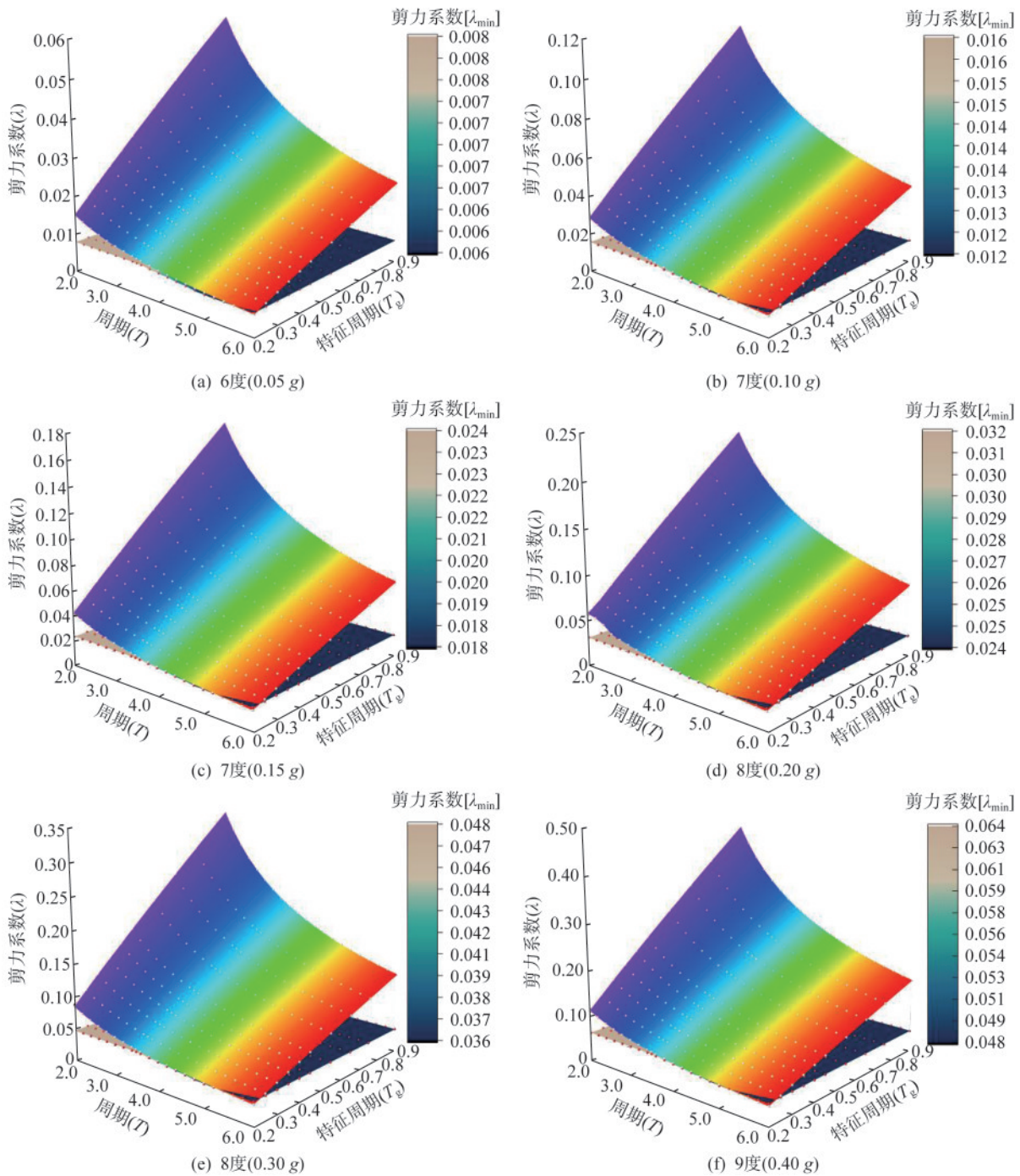


图 5 不同设防烈度下最小地震剪力系数对比

Fig.5 Contrast of minimum earthquake shear force coefficients at various seismic precautionary intensity

2 时程分析法计算剪重比与分析

计算模型以及相关参数同第 1 节中取值。考虑不同场地以及是否有无脉冲的影响,采用了 ATC-63^[21]中推荐的 22 条远场地震动(Far-Field,

FF)、14 条近场有脉冲地震动(Near-Field With Pulse, NFWP)和 14 条近场无脉冲地震动(Near-Field Without Pulse, NFWNP)分别进行 [2.0~6.0]s, 6 度—9 度抗震设防烈度作用下动力时程分析,加速度时程最大值分别取 50、100、150、200、300、

400 cm/s², 共计 126 个计算模型, 计算最小地震剪力系数, 公式如下:

$$\lambda = Q/G \quad (18)$$

式中: Q 分别按 FF、NFWP、NFWNP 地震动计算得上部结构首层的平均剪力值; G 为上部结构的重力。

各地震动作用下, 最小地震剪力系数 λ 与限值 λ_{\min} 的比较见表 4 和图 6。

从图 6 和表 4 可以看出, 当采用简化 2 自由度隔震模型进行动力时程分析, 计算最小地震剪力系数时, 在 FF 地震动作用下, 抗震设防烈度在 8 度 (0.30g) 和 9 度 (0.40g), 等效周期分别在 [5.6~

表 4 $\lambda < \lambda_{\min}$ 隔震结构等效周期 T_{eq} 区间

Table 4 Equivalent period for isolated structures ($\lambda < \lambda_{\min}$)

抗震设防烈度 (设计基本地震加速度)	远场地震动		
	FF	NFWP	NFWNP
6度(0.05g)	不起控制作用	不起控制作用	不起控制作用
7度(0.10g)	不起控制作用	不起控制作用	不起控制作用
7度(0.15g)	不起控制作用	不起控制作用	不起控制作用
8度(0.20g)	不起控制作用	不起控制作用	不起控制作用
8度(0.30g)	[5.6~6.0]	不起控制作用	不起控制作用
9度(0.40g)	[5.2~6.0]	[5.8~6.0]	不起控制作用

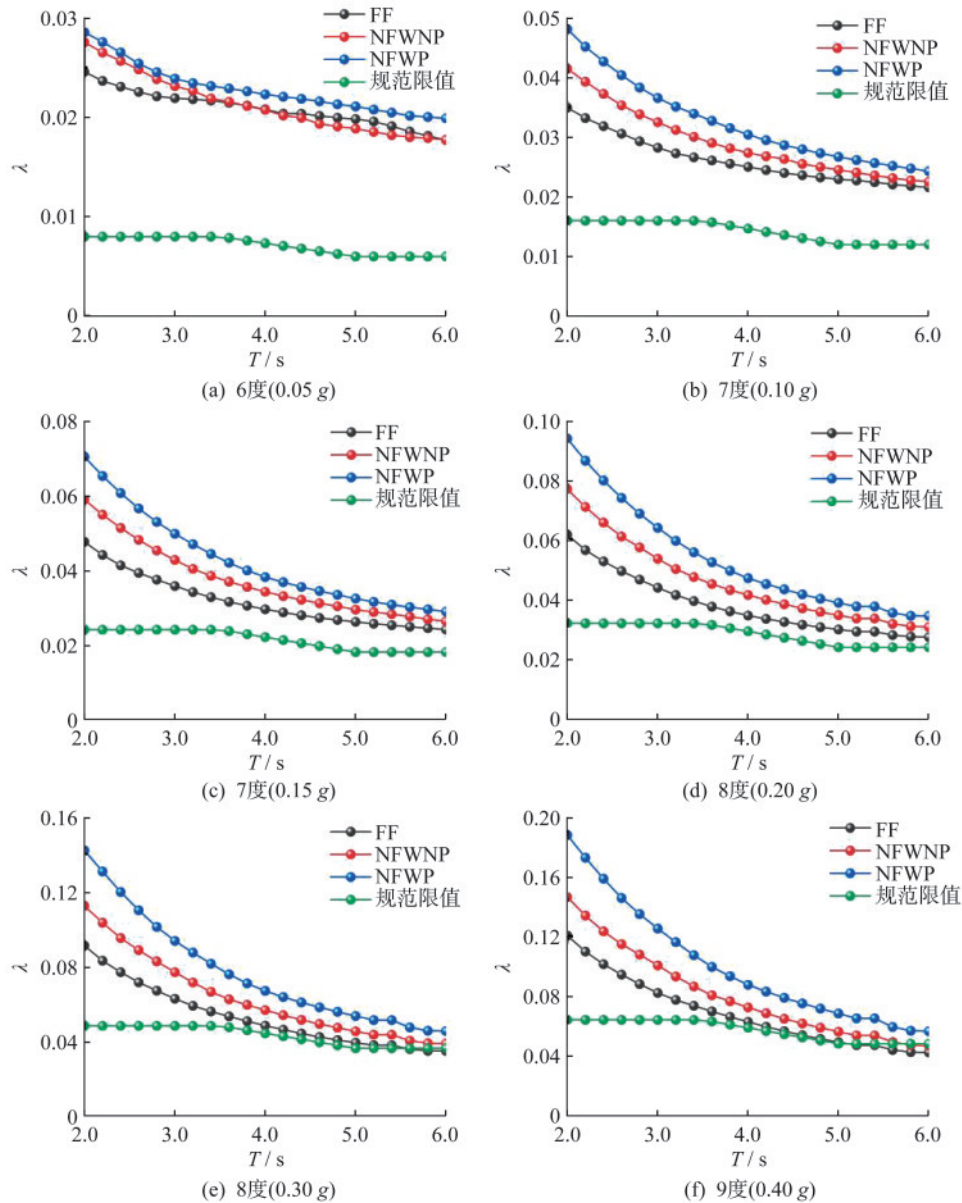


图 6 不同设防烈度下最小地震剪力系数对比

Fig.6 Contrast of minimum earthquake shear force coefficients at various seismic precautionary intensity

6.0)s 和 [5.2~6.0)s 范围内计算结果小于最小地震剪力系数限值;在 NFWP 地震动作用下,抗震设防烈度仅 9 度(0.40g),等效周期在 [5.8~6.0)s 范围内计算结果小于最小地震剪力系数限值,这也凸显了长周期和地震脉冲效应对剪力系数的影响。而在 NFWNP 地震动作用下,等效周期 [2.0~6.0)s 范围内计算的最小地震剪力系数均大于隔标中限值。

3 工程验证与分析

3.1 隔震结构概况

为验证第 1 节和第 2 节中两种简化计算方法的准确性,本节以文献[19]中的工程为案例进行分析。该工程为地上 11 层、地下 1 层的钢筋混凝土隔震结构,分析方法分别采用振型分解反应谱法和时程分析法。抗震设防烈度为 7 度,设计基本加速度为 0.10g,场地类别为 II 类,地震分组为第三组,特征周期为 0.45 s,抗震设防类别为乙类。建筑高度为 41.7 m,宽度为 14.4 m。结构设计工作年限:50 年。建筑剖面图如图 7 所示。隔震层设置在地下室顶板。隔震支座布置如图 8 所示,隔震支座的参数见表 5。隔震层剪重比为 2.24%,X、Y

方向的偏心率均小于 3%,隔震层所受风荷载小于结构总重量的 10%,隔震层有足够的屈服前刚度和屈服承载力满足抵抗风荷载作用的要求。

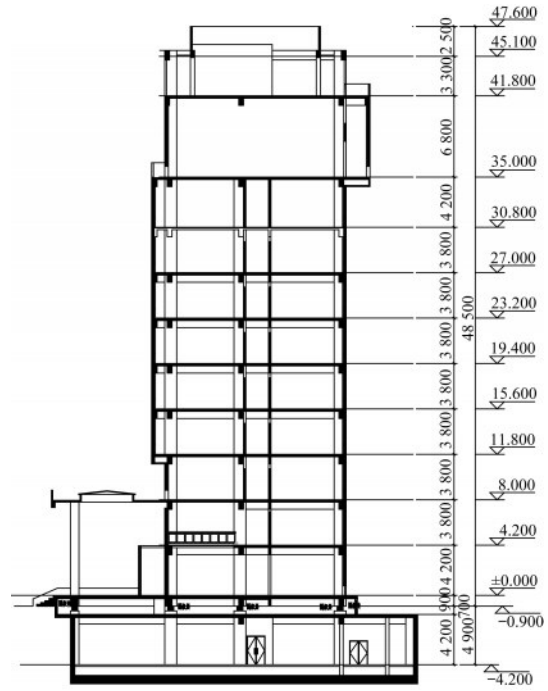


图 7 建筑剖面图(单位:mm)
Fig.7 Section drawing (Unit:mm)

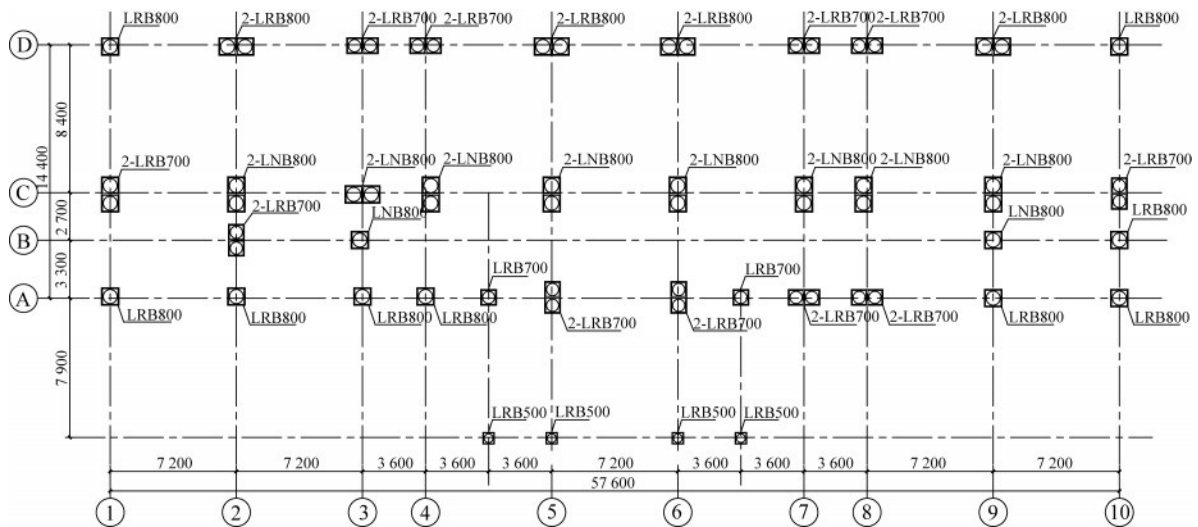


图 8 隔震支座布置图(单位:mm)
Fig.8 Plan layout of isolation bearings (Unit:mm)

3.2 振型分解反应谱法与时程分析法的计算和分析

对该工程采用 SAUSGE-PI 隔震设计模块分别进行了振型分解反应谱法和时程分析法下的地震作用计算,结构前三阶自振周期为 3.357 s、3.219 s、2.322 s。时程法根据对应的前三阶自振

周期分别选择 5 条天然波和 2 条人工波进行计算分析。所选地震波按照抗规有关规定执行,多组时程波的平均地震影响系数曲线与规范反应谱法地震影响系数曲线在结构的前三阶周期点上最大相差分别控制在 ±20% 以内。计算后 X、Y 向的最小地震剪力系数见表 6。

表5 隔震支座参数
Table 5 Seismic isolation bearings parameters

支座型号	数量/套	竖向刚度/ (kN·mm ⁻¹)	100% 等效水平 刚度/(kN·mm ⁻¹)	屈服前刚度/ (kN·mm ⁻¹)	屈服后刚度/ (kN·mm ⁻¹)	屈服力/kN
LRB500	4	2 200	1.10	10.40	0.80	40
LRB700	24	3 000	1.55	14.30	1.10	90
LRB800	17	3 300	1.60	15.34	1.18	110
LNB800	18	3 000	1.15	无	无	无

表6 振型法和时程法下的最小地震剪力系数

Table 6 Minimum earthquake shear force coefficients of complex mode method and time history analysis

计算方法	计算方向	隔震结构底部 剪力/kN	结构总质量/kN	最小地震剪 力系数λ	最小地震剪力 系数限值λ _{min}
振型分解 反应谱法	X	6 222	176 636	0.035	0.016
	Y	6 625	176 636	0.038	0.016
时程分析法(均值)	X	4 745	176 636	0.027	0.016
	Y	4 172	176 636	0.024	0.016

从表6可以看出,两种分析方法在7度设防烈度下,特征周期为0.45 s、自振周期为3.357 s的隔震结构,X、Y向的最小地震剪力系数均大于隔标中规定的限值。

3.3 不同设防烈度、特征周期下最小地震剪力系数验证

本节基于上文中的工程案例,深入探讨隔震结构在不同自振周期下的最小地震剪力系数的影响。保持其他参数不变,通过调整隔震层支座配置,计算结构在不同设防烈度[6度(0.05g)、7度(0.10g)、7度(0.15g)、8度(0.20g)、8度(0.30g)、9度(0.40g)]和不同特征周期(0.20 s、0.25 s、0.30 s、0.35 s、0.40 s、0.45 s、0.55 s、0.65 s、0.75 s、0.90 s)下最小地震剪力系数,共涉及60个计算模型,其第1阶自振周期分布在[3.40~4.90]s区间内。计算方法采用复振型分解反应谱法和时程分析法。时程法所选地震波根据不同的特征周期和对应结构模型的前三阶自振周期分别选择5条天然波和2条人工波进行计算。所选地震波符合抗震规范的相关要求。两种方法计算下的最小地震剪力系数如图9、图10所示。

从图9、图10可以看出,两种计算方法对于自振周期在[3.40~4.90]s内,特征周期在(0.2 s、0.25 s、0.30 s、0.35 s、0.40 s、0.45 s、0.55 s、0.65 s、0.75 s、0.9 s)内的隔震结构,X、Y向的最小地震剪力系数均大于隔标中规定的限值,在这一周期范围内,隔标中的最小地震剪力系数限值不起控制作用。

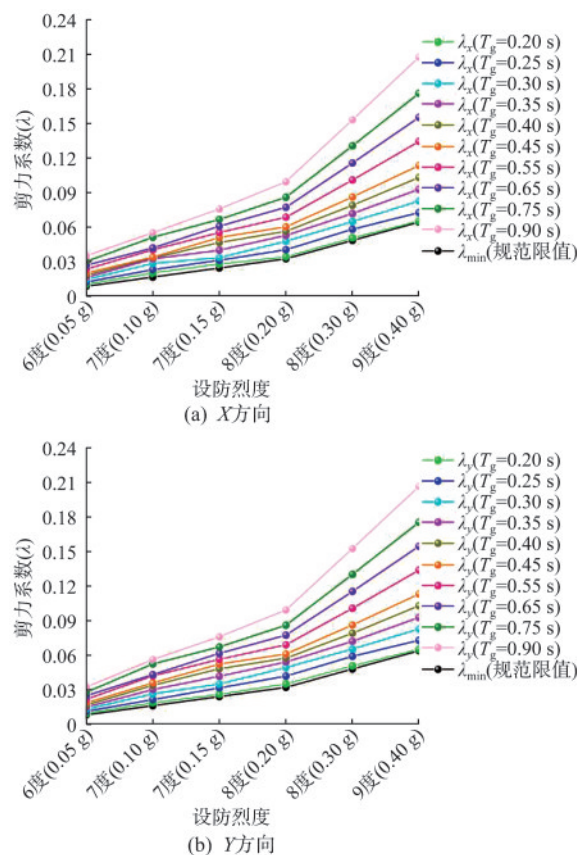


图9 振型分解反应谱法下地震剪力系数

Fig.9 Earthquake shear force coefficients of complex mode method

3.4 小结

按照隔标设计的结构在较宽的自振周期范围内,最小地震剪力系数限值不起控制作用,未能实

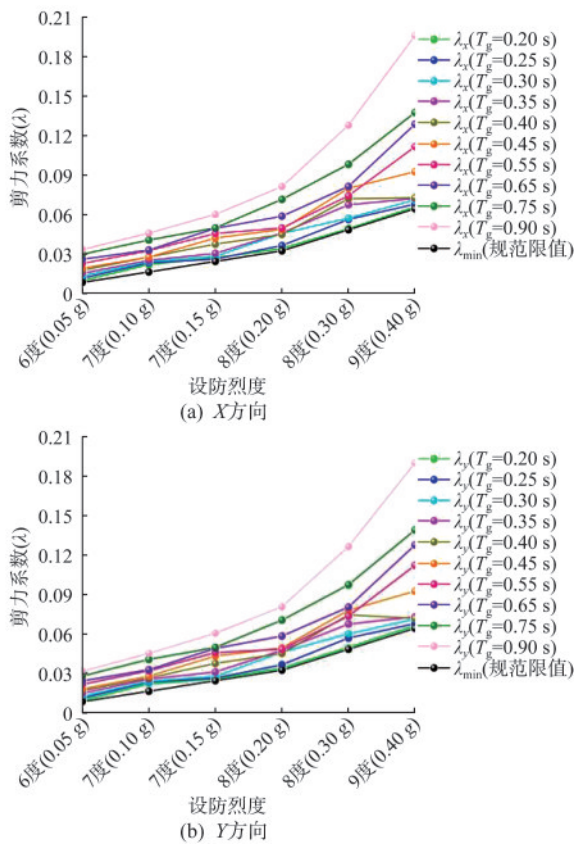


图 10 时程分析法下地震剪力系数

Fig.10 Earthquake shear force coefficients of time history analysis

现规范设置该限值的目的。为确保结构设计能够适应不同地震强度和频谱特性,建议调整隔标中的最小地震剪力系数限值,以保证结构具有足够的抗震安全性。

4 结 论

采用 2 自由度简化隔震模型,结合振型分解反应谱法和时程分析法,对不同设防烈度、场地条件和地震动特性下的隔震结构最小地震剪力系数进行了详细的计算与分析。以某实际隔震结构工程为例进行了自振周期为 $[3.4\sim 4.9]$ s 下的验证。得到以下结论:

(1) 简化分析中,任意隔震结构在等效周期为 $[2.0\sim 5.2]$ s 范围内最小地震剪力系数均大于标准设定的限值,在此周期范围内隔标中的最小剪力系数限值对隔震结构不起控制作用。

(2) 简化分析中,当采用振型分解反应谱法计算最小地震剪力系数时,仅在特征周期 $T_g=0.2$ s,设防烈度 6 度、7 度,等效周期在 $[5.4\sim 6.0]$ s;

以及设防烈度 8 度、9 度,等效周期在 $[5.2\sim 6.0]$ s,最小地震剪力系数才小于标准中的限值。

(3) 简化分析中,当采用时程分析法计算最小地震剪力系数时,在 FF 地震动作用下,设防烈度 8 度(0.30g)、9 度(0.40g),等效周期分别在 $[5.6\sim 6.0]$ s 和 $[5.2\sim 6.0]$ s,以及在 NFWP 地震动作用下,设防烈度 9 度(0.40g),等效周期在 $[5.8\sim 6.0]$ s 范围内计算结果才小于最小地震剪力系数限值,这也凸显了长周期和地震脉冲效应对剪力系数的影响。

(4) 建议适当调整隔标中最小地震剪力系数限值,以保证结构具有足够的抗震安全性。

参 考 文 献

- [1] 建筑抗震设计标准:GB 50011—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
Code for seismic design of buildings:GB 50011—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.(in Chinese)
- [2] ASCE. Minimum design loads for buildings and other structures: ASCE 7-22[S].Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers, 2022.
- [3] National building code of Canada: NBCC [S].Ottawa: National Research Council of Canada, 2010.
- [4] BS EN 1998-1 Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance: Part 1: General rules seismic actions and rules for buildings[S].London:BSI,2004.
- [5] NZS 1170.5: 2004 Structural design actions: Part 5: Earthquake actions [S]. Wellington, New Zealand: Standards New Zealand, 2004.
- [6] 建築物の構造関係技術基準解説書[M].东京:日本国土交通省住宅局建築指導課等,2007.
Explanatory book on technical standards related to building structures [M]. Tokyo: Bureau of Residential Policy, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT), Japan, 2007.
- [7] 建筑隔震设计标准:GB/T 51408—2021[S].北京:中国计划出版社,2021.
Standard for seismic isolation design of building:GB/T 51408—2021[S].Beijing:China Planning Press, 2021. (in Chinese)
- [8] 蒋欢军,段延锋,王逸珂.基于场地特征周期的最小地震剪力系数研究[J].建筑结构学报,2017,38(3): 39-45.
JIANG Huanjun, DUAN Yanfeng, WANG Yike. Study on minimum seismic shear coefficient based on

- characteristic period of site [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(3): 39-45. (in Chinese)
- [9] 郝安民. 高层及超高层建筑抗震基地剪力系数研究 [J]. 结构工程师, 2017, 33(1): 93-100.
- HAO Anmin. Study on seismic base shear factor of high-rise and super high-rise buildings [J]. Structural Engineers, 2017, 33(1): 93-100. (in Chinese)
- [10] 扶长生, 张小勇, 周立浪. 长周期超高层建筑最小底部剪力系数 [J]. 建筑结构, 2014, 44(10): 1-6.
- FU Changsheng, ZHANG Xiaoyong, ZHOU Lilang. Minimum base shear coefficient for long period super high-rise buildings [J]. Building Structure, 2014, 44(10): 1-6. (in Chinese)
- [11] 王亚勇. 关于建筑抗震设计最小地震剪力系数的讨论 [J]. 建筑结构学报, 2013, 34(2): 37-44.
- WANG Yayong. Study on the minimum story shear for seismic design of buildings [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(2): 37-44. (in Chinese)
- [12] 汪大绥, 周建龙, 姜文伟, 等. 超高层结构地震剪力系数限值研究 [J]. 建筑结构, 2012, 42(5): 24-27.
- WANG Dasui, ZHOU Jianlong, JIANG Wenwei, et al. Research on seismic shear gravity ratio limit for super high-rise buildings higher than 500 m [J]. Journal of Building Structures, 2012, 42(5): 24-27. (in Chinese)
- [13] 周丽芳, 邓雪松, 周云. 高层黏滞阻尼减震结构最小地震剪力系数分析研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(6): 206-214.
- ZHOU Lifang, DENG Xuesong, ZHOU Yun. Analytical studies on the minimum shear-weight ratio of structure with viscous dampers [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 33(6): 206-214. (in Chinese)
- [14] 王维, 李爱群. 最小地震剪力系数对隔震结构抗震性能的影响 [J]. 建筑结构学报, 2017, 38(1): 99-105.
- WANG Wei, LI Aiqun. Influence of minimum earthquake shear force coefficient on seismic performance of isolation structures [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(1): 99-105. (in Chinese)
- [15] 左琼, 罗开海. 我国《建筑抗震设计规范》基底剪力系数研究 [J]. 建筑结构学报, 2012, 33(6): 29-34.
- ZUO Qiong, LUO Kaihai. Study on seismic base shear factor in Chinese 'Code for seismic design of buildings' [J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(6): 29-34. (in Chinese)
- [16] 周锡元, 樊水荣, 苏经宇. 地震区砌体房屋的高度限制与隔震措施 [C]//砌体结构隔震减震方法及工程应用研究论文报告选编. 北京: 中国建筑科学研究院抗震所, 1996.
- ZHOU Xiyuan, FAN Shuirong, SU Jingyu. Height restrictions for masonry houses in seismic zones with seismic isolation measures [C]//Compilation of Selected Research Papers and Reports on Seismic Isolation and Vibration Reduction Methods for Masonry Structures and Their Engineering Applications. Beijing: China Academy of Building Research, 1996. (in Chinese)
- [17] 苏经宇, 韩淼, 周锡元, 等. 橡胶支座基础隔震建筑地震作用实用计算方法 [J]. 振动工程学报, 1999(2): 82-89.
- SU Jingyu, HAN Miao, ZHOU Xiyuan, et al. The practical calculating method of equivalent seismic action of base isolation building using rubber bearings [J]. Journal of Vibration Engineering, 1999(2): 82-89. (in Chinese)
- [18] KELLY J M. Earthquake-resistant design with rubber [M]. Springer, 1993.
- [19] 杨韬, 孙慧峰, 罗瑞, 等. 某高层框架结构的隔震设计 [J]. 建筑科学, 2017, 33(5): 116-120.
- YANG Tao, SUN Huifeng, LUO Rui, et al. Isolation design of a high-rise frame structure [J]. Building Science, 2017, 33(5): 116-120. (in Chinese)
- [20] 余文正, 毛德均, 杨瑞欣, 等. 隔震结构改进等效线性化设计方法研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2021, 41(2): 219-227.
- YU Wenzheng, MAO Dejun, YANG Ruixin, et al. Study on improved equivalent linearization method in design of seismic isolated structure [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2021, 41(2): 219-227. (in Chinese)
- [21] Quantification of building seismic performance factors: ATC-63 [M]. Redwood City: Applied Technology Council, 2009.