
Research on Calculation Method of Bottom Isolation Shear Wall Structure Considering Fuzzy Analytic Hierarchy Process

Li Yulou¹, Jie Yulin^{2,*}, Chen Lu¹, Yu Zhaohong³

¹Shenzhen Lianbo Construction Engineering Technology Co., Ltd. Shenzhen, China

²Guangdong Lianbo New Infrastructure Co., Ltd. Guangzhou, China

³Shenzhen Pengsheng Construction Co., Ltd. Shenzhen, China

Email address:

20120503@szlianbo.cn (Li Yulou), 425823794@qq.com (Jie Yulin)

*Corresponding author

To cite this article:

Li Yulou, Jie Yulin, Chen Lu, Yu Zhaohong. (2024). Research on Calculation Method of Bottom Isolation Shear Wall Structure Considering Fuzzy Analytic Hierarchy Process. *Science Discovery*, 12(1), 1-7. <https://doi.org/10.11648/j.sd.20241201.11>

Received: December 27, 2023; **Accepted:** January 15, 2024; **Published:** January 9, 2024

Abstract: In our country, buildings are facing the severe threat of earthquake disaster, almost all buildings have to carry out structural seismic design. Shear wall structure is one of the common structural systems of high-rise building, in order to study the isolation effect of high aspect ratio structure and understand the reason of isolation effect, under the action of horizontal force, Timoshenko beam can assume the deformation mode of bending-shear type, which is close to the deformation characteristics of shear wall structure. The bottom isolation shear wall structure has the characteristics of bending-shear lateral displacement curve under the action of strong earthquake, and its mechanical characteristics are similar to Timoshenko beams. How to accurately evaluate the importance and reliability of many influencing factors, this paper adopts the fuzzy analytic hierarchy process to analyze the dynamic characteristics before and after the seismic isolation of the cantilever Timoshenko beam of the bending-shear structure, determine the weight of each evaluation item for the analysis of the damping effect of the whole structure. It is concluded that prolonging the period, reducing the participation mass coefficient of high-order mode shapes and increasing the damping ratio of the system are the three major factors for vibration isolation technology.

Keywords: Bottom Isolation, Bending-Shear Type, Fuzzy Analytic Hierarchy Process, Timoshenko Beams, Isolation Technology

基于模糊层次分析的旧改底部隔震剪力墙结构计算方法

李玉楼¹, 揭育林^{2,*}, 陈露¹, 余兆洪³

¹深圳市联博建筑工程技术有限公司, 深圳, 中国

²广东联博新基建有限公司, 广州, 中国

³深圳市鹏盛建设有限公司, 深圳, 中国

邮箱

20120503@szlianbo.cn (李玉楼), 425823794@qq.com (揭育林)

摘要: 在我国, 建筑面临着地震灾害的严峻威胁, 几乎所有建筑都要进行结构抗震设计, 剪力墙结构是高层建筑的常见的结构体系之一, 为了研究大高宽比结构的隔震效应, 了解隔震效果产生的原因, 铁木辛柯梁在水平力作用下可呈弯剪型的变形模式, 接近剪力墙结构的变形特性。底部隔震剪力墙结构在强震作用下具有弯剪型侧移曲线的特性, 其

受力特性与铁木辛柯梁相似。如何准确评估诸多影响因素的重要性和可靠性，本文采用考虑模糊层次分析法进行了对弯剪型结构的悬臂铁木辛柯梁模拟剪力墙结构的隔震前后动力特征的分析变化，确定各鉴定项目对于整个结构减震效果的分析的权重；提出了利延长周期、减少高阶振型参与质量系数和增加体系阻尼比是隔震技术减震的三大因素；并指出了随结构周期的增大，这些因素的有利影响均减弱。

关键词：底部隔震，弯剪型，模糊层次分析法，铁木辛柯梁，隔震技术

1. 引言

随着经济的高速发展，城市中的高楼如雨后春笋般不断冒出来，这样城市用地越发紧张了，高层剪力墙结构也越来越多。建筑物过于密集，抗震性能相对比较差，人们容易遭受到的地震灾害的影响，为了人民的生命安全，建筑设计过程中必须保证建筑结构安全与使用功能。《建筑抗震设计规范》提出了隔震设计的要求，须运用规范的条文要求进行结构计算和设计，几乎所有建筑均需要开展结构抗震设计。目前，多项实际的高层建筑采用了隔震技术，隔震效果产生的原因尚未有足够充分的理论研究进行验证。由于铁木辛柯梁在水平力作用下可呈弯剪型的变形模式，接近剪力墙结构的变形特性，本文以悬臂铁木辛柯梁作为基本模型，通过研究其动力特征及地震效应，分析隔震技术对剪力墙结构的影响。

2. 模糊层次分析法的基本原理

层次分析法是T·L·Saaty等人在20世纪70年代初提出的一种数学方法，是一种定性与定量分析相结合的方法，通过两两比较的方式确定各因素的相对重要性[1]。层次分析法的基本思想，是将若干因素对同一目标的影响，归结为确定它们在目标中占的比重。若要比较n个因素 $U=(U_1, U_2, \dots, U_n)$ 对目标I的影响，确定其在I中占的比重，可每次取两个因素 U_i, U_j ，用 c_{ij} 表示 U_i 与 U_j 对I的影响之比，形成主要判断矩阵：

$$C = (c_{ij})_{n \times n} \quad (1)$$

并满足： $c_{ij} > 0, c_{ji} = 1/c_{ij}$ ，且 $c_{ii} = 1, (i, j = 1, 2, \dots, n)$ 。

若矩阵C满足：

$$C_{ij}C_{jk} = C_{ik} \quad (i, j, k = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

则称矩阵C为一致性矩阵，简称一致阵。矩阵C的最大特征值 λ_{max} 对应的特征向量归一化后记为：

$$\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)^T \quad (3)$$

其中， $\sum_{i=1}^n \omega_i = 1$ ，向量 ω_i 即为权重向量，表示了 U_1, U_2, \dots, U_n 在目标I中占的比重。

模糊层次分析法是利用1到9间的整数及其倒数作为标度构造矩阵，大多数情况下是没有考虑建筑可靠性评定中的模糊性，故考虑将层次分析法与三角模糊数相结合，使得所建立的评判模型对多因素、多层次的复杂问题评判

效果比较好。模糊数学以模糊集合论为基础，提供了一种处理不确定性问题的新方法，尤其适用于描述或处理有人参与决策的问题[2]。

设有实数集 $R=(-\infty, +\infty)$ 上的一个模糊数S，当它的隶属函数 $\mu_S: R \rightarrow [0, 1]$ 满足下列式时，称其为一个三角模糊数。

$$\mu_S(x) = \begin{cases} \frac{1}{m-l}x - \frac{l}{m-l}, & x \in [l, m] \\ \frac{1}{m-u}x - \frac{u}{m-u}, & x \in [m, u] \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

式中， $l \leq m \leq u$ ，l和u分别表示S支撑的上界和下界，而m为S的中值。一般地，三角模糊数S可记为 (l, m, u) 。

运用三角模糊层次分析法解决问题，大体可以分为三个步骤，1)建立问题的递阶层次结构；2)构造两两比较判断矩阵；3)由判断矩阵计算各元素相对权重并计算各层元素的组合权重[3]。本文通过对延长周期、减少高阶振型参与质量系数和增加体系阻尼比三个因素对隔震剪力墙结构减震的效果进行分析，寻求在随着结构周期的增大，这些因素的有利影响是否均减弱。

3. 底部隔震剪力墙结构特性

3.1. 隔震结构的地震动力特征

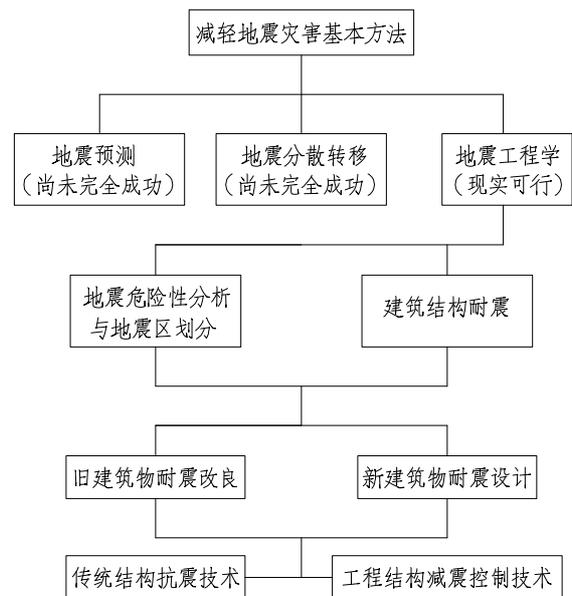


图1 减轻地震灾害的基本方法。

地震是地壳在快速释放能量过程中所产生的震动过程，原因是地球内部的岩层在永不间断的运动变形、相互摩擦、相互挤压的现象升华为出现断裂破坏的情形，地震也就随之而产生。我国地震的特点表现在：地震位置是世界两个地震带的交汇处，大部分属于浅层地震，具有地震频率高、震级大等特点。由于大部分城市建筑物过于密集，抗震性能相对比较差，人们遭受到的地震灾害相当严重。目前人们通常减轻地震灾害有三种基本方法，见图1所示。

工程结构减震控制的减震机理易理解掌握，减震控制的类别见图2所示，同时可以用较为简单的结构动力学方程[1]给以解释，见式下所示：

$$M \ddot{x}_s + C \dot{x}_s + K x_s = F(t) - M \ddot{x}_g \quad (5)$$

式中， M 、 C 、 K —结构的质量、阻尼、刚度；
 $F(t)$ —外力作用；

\ddot{x}_s 、 \dot{x}_s 、 x_s —加速度、速度和位移反应；

\ddot{x}_g —底面地震加速度。

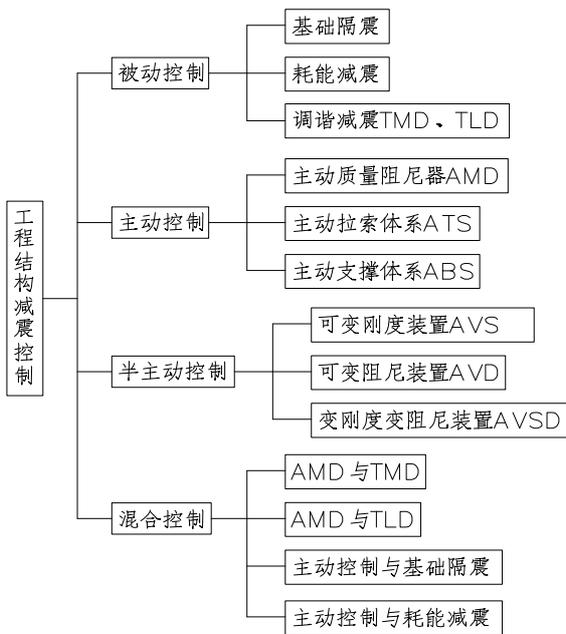


图2 减震控制的类别。

《建筑抗震设计规范》[4]要求隔震结构的计算变形简图应能适用剪切型模型，方可运用规范的条文要求进行结构计算和设计。故目前隔震技术主要应用于结构自振周期在1s以内或高度小于40m的结构。但对于大高宽比的高层建筑，其基本周期比较长，多位于反应谱曲线的平缓下降段，降低地震影响系数的效果不明显，然而已有多项实际的高层建筑采用了隔震技术[5-7]，隔震效果产生的原因尚未有足够充分的理论研究进行验证。

剪力墙结构是高层建筑的常见的结构体系之一，其高宽比较大，在水平地震等效作用下的侧移曲线以弯曲变形为主。为了研究大高宽比结构的隔震效应，文献[8-11]以周期、底部剪力、底部弯矩或顶点位移相等作为等效准则，

采用修正的双自由度、三自由度等模型进行模拟[12-15]，尽管这些研究采用多种方式使模型更符合高层变形特点，但这些模型还是与剪力墙结构存在一定差异。

把结构按多自由度体系进行计算，不但简化了实际结构的模型，使其便于运算，还使得原结构的动力特性能够被简化模型真实正确的反应出来。由于铁木辛柯梁在水平力作用下可呈弯剪型的变形模式，接近剪力墙结构的变形特性，本文以悬臂铁木辛柯梁作为基本模型，底部设置隔震装置见图3所示，通过研究其动力特征及地震效应，分析隔震技术对剪力墙结构的影响。

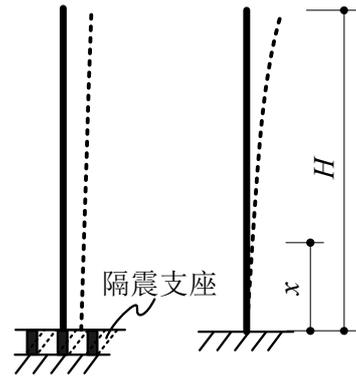


图3 隔震和非隔震悬臂梁侧向变形简图。

3.2. 隔震铁木辛柯梁的地震动力特征

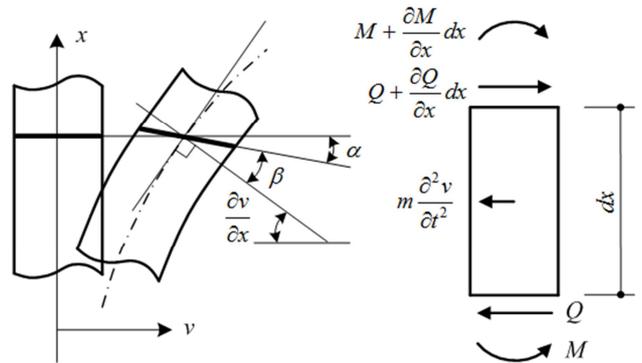


图4 梁微段变形及平衡。

在等截面悬臂铁木辛柯梁上截取一微段，由图4列出微段的平衡方程：

$$\left(Q + \frac{\partial Q}{\partial x} dx \right) - Q - m \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} dx = 0$$

$$\left(M + \frac{\partial M}{\partial x} dx \right) - M + \left(Q + \frac{\partial Q}{\partial x} dx \right) dx - m \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} dx \cdot \frac{dx}{2} = 0$$

式中： Q 和 M 分别为横截面的剪力和弯矩； m 为沿高度的分布质量； x 为与基底的距离； v 为侧向位移。

化简上面两式，并忽略高阶微量，有：

$$\frac{\partial Q}{\partial x} - m \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0 \quad (6)$$

$$Q + \frac{\partial M}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

根据梁初等理论，图4中梁横截面上剪力与变形有如下关系：

$$Q = AG\beta = \kappa AG \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \alpha \right) \quad (8)$$

$$M = EI \frac{\partial \alpha}{\partial x} \quad (9)$$

式中： G 和 E 分别为剪切模量和弹性模量； A 和 I 分别为横截面的有效剪切面积和惯性矩； α 和 β 分别为截面转角和剪切引起的夹角改变量； κ 为截面受剪的不均匀系数。

式(8)对 x 求偏导，代入式(1)，消去 $\frac{\partial Q}{\partial x}$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial x} = \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \frac{m}{\kappa AG} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \quad (10)$$

式(9)对 x 求偏导，代入式(7)，消去 $\frac{\partial M}{\partial x}$

$$Q + EI \frac{\partial^2 \alpha}{\partial x^2} = 0$$

再将式(8)代入上式

$$\kappa AG \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \alpha \right) + EI \frac{\partial^2 \alpha}{\partial x^2} = 0 \quad (11)$$

联合式(10)和式(11)，消去 α ，得到等截面梁横向自由振动的动力方程：

$$\frac{\partial^4 v}{\partial x^4} - \frac{m}{\kappa AG} \frac{\partial^4 v}{\partial x^2 \partial t^2} + \frac{m}{EI} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0 \quad (12)$$

采用分离变量法，令

$$v = \varphi(x) \cos(\omega t - \theta)$$

式中： $\varphi(x)$ 为不同振型梁的侧向位移； ω 为自振的圆频率， $\omega = 2\pi/T$ ， T 为自振周期； θ 振动的初始角。将上式代入式(12)可得

$$\varphi^{iv} + \frac{m\omega^2}{\kappa AG} \varphi'' - \frac{m\omega^2}{EI} \varphi = 0 \quad (13)$$

式(13)为4阶的偏微分方程，其特征方程有四个根，令

$$\lambda_1 = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\sqrt{\left(\frac{m\omega^2}{\kappa AG} \right)^2 + \frac{4m\omega^2}{EI}} - \frac{m\omega^2}{\kappa AG} \right)},$$

$$\lambda_2 = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\sqrt{\left(\frac{m\omega^2}{\kappa AG} \right)^2 + \frac{4m\omega^2}{EI}} + \frac{m\omega^2}{\kappa AG} \right)}, \quad \text{式(13)的解为:}$$

$$\varphi(x) = C_1 \sinh \lambda_1 x + C_2 \cosh \lambda_1 x + C_3 \sin \lambda_2 x + C_4 \cos \lambda_2 x \quad (14)$$

式中： C_1 、 C_2 、 C_3 和 C_4 为待定参数。

如图3所示，令隔震层的水平刚度为 k ，可列出以下边界条件：

$$\alpha|_{x=0} = \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{Q}{\kappa AG} \right) \Big|_{x=0} = 0 \quad (Q - kv)|_{x=0} = 0$$

$$M_{x=H} = 0 \quad Q_{x=H} = 0$$

将式(10)代入式(9)，得到以 v 表示的横截面弯矩

$$M = EI \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \frac{m}{\kappa AG} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \right) \quad (15)$$

将式(15)代入式(7)，得到以 v 表示的横截面剪力

$$Q = -EI \left(\frac{\partial^3 v}{\partial x^3} - \frac{m}{\kappa AG} \frac{\partial^3 v}{\partial x \partial t^2} \right) \quad (16)$$

将式(10)和式(11)代入边界条件，利用分离变量法化简边界条件，并将之改写为矩阵形式：

$$\begin{bmatrix} \lambda_1 + \frac{EI\lambda_1\lambda_2^2}{\kappa AG} & 0 & \lambda_2 - \frac{EI\lambda_1\lambda_2}{\kappa AG} & 0 \\ \lambda_1\lambda_2^2 & k/EI & -\lambda_1^2\lambda_2 & k/EI \\ \lambda_2^2 \sinh \lambda_1 H & \lambda_2^2 \cosh \lambda_1 H & -\lambda_1^2 \sin \lambda_2 H & -\lambda_1^2 \cos \lambda_2 H \\ \lambda_2 \cosh \lambda_1 H & \lambda_2 \sinh \lambda_1 H & -\lambda_1 \cos \lambda_2 H & \lambda_1 \sin \lambda_2 H \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \end{Bmatrix} = 0 \quad (17)$$

齐次方程组式(17)有非平凡解，故系数矩阵的行列式的值为零，可求得隔震悬臂铁木辛柯梁的特征值。求解隔震悬臂铁木辛柯梁的动力特征前，需要确定式(17)中三个结构自身具备的刚度组合变量：抗弯刚度 EI 、剪切刚度 κAG 和隔震层刚度 k 。由于实际结构难以确定 EI 和 κAG ，需借用明确物理意义的量来表示。引入隔震层周期比的定义：

$$\eta_T = \frac{T_{\text{iso}}}{T_1} = \sqrt{\frac{EI}{kH^3}} \lambda_1^2 \quad (18)$$

式中： T_{iso} 为隔震单自由度体系的周期，将悬臂梁质量集中于隔震层以上，并根据隔震支座的等效刚度计算得到的周期； T_1 和 λ_1 分别为非隔震铁木辛柯梁的基本周期和特征值， $\lambda_1^4 = m\omega_1^2 H^4 / (EI)$ 。周期比 η_T 表征 EI 和 k 的相对大小， η_T 越大，表示隔震层刚度越小。

悬臂梁在水平荷载作用下的横向位移等于弯曲变形和剪切变形之和，令自由端剪切变形占梁自由端总位移的比值为 η_{Δ} ，由材料力学可推导出 η_{Δ} 的表达式为：

$$\eta_{\Delta} = \left(1 + \frac{\kappa AGH^2}{nEI} \right)^{-1} \quad (19)$$

式中： n 为不同荷载分布形式的影响系数，沿梁轴线荷载分布为倒三角形、均布和端部集中荷载三种形态取值分别为3.64、4和3，隔震后等效地震作用分布更接近于矩形，故在本文的分析中令 $n=4$ ，便以简化分析。 η_{Δ} 表征 EI 和 κAG 的相对大小； η_{Δ} 取值范围在0~1.0之间，该值越大表示剪切变形的影响越大， η_{Δ} 为零时铁木辛柯梁退化为伯努利欧拉梁。 η_{Δ} 可作为结构高宽比的影响参数。

利用式(18)和(19)确定周期比 η_T 和变形比 η_{Δ} 后，悬臂铁木辛柯梁的特征值就成为 EI 的因变量，可求得用 EI 表征的特征值的大小。

3.3. 悬臂铁木辛柯梁隔震技术的减震效应

美国学者Housner最先提出了能量法这一概念，能量法以方法简单，表达式概念清晰，能较好的显示地震动对结构响应的影响，因而被广大的工程师和研究人员用来评估和判别建筑结构在地震中能量的吸收和耗散情况。

从我国地震影响系数可知，建筑的地震影响系数大小与结构的自振周期 T_g 有着极为紧密的联系，地震影响系数随着自振周期 T_g 的变化会产生三种不同的变化趋势，在反应谱图中即表现为三段函数。采用振型分解反应谱法计算等效地震作用， j 振型任一长度 dx 受到的等效地震作用为：

$$F_{j,x} = \alpha_j \gamma_j \varphi_{j,x} mg dx$$

式中： α_j 为地震影响系数； $\varphi_{j,x}$ 为距离基底 x 处振型的位移； g 为重力加速度； γ_j 为 j 振型的振型参与系数，

$$\gamma_j = \int_0^H \varphi_{j,x} dx / \int_0^H \varphi_{j,x}^2 dx$$

故 j 振型产生的基底等效剪力和基底等效弯矩分别为：

$$V_j = \int_0^H \alpha_j \gamma_j \varphi_{j,x} mg dx = \alpha_j \xi_j G_g \quad (20)$$

式中： G_g 为悬臂梁的总重量， $G_g = mgH$ ， g 为重力加速度； ξ_j 为振型质量参与系数，可按下式计算：

$$\xi_j = \frac{\gamma_j}{H} \int_0^H \varphi_{j,x} dx = \frac{\left(\int_0^H \varphi_{j,x} dx \right)^2}{H \int_0^H \varphi_{j,x}^2 dx} \quad (21)$$

3.4. 悬臂铁木辛柯梁隔震效应的影响因素

式(20)表明基底剪力有自重、地震影响系数和振型质量参与系数，地震影响系数受到周期和结构阻尼比影响，因此隔震技术可通过改变周期、振型质量参与系数和阻尼

比实现减震的目的，下面将通过分析基底剪力的变化研究隔震剪力墙结构的影响因素。

(1)第一个有利影响因素为延长结构周期。

通过隔震延长周期，减少地震响应。图5中随 η_T 增大，周期比增大，但不同振型变化不同：1阶振型三条曲线基本重合，剪切变形对1阶振型甚微，周期比与 η_T 大致成线性正比关系，高阶振型曲线在起始阶段变化明显，随 η_T 增大，逐渐趋于平缓。剪切变形对高阶振型的影响较大，铁木辛柯梁延长周期的效果不如伯努利欧拉梁， η_{Δ} 越大，延长周期的作用越差。延长周期减少地震作用大小的决定因素在于 η_T ， η_T ，由于隔震前后的周期比与 η_T 基本成线性关系，因此从延长周期的角度上看，隔震层的刚度越小隔震效果越好。

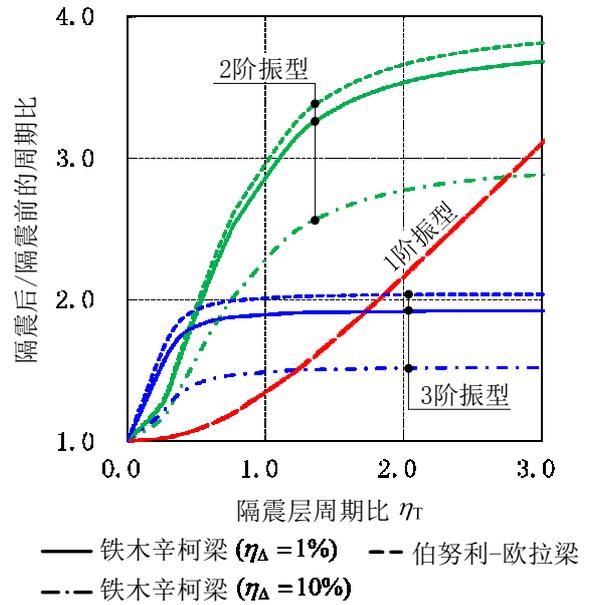


图5 隔震前后自振周期的变化。

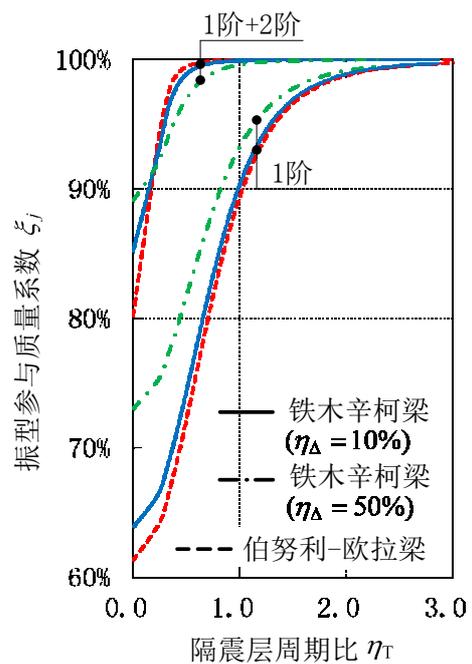


图6 隔震后振型质量参与系数的变化。

(2)其次,第二个影响因素为振型参与质量系数的参与情况。

利用不同振型的正交性,可证明所有振型质量参与系数 ζ_j 之和为1,故 ζ_j 相当于一权重分配系数,调整各振型对基底剪力的贡献。计算得到隔震的铁木辛柯梁特征值后,可

表1 隔震后振型质量参与系数达到90%时的周期比。

梁模型	1阶振型	
	隔震层周期比 η_T	隔震后/前基本周期比
伯努利欧拉梁	1.03	1.36
铁木辛柯梁 ($\eta_s = 0.1$)	0.99	1.33
铁木辛柯梁 ($\eta_s = 0.5$)	0.83	1.25

振型分解反应谱法计算地震作用时,必须保证振型参与质量系数之和大于90%,图6中隔震后1阶和2阶的振型参与质量之和很容易达到90%以上,因此隔震技术能有效减弱大多数建筑结构的高阶振型的影响。表1列出1阶振型的振型参与质量系数达到90%时的周期比,由表1可知,隔震后与隔震前的第1周期比超过1.4 (η_T 大于1.0),地震效应的计算可只用隔震后的1阶振型进行计算。这也意味着如果结构高阶振型影响较大,若将隔震后与隔震前的周期比控制在1.4倍以上,可以有效限制高阶振型的影响。

(3)再次,第三个影响因素为整体结构的阻尼情况。耗能体系的阻尼比均可表示为

$$\zeta_j = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W_j}{W_j} \quad (22)$$

式中: ΔW_j 为 j 振型振动一周的耗能,可采用隔震支座滞回骨架线的包围面积计算得到; W_j 为 j 振型系统的弹性能。

隔震层及上部结构对耗能和弹性能均有贡献,根据式(22)可以计算整体隔震结构整体的阻尼比

$$\zeta = \frac{\Delta W_{s,j} + \Delta W_{b,j}}{4\pi(W_{s,j} + W_{b,j})} = \frac{\zeta_s W_{s,j} + \zeta_b W_{b,j}}{W_{s,j} + W_{b,j}} = \zeta_b + (\zeta_s - \zeta_b) \eta_{w,j} \quad (23)$$

式中: $\Delta W_{s,j}$ 和 $\Delta W_{b,j}$ 分别为 j 振型隔震层和悬臂梁历经的最大能量,可按下两式计算; $W_{s,j}$ 和 $W_{b,j}$ 分别为 j 振型隔震层和悬臂梁历经的最大能量,; ζ_s 和 ζ_b 分别为隔震层和上部结构的阻尼比; $\eta_{w,j}$ 为各阶振型隔震层吸收的能量和整体结构能量之比, $\eta_{w,j} = W_{s,j} / (W_{s,j} + W_{b,j})$ 。

整体结构的阻尼比与隔震层阻尼比有密切关系外,还与能量比 $\eta_{w,j}$ 有关。图7为1阶和2阶振型(其他高阶振型与2阶类似)的 $\eta_{w,j}$ 和 η_T 的关系,图中1阶振型的三条曲线基本是重合的,剪切变形对1阶振型影响甚微,各振型的 $\eta_{w,j}$ 基本上随 η_T 增大而增大, η_T 超过一定值后 $\eta_{w,j}$ 趋于稳定。由于多数隔震结构的 η_T 大于高阶振型的趋于稳定的拐点数值,因此可以预见隔震后高阶振型的阻尼比较稳定,而1阶振型阻尼比会随非隔震结构的周期增大而下降。阻尼比的存在及其变化影响了隔震结构的动力响应,除了上部结构顶

由式(17)得到参数C1、C2、C3和C4的数值,从而确定梁的振型,然后可按式(21)计算 ζ_j ,并将之表示在图6中。图6中1阶振型的 ζ_j 随 η_T 增大而增大,隔震层刚度越小(η_T 越大), ζ_j 越接近于1。根据振型分解反应谱法,周期越长地震影响系数越小,隔震后增大了1阶振型的振型质量参与系数,减小了高阶振型的影响,间接地降低了地震效应。

层的加速度,隔震层阻尼比的变化也相应的对隔震层位移和上部结构的层间相对位移产生影响。

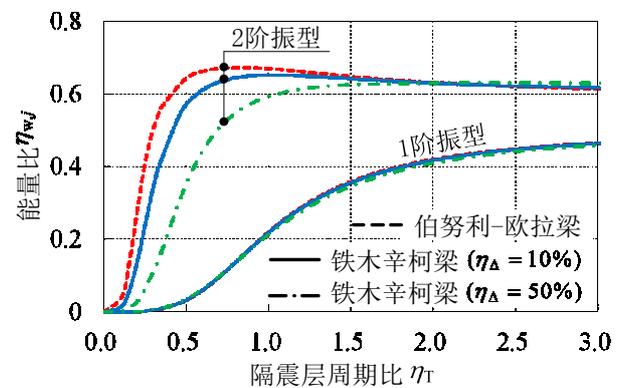


图7 隔震层吸收的能量

综上所述,延长周期、降低高阶振型的影响和增大结构阻尼是隔震剪力墙结构降低地震效应的三个主要因素。

4. 结论

本文通过建立递阶层次结构,分别用模糊层次分析法确定各鉴定项目对于整个结构减震效果的分析的权重,并通过工程实例进行了验证,主要结论如下:

- (1)用层次分析法进行对弯剪型结构的悬臂铁木辛柯梁模拟剪力墙结构进行了隔震前后动力特征的分析变化;
- (2)延长周期、减少高阶振型参与质量系数和增加体系阻尼比是隔震剪力墙结构减震的三大主要影响因素,随结构周期的增大,这些因素的有利影响均减弱。

参考文献

- [1] 李帅,唐洁芳,王鹏飞.基于AHP法的武汉市应急医疗设施选址评价研究[J].西南大学学报(自然科学版),2022,44(05):209-221.

- [2] 陈大川, 王孜, 郭健. 基于模糊层次分析法的建筑物整体平移施工风险评估[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020, 36(01): 57-65.
- [3] 张晋芳, 余隆丽, 周郅灵, 等. 基于层次分析法的超高层建筑结构选型 [J]. 建筑结构, 2021, 51(S1): 358-362.
- [4] 周福霖. 工程结构减震控制 [M]. 北京: 中国地震出版社, 1997.04.
- [5] GB50011-2010 建筑抗震设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [6] 崔鸿超. 日本超高层建筑结构抗震新技术的发展现状及思考 [J]. 建筑结构, 2013, 43(16): 1-7.
- [7] 李洪求, 薛彦涛, 郝可, 巫振弘, 戴云景, 汤荣伟. 某高烈度区高层剪力墙住宅隔震设计 [J]. 建筑结构, 2019, 49(16): 1-5.
- [8] 罗强军, 高国家, 管庆松, 张玉敏. 昆明天湖景秀百米高住宅结构隔震非线性分析 [J]. 建筑结构, 2017, 47(08): 93-97.
- [9] 刘文光, 杨巧荣, 周福霖. 大高宽比隔震结构地震反应的实用分析方法 [J]. 地震工程与工程振动. 2004, 24(4): 115-121.
- [10] 赖正聪, 潘文, 白羽等. 基于等效梁模型的大高宽比高层剪力墙隔震结构地震反应分析 [J]. 振动与冲击, 2021, 40(20): 127-134.
- [11] 叶昆, 徐誉铭, 倪管乐等. 基础隔震结构直接基于位移设计的一体化抗震设计方法 [J]. 建筑结构学报, 2022, 43(04): 58-67.
- [12] 赖正聪, 白羽, 潘文, 叶燎原, 杨晓东, 安晓文, 苏何先. 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+95.
- [13] 王焕定, 付伟庆, 刘文光, 等. 规则隔震结构等效简化模型的研究[J]. 工程力学, 2006, 23(8): 138-143.
- [14] Anil K. Chopra. 结构动力学理论及其在地震工程中的应用 (第2 版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [15] 郑展杰. 基于深度学习的强震动分量相关性研究及在地震动选取中的应用 [D]. 中国地震局地球物理研究所, 2023.

作者简介

李玉楼, 高级工程师, 硕导, 主要从事复杂结构加固理论分析和工程建设。

揭育林, 通讯作者, 工程师, 注册建造师, 主要从事复杂结构加固理论分析和工程建设。