梁秋河,周云,戚玉亮,等.基于反应谱的考虑有效刚度修正的隔震结构偏心率计算方法[J].地震工程学报,2027,49(1):103-111.DOI:10.20000/j.1000-0844.20250319003

Liang Qiuhe, Zhou Yun, Qi Yuliang, et al.Eccentricity calculation method for base-isolated structures incorporating effective stiffness correction based on response spectrum[J].China Earthquake Engineering Journal, 2027, 49(1): 103-111. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20250319003

基于反应谱的考虑有效刚度修正的隔震结构偏心率计算方法

梁秋河[1,2,3], 周 云[3], 戚玉亮[1,2], 陈浩帆[1,2], 商城豪[3]

(1.广州建筑产业研究院集团有限公司,广东 广州 510600;
2.广州建筑股份有限公司,广东 广州 510000;
3.广州大学 土木与交通工程学院,广东 广州 510006)

摘要:为降低隔震结构因扭转效应造成部分隔震支座荷载过大、过早损伤等不利影响,各国规范均对隔震层偏心率提出控制要求。对比分析当前三种主流隔震结构偏心率计算方法的物理内涵;针对偏心率计算中支座有效刚度取值不合理的问题,提出一种基于反应谱、考虑有效刚度修正的隔震层偏心率计算方法。将所提方法与现有三种算法在多参数分析模型及实际工程算例中开展对比研究,结果表明:对隔震支座有效刚度进行迭代修正,可有效反映扭转作用下各支座的最大变形差异;经刚度修正后的刚心偏移位置与未修正结果相比,最大偏移量可达 183 mm。工程算例显示,考虑有效刚度修正后结构周期约减小 5%;文章提出的修正方法得到的偏心率设计取值偏于保守,能够体现隔震层各支座变形差异带来的有效刚度变化,物理概念清晰,计算结果合理。

关键词:隔震结构;偏心率计算方法;反应谱分析;修正有效刚度

中图分类号:TU352 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-0844(2027)01-0103-09

DOI:10.20000/j.1000-0844.20250319003

Eccentricity calculation method for base-isolated structures incorporating effective stiffness correction based on response spectrum

Liang Qiuhe[1,2,3], Zhou Yun[3], Qi Yuliang[1,2], Chen Haofan[1,2], Shang Chenghao[3]

(*1.Guangzhou Research Institute of Construction Industry Co., Ltd., Guangzhou 510600, Guangdong, China;*
2.Guangzhou Construction Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510000, Guangdong, China;
3.School of Civil Engineering and Transportation, Guangzhou University, Guangzhou 510006, Guangdong, China)

Abstract: To mitigate adverse effects, such as premature failure of isolation bearings caused by exces-

收稿日期:2025-03-19

基金项目:重庆市科学基金重点资助项目(035679);2002年高等学校博士学科点专项科研资助项目(20020183061);中国博士后科学基金(2025M783262)

第一作者简介:梁秋河(1996-),男,博士研究生,主要从事地铁振动控制,结构隔震(振)方面的研究。E-mail: zhangmail@mail.com。

sive torsional loads in base-isolated structures, codes worldwide have specified limits for the eccentricity of the isolation layer. This study performs a comparative analysis of the physical significance of three existing methods for calculating the eccentricity of base-isolated structures. A response spectrum-based method with effective stiffness correction is proposed to determine the effective stiffness of bearings in eccentricity calculations. Analytical models with different parameters and case studies of actual structures are used to compare the proposed method with the three existing methods. The results show that iterative correction of the effective stiffness of isolation bearings effectively captures the differences in the maximum deformation of individual bearings caused by torsion. The corrected stiffness center differs from the uncorrected one by up to 183 mm. Case studies indicate that the structural period decreases by approximately 5% after applying the effective stiffness correction. The eccentricity obtained using the proposed method leads to a more conservative design and reflects the differences in effective stiffness caused by variations in bearing deformations within the isolation layer. The proposed method has clear physical significance and produces reasonable numerical results.

Keywords: base-isolated structure; eccentricity calculation method; response spectrum analysis; effective stiffness correction

0 引言

在隔震结构基于反应谱的等效线性化分析中，研究者常将其简化为单自由度层模型[1]。然而，该单自由度层模型简化程度较高，无法考虑隔震层几何不对称、质量-刚度分布不均匀等因素，容易低估隔震支座的扭转效应[2-5]。因此，越来越多学者倾向于将隔震层等效为多自由度层模型开展分析。葛益成[6]基于有限元模拟探究隔震层偏心率对结构扭转效应的影响，结果表明隔震层偏心对上部结构扭转效应影响显著，工程设计中应予以充分重视。潘钦锋等[7]针对平面不规则多层框架隔震结构的扭转效应开展研究，发现将隔震层刚心与上部结构刚心布置于上部结构质心两侧，能够抑制平面不规则结构的扭转效应。

为降低隔震结构扭转效应带来的不利影响，各国规范均对隔震层偏心率设置限值。现有研究[8-10]与相关规范[11-18]中，隔震层偏心率主要存在三类计算方法：基于结构边长的偏心率方法、基于质量回转半径的偏心率方法和基于刚度回转半径的偏心率方法（下文统称为“现有三种偏心率计算方法”）。我国《叠层橡胶支座隔震技术规程（CECS 126：2001）》[18]要求“隔震层的刚度中心宜与上部结构的质量中心重合”。《建筑隔震设计标准（GB/T 51408—2021）》[19]第4.6.2条进一步明确要求“隔震层刚度中心与质量中心宜重合，设防烈度地震作用下的偏心率不宜大于3%”，但并未给出偏心率的具体计算方法。

在依据《建筑抗震设计规范（GB 50011—2010）》[20]（以下简称抗规）开展设防地震等效线性化分析时，现有三种隔震层偏心率计算方法普遍假定各隔震支座水平变形取$1T_r$（T_r为支座内部橡胶层总厚度），并采用该变形对应的割线刚度作为所有支座的有效刚度进行偏心率计算。但在偏心扭转效应作用下，各隔震支座实际最大变形并不均等于$1T_r$，该假定难以反映平面不规则结构中支座变形差异对偏心率计算带来的影响。综上，现有三种隔震层偏心率计算方法缺少对物理内涵的系统剖析，也缺乏多工况下的定量对比分析，各类方法的工程合理性仍有待进一步论证。

隔震支座有效刚度的取值直接决定隔震结构的整体刚度矩阵，进而显著影响结构自振周期、隔震层变形及耗能特性等关键计算结果，是隔震结构数值分析与设计中的核心参数。同时，有效刚度也是隔震层偏心率计算的核心控制指标，其取值合理性直接决定偏心率计算精度，对保障隔震结构设计的安全性与合理性至关重要。现有文献已针对隔震结构等效线性化反应谱分析开展了大量研究[1-4]，目前工程普遍基于支座试验实测滞回特性建立力学分析模型，采用支座最大变形对应的割线刚度作为其有效刚度，并通过迭代求解方式确定最终计算刚度。由此可见，在偏心率计算前对支座有效刚度进行迭代修正，具备极强的工程必要性与理论价值。

针对现有隔震层偏心率计算方法存在的缺陷，本文首先系统对比三种主流偏心率计算方法的物理内涵，在此基础上提出一种考虑支座有效刚度修正的隔震层偏心率计算新方法。通过精细化参数模型与实际工程算例的双重验证，证实了所提方法在物理机制与数值精度上的科学性、合理性。本文核心创新在于将支座变形差异引发的有效刚度迭代修正机制引入偏心率计算体系，弥补了现有方法忽略支座刚度差异化的缺陷。研究成果可为《建筑隔震设计标准（GB/T 51408—2021）》中未明确的偏心率计算细则提供精细化求解方案，有效提升平面不规则隔震结构的隔震层设计精度与抗震设计可靠性。

1　偏心率计算方法物理意义对比

墨西哥规范[11]采用基于结构边长的偏心率计算方法，要求偏心率小于10%。美国隔振规范[12-13]以及我国台湾地区《建筑物耐震设计规范及解说》[14]的处理方式相近，均要求考虑隔震层的偏心扭转效应，采用基于质量回转半径的方法计算隔震层偏心率，并将偏心率转化为支座的位移放大系数。欧洲规范[15]采用基于刚度回转半径的偏心率计算方法，同样将计算得到的偏心率用于确定支座位移放大系数。日本隔震相关规范[16-17]采用基于刚度回转半径的偏心率方法，规定隔震层偏心率不宜大于3%。

文献[8-11]分别给出了现有三种偏心率计算方法的具体推导。基于结构边长的偏心率计算方法如式(1)～(2)所列：

$$\rho_{1,x}=e_x/L \tag{1}$$

$$\rho_{1,y}=e_y/L \tag{2}$$

基于质量回转半径的偏心率计算方法如式(3)～(5)所列：

$$\rho_{2,x}=e_y/r \tag{3}$$

$$\rho_{2,y}=e_x/r \tag{4}$$

$$r=\sqrt{\frac{\sum\left[N_i(x_i^{\,2}+y_i^{\,2})\right]}{\sum N_i}} \tag{5}$$

基于刚度回转半径的偏心率计算方法如式(6)～(10)所列：

$$\rho_{3,x}=e_y/R_x \tag{6}$$

$$\rho_{3,y}=e_x/R_y \tag{7}$$

$$R_x=\left(\frac{K_{\mathrm{T}}}{\sum K_{e_x,i}}\right)^{0.5} \tag{8}$$

$$R_y=\left(\frac{K_{\mathrm{T}}}{\sum K_{e_y,i}}\right)^{0.5} \tag{9}$$

$$K_{\mathrm{T}}=\sum\left[K_{e_y,i}(x_i-x_K)^2+K_{e_x,i}(y_i-y_{\mathrm{K}})^2\right] \tag{10}$$

式中：ρ_x、ρ_y为分别为隔震层x向、y向偏心率（无量纲）；$\rho_{1,x}$、$\rho_{1,y}$、$\rho_{2,x}$、$\rho_{2,y}$、$\rho_{3,x}$、$\rho_{3,y}$分别为三种方法的偏心率计算结果；e_x、e_y分别为隔震层x向、y向偏心距，单位：m；x_{K}、y_{K}分别为隔震层x向、y向的刚心坐标，单位：m；$K_{e_x,i}$、$K_{e_y,i}$为第i个隔震支座在隔震层发生指定位移时x向、y向的等效刚度，单位：kN/m；x_i、y_i分别为第i个隔震支座中心位置x向、y向坐标值，单位：m；N_i为第i个隔震支座承受的长期轴压荷载，单位：kN；L为隔震结构的边长，单位：m；R_x、R_y分别为隔震层x向、y向刚度回转半径，单位：m；K_{T}为隔震层扭转刚度，由隔震支座的水平刚度和支座平面位置计算求解，单位：kN·m；r为隔震结构上部结构的质量回转半径，由隔震支座的竖向轴力和支座平面位置计算求解，单位：m。上述三种偏心率计算方法的核心差异主要体现在分母参数的选取上。表1列出三种计算方法的对比分析结果，图1进一步阐释了各方法分母参数对应的物理意义。

表1　现有规范和论文中三种偏心率计算方法的对比分析

Table 1　Comparative analysis of three eccentricity ratio calculation methods in existing codes and literature

计算方法	计算公式		备注
	x向	y向	
基于结构边长的偏心率计算方法如式	$\rho_{1,x}=e_x/L$	$\rho_{1,y}=e_y/L$	分母为结构边长
基于质量回转半径的偏心率计算方法	$\rho_{2,x}=e_y/r$	$\rho_{2,y}=e_x/r$	分母为上部结构的质量回转半径
基于刚度回转半径的偏心率计算方法	$\rho_{3,x}=e_y/R_x$	$\rho_{3,y}=e_x/R_y$	分母为隔震层刚度回转半径

基于结构边长的偏心率方法在规则矩形结构中，特征长度L通常取结构较长边尺寸，但对于实际平面不规则工程结构，L的取值尚无明确规定，给工程应用带来困难。基于质量回转半径的偏心率方

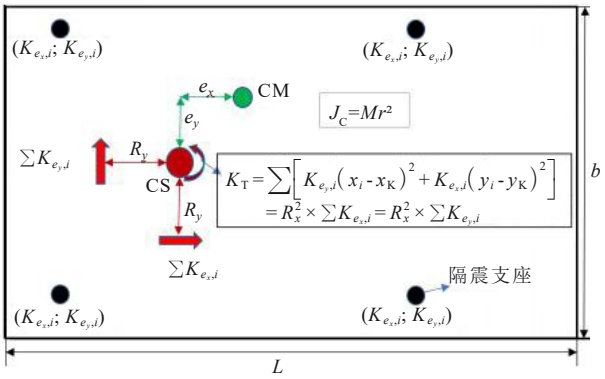


图 1 现有偏心率计算方法的参数物理意义示意图

Fig. 1 Schematic diagram of physical meanings of parameters in existing eccentricity ratio calculation methods

法由结构动力方程的刚度矩阵推导得到，式中 r 为上部结构质量回转半径，该方法用于表征偏心率对结构扭转响应的影响，但引入假设较多，难以实现隔震层偏心率的精确计算。基于刚度回转半径的偏心率方法中，K_T 为隔震层刚心对应的抗扭刚度。刚度回转半径 R_x、R_y 的物理意义为：隔震层整体抗侧刚度产生单位扭矩在 x 向和 y 向所需的等效距离。基于刚度回转半径的偏心率方法，本质为隔震层实际偏心距与隔震层单位扭矩等效距离的比值，公式可同时反映结构偏心距与隔震支座刚度分布的影响。该方法在我国与日本隔震工程设计中应用最为广泛[8,15]，计算公式物理概念清晰、理论基础明确。但该方法在计算过程中对隔震支座有效刚度采取统一取值假定，存在明显不合理性，因此有必要对支座有效刚度进行精细化修正。

2 现有偏心率计算方法物理意义对比

2.1 计算方法的确定

为使隔震层偏心率计算中支座有效刚度取值更贴合实际受力机制、物理意义更为严谨，本文对传统刚度回转半径法中的支座有效刚度取值方式进行修正，提出一种考虑支座有效刚度修正的隔震层偏心率计算方法（下文统称为修正方法）。具体计算过程如式(11)～(21)所列：

$$\rho'_x=e'_y/R'_x \tag{11}$$

$$\rho'_y=e'_x/R'_y \tag{12}$$

$$e'_x=\left|x_m-x'_K\right| \tag{13}$$

$$e'_y=\left|y_m-y'_K\right| \tag{14}$$

$$x_m=\frac{\sum(N_i\times x_i)}{\sum N_i} \tag{15}$$

$$y_m=\frac{\sum(N_i\times y_i)}{\sum N_i} \tag{16}$$

$$x'_K=\frac{\sum\left(K'_{e_y,i}\times x_i\right)}{\sum K'_{e_y,i}} \tag{17}$$

$$y'_K=\frac{\sum\left(K'_{e_x,i}\times y_i\right)}{\sum K'_{e_x,i}} \tag{18}$$

$$R'_x=\left(\frac{K'_T}{\sum K'_{e_x,i}}\right)^{0.5} \tag{19}$$

$$R'_y=\left(\frac{K'_T}{\sum K'_{e_y,i}}\right)^{0.5} \tag{20}$$

$$K'_T=\sum\left[K'_{e_y,i}(x_i-x'_K)^2+K'_{e_x,i}(y_i-y'_K)^2\right] \tag{21}$$

式中：ρ'_x、ρ'_y 分别为 x 向和 y 向的隔震层修正后偏心率（无量纲）；e'_x、e'_y 为分别为 x 向和 y 向修正后偏心距，单位：m；R'_x、R'_y 分别为 x 向和 y 向的修正刚度回转半径，单位：m。x_m、y_m 分别为 x 向和 y 向隔震层的质心坐标，单位：m；x'_K、y'_K 为修正后隔震层 x 向、y 向的刚心坐标，单位：m；K'_T 为隔震层修正的扭转刚度，单位：kN·m；x_i、y_i 分别为第 i 个支座位置坐标，单位：m；$K'_{e_x,i}$、$K'_{e_y,i}$ 分别为第 i 个支座迭代修正后 x 向、y 向的有效刚度，单位：kN/m；N_i 为支座承受的长期轴压荷载，单位：kN。

2.2 有效刚度的确定

隔震支座迭代修正后的各个支座 x、y 向的有效刚度 $K'_{e_x,i}$、$K'_{e_y,i}$ 是影响偏心率计算精度的关键参数。基于此，下文详细阐述支座有效刚度的迭代修正思路与具体计算流程。

迭代整体思路为：基于设防地震反应谱分析，分别对隔震支座 x、y 单向作用工况下的有效刚度开展迭代求解，最终使迭代修正后的支座有效刚度，与支座最大变形对应的割线刚度保持一致。迭代计算过程中，隔震结构的阻尼比依据抗规中的12.2.4条进行取值[17]。

迭代的流程为，第 i 个支座的第 n 次迭代 x、y 方向的位移、出力和有效刚度分别为 $\Delta_{x(n),i}$、$\Delta_{y(n),i}$；$F_{x(n),i}$、$F_{y(n),i}$；$k_{e_x(n),i}$、$k_{e_y(n),i}$，支座的屈服力；屈服后刚度、屈服位移分别为 F_0、k_f、Δ_0。支座有效刚度和结构附加阻尼比迭代的步骤如图 2 所示。迭代收敛判别标准参照文献[21]，迭代相对误差需小于 5%，满足该误差限值即可判定迭代收敛、计算结果有效。其中各个式子如下所列：

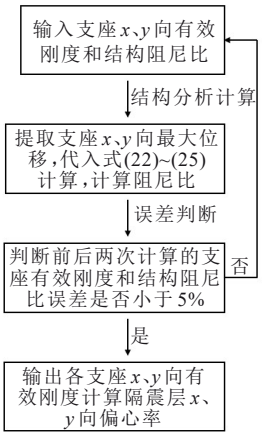


图 2　支座有效刚度修正步骤示意图

Fig. 2　Schematic diagram of correction procedure for effective stiffness of bearings

$$F_{x(n),i}=F_0+\left(\Delta_{x(n),i}-\Delta_0\right)k_{\mathrm{f}} \tag{22}$$

$$F_{y(n),i}=F_0+\left(\Delta_{y(n),i}-\Delta_0\right)k_{\mathrm{f}} \tag{23}$$

$$k_{e_x(n),i}=\frac{F_{x(n),i}}{\Delta_{x(n),i}} \tag{24}$$

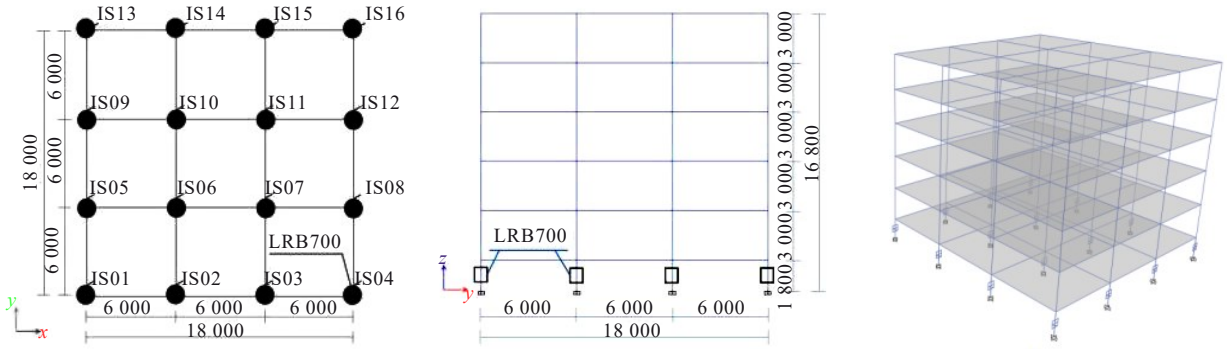
$$k_{e_y(n),i}=\frac{F_{y(n),i}}{\Delta_{y(n),i}} \tag{25}$$

经有效刚度修正后的偏心率计算方法，各项计算参数物理意义清晰合理，能够真实反映扭转作用下隔震支座的刚度差异与变形分布特征，精准实现隔震层扭转效应的控制目的。

3　不同偏心率计算方法的数值对比

3.1　参数分析模型

为开展参数分析，本文选取钢筋混凝土框架隔震结构作为分析模型。结构按照 8 度抗震设防（0.20g）、场地特征周期 0.40 s 进行构件截面与荷载设计，严格依据《抗规》要求建立基础隔震分析模型。首先采用 YJK 软件完成结构建模与配筋设计，确保构件配筋满足规范要求；随后将模型导入 ETABS 软件，并对结构质量、自振周期、反应谱基底剪力等关键指标进行误差校核，各项误差均小于 5%，满足规范精度要求。模型上部 1～5 层结构布置完全一致，隔震支座轴心与上部柱轴心精准对中，结构布置如图 3 所示。隔震层统一采用 LRB700 型隔震支座，支座编号为 IS01～IS16，支座详细参数如图 4 所示。分析过程忽略支座自身质量的影响。迭代计算初始刚度统一取支座剪切变形为 1 倍 T_{r} 对应的割线刚度。



(a) 隔震层平面图　(b) 隔震结构立面图　(c) 隔震结构三维图

图 3　基本隔震模型图（单位：mm）

Fig. 3　Basic isolation model diagram (unit: mm)

隔震结构质量中心、结构形心、隔震层刚度中心分别记为 CM（Center of Mass）、CI（Center of Inertia）、CS（Center of Stiffness）。建模过程中保持上部结构刚度中心与形心重合，同时令隔震层初始有效刚度中心与结构形心位置一致，仅引入上部结构质量偏心作为唯一偏心变量。本文将各楼层构件质量集中至楼板质心位置，通过调整楼层质心坐标实现不同大小的上部质量偏心，并严格保证各楼层总质量与基准隔震模型保持一致。通过对比集中质量模型与原分布质量模型的结构周期、层间位移角、构件内力及隔震支座位移响应，各计算结果吻合良好，验证了该质量集中建模方法的准确性与可靠性。通过沿 x 轴正向偏移各楼层质量中心，设置四级上部结构质量偏心工况，使初始偏心距 e_m 依次取为 5%L、10%L、15%L、20%L，各偏心布置如图 5 所示。

3.2　参数分析结果

提取不同偏心工况下迭代修正后的隔震支座位移与有效刚度计算结果，绘制变化规律如图 6 所示。由图可知，受结构偏心扭转效应影响，各隔震

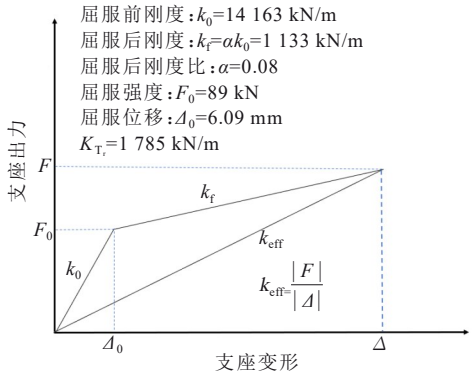


图 4 支座力学本构关系图

Fig. 4 Mechanical constitutive relationship diagram of bearings

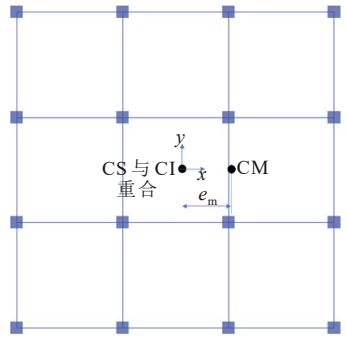


图 5 上部结构质量偏心示意图

Fig. 5 Schematic diagram of mass eccentricity of superstructure

支座迭代后的最大变形存在显著差异，并非统一取值为规范假定的1T_r。以各支座实际最大变形对应的割线刚度作为修正有效刚度后，隔震层刚度中心产生明显偏移（图 6 中 CS 为修正前刚度中心，CS’为修正后刚度中心）。随着上部结构初始偏心距增大，隔震层刚心偏移量逐步增加，相较于未修正模型，本文修正方法的最大刚心偏移量可达 183 mm。现有传统方法与本文修正方法的刚心偏移结果差异显著，最终导致偏心率计算结果存在明显偏差，充分验证了对隔震支座有效刚度进行迭代修正的必要性与合理性。



图 6 不同偏心结构修正后的支座位移和刚心偏移

Fig. 6 Corrected bearing displacements and stiffness center offsets for structures with different eccentricities

表 2 汇总了不同偏心工况下各类偏心率计算方法的关键参数结果。由表可知，不同方法对应的特征参数L、r、R_x(R_y)、R'_x、R'_y数值结果存在较大的差异。

基于结构边长的计算方法所得偏心率整体最小，由于该方法选取结构长边尺寸L参与计算，会显著降低偏心率计算数值，从而低估隔震层实际扭转

表 2　不同偏心率计算方法在不同偏心结构的计算所得参数差异

Table 2　Differences in parameters calculated by different eccentricity ratio calculation methods for structures with different eccentricities

结构体型	现有方法的参数				修正方法的参数		
	偏心距 e_x/m	L/m	r/m	$R_x(R_y)$/m	e'_x/m	R'_x/m	R'_y/m
对称	0.00	18	4.20	9.49	0	9.49	9.49
单向 5% L 偏心	0.90	18	4.10	9.49	0.79	9.59	9.47
单向 10% L 偏心	1.80	18	3.79	9.49	1.64	9.71	9.40
单向 15% L 偏心	2.70	18	3.22	9.49	2.52	9.80	9.34
单向 20% L 偏心	3.60	18	3.40	9.49	2.42	9.85	9.30

效应。基于质量回转半径的方法在 5%～20% 各级单向偏心工况下，质量回转半径始终为 9.49 m，参数数值不随隔震层刚度分布与支座变形状态变化，无法反映偏心扭转引起的支座刚度差异。相比之下，修正的刚度回转半径 R'_x、R'_y 能够充分体现不同偏心工况下隔震支座位移差异带来的刚度变化，计算结果更贴合实际受力状态，物理意义清晰合理。

表 3 对比了不同偏心工况下各偏心率计算方法的数值结果。由表可知，三种传统偏心率计算方法的计算结果差异显著。传统方法均采用支座 $1T_r$ 变形对应的割线刚度作为统一有效刚度，无法反映偏心扭转作用引发的各支座刚度差异化特征，致使偏心率计算结果存在明显偏差。本文提出的考虑有效刚度修正的偏心率计算方法，可综合考虑支座布置形式与偏心变形引起的刚度变化规律。结合数值结果对比可知，该修正方法更贴合隔震层扭转效应的控制原则，计算精度更高，更适用于实际隔震结构工程设计。

表 3　不同偏心率计算方法在不同偏心结构的计算所得偏心率结果差异

Table 3　Differences in eccentricity ratio results calculated by different eccentricity ratio calculation methods for structures with different eccentricities

结构体型	基于结构边长的偏心率方法		基于质量回转半径的偏心率方法		基于刚度回转半径的偏心率方法		修正有效刚度的偏心率计算方法	
	$\rho_{1,x}$/%	$\rho_{1,y}$/%	$\rho_{2,x}$/%	$\rho_{2,y}$/%	$\rho_{2,x}$/%	$\rho_{2,y}$/%	ρ'_x/%	ρ'_y/%
对称	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
单向 5% L 偏心	5.00	0.00	0.00	21.94	0.00	9.49	0.00	8.31
单向 10% L 偏心	10.00	0.00	0.00	47.43	0.00	18.97	0.00	17.46
单向 15% L 偏心	15.00	0.00	0.00	83.92	0.00	28.46	0.01	27.03
单向 20% L 偏心	20.00	0.00	0.00	105.73	0.00	37.95	0.01	36.75

4　实际结构算例的偏心率计算

本文选取一栋 6 层钢筋混凝土框架实际工程作为验证算例。结构总高度 21 m，平面宽度 18.95 m，整体计算模型如图 7 所示。该结构抗震设防烈度为 8 度（0.20g），场地特征周期 0.40 s；隔震层共设置 22 个 LRB700 铅芯隔震支座及 6 个 LNR700 普通隔震支座，结构各项设计均严格符合《抗规》的相关规定。计算初始阶段，隔震支座有效刚度统一取 $1T_r$ 变形对应的割线刚度进行赋值。

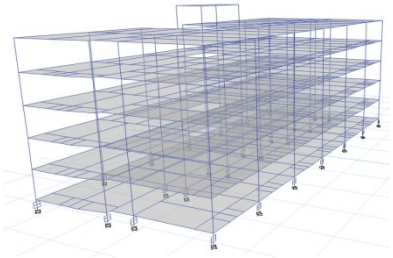


图 7　工程结构模型示意图

Fig. 7　Schematic diagram of engineering structure model

基于设防地震反应谱开展迭代计算，对支座有效刚度进行修正，并分别求解修正前后的结构自振周期与隔震层偏心率。由表 4 可知，传统方法的周期由全部支座采用 $1T_r$ 对应的有效刚度计算得到，修正方法的周期采用本文方法迭代修正后的支座刚度求解。结果表明：经刚度修正后，结构自振周期整体减小约 5%。究其原因，本算例下多数支座实际变形小于 $1T_r$，迭代修正后支座有效刚度有所

提升，致使结构整体刚度增大、隔震周期缩短，本算例条件下上部结构地震作用相应提高。若采用传统固定刚度取值方法，会过度放大隔震结构的周期延长效应，高估隔震体系的减震效果。本文修正方法所得周期结果，可充分体现隔震层各支座的刚度差异化特征，能够真实反映结构实际振动变形特性。

表 4 支座有效刚度修正前后周期对比

Table 4 Comparison of periods before and after correction of bearing effective stiffness

结构周期阶数	现有方法周期/s	修正方法周期/s	周期偏差率（现有-修正）/现有
第一阶（x向平动）	2.52	2.39	5.16%
第二阶（y向平动）	2.47	2.35	4.86%
第三阶（z向扭转）	2.18	2.06	5.50%

表5给出了基于刚度回转半径法及修正方法计算得到的隔震层偏心率。采用修正方法计算得到的x向、y向偏心率分别增大0.26、0.03个百分点，计算结果偏于保守。该方法引入有效刚度修正，可考虑隔震层各支座变形差异引起的有效刚度差异，物理概念清晰。因此在实际隔震工程设计中，建议采用考虑有效刚度修正的偏心率计算方法，避免偏心率计算值偏小，造成真实隔震层偏心率超出规范3%限值。

表 5 不同偏心率计算方法计算所得数值结果差异

Table 5 Differences in numerical results calculated by different eccentricity ratio calculation methods

所用方法	x向/%	y向/%
基于刚度回转半径的偏心率方法	1.79	0.10
考虑有效刚度修正偏心率计算方法	2.05	0.13

5 结论

通过将本文提出的基于反应谱、考虑有效刚度修正的隔震结构偏心率计算方法与现有三种方法，在多参数分析模型及实际工程算例下开展对比分析，得到研究结论如下：

（1）隔震支座有效刚度迭代修正可体现各支座由扭转效应引起的最大变形差异；该偏心率计算方法物理概念清晰，解决了支座有效刚度取值不准的问题，其迭代修正流程对隔震结构的反应谱设计分析具有一定借鉴意义。

（2）对不同偏心结构采用多种偏心率计算方法对比分析表明，修正前后刚心位置最大偏移量可达183 mm。本文所提方法计算结果数值精度更高。

（3）实际算例结果表明，支座有效刚度修正后结构自振周期约减小5%；若不进行有效刚度修正，将会高估隔震体系减震效果，修正后的周期更接近结构实际变形特性；同时该方法得到的偏心率可反映各支座变形差异带来的有效刚度差别。

参考文献（References）

[1] 余文正，陶忠，潘文，等. 隔震结构等效线性化计算方法对比研究[J]. 建筑结构学报，2018，39(1)：78-87.
Yu Wenzheng，Tao Zhong，Pan Wen，et al. Comparative study on equivalent linearization calculation method in design of seismic isolated structure[J]. Journal of Building Structures，2018，39(1)：78-87.

[2] 石诚，张同亿，冉田苒，等. 隔震结构等效线性模型的反应谱法研究[J]. 建筑结构，2018，48(17)：84-88.
Shi Cheng，Zhang Tongyi，Ran Tianran，et al. Study on response spectrum method based on equivalent linear model of isolated structures[J]. Building Structure，2018，48(17)：84-88.

[3] 滕晓飞，谭平，周林丽，等. 基于性能的隔震结构直接设计方法研究[J]. 建筑结构，2019，49(9)：71-76.
Teng Xiaofei，Tan Ping，Zhou Linli，et al. Study on performance-based direct design method for seismic isolation structure[J]. Building Structure，2019，49(9)：71-76.

[4] Liu T，Zordan T，Briseghella B，et al. Evaluation of equivalent linearization analysis methods for seismically isolated buildings characterized by SDOF systems[J]. Engineering Structures，2014，59：619-634.

[5] 梁秋河. 隔震结构隔震层考虑有效刚度修正的偏心率计算方法研究[D]. 广州：广州大学，2020：1-31..
Liang Qiuhe. Research on calculation method of eccentricity of seismic isolation layer of isolation structure considering effective stiffness correction[D]. Guangzhou：Guangzhou University，2020：1-31.

[6] 葛益成. 隔震层偏心率对结构扭转效应的影响研究[D]. 昆明：昆明理工大学，2024：1-45..
Ge Yicheng. Eccentricity of seismic isolation on structural torsional effects on the torsional effect of the structure[D]. Kunming：Kunming University of Science and Technology，2024：1-45.

[7] 潘钦锋，林环周，许立英，等. 平面不规则多层框架基础隔震结构扭转效应及其控制[J]. 振动工程学报，2024，37(12)：2021-2033.
Pan Qinfeng，Lin Huanzhou，Xu Liying，et al. Torsion effect and control of foundation seismic isolation structure of plane irregular multi-layer frame structure[J]. Journal of Vibration Engineering，2024，37(12)：2021-2033.

[8] Kilar V，Koren D. Seismic behaviour of asymmetric base iso-

lated structures with various distributions of isolators[J]. Engineering Structures, 2009, 31(4): 910-921.

[9] Pan T C, Kelly J M. Seismic response of torsionally coupled base isolated structures[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1983, 11(6): 749-770.

[10] 赵建东，王曙光，刘伟庆. L形高层隔震结构扭转影响参数分析[J]. 世界地震工程，2010，26(3)：74-79.
Zhao Jiandong, Wang Shuguang, Liu Weiqing. Analysis on the torsion parameters of L-shaped high-rise isolation buildings [J]. World Earthquake Engineering, 2010, 26(3): 74-79.

[11] Tena-Colunga A. Seismic design of base-isolated buildings in Mexico. part 1: guidelines of a model code[J]. The Open Civil Engineering Journal, 2013, 7(1): 17-31.

[12] ASCE/SEI 7-10 Minimum design loads for buildings and other structures [S].

[13] International Conference of Building Officials. Uniform building code[M]. 19th ed. Whittier, CA: International Conference of Building Officials, 1997.

[14] 台内营字第0940087319号 建筑物耐震设计规范及解说[S].
Document No. Tainei-Ying 0940087319 Seismic design code and commentary for buildings[S].

[15] Eurocode 8 Design of structures for earthquake resistance: part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings [S].

[16] 日本建築学会. 免震構造設計指針[M]. 4th ed. 東京：日本建築学会，2013.

[17] Midorikawa M, Okawa I, Iiba M, et al. Performance-based seismic design provisions newly introduced to the Building Standard Law of Japan[J]. Journal of Japan Association for Earthquake Engineering, 2004, 4(3): 162-173.

[18] CECS 126: 2001 叠层橡胶支座隔震技术规程[S].
CECS 126: 2001 Technical specification for seismic-isolation with laminated rubber bearing isolators[S].

[19] GB/T 51408—2021 建筑隔震设计标准[S].
GB/T 51408—2021 Standard for seismic isolation design of building[S].

[20] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S].
GB 50011—2010 Code for seismic design of buildings[S].

[21] DBJ/T 15-92—2021 高层建筑混凝土结构技术规程[S].
DBJ/T 15-92—2021 Technical specification for concrete structures of tall building [S].

（本文编辑：任　栋）

（上接第 102 页）

Ma Huanhuan, Chang Lijun. Effects of moisture and salt content on strength and permeability characteristics of loess saline soil in cold and arid regions[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(28): 12193-12203.

[31] 牛丽思，张爱军，赵佳敏，等. 易溶盐含量对伊犁原状黄土力学特性的影响规律[J]. 岩土工程学报，2020，42(9)：1705-1714.
Niu Lisi, Zhang Aijun, Zhao Jiamin, et al. Influences of soluble salt content on mechanical properties of Ili undisturbed loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(9): 1705-1714.

[32] 吕擎峰，谷留杨，郭连星，等. 硫酸盐含量对黄土黏粒特性的影响研究[J]. 工程地质学报，2023，31(1)：12-20.
Lü Qingfeng, Gu Liuyang, Guo Lianxing, et al. Effect of sulfate content on clay characteristics of loess[J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(1): 12-20.

[33] 万旭升，赖远明. 硫酸钠溶液和硫酸钠盐渍土的冻结温度及盐晶析出试验研究[J]. 岩土工程学报，2013，35(11)：2090-2096.
Wan Xusheng, Lai Yuanming. Experimental study on freezing temperature and salt crystal precipitation of sodium sulphate soulotion and sodium sulphate saline soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(11): 2090-2096.

（本文编辑：任　栋）