

黄小宁,王威,王宁,等.平面不规则基础隔震结构抗扭设计研究[J].地震工程学报,2020,42(5):1283-1288.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.05.1283

HUANG Xiaoning, WANG Wei, WANG Ning, et al. Torsional Resistant Design of Plane Irregular Base-isolated Structures[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(5): 1283-1288. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.05.1283

平面不规则基础隔震结构抗扭设计研究

黄小宁^{1,2}, 王 威¹, 王 宁^{1,2}, 杜永峰³

(1. 青海大学 土木工程学院, 青海 西宁 810016;

2. 青海省建筑节能材料与工程安全重点实验室, 青海 西宁 810016;

3. 兰州理工大学防震减灾研究所, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 针对平面不规则结构在水平地震作用下的振动特性,通过调整隔震层隔震支座的布置,得到 3 种不同工况的隔震层刚心与上部结构质心、刚心相对位置关系,分别以楼层位移和层间位移为指标的扭转位移比,作为平面不规则基础隔震结构扭转响应指标,利用弹塑性时程分析方法,通过对 3 种不同工况的扭转指标对比分析研究,提出适用于平面不规则基础隔震结构的抗扭设计方法。结果表明:对于平面不规则结构,应在保证隔震层扭转位移比小于 1.2 的基础上,使隔震层的刚心和上部结构的刚心分别位于上部结构质心的两侧,可有效控制上部结构的扭转。

关键词: 不规则基础隔震结构; 扭转位移比; 偏心距; 抗扭设计

中图分类号: TU352.12

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2020)05-1283-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.05.1283

Torsional Resistant Design of Plane Irregular Base-isolated Structures

HUANG Xiaoning^{1,2}, WANG Wei¹, WANG Ning^{1,2}, DU Yongfeng³

(1. Department of Civil Engineering, Qinghai University, Xining 810016, Qinghai, China;

2. Qinghai Provincial Key Laboratory of Energy-saving Building Materials and Engineering Safety, Xining 810016, Qinghai, China;

3. Institute of Earthquake Protection and Disaster Mitigation, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China)

Abstract: Considering the vibration characteristics of plane irregular structures under horizontal earthquakes, the relative position between the isolation layer stiffness center and the upper structure mass center and stiffness center is obtained by adjusting the isolation bearing position. Three different working conditions are considered. The torsional displacement ratio is used as the torsional response index of the plane irregular base-isolated structures; then the elastoplastic time-history analysis method is used to compare and analyze the torsional response index under the three considered working conditions. A torsional resistant design method is proposed for plane irregular base-isolated structures. The results show that for plane irregular structures, the torsional displacement ratio of the isolated layer should be less than 1.2; at this ratio, the stiffness center of the isolation layer and the stiffness center of the upper structure will be positioned on both sides of the mass center of the upper structure; consequently, the

收稿日期: 2020-01-13

基金项目: 青海省自然科学基金-青年项目(2018-ZJ-953Q); 创新平台: 青海省创新平台建设专项项目(2018-ZJ-T01)

第一作者简介: 黄小宁(1988-), 女, 陕西宝鸡人, 讲师, 博士, 从事结构减震与抗震性能评估研究。E-mail: hxiaoning7191@163.com。

通信作者: 王 威(1992-), 男, 河南平舆人, 硕士研究生。E-mail: ww1992hn@163.com。

torsion of the upper structure can be controlled.

Keywords: irregular base-isolated structure; torsional displacement ratio; eccentricity; anti-torsional design

0 引言

平面不规则结构在地震时发生破坏的可能性远远超过平面规则结构,对于平面不规则结构来说,在强震作用下,即使结构设计能够满足规范要求,也有可能发生严重破坏。平面不规则结构由于质心与刚心不重合,在水平地震作用下产生较大的扭转变形,基础隔震技术虽然可以明显减小上部结构的平动响应,有效控制结构的扭转。但就现阶段的研究而言,对平面不规则基础隔震结构抗扭研究大多集中在对比原抗震结构和隔震结构的扭转响应分析,并没有明确给出针对平面不规则基础隔震结构控制扭转响应的抗扭设计方法。

国内外对平面不规则基础隔震结构的扭转控制进行了很多研究,也取得了许多研究成果。美国学者 Lee^[1] 和 Pan 等^[2] 研究表明只要隔震装置偏心程度很小,即使上部结构有较大偏心,上部结构的扭转并不明显,扭转效应可以忽略; Arturo^[3] 等人认为上部结构的质量偏心和隔震前后周期比等因素,能直接影响隔震结构扭转效应,即当上部结构的质量偏心程度越大、隔震前后的周期比越大,结构的扭转反应也就越大; Nagarajaiah S 等^[4] 指出上部结构的偏心、隔震层的偏心以及隔震层的刚度变化均可能使上部结构产生扭转; 李宏男等^[5] 推导了偏心隔震结构扭转效应的简便计算公式,计算隔震结构的扭转响应更为简便、有效; 王琛等^[6] 研究表明: 连体结构一阶振型呈现出与单体结构明显不同的扭转效应研究,导致部分无楼板约束构件承受较大扭矩; 连接桁架应尽量靠近位移差控制楼层且布置高度均匀,从而减小扭转引起的连接桁架端部杆件受力集中。党育等^[7] 讨论了上部结构的质量偏心、偏心率以及隔震层的偏心率、水平刚度对结构扭转响应的影响; 袁增嵘等^[8] 以地震烈度和水平地震主方向输入角度作为分析参数,得到了二参数与抗倾覆系数之间的变化规律,以及与抗倾覆安全系数相对应的地震烈度值,研究表明: 地震作用下结果扭转引起的扭转效应对抗倾覆系数影响明显; 赵建东等^[9] 分析了不同地震动输入角度对隔震结构的影响,以隔震层的偏心率为控制变量研究了楼层最不利位移的变化规律; 祁皓等^[10] 对比抗震结构和隔震结构地震响应,结果表明: 与抗震结构相比,隔震结

构的扭转效应会明显的减小,在隔震层外围布置铅芯橡胶支座时,结构的抗扭转效果明显; 刘鑫刚等^[11] 以成都博物馆为例,对结构的扭转位移、扭转剪力及扭转加速度进行分析,研究表明: 对结构进行隔震设计,可以减小结构的扭转效应; 但当上部结构为平面不规则结构时,隔震结构的扭转响应不可忽略; 申波等^[12] 主要针对弹性、弹塑性本构模型进行阐述,对比各本构模型的不同点和优劣关系,为混凝土本构关系研究提供思路; 李向真^[13] 等人通过振动台试验证明,对 3 层两跨的钢框架调整隔震层刚心与上部结构质心接近时,可降低偏心隔震结构扭转反应。

综上所述,隔震技术不仅能减小上部结构的水平地震作用,还能有效控制上部结构的扭转,对于平面不规则基础隔震结构并没有给出抗扭设计方法。在以上研究基础上,本文以某一平面不规则结构工程案例,通过调整隔震支座,得到不同工况下隔震层的刚心位置,提出一种适用于平面不规则结构抗扭设计方法,提高平面不规则结构在水平地震作用下的抗震性能,为结构设计提供了可靠依据,对隔震技术的研究、发展具有重要的意义。

1 平面不规则结构时程分析法计算原理

利用弹塑性时程分析方法计算平面不规则结构地震响应,时程分析法的计算原理是将地震动按很小的时间段数值化后,采用逐步积分法,对结构进行动力弹塑性分析,因此,结构的动力方程可以用增量的形式表达为:

$$[M]\{\Delta\ddot{u}\} + [C]\{\Delta\dot{u}\} + [K]\{\Delta u\} = -[M]\{\Delta\ddot{u}_g\} \quad (1)$$

式中: $\{\Delta\ddot{u}\}$ 、 $\{\Delta\dot{u}\}$ 、 $\{\Delta u\}$ 为从 t_i 到 t_{i+1} 时刻质点的相对加速度、相对速度、相对位移的增量所组成的列向量; $[C]$ 、 $[K]$ 为 t_i 时刻结构阻尼矩阵和结构刚度矩阵; $\{\Delta\ddot{u}_g\}$ 为地面运动加速度增量的列向量。

对于考虑扭转的平面模型,在单向地震作用下的运动微分方程如式(2)所示:

$$\begin{bmatrix} [m_x] & [0] & [0] \\ [0] & [m_y] & [0] \\ [0] & [0] & [I_m] \end{bmatrix} \{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = - \begin{bmatrix} [m_x] & [0] & [0] \\ [0] & [m_y] & [0] \\ [0] & [0] & [I_m] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \{0\} \\ \{1\} \\ \{0\} \end{bmatrix} \{\ddot{u}_g\} \quad (2)$$

式中: $u = [\{u_x\} \quad \{u_y\} \quad \{\theta\}]^T$; u_x 是沿 x 向水平位移; u_y 是沿 y 向水平位移; θ 为结构的水平扭转位移。

本文计算扭转位移比时,将分别考虑多维地震作用下 x 、 y 向各自的扭转响应。因此,计算得到结构的响应,应按式(3)计算:

$$u = \begin{Bmatrix} u_{xx} + u_{yy} \\ u_{yx} + u_{xy} \\ \theta_x + \theta_y \end{Bmatrix} \quad (3)$$

式中: u_{xx} 为 x 向地震动引起的 x 向位移; u_{xy} 为 y 向地震动引起的 x 向位移; u_{yx} 为 x 向地震动引起的 y 向位移; u_{yy} 为 y 向地震动引起的 y 向位移; θ_x 为 x 向地震动引起结构的水平扭转位移; θ_y 为 y 向地震动引起结构的水平扭转位移。

2 计算扭转位移比

2.1 偏心距的定义

在分层确定刚心的前提下,结构第 i 层刚心可定义为:假定刚性楼板,当结构第 i 层受到水平力时,第 i 层只发生平动而不发生转动的点。当上部结构的刚心与质心存在偏心距时,上部结构的偏心距为刚心与质心之间的坐标距离。 x 、 y 向偏心距计算公式为:

$$R_x = x_c - x_m, \quad R_y = y_c - y_m \quad (4)$$

式中: x_c 、 y_c 为上部结构刚心坐标; x_m 、 y_m 为上部结构质心坐标; R_x 、 R_y 分别为上部构刚心与质心的 x 、 y 向偏心距。同理,隔震层偏心距即为隔震层刚心与上部结构质心 x 、 y 向的距离。

2.2 计算扭转位移比

基本假定:按刚性楼板假定,楼板在平面内无变形只作刚体运动;楼板在刚心处只发生平动而不发生转动,刚心和结构的刚度中心及扭转中心重合。即楼层最大弹性层间位移可用式(5)表示:

$$\Delta u_m = \Delta u_a + \theta R \quad (5)$$

式中: Δu_m 为楼层最大弹性层间位移; Δu_a 为楼层两端弹性层间位移的平均值; θ 为结构的层间扭转角; R 为抗侧力构件到转动中心的距离。

根据《抗规》^[1] 中的相关规定,平面不规则结构扭转位移比可表示为:

$$\mu = \frac{\Delta u_m}{\Delta u_a} \quad (6)$$

3 抗扭设计方法

本文定义当扭转位移比大于 1.2 时为严重偏

心,当扭转位移比小于 1.2 时为轻微偏心,在满足隔震设计要求的基础上,通过调整隔震层的不同刚心位置,得到不同工况时上部结构的扭转位移比。图 1 为上部结构质心、刚心和隔震层刚心的相对位置示意图

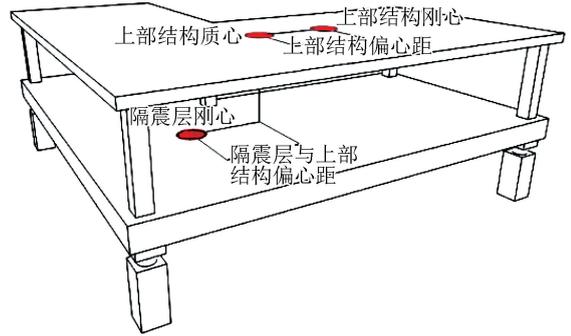


图 1 上部结构质心、刚心和隔震层刚心的相对位置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the relative position between the isolation layer stiffness center and the upper structure mass center and stiffness center

3.1 工程概况

本文以一工程实例为研究背景,为平面不规则钢筋混凝土框-剪结构。抗震设防类别为乙类,抗震设防烈度Ⅷ度(0.2g),设计地震分组第三组,场地类别Ⅱ类,该结构为生产调度楼,由于使用功能的要求层高较大,第 1、2 和 8 层的层高为 5.4 m,其余层高为 4.8 m。为了满足使用功能要求在第 8 层中抽掉平面图中用红框标出的 6 根柱子,结构平面图如图 2 所示。除构造钢筋外,梁、板、柱、剪力墙等构件主要受力钢筋均采用 HRB400 级。A-B 轴处剪力墙厚为 400 mm,其余剪力墙厚均为 300 mm,梁采用 300 mm × 700 mm,楼板厚 100 mm,结构其余参数列于表 1。

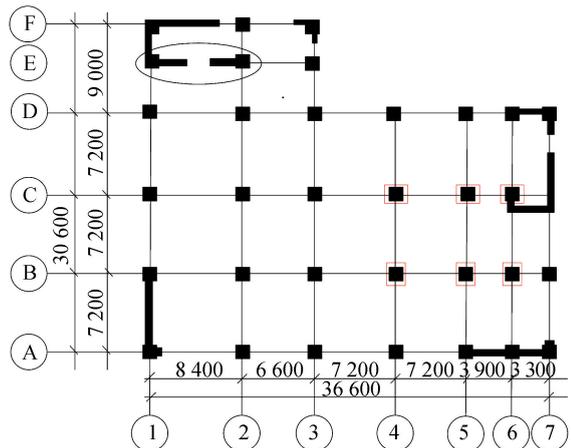


图 2 结构平面图

Fig.2 Structure plan

表 1 结构基本参数

Table 1 Basic parameters of structure

楼层	柱截面尺寸/mm	柱混凝土强度等级	墙混凝土强度等级	梁混凝土强度等级
1~5	800×800	C40	C40	C30
	700×700	C40		
6~8	800×800	C30	C40	C30
	600×600	C30		

3.2 抗扭设计分析

表 2 为原抗震结构的刚心、质心的位置坐标以及以层间位移和楼层位移为指标的扭转位移比。

表 2 抗震结构基本信息

Table 2 Basic information of the seismic structure

刚心/m		质心/m		抗震结构的扭转位移比				楼层
x	y	x	y	层间位移		楼层位移		
				x	y	x	y	
22.855	11.504	17.612	13.107	1.032	1.392	1.051	1.375	8
22.721	11.535	17.928	13.148	1.054	1.393	1.054	1.372	7
22.601	11.564	17.839	13.176	1.054	1.382	1.054	1.368	6
22.436	11.606	17.903	13.175	1.056	1.370	1.054	1.365	5
22.109	11.699	17.963	13.174	1.054	1.368	1.054	1.362	4
22.661	12.169	17.963	13.174	1.050	1.363	1.054	1.360	3
21.562	11.869	17.963	13.174	1.058	1.356	1.056	1.357	2
19.314	12.637	18.109	13.220	1.040	1.368	1.054	1.359	1

图 3、图 4 为 x 、 y 向 3 种不同偏心距, 分别以层间位移和楼层位移为指标的扭转位移比。从图 3、图 4 中上部结构的最大扭转位移比可以看出, 对于轻微偏心向 (x 向), 以层间位移为指标的最大扭转位移比为 1.095、1.128、1.107, 原抗震结构以层间位移为指标的最大扭转位移比为 1.058; 以楼层位移为指标的扭转位移比为 1.017、1.053、1.095, 原抗震结构以楼层位移为指标的最大扭转位移比为

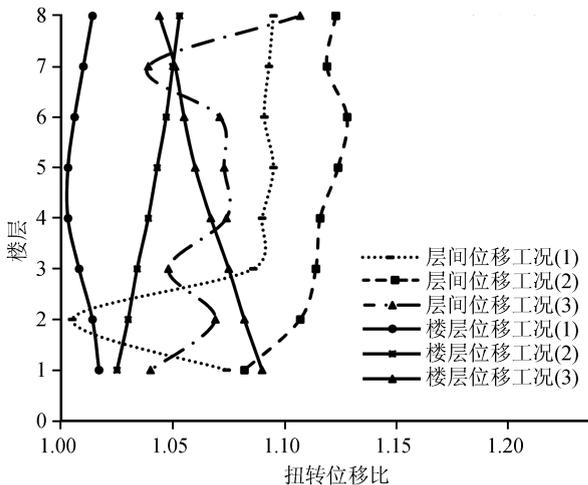


图 3 x 向扭转位移比对比

Fig.3 Comparison of torsional displacement ratio in x direction

从表 2 中可以看出, 原抗震结构以层间位移为指标, y 向的最大扭转位移为 1.058、1.393, 以楼层位移为指标, x 、 y 向的最大扭转位移为 1.054、1.375, 它们之间的误差较大分别为 0.378%、1.292%, 且以层间位移为指标得到的扭转位移比大于以楼层位移为指标得到的扭转位移比。从 x 、 y 向的最大扭转位移比可以看出, 此时上部结构为单向严重偏心结构。

通过调整隔震层的刚心位置, 得到 3 种不同偏心距的隔震结构工况。

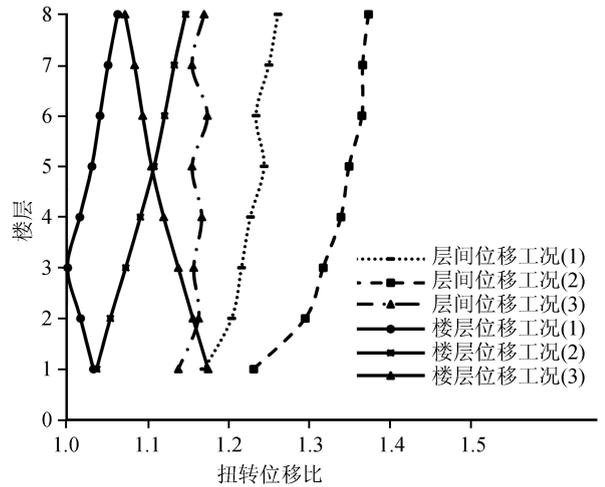


图 4 y 向扭转位移比对比

Fig.4 Comparison of torsional displacement ratio in y direction

1.056, 从以上数据可以看出, 对单向严重偏心结构进行隔震设计后, 由于严重偏心向的影响, 轻微偏心向的扭转效应可能会被放大, 尤其是以层间位移为指标计算得到隔震结构的最大扭转位移比大于原结构的最大扭转位移。对于严重偏心向 (y 向), 以层间位移为指标的最大扭转位移比为 1.261、1.373、1.170, 原抗震结构以层间位移为指标的最大扭转位

移比为 1.393;以楼层位移为指标的扭转位移比为 1.013、1.147、1.175,原抗震结构以楼层位移为指标的扭转位移比为 1.359,从以上数据可以看出,隔震结构以楼层位移为指标的扭转位移比均小于 1.2;而以层间位移为指标的扭转位移比,当隔震支座的刚心位置设计不合理时,结构的扭转响应没有明显的减小。总而言之,以层间位移为指标的扭转位移比,随楼层的增高并没有明显的规律;而以楼层位移为指标的扭转位移比,随着楼层的增高扭转位移比减小(增大)或先减小后增大,具有较为明显的规律,且无论是 x 向还是 y 向,以层间位移为指标的扭转位移比最大值大于以楼层位移为指标的扭转位移比。对于该隔震结构应取以层间位移为指标计算的扭转位移比,作为上部结构的扭转位移比。

图 5~图 8 为不同偏心距与最大扭转位移比的关系。可以看出, x 向上部结构质心和隔震层刚心最大距离为 0.328、1.163、-0.618, x 向隔震层的最大扭转位移比为 1.095、1.131、1.129, x 向上部结构的扭转位移比为 1.095、1.128、1.107。说明,随着上部结构和隔震层偏心距的减小,隔震层和上部结构的扭转位移比均减小。因此,对于单向严重偏心结构,尽量使轻微偏心向上部结构的质心和隔震层的刚心重合,与双向轻微偏心的布置方法类似。 y 向上部结构和隔震层的最大偏心距为 -0.168、0.336、-0.923, y 向隔震层的扭转位移比为 1.030、1.051、1.192, y 向上部结构的最大扭转位移比为 1.261、1.373、1.170,从以上数据可以看出,对于严重偏心向,当上部结构的质心几乎与隔震层的刚心重合时,对上部结构扭转效应的减小不明显。当隔震层的刚心与上部结构的刚心居于上部结构质心的同侧时,上部结构的扭转效应会被放大,当隔震层的刚心与上部结构的刚心分居于上部结构质

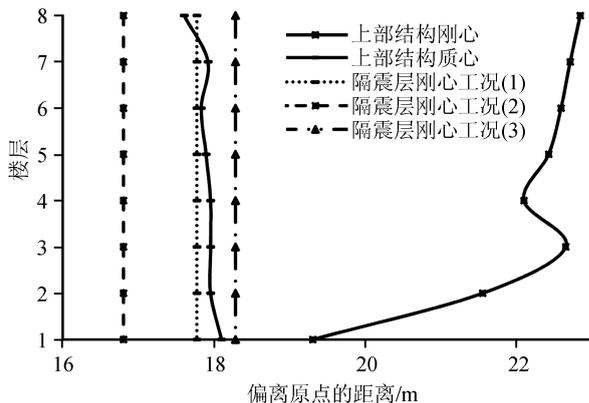


图 5 x 向质心和刚心的位置

Fig.5 Position of the mass center and stiffness center in x direction

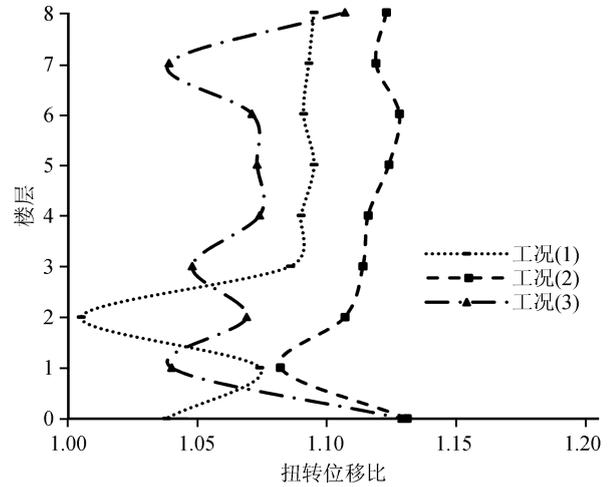


图 6 x 向扭转位移比

Fig.6 Torsional displacement ratio in x direction

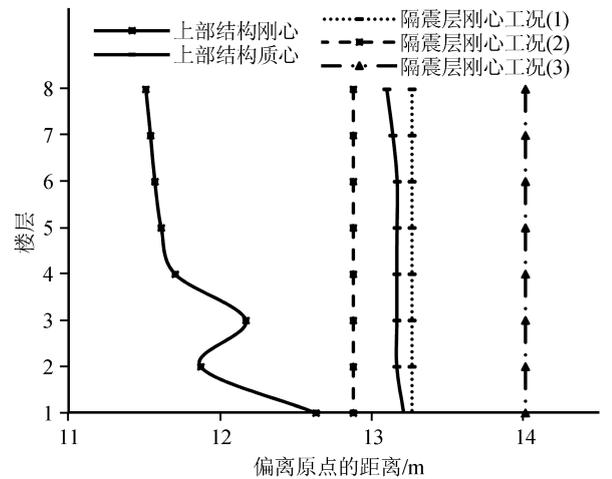


图 7 y 向质心和刚心的位置

Fig.7 Position of the mass center and stiffness center in y direction

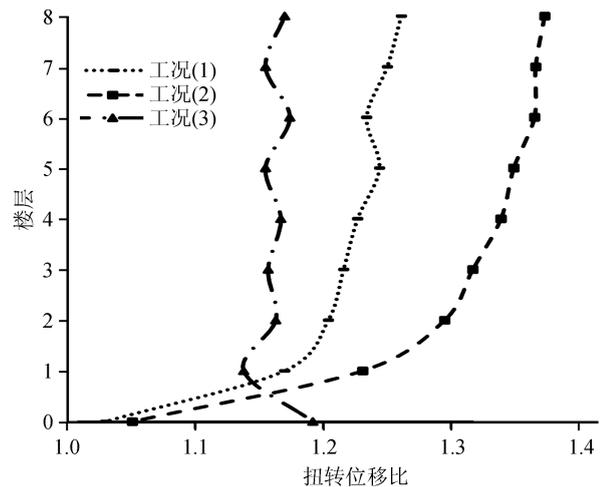


图 8 y 向扭转位移比

Fig.8 Torsional displacement ratio in y direction

心的两侧时,随着偏心距的增大,隔震层的扭转效应增大,上部结构的扭转效应减小。

4 结论

以扭转位移比为结构扭转控制指标,给出了平面不规则基础隔震结构抗扭设计方法,主要得到以下结论:

(1) 对于隔震结构,当上部结构为平面不规则结构,在计算扭转位移比时,应同时考虑以楼层位移和层间位移为指标计算结构的扭转位移比,将其中的较大值作为该层的扭转位移比。仅以单指标计算的扭转位移比可能会低估平面不规则结构的扭转效应。

(2) 当原抗震结构为偏心结构时,可通过调整隔震层的刚心,使轻微偏心向隔震层的刚心和上部结构的质心重合,可以明显减小隔震层的扭转响应。

(3) 在控制隔震层扭转位移比的基础上(隔震层的扭转位移比小于 1.2),使严重偏心向隔震层的刚心与上部结构的刚心分居于上部结构质心的两侧,可减小上部结构的扭转位移比,控制上部结构的扭转响应。

参考文献(References)

[1] LEE D M. Base Isolation for Torsion Reduction in Asymmetric Structures under Earthquake Loading[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1980, 8(4): 349-359.

[2] PAN T C, KELLY J M. Seismic Response of Torsionally Coupled Base Isolated Structures[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1983, 11(6): 749-770.

[3] TENA COLUNGA A, ESCAMILLA CRUZ J L. Torsional Amplifications in Asymmetric Base-isolated Structures[J]. *Engineering Structures*, 2007, 29(2): 237-247.

[4] NAGARAJAIAH S, REINHORN A M, CONSTANTINOU M C. Torsional Coupling in Sliding Base-Isolated Structures[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1993, 119(1): 130-149.

[5] 李宏男, 吴香香. 偏心隔震结构扭转地震作用的简化计算公式[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2004, 36(1): 52-54.
LI Hongnan, WU Xiangxiang. Simplified Formulae of Torsional Seismic Actions for Base-isolated Eccentric Structures[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2004, 36(1): 52-54.

[6] 王琛, 陶慕轩, 崔明哲, 等. 非对称复杂连体结构抗震性能与变形差控制实例研究[J]. *建筑结构学报*, 2020, 41(4): 59-70.
WANG Cheng, TAO Muxue, CUO Mingzhe, et al. Case Study on Seismic Behavior and Displacement Difference Control of Complicated Asymmetric Connected Structures[J]. *Journal of Building Structures*, 2020, 41(4): 59-70.

[7] 党育, 霍凯成. 偏心隔震结构扭转效应的影响因素分析[J]. *武汉理工大学学报*, 2010, 32(14): 137-141.
DANG Yu, HUO Kaicheng. Research on the Effect of Torsional Response of Base-isolated Buildings[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2010, 32(14): 137-141.

[8] 袁增嵘, 肖建春, 廖德, 等. 地震作用下超高悬挑雕塑的抗倾覆分析[J]. *贵州大学学报(自然科学版)*, 2019, 36(1): 94-100.
YUAN Zengrong, XIAO Jianchun, LIAO De, et al. Anti-overturning Analysis of Super Tall Cantilevered Sculpture under Earthquake Action[J]. *Journal of Guizhou University (Natural Science)*, 2019, 36(1): 94-100.

[9] 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 Information on Earthquake Engineering*, 2010, 26(3): 74-79.

[10] 祁彪, 商吴江, 范宏伟. 高层隔震结构扭转分析[J]. *世界地震工程*, 2011, 27(1): 121-130.
QI Ai, SHANG Haojiang, FAN Hongwei. Study on Torsion of High-rise Isolation Structures [J]. *World Information on Earthquake Engineering*, 2011, 27(1): 121-130.

[11] 刘鑫刚, 张玲, 马伯涛, 等. 成都博物馆基础隔震不规则结构扭转效应控制研究[J]. *建筑结构学报*, 2016, 37(11): 24-29.
LIU Xingang, ZHANG Ling, MA Botao, et al. Torsional Effect Control of Irregular Base Isolation Structure of the Chengdu Museum[J]. *Journal of Building Structures*, 2016, 37(11): 24-29.

[12] 申波, 刘盼盼, 马克俭, 等. 混凝土宏观损伤本构研究进展[J]. *贵州大学学报(自然科学版)*, 2019, 36(2): 7-12.
SHEN Bo, LIU Panpan, MA Kejian, et al. Progress in Constitutive Study of Concrete Macroscopic Damage[J]. *Journal of Guizhou University (Natural Science)*, 2019, 36(2): 7-12.

[13] 李向真, 向伟明, 全明, 等. 平扭耦联隔震体系振动台试验研究[J]. *工程抗震与加固改造*, 2010, 32(3): 94-98.
LI Xiangzhen, XIANG Weiming, QUAN Ming, et al. Shaking Table Test of the Lateral-torsional Coupling Isolated System [J]. *Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting*, 2010, 32(3): 94-98.

[14] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 中华人民共和国国家标准: 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. National Standard (Mandatory) of the People's Republic of China: Code for Seismic Design of Buildings: GB 50011—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.