

L型平面不规则高层框剪隔震结构扭转效应分析

翁志英¹,王晋哲²,卢立星³,徐毅⁴,林拓臻⁵,吴应雄³

(1.福州职业技术学院,福建福州350100;2.新南威尔士大学,新南威尔士州悉尼2052;

3.福州大学土木工程学院,福建福州350108;4.福州市建筑设计研究院有限责任公司,福建福州350100;

5.福州市滨海裕发置业有限公司,福建福州350100)

摘要: L型平面不规则高层框剪隔震结构随着凸出分肢长宽比的变化,结构扭转效应可能存在差异,为进一步探究不同凸出分肢尺寸对结构扭转效应的影响,设定典型的10层L型高层钢筋混凝土框剪隔震模型,为8度设防地震区的乙类建筑,结构模型凸出分肢长宽比分别为1:1、1.5:1、2:1、2.5:1和3:1共5种。结果表明:L型平面不规则高层框剪隔震结构随分肢长宽比 L/B 的增大并不一定导致结构扭转的加剧,上部结构的偏心率会显著影响结构扭转响应,采用隔震支座可以有效控制结构扭转。结构在极罕遇地震作用下结构的扭转变形不容忽视,需着重关注结构扭转效应的影响。不同于平面规则结构,L型高层框剪结构在竖向抗侧力构件刚度变化楼层的扭转效应有所增大。

关键词: L型平面不规则;框剪结构;基础隔震;凸出分肢长宽比;扭转效应

中图分类号: TU352.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2026)03-0048-08

Analysis of Torsional Effect of L-shaped Planar Irregular High-rise Frame-shear Isolation Structure

WENG Zhiying¹, WANG Jinzhe², LU Lixing³, XU Yi¹, LIN Tuozhen⁵, WU Yingxiong³

(1. Fuzhou Vocational and Technical College, Fuzhou, Fujian 350100, China;

2. University of New South Wales, Sydney, NSW 2052, Australia;

3. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China;

4. Fuzhou Architectural Design Institute Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 350100, China;

5. Fuzhou Binhai Rongfa Real Estate Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 350100, China)

Abstract: The L-shaped irregular high-rise frame-shear wall isolation structure, with variations in the length-to-width ratio of the protruding limbs, may exhibit differences in torsional effects. To further explore the influence of different protruding limb sizes on the torsional effects of the structure, a typical 10-story L-shaped high-rise reinforced concrete frame-shear wall isolation model was set up. This model is a Class B building in an 8-degree seismic defense zone. The length-to-width ratios of the protruding limbs of the structural model were set at 1:1, 1.5:1, 2:1, 2.5:1 and 3:1. The results show that the L-shaped plan irregular high-rise frame-shear wall isolation structure does not necessarily lead to an increase in torsional effects with the increase of the limb length-to-width ratio L/B . The eccentricity of the upper structure significantly affects the torsional response of the structure. Using isolation bearings can effectively control the torsional effect of the structure. It should be noted that the torsional deformation of the structure under extremely rare seismic actions cannot be ignored, and the influence of the torsional effect of the structure needs to be particularly focused on. Further research reveals that, unlike plan regular structures, the torsional effect of the L-shaped high-rise frame-shear wall structure increases at the floors with varying stiffness of the vertical lateral force-resisting components.

Keywords: planar L-shaped irregularity; frame-shear structure; based isolation; protruding limb length-to-width ratio; torsion

平面不规则高层框架-剪力墙结构形式扭转严重,采用基础隔震技术可在一定程度上降低结构扭转响应^[1-2]。目前,新建设的高层框剪建筑中不乏有L型凹凸不规则平面,部分受限于功能需求结构不能设缝,从而形成平面不规则结构。这类结构随着凸出分枝长宽比的变化,其结构扭转效应存在差异,因此是设计中不可忽略的重要因素^[3-4]。

目前国内外学者对高层平面不规则隔震结构扭转效应进行了相应研究,以隔震层偏心、上部结构偏心 and 结构扭转周期比为主要研究方向。首先,隔震层偏心率是诱发隔震结构的扭转变形重要因素,隔震层最大位移随着隔震层偏心率的增大而增加^[5]。Laguardia等^[6]通过弹性线型分析对基础隔震结构地震响应进行模拟预测,指出隔震层的刚度中心和质心的偏心对结构的扭转效应影响显著。李广洲等^[7]对L型平面不规则基础隔震结构进行研究,发现结构两主轴方向偏心率差值过大会显著影响结构扭转效应。其次,随着上部结构偏心率的增大,结构的扭转自振频率降低,结构扭转特性会发生明显变化^[8]。Zakaria等^[9]分析研究了上部结构偶然偏心对隔震建筑的影响,认为上部结构偏心率的变化会对隔震效果有显著影响。刘铁林等^[10]对偏心基础隔震结构进行振动台试验,发现上部结构的质心与隔震层的刚心基本重合时,隔震结构扭转效应会得到有效控制。最后,上部结构的扭转周期比对隔震层的扭转变形具有显著影响^[11]。蔡粮锴等^[12]以不规则高层框剪结构为例进行分析,发现结构扭转周期比是结构扭转的关键影响因素。黄小宁等^[13]对高层偏心建筑在地震下的扭转振动效应进行了深入研究,认为扭转周期比会对上部结构扭转响应产生显著影响,结构设计时应避免第一扭转周期和第一平动周期接近。

综上,对于高层框剪基础隔震结构扭转的研究已较为成熟,但针对结构平面凹凸不规则程度对隔震结构扭转的影响的研究较少,为进一步探究平面凹凸不规则高层框剪隔震结构中不同凸出分枝尺寸对结构扭转的影响,以L型平面为例,建立典型且具有工程实用意义的5种不同分枝长宽比的高层框剪基础隔震结构有限元模型,探究其在地震作用下的扭转效应,成果可为高层框剪结构应用隔震技术提供参考。

1 结构模型

1.1 L型平面不规则结构扭转示意

在结构抗震设计中,一般要求平面尽可能规则、

对称,以使上部结构的刚心和质心接近或重合。但实际的建筑结构中,结构的偏心是不可避免的,以本文选定的L型平面不规则结构为例,凸出分枝及分枝长宽比 L/B 示意如图1所示,结构偏心率可按下式计算:

$$R_{eX} = e_{xi}/r \quad (1)$$

$$R_{eY} = e_{yi}/r \quad (2)$$

式中: R_{eX} 和 R_{eY} 分别为X、Y轴方向的结构偏心率; e_{xi} 和 e_{yi} 分别为上部结构在X、Y轴方向的偏心距; r 为结构的回转半径。

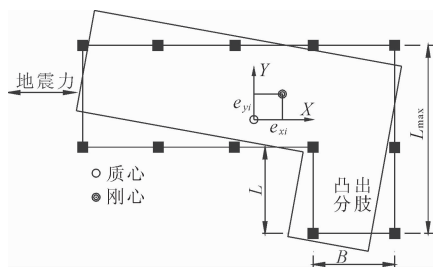


图1 L型平面不规则结构示意

在地震作用下,结构重心处的惯性力会在刚度中心产生扭转力矩,为了考虑结构偏心引起的扭转效应,可采用简化的平-扭耦联分析模型。结构的运动方程可写为:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}\mathbf{U} = -\mathbf{M}\mathbf{I}\ddot{\mathbf{U}}_g(t) \quad (3)$$

式中:结构位移列向量 $\mathbf{U} = \{\mathbf{x}, \mathbf{y}, \boldsymbol{\theta}\}^T$,水平地震加速度列向量 $\ddot{\mathbf{U}}_g(t) = \{\ddot{u}_{gx}, \ddot{u}_{gy}, 0\}^T$, \mathbf{I} 为单位列向量, $\mathbf{x}, \mathbf{y}, \boldsymbol{\theta}$ 分别为结构X、Y向的平动位移和转角向量; $\ddot{u}_{gx}, \ddot{u}_{gy}$ 为结构X、Y向的地震加速度; $\mathbf{M}, \mathbf{C}, \mathbf{K}$ 分别表示结构的质量、阻尼、抗侧移刚度矩阵。

1.2 结构信息

为使研究结果具有普适性和指导工程应用,从Benchmark结构模型拓展形成一个典型的L型框剪隔震结构建筑模型。设定建筑地上10层,首层4.20 m,标准层3.90 m,建筑总高度39.30 m,属于常见的高层框剪建筑;建筑抗震设防类别为重点设防类(乙类),场地类别为II类,抗震设防烈度为8度(0.20g),基本风压为0.50 kN/s²。

共建立5个L型平面不规则结构模型,保持5个模型各对应层构件的尺寸、材料、布置方向与位置相同,分枝长宽比 L/B 分别设置为1:1、1.5:1、2:1、2.5:1和3:1,此外,根据结构形式的不同,分别以KZ(抗震模型)和GZ(隔震模型)进行编号,共得到10个模型。需要注意,除了特殊工程需求, L/B 超

过 3:1 的建筑绝大多数必须断缝,因此所考虑的模式可以覆盖大部分可能的实际情况。各模型平面凹进尺寸占相应投影方向总尺寸 L/L_{\max} 为 0.45、0.56、

0.63、0.68 和 0.71,均大于 0.3,属于平面不规则结构^[14]。以各模型标准层为例,平面布置方案见图 2。

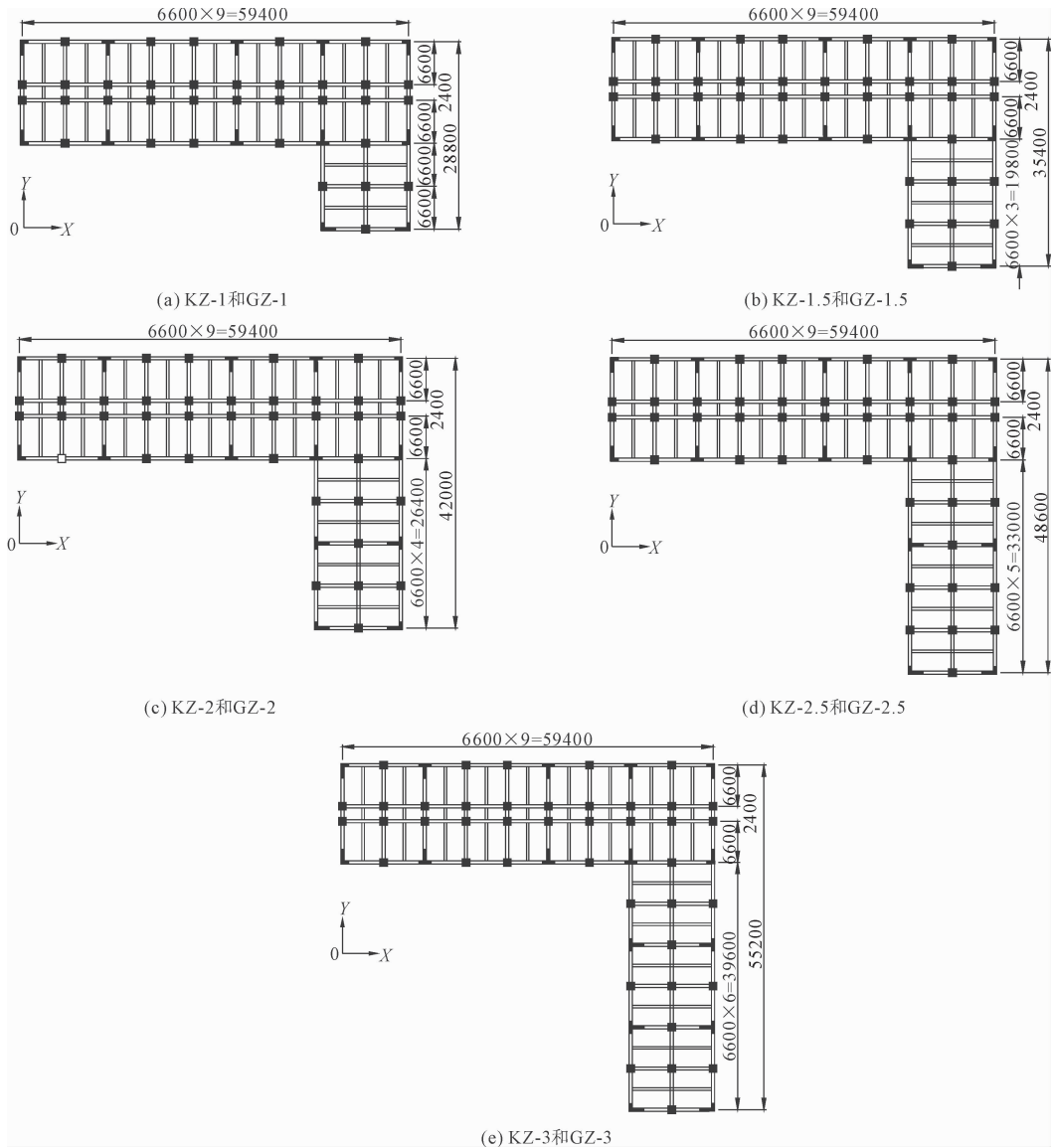


图 2 平面布置图(单位:mm)

1.3 结构建模和单元选取

采用 ETABS 软件进行结构建模。开展弹塑性分析时,可通过在模型中布置塑性铰以实现上部结构的非线性特性,在结构梁柱部位设置塑性铰,将结构划分为塑性区和弹性区,其中塑性区结构梁柱通过纤维截面进行模拟,弹性区结构梁柱继续采用弹性杆系进行模拟;对于结构塑性铰的设置,柱单元选取纤维 P-M2-M3 铰指定、梁单元选取 M3 铰指定。

剪力墙的建立选取分层壳单元开展模拟,以考虑平面内的弯曲、剪切和平面外弯曲之间的耦合作用。

隔震支座存在受压和受拉状态,通过 Rubber

Isolator 连接单元可以较好地模拟力学属性,并引入 Gap 连接单元并联来考虑隔震支座的拉压异性,取支座拉伸刚度为压缩刚度的 $1/10$ ^[15];结构强度计算和配筋采用我国建筑设计单位常用的 PKPM 软件中的 SATWE 模块,以上选取的单元和参数能满足结构分析的需要^[16-17]。

1.4 模型设计参数

建筑结构按常规设计,布置隔震层前按照传统钢筋混凝土框剪抗震结构设计,取得剪力墙和柱的布置,抗震模型框架和剪力墙抗震等级为一级,满足规范要求,设计指标合适。结构建模的构件信息见

表1。

表1 框剪结构构件设计参数

楼层	混凝土强度等级	柱截面尺寸/mm	梁截面尺寸/mm	板厚度/mm	剪力墙尺寸/mm
5-10	C35	600×600	250×600	100	200×2000
3-4	C40	650×650	250×600	100	250×2400
1-2	C40	700×700	300×600	100	300×2400
隔	C40	800×800	350×800	160	—

注：“隔”表示隔震支墩层。

在选择隔震橡胶支座的直径、个数和平面布置

时,需满足各隔震支座的竖向压应力、拉应力和水平位移等符合规范限值^[13]。以GZ-1为例,隔震层总受压承载力设计值约为 1.98×10^5 kN,基于直接设计法和多轮的时程分析调整^[18],选用直径800 mm的天然支座(LNR)和900 mm的铅芯支座(LRB)两种型号的隔震支座共58个,其中LRB900布置于隔震层外围,LNR800主要布置于隔震层内部,支座在重力荷载代表值作用下的竖向压应力最大值为6.79 MPa < 12 MPa,满足要求。所采用支座的参数如表2、表3所示。限于篇幅,同样以GZ-1为例,结构支座布置和最终建成的有限元模型如图3所示。

表2 隔震支座型号参数

型号	有效直径 d_0 /mm	支座总高度 H /mm	橡胶层总厚度 T_r /mm	铅芯直径 d_r /mm	第一形状系数 S_1	第二形状系数 S_2
LRB900	900	275.95	157.95	180	37.50	5.70
LNR800	800	285.13	167.13	—	31.67	4.79

表3 隔震支座位学性能参数

型号	橡胶剪切模量 $G/(N \cdot mm^{-2})$	水平屈服力 Q_d/kN	竖向承载力 P/kN	竖向刚度 $K_v/(N \cdot mm^{-1})$	屈服前刚度 $K_1/(N \cdot mm^{-1})$	屈服后刚度 $/(N \cdot mm^{-1})$		等效水平刚度 $/(N \cdot mm^{-1})$		等效阻尼比		水平位移限值 u_d/mm
						K_d-100	K_d-250	K_{eq-100}	K_{eq-250}	h_{eq-100}	h_{eq-250}	
LRB900	0.392	203.50	7630	5649	17.713	2.214	1.984	3.341	2.441	0.228	0.131	473.85
LNR800	0.392	—	—	3555	—	—	—	1649	—	0.050	—	440.00

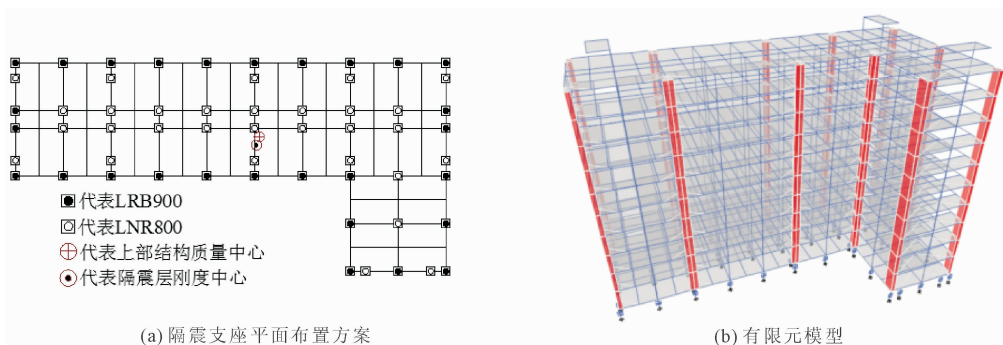


图3 隔震结构模型(GZ-1)

以GZ-1模型左侧和下侧梁柱中轴线交点为坐标原点,由式(1)、式(2)计算隔震结构偏心率,结果如表4所示。经设计调整,布置隔震支座后,隔震层刚度中心与上部结构的质量中心基本重合,隔震层 X 、 Y 向偏心率均小于3%,满足规范要求^[13]。将模型上部结构重心和刚心坐标的变化在图4中表示,可以看出,随着分枝长宽比的增大,上部结构的重心和刚心坐标向 X 轴正方向、 Y 轴负方向移动。相对而言,上部结构 Y 向偏心率相对较小,而 X 向偏心率较大且模型GZ-1.5偏心最为严重。注意到,GZ-2和GZ-3处刚心坐标存在较为明显的突变,这是因

为GZ-2和GZ-3是增加了一组剪力墙作为抗侧力构件,使上部结构刚度显著增大、刚心位置变化较大。

1.5 地震动选取

基于设定的场地条件,依据我国《建筑隔震设计标准》^[19]设计反应谱选取常规地震动,共选取7条地震波进行动力时程分析,其中包括从PEER选取的5条天然地震波Chi-Chi Taiwan-03、Superstition Hills-01、Tohoku-Oki、Niigata Ken huetsu和San Fernando,以及2条由CiSDesignCenter生成的人工波RG1'和RG2'。7条地震波沿 X 、 Y 双向输入,各地震波反应谱见图5。将7条波地震动分别调幅至

200 cm/s² (设防)、400 cm/s² (罕遇)、600 cm/s² (极罕遇), 结构响应结果取 7 条地震波结果平均值。

表 4 结构偏心率

模型编号	方向	上部结构重心坐标/m	上部结构刚心坐标/m	上部结构偏心距/m	隔震层刚心坐标/m	隔震层偏心距/m	回转半径/m	上部结构偏心率/%	隔震层偏心率/%
GZ-1	X 向	37.13	35.92	1.21	36.89	0.25	22.52	5.37	1.11
	Y 向	20.68	20.94	0.26	20.11	0.58		1.15	2.57
GZ-1.5	X 向	38.51	36.57	1.94	38.01	0.51	23.14	8.38	2.20
	Y 向	18.74	19.77	1.03	18.60	0.45		4.45	1.94
GZ-2	X 向	39.77	38.01	1.76	39.34	0.23	24.28	7.25	0.95
	Y 向	17.09	17.84	0.75	16.80	0.49		3.09	2.02
GZ-2.5	X 向	40.67	38.98	1.69	40.15	0.52	24.96	6.77	2.08
	Y 向	15.45	16.66	1.21	14.75	0.50		4.85	2.00
GZ-3	X 向	41.68	40.50	1.18	40.88	0.40	26.27	4.49	1.52
	Y 向	13.88	13.06	-0.82	12.85	0.73		3.12	2.78

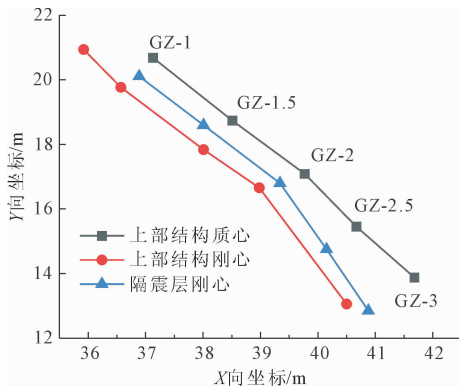


图 4 模型上部结构质心及刚心

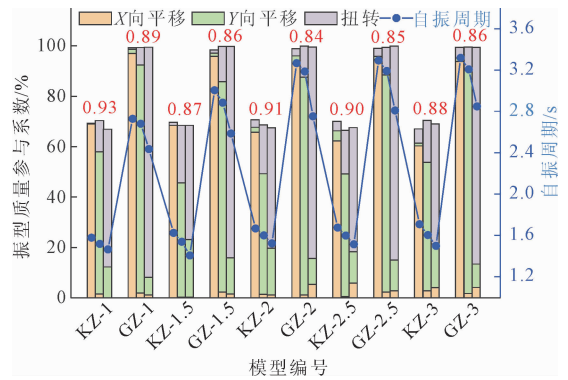


图 6 结构前 3 阶模态信息

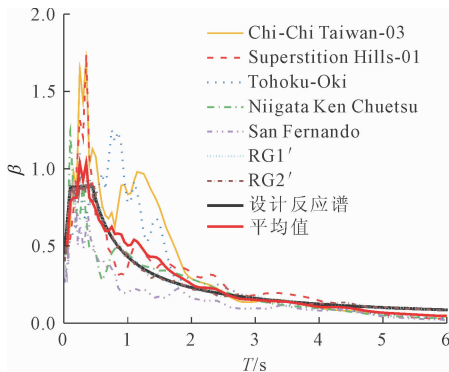


图 5 地震反应谱

2 计算结果与分析

2.1 结构动力特性

根据模态分析结果, 结构前 3 阶模态信息在图 6 中进行表示。其中, 各模型从左至右分别表示第 1~3 阶模态信息, 并在上方列出各模型的扭转周期比。值得注意, 采用隔震技术后, 结构的第一周期延长 1.83~2.11 倍, 基本达到隔震目标。

分析结构振型质量参与系数可得, 结构模态第 1 振型以平移为主, 伴随有一定扭转变形; 第 2 振型为平扭耦合, 且扭转效应显著; 第 3 振型则以扭转为主。具体来说, 以 X 向平移为主的第 1 阶振型扭转的振型质量参与系数普遍较小 (<6%), 且随着 L/B 的增大, 扭转参与系数逐渐增大; 以 Y 向平移为主的第 2 阶振型, 扭转的振型质量参与系数较大, 随着 L/B 的增大, 扭转参与系数先增后减, 模型 KZ-1.5 和 GZ-1.5 扭转振型参与系数相对最高, 可视为各模型普遍存在一定的平扭耦合, 该方向上扭转效应较为显著。

可以发现, 部分抗震结构方案的扭转周期比虽然小于规范 0.9 的限值, 但这些结构的扭转效应仍较为显著, 因此, 仅采用 0.9 的扭转周期比限值不足以完全评估结构扭转效应。相较于抗震模型, 隔震层可有效延长结构的自振周期, 减小结构的扭转。隔震模型前 2 振型平移质量参与系数总和明显增加, 扭转质量参与系数占比减小, 结构扭转振型得到

控制,上部结构构件受力更加均匀,结构 X 向基本实现平动,但 Y 向平扭耦联仍旧存在。

2.2 结构地震效应

罕遇地震作用下各模型的基底剪力和倾覆力矩如表5所示。由表5可知,5个模型底部剪力比约为0.36~0.45,底层倾覆力矩比约为0.35~0.43,

满足规范要求,减震效果良好^[19]。计算得到的倾覆力矩比均小于底部剪力比,表明底部剪力比是更为重要的指标,因此根据底部剪力比得到结构水平向减震系数。据《建筑隔震设计标准》^[19]第6.1.3-2条,隔震后上部结构的抗震等级可按降一级设计,即框架和剪力墙抗震等级为二级。

表5 结构底部剪力比和倾覆力矩比

编号	方向	底部剪力			底部倾覆力矩			水平向 减震系数
		非隔震/kN	隔震/kN	剪力比	非隔震 /($\times 10^4$ kN·m)	隔震 /($\times 10^4$ kN·m)	倾覆 力矩比	
GZ-1	X 向	14196.86	6388.56	0.45	71.95×10^4	30.97×10^4	0.43	0.45
	Y 向	16370.19	6875.12	0.42	83.35	33.50	0.40	
GZ-1.5	X 向	15056.13	6474.32	0.43	75.60	31.68	0.42	0.43
	Y 向	16644.05	6324.84	0.38	84.96	30.84	0.36	
GZ-2	X 向	16469.70	6258.34	0.38	80.16	30.55	0.38	0.38
	Y 向	17060.95	6141.93	0.36	92.44	25.51	0.35	
GZ-2.5	X 向	17224.86	7234.44	0.42	89.07	35.70	0.40	0.43
	Y 向	18263.19	7853.16	0.43	98.90	39.23	0.40	
GZ-3	X 向	18186.58	7456.36	0.41	92.93	36.44	0.39	0.43
	Y 向	19061.76	8196.66	0.43	99.63	40.95	0.41	

2.3 结构层间扭转位移比

层间位移比是指考虑偶然偏心影响的水平地震力作用下,楼层竖向抗侧力构件最大层间位移与该楼层位移平均值的比值,规范限制不超过1.2^[19]。图7给出了设防地震下5种抗震结构以及设防、罕遇和极罕遇地震下5种隔震结构的层间位移比(“0”表示隔震层)。

对比图7的层间扭转位移比可知,在设防地震下,抗震模型在 X 向层间扭转位移比相对较小,而 Y 向普遍超过1.2,结构产生较严重扭转;相较而言,隔震结构最大层间扭转位移比均有所减小,采用隔震支座可以使结构扭转得到较为有效的控制。对比设防、罕遇和极罕遇地震下隔震结构的层间扭转位移比,不难发现,随着地震烈度的增大,最大层间扭转位移比也随之增大,极罕遇地震下最大可达1.247。

对于L型平面不规则结构,随着 L/B 的变化,结构扭转响应并不是单调变化的,且与结构扭转振型质量参与系数的规律是类似的,均与上部结构的偏心率高度相关:随着 L/B 的增大,结构 X 向总长度不变,上部结构偏心率先增大后减小,在分肢长宽比为1.5:1时达到最大,使得上部结构 Y 向扭转力臂长度随之变化,在外部激励下,结构 Y 向扭转效应也随之呈现相似的规律;结构 Y 向总长度随分肢的延长而增加,上部结构偏心率普遍偏小且变化幅

度不明显,在较接近的扭矩下,反映出的 X 向扭转位移比随结构 Y 向长度呈单调增长。

此外,抗震结构和隔震结构在总体趋势上是类似的。模型 X 向层间扭转位移比随着楼层的升高呈减小趋势, Y 向随着楼层的升高呈先增大后减小的变化规律。特别地, Y 向层间扭转位移比均在结构第5层出现最大值,且其增幅显著超过临近层,这是由于结构在第五层处竖向抗侧力构件截面尺寸减小,尽管这对于平面规则结构是合理的设计,但对于L型平面不规则高层框剪结构而言,其扭转效应会产生较大的影响。因此,有别于平面规则结构,这类L型高层框剪结构在设计时需对竖向抗侧力构件刚度变化楼层的扭转效应予以关注。

2.4 隔震层支座位移

强震下隔震层支座位移是评估隔震效果的重要参数。在本研究中,随着 L/B 的增大,地震作用下结构 X 向最大支座位移基本是单调增长的,且呈现出逐渐离散化的趋势;而结构 Y 向最大支座位移呈先增长再减少的趋势,且从数值上看, Y 向的支座位移要更为突出。

极罕遇地震下隔震模型的 Y 向隔震层支座位移峰值如图8所示,可以发现,最大位移出现在工况GZ-1.5,这与结构层间扭转位移比的变化规律是一致的,其支座变形普遍达到392~415 mm,且其较大

值多出现在结构边角部分,在实际地震中如果恰好遭遇共振等偶然因素,结构安全将不容乐观,因此,

对 L 型平面不规则框剪隔震结构进行设计时,需关注结构薄弱点,边角支座宜采取加大直径等措施。

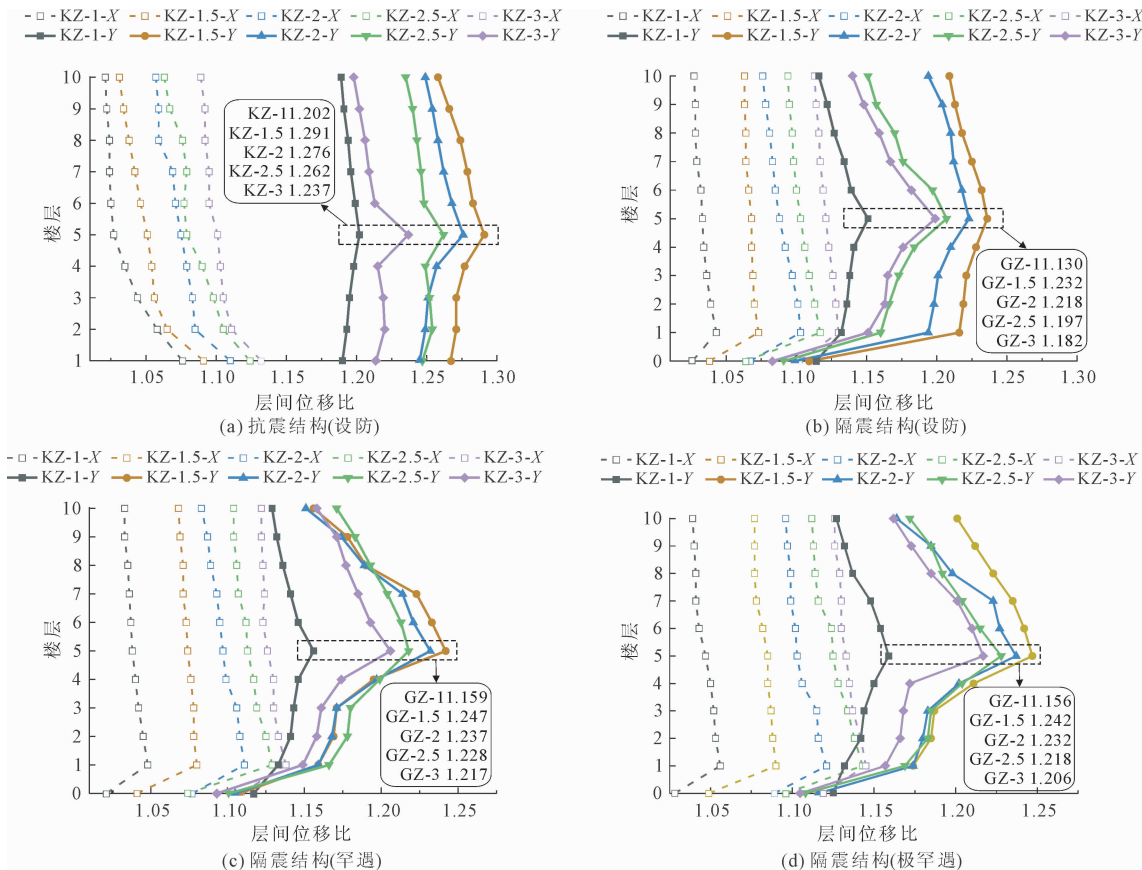


图 7 层间扭转位移比

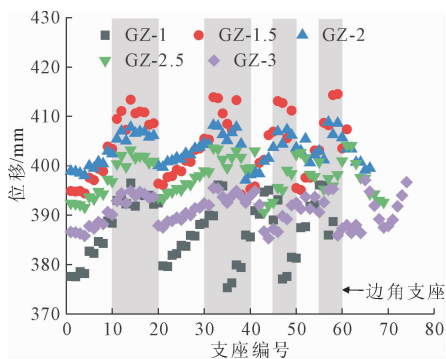


图 8 隔震层支座位移(Y向)

2.5 结构层间扭转角

除了上述扭转周期比、层间位移比等结构扭转效应控制指标,研究中发现,层间扭转角(指相邻楼层的扭转角差值)可作为结构扭转效应的补充判断依据,数值越大则说明扭转效应越严重,不作为定量指标,结果可供扭转分析时参考^[20]。

图 9 给出了强震作用下隔震结构的层间扭转角。可见,隔震结构层间扭转角主要集中于隔震层,

而上部结构层间扭转角数值则远小于隔震层。总体而言,上部结构变化趋势与层间扭转位移比大致相同,隔震层与上部结构的最大层间扭转角同样出现在 GZ-1.5 模型。需要注意,极罕遇地震作用下上部结构和隔震层最大层间扭转角大幅增加,此时结构的扭转效应显著,结构扭转变形不容忽视。

3 结论

(1) L 型平面不规则高层框剪基础隔震模型的凸出分枝长宽比 L/B 的增大并不一定导致结构扭转的加剧,隔震结构上部结构的偏心率也会显著影响结构的扭转效应。对于本文研究设定的典型结构,随着 L/B 比值的增大,结构扭转效应呈现出 X 向逐渐增大、Y 向先增后减的趋势,但总体上,采用隔震支座可以使结构扭转得到有效的控制。

(2) 隔震模型在罕遇和极罕遇地震作用下结构的扭转效应不容忽视,极罕遇地震下结构层间位移比显著增大。此外,极罕遇地震作用下隔震支座位移较大,在隔震设计时对于边角支座宜适当加大支

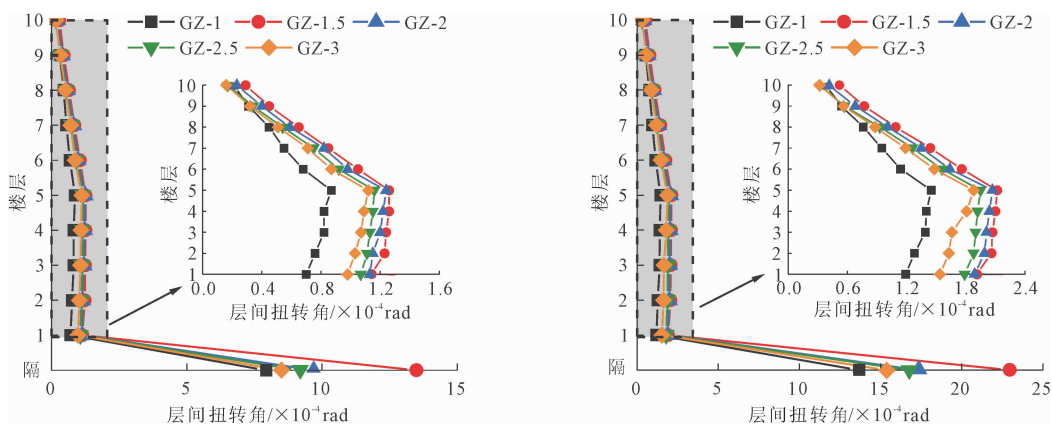


图9 隔震结构层间扭转角

座直径。

(3) 研究中发现了这类L型高层框剪结构在竖向抗侧力构件刚度变化楼层的扭转效应有所增大,这点有别于平面规则结构。

(4) 模型层间扭转角变化规律和结构层间位移比基本保持一致,可作为高层隔震结构扭转效应判断的补充依据。

参考文献:

- [1] 潘毅,彭鑫,王腾,等. 泸定6.8级地震医疗建筑震害调查与分析[J]. 建筑结构学报,2024,45(05):14-29.
- [2] 戴靠山,吴小宾,吴体,等. 专栏评述:工程结构减震与隔震[J]. 工程科学与技术,2023,55(05):1-9.
- [3] 张佳雨,祁皓,杨绵越. 偏心隔震结构扭转效应机理分析及关键参数限值研究[J]. 振动与冲击,2023,42(24):32-41.
- [4] 陈云,李飞燕,吴应雄,等. 考虑塔楼偏心的大底盘层间隔震结构地震响应试验[J]. 应用基础与工程科学学报,2019,27(03):553-564.
- [5] Fevzi S, Idris B, Arova K, et al. Effect of seismic isolation on the performance of High-rise buildings with torsional instability[J]. Sustainability,2022,15(01):36.
- [6] Laguardia R, Morrone C, Faggella M, et al. A simplified method to predict torsional effects on asymmetric seismic isolated buildings under bi-directional earthquake components[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2019,17: 6331-6356.
- [7] 李广洲,韩俊浩,郭军林,等. 高烈度区L型平面不规则多层框架结构隔震设计与研究[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版),2023,38(03):19-25.
- [8] 王建强,丁永刚,李大望. 上部结构(偏心)对基础滑移隔震结构平-扭耦联地震反应的影响[J]. 振动与冲击,2009,28(12):96-100,205.
- [9] Zakaria A, Krishna M S R, Krishna T V, et al. Effects

of the accidental eccentricity on regular and irregular buildings[J]. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE), 2019, 8(11):2157-2163.

- [10] 刘铁林,杨越,李文博. 正弦行波激励下单层偏心框架结构扭转响应的解析解[J]. 地震工程与工程振动,2022,42(01):46-55.
- [11] Shyamsunder L, Pandey D K, Mishra S K. Behavior of torsionally coupled buildings isolated by super-elastic bearing subjected to earthquakes[J]. Journal of Building Engineering,2021,43:102573.
- [12] 蔡粮锴,柏文,戴君武,等. 基础隔震结构隔震层扭转控制及影响研究[J]. 地震工程与工程振动,2022,42(04):200-209.
- [13] 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(05):1283-1288.
- [14] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范(2016版)[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [15] 潘毅,刘鑫鑫,宋佳雨,等. 近断层脉冲型地震动对基础隔震结构水平向减震系数的影响分析[J]. 建筑结构学报,2023,44(01):33-42.
- [16] 陈启冬,许立英,刘阳,等. 高烈度区某高层住宅隔震设计应用与分析[J]. 南昌大学学报(工科版),2021,43(01):22-29.
- [17] 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.
- [18] 叶昆,胡广杰. 基于直接设计法的基础隔震结构抗震性能评估[J]. 建筑结构学报,2023,44(04):276-285,308.
- [19] GB/T 51408—2021 建筑隔震设计标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2021.
- [20] 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.