

# 平面不规则多层框架基础隔震结构 扭转效应及其控制

潘钦锋<sup>1</sup>, 林环周<sup>2</sup>, 许立英<sup>3</sup>, 卢立星<sup>4</sup>, 吴应雄<sup>4,5</sup>, 曹霖坤<sup>6</sup>

(1. 福建理工大学土木工程学院, 福建 福州 350118; 2. 中国建筑第四工程局有限公司, 广东 广州 510630;  
3. 西南科技大学土木工程与建筑学院, 四川 绵阳 621010; 4. 福州大学土木工程学院, 福建 福州 350108;  
5. 福建省土木工程多灾害防治重点实验室, 福建 福州 350108; 6. 厦门坤能工程建设有限公司, 福建 厦门 361001)

**摘要:** 平面不规则建筑易扭转造成结构严重破坏, 进行结构扭转效应分析和控制是这类结构设计的关键。对此, 本文开展了 8 度设防区的平面不规则多层框架模型仿真计算, 建立了 5 个典型乙类建筑的平面 L 型四层框架隔震模型, 设置结构凸出分枝长度  $B$  和宽度  $W$  的比值分别为 1:1, 1.5:1, 2:1, 2.5:1 和 3:1, 分析了不同结构的动力特性和地震响应, 探讨了 LRB 刚度占比和隔震层刚心位置对结构扭转的影响, 提出了结构扭转的有效控制方法。结果表明: 随着凸出分枝长宽比  $B/W$  比值的增大, 结构  $X$  向扭转逐渐增大,  $Y$  向扭转逐渐减小。增大 LRB 刚度占比可减小结构扭转效应, 通过综合控制结构扭转和结构减震系数可得到合理的 LRB 刚度占比目标, 建议了 8 度地震条件下隔震层 LRB 刚度占比, 同时隔震层刚心与上部结构刚心布置于上部结构质心两侧可抑制平面不规则结构上部结构的扭转。

**关键词:** 钢筋混凝土框架结构; 基础隔震; 平面不规则; 扭转控制; 仿真计算

**中图分类号:** TU352.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2024)12-2021-13

**DOI:** 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2024.12.004

## 引言

平面不规则框架结构对扭转效应较为敏感, 即使较小的地震作用也可能引发结构较大的扭转位移, 基础隔震技术可降低结构扭转效应<sup>[1-4]</sup>; 然而, 当上部结构呈现平面不规则特性时, 扭转效应将成为隔震设计中不可忽视的关键因素。因此, 针对平面不规则基础隔震结构的扭转效应开展研究显得尤为重要。当前, 关于平面不规则隔震结构扭转效应的研究主要聚焦于几个方面: 隔震层偏心率<sup>[5-8]</sup>、上部结构偏心率<sup>[9-10]</sup>以及扭转周期比<sup>[11-12]</sup>。

针对隔震层偏心率的研究, TENA-COLUNGA 等<sup>[13]</sup>通过设置隔震层偏心距, 发现隔震层偏心率将诱发隔震结构发生显著的扭转变形, 非对称系统相对于对称系统的最大隔震层位移呈放大状态。江宜城等<sup>[14]</sup>开展了针对隔震层单向偏心的基础隔震结构理论分析, 认为单向偏心隔震结构如减小偏心率可抑制上部结构扭转。李宏男等<sup>[15]</sup>分析了偏心基础隔震结构偏心参数对结构地震响应的影响, 指出偏心

隔震结构的扭转非常显著。孙任武等<sup>[16]</sup>研究了一个 L 形平面不规则基础隔震结构扭转反应的变化规律, 发现当结构一主轴方向的偏心率较大时, 会放大另一主轴方向的扭转效应。

针对上部结构偏心率的研究, 刘铁林等<sup>[17]</sup>研究正弦行波激励对偏心结构扭转效应的影响, 结果表明, 随着上部结构偏心率的增大, 结构的非耦联扭转自振频率与固有频率逐渐降低。王建强等<sup>[18]</sup>对上部结构偏心的基础滑移隔震模型开展研究, 发现相较于刚度偏心, 上部结构的质量偏心对结构的扭转效应影响更为显著。黄小宁等<sup>[19]</sup>研究上、下部结构间偏心率变化对结构扭转的影响, 发现隔震层刚心和上部结构刚心的相对位置发生变化将对结构扭转产生影响。

针对结构扭转周期比的研究, 贺进<sup>[20]</sup>开展了基础隔震结构的数值分析, 结果表明: 在一定周期比范围内, 扭转周期较隔震层偏心率对结构扭转效应的影响更显著。季菲菲<sup>[21]</sup>系统性统计扭转效应的影响参数, 发现当周期比  $< 0.6$  或  $> 1.6$  时, 扭转效应主要受隔震层偏心率影响, 当  $0.6 < \text{周期比} < 1.6$  时, 周期

**收稿日期:** 2024-06-28; **修订日期:** 2024-08-13

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(52378495, 51778149); 西南科技大学博士基金资助项目(23zx7162); 福建省建设科技研究开发项目(2023-k-46)。

比对结构扭转效应的影响较大。

综上所述,隔震结构扭转响应的研究多以隔震层的偏心率、上部结构的偏心率和周期比为控制变量,鲜有针对平面不规则程度对隔震结构扭转效应影响的研究。在实际工程中,平面不规则建筑多为内走廊多跨框架的L型建筑,因此有必要开展不同平面不规则程度基础隔震结构模型的扭转分析。本文通过开展不同平面不规则程度下框架基础隔震结构的非线性动力时程分析,探究L型隔震结构随不规则程度的变化所产生的扭转特性及规律,引入层间扭转角作为评价结构扭转效应的补充指标,提出可有效抑制结构扭转的量化控制指标及方法。

## 1 隔震模型与隔震方案

### 1.1 隔震结构信息

目前,中国中小学教学用房、医疗建筑等多层隔震建筑建设量大,其中不乏一定数量的L型建筑。本文研究对象和目标是平面不规则多层现浇钢筋混凝土框架基础隔震结构扭转效应及控制,为了使研究结果具有普适性,并能指导工程应用,选取典型且具有工程实际意义的结构进行研究。

设定建筑结构为地上四层,建筑平面布置为L型,建筑高度为15.90 m(底层4.20 m,其余楼层3.90 m),乙类建筑,基本风压为 $0.5 \text{ kN/m}^2$ ,场地类别为II类,抗震设防烈度为8度,设计基本加速度为 $0.20g$ ,隔

震目标为上部结构降一度设计。根据《建筑抗震设计规范》3.4.3条及其条文说明<sup>[22]</sup>,平面凸角分肢长度 $B$ 与相应投影方向总尺寸 $B_{\max}$ 的比值大于0.3即为平面不规则,因此共建立五个结构模型,设置结构凸出分肢长度 $B$ 和宽度 $W$ 的比值分别为1:1,1.5:1,2:1,2.5:1和3:1,对应的 $B/B_{\max}$ 为0.45,0.56,0.63,0.68和0.71,均属平面凸角不规则结构。

为便于区分模型和下一步研究,将各分肢长宽比 $B/W$ 下的结构模型用模型编号表示,具体如表1所示。

表 1 模型编号及参数

Tab. 1 Model number and parameters

模型编号	隔震模型参数	模型编号	抗震模型参数
GZKJ-1	$B/W=1:1$	KZKJ-1	$B/W=1:1$
GZKJ-1.5	$B/W=1.5:1$	KZKJ-1.5	$B/W=1.5:1$
GZKJ-2	$B/W=2:1$	KZKJ-2	$B/W=2:1$
GZKJ-2.5	$B/W=2.5:1$	KZKJ-2.5	$B/W=2.5:1$
GZKJ-3	$B/W=3:1$	KZKJ-3	$B/W=3:1$

进行结构弹塑性分析,梁柱单元需设置塑性铰,根据美国规范 ASCE-13<sup>[23]</sup>,塑性铰根据其变形程度划分为AB(弹性段)、BC(强化段)、CD(卸载段)和DE(塑性段)4个阶段。其中,柱单元选取纤维P-M2-M3铰模拟,梁单元选取M3铰模拟。同时,楼板选用膜单元模拟,隔震支座通过Rubber Isolator连接单元和Gap连接单元并联实现<sup>[24]</sup>。以上选取的单元和参数能满足结构分析的需要。

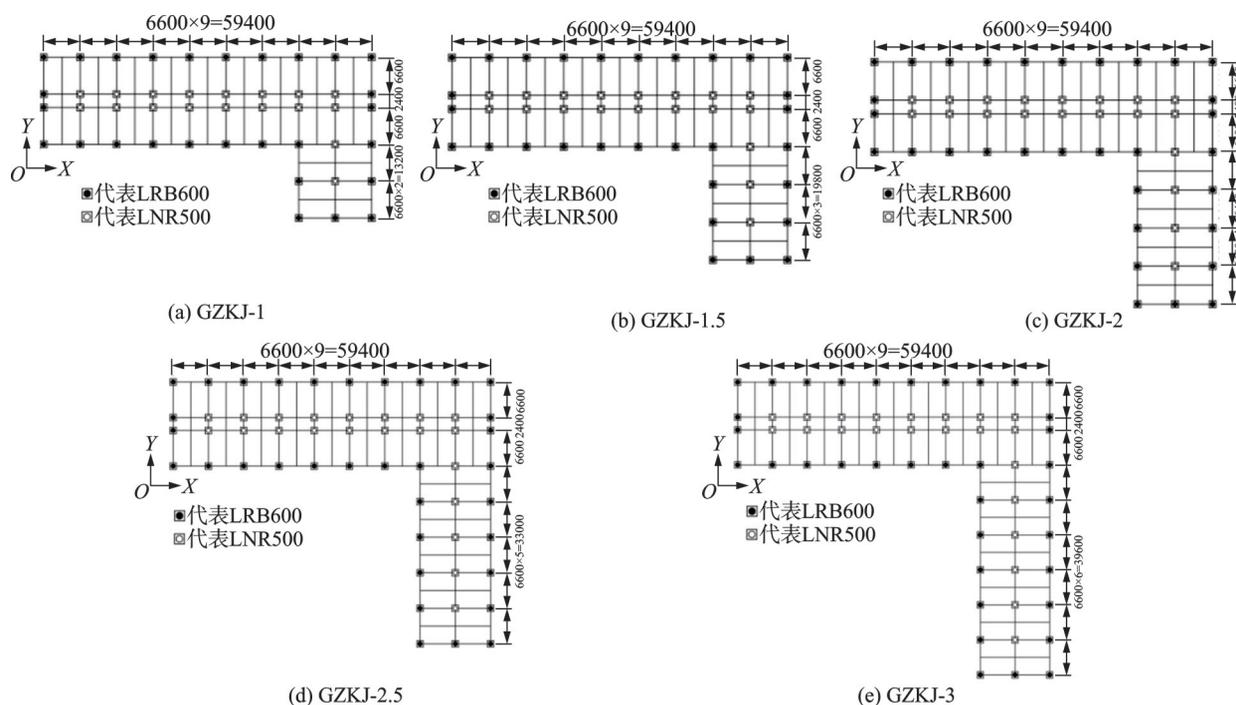


图 1 框架柱网和隔震支座平面布置图(单位:mm)

Fig. 1 Frame column network and seismic isolation bearing layout (Unit: mm)

结合表 1,结构平面柱网及隔震支座布置如图 1 所示。共选用直径 500 和 600 mm 两种型号的橡胶支座,要求重力荷载代表值下竖向压应力限值为

12 MPa,铅芯橡胶支座(LRB)布置于隔震层外围,天然橡胶支座(LNR)布置于隔震层内部,所采用支座的参数和力学性能如表 2 所示。

表 2 隔震支座参数

Tab. 2 Seismic isolation bearing parameters

类型	$T_r/\text{mm}$	$K_v/(\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1})$	$K_1/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	$\alpha/\%$	$Q_d/\text{kN}$	$K_{e-100}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	$S_1$	$S_2$
LRB600	118.90	2445	11391	7.69	90.20	1459	31.30	5.80
LRB500	98.60	1839	9880	7.69	62.60	1297	26.80	5.70
LNR600	118.90	2097	—	—	—	917	29.70	5.80
LNR500	98.60	1525	—	—	—	767	24.50	5.70

注: $T_r$ 为内部橡胶层总厚度; $K_v$ 为竖向刚度; $K_1$ 为屈服前刚度; $\alpha$ 为屈服前、后刚度比; $Q_d$ 为屈服力; $K_{e-100}$ 为支座 100% 变形下的水平等效刚度; $S_1$ 为第一形状系数; $S_2$ 为第二形状系数。

经过模态分析,隔震模型前 3 阶周期如表 3 所示。从表 3 可得,5 个模型各阶周期相近即动力特性相近。

表 3 结构前 3 阶周期(单位:s)

Tab. 3 The first three order cycles of the structure(Unit:s)

分肢长宽比 $B/W$	第 1 阶	第 2 阶	第 3 阶
1:1	2.445	2.304	1.982
1.5:1	2.450	2.313	1.990
2:1	2.464	2.319	2.008
2.5:1	2.476	2.329	2.027
3:1	2.484	2.331	2.041

## 1.2 地震动参数

根据场地等条件,研究中选用 7 条地震波进行结构的动力时程分析,其中 5 条是来自 PEER(太平洋地震工程研究中心)数据库的天然波(Loma Prieta; Chi-Chi, Taiwan; Northridge-01; Niigata, Japan; Imperial Valley-06),2 条是北京筑信达工程咨询公司开发的 CiSDesignCenter 生成的人工波(RG1; RG2)。图 2 展示了 7 条地震波的反应谱。

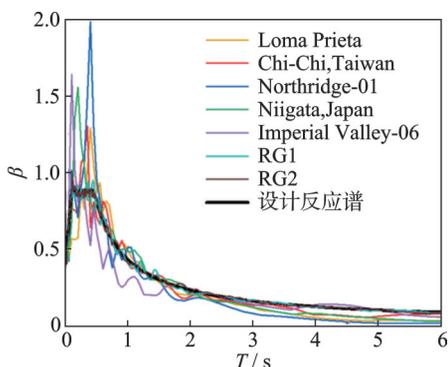


图 2 地震波反应谱

Fig. 2 Seismic wave response spectrum

将上述地震波输入结构进行弹塑性动力时程分析,地震波分别沿 X 向和 Y 向单向输入。调幅至 200, 400 和 600  $\text{cm/s}^2$ , 分别对应 8 度设防、罕遇和极罕遇地震动水平,结构响应结果取 7 条地震波的平均值。

## 2 结构响应分析

### 2.1 结构动力特性与扭转效应的减震效果

根据结构模态分析结果,列出 5 种不规则结构的前 3 阶模态信息,如表 4 所示。

通过分析表 4 结构振型质量参与系数,发现对比抗震结构,隔震结构的第 1 阶振型和第 2 阶振型平移质量参与系数明显增大,第 3 阶振型扭转质量参与系数明显增大,结构的质量参与系数之和在前 3 阶达到 99% 以上,结构高阶振型响应得到抑制,整体扭转效应减小,X 向振型扭转成分由平扭耦联变为单纯平移,但结构 Y 向平扭耦联仍旧存在,表明结构扭转虽有所减轻但未得到完全抑制。

对比表 4 抗震结构与隔震结构的周期发现,隔震结构的每一阶周期均较抗震结构明显延长,扭转周期比显著减小,但随结构凸出分肢长宽比  $B/W$  的增大,抗震结构和隔震结构扭转周期比基本不发生变化。抗震结构扭转周期比保持在 0.92~0.94 之间,均大于规范的限值 0.9;隔震结构扭转周期比保持在 0.81~0.82 之间,远小于规范限值 0.9,说明隔震层不仅可有效延长结构的自振周期,同时可减轻结构的扭转效应。

为直观地考察不规则结构振型特征,以不规则  $B/W$  为 2.5:1 的结构为例,限于篇幅,仅列出隔震结构前 3 阶振型图,如图 3 所示。

表4 结构前三阶模态信息  
Tab. 4 Information about the first three order modes of the structure

分枝长宽比 $B/W$	结构模型	振型序号	周期/s	振型质量参与系数(总和)/%			扭转周期比
				X向平移	Y向平移	竖向扭转	
1:1	KZKJ-1	1	0.859	64.51(64.51)	0.70(0.70)	1.71(1.71)	0.94
		2	0.839	2.09(66.60)	37.57(46.27)	28.40(30.11)	
		3	0.807	0.50(67.10)	28.62(66.89)	37.11(67.22)	
	GZKJ-1	1	2.445	13.70(13.70)	69.54(69.54)	15.73(15.73)	0.81
		2	2.304	81.94(95.64)	17.24(86.78)	0.18(15.91)	
		3	1.982	3.51(99.15)	12.50(99.28)	83.16(99.07)	
1.5:1	KZKJ-1.5	1	0.861	61.87(61.87)	1.08(1.08)	4.02(4.02)	0.93
		2	0.836	3.90(65.77)	43.82(44.90)	20.38(24.40)	
		3	0.801	1.48(67.25)	22.17(67.07)	44.10(68.51)	
	GZKJ-1.5	1	2.450	16.52(16.52)	68.38(67.38)	14.56(14.56)	0.81
		2	2.313	75.55(91.07)	22.50(82.88)	1.32(15.88)	
		3	1.990	7.23(99.30)	8.53(99.41)	83.62(99.50)	
2:1	KZKJ-2	1	0.869	57.55(57.55)	2.51(2.51)	7.46(7.46)	0.92
		2	0.838	6.70(64.25)	45.43(47.94)	16.62(24.08)	
		3	0.805	2.76(67.01)	20.93(66.36)	46.05(70.13)	
	GZKJ-2	1	2.464	21.07(21.07)	66.74(48.21)	10.21(28.21)	0.81
		2	2.319	73.12(92.52)	24.22(75.96)	2.51(30.22)	
		3	2.008	4.94(99.13)	8.22(99.18)	86.40(99.12)	
2.5:1	KZKJ-2.5	1	0.883	54.95(54.95)	1.85(1.85)	12.36(12.36)	0.92
		2	0.845	10.58(65.53)	44.60(46.45)	15.92(28.27)	
		3	0.814	4.47(69.99)	24.43(70.88)	39.25(67.53)	
	GZKJ-2.5	1	2.476	25.93(25.93)	64.22(66.22)	9.34(9.34)	0.82
		2	2.329	66.98(92.91)	28.02(92.24)	4.17(13.51)	
		3	2.027	6.45(99.36)	7.45(99.69)	85.78(99.29)	
3:1	KZKJ-3	1	0.889	49.24(49.24)	2.78(2.78)	14.81(14.81)	0.92
		2	0.845	13.79(63.03)	41.30(44.08)	15.83(30.64)	
		3	0.817	5.61(68.64)	27.44(71.52)	36.80(67.44)	
	GZKJ-3	1	2.484	28.04(28.04)	63.73(63.73)	7.70(7.70)	0.82
		2	2.331	64.23(92.27)	30.35(90.08)	5.16(12.86)	
		3	2.041	7.06(99.33)	5.69(99.77)	86.40(99.26)	

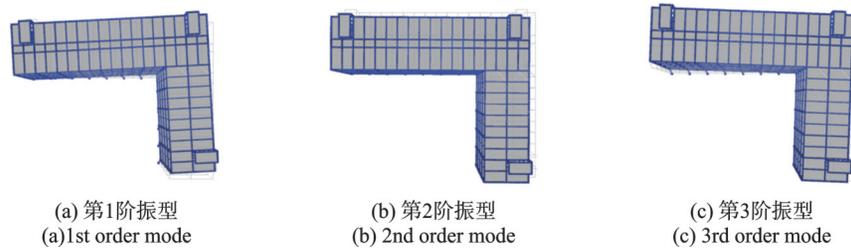


图3 隔震结构前三阶振型

Fig. 3 The first three order modes of seismic isolation structure

中震作用下各模型的底部剪力比如表5所示,5个框架隔震模型底部剪力比均小于0.5,满足上部结构地震作用降一度考虑的性能目标<sup>[25]</sup>。

## 2.2 结构扭转效应分析

层间位移比指在考虑偶然偏心影响的规定水平

地震力作用下,楼层竖向构件最大的层间位移与该楼层位移平均值的比值<sup>[22]</sup>。限于篇幅,图4和5分别给出了两种地震工况下地震动X向输入和Y向输入时结构的层间位移比。分析图4和5可得:

(1)随地震峰值加速度(PGA)的增大,结构层间位移比同步增大;

表 5 隔震结构底部剪力比  
Tab. 5 Shear ratio at the bottom of the seismic isolation structure

分枝长宽比 $B/W$	X向底部剪力			Y向底部剪力		
	非隔震/kN	隔震/kN	比值	非隔震/kN	隔震/kN	比值
1:1	10198.03	3773.27	0.37	10173.25	3865.74	0.38
1.5:1	11256.79	4282.22	0.38	11423.87	4226.91	0.37
2:1	11934.20	4534.91	0.38	12329.66	4439.71	0.36
2.5:1	12299.51	4796.61	0.39	13038.24	4824.14	0.37
3:1	12877.33	5150.83	0.40	13840.23	5249.28	0.38

注:表中比值为隔震数值/非隔震数值。

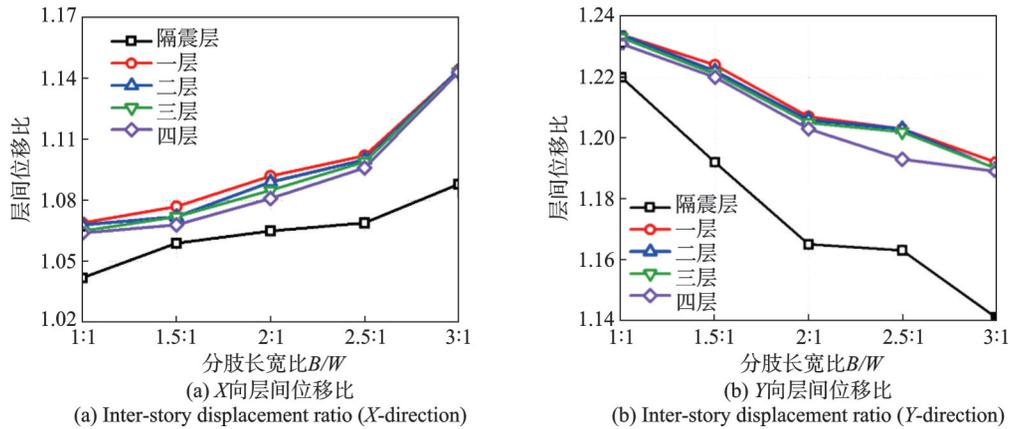


图 4 层间位移比(PGA=400 gal)

Fig. 4 Inter-story displacement ratio (PGA=400 gal)

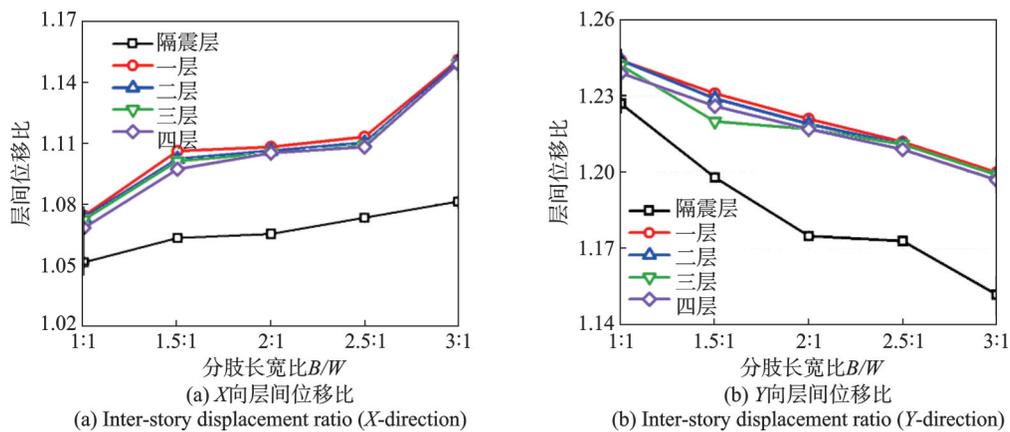


图 5 层间位移比(PGA=600 gal)

Fig. 5 Inter-story displacement ratio (PGA=600 gal)

(2)结构 X向各层层间位移比随着  $B/W$  的增大逐渐增大,模型 GZKJ-3, GZKJ-2.5, GZKJ-2, GZKJ-1.5 和 GZKJ-1 的层间位移比依次减小,且均小于规范限值 1.2;

(3)结构 Y向各层层间位移比随着  $B/W$  的增大逐渐减小,模型 GZKJ-1, GZKJ-1.5, GZKJ-2, GZKJ-2.5 的层间位移比依次减小,但均大于规范限值 1.2,仅 GZKJ-3 的层间位移比小于 1.2,但总体上表明框架隔震结构在 Y向发生了较大扭转变形。

在进行隔震结构扭转分析时,主要根据上述扭转周期比、层间位移比等控制指标量化结构的扭转程度。本文研究的主要对象是典型的 L型隔震建

筑,除了上述控制指标外,特别提出了层间扭转角(指相邻楼层的扭转角差值)作为补充指标,但不是定量指标,结果可供结构扭转分析参考。限于篇幅,图 6 给出了两种地震动 Y向输入工况下隔震结构的层间扭转角。由图 6 可知,结构在地震动 Y向输入时产生了更大扭转变形,进一步分析可得:(1)各隔震模型计算的层间扭转角均在隔震层出现最大值,产生较大扭转变形,并随着楼层的升高,层间扭转角逐渐减小,结构扭转效应逐渐不明显。(2)对比 5 个不规则模型,层间扭转角随着结构  $B/W$  比值的增大呈现逐渐减小趋势。

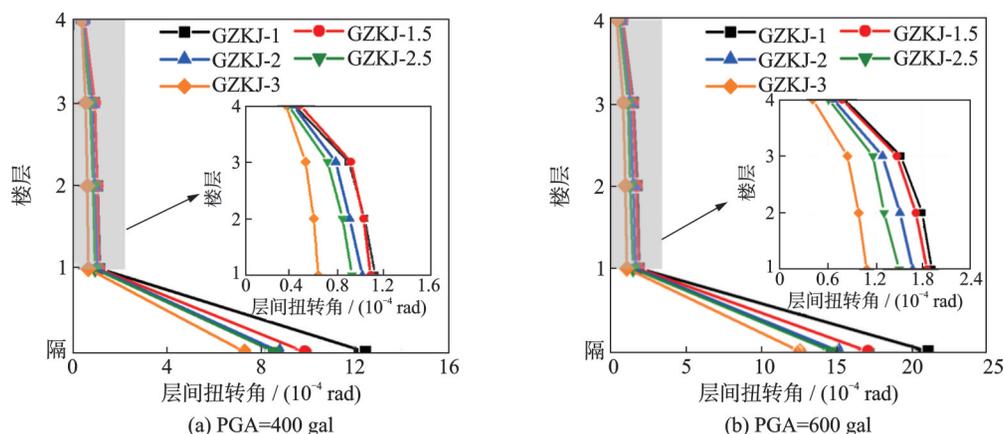


图6 结构层间扭转角

Fig. 6 Inter-story torsion angle of the structure

图7和8分别展示了两种地震工况下X向和Y向的隔震层支座位移。由图7可知,X向支座位移按从大到小排序为GZKJ-3,GZKJ-2.5,GZKJ-2,GZKJ-1.5和GZKJ-1。相较于设防地震,罕遇地震时最大隔震支座位移放大110%~130%,极罕遇地震时放大至250%~270%。由图8可知,Y向支座位移按从大到小排序为GZKJ-1,GZKJ-1.5,GZKJ-2,GZKJ-2.5和GZKJ-3。相较于设防地震,罕遇地震时最大隔震支座位移放大110%~150%,

极罕遇地震时放大至270%~320%。因此,罕遇和极罕遇地震对隔震支座位移的放大效应不容忽视。

对比图7和8可得,X向隔震层支座位移变化较小,Y向隔震层支座位移变化较大。这是由于结构X向刚度较大,在不同的B/W下,结构扭转效应均较小,且各支座受力及水平位移均匀;结构Y向刚度较小,扭转效应大,支座受力不均匀,致使支座间水平位移差距较大。

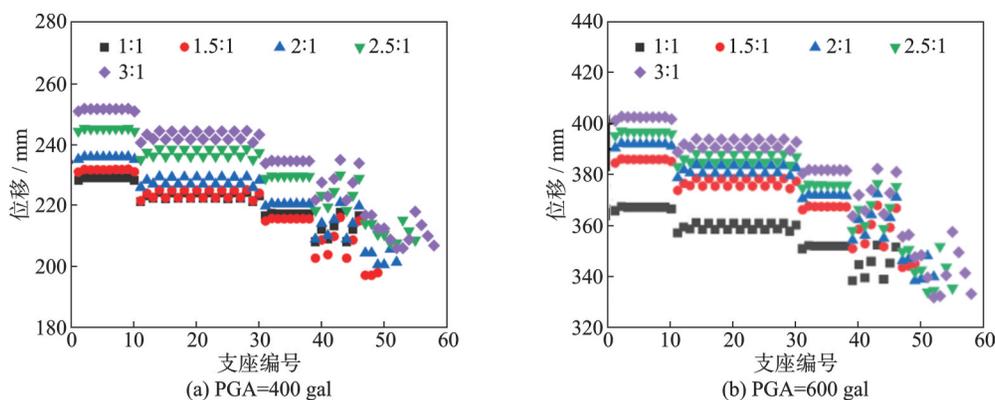


图7 X向隔震层支座位移

Fig. 7 Displacement of the seismic isolation layer support (X-direction)

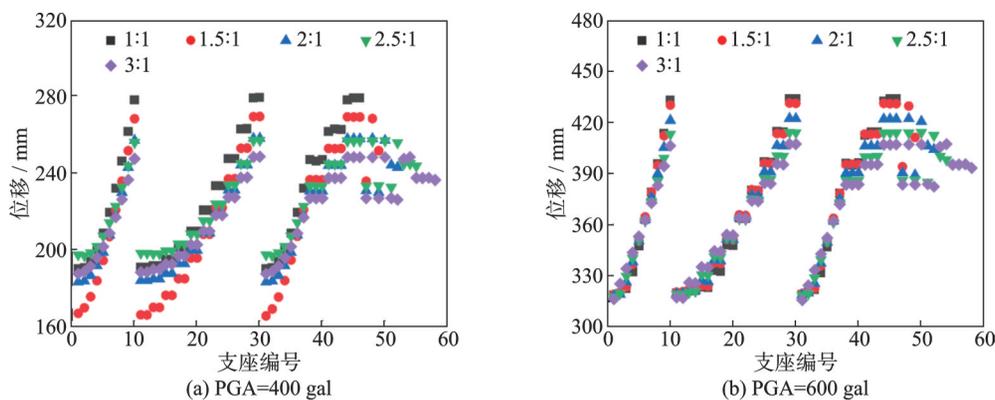


图8 Y向隔震层支座位移

Fig. 8 Displacement of the seismic isolation layer support (Y-direction)

### 3 结构扭转控制

上述基于周期比、位移比等控制指标分析了不规则框架隔震结构在不同地震作用下的扭转效应,发现 GZKJ-1 模型在所有案例中扭转最显著,故选取 GZKJ-1 为对象进行地震时程分析,详细分析 LRB 刚度占比和隔震层刚心位置对平面不规则隔震结构扭转控制的影响,并提出隔震结构的扭转控制策略。

#### 3.1 基于 LRB 刚度占比的扭转控制

##### 3.1.1 扭转控制方法

使用直接设计法,计算得到结构柱底和墙底轴力,初步确定隔震支座的数量与直径。对 GZKJ-1 模型,选用直径为 500 和 600 mm 两种型号的隔震支座,优先在结构扭转较大方向的外侧布置铅芯橡胶支座,其余位置采用天然橡胶支座。根据 LRB 刚度占比的不同,设计了 6 种不同布置方案(命名为 A1~A6),各方案保持相近的偏心率,误差在 ±0.30% 以内。LRB 刚度占比  $\alpha$  计算公式如下:

$$\alpha = \frac{K_R \times N_R}{K_R \times N_R + K_N \times N_N} \times 100\% \quad (1)$$

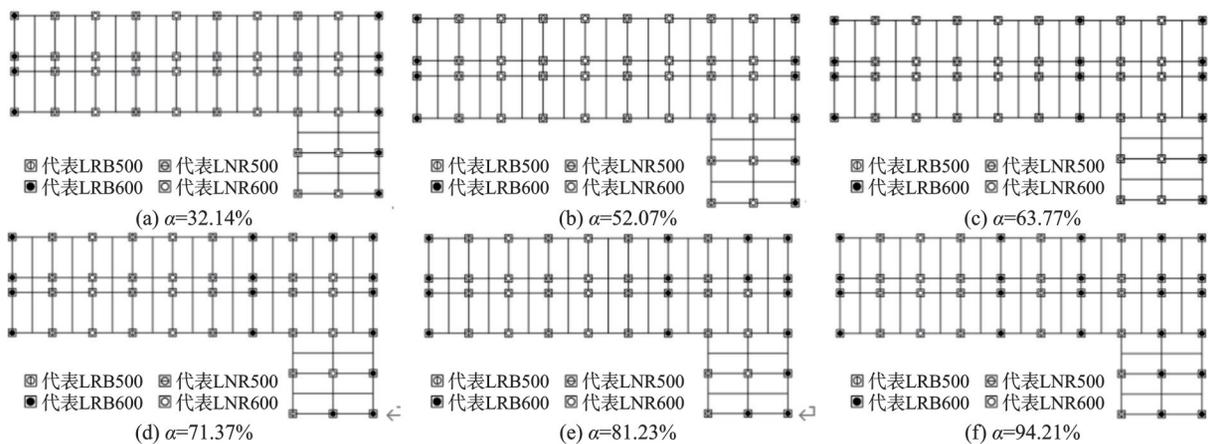


图 9 隔震支座布置图(六种方案)

Fig. 9 Seismic isolation bearings layout diagram (six schemes)

式中  $K_R$  和  $K_N$  分别表示 LRB 和 LNR 在剪应变为 100% 时的等效刚度,对应参数取值见表 2;  $N_R$  和  $N_N$  分别表示 LRB 和 LNR 的数量。

各布置方案的隔震层参数如表 6 所示,隔震支座平面布置方案如图 9 所示。

表 6 隔震层参数

Tab. 6 Seismic isolation layer parameters

布置方案	LRB 刚度占比 $\alpha/\%$	偏心率/ $\%$	
		X 向	Y 向
A1	32.14	2.003	2.281
A2	52.07	2.119	2.063
A3	63.77	2.198	2.359
A4	71.37	1.957	2.239
A5	81.23	2.057	2.154
A6	94.21	1.927	2.318

##### 3.1.2 结构响应与控制效果

###### (1) 底部剪力比

表 7 给出了不同 LRB 刚度占比下结构底部剪力比信息。由表 7 可知,随 LRB 刚度占比增大,隔震层整体刚度增加,结构周期减小,减震效果减弱。因此,X,Y 向底部剪力比增大,X 向最大底部剪力比达 0.43。虽满足降低一度设防目标,但隔震效果下降。

表 7 结构底部剪力比

Tab. 7 Bottom shear ratio of structure

LRB 的刚度占比 $\alpha/\%$	X 向底部剪力			Y 向底部剪力		
	非隔震/kN	隔震/kN	比值	非隔震/kN	隔震/kN	比值
32.14		3693.93	0.36		3513.64	0.34
52.07		3821.33	0.37		3593.58	0.35
63.77	10198.03	3855.73	0.38	10173.25	3716.09	0.36
71.37		4062.07	0.40		3775.29	0.37
81.23		4158.64	0.41		4022.04	0.40
94.21		4402.95	0.43		4100.54	0.40

(2)层间位移比

图10给出了两种地震工况下不同LRB刚度占比Y向层间位移比曲线。由图10可知,在保证隔震

层偏心率基本不变的前提下,随着LRB刚度比的增大,上部结构和隔震层的层间位移比呈现逐渐减小的变化趋势。

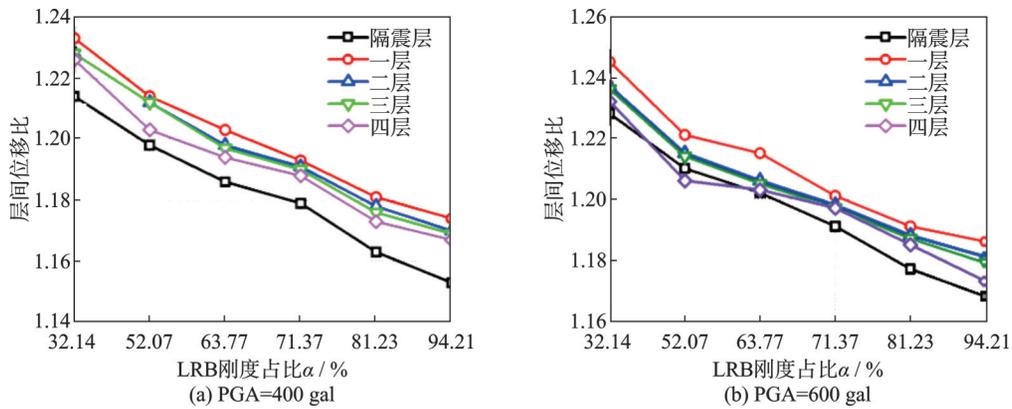


图10 上部结构Y向层间位移比

Fig. 10 Inter-story displacement ratio of the superstructure in the Y direction

(3)层间扭转角

图11和12分别给出两种地震工况下,上部结构和隔震层不同LRB刚度占比下层间扭转角的变化

曲线。由图11和12分析可知,随着LRB刚度占比的不断增大,上部结构和隔震层层间扭转角均逐渐减小。

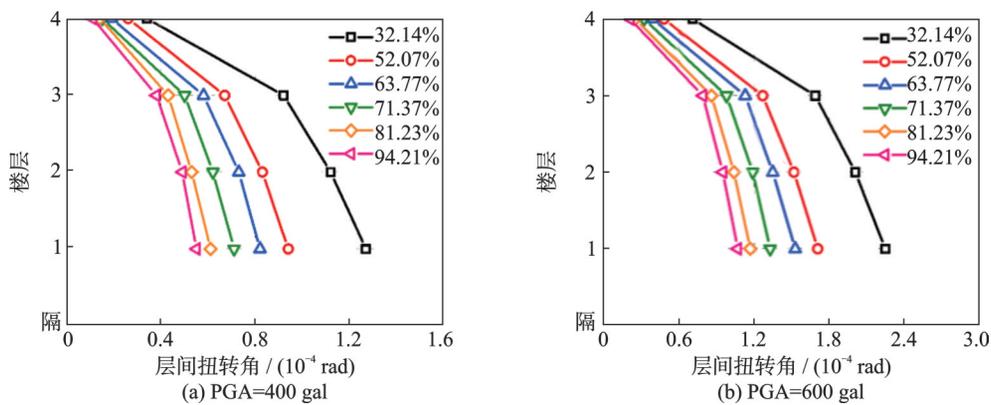


图11 上部结构层间扭转角

Fig. 11 Inter-story torsion angle of the superstructure

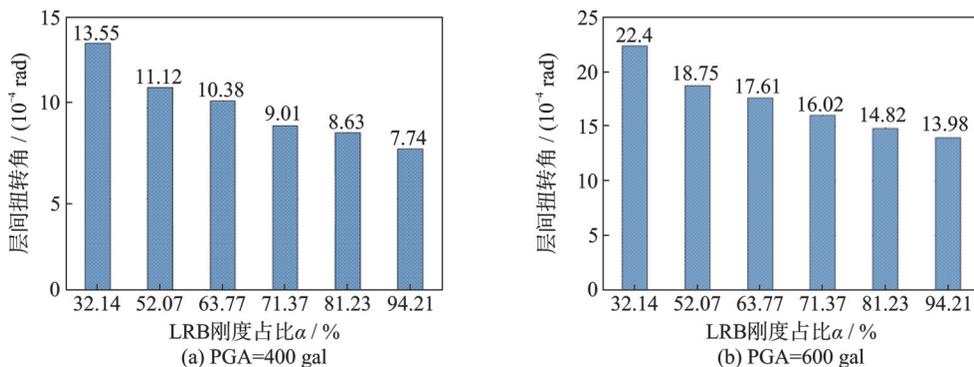


图12 隔震层层间扭转角

Fig. 12 Inter-story torsion angle of the seismic isolation layers

综上所述,框架隔震结构增加隔震支座刚度占比,可减小结构的层间位移比、降低层间扭转角,结构扭转效应逐渐降低,但结构底部剪力比增大,结构减震效果逐渐变差。隔震层LRB刚度占比对层间

位移比和底部剪力比的影响如图13所示。

对图13进一步分析可知,框架隔震结构通过合理地选取隔震支座数量及布置方式,底部剪力比余量较大,满足结构强度要求,为有效控制结构扭转效

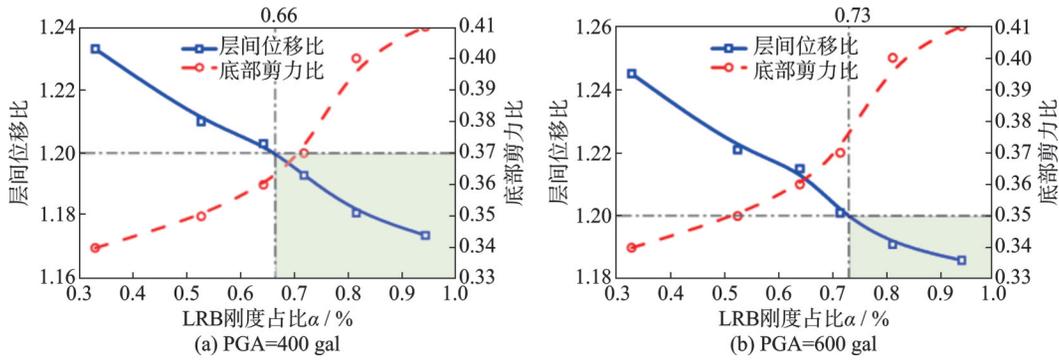


图 13 LRB 刚度占比  $\alpha$  的影响  
Fig. 13 The impact of LRB stiffness ratio  $\alpha$

应,在保证结构层间位移比小于 1.2 及底部剪力比小于 0.5 的前提下,建议 8 度设防地震下,隔震层 LRB 刚度占比宜大于 55%;8 度罕遇地震下,隔震层 LRB 刚度占比宜大于 66%;8 度极罕遇地震下,隔震层 LRB 刚度占比宜大于 73%。

### 3.2 基于隔震层刚心位置的扭转控制

#### 3.2.1 隔震层偏心率

保证原 GZKJ-1 模型隔震支座的个数、直径不变,调整隔震层刚度中心以获得不同的隔震层偏心率,为探究隔震层偏心率对结构扭转的控制作用,根据隔震层刚心位置的不同设计两种支座布置方案(编号为 B1 和 B2)。各布置方案的偏心率如表 8 所示,三种布置方案相应的支座布置如图 14 所示。

率,为探究隔震层偏心率对结构扭转的控制作用,根据隔震层刚心位置的不同设计两种支座布置方案(编号为 B1 和 B2)。各布置方案的偏心率如表 8 所示,三种布置方案相应的支座布置如图 14 所示。

#### 3.2.2 结构响应与控制效果

##### (1) 底部剪力比

不同隔震层刚心位置下结构底部剪力比信息如表 9 所示,各模型在 X 向和 Y 向的底部剪力比基本不发生变化,调整隔震层的偏心率对结构减震效果基本不产生影响。

表 8 不同布置方案下隔震层偏心率

Tab. 8 Eccentricity of the seismic isolation layer under different arrangement schemes

方向	模型编号	重心坐标/m	刚心坐标/m	偏心距/m	弹力半径/m	偏心率/%
X 向	原隔震结构(GZKJ-1)		137.62	+0.73	21.544	+3.37
	B1	138.35	137.83	+0.51	21.836	+2.34
	B2		139.00	-0.65	22.219	-2.94
Y 向	原隔震结构(GZKJ-1)		33.49	+0.32	21.544	+1.50
	B1	33.81	33.52	+0.29	21.836	+1.31
	B2		33.51	+0.31	22.219	+1.39

注:“+”表示隔震层刚度中心与上部结构刚度中心在上部结构质量中心同侧;“-”表示隔震层刚度中心与上部结构刚度中心在上部结构质量中心对侧。

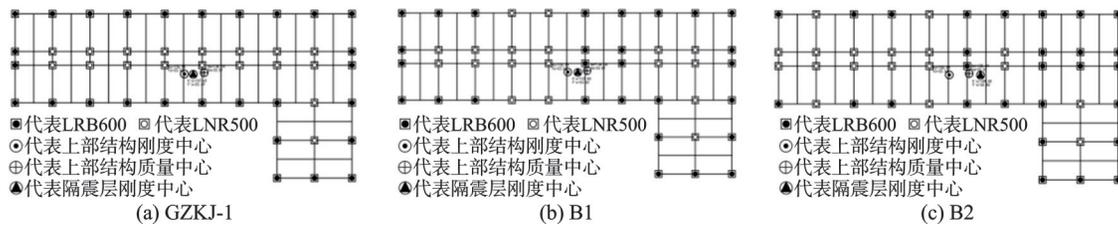


图 14 隔震支座布置图(三种方案)

Fig. 14 Layout diagram of seismic isolation bearings(three schemes)

表 9 底部剪力比

Tab. 9 Bottom shear ratio

模型编号	X 向底部剪力			Y 向底部剪力		
	非隔震/kN	隔震/kN	比值	非隔震/kN	隔震/kN	比值
原隔震模型		4172.50	0.41	4023.71	4023.71	0.40
B1	10198.03	4080.01	0.40	10173.25	4008.84	0.39
B2		4084.45	0.40		4019.68	0.40

### (2)层间位移比

两种地震工况下不同隔震层刚心位置Y向层间位移比曲线如图15所示。试验结果表明,隔震层偏心率减小,上部结构和隔震层的层间位移比降低。反向设置隔震层的偏心率,上部结构的位移比将进一步减小,而隔震层的层间位移比将增大,但均小于1.2的规范限值。

### (3)层间扭转角

图16和17分别给出了两种地震工况下,上部结构和隔震层不同隔震层刚心位置下层间扭转角的变化曲线。从图16和17可知,隔震层偏心率的减小将引起结构层间扭转角同步减小;隔震层刚心和上部结构刚心布置于上部结构质心两侧情况下的上部结构层间扭转角小于隔震层刚心和上部结构刚心布置于上部结构质心同侧的情况,但隔震层层间扭转角将增大。

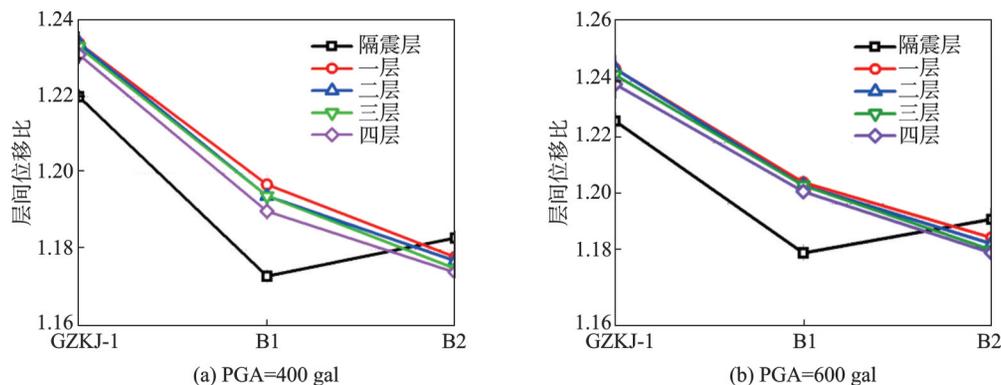


图15 上部结构Y向层间位移比

Fig. 15 Inter-story displacement ratio of the superstructure in the Y-direction

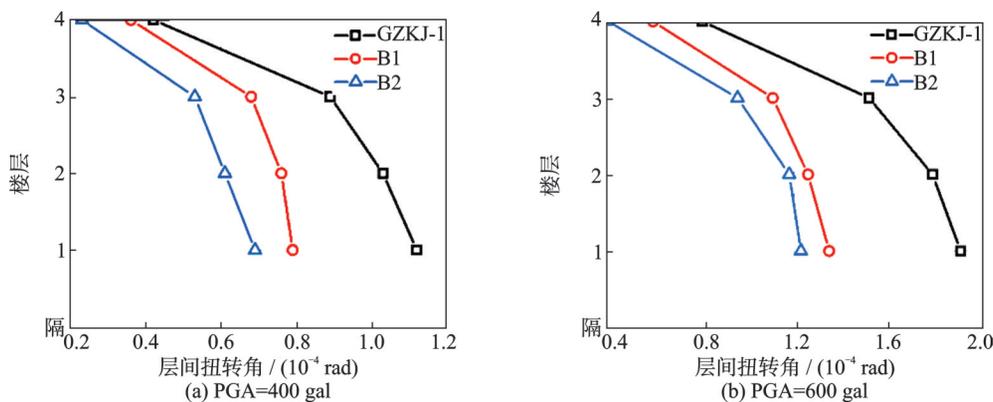


图16 上部结构层间扭转角

Fig. 16 Inter-story torsion angle of the superstructure

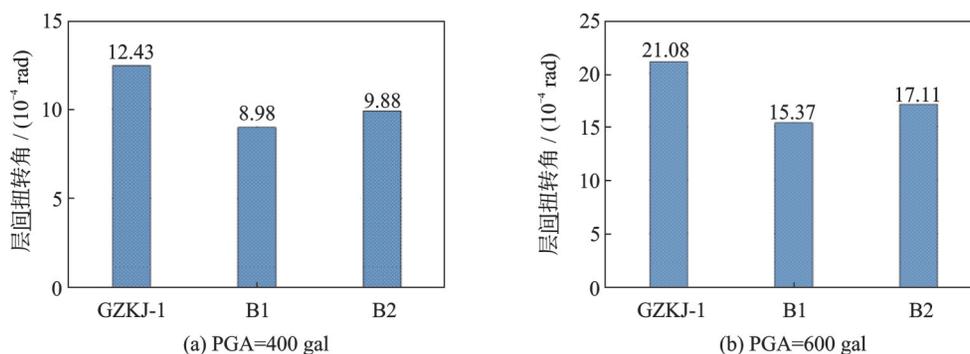


图17 隔震层层间扭转角

Fig. 17 Inter-story torsion angle of the seismic isolation layers

由以上分析可得,控制隔震层的刚度不变,仅调整隔震层的支座布置以减小隔震层偏心率,可减小结构层间位移比及层间扭转角;当隔震层刚心与

上部结构刚心布置于上部结构质心两侧时,平面不规则隔震结构上部结构层间位移比和层间扭转角将降低,但隔震层的扭转效应将增加。总而言之,

在隔震设计时,可在保证隔震层扭转位移比小于 1.2 的基础上,减小隔震层的偏心率并将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。

## 4 结 论

(1)平面不规则框架隔震结构随凸出分枝长宽比  $B/W$  的增大并不一定导致结构扭转的加剧。对比 5 个不规则模型,无论是在 8 度设防、罕遇还是极罕遇地震作用下,随着  $B/W$  比值的增大,结构  $X$  向位移比逐渐增大, $Y$  向位移比逐渐减小。 $X$  向扭转变形由大到小依次为 GZKJ-1, GZKJ-1.5, GZKJ-2, GZKJ-2.5 和 GZKJ-3;  $Y$  向扭转变形由大到小依次为 GZKJ-3, GZKJ-2.5, GZKJ-2, GZKJ-1.5 和 GZKJ-1。

(2)结构扭转判断中可将层间扭转角作为评判结构扭转效应的补充指标。研究发现,层间扭转角的变化规律同位移比变化趋势一致,同时,层间扭转角可直观感受在不同强度地震作用下结构扭转效应的变化和增降幅度。

(3)通过综合控制结构扭转和结构减震系数可得到合理的 LRB 刚度占比目标。在满足结构层间位移比小于 1.2 和底部剪力比小于 0.5 的前提下,建议在 8 度设防、罕遇和极罕遇地震的条件下,隔震层 LRB 刚度占比宜分别大于 55%, 66% 和 73%。此建议可作为其余设防烈度条件的参考。

(4)当隔震层刚心与上部结构刚心布置于上部结构质心的两侧,平面不规则隔震结构上部结构扭转效应将降低,但隔震层扭转效应将增大。

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 刘阳,刘文光,何文福,等. 复杂博物馆隔震结构地震模拟振动台试验研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(4): 107-112.  
LIU Yang, LIU Wenguang, HE Wenfu, et al. Shaking table tests for a complex museum's isolated structure[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(4): 107-112.
- [3] 吴应雄,董昕珺,廖文彬,等. 水平初位移下基础隔震结构现场动力特性测试[J]. 振动工程学报, 2024, 37(4): 578-587.  
WU Yingxiong, DONG Xinjun, LIAO Wenbin, et al. Field dynamic characteristics testing of foundation isolation structures under horizontal initial displacement[J]. Journal of Vibration Engineering, 2024, 37(4): 578-587.
- [4] SEGUIN C E, ALMAZAN J L, DE La Llera J C. Torsional balance of seismically isolated asymmetric structures[J]. Engineering Structures, 2013, 46: 703-717.
- [5] 马永宏,刘文光,何文福. 不规则高层隔震结构隔震层偏心率对地震响应的影响分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2011, 33(5): 1-6.  
MA Yonghong, LIU Wenguang, HE Wenfu. Influence analysis of different eccentricity ratio to seismic response of isolated irregular high-rise building[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2011, 33(5): 1-6.
- [6] SIRINGORINGO D M, FUJINO Y. Seismic response analyses of an asymmetric base-isolated building during the 2011 Great East Japan (Tohoku) Earthquake[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2015, 22(1): 71-90.
- [7] 许立英,吴应雄,田泓. 长周期地震动下软土地基的偏心基础隔震结构振动台试验研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(8): 1-11.  
XU Liying, WU Yingxiong, TIAN Hong. Shaking table test of eccentric base-isolated structure on soft soil foundation under long-period ground motion[J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(8): 1-11.
- [8] 傅金华. 日本抗震结构及隔震结构的设计方法[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [9] 叶昆,李黎. 近断层脉冲地震作用下偏心基础隔震结构的地震反应研究[J]. 工程力学, 2009, 26(7): 163-169.  
YE Kun, LI Li. Research on seismic response of asymmetric base-isolated structures under near-fault pulse-like ground motions[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(7): 163-169.
- [10] 戴君武,张敏政,郭迅,等. 多层偏心结构非线性地震反应分析[J]. 地震工程与工程振动, 2003, 23(5): 75-80.  
DAI Junwu, ZHANG Minzheng, GUO Xun, et al. Nonlinear seismic analysis of multi-story asymmetric building structures[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2003, 23(5): 75-80.
- [11] VOJKO Kilar, DAVID Koren. SEISMIC behaviour of asymmetric base isolated structures with various distributions of isolators[J]. Engineering Structures, 2008,

- 31(4): 910-921.
- [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(4): 200-209.
- CAI Liangkai, BO Wen, DAI Junwu, et al. Research on torsional control and influence of isolation layer of base isolation structure[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2022, 42(4): 200-209.
- [13] TENA-COLUNGA A, ZAMBRANA-ROJAS C. Dynamic torsional amplifications of base-isolated structures with an eccentric isolation system[J]. Engineering Structures, 2006, 28(1): 72-83.
- [14] 江宜城, 唐家祥, 李媛萍. 基础隔震结构扭转振动反应分析[J]. 噪声与振动控制, 2000, 20(1): 12-14.
- JIANG Yicheng, TANG Jiaxiang, LI Yuanping. Analysis of torsional vibration response of base-isolated structures[J]. Noise and Vibration Control, 2000, 20(1): 12-14.
- [15] 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.
- [16] 孙任武, 杨晓东, 刘怀超. 基于隔震设计的不规则结构扭转效应控制研究[J]. 四川建筑科学研究, 2022, 48(4): 10-16.
- SUN Renwu, YANG Xiaodong, LIU Huaichao. Research on torsional effect control of irregular structure based on seismic isolation design[J]. Sichuan Building Science, 2022, 48(4): 10-16.
- [17] 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(1): 46-55.
- LIU Tielin, YANG Yue, LI Wenbo. Analytical solutions for torsional response of single-story eccentric frame structure subjected to sinusoidal wave passage excitation[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2022, 42(1): 46-55.
- [18] 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.
- WANG Jianqiang, DING Yonggang, LI Dawang. Lateral-torsional coupled seismic responses of sliding base-isolated structures with eccentric superstructure[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(12): 96-100.
- [19] 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.
- 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.
- [20] 贺进. 基础隔震结构扭转效应研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- HE Jin. Research on factors influencing the torsion of base isolation structure[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.
- [21] 季菲菲. 基础隔震结构位移的扭转放大效应研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
- JI Feifei. Torsional displacement amplification of base-isolated structures[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.
- [22] 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. 建筑抗震设计规范(2016版): GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- 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. Code for seismic design of buildings (2016 edition): GB 50011—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.
- [23] American Society of Civil Engineers. Minimum design loads for buildings and other structures: ASCE/SEI 7-10[S]. Reston: American Society of Civil Engineers, 2010.
- [24] 陈道政, 赵杉杉, 陈锐. 隔震技术在某体育馆加固工程中的应用与分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2016, 38(2): 133-138.
- CHEN Daozheng, ZHAO Shanshan, CHEN Rui. Application and analysis of seismic isolation technique in gym reinforcement[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2016, 38(2): 133-138.
- [25] 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. 建筑隔震设计标准: GB/T 51408—2021[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
- 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. Standard for seismic isolation design of building: GB/T 51408—2021[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021.

## Torsion effect and control of foundation seismic isolation structure of plane irregular multi-layer frame structure

PAN Qin-feng<sup>1</sup>, LIN Huan-zhou<sup>2</sup>, XU Li-ying<sup>3</sup>, LU Li-xing<sup>4</sup>, WU Ying-xiong<sup>4,5</sup>, CAO Lin-kun<sup>6</sup>

(1. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China; 2. China Construction Fourth Engineering Division Corp., Ltd., Guangzhou 510630, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China; 4. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 5. Fujian Provincial Key Laboratory on Multi-Disasters Prevention and Mitigation in Civil Engineering, Fuzhou 350108, China; 6. Xiamen Kunneng Engineering Construction Co., Ltd., Xiamen 361001, China)

**Abstract:** Plane irregular buildings are prone to torsion and cause serious damage to the structure. The analysis and control of structural torsion effect is the key to this kind of structural design. In this regard, the simulation calculation of the planar irregular multi-story frame model in the 8-degree fortification zone was carried out, and the planar L-type four-story frame isolation model of five typical class B buildings was established. The ratios of the length  $B$  and width  $W$  of the protruding limbs of the structure were set to be 1:1, 1.5:1, 2:1, 2.5:1 and 3:1, respectively. The dynamic characteristics and seismic response of different structures were analyzed. The influence of the LRB stiffness ratio and the rigid center position of the isolation layer on the structural torsion was discussed, and the effective control method of structural torsion was proposed. The results show that with the increase of the length-width ratio  $B/W$  of the protruding limb, the  $X$ -direction torsion of the structure increases gradually, and the  $Y$ -direction torsion decreases gradually. Increasing the proportion of LRB stiffness can reduce the torsional effect of the structure. By comprehensively controlling the structural torsion and structural damping coefficient, a reasonable proportion of LRB stiffness can be obtained. The proportion of LRB stiffness of the isolation layer under the condition of 8 degrees earthquake is proposed. At the same time, the rigid center of the isolation layer and the rigid center of the superstructure are arranged on both sides of the mass center of the superstructure to suppress the torsion of the superstructure of the plane irregular structure.

**Key words:** reinforced concrete frame structure; base seismic isolation; irregular plane; torsional control; simulation calculations

**作者简介:** 潘钦锋(1975—),男,硕士,副教授。E-mail: phnpan@163.com。

**通讯作者:** 许立英(1981—),女,博士,讲师。E-mail: lying\_xu@126.com。