

文章编号:1673-9469(2025)01-0001-08

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2025.01.001

基于整体设计法的L型不规则结构隔震设计

滕振超,张家浩*,霍静轶,黄漪澜,计静

(东北石油大学 土木建筑工程学院,黑龙江 大庆 163318)

摘要:为减少L型不规则结构的扭转效应,探讨隔震设计中隔震层三种抗震缝设置方案对扭转效应的控制效果,提出针对L型不规则结构的整体设计流程。基于复振型分解反应谱法,对某L型建筑建立上部结构-隔震层-下部结构整体模型,通过迭代计算确定隔震装置的等效刚度与等效阻尼比,并进行修正反应谱计算;在SAUSG中对最优方案补充弹塑性时程分析,验算罕遇地震下支座极限位移与楼层位移角。结果表明,整体设计法以底部剪力比确定隔震目标,采用多计算模型包络,能更直观、方便地进行隔震设计。采取设置竖向抗震缝的方案将扭转位移比从1.60降低至1.16,位移角从1/212降低至1/505,有效控制了扭转效应。

关键词:隔震设计;扭转效应控制;整体设计法;SAUSG弹塑性时程分析;L型不规则结构

中图分类号:TU318

文献标识码:A

Seismic Isolation Design of L-shaped Plane Irregular Structure Based on Overall Design Method

TENG Zhenchao, ZHANG Jiahao*, HUO Jingyi, HUANG Yilan, JI Jing

(School of Civil Engineering and Architecture, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China)

Abstract: To reduce the torsional effect of L-shaped irregular structures, this paper explores the control effect of three seismic joint design schemes for the isolation layer on torsional effect in seismic isolation design, and proposes an overall design process for L-shaped irregular structures. Based on the complex mode decomposition response spectrum method, an overall model of the upper structure isolation layer lower structure of an L-shaped building is established. The equivalent stiffness and damping ratio of the isolation device are determined through iterative calculation, and the modified response spectrum calculation is carried out; Add elastic-plastic time history analysis to the optimal solution in SAUSG, and verify the ultimate displacement of the support and the displacement angle of the floor under rare earthquakes. The overall design method determines the seismic isolation target based on the bottom shear ratio and uses multiple calculation model envelopes to make seismic isolation design more intuitive and convenient. The scheme of setting vertical seismic joints was adopted to reduce the torsional displacement ratio from 1.60 to 1.16, and the displacement angle from 1/212 to 1/505, effectively controlling the torsional effect.

Key words: isolation design; control of torsion effect; overall design method; SAUSG elastic-plastic time history analysis; L-shaped irregular structure

历次灾害调查表明,不规则建筑在地震作用下受扭转效应破坏严重^[1-2]。加强对不规则结构

的隔震设计研究具有工程价值和应用意义^[3]。Wang等^[4]对基础隔离的多层钢筋混凝土框架结

收稿日期:2024-01-04

基金项目:黑龙江省自然科学基金联合引导项目(LH2020E018);大庆市指导性科技计划项目(ZD-2021-40);东北石油大学创新引导项目(2020YDL-02)

第一作者:滕振超(1976—),男,河北故城人,博士,副教授,主要从事结构工程、防灾减灾及防护工程研究。

*通信作者:张家浩(2001—),男,广东江门人,硕士研究生,主要从事结构工程、隔震与消能减震研究。

构进行了模态分析。干洪等^[5-7]对平面不规则大底盘单塔楼进行隔震分析,并对比了层间隔震、基础隔震以及传统抗震结构模型。张曼生等^[8]分析了隔震层水平刚度和阻尼比对结构层加速度、总剪力及总倾覆力矩的减震效率的影响。凯里^[9]研究了平面不规则结构在地震中的扭转反应,特别是偏心方向对位移比的影响。孙任武等^[10]通过调整隔震支座的类型和布置位置,研究了不同隔震方案对结构扭转效应的影响。黄小宁等^[11-12]提出在单向地震作用下,平面不规则结构的运动微分方程,并评估了该隔震系统在地震中的表现。刘德稳等^[13]对比了三种不同的L型不规则隔震结构布置方案,从建筑功能和减震效果两个方面进行评价。马永宏^[14]阐述了不规则隔震结构的研究现状,包括隔震层支座的布置、隔震技术对扭转效应的改善效果,以及隔震层偏心率对地震响应的影响。但传统隔震设计采用分部设计法,未对隔震构件作性能设计,其沿用《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)^[15](简称《抗规》)的反应谱曲线,未充分考虑隔震结构在长周期下的整体动力特性。

本文先给出L型不规则结构整体设计法设计流程,以实际工程为例,建立上部结构-隔震层-下部结构模型,采用复振型分解反应谱法结合迭代的方式对隔震体系进行整体分析。同时采取不设置抗震缝、隔震层贯穿设置抗震缝、仅隔震层以上设置抗震缝三种方案研究结构的扭转效应。最后补充罕遇地震下弹塑性时程分析结果,对比了抗震缝设置位置对不规则隔震结构扭转效应控制的影响。

1 L型不规则结构整体设计法流程

1.1 基于《建筑隔震设计标准》确定隔震目标

《建筑隔震设计标准》(简称《隔标》)规定,隔震结构在底部剪力比小于0.5时,上部结构可按本地区设防烈度降低1度来确定抗震措施;底部剪力比大于0.5时,按本地区设防烈度采取相应的抗震措施;且与竖向地震作用有关的抗震措施,应按本地区设防烈度确定,不得降低^[16]。基于工程经济性和安全度考虑,底部剪力比应设定为0.5以下,并通过仅上部结构设置抗震缝、隔震层不设抗震缝来降低不规则结构的扭转效应。

1.2 隔震支座选取及布置

根据隔震支座在重力荷载代表值下长期受压

应力限值来初步估算支座尺寸,根据屈重比不小于2%来估算铅芯橡胶支座的比例。对于不规则结构,主要是通过隔震支座的合理布置来修改结构偏心扭转效应,因此隔震支座在布置上要遵循隔震层刚心、质心尽量重合,偏心率不高于3%的原则。

1.3 隔震层等效刚度比与等效阻尼比计算

隔震层等效刚度比与等效阻尼比由迭代计算确定,迭代过程如下:

(1)将铅芯橡胶支座所承受的上部结构竖向荷载换算成质量 m 。

(2)根据假定的隔震层初始位移和初始刚度、屈服位移,按下式计算等效水平刚度和等效阻尼比。

$$K_{eq} = K_y + \frac{Q_y - K_y D_y}{D} \quad (1)$$

$$\zeta_{eq} = \frac{4Q_y(D - D_y)}{2\pi K_{eq} D^2} \quad (2)$$

式中: K_{eq} 为隔震支座等效水平刚度,kN/m; ζ_{eq} 为铅芯橡胶支座的等效阻尼比; Q_y 为隔震支座水平屈服力设计值,kN; D 为隔震层位移,mm; D_y 为铅芯橡胶支座的屈服位移,mm; K_y 为铅芯橡胶支座屈服后刚度,kN/m。

(3)根据上部结构竖向荷载换算的质量 m 和上式计算得到的等效阻尼比带入下式,得到隔震支座的等效阻尼系数。

$$C_{eq} = \frac{4m\pi\zeta_{eq}}{T} \quad (3)$$

式中: C_{eq} 为铅芯橡胶支座的等效阻尼系数,N·s/m; m 为铅芯橡胶支座承受的上部结构质量,t; T 为隔震结构第一自振周期,s。

(4)将支座的等效刚度和等效阻尼系数输入至计算程序,通过复振型分解反应谱分析求出隔震层位移 D_i ,将其代入上述公式得到新的等效水平刚度、等效阻尼比和等效阻尼系数,经反复迭代后,当第 i 次隔震层位移比第 $i-1$ 次结果误差小于 $|D|$,或等效阻尼比误差小于 $|\zeta_{eq}|$ 时,认为迭代收敛,此结果作为后续整体结构分析的依据。

$$D_i - D_{i-1} < |D| \quad (4)$$

$$\zeta_i - \zeta_{i-1} < |\zeta_{eq}| \quad (5)$$

式中: $|D|$ 为隔震层位移误差限值,一般为0.2 mm; $|\zeta_{eq}|$ 为等效阻尼比误差限值,一般为0.1%。

1.4 选取地震波进行弹塑性时程分析

选取地震波进行设防地震下弹性时程分析,对比复振型分解反应谱法与时程分析基底剪力计

算结果,通过调整程序中的地震力放大系数,使反应谱法与多条时程曲线计算所得的楼层剪力平均值大致相当,然后取包络值作为地震作用结果,并验算上部结构在设防地震作用下楼层最大弹性层间位移。

在设防地震作用下,隔震结构上部构件应根据性能要求划分为关键构件、重要水平构件和普通水平构件、普通竖向构件,且满足弹性设计要求。最后补充罕遇地震(含极罕遇地震)作用下弹塑性时程分析,验算上部结构楼层内弹塑性层间位移和隔震层位移,不规则结构的隔震设计流程见图 1。

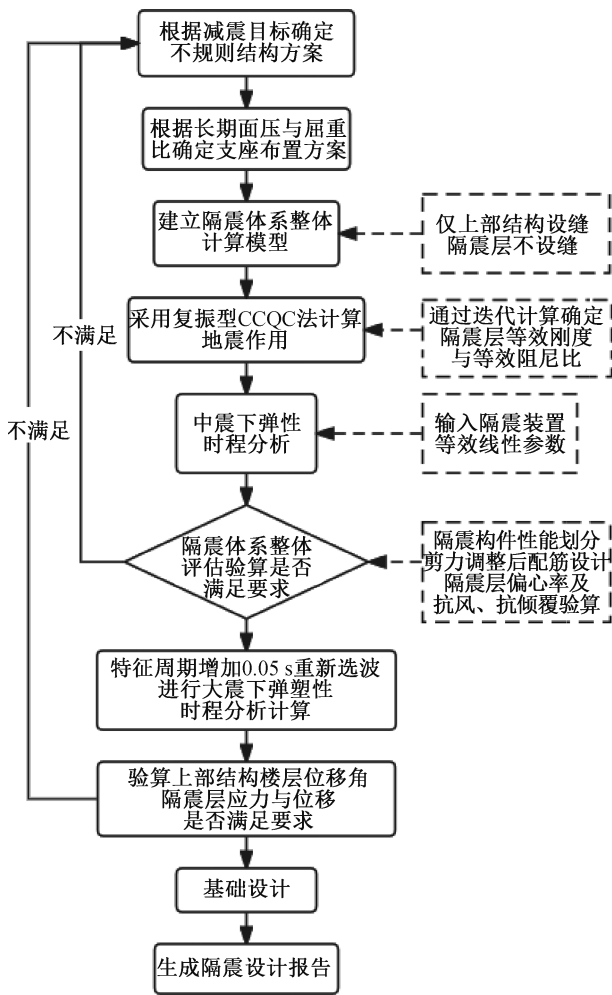


图 1 不规则结构隔震设计流程

Fig. 1 Irregular structure isolation design process

2 工程概况

该工程为某大学新建 L 型配套宿舍楼,建筑面积约 6 500 m²,建筑高度 27.5 m;主体结构地上 6 层,地下一层(层高 5 m);采用地下室顶板隔震方案,隔震层高为 1.7 m。设计基本参数见表 1,该

建筑标准层平面见图 2,建筑立面见图 3。

表 1 设计基本参数

Tab. 1 Basic parameters of design

设计基本参数	参数值
设防烈度	8 度(0.2 g)
设计地震分组	I 组
场地类别	III 类
地面粗糙度	B 类
场地特征周期	0.45 s
基本风压	0.6 kN/m ²
设防类别	重点设防类

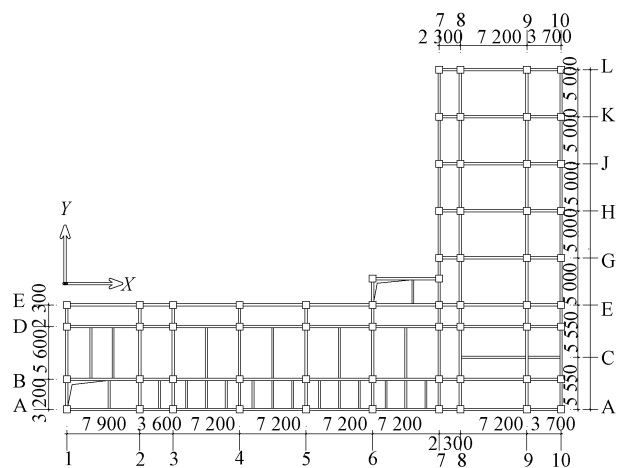


图 2 标准层结构布置(单位: mm)

Fig. 2 Standard layer structure arrangement (unit: mm)

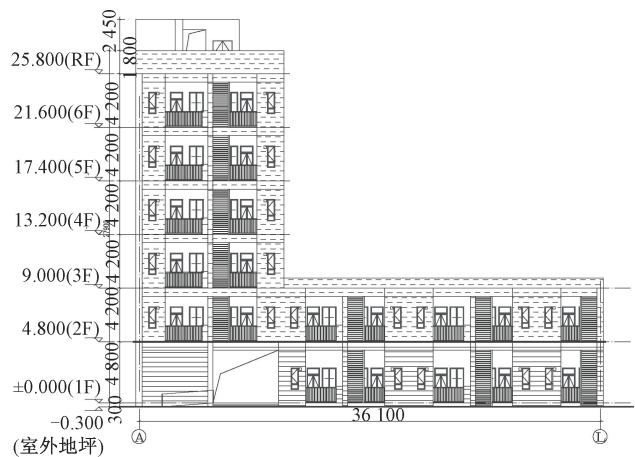


图 3 A—L 轴建筑立面图(单位: mm)

Fig. 3 A—L axis building elevation view (unit: mm)

3 不规则结构隔震设计流程验证

目前我国《抗规》对不规则结构的扭转效应通过扭转位移比进行控制。当扭转位移比超过 1.5 时,距离刚度中心较远的竖向构件最先出现破坏,继而导致整个结构的失效,扭转位移比的计算公式为

$$\Delta = 1 + \frac{\theta L}{2\mu} \quad (6)$$

式中: Δ 为结构层扭转位移比; θ 为结构层扭转位移角,rad; μ 为楼层两端抗侧力构件水平位移平均值,mm; L 为结构层垂直于侧移方向的投影长度,mm。

根据减震目标确定该工程结构布置方案,竖向构件平均层间位移取单向地震作用下按规定水平力计算并考虑偶然偏心工况的计算结果,如图4所示,平均层间位移最大值为6.62 mm。

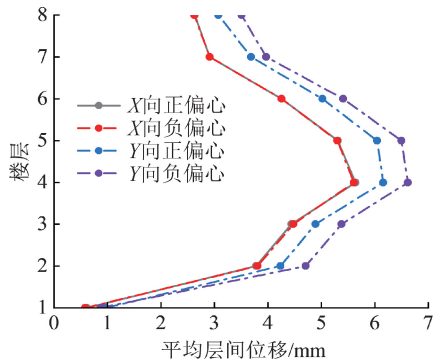


图4 楼层平均层间位移

Fig. 4 Average inter-story displacement of floors

结构层的扭转位移角等于楼层所承受的扭矩与扭转刚度的比值,计算公式如下:

$$\theta_i = \frac{T_i}{K_{i\theta}} \quad (7)$$

式中: T_i 为第*i*结构层扭矩,kN·m; $K_{i\theta}$ 为第*i*结构层计算扭转刚度,kN·m/rad。

3.1 不规则结构扭转作用分析

结构层扭转变形如图5所示,计算上部结构地震作用时,由于各层剪力作用于楼层质量中心,而不规则结构楼层刚度中心与质量中心往往不重合,地震作用下楼层将绕刚度中心发生扭转。

不规则结构楼层的质量中心坐标(X_m, Y_m)计算公式如下:

$$X_m = \frac{\sum_{i=1}^n G_i X_i}{\sum_{i=1}^n G_i}; Y_m = \frac{\sum_{i=1}^n G_i Y_i}{\sum_{i=1}^n G_i} \quad (8)$$

式中: G_i 为第*i*个竖向构件承受的重力荷载代表值,kN; X_i 为第*i*个竖向构件中心位置*X*方向的坐标; Y_i 为第*i*个竖向构件中心位置*Y*方向的坐标。

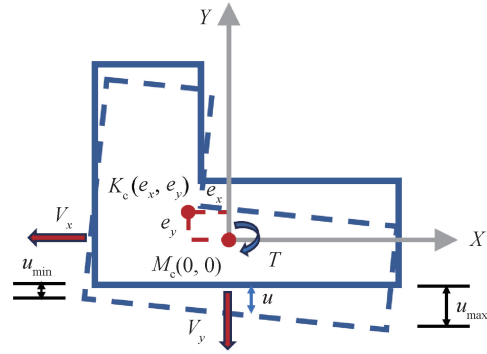


图5 结构扭转变形示意图

Fig. 5 Schematic diagram of structural torsional deformation

不规则结构楼层的刚度中心坐标(X_k, Y_k)可以把抗侧力构件的抗侧刚度看作假想面积,把假想面积的形心视为刚度中心,计算公式如下:

$$X_k = \frac{\sum_{i=1}^n K_{iy} X_i}{\sum_{i=1}^n K_{iy}}; Y_k = \frac{\sum_{i=1}^n K_{ix} Y_i}{\sum_{i=1}^n K_{ix}} \quad (9)$$

式中: K_{iy} 为第*i*个抗侧力构件在*Y*方向的刚度,kN/m; K_{ix} 为第*i*个抗侧力构件在*X*方向的刚度,kN/m。

结构楼层各方向的偏心距计算公式如下:

$$e_x = |X_k - X_m|; e_y = |Y_k - Y_m| \quad (10)$$

式中: e_x 为结构层在*X*方向上的偏心距,m; e_y 为结构层在*Y*方向上的偏心距,m。

根据上述公式,计算第四结构层偏心距,如表2所示:

表2 第四结构层偏心距 (单位:m)

Tab. 2 Eccentricity of the fourth structural layer

(unit: m)			
方向	质量中心	刚度中心	偏心距
X向	33.749	35.468	1.719
Y向	17.027	17.372	0.344

结构层的计算扭转刚度为

$$K_{i\theta} = \sum_{i=1}^n (K_{iy} X_i^2 + K_{ix} Y_i^2) \quad (11)$$

计算弹力半径为

$$R_x = \sqrt{\frac{K_{i\theta}}{\sum_{i=1}^n K_{ix}}}; R_y = \sqrt{\frac{K_{i\theta}}{\sum_{i=1}^n K_{iy}}} \quad (12)$$

计算偏心率为

$$\rho_x = \frac{e_x}{R_x}; \rho_y = \frac{e_y}{R_y} \quad (13)$$

计算所得第四结构层*X*向偏心率为3.968%,

Y 向偏心率为 0.794%, 结构层承担的扭矩等于计算结构层以上各层地震剪力与偏心距乘积产生的扭矩之和, 计算公式如下:

$$T_j = \sum_j^n (V_{jx}e_{jy} + V_{jy}e_{jx}) \quad (14)$$

式中: T_j 为第 j 结构层承担的扭矩, $\text{kN} \cdot \text{m}$; V_{jx} 为作用在第 j 层剪力在 X 方向上的分量, kN ; V_{jy} 为作用在第 j 层剪力在 Y 方向上的分量, kN 。

首层所承受的扭矩计算公式如下:

$$T_0 = \sum_0^n (V_{jx}e_{jy} + V_{jy}e_{jx}) \quad (15)$$

第四结构层计算扭矩 T 为 $28\,828\text{ kN} \cdot \text{m}$, 扭转刚度 K_θ 为 $10.9 \times 10^9\text{ kN} \cdot \text{m}/\text{rad}$, 扭转位移角 θ 为 $2.63 \times 10^{-6}\text{ rad}$, 扭转位移比为 1.39。

通过以上计算结果可以看出, 不规则结构其较大偏心率所引起的扭转位移比较大, 超过规范限值, 地震作用时破坏明显。因此对 L 型不规则结构采用该隔震设计方法, 以降低上部结构的扭转效应。

3.2 隔震支座布置方案

本工程采用天然叠层橡胶支座 (Linear Natural Rubber Bearing, LNR) 与铅芯橡胶支座 (Lead Rubber Bearing, LRB) 组合布置的方案, 其中 LNR 支座共布置了 19 个, LRB 支座共布置了 34 个, 隔震支座具体平面布置见图 6, 所选两种支座的物理和力学性质见表 3, 隔震层偏心率验算见表 4。

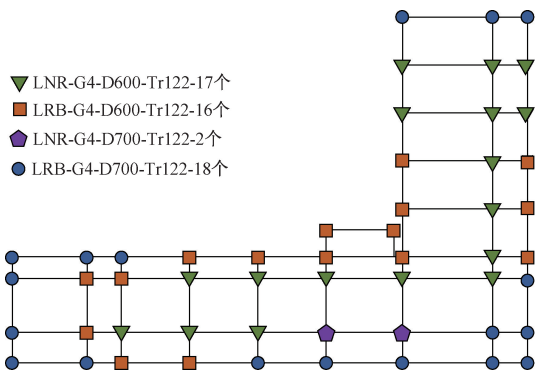


图 6 隔震支座布置

Fig. 6 Isolation bearings arrangement

表 4 隔震层偏心率验算

Tab. 4 Eccentricity checking of isolation layer

坐标轴方向	质心坐标 (X_m, Y_m)	刚心坐标 (X_k, Y_k)	偏心距 /m	偏心率 /%
X 向	37.645 8	38.022 7	0.367 9	1.767 9
Y 向	20.548 5	20.898 9	0.350 4	1.643 9

3.3 建立隔震体系整体计算模型

依据上述计算得知, 本工程在进行隔震设计时, 由于存在严重的偏心扭转效应。经方案论证和考虑隔震层布置后, 提出通过设置抗震缝来解决偏心扭转问题, 形成三种设缝方案, 见图 7。

三种设缝方案其隔震效果、模态分析及综合评价如表 5—表 7 所示:

由方案 1、2 与方案 3 在第一自振周期中平动系数对比可以得出, L 型不规则结构在设置抗震缝后从平扭耦联变为平动, 结构周期延长, 可以更好地减少上部结构的地震作用。

进行设防烈度下的反应谱计算, 可以得出: 在地下室顶板设置隔震层后结构自振周期大幅提高, 偏心率通过隔震支座的合理布置均可以控制在 3% 以内。设置隔震层后, 楼层扭转位移比从非隔震模型的 1.60 降低至 1.37, 楼层位移角从 $1/212$ 降低至 $1/391$, 采用隔震设计有效控制了结构层位移比。

对比三种隔震方案发现, 采用方案 1 虽然在建筑处理上美观性更好, 但其隔震层为满足偏心率的要求往往需要布置更多、更大直径的铅芯橡胶支座, 导致隔震层扭转刚度大、结构振型中平动系数不充分、隔震层屈服力总和更大, 达不到所预期的隔震目标。

通过设置抗震缝后, 上部结构的平扭耦联效应削弱、平动系数增加, 使得地震能量输入可以通过隔震层的平动进行有效耗散, 楼层最大扭转位移比从 1.37 降低至 1.16, 楼层位移角从 $1/391$ 降低至 $1/511$ 。方案 1 与方案 2 对比, 隔震层提供的阻尼比较为接近, 考虑到方案 1 需要将相邻隔震结构之间的隔离缝增大至 600 mm 以上, 严重影响原有建筑用途、增大了构造费用。因此本工程选择方案 2, 仅隔震层以上设置抗震缝。

表 3 隔震支座参数

Tab. 3 Isolator parameters

支座类型	剪切弹性模量 /($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$)	一次形状系数	二次形状系数	限界变形 /%	有效面积 / mm^2	竖向初始刚度 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	水平初始刚度 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	屈服力 /kN	屈服后水平刚度 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	水平等效刚度 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	等效阻尼比 /%
LBR 700	0.4	35.0	6.4	400	3 848	4 148 000	13 800	122.7	1 380	2 496	26
LBR 600	0.4	30.0	5.4	400	2 827	2 667 000	10 140	90.2	1 014	1 833	26
LNR 700	0.4	33.3	6.4	400	3 839	3 632 000	1 350	0.0	0	1 350	0
LNR 600	0.4	28.5	5.4	400	2 820	2 282 000	990	0.0	0	990	0

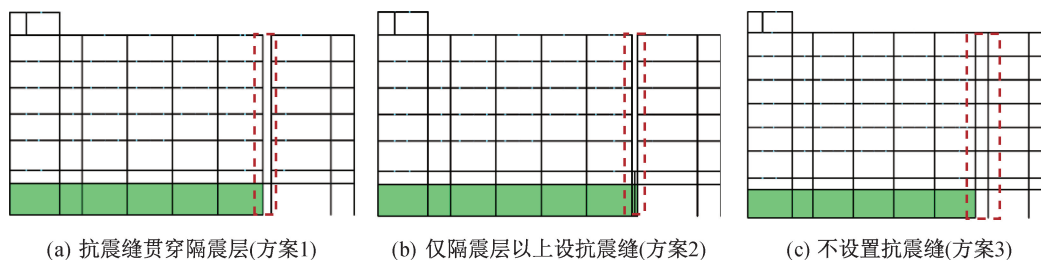


图7 隔震结构抗震缝设置方案

Fig. 7 Seismic joint setting scheme of isolation structure

表5 方案对比

Tab. 5 Comparison of schemes

方案	抗震缝处理	优点	缺点	中震反应谱下 隔震效果	综合评价
1	抗震缝从地下室顶板处 向上贯穿全楼,使L型结 构分为两个独立的塔楼	分为两个互相独立的 规则结构,扭转效应 控制较好	由于隔震层设缝,《隔 标》要求缝宽不小于 600 mm,影响建筑正 常使用,构造措施复杂	偏心率小于3%时, 底部剪力比1塔为 0.48,2塔为0.51	良
2	抗震缝在隔震层顶板处 向上贯穿全楼,隔震层及 以下不设缝	隔震层形成一整体, 上部结构按《抗规》设 抗震缝,缝宽140 mm	轻微影响建筑外观, 类似于大底盘多塔形 式,结构概念不清晰	偏心率小于3%时, 底部剪力比为0.49	优
3	不设置抗震缝,全楼相连	不设缝、建筑功能完 整、结构受力明确	隔震层扭转刚度偏大	偏心率小于3%时, 底部剪力比为0.62	差

表6 模态分析对比

Tab. 6 Comparison of modal analysis

方案	第一振型周期及 分量系数	第二振型周期及 分量系数	第三振型周期及 分量系数	扭转振型 阻尼比/%	综合评价
1	周期:1塔1.7697 s; 2塔1.7207 s 平动系数(X):1.00,0.99 平动系数(Y):0.00,0.00 扭转系数(Z):0.00,0.01	周期:1塔1.7293 s; 2塔1.6891 s 平动系数(X):0.00,0.00 平动系数(Y):1.00,1.00 扭转系数(Z):0.00,0.00	周期:1塔1.5158 s; 2塔1.5213 s 平动系数(X):0.00,0.25 平动系数(Y):0.04,0.00 扭转系数(Z):0.96,0.75	1塔:29.16 2塔:24.62	优
2	周期:1.8224 s 平动系数(X):0.99 平动系数(Y):0.01 扭转系数(Z):0.00	周期:1.7914 s 平动系数(X):0.00 平动系数(Y):1.00 扭转系数(Z):0.00	周期:1.6314 s 平动系数(X):0.07 平动系数(Y):0.43 扭转系数(Z):0.50	25.25	良
3	周期:1.6681 s 平动系数(X):0.53 平动系数(Y):0.42 扭转系数(Z):0.04	周期:1.6358 s 平动系数(X):0.47 平动系数(Y):0.44 扭转系数(Z):0.09	周期:1.4495 s 平动系数(X):0.04 平动系数(Y):0.21 扭转系数(Z):0.75	22.64	中
非隔震	周期:1.0393 s 平动系数(X):0.39 平动系数(Y):0.36 扭转系数(Z):0.25	周期:0.9110 s 平动系数(X):0.55 平动系数(Y):0.42 扭转系数(Z):0.03	周期:0.7143 s 平动系数(X):0.05 平动系数(Y):0.29 扭转系数(Z):0.66	5.00	差

表7 设防烈度反应谱计算楼层结果对比

Tab. 7 Comparison of floor results calculated by seismic intensity response spectrum

方案	最大扭转位移比	最大楼层位移角	最大层间位移比	隔震层总屈服力/kN	综合评价
1	1.20(三层1塔)	1/511(五层1塔)	2.46(三层1塔)	3366.3	良
2	1.16(六层2塔)	1/505(六层1塔)	2.27(四层1塔)	3283.7	优
3	1.37(四层)	1/391(六层)	2.71(四层)	4367.0	中
非隔震	1.60(六层)	1/212(七层)	1.67(四层)	—	差

表 8 设防地震下地震波选用

Tab. 8 Selection of seismic waves for earthquake prevention

序号	地震波名称(类型)	主方向	次方向	竖直最大峰值
		最大峰值加速度 /($\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$)	最大峰值加速度 /($\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$)	加速度 /($\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$)
1	RH3TG045(人工波)	200	170	130
2	RH4TG045(人工波)	200	170	130
3	CHI-CHI, TAIWAN-05_NO_2961	200	170	130
4	CAPEMENDOCINO_NO_829	200	170	130
5	TH012TG045_CHI-CHI TAIWAN-04 9-20-1999 CHY025	200	170	130
6	TH087TG045_KOBE JAPAN 1-16-1995 YAE	200	170	130
7	TH055TG045_EL MAYOR-CUCAPAH 4-4-2010 EL CENTRO ARRAY	200	170	130

3.4 设防烈度下地震作用效应计算

选取七条地震波进行设防地震下弹性时程分析,如表 8 所示。图 8 为所选地震波反应谱与规范反应谱对比,地震作用取七组加速度时程曲线计算结果的平均值,复振型分解反应谱法与时程分析法基底剪力对比如表 9 所示,图 9—图 10 为隔震前后各楼层剪力对比。

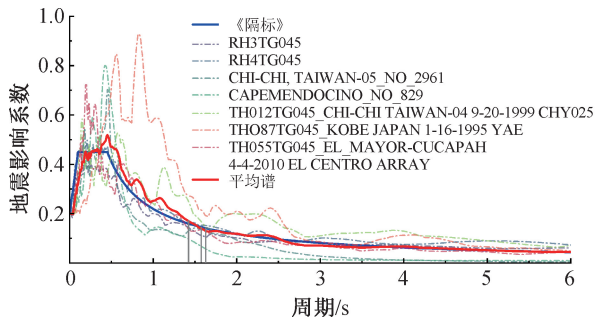


图 8 7 组地震波反应谱对比

Fig. 8 Comparison of response spectra of 7 seismic waves

表 9 底部剪力对比

Tab. 9 Comparison of bottom shear forces

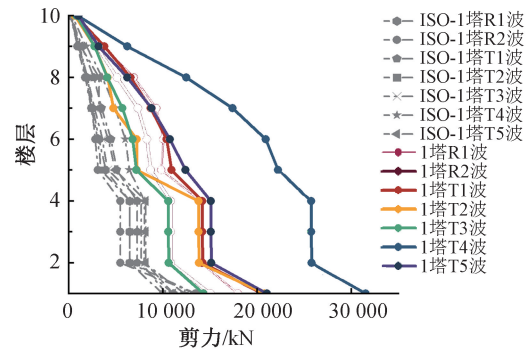
地震输入方向	复振型反应谱法 首层剪力/kN	时程分析法平均值 首层剪力/kN	地震力放大系数
X 向 1 塔	4 237.1	4 438.9	1.04
X 向 2 塔	2 104.5	2 736.6	1.30
Y 向 1 塔	4 014.9	3 506.9	1.00
Y 向 2 塔	2 222.8	2 093.8	1.00

3.5 罕遇烈度下地震作用效应计算

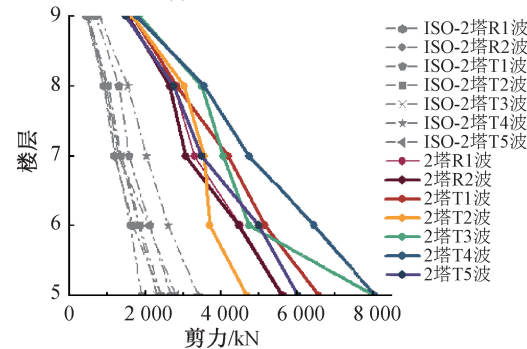
读取计算配筋结果,建立三维有限元模型,通过 SAUSG 非线性分析软件,采用直接积分法进行动力弹塑性分析,进行罕遇地震下弹塑性时程分析,对场地卓越周期增加 0.05 s 后重新选波,如表

10 所示,验算罕遇地震下支座极限位移和上部结构楼层位移角。

由 8 度罕遇地震下弹塑性时程分析可知,上部结构最大层间位移角为 1/177,楼层位移角分布如图 11—12 所示,满足《隔标》要求罕遇地震下楼层位移角 1/100 的限值。隔震支座在罕遇地震下短期压应力最大值为 12.8 MPa、最大拉应力为 0.7 MPa。最大水平位移为 160 mm,如图 13 所示,均满足规范最大容许要求。



(a) X向1塔



(b) X向2塔

图 9 X 向地震剪力对比

Fig. 9 Comparison of seismic shear force in X direction

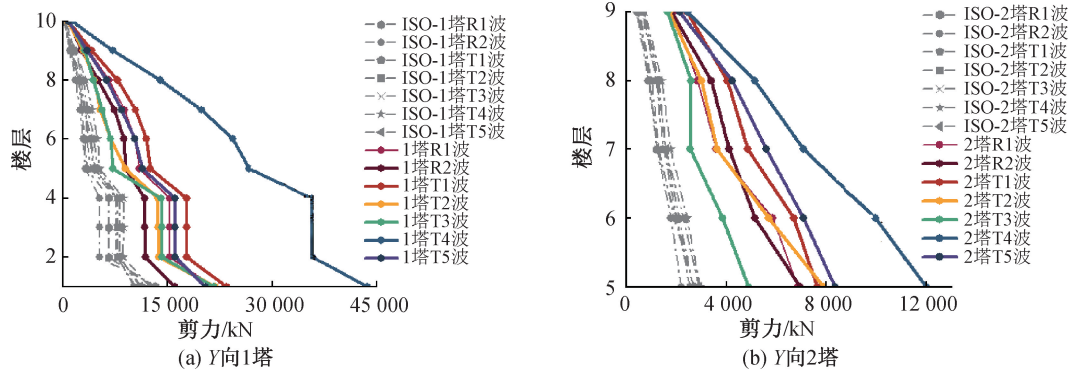


图 10 Y向地震剪力对比

Fig. 10 Comparison of seismic shear force in Y direction

表 10 罕遇地震下地震波选用

Tab. 10 Selection of seismic waves during rare earthquakes

序号	地震波名称(类型)	主方向	次方向	竖直最大峰值
		最大峰值加速度 /($\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$)	最大峰值加速度 /($\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$)	加速度 /($\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$)
1	RH4TG045(人工波)	400	340	260
2	RH3TG045(人工波)	400	340	260
3	TH110TG045_NORTHRIDGE-01 1-17-1994(天然波)	400	340	260
4	TH017TG045_CHUETSU-OKI 7-16-2007(天然波)	400	340	260
5	TH069TG045_TWATE 6-13-2008 AKT019(天然波)	400	340	260
6	TH017G045_IMPOTAL VALLEY-06 10-15-1979(天然波)	400	340	260
7	CHI-CHI,TAIWAN-02-NO-2166(天然波)	400	340	260

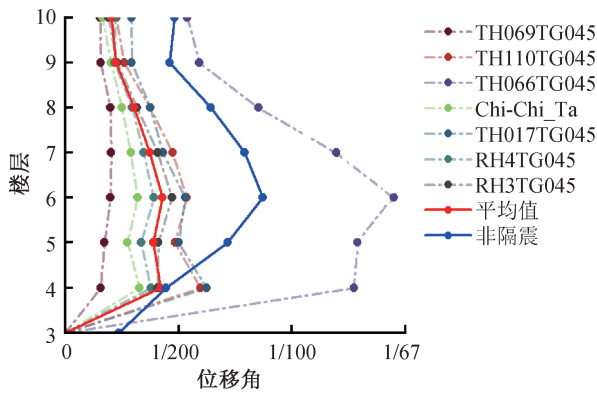


图 11 X向楼层位移角

Fig. 11 X-axis floor displacement angle

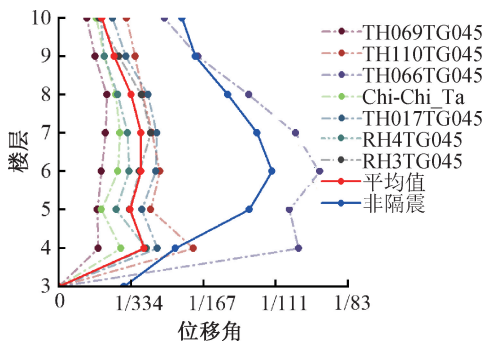


图 12 Y向楼层位移角

Fig. 12 Y-axis floor displacement angle

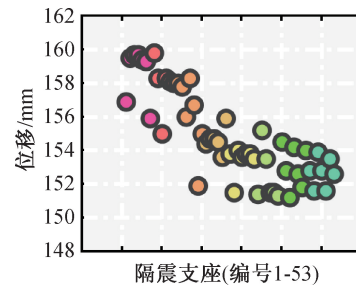


图 13 罕遇地震下支座最大位移值

Fig. 13 Maximum displacement of bearing under rare earthquake

4 结论

本文主要针对某 L 型不规则结构进行隔震设计,采用仅隔震层上部结构设置抗震缝的方案,进一步降低偏心扭转效应,实现隔震目标。研究结果表明:

1)对于 L 型不规则结构应首先考虑隔震设计方案,采用地下室顶板隔震后,位移比从 1.60 降低至 1.16,位移角从 1/212 降低至 1/505,偏心率控制在 3%以内。

(下转第 17 页)

- 机系统应用, 2019, 28(7): 1-8.
- [12] 郭昌言, 高尚. 三次样条插值的推广[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(7): 1507-1510.
- [13] GUI C, ZHANG J, LEI J, et al. A comprehensive evaluation algorithm for project-level bridge maintenance decision-making [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 289: 125713.
- [14] GUI C, LIN W, HUANG Z, et al. A decision-making algorithm for concrete-filled steel tubular arch bridge maintenance based on structural health monitoring[J]. *Materials*, 2022, 15(19): 6920.
- [15] 贾凡, 严妍, 张家琪. 基于 K-means 聚类特征消减的网络异常检测[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2018, 58(2): 137-142.
- [16] 陈希镇. 现代统计分析方法的理论和应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016.
- [17] 计静, 罗干, 姜信贺, 等. 斜靠式钢箱系杆拱桥成桥索力检测及稳定性分析[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2023, 40(1): 41-48.
- [18] 蒋国富, 郭龙, 王龙林, 等. 在役部分斜拉桥健康监测系统设计及实现[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2021, 38(1): 61-68.
- [19] 中国钢铁工业协会. 桥梁用结构钢: GB/T 714—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015: 6-7.
- [20] QIANG B, LI Y, YAO C, et al. Through-thickness distribution of residual stresses in Q345qD butt-welded steel plates[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 251: 54-64.
- [21] YUANZHOU Z, JI B, FU Z, et al. Local stress variation in welded joints by ICR treatment[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2016, 120: 45-51.
- [22] 中国建筑科学研究院, 广东省建筑科学研究院. 城市桥梁检测与评定技术规范: CJJ/T 233—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016: 37-38.

(责任编辑 王利君)

(上接第 8 页)

2) 对于 L 型不规则结构隔震层宜保持整体连接、上部结构设抗震缝, 既能通过隔震层支座布置来调整质心与刚心重合, 又能通过上部结构设缝使之分为独立的部分, 隔震层屈服力总和比整体隔震方案降低了 25%, 实现隔震目标。

3) 对于不规则结构, 本文探讨了其基于整体设计法的隔震设计流程, 在设防烈度下应补充弹性时程分析对比反应谱法结果, 在罕遇地震下应补充弹塑性时程分析, 精确计算隔震层非线性效应。

参考文献:

- [1] 范夕森, 赵玉鹏, 李玉琳, 等. 不规则结构的扭转效应控制研究[J]. 山东建筑大学学报, 2017, 32(6): 517-523.
- [2] TENA-COLUNGA A, GÓMEZ-SOBERÓN L. Torsional response of base-isolated structures due to asymmetries in the superstructure[J]. *Engineering Structures*, 2002, 24(12): 1587-1599.
- [3] RUIJUN Z, TONG G, WENHUA Q, et al. Research on seismic performance of a novel fully precast RC frame isolation structure[J]. *Structures*, 2024: 59105750.
- [4] WANG H C, LI J H, WU F J. Base-isolated multi-storey reinforced concrete frame structure modal analysis [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 204: 869-871.
- [5] 干洪, 罗辉. 考虑扭转效应的平面不规则大底盘单塔楼减震性能分析[J]. 安徽建筑工业学院学报(自然科学版), 2014, 22(2): 19-23.
- [6] 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.
- [7] 石艳旺. 不规则结构的扭转效应控制研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2016.
- [8] 张曼生, 张国军, 马伯涛, 等. 基础隔震结构隔震层水平性能设计研究[J]. 建筑结构, 2019, 49(11): 123-127.
- [9] 凯里. 平面不规则结构扭转效应分析的思考和讨论[J]. 建筑结构, 2013, 43(7): 47-51.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 王威, 黄小宁, 王宁, 等. 基于隔震技术的偏心结构扭转控制研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2020, 42(1): 83-89.
- [13] 刘德稳, 王琼芬, 吴跃红, 等. 不规则结构隔震设计与研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2013, 29(6): 1041-1046.
- [14] 马永宏. 不规则隔震结构研究进展及展望[J]. 四川水泥, 2020(1): 284-285.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑隔震设计标准: GB/T 51408—2021[S]. 北京: 中国计划出版社, 2021.

(责任编辑 王利君)