

修明慧, 谭平, 滕晓飞. 隔震结构直接设计法研究[J]. 华南地震, 2017, 37(2): 92-99. [XIU Minghui, TAN Ping, TENG Xiaofei. Study on Direct Design Method for Isolated Structure[J]. South china journal of seismology, 2017, 37(2): 92-99.]

## 隔震结构直接设计法研究

修明慧, 谭平, 滕晓飞

(广州大学减震控制与结构安全国家重点实验室培育基地, 广州 510405)

**摘要:** 提出了隔震结构的直接设计法, 介绍了隔震层等效阻尼比和隔震支座等效刚度的迭代方法, 并与现行规范中隔震结构所采用的分部设计法进行了系统的对比分析, 比较了内力、位移, 并统计了钢筋用量。研究表明: 直接设计法与分部设计法相比, 两者总体用钢量相差不大, 但在构件层面, 具体用钢量与构件种类以及构件平面位置有关, 此外, 不同高度处同一位置也会存在一定规律性的差异; 内力和位移相差不大, 因此能够满足安全性和经济性的要求, 将过去两阶段的分部设计变为直接设计, 一步到位, 可方便隔震设计的推广应用。

**关键词:** 直接设计法; 等效阻尼比; 等效刚度; 迭代方法; 分部设计法

**中图分类号:** TU311.3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-8662 (2017) 02-0092-08

**DOI:** 10.13512/j.hndz.2017.02.015

## Study on Direct Design Method for Isolated Structure

XIU Minghui<sup>1</sup>, TAN Ping<sup>2</sup>, TENG Xiaofei<sup>3</sup>

(Cultivation Base for State Key Laboratory for Seismic Control and Structural Safety, Guangzhou University, Guangzhou 510405, China)

**Abstract:** In this paper, a direct design method for isolated structure is put forward, in which the procedure of the equivalent damping ratio and the equivalent stiffness of the isolated layer is also introduced. The systematical comparison of the proposed direct design method and the current two-stage method is made herein for structural internal forces, displacements, the amount of steel, etc. The results show that there is little difference in the total steel consumption between the two methods. However, the steel mass consumed for both design method is quite different according to the type of components, the plane positions and heights. The proposed direct design

**收稿日期:** 2017-03-23

**基金项目:** 教育部创新团队研究计划项目(IRT13057); “广东特支计划”科技创新领军人才(2014TX01C141)

**作者简介:** 修明慧 (1992-), 女, 硕士, 主要从事高层结构隔震方面的研究。

**E-mail:** 1363311463@qq.com.

**通信作者:** 谭平 (1973-), 男, 博士, 研究员, 博导, 主要从事结构抗震与减震控制研究。

**E-mail:** ptan@gzhu.edu.cn.

method for isolated structure can simplify the design step and reduce the calculation significantly, which is accepted as the recommended isolation design method in “Code of design for seismic isolation buildings” in China and convenient for wide use of seismic isolation in China.

**Keywords:** The direct design method; The equivalent damping ratio; Equivalent stiffness; Iterative method; Partial design method

## 0 引言

目前国内外学者对高层隔震做了大量的研究, Tsutomu Komuro, Yasuhiro Nishikawa 等<sup>[1]</sup>对高层建筑基础隔震结构的发展和应用进行了研究。谭平, 周福霖<sup>[2]</sup>回顾了隔震技术的发展与研究现状, 介绍了现行隔震技术规程以及在隔震设计与施工过程中应注意的事项。王曙光等<sup>[3]</sup>对高层建筑结构隔震设计方法进行了改进, 指出必须考虑结构高阶振型的影响, 并对规范中采用的阻尼调整提出了修改建议。同济大学吕西林<sup>[4]</sup>对高宽比为 5 和 7 时的 7 层钢框架结构的隔震效果及抗倾覆措施进行了振动台试验研究。朱宏平<sup>[5]</sup>对国内外建筑基础隔震技术的研究成果和工程应用进行了全面的介绍, 总结了存在的问题, 讨论了未来隔震技术的发展方向。周倩南等<sup>[6]</sup>结合新规范分析了我国高层隔震技术研究现状及新问题, 将新旧规范中不同阻尼比下地震影响系数进行了对比分析。

2001 年我国颁布的《建筑抗震设计规范》<sup>[7]</sup> (GB50011-2001), 第一次将隔震设计的内容列入其中, 隔震层的位置仅限于基础与上部结构之间, 2010 年版《规范》<sup>[8]</sup>取消了对隔震设计的结构类型、非隔震时结构基本周期小于 1.0 s 和高度不超过 40 m 三个主要限制, 还取消了隔震建筑主要应用于 8、9 区的条款, 并将隔震技术由基础隔震扩展到层间隔震。规定该技术宜用于高宽比小于 4、其变型特征接近剪切变形的结构, 促进了隔震技术更广泛的应用。

现行的隔震结构设计方法为分部设计法, 需要进行两阶段设计, 过程繁琐。本文提出一种隔震结构直接设计法, 以及隔震层等效阻尼比和等效刚度的迭代方法, 通过典型算例与现行规范中采用的分部设计法进行了系统的对比分析, 得到了一些有意义的结论。

## 1 分部设计法介绍

目前大多数的隔震设计采用 2010 版《建筑抗

震设计规范》的分部设计法, 所谓分部设计, 是两阶段设计, 先确定水平向减震系数  $\beta$ , 进而求得隔震后的水平地震影响系数最大值  $\alpha_{\max 1}$  再进行设计配筋, 可以将隔震后上部结构的水平地震作用大致归纳为比非隔震时降低半度、一度 and 一度半三个档次。其详细流程如图 1 所示。

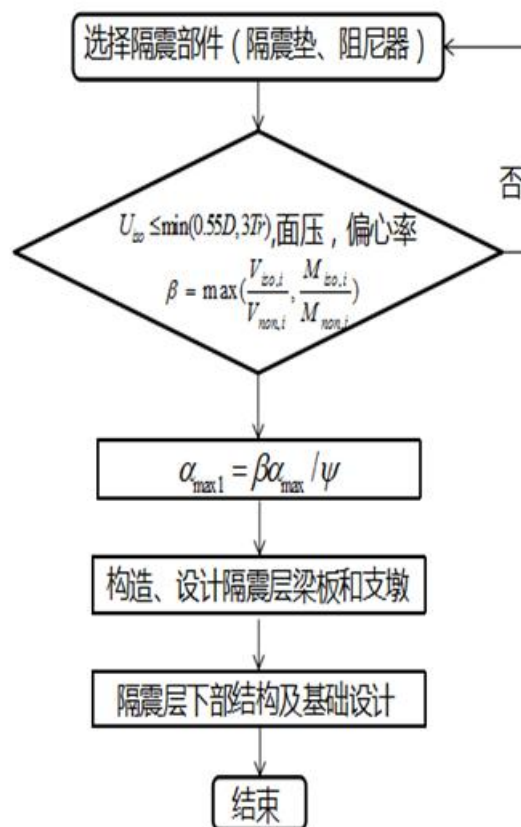


图 1 分部设计法流程图

Fig.1 Flow chart of the partial design method

值得一提的是, 其中水平向减震系数  $\beta$  是设防烈度地震下隔震结构与非隔震结构层间剪力的比值, 高层应考虑弯矩比, 然后取两者中的较大值, 而非隔震的水平地震影响系数最大值  $\alpha_{\max}$  对应于多遇地震下的值, 最后按折减过的多遇地震影响系数进行截面强度设计。

## 2 直接设计法

在外激励下, 隔震结构体系以楼层为基本单元, 利用 D'Alembert 原理得到结构的动力方程:

$$[M]\{\ddot{X}\}+[C]\{\dot{X}\}+[K]\{X\}=\{P(t)\}-[M]\{h\}\ddot{x}_g(t) \quad (1)$$

式(1)中 $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ 分别为结构的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $\{\ddot{X}\}$ 、 $\{\dot{X}\}$ 、 $\{X\}$ 分别表示隔震层相对于地面的加速度、速度和位移, $P(t)$ 表示外部荷载。阻尼矩阵 $[C]$ 采用非经典阻尼<sup>[9]</sup>, 即:

$$[C]=[C_0]+[C_r] \quad (2)$$

$$[C_0]=\alpha_s[M]+\beta_s[K] \quad (3)$$

$$[C_r]=\begin{bmatrix} C_{br} & [0] \\ [0] & [0] \end{bmatrix} \quad (4)$$

上式中, $[C_r]$ 为体现非比例阻尼的余项阻尼矩阵, $C_{br}=(\alpha_b-\alpha_s)m_b+(\beta_b-\beta_s)k_b$ ,  $[C_0]$ 代表经典 Rayleigh 阻尼矩阵, $\alpha_s$ 、 $\beta_s$ 、 $\alpha_b$ 、 $\beta_b$ 分别为上部结构和隔震体系的子结构 Rayleigh 阻尼比例系数。

用此方法假设的结构阻尼矩阵可以采用振型分解反应谱法对(1)进行解耦, 无需生成结构的总体阻尼矩阵, 需要注意的是当隔震层阻尼比大于 20%时需要采用复振型分解反应谱法进行求解。

在上文介绍的分部设计法中存在 $\alpha_{\max}$ 与 $\beta$ 的性能水准并不一致, 因此这种方法势必会对配筋的准确性带来很大的影响。此外, 地震波选取的好坏也对 $\alpha$ 的取值带来不同程度的差异, 因此本文介绍了可以一步到位进行配筋设计的直接设计法, 很好地解决了这一问题, 为在编的《建筑隔震设计规范》建议采用的隔震设计方法。

直接设计法是将手算经过反复迭代得到的隔震层等效阻尼比、隔震支座等效刚度, 直到隔震层位移基本不变, 最终得到隔震中震反应谱, 进而对隔震结构直接进行配筋, 直接设计法的流程图如图 2 所示, 具体参数含义和迭代过程在本文第三部分将做详细的介绍。此过程简单, 一步到位, 易于操作, 为我们提供了一种新的思路, 很好的避免了选波等存在的问题。

由于采用直接设计法进行设计时隔震结构是在中震下进行直接设计, 这使得它的设防目标和结构的性态都有所提高, 在很大程度上满足了安全性和经济性的要求。

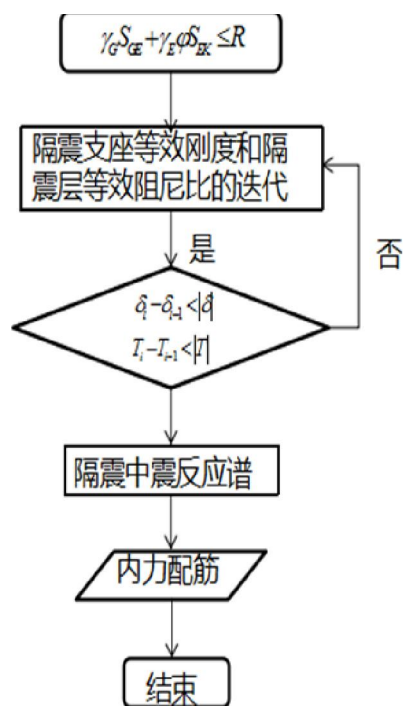


图 2 直接设计法的流程图

Fig.2 Flow chart of the direct design method

## 3 隔震层等效刚度和等效阻尼比的确定

隔震结构的直接设计法的关键在于确定隔震结构自振周期和阻尼比的取值。经过反复迭代得到隔震支座水平等效刚度和隔震层的等效阻尼比。主要计算假定如下:

- (1) 假定隔震模型中所有天然橡胶隔震支座的力-位移滞回曲线为理想线性, 不提供附加阻尼比。
- (2) 根据经验假定隔震模型目标初始位移和铅芯支座提供阻尼比。

迭代原理如图 3 所示, 具体迭代过程介绍如下:

迭代初始起步参数。根据经验设定隔震结构的初始隔震目标周期 $T_0$ 和隔震层仅铅芯支座提供的等效黏滞阻尼比 $\zeta_{eq}^0$ 。

- (1) 将隔震层质心位移作为起步位移 $\delta_1$  [10-11]。

- (2) 计算单个支座的等效刚度 $K_{eq1}$ 。

$$K_{eq1} = \frac{K_y \delta_1 + Q}{\delta_1} \quad (5)$$

$$K_y = K_0 \quad (6)$$

上式中, $Q$ 表示水平屈服力, $\lambda$ 表示屈服后刚度比, $K_0$ 表示水平初始刚度, $K_y$ 表示屈服后刚度。

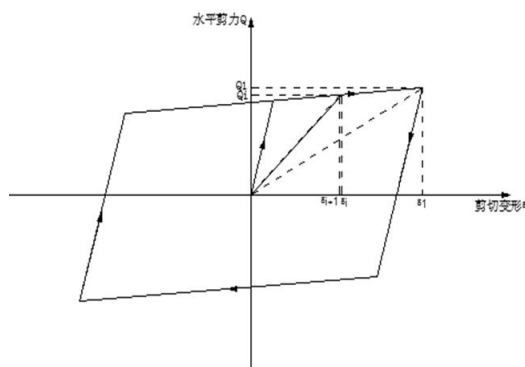


图3 铅芯橡胶隔震支座水平剪切变形及水平等效刚度迭代过程原理图

Fig.3 The horizontal shear deformation and horizontal equivalent stiffness iterative process principle of LRB

(3) 由下式计算出隔震层等效刚度  $K_{eq}$ :

$$T_e = 2\pi \sqrt{\frac{m}{K_{eq}}} \quad (7)$$

(4) 由下式计算隔震层所有铅芯支座的耗能  $A_{r1}^0$  [11]:

$$A_{r1}^0 = 2\pi K_{eq} \delta_1^2 \xi_{eq}^0 \quad (8)$$

(5) 如有阻尼器, 由隔震层质心位移及阻尼器滞回曲线计算阻尼器的耗能  $A_{r2}^0$ 。

$$W_{ej} = (2\pi^2/T_1) C_j \cos^2 \theta_j \Delta u_j^2 \quad [12] \quad (9)$$

$$A_{r2}^0 = n W_{ej} \quad (10)$$

(6) 由4和5步求得隔震层总耗能  $A_r^0$ , 由下式计算隔震层等效阻尼比:

$$A_r^0 = A_{r1}^0 + A_{r2}^0 \quad (11)$$

$$\zeta_1 = \frac{A_r}{2\pi K_{eq} D^2} \quad (12)$$

(7) 重复以上步骤, 直到第  $i$  次和第  $i+1$  次的隔震层位移收敛和接近为止。

迭代判断收敛的条件:

(1) 第  $i$  次迭代得到的水平剪切变形与前一次的剪切变形差小于  $|\delta|$ ,  $\delta=0.2\text{mm}$ 。

$$\delta_i - \delta_{i-1} \angle |\delta| \quad (13)$$

(2) 第  $i$  次迭代得到的结构第一自振周期  $T$  与前一次的周期差小于  $|T|$ ,  $T=0.1\%$ 。

$$T_i - T_{i-1} \angle |T| \quad (12)$$

迭代收敛后, 即得到反应谱法水平地震作用下铅芯橡胶隔震支座的水平等效刚度, 隔震层的等效阻尼比。

## 4 工程实例

下面以某隔震框架-剪力墙结构为例, 对直接设计法进行说明, 平面矩形, 长 50.4 m, 宽 38 m, 共 28 层(含隔震层), 地上 1 层高 4.8 m, 标准层高 3.3 m, 结构高度为 99.5 m, 隔震层高 3 m, 结构最大高宽比  $99.5/38=2.62$ , 设计地震分组为抗震设防类别应划分为乙类, 该建筑位于地震高烈度区, 设防烈度为 8 度(0.2g), 第一组, II 类场地, 特征周期 0.35 s, 应用 PKPM 软件完成框架-剪力墙结构的抗震设计, 结构首层平面布置图如 4。

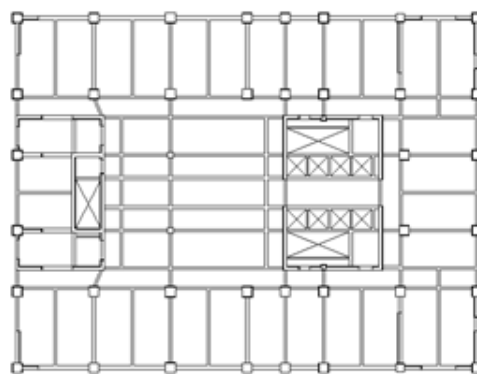


图4 结构首层平面布置图

Fig.4 Structure layout of the first floor

### 4.1 非隔震模型对比

为了精确模拟结构的动力响应情况, 用 ETABS2015 有限元软件建立的非隔震结构(见图 5)与 PKPM 建立的非隔震结构进行对比, 前者模型总质量为 79 729.8 t, 后者 77 701.1 t, 差值在 2.6%, 各层间剪力相差也不大, 如表 1 所示, 两模型得到的周期也很接近, 这保证了分析的可靠性。

### 4.2 隔震层设计

结构采用基础隔震, 隔震装置包括: 天然橡胶支座、铅芯橡胶支座、弹性滑板支座(图 6)

表 1 不同软件得到非隔震结构周期对比

振型	SATWE	ETABS	方向	误差/(%)
1	2.586	2.684	X 向平动为主	3.8
2	2.172	2.201	Y 向平动为主	1.3
3	1.896	1.967	扭转	3.8

### 4.3 分析结果及比较

(1) 地震波的输入。时程分析采用的地震波

为5条天然波和2条人工波,地震动输入方式为 $X$ 向和 $Y$ 向单向水平输入,设防烈度下水平地震加速度峰值 $200\text{ cm/s}^2$ 。图7给出了规范反应谱与7条时程曲线及平均值拟合反应谱对比结果,7条地震波反应谱在设计周期范围内与规范反应谱一致。

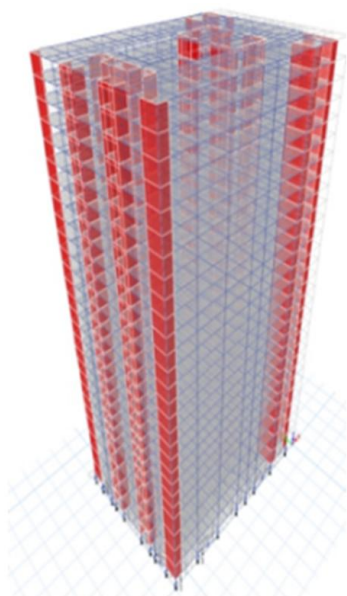


图5 ETABS结构模型

Fig.5 Structure model of ETABS

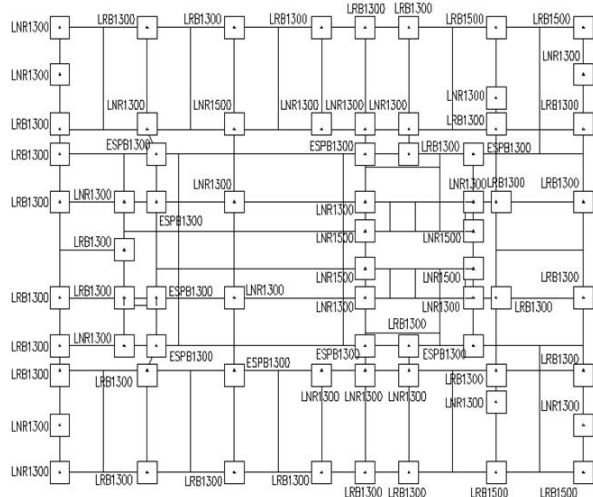


图6 隔震装置布置示意图

Fig.6 Isolation device layout diagram

(2) 隔震前后上部结构响应对比。由图8计算结果可知,隔震结构层间剪力与非隔震结构层间剪力之比最大值为0.62,隔震结构层倾覆力矩与非隔震结构层倾覆力矩之比最大值为0.68,按《建筑抗震设计规范》GB50011-2010第12.2.5条确定隔震后上部结构计算水平地震影响系数最大值

取值如下:参照《抗规》的规定,确定水平向减震系数为0.68,上部结构抗震等级为一级不变,隔震层上部结构的水平地震作用影响系数最大值为 $0.16 \times 0.68 / 0.8 = 0.136$ 。综合考虑,隔震后上部结构水平地震影响系数最大值取0.136。

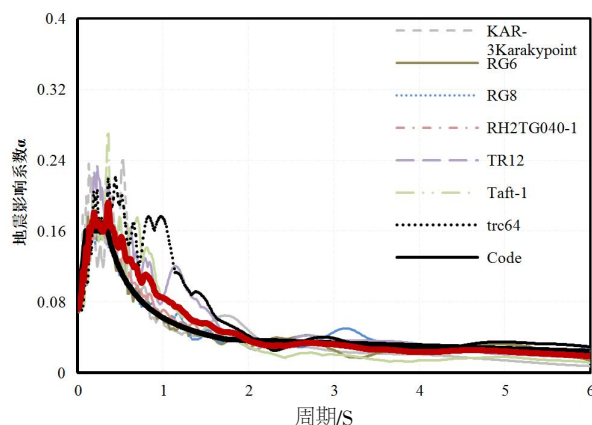


图7 规范反应谱与拟合反应谱对比

Fig.7 Comparison between response spectrum compatible and standard response spectrum

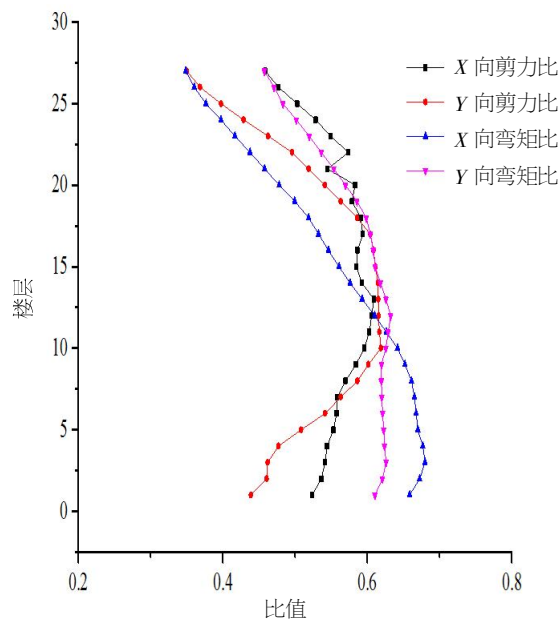


图8 结构隔震前后内力对比

Fig.8 Comparison of internal force response between isolated and non-isolated structures

按照第三部分介绍的迭代流程,经过4次迭代后获得收敛结果。各次迭代结果如表2。第3次和第4次迭代的隔震层位移、隔震支座的等效刚度和周期基本一致,取第4次的迭代结果进行上部结构的中震反应谱分析和配筋设计。

隔震结构设防烈度地震影响系数曲线如图9所示,阻尼比取隔震层等效阻尼比0.097。



(3) 直接设计法与分部设计法的内力比较。 $Y$  向底部剪力相差 14%，总体底部和顶部相差不大，如图 10 可知，两者内力底部剪力  $X$  方向相差 19%，但中间层直接设计法普遍较分部设计法偏小。

表 2 迭代结果  
Table 2 Iterative results

迭代次数	周期/s	隔震层		等效阻尼比	等效刚度		
		位移 $X$ /m	位移 $Y$ /m		LRB1300(kN/m)	LRB1500(kN/m)	ESPB1300(kN/m)
1	4.401	0.106 9	0.113 3	0.097 289 709	4 092.15	4 872.25	3 613.98
2	4.361	0.106 1	0.112 4	0.097 1650 46	4 222.04	5 045.19	3 857.67
3	4.355	0.106	0.112 3	0.097 165 318	4 240.90	5 070.30	3 893.05
4	4.355	0.105 9	0.112 3	0.097 165 339	4 243.76	5 074.11	3 898.41

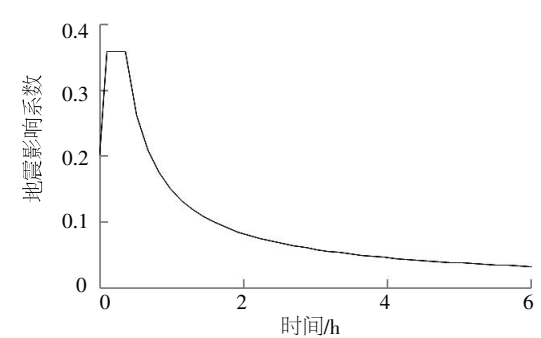


图 9 迭代后中震隔震下的地震影响系数曲线  
Fig.9 The iteration after the earthquake influence coefficient curves under seismic isolation

$X$  向与  $Y$  向两个方向内力有一定的差异，可见刚度对结构的内力影响较大，同时结构的  $Y$  向在第三层有突变；采用分部设计法时结构在 22 层处有突变，但直接设计法确没有这样的现象，可见该方法没有现行设计法那样敏感。

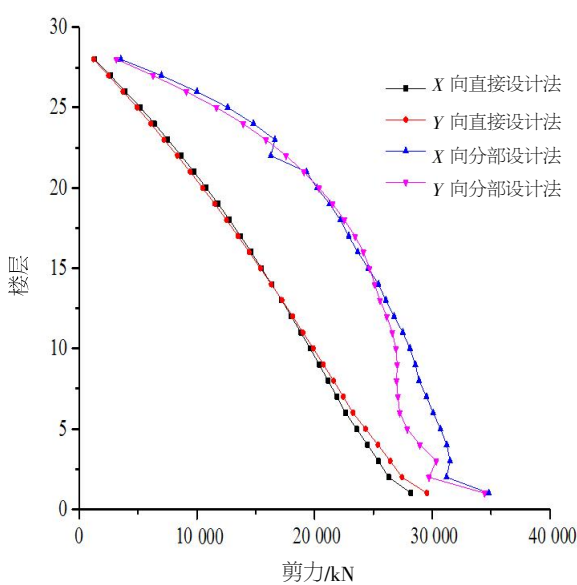


图 10 两种设计方法的内力对比  
Fig.10 Comparison of the internal forces of the two design methods

(4) 直接设计法与分部设计法的位移比较。由下图11可知，两种方法下 $X$  向层间位移角底部相差不大，直接设计法上部偏小， $Y$  方向相差不大。

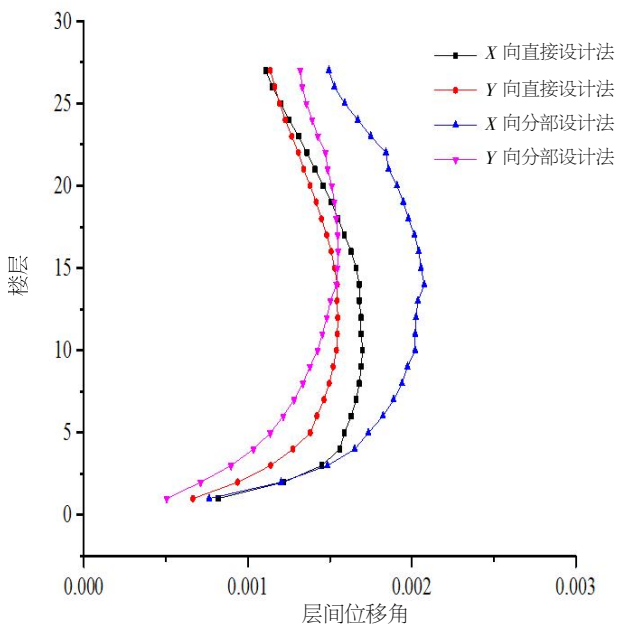


图 11 两种设计方法的层间位移角对比  
Fig.11 Comparison of interlayer displacement angles for two design methods

选取在分部设计法选择的波中选择的七条波，输出设防烈度地震下隔震层位移的平均值。由表 3 可知，直接设计法迭代后隔震层位移与其比较，两者相差不大。

表 3 两种方法的位移比较

Table 3 Comparison of displacement of the two methods			
坐标	分部设计法	直接设计法	差值
$X$ 向	109.5	105.9	-3.29%
$Y$ 向	115.8	112.3	-3.02%

(5) 直接设计法与分部设计法的配筋比较。以下给出直接设计法与分部设计法的各层框架-剪

力墙配筋计算结果比较,分别选取底层,中间层 14 层和顶层的同一位置的梁和墙构件进行配筋比较。考虑各种最不利荷载组合时剪力墙边缘构件纵筋计算结果与剪力墙的位置有关,又分别选取角部梁和中部梁,角部墙和边缘墙进行比较。

对框架梁配筋计算结果比较如图 12 所示,结果表明:各种最不利荷载组合时梁纵筋计算结果与其位置有关。对底层角部梁而言,直接设计法配筋面积稍微偏大;而底层中部梁,直接设计法偏小;对中间层和顶层,分部设计法梁配筋无论是角部还是中部都是偏大的,与平面位置无关。

比较两种设计方法下的剪力墙配筋面积,图 13 的结果表明:对底层而言,直接设计法的墙配筋偏大,中间层墙的配筋面积与构件所处位置有关,中部墙分部设计法偏大,中间层角部墙和顶部墙两种设计方法相差不大。

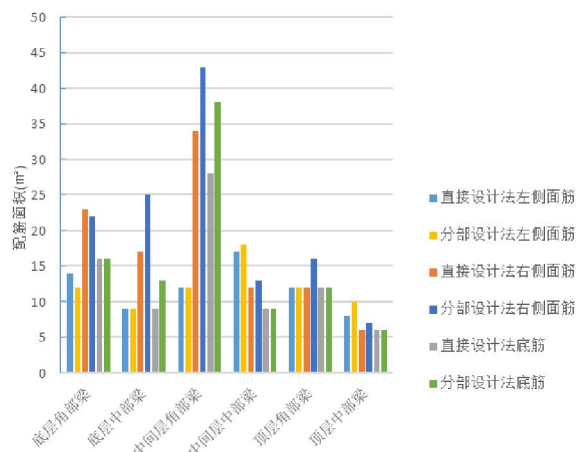


图 12 两种设计方法梁配筋比较

Fig.12 Comparison of two design methods for beam reinforcement

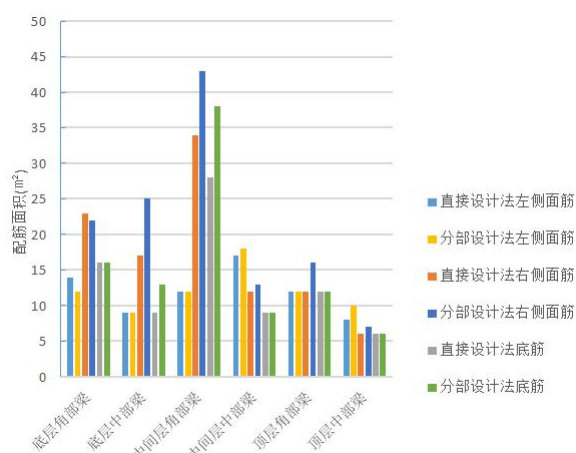


图 13 两种设计方法的墙配筋比较

Fig.13 Comparison of wall reinforcement between two design methods

现统计每平米钢筋用量情况如图 14,可知分部设计法与直接设计法的配筋总量相当,但针对不同构件而言各有不同,对板而言,直接设计法的配筋量较小;对墙和柱,直接设计法的配筋量偏大;对梁而言,两者比较相差不大。

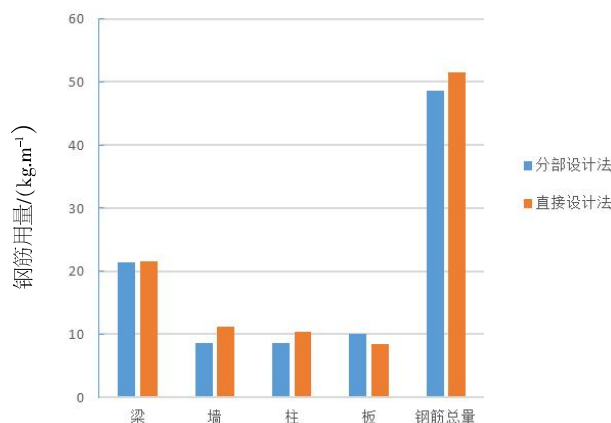


图 14 两种设计方法的构件配筋比较

Fig.14 Comparison of the two components of the design method

## 5 结语

本文提出了隔震结构的直接设计法,通过对直接设计法和分部设计法的研究可得到如下结论:

(1) 本文提出了一种新的设计方法——隔震结构直接设计法,将过去两阶段的分部设计转化为一步到位的直接设计法,大大简化了设计流程,也减小了设计计算的工作量,方便快捷,简单高效。

(2) 介绍了直接设计法的设计流程,给出了隔震支座的等效阻尼比和等效刚度的迭代方法,经过反复迭代,得到了中震下的隔震反应谱,并用它进行分析和配筋计算。

(3) 进行了两种设计方法的安全性和经济性的比较。得出如下结论:安全性方面,通过内力比较,两者底部内力相差不大,中部直接设计法的内力偏小。两者的层间位移角也较为接近,因此能够满足安全性的要求。经济性:通过比较两种方法的配筋可知,总体配筋量相差不大,与构件的种类和所处位置有关,满足经济性的要求。平面位置影响:对梁而言,配筋的差异在平面布置的差异仅仅在底层体现的较为明显,角部梁直接设计法的配筋偏大,中部梁偏小;对于上部结构与所处中部还是边缘关系不大,与设计方法有关。对剪力墙而言,中间层的配筋与平面位置有关,中部墙分部设计法偏大,角部偏小。构件层

面:总体配筋量上相差不大,对楼板而言配筋总量上,直接设计法略小与分部设计法,但对剪力墙和柱子,直接设计法偏大;对梁而言两者相差不大。

综上所述,即使用钢量相差不大,但直接设计法是在中震下进行设计配筋,提高了性能水准,克服了分部设计法的弊端,值得进一步应用推广,为在编的《建筑隔震设计规范》提供了一种新的设计思路。

#### 参考文献:

- [1] Tsutomu Komuro, Yasuhiro Nishikawa, Yuichi Kimura and Yuji Isshiki. Development and Realization of Base Isolation System for High-Rise Buildings [J]. Technical report, 2005, 3 (2): 233-239.
- [2] 谭平,周福霖. 隔震技术的研究与工程应用[J]. 施工技术, 2008, 37 (10): 5-8.
- [3] 王曙光,杜东升,刘伟庆. 高层建筑结构隔震设计关键问题[J]. 南京工业大学学报, 2009, 31 (1): 71-77.
- [4] 吕西林. 第十五届高层建筑抗震技术交流会完美收官[J]. 建筑结构, 2015, 45 (23): 85.
- [5] 朱宏平,周方圆,袁涌. 建筑隔震结构研究进展与分析[J]. 工程力学, 2014, 31 (3): 1-10.
- [6] 周倩南,傅昶彬. 结合新规范分析了我国高层隔震技术研究现状及新问题[J]. 四川建筑科学, 2011, 37 (4): 195-198.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范:GB50011-2001[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2001.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范:GB50011-2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.
- [9] 杜永峰,李慧. 非比例阻尼隔震结构地震响应的实振型分解法[J]. 工程力学, 2003, 08, 20 (4): 24-32.
- [10] 张国镇,黄震兴,苏晴茂,等. 结构消能减震控制及隔震设计[M]. 台湾:全华科技图书股份有限公司, 9-3.
- [11] 蔡益超,詹添全. 建筑物隔震设计与施工[M]. 台湾:财团法人中华建筑中心, 1994.
- [12] 刘晶波,杜修力. 结构动力学[M]. 北京:机械工业出版社, 2005.