

# 超高层建筑伸臂加强层结构设计的若干问题

魏 琰<sup>1,2</sup>, 林旭新<sup>1</sup>, 王 森<sup>1,2</sup>

(1 深圳市力鹏工程结构技术有限公司, 深圳 518034;

2 深圳市力鹏建筑设计事务所, 深圳 518034)

[摘要] 对当前超高层建筑伸臂加强层结构设计的一些问题进行了讨论,指出了加强层位置和数量对超高层建筑的顶点位移、基本周期、顶部风振加速度、层间位移角、框架倾覆力矩、墙体拉力等的影响。经分析给出了结合控制目标设置加强层位置和数量的选择方法,对顶部设置加强层进行讨论,结果表明顶部加强层并非较优选择,同时提出了伸臂桁架构件截面的设定方法,结合工程实例说明该方法的应用。

[关键词] 伸臂加强层; 结构控制目标; 数量和位置; 顶部加强层; 伸臂构件截面

中图分类号: TU318 文献标识码: A 文章编号: 1002-848X(2019)07-0001-08

## Some issues about structural design of outrigger strengthening layer in super high-rise buildings

Wei Lian<sup>1,2</sup>, Lin Xuxin<sup>1</sup>, Wang Sen<sup>1,2</sup>

(1 Shenzhen Li Peng Structural Engineering Technology Co., Ltd., Shenzhen 518034, China;

2 Shenzhen Li Peng Building Structure Design Institute, Shenzhen 518034, China)

**Abstract:** Some issues in the structural design of the outrigger strengthening layer in super high-rise buildings were discussed. The influences of the quantity and location of strengthening layers of super high-rise buildings on top displacement, basic period, top wind-induced acceleration, inter-layer displacement angle, frame overturning moment and wall tension were studied. Based on the analysis, the arrangement method of the location and quantity of the strengthening layer was presented based on control goal, and the setting of the strengthening layer on the top of the super high-rise buildings was discussed. The results show that the top strengthening layer is not an optimal choice, and the setting method for cross-section of outrigger component was put forward. The application of this method was illustrated combined with practical engineering.

**Keywords:** outrigger strengthening layer; structural control goal; quantity and location; top strengthening layer; cross-section of outrigger component

## 0 引言

随着建筑高度的增加,整体结构侧向刚度减小,结构基本周期加长,在侧向力作用下结构侧向位移增大,结构底部常出现不同程度的受拉,并加剧结构的 $P-\Delta$ 效应。经多年的研究和实践,工程界成功地采用水平伸臂加强层来提高结构侧向刚度,以控制结构的侧向位移,加强层由核心筒通过伸臂桁架与外框柱连接构成。

文献[1]运用结构力学的分析方法分析了设置一道加强层时的最优位置,以控制结构顶点侧向位移为目标,但未涉及多道伸臂加强层设置的相关问题。文献[2]对于有 $n$ 个伸臂加强层的结构,为控制其侧向位移建议伸臂加强层的最佳布置位置为 $H/(n+1)$ ,  $2H/(n+1)$ ,  $\dots$ ,  $nH/(n+1)$ 高度处,从而得出结论:基于加强层刚度为无限刚度并且结构抗侧刚度上下均匀不变的情况,可推导出,设置一道加强层时适宜位置是在 $H/2$ 处;设置多道加强层

时,最高位置在 $nH/(n+1)$ 处,明确顶层不设加强层,且各道加强层位置均匀分布。文献[3]指出加强层不但可以增大结构抗侧刚度、控制结构位移,还可以调节倾覆力矩在核心筒和外框之间的分配比例,这对认识加强层的有利作用是有帮助的,但该文对加强层的优化位置未进行讨论。文献[1-3]对加强层位置的研究都从结构设计角度出发,未结合建筑使用功能考虑。

综上所述,目前关于超高层结构伸臂加强层位置及数量的确定尚存在较多不同意见,本文对此进行分析研究,提出相应的设计建议。

## 1 加强层设置位置

确定加强层位置时,应遵循以下三点基本要求:

1) 符合建筑使用功能的要求,利用建筑避难层和设备层的空间,设置加强层; 2) 结合结构控制目标进

作者简介: 魏琰, 研究员, Email: wl2002111@163.com。

行分析,如控制顶点位移与基本周期(包含风荷载作用下对结构舒适度的控制)、层间位移角、筒体倾覆力矩及拉力等,对加强层的设置位置进行有效性(或称敏感性)分析;3)伸臂桁架构件制作宜便于施工,受力宜适当,截面尺寸不宜过大,避免加强层区域构件受力过于集中。根据有效性分析结果选择加强层的最优位置。

加强层的功能是协调核心筒和外框柱变形,两者间传力应直接可靠,不宜将加强层结构支承于核心筒的外周边横向剪力墙上。

## 2 设置一道加强层的最优位置

选择设置加强层位置时,应先确定其主要控制目标,是控制结构顶点位移与基本周期(包含风荷载作用下对结构舒适度的控制)、层间位移角还是筒体倾覆力矩及拉力等。

以深圳某超高层建筑为例进行分析,该结构体系为巨型框架-核心筒结构,建筑高度为350m,抗震设防烈度为7度(0.1g),基本风压为 $0.75\text{kN/m}^2$ ,结构地上79层,地下4层。为考察一道加强层在不同高度位置时的有效性,在建筑避难层(设有环桁架)处,即06层、17层、29层、41层、53层、65层,共6个位置,进行伸臂加强层的有效性分析。

### 2.1 控制基本周期与顶点位移时

风荷载作用下不同伸臂加强层位置时结构的基本周期见表1。计算结果表明,伸臂加强层位置设在中间及略偏下的避难层处时,结构基本周期较小,设在顶部或偏下避难层处的结构基本周期会相对较长。当仅设置一道伸臂加强层时,位于整体高度41层(0.52H,H为结构总高)处的基本周期最小,为7.61s。

不同伸臂加强层位置时基本周期比较 表1

| 伸臂位置    | 06层  | 17层  | 29层  | 41层  | 53层  | 65层  |
|---------|------|------|------|------|------|------|
| 占总高H的比例 | 0.08 | 0.22 | 0.37 | 0.52 | 0.67 | 0.82 |
| 基本周期/s  | 8.19 | 7.85 | 7.67 | 7.61 | 7.79 | 8.04 |

风荷载作用下,设置一道伸臂加强层在不同高度位置时对结构顶点位移的影响见表2。计算结果表明,伸臂加强层位置设置在中间及略偏上避难层时,结构顶点位移会相对较小,设置在顶部及偏下部避难层时,顶点位移会相对较大。当仅设置一道伸臂加强层时,位于整体高度41层(0.52H)处时顶点位移最小,X向为571mm;Y向为651mm。伸臂加强层在不同高度位置时,顶点位移变化趋势见图1。

不同伸臂加强层位置时风荷载作用下对结构顶部风振加速度的影响如表3所示,由表3可知,伸臂

位置对顶部风振加速度影响不大,但居中设置时略有利。当伸臂加强层位置设于整体高度41层(0.52H)处时顶部风振加速度相对最小。

综合上述结果可知,本案例设置一道伸臂加强层时,当设置在结构的0.52H位置时,结构顶点位移、基本周期及结构顶部风振加速度均达到最小。

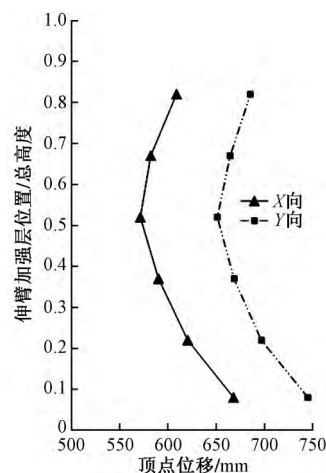


图1 不同伸臂加强层位置顶点位移/mm

不同伸臂加强层位置时顶点位移比较 表2

| 伸臂位置        |     | 06 层 | 17 层 | 29 层 | 41 层 | 53 层 | 65 层 |
|-------------|-----|------|------|------|------|------|------|
| 占总高 $H$ 的比例 |     | 0.08 | 0.22 | 0.37 | 0.52 | 0.67 | 0.82 |
| 位移/mm       | X 向 | 668  | 620  | 590  | 571  | 582  | 609  |
|             | Y 向 | 745  | 697  | 668  | 651  | 664  | 685  |

不同伸臂加强层位置时顶部风振加速度比较 表3

| 伸臂位置               |       | 06 层  | 17 层  | 29 层  | 41 层  | 53 层  | 65 层  |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 占总高 $H$ 的比例        |       | 0.08  | 0.22  | 0.37  | 0.52  | 0.67  | 0.82  |
| 顺风向<br>$I/(m/s^2)$ | $X$ 向 | 0.060 | 0.059 | 0.059 | 0.059 | 0.059 | 0.060 |
|                    | $Y$ 向 | 0.059 | 0.058 | 0.058 | 0.057 | 0.058 | 0.058 |
| 横风向<br>$I/(m/s^2)$ | $X$ 向 | 0.244 | 0.224 | 0.215 | 0.212 | 0.221 | 0.234 |
|                    | $Y$ 向 | 0.256 | 0.234 | 0.223 | 0.220 | 0.231 | 0.246 |

### 2.2 控制层间位移角时

风荷载作用下,设置一道伸臂加强层在不同高度位置时对层间位移角的影响见表4。限于篇幅,只绘制Y向层间位移角变化曲线,如图2所示。

不同伸臂加强层位置时层间位移角比较 表4

| 伸臂位置        |     | 06 层  | 17 层  | 29 层  | 41 层  | 53 层  | 65 层  |
|-------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 占总高 $H$ 的比例 |     | 0.08  | 0.22  | 0.37  | 0.52  | 0.67  | 0.82  |
| 层间位移角       | X 向 | 1/406 | 1/431 | 1/462 | 1/512 | 1/477 | 1/448 |
|             | Y 向 | 1/369 | 1/391 | 1/419 | 1/449 | 1/427 | 1/404 |

计算结果表明,伸臂加强层位置设在中间部位避难层时,结构最大层间位移角较小,设在顶部或偏下避难层时,最大层间位移角会相对较大。当设置一道伸臂时,位于整体高度41层(0.52H)处层间位移角最小,X向为1/512(57层);Y向为1/449(69层)。

若以控制结构层间位移角为目标,本案例选择将伸臂加强层设置于结构的0.52H处(即居中部位)是适宜的,这与控制结构顶点位移和基本周期的结论一致。

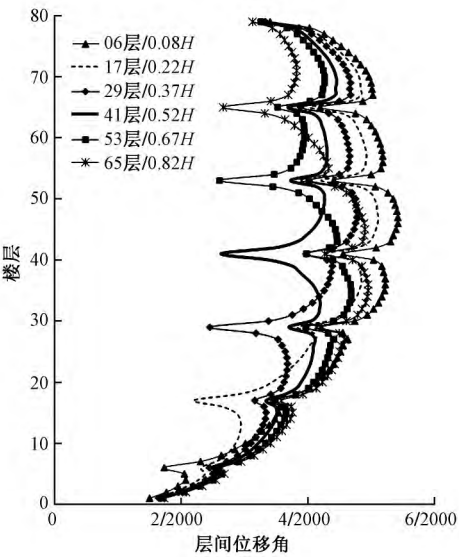


图 2 Y 向不同伸臂位置的层间位移角曲线

2.3 控制底部筒体倾覆力矩时

在风荷载作用下,比较无伸臂加强层与不同伸臂加强层位置时,底部筒体的倾覆力矩减小量百分比  $\Delta M = (M - M_i) \times 100\% / M$ ,其中  $M, M_i$  分别为无伸臂加强层和不同伸臂加强层位置时结构底部筒体的倾覆力矩。

不同伸臂加强层位置时底部筒体的倾覆力矩及倾覆力矩减小量百分比的计算结果见表 5,倾覆力矩减小量百分比的变化曲线见图 3。由图 3 可看出,伸臂加强层设置在结构偏中下部时能够较好起到减小筒体倾覆力矩的作用。

不同伸臂加强层位置时底部筒体的倾覆力矩及倾覆力矩减小量百分比

| 伸臂位置 | 占总高 $H$ 的比例 | 倾覆力矩<br>$/(\times 10^6 \text{ kN}\cdot\text{m})$ |     | 倾覆力矩减小量<br>百分比 |     |
|------|-------------|--------------------------------------------------|-----|----------------|-----|
|      |             | X 向                                              | Y 向 | X 向            | Y 向 |
|      |             |                                                  |     |                |     |
| 无    | 无           | 82                                               | 94  |                |     |
| 06 层 | 0.08        | 61                                               | 72  | 26%            | 23% |
| 17 层 | 0.22        | 60                                               | 71  | 27%            | 25% |
| 29 层 | 0.37        | 64                                               | 76  | 22%            | 20% |
| 41 层 | 0.52        | 68                                               | 80  | 17%            | 16% |
| 53 层 | 0.67        | 73                                               | 84  | 12%            | 11% |
| 65 层 | 0.82        | 76                                               | 88  | 8%             | 7%  |

2.4 控制底部墙肢拉力时

风荷载作用下,研究了设置一道伸臂加强层在不同高度位置时对底部墙肢拉力的影响。核心筒墙肢分析位置见图 4,其中墙肢 W1 尺寸为  $1.0\text{m} \times 4.0\text{m}$ ;墙肢 W2 尺寸为  $1.0\text{m} \times 5.3\text{m}$ 。

在风荷载作用下,比较无伸臂加强层与不同伸臂加强层位置时,底部墙肢的拉力减小量百分比  $\Delta N = (N_i - N_j) \times 100\% / N_i$ ,其中  $N_i, N_j$  分别为无伸

臂加强层和不同伸臂加强层位置时结构底部墙肢拉力。

不同伸臂加强层位置时筒体的底部墙肢拉力及底部墙肢拉力减小量百分比的计算结果见表 6,底部墙肢拉力减小量百分比的变化曲线见图 3,对于设置一道伸臂加强层,且位于结构偏中下部时,有利于减小底部筒体墙肢拉力,起到减轻核心筒体的负荷作用。

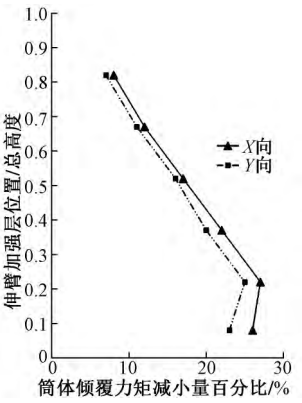


图 3 底部筒体倾覆力矩减小量百分比曲线

不同伸臂位置时墙肢 W1 及 W2 底部拉力及拉力

减小量百分比

表 6

| 伸臂位置 | 占总高 $H$ 的比例 | 底部拉力 $/(\times 10^4 \text{ kN})$ |      | 底部拉力减小量百分比 |      |       |     |
|------|-------------|----------------------------------|------|------------|------|-------|-----|
|      |             | 墙肢 W1                            |      | 墙肢 W2      |      | 墙肢 W1 |     |
|      |             | X 向                              | Y 向  | X 向        | Y 向  | X 向   | Y 向 |
| 无    | 无           | 2.98                             | 1.24 | 3.47       | 5.89 |       |     |
| 06 层 | 0.08        | 2.26                             | 0.92 | 2.6        | 4.43 | 24%   | 26% |
| 17 层 | 0.22        | 2.39                             | 0.91 | 2.58       | 4.52 | 20%   | 27% |
| 29 层 | 0.37        | 2.52                             | 1.00 | 2.74       | 4.8  | 15%   | 19% |
| 41 层 | 0.52        | 2.63                             | 1.06 | 2.89       | 5.03 | 12%   | 15% |
| 53 层 | 0.67        | 2.74                             | 1.12 | 3.07       | 5.3  | 8%    | 10% |
| 65 层 | 0.82        | 2.83                             | 1.16 | 3.21       | 5.5  | 5%    | 7%  |

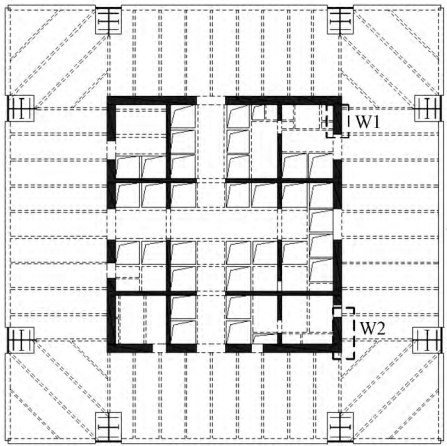


图 4 核心筒墙肢分析位置

由本小节讨论说明,伸臂加强层设置于不同高度位置时,对不同控制目标,有效性是不一样的,需按主要控制目标进行有效性分析比较后确定。本案例当主要控制结构层间位移角或顶点位移时,设置在结构的  $0.52H$  高度处为最优,但不同案例分析表明在风荷载作用下,当结构上部刚度削弱时,此位置将会适当上移,如深圳一座  $350\text{m}$  的塔楼,一道加强层设置于  $0.63H$  高度时最优;武汉一座  $350\text{m}$  塔楼,

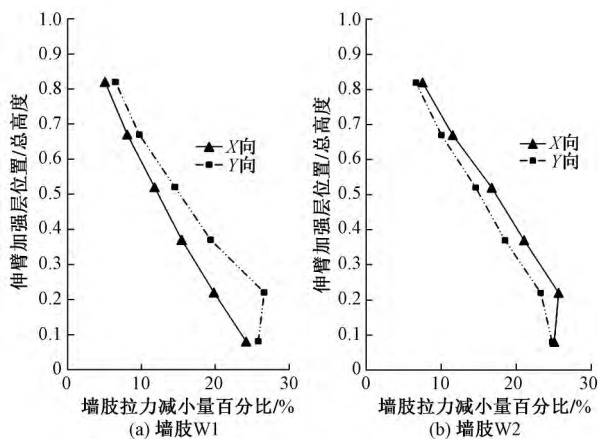


图5 底部墙肢拉力减小量百分比曲线

因顶部刚度削弱较多,一道加强层设置于  $0.74H$  高度时最优。《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2010)<sup>[4]</sup>(简称高规)中第 10.3.2 条第 1 款规定:当布置一个加强层时,可设置在 0.6 倍房屋高度附近。实践表明这一规定基本上是正确的。由此可见,一道加强层的最优位置需要进行有效性分析,比较后确定才可获得更为合理的结果。

### 3 设置两道及两道以上加强层位置

#### 3.1 两道加强层位置的设置建议

当一道加强层不能满足结构控制目标时,要考虑设置两道或更多加强层,且应进行有效性分析,以第 2 节的案例进行分析,设置两道加强层时,考虑如下方式:

将设置一道伸臂加强层的最优位置 41 层 ( $0.52H$ ) 确定为第一道伸臂加强层位置,然后根据设置一道伸臂加强层的有效性分析结果进行组合,组合可分为以下 4 种:组合 1: 17 层+41 层;组合 2: 29 层+41 层;组合 3: 41 层+53 层;组合 4: 41 层+65 层。各个组合下结构主要指标比较见表 7。

表 7 设置两道伸臂加强层时主要指标对比

| 组合 | 周期/s  |       | 顶点位移/mm |     | 层间位移角 |       | 底部筒体倾覆力矩/( $\times 10^6 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ) |      |
|----|-------|-------|---------|-----|-------|-------|----------------------------------------------------|------|
|    | $T_1$ | $T_2$ | X 向     | Y 向 | X 向   | Y 向   | X 向                                                | Y 向  |
| 1  | 7.21  | 7.20  | 522     | 601 | 1/531 | 1/460 | 5.32                                               | 6.38 |
| 2  | 7.22  | 7.21  | 520     | 600 | 1/539 | 1/463 | 5.90                                               | 6.99 |
| 3  | 7.35  | 7.35  | 521     | 604 | 1/562 | 1/490 | 6.54                                               | 7.66 |
| 4  | 7.44  | 7.42  | 527     | 605 | 1/553 | 1/489 | 6.63                                               | 7.75 |

可以看出,设置两道伸臂加强层时,将加强层设于 41 层+53 层(组合 3)较优,其次是 41 层+65 层(组合 4),即选择一道伸臂加强层最优位置(本案例为 41 层)及其相邻一个避难层位置(本案例为 53 层或 65 层)为一种较优选择,进一步的分析表明,取一道伸臂加强层最优位置的相邻上下避难层处设

两道伸臂加强层也是较优的选择。

#### 3.2 三道加强层位置的设置建议

当两道加强层不能满足结构控制目标时,要考虑设置三道加强层。设置三道加强层时,根据两道加强层的有效性分析结果,选择最优两道加强层中较好的一组或两组进行组合:

(1) 选择本案例较优的一组(41 层+53 层),可得如下组合:组合 1: 17 层+41 层+53 层;组合 2: 29 层+41 层+53 层;组合 3: 41 层+53 层+65 层;

(2) 选择其次的一组(41 层+65 层),可得如下组合:组合 4: 17 层+41 层+65 层;组合 5: 29 层+41 层+65 层;组合 6: 41 层+53 层+65 层。

各个组合情况下结构主要指标比较见表 8。

表 8 不同组合下设置三道伸臂时主要指标对比

| 组合 | 周期/s  |       | 顶点位移/mm |     | 层间位移角 |       | 底部筒体倾覆力矩/( $\times 10^6 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ) |      |
|----|-------|-------|---------|-----|-------|-------|----------------------------------------------------|------|
|    | $T_1$ | $T_2$ | X 向     | Y 向 | X 向   | Y 向   | X 向                                                | Y 向  |
| 1  | 7.00  | 6.97  | 480     | 562 | 1/607 | 1/496 | 5.18                                               | 6.22 |
| 2  | 7.03  | 7.01  | 483     | 565 | 1/627 | 1/497 | 5.77                                               | 6.85 |
| 3  | 7.30  | 7.29  | 502     | 584 | 1/567 | 1/500 | 6.49                                               | 7.60 |
| 4  | 7.06  | 7.05  | 484     | 562 | 1/578 | 1/520 | 5.23                                               | 6.28 |
| 5  | 7.08  | 7.07  | 486     | 564 | 1/585 | 1/526 | 5.81                                               | 6.89 |
| 6  | 7.30  | 7.29  | 502     | 584 | 1/567 | 1/500 | 6.49                                               | 7.60 |

由表 8 可知,若控制最大层间位移角时,29 层+41 层+65 层(组合 5)是较好的组合;若在满足结构控制目标的基础上,进一步减小底部筒体倾覆力矩,17 层+41 层+65 层(组合 4)是较好的选择。

伸臂加强层位置和数量往往与设置一道伸臂加强层最优位置的确定有关,根据本案例及有关案例分析结果提出以下几点建议:1) 应结合结构体系,明确所设加强层的主要目标,通过有效性分析,在建筑不同高度避难层处来确定一道伸臂加强层最优位置;2) 当需要设置两道伸臂加强层时,选择一道加强层最优位置或相邻次要最优位置,并分别和其相邻上下部范围内加强层组合,进行有效性分析比较后确定;3) 当需要设置三道伸臂加强层时,在设置两道加强层的基础上,选择满足结构控制目标较优的组合,一般可将第三道伸臂设于结构中下部。

#### 3.3 多于三道加强层位置设置建议

参照以上分析结果,当需设置多于三道加强层时,建议可在居中设置三道加强层的基础上,往下或往上延伸设置一道或两道加强层,可进行有效性分析比较确定。

### 4 顶部设置加强层的讨论

文献[2]的建议是结构顶部不设置加强层。基

不同伸臂位置时主要指标比较

表 9

| 伸臂位置                  | 周期/s           |                | 顶点位移/mm |     | 风振加速度/( m/s <sup>2</sup> ) |        |        |        | 层间位移角 |       | 底部筒体倾覆力矩<br>/( ×10 <sup>6</sup> kN·m) |       |
|-----------------------|----------------|----------------|---------|-----|----------------------------|--------|--------|--------|-------|-------|---------------------------------------|-------|
|                       |                |                |         |     | 顺风向                        |        | 横风向    |        |       |       |                                       |       |
|                       | T <sub>1</sub> | T <sub>2</sub> | X 向     | Y 向 | X 向                        | Y 向    | X 向    | Y 向    | X 向   | Y 向   | X 向                                   | Y 向   |
| 41 层( 0.52 <i>H</i> ) | 7. 61          | 7. 59          | 571     | 651 | 0. 059                     | 0. 057 | 0. 212 | 0. 220 | 1/512 | 1/449 | 6. 80                                 | 7. 95 |
| 79 层( 1.0 <i>H</i> )  | 8. 29          | 8. 25          | 652     | 725 | 0. 060                     | 0. 059 | 0. 251 | 0. 264 | 1/419 | 1/378 | 7. 88                                 | 9. 13 |

于第 2 节的案例进行分析,在结构顶部 79 层(1.0H)处设置伸臂加强层。在风荷载作用下 41 层(0.52H)处和 79 层(1.0H)处主要指标比较见表 9。

可以看出,顶部设置伸臂加强层不符合一道加强层最优位置的要求。

高规中第 10.3.2 条第 1 款规定:当布置两个加强层时,可分别设置在顶层和 0.5 倍房屋高度附近。按照高规要求,本案例设置两道伸臂加强层位置应是 41 层+79 层,与 3.1 节加强层设于 41 层+53 层比较,主要指标情况见表 10。

风荷载作用下两道伸臂时主要指标对比 表 10

| 伸臂位置      | 周期/s           |                | 顶点位移/mm |     | 层间位移角 |       | 底部筒体倾覆力矩/(×10 <sup>6</sup> kN·m) |      |
|-----------|----------------|----------------|---------|-----|-------|-------|----------------------------------|------|
|           | T <sub>1</sub> | T <sub>2</sub> | X 向     | Y 向 | X 向   | Y 向   | X 向                              | Y 向  |
| 41 层+53 层 | 7.35           | 7.35           | 521     | 604 | 1/562 | 1/490 | 6.54                             | 7.66 |
| 41 层+79 层 | 7.53           | 7.52           | 543     | 618 | 1/537 | 1/483 | 6.68                             | 7.83 |

由表 10 得知,当设置两道加强层时,按高规规定选择加强层的位置并不是较好的选择。

高规中第 10.3.2 条第 1 款规定:当布置多个加强层时,宜沿竖向从顶层向下均匀布置。按此要求,本案例设置三道伸臂加强层位置应是 H/3、2H/3 以及顶层,即 29 层+53 层+79 层,与 3.2 节加强层设于 29 层+41 层+65 层比较,主要指标情况见表 11。

可以看出,当设置三道加强层时,29 层+41 层+65 层优于 29 层+53 层+79 层。

风荷载作用下三道伸臂不同位置时主要指标对比 表 11

| 伸臂位置           | 周期/s           |                | 顶点位移/mm |     | 层间位移角 |       | 底部筒体倾覆力矩/(×10 <sup>6</sup> kN·m) |      |
|----------------|----------------|----------------|---------|-----|-------|-------|----------------------------------|------|
|                | T <sub>1</sub> | T <sub>2</sub> | X 向     | Y 向 | X 向   | Y 向   | X 向                              | Y 向  |
| 29 层+53 层+79 层 | 7.24           | 7.23           | 502     | 580 | 1/562 | 1/501 | 6.01                             | 7.12 |
| 29 层+41 层+65 层 | 7.08           | 7.07           | 486     | 564 | 1/585 | 1/526 | 5.81                             | 6.89 |

综上所述,顶部设有加强层的情况,虽也能取得一定的效果,但不是较优的,考虑到建筑设计时,顶层通常不做避难层或设备层,建议一般不在顶层设加强层。

5 伸臂桁架构件截面的设定方法

5.1 方法提出背景

关于伸臂桁架构件截面尺寸的初定,一般是借鉴相似工程项目的截面尺寸,通过重复试算进行调

整。本文针对图 6 所示的人字撑伸臂桁架斜撑截面的初定方法进行了研究,提出了初步设计时,计算斜腹杆截面的近似公式。

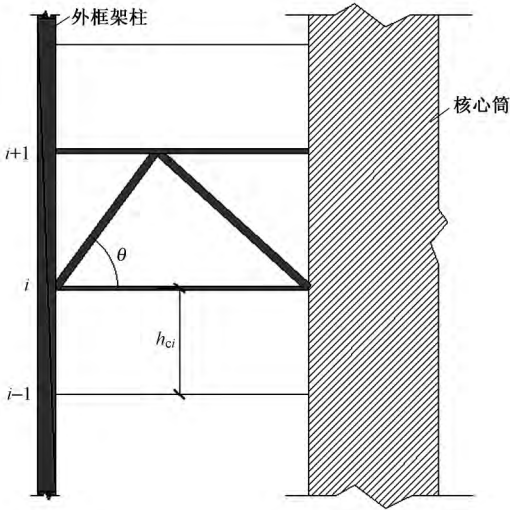


图 6 人字撑伸臂布置示意图

5.2 方法论证

在风荷载或水平地震作用下,某高层建筑第 i+1 层无伸臂加强层时,可求得第 i 层外框柱竖向变形差  $\Delta_{ve,i}$  为:

$$\Delta_{ve,i} = \Delta_{e,i} - \Delta_{e,i-1} \quad (1)$$

式中:  $\Delta_{e,i}$  为无伸臂加强层时,第 i 层外框柱竖向变形;  $\Delta_{e,i-1}$  为第 i-1 层外框柱竖向变形。

当在第 i+1 层设置人字撑伸臂时(图 6),可求得相应第 i 层的外框柱竖向变形差  $\Delta_{ve,i}^t$  为:

$$\Delta_{ve,i}^t = \Delta_{e,i}^t - \Delta_{e,i-1}^t \quad (2)$$

式中:  $\Delta_{e,i}^t$  为在第 i+1 层设置人字撑伸臂加强层时,第 i 层外框柱竖向变形;  $\Delta_{e,i-1}^t$  为第 i-1 层外框柱竖向变形。

$\Delta_{ve,i}$  和  $\Delta_{ve,i}^t$  的关系可用如下公式近似表示:

$$\Delta_{ve,i}^t = \mu_{ci}^t \cdot \Delta_{ve,i} \quad (3)$$

式中  $\mu_{ci}^t$  为在第 i+1 层设置伸臂加强层时,第 i 层外框柱竖向变形差与不考虑伸臂加强层时第 i 层外框柱竖向变形差的比值,一般近似取 2~4(建议结构底部取 2,中部取 3,邻近顶部范围取 4)。

由胡克定律得到,在第 i+1 层设置加强层时,第 i 层外框柱的轴力  $N_{ci}$  与外框柱竖向变形差  $\Delta_{ve,i}^t$  的关系为:

$$N_{ci} = \frac{EA\Delta_{vc,i}}{h_{ci}} \quad (4)$$

式中:  $EA$  为外框柱的轴向刚度;  $h_{ci}$  为第  $i$  层外框柱层高。

人字撑伸臂加强层斜腹杆与水平方向夹角以  $\theta$  表示, 则斜腹杆轴力  $N_d$  与其竖向分力  $N_d^v$  的关系为:

$$N_d = \frac{N_d^v}{\sin\theta} \quad (5)$$

人字撑伸臂斜腹杆轴力的竖向分力  $N_d^v$  与第  $i$  层外框柱的轴力  $N_{ci}$  的关系可近似用以下公式表示:

$$N_d^v = \mu_{di}^v \cdot N_{ci} \quad (6)$$

式中  $\mu_{di}^v$  为第  $i+1$  层斜腹杆轴力的竖向分力与第  $i$  层外框柱轴力的比值。

综合式 (3) ~ (6) 得到人字撑斜腹杆轴力的近似表达式为:

$$N_d = \frac{\mu_{ci}^i \mu_{di}^v EA \Delta_{vc,i}}{h_{ci} \sin\theta} \quad (7)$$

当  $\theta = 40^\circ \sim 45^\circ$  时,  $\mu_{di}^v$  一般近似取  $0.6 \sim 0.75$  (建议结构底部取  $0.6 \sim 0.65$ , 中部取  $0.7$ , 邻近顶部范围取  $0.75$ )。

人字撑斜腹杆是仅考虑风荷载或水平地震单工况作用下的轴力, 此轴力为标准值, 还需考虑与设计有关的系数调整。由于考虑小震或风荷载作用与恒、活荷载组合下轴力设计值的复杂性, 故在设计时仅对风荷载或水平地震相关的系数进行调整及放大。荷载组合为:

$$N = \gamma \mu_N \cdot N_d \quad (8)$$

式中:  $N$  为斜腹杆轴力的设计值;  $N_d$  为仅考虑风荷载或水平地震作用下斜腹杆轴力标准值;  $\gamma$  为荷载组合系数, 当风荷载起控制作用时,  $\gamma$  取  $1.4$ , 当水平地震起控制作用时,  $\gamma$  取  $1.3$ ;  $\mu_N$  为放大系数, 一般近似取  $1.2 \sim 1.4$ 。

人字撑斜腹杆轴力确定后, 便可根据《钢结构设计规范》(GB 50017—2017) 轴心受压构件强度验算及轴心受压构件稳定验算结果初步确定斜腹杆截面。首先由轴心受压构件强度验算得到的斜腹杆截面面积  $A_1$  表达式为:

$$A_1 = \frac{N}{f} \quad (9)$$

式中  $f$  为不同钢材牌号的抗压强度设计值, 根据工程经验可预先选用一个数值进行初步计算。

联合式 (7) ~ (9) 得到斜腹杆的截面面积  $A_1$  表达式为:

$$A_1 = \frac{\mu \gamma EA \Delta_{vc,i}}{f h_{ci} \sin\theta} \quad (10)$$

式中  $\mu$  为综合调整系数,  $\mu = \mu_{ci}^i \mu_{di}^v \mu_N$ 。

由计算得到的面积  $A_1$  初定斜腹杆截面形式和尺寸, 以此截面形式和尺寸计算轴心受压构件的稳定系数  $\varphi$ 。根据轴心受压构件稳定验算公式, 得到的斜腹杆的截面面积  $A_2$  表达式为:

$$A_2 = \frac{N}{\varphi f} \quad (11)$$

式中  $\varphi$  为轴心受压构件的稳定系数, 应根据构件长细比、钢材屈服强度等确定。

联合式 (7) ~ (8) 和式 (11), 得到的斜腹杆截面面积  $A_2$  表达式为:

$$A_2 = \frac{\mu \gamma EA \Delta_{vc,i}}{\varphi f h_{ci} \sin\theta} \quad (12)$$

人字撑斜腹杆的截面面积  $A$  取  $A_1$  与  $A_2$  的较大值, 即:

$$A = \max[A_1, A_2]$$

伸臂桁架人字撑的上下弦截面面积根据工程经验近似取值如下:

$$A_{\pm} = (0.55 \sim 0.65) A$$

$$A_{\mp} = (0.40 \sim 0.55) A$$

式中  $A_{\pm}$  和  $A_{\mp}$  分别为人字撑伸臂上弦和下弦的截面面积。

## 6 工程实例

现以本文第 2 节案例为例, 采用第 5 节伸臂桁架构件截面初定方法进行计算与设计, 以说明此方法的合理性。

结构布置一道伸臂加强层, 并设置于 41 层时, 按此方法计算的伸臂构件截面见表 12, 风荷载作用下结构主要指标见表 13。

设置一道伸臂加强层伸臂构件截面尺寸 表 12

| 伸臂位置 41 层 | $B/\text{mm}$ | $H/\text{mm}$ | $t_w/\text{mm}$ | $t_f/\text{mm}$ | 面积/ $\text{mm}^2$  |
|-----------|---------------|---------------|-----------------|-----------------|--------------------|
| 上弦        | 500           | 1 000         | 95              | 95              | $1.72 \times 10^5$ |
| 下弦        | 500           | 1 000         | 70              | 70              | $1.30 \times 10^5$ |
| 斜撑        | 1 000         | 1 000         | 100             | 100             | $2.80 \times 10^5$ |
| 上弦/斜撑     | —             | —             | —               | —               | 0.61               |
| 下弦/斜撑     | —             | —             | —               | —               | 0.47               |

注: 伸臂桁架截面均采用工字钢;  $B \times H \times t_w \times t_f$  表示截面总宽度  $\times$  截面总高度  $\times$  腹板厚度  $\times$  翼缘厚度。

风荷载作用下设置一道伸臂加强层时主要指标 表 13

| 伸臂位置 | 顶点位移/ $\text{mm}$ |     | 层间位移角 |       | 底部筒体倾覆力矩/( $\times 10^6 \text{kN} \cdot \text{m}$ ) |      |
|------|-------------------|-----|-------|-------|-----------------------------------------------------|------|
|      | X 向               | Y 向 | X 向   | Y 向   | X 向                                                 | Y 向  |
| 41 层 | 565               | 643 | 1/518 | 1/451 | 6.75                                                | 7.90 |

由表 13 得知, 布置一道伸臂加强层时在 Y 向未能满足最大层间位移角要求, 需要在 Y 向再布置多一

道伸臂加强层,按 3.1 节建议,在 53 层处  $Y$  向布置多一道伸臂加强层,伸臂构件截面尺寸见表 14,风荷载作用下两道伸臂加强层结构主要指标见表 15。

53 层处  $Y$  向加强层伸臂构件截面尺寸 表 14

| 伸臂位置 53 层 | $B/\text{mm}$ | $H/\text{mm}$ | $t_w/\text{mm}$ | $t_f/\text{mm}$ | 面积/ $\text{mm}^2$ |
|-----------|---------------|---------------|-----------------|-----------------|-------------------|
| 上弦        | 500           | 1 000         | 80              | 80              | $1.47\times 10^5$ |
| 下弦        | 400           | 1 000         | 65              | 65              | $1.09\times 10^5$ |
| 斜撑        | 900           | 1 000         | 90              | 90              | $2.36\times 10^5$ |
| 上弦/斜撑     | —             | —             | —               | —               | 0.62              |
| 下弦/斜撑     | —             | —             | —               | —               | 0.46              |

风荷载作用下设置两道伸臂加强层时主要指标 表 15

| 伸臂位置      | 顶点位移/ $\text{mm}$ |       | 最大层间位移角 |       | 底部筒体倾覆力矩/ $(\times 10^6 \text{kN}\cdot\text{m})$ |       |
|-----------|-------------------|-------|---------|-------|--------------------------------------------------|-------|
|           | $X$ 向             | $Y$ 向 | $X$ 向   | $Y$ 向 | $X$ 向                                            | $Y$ 向 |
| 41 层+53 层 | 552               | 602   | 1/543   | 1/486 | 6.68                                             | 7.66  |

可以看出,在  $Y$  向布置两道伸臂加强层时仍未能满足最大层间位移角要求,由相关工程经验总结所得,当截面尺寸大于某一范围后,对提高结构刚度的贡献不明显,因此考虑在  $Y$  向布置三道伸臂加强层,按第 4 节建议进行伸臂加强层位置有效性分析,选择伸臂加强层位置为 29 层+41 层+65 层。其中在 29 层+41 层+65 层的  $Y$  向均设置伸臂加强层,选择在 41 层+65 层的  $X$  向布置伸臂加强层,以避免  $X$  向伸臂构架截面尺寸过大。29 层和 65 层伸臂加强层伸臂构件截面尺寸分别见表 16、17。41 层伸臂构件尺寸见表 12。风荷载作用下设置三道伸臂加强层时结构主要指标见表 18。

29 层处  $Y$  向加强层伸臂构件截面尺寸 表 16

| 伸臂位置 29 层 | $B/\text{mm}$ | $H/\text{mm}$ | $t_w/\text{mm}$ | $t_f/\text{mm}$ | 面积/ $\text{mm}^2$ |
|-----------|---------------|---------------|-----------------|-----------------|-------------------|
| 上弦        | 700           | 1 000         | 95              | 95              | $2.10\times 10^5$ |
| 下弦        | 600           | 1 000         | 75              | 75              | $1.54\times 10^5$ |
| 斜撑        | 1100          | 1100          | 110             | 110             | $3.39\times 10^5$ |
| 上弦/斜撑     | —             | —             | —               | —               | 0.62              |
| 下弦/斜撑     | —             | —             | —               | —               | 0.45              |

65 层加强层伸臂构件截面尺寸 表 17

| 伸臂位置 65 层 | $B/\text{mm}$ | $H/\text{mm}$ | $t_w/\text{mm}$ | $t_f/\text{mm}$ | 面积/ $\text{mm}^2$ |
|-----------|---------------|---------------|-----------------|-----------------|-------------------|
| 上弦        | 400           | 900           | 70              | 70              | $1.09\times 10^5$ |
| 下弦        | 400           | 900           | 55              | 55              | $8.75\times 10^5$ |
| 斜撑        | 900           | 900           | 70              | 70              | $1.79\times 10^5$ |
| 上弦/斜撑     | —             | —             | —               | —               | 0.61              |
| 下弦/斜撑     | —             | —             | —               | —               | 0.49              |

风荷载作用下设置三道伸臂时主要指标 表 18

| 伸臂位置           | 顶点位移/ $\text{mm}$ |       | 层间位移角/ $\text{rad}$ |       | 底部筒体倾覆力矩/ $(\times 10^6 \text{kN}\cdot\text{m})$ |       |
|----------------|-------------------|-------|---------------------|-------|--------------------------------------------------|-------|
|                | $X$ 向             | $Y$ 向 | $X$ 向               | $Y$ 向 | $X$ 向                                            | $Y$ 向 |
| 29 层+41 层+65 层 | 514               | 563   | 1/570               | 1/528 | 6.32                                             | 6.90  |

由表 18 可知,在 29 层+41 层+65 层的  $Y$  向设

置三道伸臂加强层,结构最大层间位移角可满足规范要求。

伸臂位置和数量的选择还需进一步考虑伸臂构件内力,选择适宜的构件尺寸。表 19 为人字撑斜腹杆的应力。由表 19 可看出,本案例选择的伸臂加强层构件截面尺寸对抗风是较适宜的。

风荷载作用下设置三道伸臂斜腹杆应力/ $\text{MPa}$  表 19

| 伸臂位置 |       | $f_1$ | $f_2$ | $f_3$ |
|------|-------|-------|-------|-------|
| 29 层 | $Y$ 向 | 0.86  | 0.76  | 0.84  |
| 41 层 | $X$ 向 | 0.90  | 0.80  | 0.84  |
|      | $Y$ 向 | 0.79  | 0.70  | 0.77  |
| 65 层 | $X$ 向 | 0.81  | 0.72  | 0.78  |
|      | $Y$ 向 | 0.80  | 0.72  | 0.83  |

注: $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$  分别为组合作用下人字撑斜腹杆强度应力比、 $X$  向和  $Y$  向稳定应力比。

考虑结构抗震要求,地震组合(1.2( $D+0.5L$ ))+1.3( $E$ ))作用下结构整体指标及伸臂斜腹杆应力见表 20、21。

1.2( $D+0.5L$ ))+1.3( $E$ ) 作用下设置三道伸臂时主要指标 表 20

| 伸臂位置           | 顶点位移/ $\text{mm}$ |       | 层间位移角 |       | 底部筒体倾覆力矩/ $(\times 10^6 \text{kN}\cdot\text{m})$ |       |
|----------------|-------------------|-------|-------|-------|--------------------------------------------------|-------|
|                | $X$ 向             | $Y$ 向 | $X$ 向 | $Y$ 向 | $X$ 向                                            | $Y$ 向 |
| 29 层+41 层+65 层 | 335               | 333   | 1/809 | 1/729 | 4.95                                             | 4.69  |

1.2( $D+0.5L$ ))+1.3( $E$ ) 作用下设置三道伸臂

斜腹杆应力/ $\text{MPa}$  表 21

| 伸臂位置 |       | $f_1$ | $f_2$ | $f_3$ |
|------|-------|-------|-------|-------|
| 29 层 | $Y$ 向 | 0.32  | 0.30  | 0.32  |
| 41 层 | $X$ 向 | 0.37  | 0.37  | 0.38  |
|      | $Y$ 向 | 0.32  | 0.30  | 0.33  |
| 65 层 | $X$ 向 | 0.43  | 0.41  | 0.44  |
|      | $Y$ 向 | 0.40  | 0.38  | 0.43  |

仅考虑自重组合工况 1.2( $D+0.5L$ ) 作用下,斜腹杆应力情况见表 22。

由表 21 和表 22 可得仅考虑小震作用时斜腹杆应力,见表 23。

1.2( $D+0.5L$ ) 作用下三道伸臂斜腹杆应力/ $\text{MPa}$  表 22

| 伸臂位置 |       | $f_1$ | $f_2$ | $f_3$ |
|------|-------|-------|-------|-------|
| 29 层 | $Y$ 向 | 0.15  | 0.13  | 0.14  |
| 41 层 | $X$ 向 | 0.17  | 0.15  | 0.16  |
|      | $Y$ 向 | 0.16  | 0.14  | 0.14  |
| 65 层 | $X$ 向 | 0.28  | 0.24  | 0.26  |
|      | $Y$ 向 | 0.25  | 0.23  | 0.26  |

由表 23 可得仅在小震作用下三道斜腹杆应力较小,留有相对较大富裕空间给大震,但最终截面尺寸尚且需按规范要求罕遇地震弹塑性分析,以保证满足结构性能目标要求。

综上可得,伸臂加强层位置的确定和数量选择

仅小震作用下设置三道伸臂斜腹杆应力/MPa 表 23

| 伸臂位置 |     | $f_1$ | $f_2$ | $f_3$ |
|------|-----|-------|-------|-------|
| 29 层 | Y 向 | 0.17  | 0.17  | 0.18  |
| 41 层 | X 向 | 0.20  | 0.22  | 0.22  |
|      | Y 向 | 0.16  | 0.16  | 0.19  |
| 65 层 | X 向 | 0.15  | 0.17  | 0.18  |
|      | Y 向 | 0.15  | 0.15  | 0.17  |

的建议,以及伸臂桁架构件截面的初定方法可用于初步设计阶段,对设计工作具有实用的意义。

## 7 结论

(1) 加强层位置的设置应按照建筑使用功能,在建筑避难层处设置。

(2) 应结合结构控制目标进行有效性分析,选择加强层的最优位置和数量。当控制顶点位移和最大层间位移角时,加强层设置于结构中上部效果比较显著;当控制底部筒体墙肢的轴力、倾覆力矩等时,加强层设置于结构偏中下部效果较好。

(3) 当仅需设置一道加强层时,一般居中略偏高设置较为有利,高规规定设置于“0.6 倍房屋高度附近”是合理的;当需设置两道加强层时,一般可在第一道加强层位置或紧邻位置的基础上,往上或往下相邻避难层处加设一道加强层,也可取一道加强层最优位置的相邻上下避难层处设两道加强层;当需设置三道加强层时,一般可在两道加强层位置的基础上,居中或往下加设一道,如考虑要达到较好减小筒体倾覆力矩的效果,第三道加强层可适当略往下布置。总之,加强层的最优位置需根据控制目标进行有

效性分析比较后确定才是较为科学合理的,研究也表明加强层数量不宜太多,应从安全性、经济性和合理性综合考虑,设置过多会造成不必要的浪费。

(4) 建议结构顶部不设置加强层,因建筑避难层一般不设置于顶层,计算结果表明顶部加强层也非最优选择。

(5) 本文指出了伸臂桁架构件截面尺寸的初定方法,通过工程实例应用说明此方法是合理的,可供工程师设计参考。

(6) 本文主要针对深圳地区超高层建筑为风荷载控制的情况,进行风荷载作用下的比较分析,当为地震作用控制时可按本文方法进行类似有效性分析,得出加强层最优位置和数量,其结果将会与风荷载作用下结果略有差异。

致谢:孙仁范教授、杨仁孟主任工程师提供了宝贵意见,在此表示感谢。

## 参 考 文 献

(上接第 102 页)

有外观,通过在钢桁架上弦位置设置 TMD 可以在不改变原有结构的基础上有效抑制结构在人群荷载激励下的振动。

## 参 考 文 献

- [1] 高层建筑混凝土结构技术规程: JGJ 3—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [2] Highway capacity manual 2000 [S]. Washington D. C.: Transportation Research Board, 1998.
- [3] 廖文科. 中国 7~18 岁汉族学生体质与健康动态变化与综合评价研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2009.
- [4] MATSUMOTO Y, NISHIOKA T, SHIOJIRI H, et al. Dynamic design of footbridges [S]. Bergamo: IABSE Proceedings, 1978.
- [5] SÉTRA. Assessment of vibrational behavior of footbridges under pedestrian loading [S]. Paris: Association Francaise de Génie Civil, 2006.

- [1] 黄世敏, 魏琰, 衣洪建, 等. 高层建筑中水平加强层最优位置的研究 [J]. 建筑科学, 2003, 19(2): 4-6, 10.
- [2] SMITH B S, COULL A. Tall building structures: analysis and design [M]. New York: Wiley-Interscience, 1991.
- [3] 徐培福, 黄吉峰, 史建鑫. 利用加强层调节框筒结构核心筒弯矩 [J]. 建筑结构, 2015, 45(7): 1-7.
- [4] 高层建筑混凝土结构技术规程: JGJ 3—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [5] 钢结构设计标准: GB 50017—2017 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [6] LEONARD D. Human tolerance levels for bridge vibrations [M]. Crowthorne: Road Research Laboratory, 1966.
- [7] 李爱群, 陈鑫, 张志强. 大跨楼盖结构减振设计与分析 [J]. 建筑结构学报, 2010, 31(6): 160-170.
- [8] ALLEN D E, ONYSKO D M, MURRAY T M. Minimizing floor vibration ATC design guide 1 [S]. Redwood City, CA: Applied Technology Council, 1999.
- [9] Bases for design of structures—serviceability of buildings and walkways against vibrations: ISO 10137-2007 [S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2007.
- [10] Mechanical vibration and shock—evaluation of human exposure to whole-body vibration: ISO 2631-1 [S]. Geneva: International Organization for Standardization, 1997.
- [11] 姜宇, 黄健, 吕佐超. 楼板体系振动舒适度设计 [M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [12] National building code for Canada: NBC-1985 [S]. Ottawa: National Research Council of Canada, 1985.