

DOI: 10.19701/j.jzjg.2020.07.001

# 一向少墙高层剪力墙结构抗震设计计算方法

魏 琰, 王 森, 曾庆立

(深圳市力鹏工程结构技术有限公司, 深圳 518034)

[摘要] 对高层建筑一向少墙剪力墙结构的结构体系特点进行了分析,指出了当少墙方向的扁柱楼板框架剪力比 $\mu_{inf}$ 大于 0.1 时,扁柱楼板框架作用较大,必须验算扁柱楼板框架的承载力;少墙方向的 X 向剪力墙一般为非矩形的复杂截面,设计时建议采用组合墙肢的设计方法;梁柱框架一般为异形柱截面,应按异形柱设计;少墙方向的扁柱楼板框架,楼板的验算应考虑水平荷载的作用;建议少墙方向的设计方法采用抗震性能化设计法。

[关键词] 结构体系; 梁柱框架; 异形柱; 扁柱楼板框架; 抗震性能设计

中图分类号: TU973.2 文献标识码: A 文章编号: 1002-848X(2020)07-0001-08

[引用本文] 魏琰,王森,曾庆立.一向少墙高层剪力墙结构抗震设计计算方法[J].建筑结构,2020,50(7):1-8.  
WEI Lian,WANG Sen,ZENG Qingli. Seismic design and calculation methods of high-rise shear wall structure with few shear walls in one direction[J].Building Structure,2020,50(7):1-8.

## Seismic design and calculation methods of high-rise shear wall structure with few shear walls in one direction

WEI Lian, WANG Sen, ZENG Qingli

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

**Abstract:** The characteristics of the shear wall structural system of a high-rise building with few shear walls in one direction were studied. It was pointed out that if the shear ratio  $\mu_{inf}$  of the flat column-slab frame with few shear walls in one direction exceeds 0.1, flat column slab frame undertook large loads and the bearing capacity of the frame should be checked and calculated; the X-direction shear wall in the direction of few walls generally had non-rectangular complex sections, so it was suggested to adopt the design method of composite wall limb in the design; the beam column frame generally had special-shaped column sections, so it should be designed according to the special-shaped column; the effect of horizontal load should be considered in the calculation of bearing capacity of floor of the flat column-slab frame in the direction of few walls; the design method of performance-based seismic design should be used for the flat column-slab frame in the direction of few walls.

**Keywords:** structural system; beam-column frame; specially shaped column; flat column slab frame; performance-based seismic design

### 0 前言

近年来,由于土地用地紧张及业主对景观的要求,大量涌现了超 B 级高度的超高层剪力墙结构,此类剪力墙结构在建筑一个方向剪力墙很多,符合规范定义的剪力墙结构要求;而在另一个方向剪力墙稀少,不符合规范对于剪力墙结构的要求。

对于一向少墙的钢筋混凝土剪力墙结构,主要存在两个大问题需要解决,一是少墙方向结构体系的判断;二是现行软件计算模型中剪力墙均按壳单元处理,在整体分析中已考虑剪力墙平面外刚度,但程序中并没有对剪力墙面外和相关的端柱的抗震承载能力进行计算,因而现行程序按剪力墙结构进行整体分析验算的结果是存在缺漏的,必须研究改进。

文献[1]对此类结构的抗侧力体系进行了研究,提出了少墙方向结构体系的判别方法;在此基础

上,本文进一步研究提出了较完整的一向少墙剪力墙结构的抗震设计计算方法,并结合工程案例进行说明,供工程界参考。

### 1 少墙方向抗侧力体系

文献[1]指出少墙结构在 X 向的抗侧力体系是由三部分结构组成(假定 X 向剪力墙稀少),即 X 向布置的剪力墙, X 向梁和柱(含剪力墙端柱)组成的框架以及 Y 向墙(面外)和楼板组成的扁柱楼板框架。

以图 1 某工程结构平面布置示意图为例,经划分后 X 向结构体系如图 2 所示, X 向剪力墙以黑体填充表示; X 向梁柱框架以方格填充表示,其特点之一是框架柱截面包括 Y 向剪力墙端部一定长度在

作者简介:魏琰,研究员,博士生导师,Email: wl2002111@163.com。

内,其形状为非矩形截面;扁柱楼板框架以斜线填充表示,其特点为扁柱楼板框架两侧的扁柱往往不在同一轴线上。由此可见,本案例少墙方向的结构体系不能判别为剪力墙结构体系,而是一种新的框架-剪力墙结构体系。

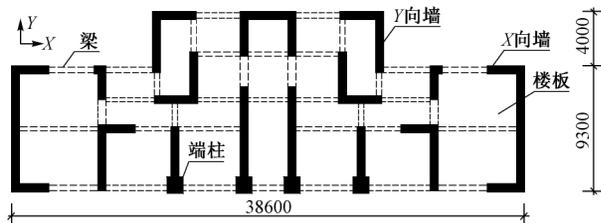


图1 某工程的结构平面布置示意图

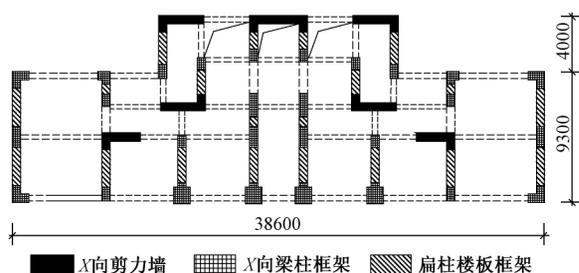


图2 少墙方向抗侧力体系示意图

假设弹性分析求得少墙方向三部分抗侧力结构第  $i$  层的剪力分别为  $V_{iw}$  ( $X$  向剪力墙),  $V_{if}$  ( $X$  向梁柱框架) 及  $V_{iwf}$  (扁柱楼板框架), 可由式 (1) ~ (4) 求得第  $i$  层少墙方向各抗侧结构承受的楼层剪力与层总剪力  $V_i$  的比值为:

剪力墙部分:

$$\mu_{iw} = V_{iw} / V_i \quad (1)$$

梁柱框架部分:

$$\mu_{if} = V_{if} / V_i \quad (2)$$

扁柱楼板框架部分:

$$\mu_{iwf} = V_{iwf} / V_i \quad (3)$$

以上三部分和为:

$$\mu_{iw} + \mu_{if} + \mu_{iwf} = 1.0 \quad (4)$$

由式 (1) ~ (4) 可知,一向少墙的剪力墙结构仅在多墙方向为剪力墙结构,在少墙方向并非为剪力墙结构,而是一种新型的框架-剪力墙结构,多了扁柱楼板框架的成分,而框架柱因另一向剪力墙端部参与工作而成为 L 形等异形柱。研究表明,当扁柱楼板框架剪力比  $\mu_{iwf} > 0.1$  时,扁柱楼板框架的抗侧作用不可忽视,可称为复合框架-剪力墙结构;当扁柱楼板框架剪力比  $\mu_{iwf} \leq 0.1$  时,扁柱楼板框架的抗侧作用相对较小,一般不需专门进行计算复核,可采用构造方法处理解决,此时可称为框架-剪力墙结构,其受力与一般框架-剪力墙结构基本相同。

## 2 计算模型

一向少墙结构在另一方向为剪力墙结构,在少墙方向为复合框架-剪力墙结构,如两个方向取不同的计算模型,则工作量较大且目前尚无相应的商业计算软件可用,为此建议两个方向采用同一剪力墙计算模型,采用有限元法进行计算。

### 2.1 剪力墙

对于双向剪力墙结构,仅需考虑剪力墙面内设计,不需要对剪力墙面外进行分析。对于少墙结构,在墙较多方向,剪力墙设计分为边缘构件及一般墙身段,可沿用现有程序采用墙单元按照组合墙肢或一字墙进行内力计算及承载力设计;少墙方向则需要根据墙面外的作用,对墙单元分段,为此需要通过人工进行墙单元分割,并根据分割后的单元分别求取梁柱框架、扁柱楼板框架的内力进行承载力设计。

### 2.2 梁柱框架

与框架结构或框架-剪力墙结构的框架采用杆单元模拟不同,少墙方向的梁柱框架一般是由剪力墙端柱接梁或剪力墙面外接梁构成,其截面包含  $Y$  向剪力墙端部一定长度范围内的墙,因此少墙方向的框架柱宜采用墙单元模拟,特别是剪力墙端柱,建议采用与墙身不同厚度的墙单元建模。少墙方向的框架柱截面形式一般为异形柱截面,内力应按照分段后的截面形式计算,楼面梁依然采用杆单元。

### 2.3 楼板

在墙较多方向,楼板由竖向荷载控制,其设计方法依然可以采用在假定的边界条件下,根据计算手册进行查表。在少墙方向,楼板的作用是扁柱楼板框架的“梁”,其设计需要考虑水平荷载作用。由于两侧扁柱往往不在同一轴线上,连接两侧扁柱的“梁”(楼板)在平面上往往是折梁的形式。实际上,在水平荷载作用,楼板支座弯矩较大,跨中弯矩较小,仅需在原有设计基础上,考虑楼板支座负弯矩即可。因此楼板应采用具有面外及面内刚度的弹性板单元,建议以 1m 为网格细分楼板,设计时仅取搭接在扁柱范围内的楼板进行计算,取水平荷载作用下,1m 板带的支座负弯矩与竖向荷载作用组合设计即可。

## 3 剪力墙分段方法

以上论述表明,一向少墙结构在计算时,剪力墙分段方法与一般剪力墙结构不同,它必须兼顾  $Y$  向剪力墙结构与少墙方向梁柱框架中柱截面的需要,为此在文献 [1] 研究成果基础上,参照《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2010) [2] (简称高规) 第 7.1.6 条及第 7.2.15 条的规定,  $X$  向布置的剪力

墙、梁柱框架、扁柱楼板框架的分段原则如下。

3.1 一字墙

图 3 所示的一字墙,面外即不搭梁亦不与 X 向剪力墙相接,此时整段一字墙划为扁柱楼板框架的一部分。

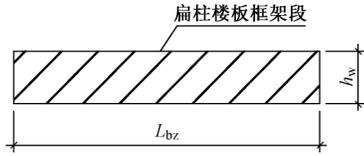


图 3 一字墙

3.2 一字墙面外搭梁

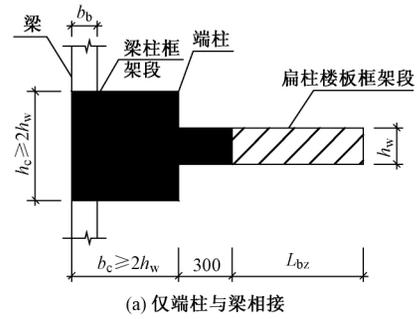
当一字墙面外搭梁时,大致可分为三种情形,如图 4 所示。当在墙面外的端部搭梁(图 4(a))时,梁柱框架的柱宽取值为  $L_f = \max(b_b + h_w, 0.5l_c)$ 。当在距离墙端  $b_1$  的位置设置一道梁(图 4(b))时,梁柱框架的柱宽取值为  $L_f = \max(b_1 + b_b + h_w, 0.5l_c)$ 。当在墙中部设置一道梁(图 4(c))时,梁柱框架的柱宽取值为  $L_f = b_b + 2h_w$ 。

3.3 一端与端柱相连

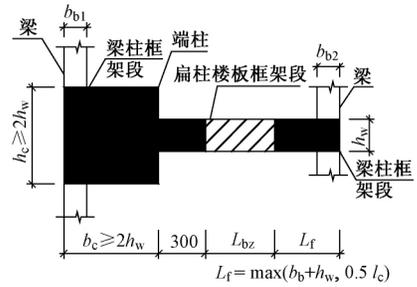
当在墙的其中一端与端柱相连(图 5(a))时,梁柱框架的柱宽取值为  $L_f = b_c + 300$ 。当一端与端柱相连,另一端搭梁(图 5(b))时,与端柱相连一端的梁柱框架的柱宽取值为  $L_f = b_c + 300$ ,搭梁一端的梁柱框架的柱宽取值为  $L_f = \max(b_b + h_w, 0.5l_c)$ 。

3.4 一端与 X 向剪力墙相连

当一字墙一端与 X 向剪力墙相连时,大致可分为三种情形。当一端与 X 向剪力墙的中部相连(图 6(a))时,一字墙长  $L_{bz}$ ,该一字墙均计入扁柱楼板框架段;当一端与 X 向剪力墙的端部相连(图 6(b))时,一字墙端部长度为  $L = \max(h_{w1}, 300)$  的一段划为 X 向剪力墙,剩余的部分划为扁柱楼板框架段;当一端在距离 X 向剪力墙端部  $L_x$  的位置与 X 向剪力墙相连,且  $L_x \leq h_{w1} + h_{w2}$ (图 6(c))时,一字墙端部长度为  $L = \max(h_{w1}, 300)$  的一段划为 X 向剪力墙,剩余的部分划为扁柱楼板框架段;当  $L_x > h_{w1} + h_{w2}$  时,



(a) 仅端柱与梁相接



(b) 端柱及墙面外与梁相接

图 5 墙有端柱

X 向剪力墙及扁柱楼板框架段的取值与图 6(a) 一致。

3.5 一端与 X 向剪力墙相连,另一端搭梁

当一端与 X 向剪力墙的中部相连,另一端搭梁(图 7(a))时,端部梁柱框架的柱宽取值为  $L_f = \max(b_b + h_w, 0.5l_c)$ ,剩余部分划为扁柱楼板框架;当一端与 X 向剪力墙的端部相连,另一端搭梁(图 7(b))时,一字墙端部长度为  $L = \max(h_{w1}, 300)$  的一段划为 X 向剪力墙,另一端梁柱框架的柱宽取值为  $L_f = \max(b_b + h_w, 0.5l_c)$ ,剩余的部分划为扁柱楼板框架;当一端在距离 X 向剪力墙端部  $L_x$  的位置与 X 向剪力墙相连,且  $L_x \leq h_{w1} + h_{w2}$ ,另一端搭梁(图 7(c))时,一字墙端部长度为  $L = \max(h_{w1}, 300)$  的一段划为 X 向剪力墙,另一端梁柱框架的柱宽取值为  $L_f = \max(b_b + h_w, 0.5l_c)$ ,剩余的部分划为扁柱楼板框架;当  $L_x > h_{w1} + h_{w2}$  时,X 向剪力墙及扁柱楼板框架的取值与图 7(a) 一致。

对于以上各图,建议:当扁柱楼板框架段尺寸  $L_{bz}$  小于  $\min(300, h_w)$  时,可将扁柱楼板框架段计入

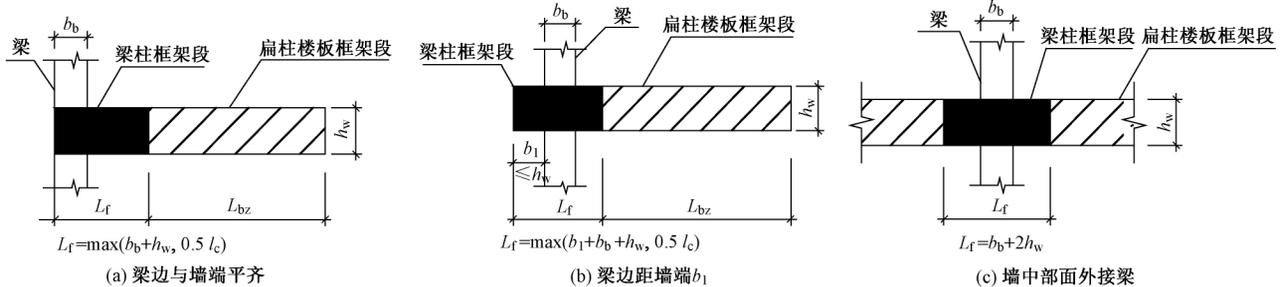


图 4 一字墙面外接梁

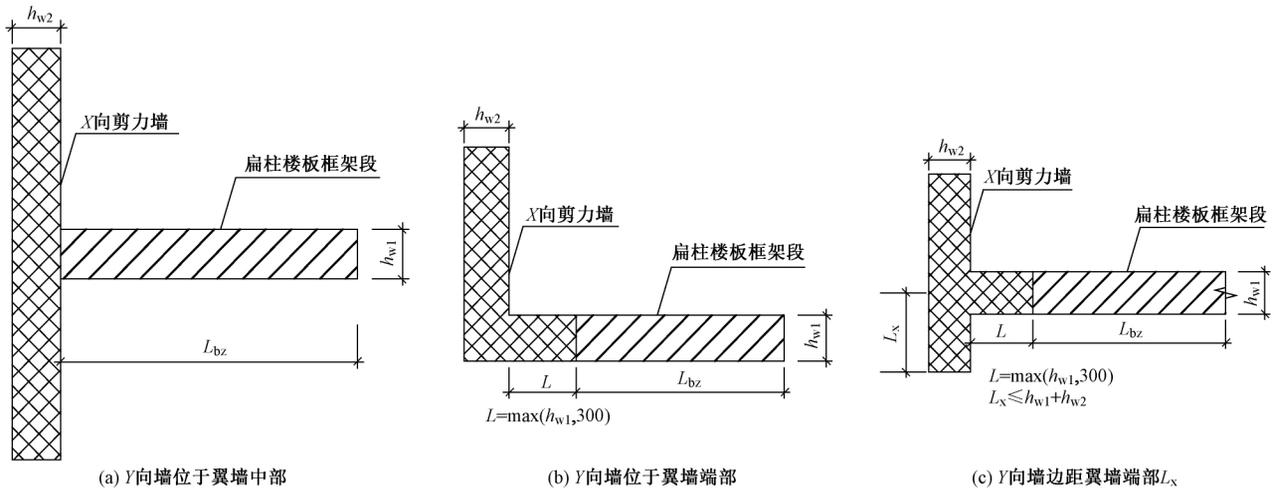


图6 一端与X向剪力墙相连

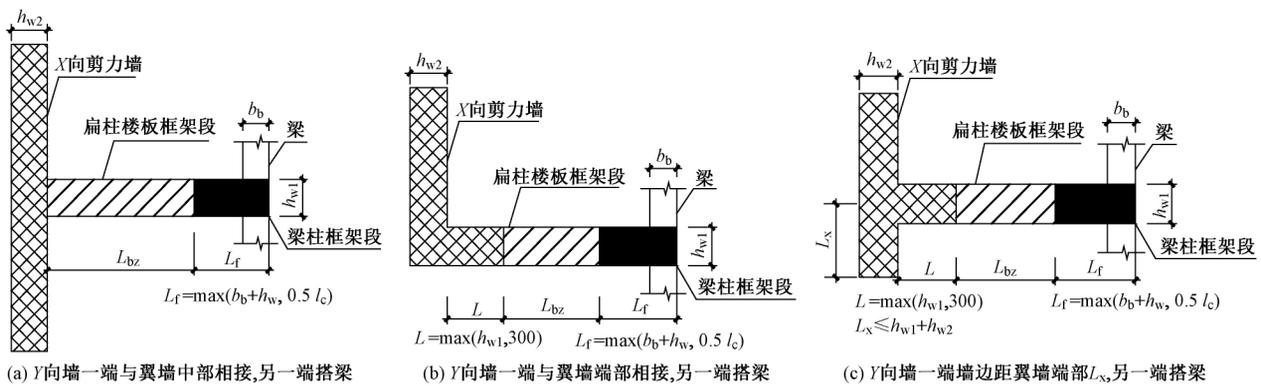


图7 一端与X向剪力墙相连,另一端搭梁

梁柱框架段或X向剪力墙段,如当一字墙一端仅与端柱相连或面外搭梁时,扁柱楼板框架段并入梁柱框架段,否则并入X向剪力墙。

#### 4 少墙方向结构抗震设计计算方法

少墙结构作为一种新型的结构体系,设计方法亟待研究解决,市场上尚未有相应的设计软件可用。根据过往的经验及结合现有规范有关于框架-剪力墙结构的设计思路,建议少墙方向的设计可按照性能设计法进行。

##### 4.1 抗震等级与性能目标

当扁柱楼板框架剪力比 $\mu_{w1} > 0.1$ 时,该结构体系为复合框架-剪力墙结构,在少墙方向的X向剪力墙其抗震等级宜按照框架-剪力墙结构中的剪力墙选取,梁柱框架及扁柱楼板框架宜按框架-剪力墙结构中的框架选取。

少墙方向的抗震性能目标建议可按照C级选取,结构及构件的性能要求见表1。

如表1所示,X向剪力墙及梁柱框架的性能目标与一般框架-剪力墙结构相似。少墙结构剪力墙面外破坏对非少墙方向结构的影响需给予充分的关

注,当墙厚较薄时,一旦出现屈服,剪力墙面外全截面可能迅速破坏,因此建议应严格控制扁柱的抗震性能目标。

##### 4.2 小震设计

少墙方向结构小震设计需根据上述分段后分别进行。其中X向剪力墙其截面形式可能为矩形、T形、L形以及两端带翼缘的复杂截面,设计时应根据具体截面形式及分段尺寸提取内力进行设计,其构造措施应满足规范对于剪力墙的要求。现有程序对于复杂截面剪力墙的计算一般有两个方法,一种是把复杂截面分别按照一字墙计算后,重叠部分配筋直接叠加;另一种是按照《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)<sup>[3]</sup>第9.4.3条及《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)<sup>[4]</sup>第6.2.13条第3款取一定的翼墙长度作为组合墙肢,按照异形墙截面进行计算设计;建议少墙方向结构宜按照组合墙肢计算,翼缘的计算长度可直接采用本文的分段方法选取。

少墙方向结构的梁柱框架,其框架柱的截面形式可能为矩形或L形等异形柱截面,设计时同样应

少墙方向结构及构件的性能目标 表 1

抗震烈度		多遇地震	设防地震	罕遇地震
性能水准		1	3	4
层间位移角限值		国家高规: 1/800~1/500 (广东高规: 1/650)	—	1/100
构件性能水平	X 向 剪力墙	底部 加强区	弹性	抗弯不屈服, 抗剪弹性
		一般 剪力墙	弹性	抗弯不屈服, 抗剪弹性
	框架柱(含 剪力墙端柱)	弹性	抗弯不屈服, 抗剪弹性	
	扁柱	弹性	抗弯不屈服, 抗剪弹性	
	连梁	弹性	部分抗弯屈 服, 抗剪不 屈服	
	框架梁	弹性	部分抗弯屈 服, 抗剪不 屈服	
	楼板(梁)	弹性	部分抗弯屈 服, 抗剪不 屈服	

注: 多遇地震层间位移角限值根据结构的总高, 参照框架-剪力墙结构取值, 括号中的 1/650 是按照广东高规取值。弹性、不屈服可按国家高规第 3.11.3 条的公式进行计算。

根据分段后的截面提取内力进行设计, 其构造亦应满足相关规范对于异形柱的要求。

扁柱的设计, 宜先按照传统剪力墙设计方法对面内进行配筋, 再根据面外分段提取不同分段的内力, 采用面内配筋结果分段进行承载力复核, 只有当面外承载力不满足要求时, 才需根据面外受力情况重新进行配筋设计。扁柱在另一个方向是面内剪力墙, 扁柱的配筋设计应考虑两个方向的配筋结果取包络。

扁柱纵向构造配筋要求, 可分为以下两部分:

1) 若扁柱与剪力墙面内边缘构件有重叠部分, 重叠部分的构造要求宜遵循边缘构件的要求; 2) 扁柱的中段一般为剪力墙面内的中部墙身位置, 其构造配筋与普通框架柱的构造配筋往往相差较大, 若按照普通框架柱的构造配筋进行设计, 将大大增加剪力墙的配筋, 可能会造成严重的浪费, 为此建议在满足上述承载力的前提下, 扁柱与边缘构件非重叠区域可取扁柱计算配筋的结果并应满足剪力墙墙身构造要求; 基于安全考虑, 建议对于较长的扁柱可考虑在中部位置间隔一定距离设置暗柱, 该暗柱可参照框架柱的构造配筋进行配筋, 暗柱的尺寸可参照高规第 6.4.1 条及第 7.1.6 条的要求, 柱高可取为  $\max(2h_w, 400)$ , 柱宽可同墙宽  $h_w$ , 如图 8 所示。

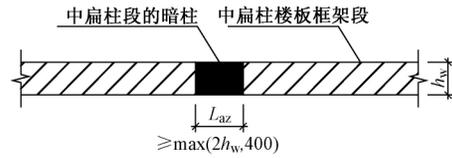


图 8 暗柱示意图

进行抗剪承载力设计时, 在满足面内墙约束边缘构件箍筋配置的同时, 对扁柱应根据计算配置一定的抗剪钢筋。由于常规设计并未对剪力墙面外的抗剪进行设计, 原有的面外拉结筋对抗剪作用有限, 建议扁柱楼板框架段可考虑按照式(5)进行面外斜截面承载力验算, 当承载力足够时, 可不另设面外的抗剪钢筋。

当偏心受压时:

$$V \leq \frac{1}{0.85} \left( \frac{1.05}{\lambda + 1} f_t b h_0 + 0.056N \right) \quad (5a)$$

当偏心受拉时:

$$V \leq \frac{1}{0.85} \left( \frac{1.05}{\lambda + 1} f_t b h_0 - 0.2N \right) \quad (5b)$$

当不能满足式(5a)或式(5b)要求时, 参照高规第 6.2.8 条及 6.2.9 条, 按式(6)进行面外抗剪钢筋配筋计算。

当偏心受压时:

$$V \leq \frac{1}{0.85} \left( \frac{1.05}{\lambda + 1} f_t b h_0 + 0.056N + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 \right) \quad (6a)$$

当偏心受拉时:

$$V \leq \frac{1}{0.85} \left( \frac{1.05}{\lambda + 1} f_t b h_0 - 0.2N + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 \right) \quad (6b)$$

由于剪力墙面内与面外的抗剪面积是一致的, 而剪力墙面内剪力往往远远大于面外剪力, 故扁柱的抗剪截面要求是由剪力墙面内剪力控制, 因此面外无需验算剪压比。

少墙方向楼板在水平荷载作用下, 楼板两侧支座产生一定的负弯矩。取 1m 板带为研究对象, 其沿板跨的弯矩分布如图 9 所示, 两端负弯矩较大, 跨中弯矩较小; 对于双向剪力墙结构, 楼板端部的弯矩往往较小, 可不考虑其对承载力的影响。

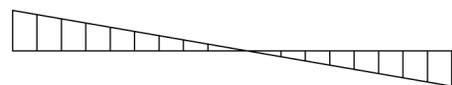


图 9 水平荷载作用下楼板弯矩示意图

在竖向荷载作用下, 沿板跨的弯矩分布如图 10 所示。竖向荷载作用下, 其支座及跨中弯矩均往往较大; 当考虑不同的荷载组合, 将图 9 与图 10 叠加以后, 与只考虑竖向荷载作用的工况相比, 楼板的支

座弯矩增大较多,跨中弯矩基本上不变;因此为了保证小震作用下楼板的承载力,楼板支座的抗弯承载力设计必须考虑水平荷载的影响(对于风控地区,尚需考虑风荷载的影响)。

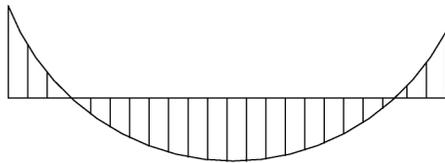


图 10 竖向荷载作用下楼板弯矩示意图

当楼板抗弯承载力满足要求,则其构造配筋可遵循现有规范对楼板的构造要求;考虑水平荷载后,楼板支座负弯矩影响范围较大,支座钢筋从墙边伸入楼板长度应适当增加,并有一定数量的通长钢筋。

#### 4.3 中震及大震分析

根据高规第 3.11.3 条的规定,第 3.4.5 性能水准的结构应进行弹塑性计算分析,中震、大震抗震性能水准一般都为第 3 或第 4 性能水准,因此对于少墙方向结构,中震、大震理论上应采用弹塑性分析法进行计算分析;然而,实际工程中考虑少墙方向的弹塑性分析存在以下困难:1) 现有的计算程序不能考虑剪力墙面外的非线性。少墙方向的框架柱及扁柱均采用了墙单元模拟,使得框架柱及扁柱在少墙方向只能按照弹性计算。2) 楼板单元不能考虑面外非线性。3) 同时考虑楼板及剪力墙面外的非线性会使弹塑性分析耗时大大增加。

在未能解决弹塑性分析方法的困难前提下,建议两个方向在小震弹性分析模型的基础上,采用同一模型按照等效弹性法近似计算。采用等效弹性法时,参考高规第 3.11.3 条的规定进行计算,应考虑中震及大震作用下结构刚度退化,中震、大震连梁刚度折减系数不应小于 0.3,中震、大震分析的结构阻尼比可比小震分析适当增加。

## 5 算例

### 5.1 工程简介

本案例项目位于深圳前海深港现代服务业合作区,建筑总高度为 131.10m,其附属商业裙房高度为 16.25m。本项目含 4 层地下室,地下 4 层~地下 2 层为车库和设备用房,地下 1 层为商业。嵌固端取地下 1 层顶板,板厚 180mm。上部楼层除加强层层高 5.1m,其余楼层层高 3.6m,板厚为 180mm。图 11 为本项目标准层结构平面图。从图 11 可以看出,本项目 X 向布置的剪力墙较少,可能存在少墙问题,需对 X 向的结构体系进行少墙判别。Y 向布置的剪力墙较多,可不进行少墙判别。

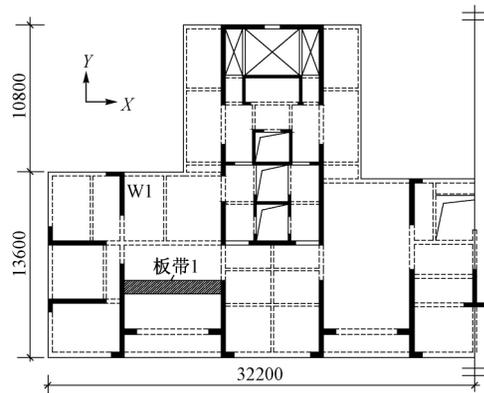


图 11 标准层结构平面示意图

### 5.2 结构体系判别及整体指标计算

根据文献[1]的判别方法,经计算,本案例少墙方向的抗侧力体系各部分的剪力比如表 2 所示。表 2 的计算结果表明,本案例 X 向的扁柱楼板框架的剪力比为  $0.156 > 0.1$ ,X 向可判别为复合框架-剪力墙结构。

参数	X 向剪力墙	X 向梁柱框架 (含剪力墙端柱)	扁柱楼板框架
剪力/kN	4 610	2 432	1 297
剪力比	0.553	0.291	0.156

表 3 的结构基本指标表明,在地震作用下,本案例少墙方向最大层间位移角为  $1/1 027$ ,Y 向最大层间位移角为  $1/1 765$ ,满足位移角限值要求。

指标	X 向	Y 向
周期/s	3.66	2.83
基底剪力/kN	16 384	18 427
层间位移角	1/1 027(24 层)	1/1 765(26 层)
规范限值	1/800(1/650)	1/800(1/650)

### 5.3 少墙方向构件抗震等级选取及抗震承载力验算

本案例在 X 向为复合框架-剪力墙结构,抗震设防烈度为 7 度,按照框架-剪力墙结构设计,其高度为超 B 级高度,构件的抗震等级如表 4 所示。

构件	X 向剪力墙	梁柱框架	扁柱楼板框架
抗震等级	一级	一级	一级

如前文所述,少墙方向的 X 向剪力墙、梁柱框架抗震等级与框架-剪力墙结构相同,模型中框架柱为采用墙单元模拟的异形柱,需人工取出内力并根据规范相关要求对构件内力进行调整,关于 X 向剪力墙、梁柱框架的具体验算过程本文不再赘述。此处仅以图 11 所示的剪力墙 W1 及图中斜线板带 1

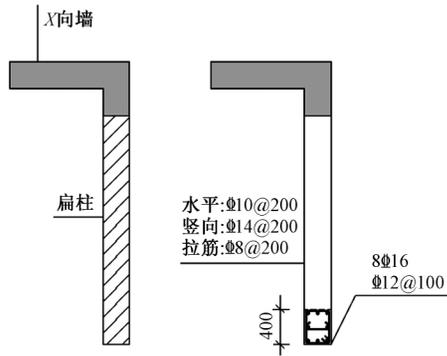


图 12 剪力墙 W1 示意图

为例,说明扁柱楼板框架承载力的验算。根据第 3 节的划分方法,将剪力墙 W1 墙划分为如图 12 所示的两部分。

中震、大震均采用等效弹性法,中震、大震连梁折减系数分别取 0.5、0.3,小震、中震的阻尼比均为 0.05,大震阻尼比为 0.06。根据内力计算结果及图 12 的配筋结果,对扁柱进行双向压弯、拉弯承载力验算,如图 13 所示。

图 13 的验算结果表明,本案例扁柱压弯抗震性能可满足小震弹性、中震不屈服的要求;在大震作用下,扁柱压弯已屈服,不满足设定的性能目标要求,在设计阶段,应适当增大配筋满足设定的性能目标。

扁柱抗剪验算如表 5 所示。表 5 的验算结果表明,本案例剪力墙面外抗剪抗震性能可满足小震、中震弹性,大震不屈服的要求;小震、中震、大震均能满足最小抗剪截面的抗剪承载力要求。

剪力设计值			抗剪承载力			最小抗剪截面		
小震	中震	大震	小震	中震	大震	小震	中震	大震
67.5	102.3	133.7	914	993	1 014.5	3 748.9	3 748.9	4 461.2

注:此处抗剪承载力计算未考虑拉结筋。

以图 11 所示的板带 1 为例,说明扁柱楼板框架的楼板验算。在恒载作用下,板带 1 的弯矩图如图 14 所示,其中  $M_1 = 21.38\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}$ ,  $M_2 = 20.7\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}$ ,  $M_z = -16.94\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}$  (本文约定上侧受拉为正)。竖向荷载作用下,板带 1 的弯矩分布类似

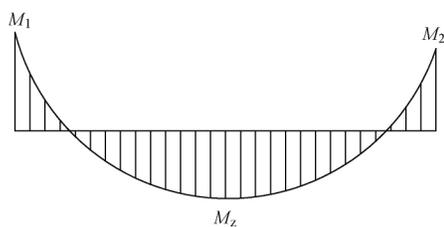


图 14 恒载作用下每米板块弯矩示意图

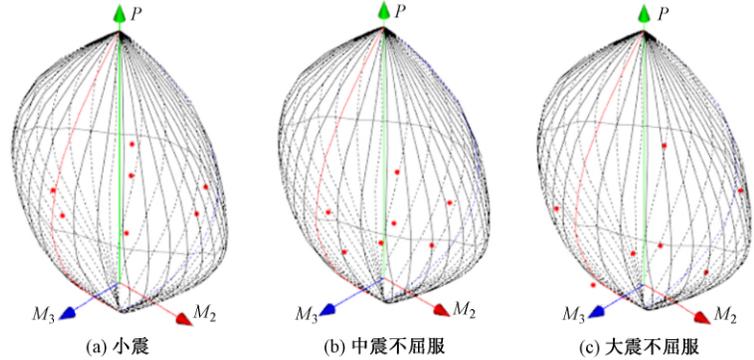


图 13 扁柱压弯承载力验算

于两端为弹性支座的梁,端弯矩取决于弹性支座的刚度。上述内力均为弹性解,未作弯矩调幅。

在小震作用下,板带 1 弯矩的分布特征如图 15 所示,其中  $M_1 = 8.14\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}$ ,  $M_2 = -3.39\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}$ ,  $M_z = 0.52\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}$ 。小震作用下,板带 1 的弯矩分布类似于框架结构在水平荷载作用下梁的弯矩分布特征,两端支座弯矩较大,跨中弯矩较小,其中支座弯矩的大小与剪力墙的面外刚度有关。

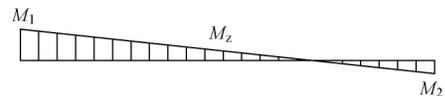


图 15 小震作用下每米板块弯矩示意图

图 15 表明,小震作用下,楼板在少墙方向会产生较大的支座面外弯矩。小震作用下,板带 1 西侧支座面外弯矩为  $8.14\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}$ ,与恒荷载引起的支座面外弯矩相比,小震约为恒载作用下的 38.1%,表明楼板在少墙方向承载力设计应考虑水平荷载的影响。

根据竖向荷载及水平荷载作用下,楼板在少墙方向内力分布的特征,对楼板进行相应的配筋设计。本算例风荷载为控制工况,此处将风荷载作用下的内力亦列出。各工况下,板带 1 西侧支座弯矩及跨中弯矩汇总如表 6 所示。

位置	恒载 D	活载 L	风 $W_x$	小震 $E_x$	中震	大震
西侧支座	21.38	7.04	9.68	8.14	21.06	40.70
跨中	-16.94	-6.04	0.63	0.52	1.35	2.60

根据高规及《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)<sup>[5]</sup>的相关规定,考虑以下荷载组合后,板带 1 西侧支座弯矩及跨中弯矩设计值见表 7。计算结果表明,当按一般楼板仅考虑竖向荷载进行构件设计时,板带 1 西侧支座弯矩设计值为  $35.8\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}$ ;考虑水平荷载参与组合后,其弯矩为  $46.1\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}$ ,约

为前者的 1.29 倍。分别采用仅考虑竖向荷载及考虑风荷载的两个组合 配筋设计如表 8 所示。

板带 1 西侧支座弯矩及跨中弯矩设计值/(kN·m/m) 表 7

位 置	竖向荷载		风荷载		小震		中震	大震
	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5	工况 6	工况 7	工况 8
支座	35.5	35.8	43.6	46.1	36.7	34.4	46.0	65.6
跨中	-28.8	-28.8	-28.3	-25.4	-23.1	-23.3	-18.61	-17.36

注: 工况 1: 1.2D+1.4L; 工况 2: 1.35D+0.98L; 工况 3: 1.2D+1.4L+0.84W; 工况 4: 1.2D+0.98L+1.4W; 工况 5: 1.2D+0.6L+0.28W+1.3E<sub>x</sub>; 工况 6: 1.2D+0.6L+1.3E<sub>x</sub>; 工况 7: 1.0D+0.5L+1.0E<sub>x</sub>; 工况 8: 1.0D+0.5L+1.0E<sub>x</sub>。表 9 同。

板带 1 西侧支座配筋设计 表 8

设计条件	弯矩设计值/(kN·m/m)	计算面积/mm <sup>2</sup>	实配面积/mm <sup>2</sup>
仅考虑竖向荷载	35.8	762	770(Φ 14@200)
考虑水平荷载	46.1	981	1 026(Φ 14@150)

表 8 的计算结果表明,考虑水平荷载参与组合后,配筋面积比仅考虑竖向荷载时增加约 33%。板带 1 西侧支座在少墙方向的楼板配筋应考虑水平荷载的影响。进一步采用考虑水平荷载的配筋结果进行中震、大震性能目标验算,材料强度取标准值,则板带 1 西侧支座的极限承载力为:

$$M_u \leq 0.9f_{yk}A_s h_0 = 47.24 \text{ kN} \cdot \text{m/m}$$

由此可见,中震作用下,楼板抗弯已接近屈服,大震作用下,楼板抗弯已屈服。由于水平荷载引起的板块跨中弯矩较小,板带 1 跨中配筋设计可仅考虑竖向荷载组合;考虑到中震作用下,楼板支座已屈服,跨中弯矩有所增大,此时可考虑将相应板带假定两端铰支且材料强度宜采用标准值进行跨中配筋设计;板带 1 跨中仅考虑竖向荷载并进行内力调整后,其配筋面积为 754mm<sup>2</sup>(Φ 12@150)。板带 1 西侧支座抗剪承载力验算见表 9。

表 9 的验算结果表明,本案例楼板面外抗剪抗震性能可满足小震、中震弹性,大震不屈服的要求;小震、中震、大震均能满足最小抗剪截面的抗剪承载力的要求。

板带 1 西侧支座抗剪承载力验算/(kN/m) 表 9

验算结果	风荷载		小震		中震	大震
	工况 3	工况 4	工况 5	工况 6	工况 7	工况 8
剪力设计值	40	39	51	49	44	48
抗剪承载力	145	145	171	171	171	204
最小抗剪截面	518	518	488	488	488	437

## 6 结论与建议

建议一向少墙剪力墙结构抗震设计要点如下:

(1) 当扁柱楼板框架剪力比  $\mu_{iwf} \leq 0.1$  时,说明扁柱楼板框架的作用较小,建议不进行扁柱楼板框架承载力验算,适当采用加强构造措施处理。当扁柱楼板框架剪力比  $\mu_{iwf} > 0.1$  时,说明扁柱楼板框架的作用较大,必须验算扁柱楼板框架的承载力,本文建议的性能设计方法可供参考应用。

(2) 少墙方向的 X 向剪力墙一般为非矩形的复杂截面,设计时建议采用组合墙肢的设计方法;梁柱框架一般为异形柱截面,应按异形柱设计。

(3) 少墙方向的扁柱楼板框架,楼板的验算应考虑水平荷载的作用。

(4) 在弹塑性分析方法尚未完善前,建议用等效弹性法验算少墙方向中震、大震的性能目标。

## 参 考 文 献

- [1] 魏琰,王森,曾庆立,等. 一向少墙的高层钢筋混凝土结构的结构体系研究[J]. 建筑结构, 2017, 47(1): 23-27.
- [2] 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.
- [3] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [4] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [5] 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.

## 《减震技术》征稿启事

2014 年 5 月,中国土木工程学会防震减灾技术推广委员会联合《建筑结构》期刊共同创立了《减震技术》,并邀请周福霖院士担任编辑委员会主任委员,任庆英、周云和王学东担任副主任委员。其内容主要有防震减灾的技术发展趋势、减隔震结构研究、工程设计案例、软件开发应用、产品资讯、行业规范等。

《减震技术》2014 年为半年刊,从 2015 年改为季刊。《减震技术》是《建筑结构》的副刊,随《建筑结构》正刊一起发行。

为了保证《减震技术》长期和谐、有序地发展,现长期征集稿件,请登录网址: <http://jcjg.cbpt.cnki.net/EditorDN/index.aspx?t=1> 查看具体要求、注册账号并投稿,联系电话: 010-57369042。