

陈兆荣, 潘东辉, 魏春玲, 等. 高层建筑框筒结构层受剪承载力计算方法研究[J]. 华南地震, 2018, 38 (1): 120-124. [CHEN Zhaorong, PAN Donghui, WEI Chunling, et al. Research on the Calculation Method of Story Shear Capacity in Tall Frame-corewall Structure[J]. South China journal of seismology, 2018, 38(1): 120-124.]

高层建筑框筒结构层受剪承载力计算方法研究

陈兆荣¹, 潘东辉², 魏春玲¹, 刘波³, 徐新星⁴

(1. 广东鼎峰地产集团有限公司, 广东 东莞 523071; 2. 东莞理工学院, 广东 东莞 523808;
3. 上海长福工程结构设计事务所, 上海 200011; 4. 广州大学土木工程学院, 广州 510006)

摘要: 层受剪承载力是建筑结构抗震性能的关键指标之一。对目前关于层受剪承载力的计算方法进行了探讨, 指出了当前的计算方法对于高层建筑框筒结构具有一定的局限性。结合二道防线的设计概念给出了“梁柱节点平衡法”和“筒柱剪力分配法”两种方法, 并通过工程案例给出了后者方法的应用。

关键词: 层受剪承载力; 计算方法; 梁柱节点平衡法; 筒柱剪力分配法

中图分类号: TU323.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662 (2018) 01-0120-05

DOI: 10.13512/j.hndz.2018.01.017

Research on the Calculation Method of Story Shear Capacity in Tall Frame-corewall Structure

CHEN Zhaorong¹, PAN Donghui², WEI Chunling¹, LIU Bo³, XU Xinxing⁴

(1. Guangdong Dingfeng Real Estate Group CO., LTD, Dongguan 523071, China; 2. Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, China; 3. Shanghai ChinaFu Structural Design Inc., Shanghai 200011, China;
4. Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The story shear bearing capacity is one of the key indexes of seismic performance in building structures. The paper discusses the calculation method of story shear capacity, and points out the current calculation method in tall frame-corewall structure that has certain applicability. Combining the design concepts of the two lines of defense, the paper gives two methods of “beam-column joint balance method” and “frame-core shear distribution method”. Finally an engineering example is given to explain the application of the latter method.

Keywords: Story shear capacity; Calculation; Beam-column joint balance method; Frame-core shear distribution method

收稿日期: 2017-06-10

作者简介: 陈兆荣(1985-), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要从事土木工程相关工作。

E-mail: 245140142@qq.com.

0 前言

框架-核心筒结构由于具有框架和筒体两种结构体系的优点常被用于办公建筑。诸多震害经验表明,一般结构并不具备足以抵抗强烈地震的水平承载力所需要的储备,常依靠结构的弹塑性变形来消耗输入的大部分地震能量,实现大震不倒的抗震性能目标。因此正确的计算与实际相吻合的层受剪承载力显的尤为重要。

对于框筒结构层受剪承载力组成部分,是指在考虑水平地震作用方向上,该层全部柱(斜撑)、剪力墙的受剪承载力之和。柱的受剪承载力是根据柱两端实配的受弯承载力按两端同时屈服的假定失效模式进行反算出其受剪承载力;剪力墙的受剪承载力是根据实配钢筋按抗剪设计公式反算出其受剪承载力;斜撑的受剪承载力计及轴力的贡献,应考虑受压屈服的影响。

现行《高层建筑混凝土结构技术规程》^[1](JGJ3-2010)(以下简称高规)指出对于柱的受剪承载力计算是假定各楼层柱端达到截面抗弯承载力,即柱端形成塑性铰,其适用条件是“强梁弱柱”形式的框架。在计算时,首先求出各柱端的抗弯承载力,再求出各柱的抗剪承载力,然后将各柱的抗剪承载力进行线性叠加而求得楼层总受剪承载力。对于框筒结构,核心筒作为结构的第一道防线,在强震作用下先于框架部分破坏,此时由于整体结构的刚度衰减使得框架部分的弯矩和剪力增加有限(有可能是递减)往往达不到截面的抗弯承载力极限,即在计算柱层受剪承载力时常常被放大。本文就此展开讨论,并对框筒结构的层受剪承载力计算方法提出相应建议。

1 计算层间受剪承载力的规范方法

1.1 规范对于层受剪承载力的相关规定

高规 3.5.3 节规定:对于 A 级高度高层建筑的楼层抗侧力结构的层间受剪承载力不宜小于其相邻上一层受剪承载力的 80%,不应小于其相邻上一层受剪承载力的 65%;B 级高度高层建筑的楼层抗侧力结构的层间受剪承载力不应小于其相邻上一层受剪承载力的 75%。其旨在楼层抗侧力结构的承载能力比值超过规定限值形成的突变将导致结构薄弱层破坏。

《抗震鉴定标准》^[2](GB50023-2009)(以下简称鉴定标准)层受剪承载力的计算公式,见式(1)所示:

$$V_y = \sum V_{cy} + 0.7 \sum V_{my} + 0.7 \sum V_{wy} \quad (1)$$

式(1)中: V_y 为楼层现有受剪承载力; $\sum V_{cy}$ 为框架柱层间现有受剪承载力之和; $\sum V_{my}$ 为砖填充墙框架层间现有受剪承载力之和; $\sum V_{wy}$ 为抗震墙层间现有受剪承载力之和。

矩形框架柱层间现有受剪承载力可按式(2~3)计算,并取较小值:

$$V_{cy} = \frac{M_{cy}^u + M_{cy}^L}{H_n} \quad (2)$$

$$V_{cy} = \frac{0.16}{\lambda + 1.5} f_{ck} b h_o + f_{yk} \frac{A_{sv}}{s} h_o + 0.056 N \quad (3)$$

式(2~3)中: M_{cy}^u 、 M_{cy}^L 分别为验算层偏压柱上、下端的现有受弯承载力; λ 为框架柱的计算剪跨比,取 $\lambda = H_n / 2h_o$; N 对应于重力荷载代表值的柱轴向压力,当 $N > 0.3f_{ck} b h_o$ 时,取 $N = 0.3f_{ck} b h_o$; A_{sv} 为配置在同一截面内箍筋各肢的截面面积; f_{yk} 为箍筋抗拉强度标准值; f_{ck} 为混凝土轴心抗压强度标准值; s 为箍筋间距; b 为验算方向柱截面宽度; h 、 h_o 分别为验算方向柱截面高度、有效高度; H_n 为框架柱净高。

在计算框架柱的受剪承载力可理解为当柱塑性铰出现在本层柱端时,相应地该柱端的受剪承载力等于柱端按实际配筋和材料强度标准值计算的屈服弯矩与层净高的比值(钢筋及钢材的强度标准值取屈服强度标准值)。

带边框柱的钢筋混凝土抗震墙的层间现有受剪承载力可按式(4)计算:

$$V_{wy} = \frac{1}{\lambda - 0.5} (0.04f_{ck} A_w + 0.1N) + 0.8f_{yk} \frac{A_{sh}}{s} h_o \quad (4)$$

式(4)中: N 对应于重力荷载代表值的柱轴向压力,当 $N > 0.2f_{ck} A_w$ 时,取 $N = 0.2f_{ck} A_w$; A_w 为抗震墙的截面面积; A_{sh} 为配置在同一水平截面内的水平钢筋截面面积; λ 为抗震墙的计算剪跨比;其值可采用计算楼层至该抗震墙顶的 1/2 高度与抗震墙截面高度之比,当小于 1.5 时取 1.5,当大于 2.2 时取 2.2。

1.2 现行规范对框筒结构层高的限制

对于框筒结构,结合式(1),楼层受剪承载力简化为式(5)有

$$V_y = \sum V_{cy} + 0.7 \sum V_{my} \quad (5)$$

高规规定:

$$V_{y,d} > \eta \cdot V_{y,u} \quad (6)$$

式(6)中: $V_{y,d}$ 对应于分析楼层位置的层受剪承载力; $V_{y,u}$ 对应于分析楼层位置上一层的层受剪承载力; 当框筒结构为 A 级高度时, η 取 0.65~0.8, B 级高度时为 0.7。

将式(6)代入式(5), 得

$$\sum V_{cy,d} + 0.7 \sum V_{wy,d} > \eta (\sum V_{cy,u} + 0.7 \sum V_{wy,u}) \quad (7)$$

由于框筒结构上下相邻层墙截面及水平配筋相近, 故可令:

$$\sum V_{wy,d} \approx \sum V_{wy,u} \approx \sum V_{wy} \quad (8)$$

将式(8)代入(7), 得

$$\sum V_{cy,d} - \eta \sum V_{cy,u} > 0.7 \sum V_{wy} (\eta - 1) \quad (9)$$

由 $V_c = \frac{\sum M_c}{H_n}$, 框筒结构上下相邻层柱截面相近, 故可令:

$$\sum M_{cy,d} \approx \sum M_{cy,u} \quad (10)$$

即:

$$V_{cy,d} = \frac{\sum M_c}{H_{n,d}} \quad (11)$$

$$V_{cy,u} = \frac{\sum M_c}{H_{n,u}} \quad (12)$$

将式(10~12)代入式(9), 得

$$\sum M_c \left(\frac{1}{H_{n,d}} - \frac{1}{H_{n,u}} \right) > 0.7 \sum V_{wy} (\eta - 1)$$

整理得,

$$\frac{\eta H_{n,d} - H_{n,u}}{(1-\eta)H_{n,d}H_{n,u}} < 0.7 \frac{\sum V_{wy}}{\sum M_c} \quad (13)$$

对于式(13), 只需要 $\eta H_{n,d} < H_{n,u}$ 即可成立。对于分析位置层高为 4.5 m、梁高为 800 mm 的框筒结构, 相邻下一层的层高要求见表 1 所示。

表 1 现行规范对框筒结构层高的限制要求

Table 1 The current specification limits on height of the tube structure

高度	规范要求	本层净高/mm	下一层净高/mm
A 级	0.65	3 700	5 700
	0.80	3 700	4 630
B 级	0.70	3 700	5 290

1.3 规范对于结构抗震防线的相关规定

《建筑抗震设计规范》^[3](GB50011-2010)(以下简称抗规)3.5.3 指出结构体系宜有多道抗震防线, 对于结构在强震中的安全具有十分重要的作用, 要求抗震结构体系应由若干延性较好的分体系组成, 并由延性较好的结构构件连接起来共同协同工作。

对于框架-核心筒结构体系是由延性框架和筒体两部分系统组成。核心筒作为第一道防线, 在高规和抗震中关于核心筒抗震等级高于框架的规定中体现出来。核心筒的抗侧刚度远比框架大得多, 在强震中吸收了绝大部分的水平剪力, 在小震和风荷载作用下主要控制结构的水平侧移。框架作为框架-核心筒结构的第二道防线, 主要承担竖向荷载, 加之框架在平面内的力臂较大使得承担的倾覆力矩比较大。

2 框筒结构层受剪承载力计算的建议方法

2.1 梁柱节点平衡法

根据强柱弱梁的设计概念, 假定梁端均能达到正截面受弯承载力后框架柱最后才屈服(塑性铰不先出现于柱端), 此时整个结构达到整体破坏, 次时, 层间柱端正截面受弯承载力根据梁柱节点平衡按弹性分配确定, 计算简图见图 1 所示。

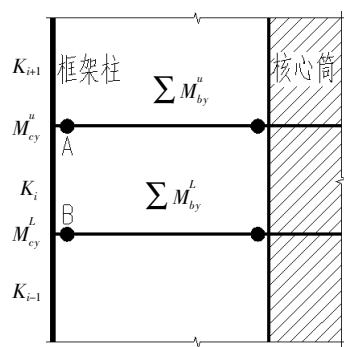


图 1 梁柱节点平衡计算简图

Fig.1 The calculation diagram of beam-column node balance

梁传给柱上端弯矩为 $\sum M_{by}^u \frac{K_i}{K_i + K_{i+1}}$; 梁传给柱下端弯矩为 $\sum M_{by}^L \frac{K_i}{K_i + K_{i-1}}$ 。结合鉴定标准关于柱的计算方法, 可以得出柱上下端的计算弯矩, 见式 (14~15) 所示。

$$\sum M_{cy}^u = \min \left\{ M_{cy}^u, \sum M_{by}^u \frac{K_i}{K_i + K_{i+1}} \right\} \quad (14)$$

$$\sum M_{cy}^L = \min \left\{ M_{cy}^L, \sum M_{by}^L \frac{K_i}{K_i + K_{i-1}} \right\} \quad (15)$$

将式(14)、(15)代入式(3)得:

$$V_{cy} = \frac{M_{cy}^u + M_{cy}^L}{H_n} \quad (16)$$

综上所述,柱层受剪承载力取式(16)与式(3)计算结果的较小值,再代入式(1)即可。

2.2 筒柱剪力分配法

对于抗震设计的框架柱、框支柱端部截面的剪力设计值,对于一级框架结构及 9 度时的框架,高规 6.2.3 规定如下式(17)所示:

$$\sum M_c = 1.2 \sum M_{bua} \quad (17)$$

式(17)中: $\sum M_c$ 节点上下柱端截面顺时针或逆时针方向组合的弯矩设计值之和; $\sum M_{bua}$ 节点左右两端逆时针或顺时针方向实配的正截面抗震受弯承载力所对应的弯矩值之和。

在弹性阶段,根据梁柱节点弯矩平衡,取框架梁先于框架柱达到正截面受弯承载力时的弯矩平衡(κ 为框架柱刚度分配系数),有:

$$\sum M_{cua} = \kappa \sum M_{bua} \quad (18)$$

联立式(17)和(18)式,得:

$$\sum M_c = \frac{1.2}{\kappa} \sum M_{cua} \quad (19)$$

令 $\frac{1.2}{\kappa} = \psi$, 式(19)化简为 $\sum M_c = \psi \sum M_{cua}$, 即:

$$\sum V_c = \psi \sum V_{cua} \quad (20)$$

同理,对于剪力墙,有:

$$\sum V_w = \psi \sum V_{wua} \quad (21)$$

框架柱作为框筒结构中二道防线,在强震中核心筒往往先于框架柱屈服。此时整体刚度减小,框架柱的剪力上升受到限制。联立式(20)和(21)式,得:

$$\frac{\sum V_c}{\sum V_{cua}} = \frac{\sum V_w}{\sum V_{wua}} \quad (22)$$

即:

$$\sum V_{cua} = \sum V_c \frac{\sum V_{wua}}{\sum V_w} \quad (23)$$

由于计算程序功能的限制梁柱节点平衡法尚存在一定的困难。以下案例是针对筒柱剪力分配法进行展开说明。

3 工程案例

某高层建筑框筒结构,地上 31 层,结构高度 131.7 m,地下 4 层,抗震等级为一级。楼板混凝土强度等级采用 C30,钢筋采用 HRB400。楼板厚度为 100/120 mm,核心筒内为 150 mm。平面为 41.3×41.3 m,核心筒为 24.0×16.1 m,外框混凝土柱由 1 100×1 300 mm 由下至上减少到 800×800 mm 逐渐收进,其标准层平面见图 2 所示。

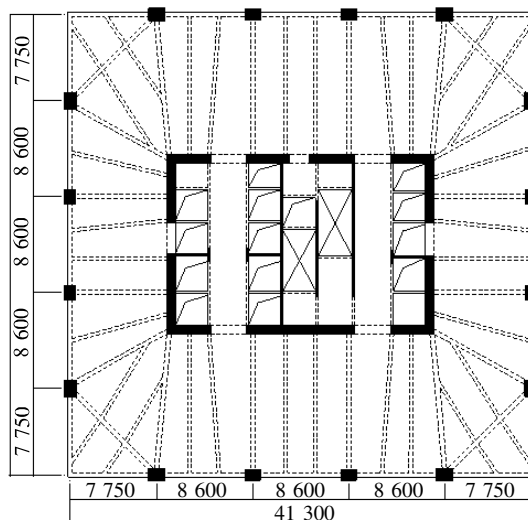


图 2 典型层平面图

Fig.2 Typical floor plan

对于框架柱的受剪承载力,采用规范算法计算的首层框架柱受剪承载力为 101 074 kN,本文建议方法(式 18)计算的框架柱首层承载力为 48 736 kN;可见规范对于框筒结构框架部分的算法结果比较偏大。主要原因是规范方法假定框架柱能够达到屈服状态(即极限受剪状态)。

同时,对层受剪承载力,按照规范方法计算的首层层受剪承载力 142 100 kN,本文建议方法计算的层受剪承载力为 89 762 kN(限于篇幅,只列 X 向)。规范方法与建议方法沿楼层高处的变化对比见图 3 所示。

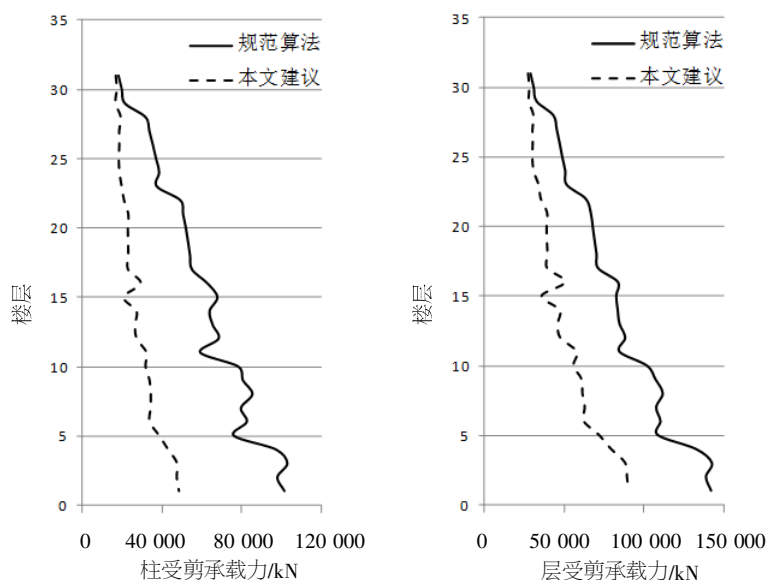


图3 规范方法与建议方法对比图

Fig.3 Comparison of standard method and recommended method

从图3中可以发现,本文建议方法计算的楼层受剪承载力在底层约为规范方法计算的0.7倍,即关于该高层框筒结构规范方法计算的楼层受剪承载力比实际结构在强震中放大了约35%,这需要工程师引起高度重视。在靠近结构顶层时两种计算方法计算结果比较接近。在没有进行弹塑性层受剪承载力专项分析的前提下,可以采用本文的建议方法进行复核,如果不满足,则应进行相应的弹塑性分析并采取相应的应对措施。

5 结语

本文主要研究结果,可归纳如下:

(1) 现行规范对于框筒结构中框架柱的层受剪承载力计算方法的适用条件为“弱柱”型,即柱子先于框架梁达到屈服状态求得层受剪承载力,对于框架-核心筒结构的框架柱往往不能屈服相悖。

(2) 结合框架-核心筒结构关于多道防线的设计概念给出了“梁柱节点平衡法”和“筒柱剪力分配法”两种层受剪承载力的计算方法,并通过工程案例给出了后者方法的应用。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ3-2010 高层建筑混凝土结构技术规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50023-2009 建筑抗震鉴定标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2009.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50011-2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.
- [4] 周露, 宁响亮, 庾光忠. 近场高烈度区高层框筒结构组合隔震设计与分析[J]. 华南地震, 2017, 37(2): 71-78.
- [5] 吴迪, 霍维刚, 熊焱, 等. 某高层框架-剪力墙基础隔震结构地震响应分析[J]. 华南地震, 2017, 37(2): 65-70.