

文章编号:1673-2049(2016)03-0086-07

水平荷载作用下钢框架-预制混凝土抗侧力墙体 装配式结构的简化计算方法

吴函恒¹, 秦沛远¹, 陈军武^{1,2}, 周天华¹

(1. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061; 2. 陕西有色建筑设计研究院有限公司, 陕西 西安 710054)

摘要:为研究水平荷载作用下钢框架-预制混凝土抗侧力墙装配式结构体系(SPW体系)内力和位移的简化计算方法,提出了结构体系的简化计算模型,根据弹性理论建立结构体系的平衡微分方程,提出反映结构侧向刚度的参数 λ ,结合边界条件求解了在均布侧向荷载、倒三角侧向荷载和顶部集中侧向荷载作用下结构体系的内力与侧向位移计算公式,采用有限元法对简化计算方法的可靠性进行了验证,并进行了误差分析。研究结果表明:有限元分析值与简化计算值较为接近,简化计算方法能够较为准确地计算SPW体系在水平荷载作用下的内力和位移,可靠性较好。

关键词:钢框架;预制混凝土抗侧力墙;结构体系;内力;位移;水平荷载

中图分类号:TU398.2

文献标志码:A

Simplified Calculation Method of Steel Frame-prefabricated Concrete Lateral Force Resisting Wall Structures Under Lateral Load

WU Han-heng¹, QIN Pei-yuan¹, CHEN Jun-wu^{1,2}, ZHOU Tian-hua¹

(1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China;

2. Shaanxi Design and Research Institute of Nonferrous Architectures Co., Ltd, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: In order to research the simplified calculation method of the internal force and displacement for steel frame-prefabricated concrete lateral force resisting wall structures (SPW system) under lateral load, the simplified calculation model of the structural system was put forward. Meanwhile, the equilibrium differential equations of the structural system were established according to the elastic theory, and the parameter λ standing for structural lateral stiffness was proposed. Then, based on boundary conditions, the calculation formulas of internal force and lateral displacement were deduced under uniform lateral load, inverted triangle lateral load and top-concentrated lateral load. The reliability of the simplified calculation method was verified by finite element method, and the error analysis was carried out. The study results show that the results of simplified calculation method are close to those of finite element method, the simplified calculation method can calculate internal force and displacement of SPW system under lateral load with enough accuracy and better reliability.

Key words: steel frame; prefabricated concrete lateral force resisting wall; structure system; internal force; displacement; lateral load

收稿日期:2015-12-06

基金项目:国家自然科学基金项目(51508029);中国博士后科学基金项目(2015M580802);

中央高校基本科研业务费专项资金项目(310828161011);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2016JM5044)

作者简介:吴函恒(1984-),男,河南平顶山人,讲师,工学博士,博士后,E-mail:wuhanheng@163.com。

0 引言

内填式抗侧力墙体与钢框架组成的双重抗侧力体系能充分结合二者的优点,具有抗侧刚度大、延性好、多道抗震设防的特点^[1-10]。为实现抗侧力墙体的预制装配化,并与钢框架进行同步安装,在推动建筑产业化和现代化的背景下,文献[11]提出了钢框架-预制混凝土抗侧力墙装配式结构体系(以下简称 SPW 体系)。

文献[12]~[14]对 4 榀由钢框架和型钢混凝土抗侧力墙、钢筋混凝土抗侧力墙组成的单层单跨足尺 SPW 体系结构模型开展水平低周反复加载试验研究,结果表明:该体系能充分结合钢框架与混凝土抗侧力墙体的优点,构造合理可靠,在抗震设防区具有广泛的应用前景。文献[15],[16]对 SPW 体系的竖向受力性能进行研究,结果表明:预制墙体顶部连接板的长圆孔构造形式能有效地降低墙体的轴压比,使墙体仅承担使用阶段活荷载所带来的竖向力。文献[17],[18]对 SPW 体系开展数值分析,研究了抗侧力墙板与钢梁连接界面的受力性能和传力机理,明确了各类连接件承担剪力和弯矩的分布情况以及分配关系。

在上述研究的基础上,本文建立 SPW 体系的简化计算模型,基于连续化的方法,建立钢框架、约束梁和抗侧力墙体协同工作微分方程,提出反映结构侧向刚度的参数,求解结构体系在 3 种典型水平荷载作用下的内力、位移计算方法,并采用有限元法验证了简化方法的可靠性,为该体系的理论研究和工程应用提供参考。

1 简化力学模型及假定

钢框架-预制混凝土抗侧力墙体结构体系是由钢框架、抗侧力墙体组成的三维空间结构,分析过程中忽略结构整体的扭转效应,将钢框架部分、抗侧力墙体部分和约束梁部分分别等效为总钢框架、总抗侧力墙体和总约束梁(图 1),其中总框架部分的一半对称等效在抗侧力墙体的左右两侧。

在水平荷载作用下,框架柱与抗侧力墙体的连接梁段呈现反向弯曲变形,即在跨中附近存在反弯点,如图 2 所示,分析时采用如下基本假定:

(1)假定反弯点位于框架柱与抗侧力墙体连接梁段的跨中位置。

(2)框架柱在水平荷载作用下的轴向变形较小,而梁反弯点处的竖向变形主要由框架梁轴向变形引

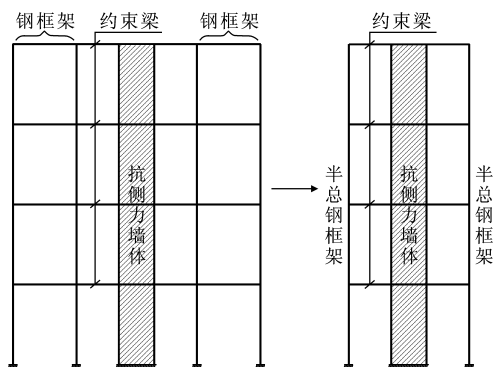


图 1 模型简化

Fig. 1 Model Simplification

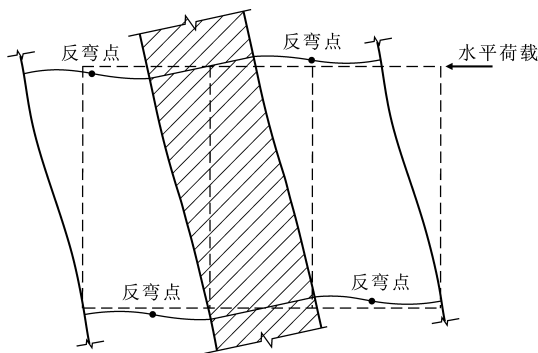


图 2 框架梁变形

Fig. 2 Deformation of Frame Beam

起,因此,分析时忽略框架柱和反弯点处的竖向变形。

(3)约束梁中间段由于受到上下层墙体的约束作用,假定为刚性。

采用连续化的方法^[19]将模型在反弯点处进行切分,切口处存在相关作用的分布剪力 τ_i ,水平分布荷载 p 由钢框架和抗侧力墙体共同承担,其中总钢框架承担的部分为 p_f ;总抗侧力墙体承担的部分为 $p - p_f$,计算简图如图 3 所示,其中 θ 为转角。

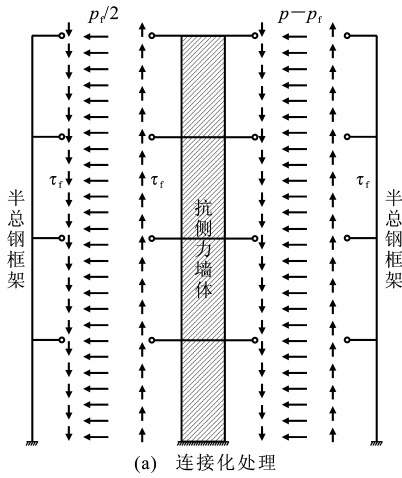
2 基本方程的建立

对于抗侧力墙体部分,反弯点处的分布剪力 τ_i 将在抗侧力墙体内产生沿竖向分布的线力矩 $m_f(z)$,见图 4,同时墙体承担水平荷载 $p - p_f$,则由材料力学理论可得

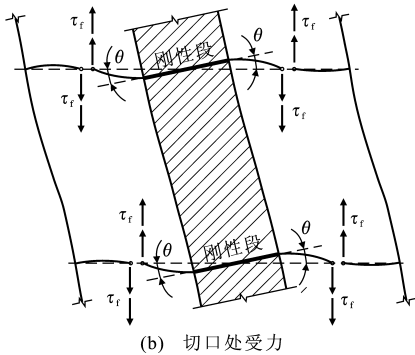
$$EI_{eq} \frac{d^4 y}{dz^4} = p - p_f + \frac{dm_f(z)}{dz} \quad (1)$$

式中: EI_{eq} 为总抗侧力墙体及弯曲变形和剪切变形的等效抗弯刚度。

对于带刚性段的约束梁段 12(图 5),当梁段在 2 处的转角为 θ 时,1' 处的竖向变形为 $\alpha l' \theta$,由转角位移方程得出非刚性梁段 1' 处的弯矩 $m_{1'1}$ 为



(a) 连接化处理



(b) 切口处受力

图 3 计算简图

Fig. 3 Calculation Diagram

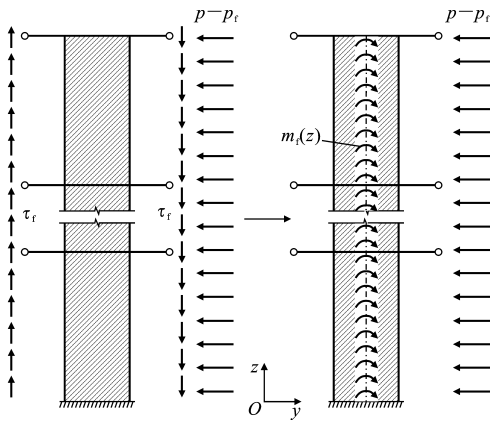


图 4 墙体受力简图

Fig. 4 Force Diagram of Wall

$$m_{1'1} = \frac{3EI_b}{(1-\alpha)l'}\theta - \frac{3EI_b}{(1-\alpha)^2 l'^2}(-\alpha l'\theta) \quad (2)$$

式中: EI_b 为总约束梁的截面抗弯刚度; l' 为反弯点至墙体中轴线之间梁段的长度; $\alpha l'$ 为刚性段梁长度的一半。

1' 处的竖向剪力 $V_{1'1}$ 为

$$V_{1'1} = \frac{m_{1'1}}{(1-\alpha)l'} = \frac{3EI_b}{(1-\alpha)^2 l'^2}\theta + \frac{3EI_b}{(1-\alpha)^3 l'^3}\alpha l'\theta \quad (3)$$

则 2 处的杆端弯矩 m_{21} 为

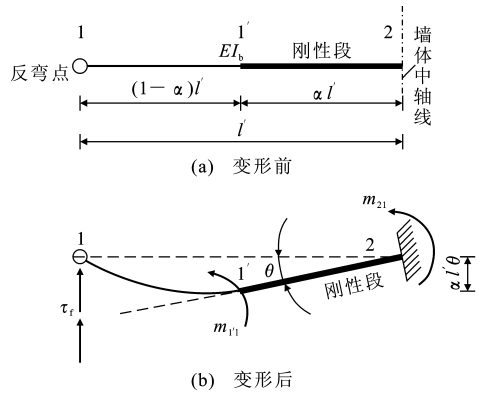


图 5 约束梁段受力简图

Fig. 5 Force Diagram of Constraint Beam

$$m_{21} = m_{1'1} + V_{1'1}\alpha l' \quad (4)$$

将式(2)、(3)代入式(4)得

$$m_{21} = \frac{3EI_b\theta}{l'} \frac{1}{(1-\alpha)^3} \quad (5)$$

杆端弯矩 m_{21} 是由反弯点处分布剪力 τ_f 的作用而产生, 由于墙体中轴线两侧的带刚域梁段变形呈反对称关系, 故将杆端弯矩 m_{21} 折算成在墙体中轴线处沿高度方向的分布线力矩 $m_f(z)$, 则 $m_f(z)$ 与杆端弯矩 m_{21} 的关系为

$$m_f(z) = \frac{2m_{21}}{h} = \frac{6EI_b\theta}{l'h} \frac{1}{(1-\alpha)^3} \quad (6)$$

式中: h 为层高。

将转角与侧移的关系 $\theta = \frac{dy}{dz}$ 代入式(6), 并对 z 微分一次得

$$\frac{dm_f(z)}{dz} = \frac{6EI_b}{l'h} \frac{1}{(1-\alpha)^3} \frac{d^2y}{dz^2} \quad (7)$$

令 $C_B = \frac{6EI_b}{l'h} \frac{1}{(1-\alpha)^3}$, 则式(7)可简化为

$$\frac{dm_f(z)}{dz} = C_B \frac{d^2y}{dz^2} \quad (8)$$

对于钢框架部分, 反弯点处的分布剪力 τ_f 主要引起柱子的轴向变形, 而基本假定忽略了柱子的轴向变形, 仅考虑荷载 p_f 的作用; 同时令 $C_F = h \sum D'$ 表示某层框架柱抗剪刚度之和, D' 为钢框架抗侧刚度, 其值的计算可参照文献[20]。

由材料力学理论可得

$$C_F \frac{d^2y}{dz^2} = -p_f \quad (9)$$

将式(8)、(9)代入式(1)得

$$EI_{eq} \frac{d^4y}{dz^4} - (C_B + C_F) \frac{d^2y}{dz^2} = p \quad (10)$$

令 $\xi = \frac{x}{H}$, 其中 H 为结构的总高度; 令 $\lambda =$

$\sqrt{\frac{(C_F+C_B)H^2}{EI_{eq}}}$,则式(10)可写成

$$\frac{d^4 y}{d\xi^4} - \lambda^2 \frac{d^2 y}{d\xi^2} = \frac{pH^4}{EI_{eq}} \quad (11)$$

式(11)即为结构体系承担水平荷载的基本微分方程,其中刚度参数 λ 与总钢框架的刚度 C_F 、总约束梁的刚度 C_B 和总抗侧力墙体的刚度 EI_{eq} 有关。

3 内力与位移计算

对于结构侧移量 y 的4阶常系数线性微分方程,其一般解为

$$y = A \sinh(\lambda)\xi + B \cosh(\lambda)\xi + C\xi + D + y_1 \quad (12)$$

式中: A, B, C, D 均为由边界条件确定的4个积分常数; y_1 为由水平荷载 p 所确定的特解。

抗侧力墙体承担的弯矩 M_w 与侧移量 y 的关系式为

$$M_w = -\frac{EI_{eq}}{H^2} \frac{d^2 y}{d\xi^2} \quad (13)$$

设 V'_w 为抗侧力墙体承担的剪力 V_w 与分布线力矩 $m_f(z)$ 的差值, V'_w 与侧移量 y 的关系式为

$$V'_w = V_w - m_f(z) = -\frac{EI_{eq}}{H^3} \frac{d^3 y}{d\xi^3} \quad (14)$$

对于框架部分,结构任一标高处框架柱承担的剪力 V_f 可由剪力平衡关系得到,即

$$V_f = V_0 - V_w = V_0 - V'_w - m_f(z) \quad (15)$$

式中: V_0 为框架和抗侧力墙体承担的总剪力。

当求得 V'_w 后,框架柱承担的剪力 V_f 和由框架梁约束产生的分布线力矩 $m_f(z)$ 可按照框架柱刚度 C_F 、框架梁刚度 C_B 的比例进行分配,即

$$V_f = \frac{C_F}{C_F + C_B} (V_0 - V'_w) \quad (16)$$

$$m_f(z) = \frac{C_B}{C_F + C_B} (V_0 - V'_w) \quad (17)$$

求得 V_f 后,抗侧力墙体承担的剪力 V_w 由剪力平衡关系确定,即

$$V_w = V_0 - V_f \quad (18)$$

框架柱承担的轴力 $N_f(z)$ 由反弯点处的分布剪力 τ_f 沿着结构高度方向积分得到,即

$$N_f(z) = \int_z^H \tau_f dz = \int_z^H \frac{m_f(z)}{2l} dz \quad (19)$$

按照上述方法求出3种常见水平荷载(均布荷载、倒三角荷载和顶部集中荷载)作用下结构侧移 $y(\xi)$ 、抗侧力墙体弯矩 $M_w(\xi)$ 和抗侧力墙体剪力 $V'_w(\xi)$ 的计算公式:

(1)均布荷载作用下

$$\left. \begin{aligned} \frac{y(\xi)}{f_H} &= \frac{8}{\lambda^4} \left[\frac{1 + \lambda \sinh(\lambda)}{\cosh(\lambda)} (\cosh(\lambda)\xi - 1) - \lambda \sinh(\lambda)\xi + \lambda^2 \left(\xi - \frac{1}{2}\xi^2 \right) \right] \\ \frac{M_w(\xi)}{M_0} &= \frac{2}{\lambda^2} \left[\frac{\lambda \sinh(\lambda) + 1}{\cosh(\lambda)} \cosh(\lambda)\xi - \lambda \sinh(\lambda)\xi - 1 \right] \\ \frac{V'_w(\xi)}{V_0} &= \frac{1}{\lambda} \left[\lambda \cosh(\lambda)\xi - \frac{\lambda \sinh(\lambda) + 1}{\cosh(\lambda)} \sinh(\lambda)\xi \right] \\ f_H &= \frac{qH^4}{8EI_{eq}}, M_0 = \frac{qH^2}{2}, V_0 = qH \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

(2)倒三角荷载作用下

$$\left. \begin{aligned} \frac{y(\xi)}{f_H} &= \frac{120}{11\lambda^2} \left[\left(\frac{\sinh(\lambda)}{2\lambda} - \frac{\sinh(\lambda)}{\lambda^3} + \frac{1}{\lambda^2} \right) \cdot \frac{\cosh(\lambda)\xi - 1}{\cosh(\lambda)} + \left(\xi - \frac{\sinh(\lambda)\xi}{\lambda} \right) \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{\lambda^2} \right) - \frac{\xi^3}{6} \right] \\ \frac{M_w(\xi)}{M_0} &= \frac{3}{\lambda^3} \left[\left(\frac{\lambda^2 \sinh(\lambda)}{2} - \sinh(\lambda) + \lambda \right) \cdot \frac{\cosh(\lambda)\xi}{\cosh(\lambda)} - \left(\frac{\lambda^2}{2} - 1 \right) \sinh(\lambda)\xi - \lambda\xi \right] \\ \frac{V'_w(\xi)}{V_0} &= -\frac{2}{\lambda^2} \left[\left(\frac{\lambda^2 \sinh(\lambda)}{2} - \sinh(\lambda) + \lambda \right) \cdot \frac{\cosh(\lambda)\xi}{\cosh(\lambda)} - \left(\frac{\lambda^2}{2} - 1 \right) \cosh(\lambda)\xi - 1 \right] \\ f_H &= \frac{11qH^4}{120EI_{eq}}, M_0 = \frac{qH^2}{3}, V_0 = \frac{qH}{2} \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

(3)顶部集中荷载作用下

$$\left. \begin{aligned} \frac{y(\xi)}{f_H} &= 3 \left[\frac{\sinh(\lambda)}{\lambda^3 \cosh(\lambda)} (\cosh(\lambda)\xi - 1) - \frac{\sinh(\lambda)\xi + \frac{\xi}{\lambda^2}}{\lambda^3} \right] \\ \frac{M_w(\xi)}{M_0} &= \frac{1}{\lambda} \left[\tanh(\lambda) \cosh(\lambda) - \sinh(\lambda)\xi \right] \\ \frac{V'_w(\xi)}{V_0} &= \cosh(\lambda)\xi - \tanh(\lambda) \sinh(\lambda)\xi \\ f_H &= \frac{pH^3}{3EI_{eq}}, M_0 = pH, V_0 = p \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

4 有限元法的验证及误差分析

为了验证结构体系简化计算方法的可靠性以及计算精度,建立由钢框架和混凝土抗侧力墙体构成的单跨6层和单跨16层模型进行对比分析。分析模型立面如图6所示。

6层模型:跨度4.2 m,层高3.0 m,框架柱型号为HW350×350×10×15,框架梁型号为HN350×175×7×11,钢材材质为Q345B级;抗侧力墙体宽

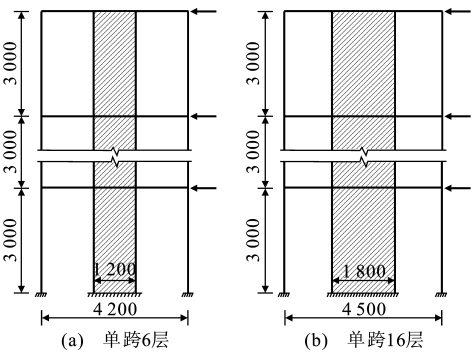


图 6 分析模型立面(单位:mm)

Fig. 6 Elevation of Analysis Models (Unit:mm)

1.2 m,厚度为 150 mm,混凝土强度等级为 C30,抗

侧力墙体居中布置。

16 层模型:跨度 4.5 m,层高 3.0 m,框架柱型号为□450×450×16×16,框架梁型号为 HN400×200×8×13,钢材材质为 Q345B 级;抗侧力墙体宽 1.8 m,厚度为 200 mm,混凝土强度等级为 C30,抗侧力墙体居中布置。

分别采用简化计算方法和有限元法对模型进行线弹性分析,有限元分析软件采用 SAP2000 程序,框架梁、柱和抗侧力墙体分别采用梁单元和壳单元模拟,在每个楼层施加 20 kN 水平荷载。将二者对分析模型侧向位移、钢框架和抗侧力墙体承担的水平剪力的计算结果进行对比,见表 1,2。

表 1 简化计算结果与有限元分析结果对比(6 层模型)

Tab. 1 Comparison of Simplified Calculation Results and Finite Element Analysis Results (Six-storey Model)

楼层	楼层侧移量			框架柱承担的剪力			抗侧力墙体承担的剪力		
	有限元结果 δ_f/mm	简化计算结果 δ_s/mm	$\delta_f\delta_s^{-1}$	有限元结果 V_{ff}/kN	简化计算结果 V_{fs}/kN	$V_{ff}V_{fs}^{-1}$	有限元结果 V_{wf}/kN	简化计算结果 V_{ws}/kN	$V_{wf}V_{ws}^{-1}$
6	11.06	10.61	0.959	11.88	11.01	0.927	8.12	8.99	1.107
5	9.82	9.50	0.967	16.02	14.18	0.885	23.98	25.82	1.077
4	8.17	7.96	0.974	23.08	20.68	0.896	36.92	39.32	1.065
3	6.09	5.98	0.982	28.10	26.46	0.942	51.90	53.54	1.032
2	3.71	3.66	0.987	31.84	29.20	0.917	68.16	70.80	1.039
1	1.37	1.35	0.985	24.90	23.76	0.954	95.10	96.24	1.012

表 2 简化计算结果与有限元分析结果对比(16 层模型)

Tab. 2 Comparison of Simplified Calculation Results and Finite Element Analysis Results (Sixteen-storey Model)

楼层	楼层侧移量			框架柱承担的剪力			抗侧力墙体承担的剪力		
	有限元结果 δ_f/mm	简化计算结果 δ_s/mm	$\delta_f\delta_s^{-1}$	有限元结果 V_{ff}/kN	简化计算结果 V_{fs}/kN	$V_{ff}V_{fs}^{-1}$	有限元结果 V_{wf}/kN	简化计算结果 V_{ws}/kN	$V_{wf}V_{ws}^{-1}$
16	58.5	53.2	0.909	12.2	11.3	0.926	7.8	8.7	1.115
15	55.8	51.0	0.914	15.2	13.8	0.908	24.8	26.2	1.056
14	52.8	48.6	0.920	21.8	19.4	0.890	38.2	40.6	1.063
13	49.7	45.9	0.924	28.6	25.0	0.874	51.4	55.0	1.070
12	46.3	43.1	0.931	35.4	30.8	0.870	64.6	69.2	1.071
11	42.7	40.0	0.937	42.6	36.6	0.859	77.4	83.4	1.078
10	38.9	36.7	0.943	49.4	42.6	0.862	90.6	97.4	1.075
9	34.9	33.1	0.948	56.6	48.4	0.855	103.4	111.6	1.079
8	30.7	29.4	0.958	63.6	54.4	0.855	116.4	125.6	1.079
7	26.4	25.4	0.962	70.4	60.0	0.852	129.6	140.0	1.080
6	22.0	21.3	0.968	76.8	65.6	0.854	143.2	154.4	1.078
5	17.6	16.9	0.960	82.8	70.4	0.850	157.2	169.6	1.079
4	13.1	12.8	0.977	87.0	74.2	0.853	173.0	185.8	1.074
3	8.8	8.5	0.966	88.4	75.6	0.855	191.6	204.4	1.067
2	4.8	4.7	0.979	80.8	69.6	0.861	219.2	230.4	1.051
1	1.6	1.5	0.938	65.0	60.2	0.926	255.0	259.8	1.019

通过表 1,2 对比可以看出:

(1)针对结构楼层侧向位移,简化计算值略小于

有限元分析值,其比值在 0.9~1 之间,产生误差的原因是简化计算时忽略了框架柱的轴向变形,即忽

略了框架部分的整体弯曲变形所引起的侧移,致使侧移量计算值偏小;随着楼层数的增多,弯曲变形所引起的侧移组分会变大,误差也会随之增大。

(2)针对框架柱和抗侧力墙体承担的剪力,采用简化计算方法得出的框架柱承担的剪力小于有限元分析值,而得出的抗侧力墙体承担的剪力值大于有限元分析值,两者相对误差在10%以内。产生误差的原因是采用了连接梁段反弯点位置在跨中的假定,而事实上由于抗侧力墙体的刚度较大,反弯点的位置略靠近于抗侧力墙体,采用反弯点居中的假定会夸大抗侧力墙体的刚度,致使计算得出的抗侧力墙体承担的剪力值偏大,而框架柱承担的剪力值偏小。

5 结 语

(1)基于连续化方法,建立钢框架、约束梁和抗侧力墙体协同工作微分方程,提出刚度参数 λ ,该参数综合反映钢框架、约束梁和抗侧力墙体的刚度;求解了SPW体系在3种典型水平荷载作用下的内力、位移简化计算方法。

(2)通过6层和16层模型进行简化计算方法和有限元法的对比分析,两者相对误差在10%以内,满足工程精度要求,引起误差的主要因素是简化计算时采用了忽略框架柱的轴向变形和反弯点位于框架柱与墙体连接梁段的跨中位置的假定。

参考文献:

References:

- [1] HITAKA T, MATSUI C. Experimental Study on Steel Shear Wall with Slits[J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(5): 586-594.
- [2] JU R S, LEE H L, CHEN C C, et al. Experimental Study on Separating Reinforced Concrete Infill Walls from Steel Moment Frames[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 71(4): 119-128.
- [3] 彭晓彤, 顾强. 钢框架内填钢筋混凝土剪力墙混合结构破坏机理及塑性分析[J]. 工程力学, 2011, 28(8): 56-61.
PENG Xiao-tong, GU Qiang. The Failure Mechanism and Plastic Analysis of Composite Steel Frame-reinforced Concrete Infill Wall Structures[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(8): 56-61.
- [4] 孙国华, 顾强, 何若全, 等. 半刚接钢框架内填暗竖缝钢筋混凝土剪力墙结构滞回性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(9): 16-26.
SUN Guo-hua, GU Qiang, HE Ruo-quan, et al. Experimental Investigation of Partially-restrained Steel Frame with Concealed Vertical Slits RC Infill Walls [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(9): 16-26.
- [5] 赵伟, 童根树, 杨强跃. 钢框架内填预制带竖缝钢筋混凝土剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(7): 141-146.
ZHAO Wei, TONG Gen-shu, YANG Qiang-yue. Experimental Study on Seismic Behavior of Steel Frame with Prefabricated Reinforced Concrete Infill Slit Shear Walls [J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(7): 141-146.
- [6] 赵伟, 童根树, 周观根, 等. 钢框架内填预制钢筋混凝土剪力墙试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2013, 35(1): 63-69.
ZHAO Wei, TONG Gen-shu, ZHOU Guan-gen, et al. Experimental Investigation of Steel Frame with Infill Prefabricated Reinforce-concrete Shear Walls [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2013, 35(1): 63-69.
- [7] 陈以一, 宁燕琪, 蒋路. 框架-带缝钢板剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(7): 133-139.
CHEN Yi-yi, NING Yan-qi, JIANG Lu. Experimental Study on Seismic Behavior of Frame-steel Plate Shear Wall with Slits [J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(7): 133-139.
- [8] 陈以一, 蒋路. 带缝钢板剪力墙的承载力和开缝参数研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2010, 27(3): 109-114.
CHEN Yi-yi, JIANG Lu. Research on Bearing Capacity and Slit Parameters of Steel Plate Shear Wall with Slits [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2010, 27(3): 109-114.
- [9] 蒋路, 陈以一, 王伟栋. 带缝钢板剪力墙弹性抗侧刚度及简化模型研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2010, 27(3): 115-120.
JIANG Lu, CHEN Yi-yi, WANG Wei-dong. Research on Elastic Lateral Stiffness and Simplified Model of Steel Plate Shear Wall with Slits [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2010, 27(3): 115-120.
- [10] 耿帅, 陈以一. 带竖缝钢板剪力墙-框架体系抗侧构件要素特性配置[J]. 建筑科学与工程学报, 2014, 31(1): 130-137.
GENG Shuai, CHEN Yi-yi. Configuration of Lateral Force-resistance Component Properties in Steel Plate Shear Wall with Slits-frame Structures [J]. Journal

- of Architecture and Civil Engineering, 2014, 31(1): 130-137.
- [11] 周天华, 吴函恒, 白亮, 等. 钢框架-预制混凝土抗侧力墙装配式结构体系[J]. 建筑科学与工程学报, 2013, 30(3): 1-6.
ZHOU Tian-hua, WU Han-heng, BAI Liang, et al. Fabricated Structural System of Steel Frame-prefabricated Concrete Lateral Resistance Wall[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2013, 30(3): 1-6.
- [12] 吴函恒. 钢框架-预制混凝土抗侧力墙装配式结构体系受力性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
WU Han-heng. Mechanical Behavior Research on Steel Frame-prefabricated Concrete Lateral Resistance Wall Fabricated Structural[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.
- [13] 周天华, 吴函恒, 白亮, 等. 钢框架-型钢混凝土抗侧力墙装配式结构抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(7): 131-137.
ZHOU Tian-hua, WU Han-heng, BAI Liang, et al. Experimental Study on Seismic Behavior of Steel Frame-steel Reinforced Concrete Lateral Force Resisting Wall Fabricated Structures[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(7): 131-137.
- [14] 周天华, 管宇, 吴函恒, 等. 钢框架-预制混凝土抗侧力墙装配式结构竖向受力性能研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(9): 27-34.
ZHOU Tian-hua, GUAN Yu, WU Han-heng, et al. Research on Vertical Mechanical Behavior of Steel Frame-prefabricated Concrete Lateral Resistance Wall Fabricated Structure[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(9): 27-34.
- [15] 周天华, 吴函恒, 陈军武, 等. 钢框架-预制混凝土抗侧力墙结构抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(6): 29-34.
ZHOU Tian-hua, WU Han-heng, CHEN Jun-wu, et al. Experimental Study on Seismic Behavior of Steel Frame-concrete Lateral Force Resisting Wall Fabricated Structures[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(6): 29-34.
- [16] 管宇, 周天华, 吴函恒, 等. 多高层钢框架-预制混凝土抗侧力墙装配式结构竖向受力性能研究[J]. 建筑结构, 2014, 44(13): 64-71, 28.
GUAN Yu, ZHOU Tian-hua, WU Han-heng, et al. Research on the Vertical Mechanical Behavior of Multi-storey and High-rise Steel Frame-prefabricated Concrete Lateral Resistance Wall Fabricated Structure[J]. Building Structure, 2014, 44(13): 64-71, 28.
- [17] 吴函恒, 周天华, 吕晶. 钢框架-装配式混凝土抗侧力墙板结构受力性能[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2016, 46(1): 118-125.
WU Han-heng, ZHOU Tian-hua, LU Jing. Mechanical Behavior of Steel Frame-fabricated Concrete Lateral Force Resisting Wall Structures[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2016, 46(1): 118-125.
- [18] 吴函恒, 吕晶, 周天华. 基于纤维模型的钢框架-混凝土抗侧力墙板装配式结构抗震性能分析[J]. 工业建筑, 2016, 46(3): 54-60.
WU Han-heng, LU Jing, ZHOU Tian-hua. Analysis of Seismic Behaviors of Steel Frame-concrete Lateral Force Resisting Wall Fabricated Structures Using Fiber Elements[J]. Industrial Construction, 2016, 46(3): 54-60.
- [19] 方鄂华, 钱稼茹, 叶列平. 高层建筑结构设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
FANG E-hua, QIAN Jia-ru, YE Lie-ping. Design of High-rise Buildings Structure[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003.
- [20] 陈骥. 钢结构稳定: 理论与设计[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2003.
CHEN Ji. Stability of Steel Structures: Theory and Design[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2003.