

文章编号:1673-2049(2013)04-0070-08

水平荷载作用下新型钢-混凝土混合结构 简化计算方法

李 亮¹, 李国强², 汪 利¹

(1. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061; 2. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要:针对钢框架-混凝土芯筒混合结构的不足,提出了钢框架-屈曲约束支撑-混凝土芯筒多重混合结构形式。根据刚度相等原则,建立了多重钢-混凝土混合结构的简化力学模型,给出了框架、支撑钢框架和混凝土芯筒的刚度计算公式,根据弹性理论推导出了结构的平衡微分方程,依据边界条件得到了在倒三角水平荷载、均布水平荷载和顶点集中水平荷载作用下侧移和内力的简化算法,最后,对简化算法的可靠性进行了验证。结果表明:该算法具有优良的精度,且应用简便,可供工程设计人员采用。

关键词:钢框架-混凝土芯筒混合结构;屈曲约束支撑;水平荷载;平衡微分方程

中图分类号:TU375.4 **文献标志码:**A

Simplified Computation Algorithm of New Multi-lateral Resistant Steel-concrete Mixed Structure Under Lateral Load

LI Liang¹, LI Guo-qiang², WANG Li¹

(1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China; 2. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: According to the shortage of steel frame and concrete core canister mixed structure, the steel frame-buckling constraint brace-concrete core multi-lateral resistant mixed structure was put forward. Simplified mechanical model of multi-lateral resistant steel-concrete mixed structure was established based on the stiffness equation principle. Stiffness calculation formulae of frame, brace steel frame and concrete tube were given, and the equilibrium differential equations of the structure were deduced according to the elastic theory. Then the lateral and internal force simplified algorithms were deduced based on boundary conditions under the inverted triangle lateral load, uniformly lateral load and top-concentrated lateral load. Finally, the reliability of the simplified algorithm was verified. The results show that the simplified algorithm has good accuracy, and it is easy for application, and can be applied for the engineering designers.

Key words: steel frame and concrete core canister mixed structure; buckling constraint brace; lateral load; equilibrium differential equation

收稿日期:2013-07-11

基金项目:国家自然科学基金项目(51208057);中国博士后科学基金项目(2013T60687)

作者简介:李 亮(1981-),男,陕西西安人,讲师,工学博士,E-mail:bright_li@chd.edu.cn。

0 引言

钢框架-混凝土芯筒混合结构由外部钢框架和内部混凝土芯筒组成,兼有钢结构和混凝土结构的优点^[1-7]。钢框架部分中钢梁的跨高比大,钢柱截面小而承载能力高,抵抗竖向荷载效率高;混凝土芯筒具有极大的抗侧刚度及抗倾覆能力,抵抗水平荷载效率高。但该结构体系也存在一些不足,首先,刚架框架梁柱焊接或栓焊混合连接延性较差,容易发生脆性破坏^[8];其次,框架部分需要采用较大梁柱截面来提高安全储备,以抵抗混凝土芯筒开裂后卸载的那部分内力,由于框架利用梁柱截面抗弯刚度来抵抗侧力,抗侧效率低并造成设计浪费^[9]。

考虑到:①半刚性连接延性好,发生较大塑性变形时仍具有稳定的抗弯承载力,梁柱采用半刚性连接可避免脆性破坏;②半刚性组合梁可调整连接刚度来优化梁内弯矩分布,降低钢材用量;③屈曲约束支撑在受力和受压时均能达到屈服,具有优越的耗能能力,在钢框架中布置该支撑后,可利用支撑及梁柱的轴向刚度来抵抗侧力,与依靠梁柱抗弯刚度相比效率更高。据此,本文中笔者提出了由屈曲约束支撑、半刚性连接钢框架和混凝土芯筒组成的新型钢-混凝土混合结构体系。

本文中建立了新型钢-混凝土混合结构的简化计算模型,采用弹性理论推导出了水平荷载作用下侧移的简化算法,并采用有限元法对简化算法的可靠性进行了验证。采用该算法能快速而可靠地估算出新型钢-混凝土混合结构的侧移,避免了复杂的有限元建模及分析过程,具有重要的理论意义和工程应用价值。

1 简化力学模型及假定

新型钢-混凝土混合结构中的抗侧力构件包括混凝土芯筒、屈曲约束支撑和半刚性连接框架 3 个部分,可构成多重抗侧力体系,如图 1 所示。

根据抗弯刚度和剪切刚度相等原则,可将空间钢框架、屈曲约束支撑构架(屈曲约束支撑及与屈曲约束支撑直接相连的钢梁和钢柱铰接构成)以及混凝土芯筒等效为平面总铰接框架、总支撑和总剪力墙,并进一步简化为弯剪型竖向悬臂杆,见图 2。

理论推导过程中,假定^[10]:

(1)框架、支撑和混凝土芯筒沿高度方向截面相同。

(2)高度方向上楼板的作用是连续的。

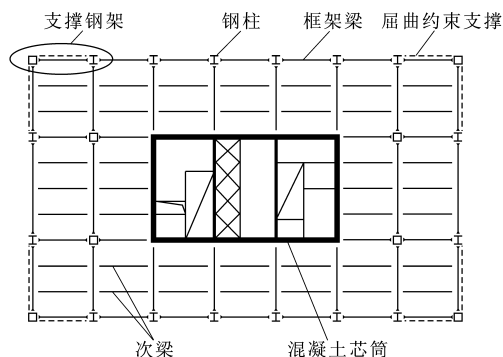


图 1 典型多重钢-混凝土混合结构平面

Fig. 1 Plane of Typical Multi-lateral Resistant Steel-concrete Mixed Structure

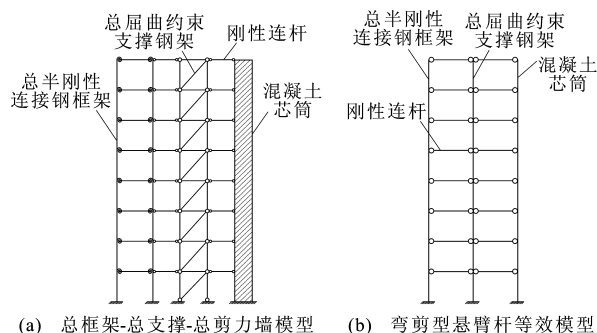


图 2 多重钢-混凝土混合结构的简化模型

Fig. 2 Simplified Models of Multi-lateral Resistant Steel-concrete Mixed Structure

(3)楼板在自身平面内刚度无限大,且荷载的合力中心与各楼层的刚度中心重合。

2 结构的刚度计算

2.1 半刚性连接钢框架刚度

考虑梁与柱之间半刚性连接后,钢框架部分第 i 层的第 j 根柱子的抗侧移刚度 $D_{i,j}$ 为^[11]

$$D_{i,j} = \beta_{i,j} \sum_{j=1}^n \frac{12i_{c,i,j}}{h_i^2} \quad (1)$$

式中: $\beta_{i,j}$ 为考虑半刚性连接的柱子 D 值的修正系数,可由表 1 得到; $i_{c,i,j}$ 为第 i 层的第 j 根柱子的线刚度; h_i 为第 i 层的楼层高度。

于是,第 i 层的层剪切刚度 $C_{t,i}$ 为

$$C_{t,i} = h_i \sum_{i=1}^n D_{i,j} \quad (2)$$

第 i 层的抗弯刚度^[12] $(E_t I_t)_i$ 为

$$(E_t I_t)_i = E_t \sum_{j=1}^n (I_{ij} + A_{ij} c_{ij}) \quad (3)$$

式中: E_t 为钢框架柱的钢材弹性模量; I_t 为钢框架柱的截面惯性矩; I_{ij} 为第 i 层的第 j 根框架柱的截面惯性矩; A_{ij} 为第 i 层的第 j 根框架柱的截面面积;

表 1 半刚性连接对钢柱 D 值的修正系数 $\beta_{i,j}$

Tab. 1 Modified Coefficient $\beta_{i,j}$ to D Value of Steel Column by Semi-rigid Connection

| 楼层 | | 计算简图 | $\beta_{i,j}$ 计算公式 |
|-----|------|------|---|
| 中间层 | | | $\beta_{i,j}=1-\frac{6i_{c,i,j}+6i_{c,i+1,j}}{6\tilde{i}_{c,i,j}+6i_{c,i+1,j}+k_{AC,1}+k_{AA,1}+k_{AA,2}+k_{AB,2}}$ |
| 底层 | 底部固定 | | $\beta_{i,j}=1-\frac{6i_{c,i,j}+4i_{c,i-1,j}}{6\tilde{i}_{c,i,j}+4i_{c,i-1,j}+k_{DF,3}+k_{DD,3}+k_{DD,4}+k_{DE,4}}$ |
| | 底部铰支 | | $\beta_{i,j}=1-\frac{6i_{c,i,j}+3i_{c,i-1,j}}{6\tilde{i}_{c,i,j}+3i_{c,i-1,j}+k_{DF,3}+k_{DD,3}+k_{DD,4}+k_{DE,4}}$ |
| 顶层 | | | $\beta_{i,j}=1-\frac{6i_{c,i+1,j}}{6i_{c,i+1,j}+k_{GK,5}+k_{GG,5}+k_{GL,6}+k_{GL,6}}$ |

注: $k_{mn}, k_{mm}, k_{mn}, k_{nn}$ 均为半刚性连接梁单元在不考虑轴向和剪切变形时的刚度矩阵分量的元素, m, n 为计算简图中梁端的节点。
 c_{ij} 为第 i 层的第 j 根框架柱到结构平面中性轴的距离。

2.2 屈曲约束支撑钢架刚度

钢框架第 i 层屈曲约束支撑的层剪切刚度的总和 $C_{b,i}$ 为

$$C_{b,i} = h_i \sum_{j=1}^n D_{b,ij} = h_i \sum_{j=1}^n k_{ij} \cos^2(\theta_{ij}) \tag{4}$$

式中: $D_{b,ij}$ 为第 i 层的第 j 根屈曲约束支撑的抗侧移刚度; k_{ij} 为第 i 层的第 j 根屈曲约束支撑的轴向刚度; θ_{ij} 为第 i 层的第 j 根屈曲约束支撑与水平方向的夹角。

考虑钢柱轴向变形的影响, 第 i 层屈曲约束支撑钢架的弯曲刚度 $(E_b I_b)_i$ 为

$$(E_b I_b)_i = E_{bc} \mu' \sum_{i=1}^n (I_{ij} + A_{ij} c_{ij}) \tag{5}$$

式中: E_b 为屈曲约束支撑的材料弹性模量; I_b 为屈曲约束支撑钢架的截面惯性矩; μ' 为折减系数, 对中心支撑可取 0.8~0.9; E_{bc} 为与屈曲约束支撑直接相连的钢柱截面弹性模量。

采用 γ_b^2 来表示支撑钢架的剪切变形影响系数, 即有

$$\gamma_b^2 = \frac{E_b I_b}{C_{b,i} H^2} \tag{6}$$

式中: H 为混凝土芯筒的总高度。

根据顶点位移相等的原则, 可得到支撑钢架的等效弯曲刚度 $(E_b I_b)_{eq}$ 为

$$(E_b I_b)_{eq} = \begin{cases} \frac{E_b I_b}{1+3.64\gamma_b^2} & \text{倒三角水平荷载} \\ \frac{E_b I_b}{1+4\gamma_b^2} & \text{均布水平荷载} \\ \frac{E_b I_b}{1+3\gamma_b^2} & \text{顶点集中水平荷载} \end{cases} \tag{7}$$

2.3 混凝土芯筒刚度

采用 γ_t^2 来表示混凝土芯筒剪切变形影响系数, 即有

$$\gamma_t^2 = \frac{\mu E_t I_t}{G_t A_t H^2} \tag{8}$$

式中: E_t 为混凝土的弹性模量; I_t 为混凝土芯筒的截面惯性矩; μ 为剪应力不均匀系数; G_t 为混凝土的剪切弹性模量; A_t 为混凝土芯筒的横截面积。

根据顶点位移相等原则, 可得到混凝土芯筒的等效弯曲刚度 $(E_t I_t)_{eq}$ 为

$$(E_t I_t)_{eq} = \begin{cases} \frac{E_t I_t}{1+3.64\gamma_t^2} & \text{倒三角水平荷载} \\ \frac{E_t I_t}{1+4\gamma_t^2} & \text{均布水平荷载} \\ \frac{E_t I_t}{1+3\gamma_t^2} & \text{顶点集中水平荷载} \end{cases} \tag{9}$$

3 微分方程的建立

图 3 为多重抗侧力体系的简化模型及微元体受力。在任意分布水平荷载 $q(z)$ 作用下, 简化的力学模型如图 3(a) 所示。

由图 3(b) 中微元体各部分弯矩平衡条件可知

$$M(z) = M_f(z) + M_b(z) + M_t(z) \tag{10}$$

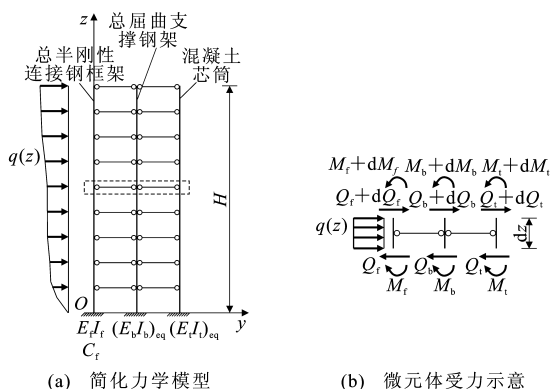


图3 多重抗侧力体系的简化模型及微元体受力

Fig. 3 Simplified Model of Multi-lateral Resistant System and Force of Infinitesimal Body

式中: $M(z)$ 为整体结构在高度 z 处的总弯矩; $M_f(z)$ 为半刚性连接钢框架部分在高度 z 处分担的弯矩; $M_b(z)$ 为屈曲约束支撑钢架部分在高度 z 处分担的弯矩; $M_t(z)$ 为混凝土芯筒部分在高度 z 处分担的弯矩。

由微元体弯矩平衡方程 $\sum M(z) = 0$, 可得到

$$Q(z) = Q_t(z) + Q_b(z) + Q_f(z) = \frac{dM(z)}{dz} \quad (11)$$

式中: $Q(z)$ 为整体结构在高度 z 处的总剪力; $Q_f(z)$ 为半刚性连接钢框架部分在高度 z 处分担的剪力; $Q_b(z)$ 为屈曲约束支撑钢架部分在高度 z 处分担的剪力; $Q_t(z)$ 为混凝土芯筒部分在高度 z 处分担的剪力。

由微元体剪力平衡方程 $\sum Q(z) = 0$, 可得到

$$q(z) = q_t(z) + q_b(z) + q_f(z) = -\frac{dQ(z)}{dz} \quad (12)$$

式中: $q(z)$ 为整体结构在高度 z 处的水平荷载; $q_f(z)$ 为半刚性连接钢框架部分在高度 z 处分担的水平荷载; $q_b(z)$ 为屈曲约束支撑钢架部分在高度 z 处分担的水平荷载; $q_t(z)$ 为混凝土芯筒部分在高度 z 处分担的水平荷载。

根据位移协调条件可知

$$\frac{d^2 y}{dz^2} = \frac{d^2 y_t}{dz^2} = \frac{d^2 y_b}{dz^2} = \frac{d^2 y_f}{dz^2} = \frac{d^2 y_{f,M}}{dz^2} + \frac{d^2 y_{f,Q}}{dz^2} \quad (13)$$

式中: y_t 为混凝土芯筒部分的侧移; y_b 为屈曲约束支撑钢架部分的侧移; y_f 为半刚性连接钢框架部分的侧移; $y_{f,M}$ 为框架部分的弯曲侧移; $y_{f,Q}$ 为框架部分的剪切侧移。

根据材料力学中内力与位移的关系可知

$$\left. \begin{aligned} M_t(z) &= -(E_t I_t)_{eq} \frac{d^2 y}{dz^2} \\ M_b(z) &= -(E_b I_b)_{eq} \frac{d^2 y}{dz^2} \\ M_f(z) &= -E_f I_f \frac{d^2 y_{f,M}}{dz^2} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

将式(13), (14)代入式(10), 可得到

$$\left[(E_t I_t)_{eq} + (E_b I_b)_{eq} + E_f I_f \right] \frac{d^2 y}{dz^2} = -M(z) + E_f I_f \frac{d^2 y_{f,Q}}{dz^2} \quad (15)$$

根据材料力学理论可知

$$\frac{dy_{f,Q}}{dz} = \frac{Q_f(z)}{C_f} \quad (16)$$

将式(16)对 z 求导后代入式(12), 可得到

$$\frac{d^2 y_{f,Q}}{dz^2} = \frac{1}{C_f} \frac{dQ_f(z)}{dz} = -\frac{q(z) - q_t(z) - q_b(z)}{C_f} \quad (17)$$

将式(11), (14)代入式(15), 可得到

$$\left. \begin{aligned} q_t(z) &= (E_t I_t)_{eq} \frac{d^4 y}{dz^4} \\ q_b(z) &= (E_b I_b)_{eq} \frac{d^4 y}{dz^4} \\ q_f(z) &= E_f I_f \frac{d^4 y_{f,M}}{dz^4} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

将式(17), (18)代入式(15), 并令 $\sum EI = E_f I_f +$

$(E_t I_t)_{eq} + (E_b I_b)_{eq}$, $\xi = \frac{z}{H}$, 可得到

$$\frac{d^4 y}{d\xi^4} - \lambda^2 \frac{d^2 y}{d\xi^2} = \frac{M(z)}{\sum EI} \lambda^2 H^2 + \frac{q(z) H^4}{(E_t I_t)_{eq} + (E_b I_b)_{eq}} \quad (19)$$

式中: λ 为与各部分刚度均相关的一个参数, $\lambda =$

$$H \sqrt{\frac{C_f \sum EI}{E_f I_f ((E_t I_t)_{eq} + (E_b I_b)_{eq})}}.$$

4 简化计算公式的推导

4.1 倒三角水平荷载

在倒三角水平荷载作用下, 任意高度 z 处的水平荷载 $q(z)$ 及弯矩 $M(z)$ 分别为

$$q(z) = q(H) \xi \quad (20)$$

$$M(z) = -\frac{q(H) H^2}{6} (2 - 3\xi + \xi^3) \quad (21)$$

将式(20), (21)代入式(19), 可得到

$$\frac{d^4 y}{d\xi^4} - \lambda^2 \frac{d^2 y}{d\xi^2} = -\frac{q(H) H^4}{6 \sum EI} \lambda^2 \xi^3 + \left(\frac{q(H) H^4}{2 \sum EI} \lambda^2 + \frac{q(H) H^4}{(E_t I_t)_{eq} + (E_b I_b)_{eq}} \right) \xi - \frac{q(H) H^4}{3 \sum EI} \lambda^2 \quad (22)$$

设微分方程的解为

$$y = A_1 + A_2 \xi + A_3 \operatorname{sh}(\lambda \xi) + A_4 \operatorname{ch}(\lambda \xi) + y^* \quad (23)$$

设方程式(22)的特解为

$$y^* = B_1 \xi^5 + B_2 \xi^3 + B_3 \xi^2 \quad (24)$$

将式(24)代入式(22),可得到

$$y^* = \frac{q(H)H^4}{120 \sum EI} \xi^5 + \frac{q(H)H^4}{6\lambda^2} \left(\frac{1}{\sum EI} - \frac{1}{(E_t I_t)_{\text{eq}} + (E_b I_b)_{\text{eq}}} - \frac{q(H)H^4}{120 \sum EI} \xi^3 + \frac{q(H)H^4}{6 \sum EI} \xi^2 \right) \quad (25)$$

根据边界条件 $y|_{\xi=0}=0, y'|_{\xi=0}=0, y''|_{\xi=1}=0$, 可得到

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= -A_4 = A_3 \frac{\operatorname{ch}(\lambda)}{\operatorname{sh}(\lambda)} + \frac{q(H)H^4}{\lambda^4 \operatorname{ch}(\lambda)} \cdot \\ &\quad \left(\frac{1}{\sum EI} - \frac{1}{(E_t I_t)_{\text{eq}} + (E_b I_b)_{\text{eq}}} \right) \\ A_2 &= -\lambda A_3 \\ A_4 &= -A_3 \operatorname{sh}(\lambda) - \frac{q(H)H^4}{\lambda^4 \operatorname{ch}(\lambda)} \left(\frac{1}{\sum EI} - \frac{1}{(E_t I_t)_{\text{eq}} + (E_b I_b)_{\text{eq}}} \right) \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

将式(25),(26)代入式(23),可得到

$$y = A_3 \left(\frac{\operatorname{sh}(\lambda)}{\operatorname{ch}(\lambda)} - \lambda \xi + \operatorname{sh}(\lambda \xi) - \frac{\operatorname{sh}(\lambda)}{\operatorname{ch}(\lambda)} \operatorname{ch}(\lambda \xi) \right) + \frac{q(H)H^4}{120 \sum EI} \xi^5 + \frac{q(H)H^4}{6 \sum EI} \xi^2 + \frac{q(H)H^4}{\lambda^4 \operatorname{ch}(\lambda)} \left(\frac{1}{\sum EI} - \frac{1}{(E_t I_t)_{\text{eq}} + (E_b I_b)_{\text{eq}}} \right) (1 - \operatorname{ch}(\lambda \xi)) + \left[\frac{q(H)H^4}{6\lambda^2} \left(\frac{1}{\sum EI} - \frac{1}{(E_t I_t)_{\text{eq}} + (E_b I_b)_{\text{eq}}} \right) - \frac{q(H)H^4}{12 \sum EI} \right] \xi^3 \quad (27)$$

将式(14),(21)代入式(10),可得到

$$M_f(z) = -\frac{q(H)H^2}{6} (2 - 3\xi + \xi^2) + \frac{(E_t I_t)_{\text{eq}} + (E_b I_b)_{\text{eq}}}{H^2} \frac{d^2 y}{d\xi^2} \quad (28)$$

将式(28)代入式(14),并对 ξ 进行一次积分,可得到

$$\begin{aligned} \frac{dy_{f,M}}{d\xi} &= \frac{q(H)H^4}{6} (2 - 3\xi + \xi^2) - \\ &\quad \frac{(E_t I_t)_{\text{eq}} + (E_b I_b)_{\text{eq}}}{E_f I_f} \{ A_3 \lambda (\operatorname{ch}(\lambda \xi) - \frac{\operatorname{sh}(\lambda)}{\operatorname{ch}(\lambda)} \operatorname{sh}(\lambda \xi)) + \\ &\quad \frac{q(H)H^4}{3 \sum EI} \xi + \frac{q(H)H^4}{24 \sum EI} \xi^4 - \frac{q(H)H^4}{\lambda^3 \operatorname{ch}(\lambda)} \left(\frac{1}{\sum EI} - \right. \end{aligned}$$

$$\left. \frac{1}{(E_t I_t)_{\text{eq}} + (E_b I_b)_{\text{eq}}} \right) \operatorname{sh}(\lambda \xi) + \left[\frac{q(H)H^4}{2\lambda^2} \left(\frac{1}{\sum EI} - \frac{1}{(E_t I_t)_{\text{eq}} + (E_b I_b)_{\text{eq}}} \right) - \frac{q(H)H^4}{4 \sum EI} \right] \xi^2 \} + A_5 \quad (29)$$

由框架部分底部转角为0,可得到

$$A_5 = \frac{(E_t I_t)_{\text{eq}} + (E_b I_b)_{\text{eq}}}{E_f I_f} A_3 \lambda \quad (30)$$

将式(30)代入式(29),可得到

$$\begin{aligned} \frac{dy_{f,M}}{d\xi} \Big|_{\xi=1} &= \frac{q(H)H^4}{8E_f I_f} + \frac{(E_t I_t)_{\text{eq}} + (E_b I_b)_{\text{eq}}}{E_f I_f} A_3 \lambda \cdot \\ &\quad (1 - \operatorname{ch}(\lambda) - \frac{\operatorname{sh}(\lambda)}{\operatorname{ch}(\lambda)} \operatorname{sh}(\lambda)) - \frac{(E_t I_t)_{\text{eq}} + (E_b I_b)_{\text{eq}}}{E_f I_f} \cdot \\ &\quad \frac{q(H)H^4}{8 \sum EI} - \frac{(E_t I_t)_{\text{eq}} + (E_b I_b)_{\text{eq}}}{E_f I_f} \left(\frac{1}{\sum EI} - \frac{1}{(E_t I_t)_{\text{eq}} + (E_b I_b)_{\text{eq}}} \right) \frac{q(H)H^4}{\lambda^2} \left(\frac{1}{2} - \frac{\operatorname{sh}(\lambda)}{\lambda \operatorname{ch}(\lambda)} \right) \end{aligned} \quad (31)$$

由结构顶部($\xi=1$)剪力为0,可得到

$$Q_f(z) \Big|_{\xi=1} = -(Q_t(z) + Q_b(z)) \Big|_{\xi=1} = -\frac{(E_t I_t)_{\text{eq}} + (E_b I_b)_{\text{eq}}}{H^3} \frac{d^3 y}{d\xi^3} \Big|_{\xi=1} \quad (32)$$

将式(27),(32)代入式(16),可得到

$$\begin{aligned} \frac{dy_{f,Q}}{d\xi} \Big|_{\xi=1} &= \frac{q(H)H^4}{\lambda^3} \left(\frac{1}{\sum EI} - \frac{1}{(E_t I_t)_{\text{eq}} + (E_b I_b)_{\text{eq}}} \right) \cdot \\ &\quad \frac{1}{(E_t I_t)_{\text{eq}} + (E_b I_b)_{\text{eq}}} \frac{\sum EI}{E_f I_f} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{\operatorname{sh}(\lambda)}{\operatorname{ch}(\lambda)} \right) + \\ &\quad A_3 \frac{\sum EI}{E_f I_f} \lambda (\operatorname{ch}(\lambda) - \frac{\operatorname{sh}(\lambda)}{\operatorname{ch}(\lambda)}) \end{aligned} \quad (33)$$

将式(27)对 ξ 求导,可得到

$$\begin{aligned} \frac{dy}{d\xi} \Big|_{\xi=1} &= A_3 \lambda (-1 + \operatorname{ch}(\lambda \xi) - \frac{\operatorname{sh}(\lambda)}{\operatorname{ch}(\lambda)} \operatorname{sh}(\lambda)) - \\ &\quad \frac{q(H)H^4}{\lambda^3} \left(\frac{1}{\sum EI} - \frac{1}{(E_t I_t)_{\text{eq}} + (E_b I_b)_{\text{eq}}} \right) \cdot \\ &\quad \frac{\operatorname{sh}(\lambda)}{\operatorname{ch}(\lambda)} + \frac{q(H)H^4}{2\lambda^2} \left(\frac{1}{\sum EI} - \frac{1}{(E_t I_t)_{\text{eq}} + (E_b I_b)_{\text{eq}}} \right) + \frac{q(H)H^4}{8 \sum EI} \end{aligned} \quad (34)$$

框架部分的侧移由弯矩侧移和剪切侧移组成,

即有

$$\frac{dy}{d\xi} \Big|_{\xi=1} = \frac{dy_{f,M}}{d\xi} \Big|_{\xi=1} + \frac{dy_{f,Q}}{d\xi} \Big|_{\xi=1} \quad (35)$$

将式(31),(33),(34)代入式(35),可得到

$$A_3 = \frac{q(H)H^4}{\lambda^3} \left(\frac{1}{\sum EI} - \frac{1}{(E_t I_t)_{\text{eq}} + (E_b I_b)_{\text{eq}}} \right) \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{\lambda^2} \right) \quad (36)$$

再将式(36)代入式(26),可得到

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= \frac{\text{sh}(\lambda)}{\text{ch}(\lambda)} \frac{q(H)H^4}{\lambda^3} \left(\frac{1}{\sum EI} - \frac{1}{(E_t I_t)_{\text{eq}} + (E_b I_b)_{\text{eq}}} \right) \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{\lambda^2} \right) + \\ &\quad \frac{q(H)H^4}{\lambda^4 \text{ch}(\lambda)} \left(\frac{1}{\sum EI} - \frac{1}{(E_t I_t)_{\text{eq}} + (E_b I_b)_{\text{eq}}} \right) \\ A_2 &= -\frac{q(H)H^4}{\lambda^2} \left(\frac{1}{\sum EI} - \frac{1}{(E_t I_t)_{\text{eq}} + (E_b I_b)_{\text{eq}}} \right) \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{\lambda^2} \right) \\ A_3 &= -\frac{\text{sh}(\lambda)}{\text{ch}(\lambda)} \frac{q(H)H^4}{\lambda^3} \left(\frac{1}{\sum EI} - \frac{1}{(E_t I_t)_{\text{eq}} + (E_b I_b)_{\text{eq}}} \right) \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{\lambda^2} \right) - \\ &\quad \frac{q(H)H^4}{\lambda^4 \text{ch}(\lambda)} \left(\frac{1}{\sum EI} - \frac{1}{(E_t I_t)_{\text{eq}} + (E_b I_b)_{\text{eq}}} \right) \end{aligned} \right\} \quad (37)$$

4.2 均布水平荷载

按照与倒三角水平荷载相同的解法,可得到均布荷载作用下的侧移 y 为

$$\begin{aligned} y &= A_1 + A_2 \xi + A_3 \text{sh}(\lambda \xi) + A_4 \text{ch}(\lambda \xi) + \\ &\quad \frac{q(H)H^4}{24 \sum EI} (1 - \xi)^4 + \frac{q(H)H^4}{2\lambda^2} \cdot \\ &\quad \left(\frac{1}{\sum EI} - \frac{1}{(E_t I_t)_{\text{eq}} + (E_b I_b)_{\text{eq}}} \right) \xi^2 \end{aligned} \quad (38)$$

其中

$$\begin{aligned} A_1 &= -\frac{q(H)H^4}{24 \sum EI} + \frac{q(H)H^4}{\lambda^2} \left(\frac{1}{\sum EI} - \frac{1}{(E_t I_t)_{\text{eq}} + (E_b I_b)_{\text{eq}}} \right) \frac{1}{\lambda \text{ch}(\lambda)} (\text{sh}(\lambda) + \frac{1}{\lambda}) \\ A_2 &= \frac{q(H)H^4}{6 \sum EI} - \frac{q(H)H^4}{\lambda^2} \left(\frac{1}{\sum EI} - \frac{1}{(E_t I_t)_{\text{eq}} + (E_b I_b)_{\text{eq}}} \right) \\ A_3 &= \frac{q(H)H^4}{\lambda^3} \left(\frac{1}{\sum EI} - \frac{1}{(E_t I_t)_{\text{eq}} + (E_b I_b)_{\text{eq}}} \right) \\ A_4 &= -\frac{q(H)H^4}{\lambda^2} \left(\frac{1}{\sum EI} - \frac{1}{(E_t I_t)_{\text{eq}} + (E_b I_b)_{\text{eq}}} \right) \cdot \\ &\quad \frac{1}{\lambda \text{ch}(\lambda)} (\text{sh}(\lambda) + \frac{1}{\lambda}) \end{aligned}$$

4.3 顶点集中水平荷载

按照与倒三角水平荷载相同的解法,可得到顶点集中水平荷载作用下的侧移 y 为

$$y = A_1 + A_2 \xi + A_3 \text{sh}(\lambda \xi) + A_4 \text{ch}(\lambda \xi) +$$

$$\frac{PH^3}{6 \sum EI} (1 - \xi)^3 \quad (39)$$

其中

$$\begin{aligned} A_1 &= -\frac{PH^3}{\lambda^3} \frac{E_f I_f}{\sum EI ((E_t I_t)_{\text{eq}} + (E_b I_b)_{\text{eq}})} \cdot \\ &\quad \frac{\text{sh}(\lambda)}{\text{ch}(\lambda)} - \frac{PH^3}{6 \sum EI} \\ A_2 &= -\frac{PH^3}{\lambda^2} \frac{E_f I_f}{\sum EI ((E_t I_t)_{\text{eq}} + (E_b I_b)_{\text{eq}})} + \\ &\quad \frac{PH^3}{2 \sum EI} \\ A_3 &= -\frac{PH^3}{\lambda^3} \frac{E_f I_f}{\sum EI ((E_t I_t)_{\text{eq}} + (E_b I_b)_{\text{eq}})} \\ A_4 &= \frac{PH^3}{\lambda^3} \frac{E_f I_f}{\sum EI ((E_t I_t)_{\text{eq}} + (E_b I_b)_{\text{eq}})} \frac{\text{sh}(\lambda)}{\text{ch}(\lambda)} \end{aligned}$$

式中: P 为作用在结构顶部的集中荷载。

5 内力简化计算公式

由式(11),(14)可知,屈曲约束支撑钢架部分在任意高度 z 处的弯矩 $M_b(z)$ 和剪力 $Q_b(z)$ 分别为

$$\left. \begin{aligned} M_b(z) &= -\frac{(E_b I_b)_{\text{eq}}}{H^2} \frac{d^2 y}{d\xi^2} \\ Q_b(z) &= -\frac{(E_b I_b)_{\text{eq}}}{H^3} \frac{d^3 y}{d\xi^3} \end{aligned} \right\} \quad (40)$$

混凝土芯筒部分在任意高度 z 处的弯矩 $M_t(z)$ 和剪力 $Q_t(z)$ 分别为

$$\left. \begin{aligned} M_t(z) &= -\frac{(E_t I_t)_{\text{eq}}}{H^2} \frac{d^2 y}{d\xi^2} \\ Q_t(z) &= -\frac{(E_t I_t)_{\text{eq}}}{H^3} \frac{d^3 y}{d\xi^3} \end{aligned} \right\} \quad (41)$$

于是,半刚性连接钢框架部分在任意高度 z 处的弯矩 $M_f(z)$ 和剪力 $Q_f(z)$ 分别为

$$\left. \begin{aligned} M_f(z) &= M(z) + \frac{(E_t I_t)_{\text{eq}} + (E_b I_b)_{\text{eq}}}{H^2} \frac{d^2 y}{d\xi^2} \\ Q_f(z) &= Q(z) - \frac{(E_t I_t)_{\text{eq}} + (E_b I_b)_{\text{eq}}}{H^3} \frac{d^3 y}{d\xi^3} \end{aligned} \right\} \quad (42)$$

6 有限元法的验证

实际结构中楼板仅在楼层标高处将框架、支撑和混凝土芯筒连接起来,假定楼板的作用高度方向上连续导致力学模型与实际模型不符。为了说明该假定对简化算法可靠性的影响可以忽略,采用有限元法进行验证。

6.1 模型介绍

算例模型的几何尺寸如图4所示。水平荷载均

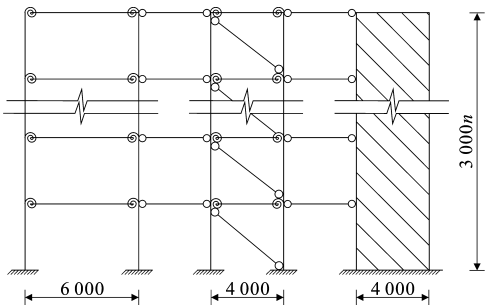


图 4 算例模型的几何尺寸(单位:mm)

Fig. 4 Geometric Sizes of Example Model (Unit:mm)

采用倒三角分布模式;结构中钢柱型号为 H500×500×20×24,钢梁型号为 H500×300×16×18;支撑柱型号为 H300×300×12×16,支撑梁型号为 H350×200×12×14;混凝土墙体厚度 $t=400$ mm。钢材弹性模量 $E_s=200$ GPa,混凝土弹性模量 $E_c=30$ GPa,半刚性连接的初始转动刚度 $R=1.2\times10^{12}$ (N·mm)·rad⁻¹。

表 2 模型 A1~A7 理论公式计算结果与有限元结果对比

| 模型编号 | $k/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$ | C_{bf}/N | $1+3.64\gamma_b^2$ | $(E_b I_b)_{eq}/10^{16}$ MPa | $K/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$ | | 相对误差/% |
|------|-----------------------------------|-------------------|--------------------|------------------------------|-----------------------------------|--------|--------|
| | | | | | 简化算法 | 有限元法 | |
| A1 | 2 160 000 | 4.15×10^9 | 1.014 | 2.03 | 13 501 | 13 213 | 2.13 |
| A2 | 576 000 | 1.11×10^9 | 1.052 | 1.96 | 13 414 | 13 125 | 1.43 |
| A3 | 324 000 | 6.22×10^8 | 1.093 | 1.88 | 13 329 | 13 047 | 2.11 |
| A4 | 216 000 | 4.15×10^8 | 1.139 | 1.81 | 13 239 | 12 968 | 2.04 |
| A5 | 162 000 | 3.11×10^8 | 1.186 | 1.74 | 13 155 | 12 898 | 1.95 |
| A6 | 108 000 | 2.07×10^8 | 1.279 | 1.61 | 13 007 | 12 776 | 1.78 |
| A7 | 79 200 | 1.52×10^8 | 1.380 | 1.49 | 12 868 | 12 661 | 1.61 |

表 3 模型 B1~B7 理论公式计算结果与有限元结果对比

| 模型编号 | $k/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$ | C_{bf}/N | $1+3.64\gamma_b^2$ | $(E_b I_b)_{eq}/10^{16}$ MPa | $K/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$ | | 相对误差/% |
|------|-----------------------------------|-------------------|--------------------|------------------------------|-----------------------------------|---------|--------|
| | | | | | 简化算法 | 有限元法 | |
| B1 | 2 232 000 | 4.29×10^9 | 1.121 | 1.84 | 259 231 | 256 410 | 1.09 |
| B2 | 1 260 000 | 2.42×10^9 | 1.215 | 1.69 | 254 762 | 253 165 | 0.63 |
| B3 | 900 000 | 1.73×10^9 | 1.301 | 1.58 | 251 224 | 250 313 | 0.36 |
| B4 | 576 000 | 1.11×10^9 | 1.471 | 1.40 | 245 468 | 245 700 | 0.09 |
| B5 | 432 000 | 8.29×10^8 | 1.628 | 1.27 | 241 207 | 242 229 | 0.42 |
| B6 | 324 000 | 6.22×10^8 | 1.837 | 1.12 | 236 658 | 238 474 | 0.76 |
| B7 | 223 200 | 4.29×10^8 | 2.215 | 0.93 | 230 619 | 233 100 | 1.06 |

7 结 语

本文中提出了钢框架-屈曲约束支撑-混凝土芯筒多重混合结构形式,建立了多重钢-混凝土混合结构的简化力学模型,推导出了水平荷载作用下的简化计算公式。通过有限元法验证了简化算法具有优良的精度,且应用简便,可供工程设计人员采用。

6.2 计算结果对比

设结构顶部发生侧移 Δ 时,基底处的水平剪力为 V ,定义结构整体参数 $K=V/\Delta$ 。实际结构中,混凝土墙体高宽比 H/B (B 为墙体宽度)和支撑钢架中支撑的轴向刚度对各自剪切变形占总变形的比例产生较大影响。对于高宽比较大和高宽比较小的结构,通过改变支撑的轴向刚度得到了 2 组共 14 个算例,并与有限元法进行对比来说明简化算法具有良好的适用性和可靠性。

当 $H/B=9$ 时,墙体剪切变形影响较小。通过改变支撑的轴向刚度 k ,共得到 7 个算例模型(A1~A7),其结构整体刚度参数结果见表 2。当 $H/B=3$ 时,墙体剪切变形影响较大。通过改变支撑的轴向刚度 k ,共得到 7 个算例模型(B1~B7), K 值结果如表 3 所示。通过对比表 2,3 中简化算法与有限元法计算结果可知,最大相对误差为 2.13%,可见,本文中提出的简化算法具有优良的计算精度。

参考文献:

References:

[1] 李国强,石文龙,王静峰.半刚性连接钢框架结构设计[M].北京:中国建筑工业出版社,2009.
LI Guo-qiang, SHI Wen-long, WANG Jing-feng. Structural Design of Steel Frames with Semi-rigid Connections [M]. Beijing: China Architecture &

- Building Press, 2009.
- [2] 郭彦林, 张博浩, 王小安, 等. 装配式防屈曲支撑设计理论的研究进展[J]. 建筑科学与工程学报, 2013, 30(1): 1-12.
GUO Yan-lin, ZHANG Bo-hao, WANG Xiao-an, et al. Research Progress on Design Theory of Assembled Buckling-restrained Brace[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2013, 30(1): 1-12.
- [3] LI L, LI G Q, LUI Y S. Simplified Algorithm of the Novel Steel-concrete Mixed Structure Under Lateral Load[J]. International Journal of High-rise Buildings, 2012, 1(4): 247-254.
- [4] 吴 徽, 张国伟, 赵 健, 等. 防屈曲支撑加固既有 RC 框架结构抗震性能研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(7): 37-46.
WU Hui, ZHANG Guo-wei, ZHAO Jian, et al. Seismic Performance of Existing RC Frame Structures Reinforced with Buckling-restrained Braces[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(7): 37-46.
- [5] 刘寒冰, 马 辉, 刘天明, 等. 竖向集中荷载作用下钢-混凝土组合梁的解析解[J]. 中国公路学报, 2010, 23(4): 39-44.
LIU Han-bing, MA Hui, LIU Tian-ming, et al. Analytical Solution of Steel-concrete Composite Beam Under Vertical Loads[J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(4): 39-44.
- [6] 尧云涛, 肖汝诚. 考虑空间效应的钢-混凝土组合梁单元研究[J]. 中国公路学报, 2008, 21(3): 53-56, 90.
YAO Yun-tao, XIAO Ru-cheng. Research on Segment Element of Steel-concrete Composite Slab Beam Considering Spatial Effect[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(3): 53-56, 90.
- [7] 周勇超, 李亮亮, 李子青. 钢-混凝土组合梁界面滑移效应变分法求解[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2013, 33(1): 39-44.
ZHOU Yong-chao, LI Liang-liang, LI Zi-qing. Solution of Slip Effect of Steel-concrete Composite Beam with Variational Principles[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2013, 33(1): 39-44.
- [8] MILLER D K. Lessons Learned from the Northridge Earthquake [J]. Engineering Structures, 1998, 20(4/5/6): 249-260.
- [9] ROSMAN R. Stability and Dynamic of Shear-wall Frame Structures[J]. Build Science, 1974, 32(9): 55-63.
- [10] 包世华. 新编高层建筑结构[M]. 2 版. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
BAO Shi-hua. New High-rise Building Structures [M]. 2nd ed. Beijing: China Water & Power Press, 2001.
- [11] 胡大柱. 半刚性连接组合梁框架体系实用抗震设计方法[D]. 上海: 同济大学, 2008.
HU Da-zhu. Practical Seismic Design Method of Semi-rigid Composite Frames System[D]. Shanghai: Tongji University, 2008.
- [12] JGJ 99—98, 高层民用建筑钢结构技术规程[S].
JGJ 99—98, Technical Specification for Steel Structure of Tall Buildings[S].

《施工技术》2014 年征订通知

《施工技术》为国家期刊奖提名奖期刊、中国科技论文核心期刊、中国期刊方阵双百期刊、建设部优秀科技期刊、中国科技期刊精品数据库来源期刊、中文核心期刊、国际建筑数据库收录期刊、中国核心期刊(遴选)数据库收录期刊、美国《剑桥科学文摘》收录期刊、波兰《哥白尼索引》来源期刊、《中国铁路科技文献数据库》收录期刊。《施工技术》创刊于 1958 年, 是国内建设系统唯一的国家级专业科技期刊, 也是建设科技领域率先改为半月刊的中文核心期刊。

特色栏目: 方针政策; 综合述评; 地基与基础; 建筑企业信息化; 隧道工程; 道路与桥梁; 模板与脚手架; 钢结构; 混凝土; 防水技术; 安装工程; 建筑节能; 工程检测、鉴定与加固; 装饰装修; 结构分析与试验研究; 机械化施工; 绿色施工; 测量技术; 标准规范等。

《施工技术》为半月刊, 16 开本, 国内外公开发行, 各地邮局、本编辑部均可订阅, 邮发代号: 2-756, 每期定价 15 元, 全年共 360 元。本刊兼营广告, 是展示企业形象的理想舞台。

地 址: 北京市西城区德胜门外大街 36 号 A 座 4 层

邮 编: 100120

电 话: (010) 57368788 (主编), 57368789 (编辑), 68300059 (广告), 68341147 (发行)

E-mail: sgjs@cadg.cn

网 址: www.shigongjishu.cn

新浪微博: @施工技术传媒机构

微信号: shigongjishu

