

考虑楼板影响的钢框架结构节点域数学模型

刘洪波^{1,2}, 徐龙军³, 张庆国¹, 李爽¹

(1. 哈尔滨工业大学 建筑设计研究院, 150090 哈尔滨, Interdage@163.com; 2. 黑龙江大学 建筑工程学院, 150080 哈尔滨; 3. 哈尔滨工业大学(威海) 土木工程灾害与预防研究中心, 264209 山东 威海)

摘要: 为研究混凝土楼板对钢框架结构节点域受力性能的影响, 在有限元分析基础上, 确定影响节点域性能的楼板有效宽度. 根据对弹性和塑性阶段节点域的受力分析, 提出了考虑组合效应的节点域数学模型, 推导出相应的抗剪刚度和强度计算公式, 并与有限元结果进行对比分析. 研究结果表明: 该数学模型能够很好地模拟考虑楼板影响的节点域的受力性能; 在梁端弯矩相同情况下, 作用在考虑楼板影响的节点域上的剪力比不考虑楼板影响的情况小.

关键词: 钢框架; 有限元; 节点域; 组合效应; 楼板

中图分类号: TU393.2; O346.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2012)02-0028-05

Models for panel zones in steel moment frame structures with composite action

LIU Hong-bo^{1,2}, XU Long-jun³, ZHANG Qing-guo¹, LI Shuang¹

(1. Architectural Design and Research Institute, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China, Interdage@163.com; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Heilongjiang University, 150080 Harbin, China; 3. Research Center of Civil Engineering Disasters and Prevention, Harbin Institute of Technology at Weihai, 264209 Weihai, Shandong, China)

Abstract: To research the influence of concrete slab on the behavior of panel zone in steel moment frame structures, the effective width of composite connections was proposed by finite element analysis. Based on analysis within elastic and post-elastic range of the panel zone, a new model, which is particularly suited for modelling steel and composite joints within frame analysis procedures, is proposed, and the formulae calculating the shearing stiffness and ultimate strength of the composite joints are derived. The results demonstrate that the approach provides a more realistic representation of the behavior in comparison with the available models, especially in the case of composite connections. Shear force in panel zone with slab is smaller than that without slab under the same moment loads.

Key words: steel frame; finite element; panel zone; composite action; slab

钢框架结构中, 节点域的剪切变形对整个钢框架性能有重要影响. 结构抗震设计时, 一方面利用节点域屈服后具有良好的强度和循环强化性能, 耗散地震能量; 另一方面, 节点域塑性变形过大引起节点焊缝处脆性断裂^[1-2]. 楼板和钢梁组合作用使钢梁除了承受弯矩还受轴力作用^[3].

1 影响节点域性能的楼板有效宽度

钢-混凝土组合梁在竖向荷载作用下, 混凝土翼缘板存在剪力滞后现象, 设计中普遍采用翼缘有效宽度概念进行设计^[4]. 本文强调的是影响节点域性能的楼板有效宽度, 不可混淆.

钢框架结构在水平地震荷载作用下, 梁柱节点承受反对称的往复循环荷载作用. 由于混凝土的抗拉强度很低, 受拉侧混凝土很快开裂退出工作, 拉力全部由钢筋承受. 受压侧是混凝土和钢筋共同工作, 对节点域的变形影响起了主导作用. 在

收稿日期: 2010-12-12.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51008094); 黑龙江省教育厅科学技术研究资助项目(11551369).

作者简介: 刘洪波(1976—), 男, 博士, 副教授.

节点附近混凝土楼板中的压应力主要分布在柱翼缘宽度范围内,距离柱翼缘越近,应力分布集中状况越明显^[5].

本文研究的主要是梁柱刚性连接节点,构件截面参数见表1,两组构件的混凝土楼板宽度分别取柱宽、两倍柱宽、2 m 3种情况.钢材的弹性模量 $E = 2.1 \times 10^5$ MPa,屈服强度 $f_y = 275$ MPa,混凝土的弹性模量 $E_c = 3.0 \times 10^4$ MPa,抗压强度 $f_c = 30$ MPa,抗拉强度 $f_t = 3$ MPa,楼板配筋率 $\rho = 0.56\%$.

表1 构件截面几何参数 mm

编号	截面高	截面宽	腹板厚	翼缘厚
S ₁	梁	300	150	7
	柱	260	260	17
S ₂	梁	460	190	10
	柱	370	370	15

约束条件和加载方案见图1,节点S₁和S₂层高 l_c 均为3 m,节点S₁半跨长 l_b 为2.5 m,节点S₂半跨长 l_b 为4.5 m,节点S₁楼板厚度取100 mm和130 mm两种情况,节点S₂楼板厚度取120 mm和150 mm两种情况.有限元模型见图2,采用ANSYS中实体单元建模,混凝土楼板采用Solid65单元,钢结构部分采用Solid45单元.考虑楼板与钢梁之间的接触,钢梁与楼板之间采用焊钉连接,有限元建模时,根据面积等效原则,将圆形焊钉等效成矩形,有限元计算结果见图3,图中节点域的转角是指节点域的剪切变形角.钢材采用随动强化准则,混凝土采用各向同性强化准则.

由图3可知,3种楼板宽度情况的节点域弯矩-变形曲线在弹性和塑性阶段都非常接近.

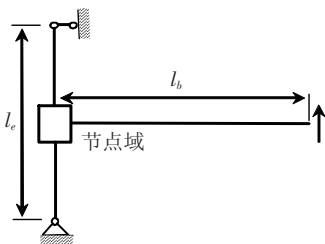


图1 约束条件和加载方案

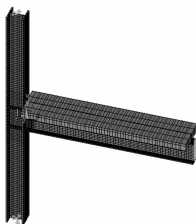
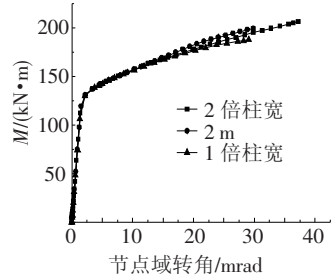
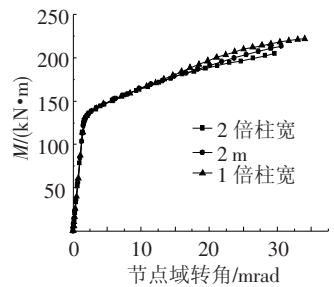


图2 有限元模型

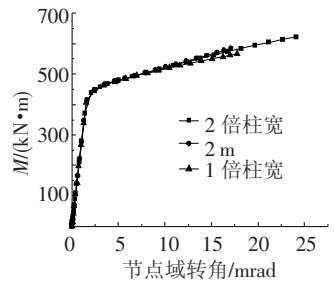
节点S₁在楼板宽度2 m情况下,如图4所示定义5条路径,x为梁长度方向,z为楼板宽度方向,各路径距离柱翼缘表面分别为20、50、100、150、200 mm.弹性阶段混凝土楼板内压应力的分布情况见图5.



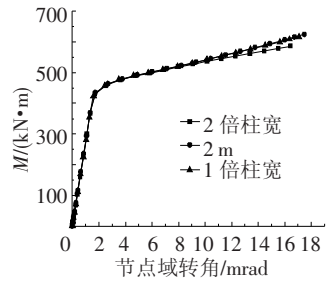
(a) 节点S₁ 楼板厚度100 mm



(b) 节点S₁ 楼板厚度130 mm



(c) 节点S₂ 楼板厚度120 mm



(d) 节点S₂ 楼板厚度150 mm

图3 楼板宽度对节点域性能影响

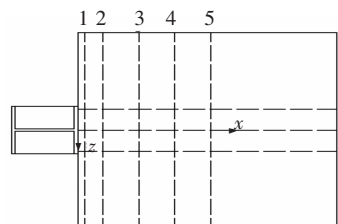


图4 路径示意

由图5可知,在节点附近混凝土楼板中的压应力主要分布在柱翼缘宽度范围内,距离柱翼缘越近,应力分布集中状况就越明显,而应力集中程度直接影响楼板的有效宽度.随着距离的增大,压应力分布范围有一定程度的扩大.楼板的有效宽度随组合梁进入塑性的程度而增加^[4],本文主要目的是研究楼板的有效宽度对节点域受力性能的影响,下面研究中,楼板的有效宽度取2倍柱翼缘宽度基本不影响研究结果.

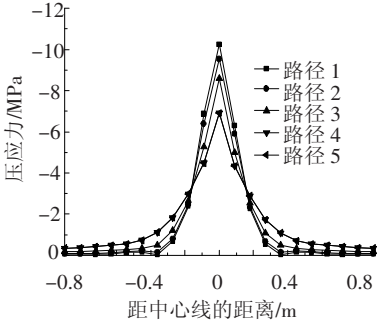


图5 混凝土楼板内压应力分布

2 节点域等效剪力计算

节点域等效剪力计算遵循下列假定^[5]:忽略不计钢梁与混凝土板之间滑移;应变分布满足平截面假定;混凝土楼板受拉时,忽略混凝土的抗拉强度,混凝土楼板受压时,忽略钢筋强度;不考虑压型钢板肋高范围内的混凝土.

节点域附近内力分布情况见图6,钢梁内不对称分布的正应力是钢梁内弯矩 M_s 与轴力 N_s 共同作用的结果^[6].同样,混凝土板内的正应力是混凝土板内弯矩 M_c 与轴力 N_c 共同作用的结果.

腹板面积占钢梁截面积很小一部分,可以假定轴力分别集中在钢梁上下翼缘中心处,钢框架节点域等效剪力 V_{eq} 可表示为^[5]

$$V_{eq} = \frac{M_s}{d_b - t_{bf}} + \frac{N_s}{2} - V_{col}, \quad (1)$$

$$V_{col} = \frac{M}{H_c}. \quad (2)$$

式中 H_c 为层高.

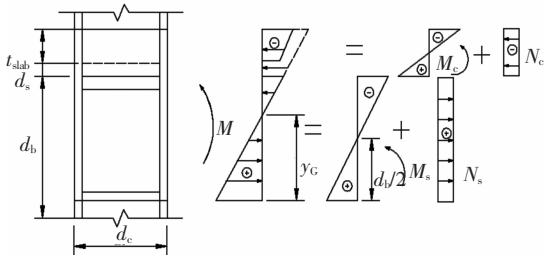


图6 节点域附近弯矩等效过程

由于混凝土板内的弯矩 M_c 很小,可忽略.节点弯矩 M 可表示为

$$M = M_s + N_s \left[\frac{d_b - t_{bf}}{2} + d_s + \frac{t_{slab}}{2} \right], \quad (3)$$

式中: t_{slab} 为混凝土板的计算厚度; d_s 为混凝土板底面至钢梁上翼缘的距离.

引入 N_s 与 M_s 的比值 R_{NM} ^[6-7],

$$R_{NM} = \frac{N_s}{M_s} = \frac{A_s}{I_s} \left[y_G - \frac{d_b}{2} \right], \quad (4)$$

式中: A_s 为钢梁截面面积截面惯性矩; I_s 为钢梁截面惯性矩.

由式(1)~(4),节点域等效剪力可表示为^[6]

$$V_{eq} = \frac{M}{d_b - t_{bf}} (R - \rho),$$

$$R = \frac{2 + R_{NM}(d_b - t_{bf})}{2 + R_{NM}(d_b + t_{slab} + 2d_s)},$$

$$\rho = \frac{d_b - t_{bf}}{H_c}.$$

由节点域等效剪力公式可以看出,相同的梁端弯矩作用下,节点域等效剪力随着楼板厚度增加而减小,也就是说,作用在考虑楼板影响的节点域上的剪力比不考虑楼板影响的情况小.

3 节点域刚度

3.1 弹性阶段

在等效剪力 V_{ep} 作用下节点域位移为^[8]

$$\Delta = \left(\frac{1}{k_M} + \frac{1}{k_V} \right) V_{eq},$$

式中: k_M 为弯曲刚度系数; k_V 为剪切刚度系数.

$$k_M = \frac{C_r EI_c}{[(d_b - t_{bf})/2]^3}, \quad k_V = \frac{Gd_c t_{cw}}{(d_b - t_{bf})/2},$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)}.$$

式中: E 为弹性模量; G 为剪切模量; μ 为泊松比; d_c 为柱高; I_c 为柱的截面惯性矩; C_r 是和约束情况有关的常数,对于H型柱取 $C_r = 5$.

节点域弯矩 M_{pa} 与转角 γ 的关系为^[8]

$$V_{eq} = \frac{k_M k_V}{k_M + k_V} \Delta = \frac{k_M k_V}{k_M + k_V} \frac{d_b - t_{bf}}{2} \gamma,$$

$$M_{pa} = \frac{k_M k_V}{k_M + k_V} \frac{(d_b - t_{bf})^2}{2(R - \rho)} \gamma,$$

则节点域的弹性刚度 K_e 为

$$K_e = \frac{k_M k_V}{k_M + k_V} \frac{(d_b - t_{bf})^2}{2(R - \rho)},$$

节点域的首次屈服弯矩 M^{pay} 为

$$M^{pay} = K_e C_y \gamma_y, \quad \gamma_y = \frac{\tau_y}{G}, \quad \tau_y = \frac{f_y}{\sqrt{3}} \sqrt{1 - (P/P_y)^2}.$$

式中: f_y 为屈服强度; τ_y 为剪切强度; γ_y 为屈服时剪应变; C_y 为平均应变与屈服时剪应变之比; P 、 P_y 为柱承受轴向压力和柱的轴向受压屈服承载力。

剪应力在节点域内分布不均匀, 节点域中心剪应力最大, 并向四周逐渐减小, 节点域的屈服先从中心开始, 然后向 4 个角发展, 平均应变与屈服时剪应变之比取 0.85 比较合适^[8]。

3.2 弹塑性阶段

因为节点域的屈服先从中心开始, 然后向 4 个角发展, 所以在节点域首次屈服至完全剪切屈服阶段, 柱翼缘和部分柱腹板还处在弹性阶段。这个阶段的节点域可以近似简化为两段独立的 T 型截面梁, 简化梁腹板高度取柱腹板高度的 0.15 倍。这个阶段节点域刚度 K_1 为^[8]

$$K_1 = \frac{P_M P_V}{P_M + P_V} \frac{(d_b - t_{bf})^2}{2(R - \rho)},$$

$$P_M = \frac{5EI_T}{[(d_b - t_{bf})/2]^3},$$

$$P_V = \frac{G[0.15(d_c - 2t_{cf}) + t_{cf}]t_{cw}}{(d_b - t_{bf})/2}.$$

式中 I_T 为简化梁的截面惯性矩。

对应节点域完全剪切屈服时节点域的屈服弯矩 M_{pay1} 为

$$M_{pay1} = \tau_y d_c t_{cw} \frac{d_b - t_{bf}}{R - \rho}.$$

3.3 柱翼缘塑性铰形成阶段

把节点域完全剪切屈服后的节点域简化成由柱翼缘和连续板组成的单层框架模型, 这时还没有形成机构, 抗剪承载力还可以进一步增加, 节点域的抗剪刚度主要取决于框架模型中梁柱的抗弯刚度, 一般模型中上部横梁的线刚度远大于柱翼缘绕自身弱轴的线刚度, 则节点域的刚度 K_2 为

$$K_2 = \frac{24EI_{cf}}{(d_b - t_{bf})(R - \rho)},$$

式中 I_{cf} 为柱翼缘绕自身弱轴的截面惯性矩。

当单层框架模型梁柱节点形成塑性铰, 模型形成机构, 此后, 节点域的转动刚度和承载力的增加取决于材料强化。此时, 节点域完全进入塑性的弯矩 M_p 为^[6]

$$M_p = M_{pay1} + (4\gamma_y - C_y \gamma_y - M_{pay1}/K_1)K_2.$$

3.4 强化阶段

在钢材应变强化阶段, 节点域的抗剪承载力仍可小幅度增加, 强化阶段节点域刚度为

$$K_3 = \frac{G_{st} d_{ct} t_{cw}}{R - \rho}.$$

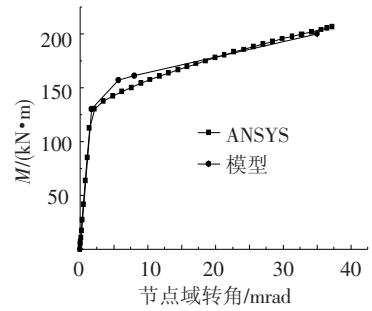
式中 G_{st} 为剪切强化模量。

4 验证数学模型

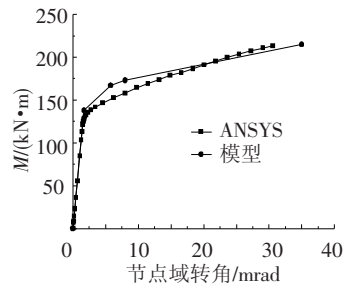
借鉴组合梁截面中和轴的计算方法, 根据混凝土与钢材的弹性模量比, 把混凝土楼板换算成钢截面, 采用换算截面法计算中和轴的位置^[9-10]。混凝土楼板受拉时, 忽略混凝土的抗拉强度, 只考虑钢筋的参与工作。

4.1 边柱节点

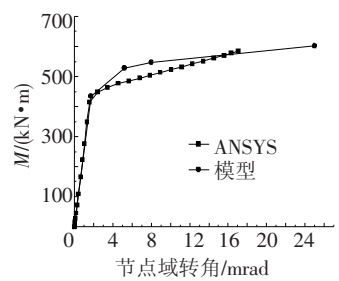
有限元分析与数学计算模型结果对比见图 7, 可以看出无论是在受力变形的弹性阶段还是在弹塑性阶段, 所建数学模型都很准确, 只是模型给出的弹塑性阶段计算结果误差相对较大。



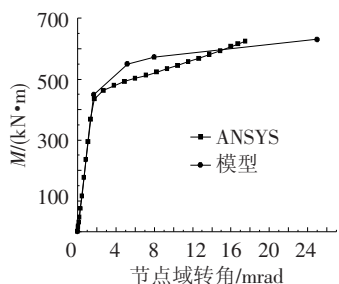
(a) 节点 S_1 楼板厚度 100 mm



(b) 节点 S_1 楼板厚度 130 mm



(c) 节点 S_2 楼板厚度 120 mm



(d) 节点 S_2 楼板厚度 150 mm

图 7 边柱节点模型与有限元结果对比

4.2 中柱节点

在水平荷载作用下,钢框架结构中柱节点两侧楼板一侧为受压,另一侧为受拉.混凝土抗拉强度很低,在负弯矩作用下混凝土很快受拉开裂退出工作,只有纵向钢筋起抗拉作用.在实际工程中楼板配筋率一般比较小,在负弯矩作用下钢梁截面的应力分布基本对称,可以忽略负弯矩作用下楼板中纵向钢筋对节点域的影响.中柱节点有限元模型见图8,有限元方法与数学模型结果的比较见图9.中柱节点数学模型结果与有限元结果非常接近,这说明所建数学模型能够很好地考虑中柱节点域中楼板拉压强度差别的影响.

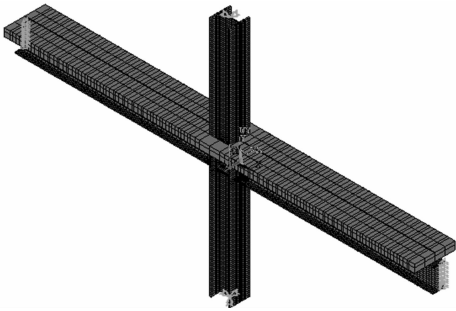
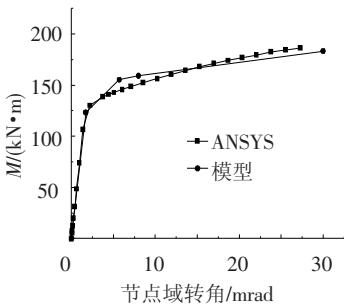
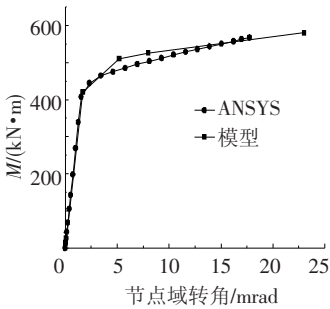


图8 中柱节点有限元模型



(a) 节点 S₁ 楼板厚度 100 mm



(b) 节点 S₂ 楼板厚度 120 mm

图9 中柱节点模型与有限元结果对比

随着楼板厚度增加而减小,作用在考虑楼板影响的节点域上的剪力比不考虑楼板影响的情况小.

2)无论是在节点域受力变形的弹性阶段还是在弹塑性阶段,所建数学模型都很准确.所建数学模型既能用来模拟边柱节点,也能用来分析中柱节点,能够很好地考虑中柱节点域中楼板拉压强度差别对节点域受力性能的影响.

参考文献:

[1] BEHROUZ A, AREZOO S, PEJMAN A. Seismic performance evaluation of steel moment resisting frames through incremental dynamic analysis [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2010, 66:178 - 190.

[2] CHARNEY F A, PATHAK R. Sources of elastic deformation in steel frame and framed-tube structures [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2008, 64: 87 - 100.

[3] 石永久, 苏迪, 王元清. 混凝土楼板对钢框架梁柱节点抗震性能影响的试验研究 [J]. 土木工程学报, 2006, 39(9): 26 - 31.

[4] 刘洪波, 邵永松, 谢礼立, 等. 钢框架结构楼板有效宽度及对节点性能影响 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(10):1532 - 1536.

[5] 石永久, 苏迪, 王元清, 等. 考虑组合效应的钢框架节点承载力计算方法 [J]. 建筑结构学报, 2005(增刊):165 - 167.

[6] CASTRO J M, ELGHAZOULI A Y, IZZUDDIN B A. modelling of the panel zone in steel and composite moment frames [J]. Engineering Structures, 2005, 25: 129 - 144.

[7] HEIDARPOUR A, BRADFORD M A. Elastic behaviour of panel zone in steel moment resisting frames at elevated temperatures [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65:129 - 144.

[8] KIM K D, ENGELHARDT M D. Monotonic and cyclic loading models for panel zones in steel moment frames [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2002, 58: 605 - 635.

[9] ZHAO H, KUNNATH S K, YUAN Y. Simplified non-linear response simulation of composite steel concrete beams and CFST columns [J]. Engineering Structures, 2010, 32:2825 - 2831.

[10] CHENG Chin-Tung, CHAN Chen-Fu, CHUNG Lap-Loi. Seismic behavior of steel beams and CFT column moment-resisting connections with floor slabs [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2007, 63:1479 - 1493.

5 结论

1)相同的梁端弯矩作用下,节点域等效剪力

(编辑 赵丽莹)