

文章编号:1673-2049(2007)03-0056-05

钢筋混凝土框架梁-剪力墙平面外 连接节点的力学分析

林宏伟, 石志飞

(北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘要:应用正交各向异性弹性薄板理论分析了钢筋混凝土剪力墙在框架梁传递来的平面外弯矩作用下的力学行为,得到了节点的转动刚度和墙体有效计算宽度的解析表达式;引入了“等效框架”分析模型,将节点区附近有效计算宽度范围内的墙体视为一等效框架柱进行分析即可反映节点的平面外转动刚度问题;并将理论解与 ANSYS 有限元解进行比较,结果符合较好;对实际工程情况进行了算例分析。计算结果表明:框架梁-剪力墙平面外连接节点的转动刚度较大,还不能达到可以忽略的程度。

关键词:钢筋混凝土;剪力墙;平面外连接节点;弹性板理论;有效计算宽度

中图分类号:TU375.1

文献标志码:A

Mechanical Analysis for Non-planar Reinforced Concrete Frame Beam and Shear-wall Joint

LIN Hong-wei, SHI Zhi-fei

(School of Civil Engineering and Architecture, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Based on the orthotropic elastic thin plate theory, the mechanical performance of shear wall subjected to non-planar bending moment acting from the beam was studied. The analytical solutions for rotational stiffness of the joint and effective width of the wall were obtained. An equivalent frame model was introduced. The out-of-plane rotational stiffness of the joint can be derived by assuming that an effective width of wall near the joint was acted as an equivalent column. The theoretical results were compared with the finite element results obtained by ANSYS and good agreements were found. Based on practical engineering situation, the results of calculation show that the rotational stiffness of the non-planar beam-wall joint is not small enough to be neglected.

Key words: reinforced concrete; shear-wall; non-planar beam-wall joint; elastic plate theory; effective calculation width

0 引言

在钢筋混凝土高层建筑结构中,框架-剪力墙和框架-核心筒体系是经常使用的一种结构形式^[1-6]。

在这种结构形式中,钢筋混凝土梁一端与框架柱相连接,而另一端与钢筋混凝土剪力墙(核心筒墙)相连接的情况屡见不鲜,而这种布置方式在与墙体连接一端常常形成框架梁-剪力墙平面外连接节点。

收稿日期:2007-05-13

基金项目:国家自然科学基金项目(50678018)

作者简介:林宏伟(1982-),男,福建福州人,工学硕士研究生,E-mail:bjdtm2001@163.com。

通常钢筋混凝土剪力墙主要用于承受水平剪力及墙平面内弯矩作用,当梁垂直作用于墙时,则使其受到平面外的弯矩作用,有别于普通墙的受力状态^[7]。对于这种连接形式的受力性能和设计方法,目前各国的研究很少^[8]。工程设计上通常忽略剪力墙的平面外刚度,将这种节点视为完全铰接进行设计。在实际工程中,铰接节点构造复杂,难以实现,并且这种设计方法低估了结构体系的整体刚度,还会因为忽略梁端弯矩而造成梁端过早开裂。

文献[9]中用 SAP90 程序对边连梁-核心筒墙的平面外连接节点进行了弹性有限元计算,并采用参数化线性回归方法得到了这一模型的节点扭转刚度公式,并给出了墙体的有效宽度计算公式。文献[8]中对此类连接节点进行了试验研究,研究了弱墙型梁-墙平面外连接节点的破坏过程和破坏形态、承载能力、变形能力等。《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2002)^[10]中规定了梁-墙平面外连接时为减少梁端弯矩对墙的不利影响应采取的构造措施,包括在连接处沿梁轴线方向设置剪力墙、设置扶壁柱、在墙内设置暗柱或型钢,但并没有给出有效受力宽度等的具体计算公式。

笔者研究的目的在于应用弹性力学弹性板理论对梁-墙平面外连接节点进行线弹性阶段的力学分析,进而给出节点的转动刚度和墙体有效计算宽度的解析表达式,为解决此类问题提供参考。

1 弹性板理论分析

1.1 力学分析模型

钢筋混凝土剪力墙与平面外一框架梁连接,梁轴线垂直于墙体平面,如图 1 所示。在整个剪力墙体上下层间反弯点处取出一片墙体,并将框架梁在其反弯点处截断,假定墙体平面外弯曲的反弯点在每层的中线部分。这样取出的梁墙力学分析模型中,墙体的高度等于层高,与墙平面外连接的框架梁类似于一个悬臂梁。需要指出的是,本文中在分析时不考虑楼板的作用。

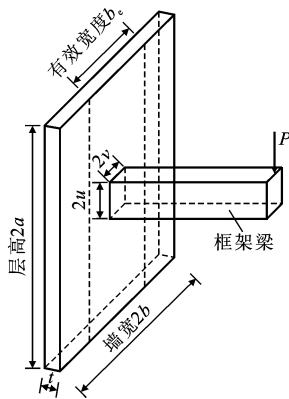


图 1 梁-墙平面外连接节点模型

Fig. 1 Model of Non-planar Beam-wall Joint

由于剪力墙的厚度较高度和宽度方向的尺寸小许多,可采用薄板理论进行分析(板厚与板面内最小特征尺寸之比为 $1/80 \sim 1/5$)。

根据上述模型,墙体的边界条件为四边简支(在反弯点处无弯矩),梁自由端受一垂直向下的集中力作用(梁的反弯点处仅有竖向剪力),如图 1 所示。

模型中主要参数如下:墙高(层高) $2a$,墙宽 $2b$,墙厚 t ;梁高 $2u$,梁宽 $2v$,梁长 L ;混凝土弹性模量 E_0 ,泊松比 ν_0 ;钢筋弹性模量 E_1 ,泊松比 ν_1 。

考虑剪力墙内钢筋的作用,则剪力墙在不同配筋方向将体现不同的力学性质。如果配筋方向是正交的,则剪力墙从宏观上将体现正交异性材料的力学性质。应用文献[11]中提供的基于纤维增强复合材料细观力学的钢筋混凝土等效模量公式,可将带钢筋的剪力墙简化为正交异性材料(共 9 个独立弹性常数,其与混凝土、钢筋的弹性模量、泊松比以及各方向的配筋率有关),进而应用正交异性板理论进行分析。

1.2 梁端弯矩的简化

根据图 1 的模型,框架梁在连接节点处将产生一平面外弯矩,并传递给剪力墙。在分析时,假定将此平面外弯矩 M 在节点范围内沿墙高方向等效为一线性分布荷载,如图 2 所示。

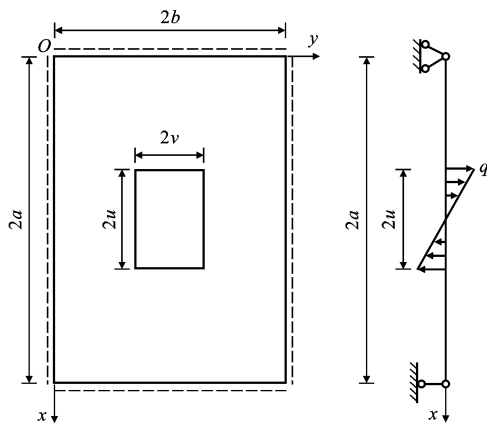


图 2 弹性板理论分析坐标系与平面外弯矩等效分布荷载

Fig. 2 Theoretical Analysis Coordinate System and Non-planar Bending Moment Equivalent Distributed Load
等效线性分布荷载的表达式为

$$q(x, y) = \begin{cases} \frac{q_0}{u}(x-a) & a-u \leq x \leq a+u, \\ & b-v \leq y \leq b+v \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $q_0 = \frac{3M}{4u^2v}$ 。

1.3 正交异性薄板理论解

正交异性薄板在横向荷载作用下的弹性曲面微分方程^[12]为

$$D_1 \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + D_2 \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} + 2D_3 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} = q \quad (2)$$

式中: D_1 、 D_2 为薄板弹性主方向的弯曲刚度, $D_1 = \frac{E_{11} t^3}{12(1-\nu_{12}\nu_{21})}$, $D_2 = \frac{E_{22} t^3}{12(1-\nu_{21}\nu_{12})}$; $D_3 = \nu_{12} D_1 + 2D_k = \nu_{21} D_2 + 2D_k$, D_k 为扭转刚度, $D_k = \frac{G_{12} t^3}{12}$; 正交异性材料的弹性常量 E_{11} 、 E_{22} 、 G_{12} 、 ν_{12} 、 ν_{21} 可根据文献^[11]中给出的钢筋混凝土材料等效模量公式计算。

微分方程式(2)可以用来在给定边界条件和横向荷载形式下求得薄板的挠度函数 $w(x, y)$, 从而求得弯矩、扭矩、弯应力和扭应力等。

根据弹性薄板弯曲问题的经典解法, 对于四边简支板其平面外挠度函数 $w(x, y)$ 可取为双重三角级数

$$w(x, y) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_{mn} \sin \frac{m\pi x}{2a} \sin \frac{n\pi y}{2b} \quad (3)$$

式(3)中的待定系数 A_{mn} 则通过外荷载 $q(x, y)$ 确定

$$A_{mn} = \int_0^{2a} \int_0^{2b} q(x, y) \sin \frac{m\pi x}{2a} \sin \frac{n\pi y}{2b} dx dy \cdot$$

$$\left\{ \pi^4 ab \left[D_1 \left(\frac{m}{2a} \right)^4 + 2D_3 \left(\frac{mn}{4ab} \right)^2 + D_2 \left(\frac{n}{2b} \right)^4 \right] \right\}^{-1} \quad (4)$$

将式(1)代入式(4)进行积分, 并将结果回代到式(3), 可得到墙体平面外挠度函数的解析表达式

$$w(x, y) = \frac{16Mat}{\pi^4 E_0 I_b} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_m C_n}{D_{mn}} \cdot \sin \frac{m\pi x}{2a} \sin \frac{n\pi y}{2b} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} C_m &= \frac{\cos \bar{\alpha}_m}{m\pi} \left(\frac{2}{m\pi} \sin \alpha_m - \frac{u}{a} \cos \alpha_m \right) \\ C_n &= \frac{1}{n\pi} \sin \bar{\beta}_n \sin \beta_n \\ D_{mn} &= \frac{1}{E_0 t^3} \left[D_1 \left(\frac{mt}{2a} \right)^4 + 2D_3 \left(\frac{mnt^2}{4ab} \right)^2 + D_2 \left(\frac{nt}{2b} \right)^4 \right] \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: I_b 为框架梁横截面惯性矩, $I_b = \frac{2v(2u)^3}{12}$; $\bar{\alpha}_m =$

$\frac{m\pi}{2}$; $\alpha_m = \frac{m\pi u}{2a}$; $\bar{\beta}_n = \frac{n\pi}{2}$; $\beta_n = \frac{n\pi v}{2b}$ 。为表达简便, 它们均已量纲为一化。

1.4 节点的转动刚度和有效计算宽度解析解

剪力墙节点中心的竖向转角为

$$\theta_w = \frac{\partial w}{\partial x}$$

将式(5)代入 θ_w 中求导, 并令 $x=a, y=b$, 可得

$$\theta_w = \frac{8Mt}{\pi^3 E_0 I_b} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_m C_n}{D_{mn}} m \cos \bar{\alpha}_m \sin \bar{\beta}_n \quad (7)$$

定义节点的平面外转动刚度为: 使墙体中心节点处产生单位竖向转角时所需要的平面外弯矩值, 从而其解析表达式为

$$K_\theta = \frac{M}{\theta_w} = \frac{\pi^3 E_0 I_b}{8t} \left(\sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_m C_n}{D_{mn}} \cdot m \cos \bar{\alpha}_m \sin \bar{\beta}_n \right)^{-1} \quad (8)$$

为了便于工程设计和分析, 常引入等效框架分析模型。将节点附近沿墙宽方向一定宽度的墙体视为等效框架柱, 并取框架柱的厚度与墙厚相等; 令此框架柱在节点处的转动刚度等于由式(8)确定的剪力墙平面外节点的转动刚度, 从而可以确定此框架柱的横截面宽度, 即有效计算宽度 b_e 。

经推导得到的有效计算宽度的解析表达式为

$$b_e = f_B \frac{\pi^3 a I_b}{4t^4} \left(\sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_m C_n}{D_{mn}} \cdot m \cos \bar{\alpha}_m \sin \bar{\beta}_n \right)^{-1} \quad (9)$$

式中: f_B 为考虑等效框架柱节点处局部刚度的转动柔度折减系数^[13], $f_B = 1 - \frac{9}{8} \frac{u}{a} + \frac{3}{10} \left(\frac{u}{a} \right)^2$ 。式(7)~(9)中各计算系数具体表达式见式(6)。

2 计算实例

2.1 实例分析

钢筋混凝土剪力墙: 层高 4 000 mm, 墙宽 4 000 mm, 墙厚 200 mm; 框架梁横截面宽 400 mm, 截面高 600 mm, 梁长 3 000 mm; 取剪力墙内水平和竖向分布钢筋的配筋率相等。

C30 混凝土^[14]: 弹性模量 $E_0 = 3.0 \times 10^4$ MPa, 泊松比 $\nu_0 = 0.2$ 。

HPB235 钢筋: 弹性模量 $E_1 = 2.1 \times 10^5$ MPa, 泊松比 $\nu_1 = 0.3$ 。

通过改变配筋率, 对节点的平面外转动刚度和墙体的有效计算宽度进行数值计算。

同时将理论解计算结果与通用有限元分析软件 ANSYS 的计算结果进行对比, 见表 1。在 ANSYS 中采用壳单元 Shell63 建立剪力墙模型; 网格尺寸为 50 mm × 50 mm; 材料弹性常量根据配筋率求得的等效弹性模量按正交异性材料输入; 边界条件为四边简支; 在节点区施加如图 2 所示的平面外弯矩等效线性分布荷载。

表 1 理论解与有限元解比较

Tab. 1 Comparison Between Theoretical Solutions and Finite Element Solutions

配筋率/%	节点转动刚度/(10 ⁸ kN·mm·rad ⁻¹)		有效计算宽度/m	
	理论解	有限元解	理论解	有限元解
0.00	1.357 6	1.363 0	1.896 1	1.903 6
0.25	1.369 7	1.375 1	1.913 0	1.920 6
0.50	1.381 9	1.387 3	1.930 0	1.937 6
0.75	1.394 1	1.399 6	1.947 1	1.954 8
1.00	1.406 4	1.412 0	1.964 3	1.972 0
1.25	1.418 8	1.424 4	1.981 5	1.989 3
1.50	1.431 2	1.436 8	1.998 9	2.006 7

由于通常情况下,工程上的剪力墙内的配筋率均小于 1%,从表 1 中可以看出,在线弹性阶段钢筋对剪力墙的受力影响较小,因而在工程精度范围内可以近似忽略钢筋的作用,直接取素混凝土的弹性参数进行计算。

通过对理论解式(8)、(9)进一步的计算分析发现:①墙厚对节点转动刚度的影响较大,墙体越厚节点的转动刚度明显增大,而有效计算宽度则不随墙厚变化,这主要是由于采用薄板理论导致的;②当墙宽比较大时(如大于1.5倍的层高),墙宽对节点转动刚度和有效宽度的影响将非常小,二者几乎不随墙宽变化;③层高等二者的影响较为明显,层高增大,节点转动刚度减小,而有效宽度则呈增长趋势;④梁截面尺寸越大,节点的转动刚度和有效宽度均增大,但梁高对二者的影响较梁宽更为显著。

2.2 有效计算宽度曲线

实际工程设计时,为了抵抗框架梁传来的平面外弯矩,在剪力墙内设置暗柱是一种有效的方法。暗柱的宽度设计值可取为有效计算宽度,并按框架柱构件进行设计。

当取剪力墙内各方向配筋率为 0 时,所有结论就退化为素混凝土剪力墙(各向同性)的情况。因线弹性阶段钢筋对剪力墙受力的增强作用较小,故以下按素混凝土的情况给出有效计算宽度的 1 组变化曲线。

由于梁宽 2*v* 的影响较小,本文中仅按方形截面梁 *u*=*v* 的情况,给出有效计算宽度 *b_e* 在不同的墙宽高比 *b/a* 情况下随梁高 *u*、层高 *a* 的变化曲线,如图 3 所示。

3 结 语

本文中应用正交异性弹性薄板理论得到了基于所建立模型的梁-墙平面外连接节点的转动刚度和

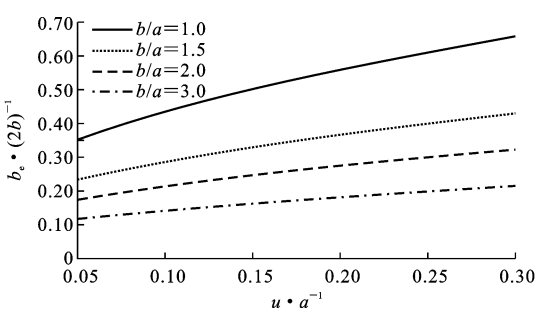


图 3 有效计算宽度曲线

Fig. 3 Effective Computation Width Curve

有效计算宽度的解析表达式,并根据工程常用情况做了初步的比较分析。基于理论解的计算结果表明:框架梁-剪力墙平面外连接节点的转动刚度尚大,不能达到可以忽略的程度;而在节点区附近沿墙宽方向的有效计算宽度范围内,将墙体视为一框架柱进行设计可以近似反映平面外节点的转动刚度问题。工程设计中,在节点附近的剪力墙内设置暗柱时,暗柱的宽度值可以取为有效计算宽度值。本文中还给出了 1 组常用的有效计算宽度的变化曲线。

参考文献:

References:

[1] 沈蒲生,孟焕陵. 框筒结构梁柱截面基于剪力滞最小的合理高度[J]. 建筑科学与工程学报,2005,22(1): 16-19.
SHEN Pu-sheng, MENG Huan-ling. Reasonable Section Height of Beam and Column Based on the Minimum Shear Lag in Framed Tube Structures[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22 (1):16-19.

[2] 张建仁,王磊. 既有钢筋混凝土桥梁构件承载力估算方法[J]. 中国公路学报,2006,19(2):49-55.
ZHANG Jian-ren, WANG Lei. Estimated Approach to Carrying Capacity of Existing Reinforced Concrete Bridge Member[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(2): 49-55.

[3] 王锁军,王元清,吴杰,等. 组合梁刚度对组合框架的抗震性能影响分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2006,23(1):39-44.
WANG Suo-jun, WANG Yuan-qing, WU Jie, et al. Analysis of Composite Beam Rigidity Influencing Seismic Properties of Composite Frame[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(1): 39-44.

[4] 刘哲锋,沈蒲生,龚胡广. 基于拟力法的框架结构静力弹塑性分析[J]. 建筑科学与工程学报,2006,23(3): 32-36.
LIU Zhe-feng, SHEN Pu-sheng, GONG Hu-guang.

- Static Elastic-plastic Analysis of Frame Structure Based on Force Analogy Method[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(3): 32-36.
- [5] 沈蒲生, 刘 杨. 水平地震作用下框支剪力墙结构的变形研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(1): 58-63.
- SHEN Pu-sheng, LIU Yang. Distortion Research of Shear Wall Structure Supported on Frame Under Earthquake Actions[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(1): 58-63.
- [6] 刘伯权, 潘 元. 框架-抗震墙结构抗震墙抗弯刚度的优化研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(1): 55-57.
- LIU Bo-quan, PAN Yuan. Study on Optimum Bending Rigidity of Seismic Wall in Frame-shear Wall Structure[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(1): 55-57.
- [7] 郑 琪. 钢筋混凝土梁墙节点抗震性能的初步研究[J]. 北京建筑工程学院学报, 2001, 17(增): 48-51.
- ZHENG Qi. Primary Researches of the Joint of Reinforced Concrete Wall and Beam[J]. Journal of Beijing Institute of Civil Engineering and Architecture, 2001, 17(S): 48-51.
- [8] 杨 华, 钱稼茹, 赵作周. 钢筋混凝土梁-墙平面外连接节点试验[J]. 建筑结构学报, 2005, 26(4): 19-26.
- YANG Hua, QIAN Jia-ru, ZHAO Zuo-zhou. Experimental Study of Reinforced Concrete Non-planar Beam-wall Connections[J]. Journal of Building Structures, 2005, 26(4): 19-26.
- [9] KWAN A K H, CHAN W T. Non-planar Beam Wall Joints in Tall Building Structures[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineering, Structures and Buildings, 2000, 140(2): 73-83.
- [10] JGJ 3—2002, 高层建筑混凝土结构技术规程[S]. JGJ 3—2002, Technical Specification for Concrete Structures of Tall Building[S].
- [11] 孔丹丹, 赵颖华, 王 萍, 等. 钢筋混凝土材料有限元分析中的等效模量方法[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2005, 21(3): 200-203.
- KONG Dan-dan, ZHAO Ying-hua, WANG Ping, et al. Equivalent Moduli Method in the Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2005, 21(3): 200-203.
- [12] 徐芝纶. 弹性力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990.
- XU Zhi-lun. Mechanics of Elasticity [M]. Beijing: Higher Education Press, 1990.
- [13] DAVID A P. Slab Effective Width for Equivalent Frame Analysis[J]. ACI Journal Proceedings, 1975, 72(3): 135-137.
- [14] GB 50010—2002, 混凝土结构设计规范[S]. GB 50010—2002, Code for Design of Concrete Structures[S].

《工业建筑》2008 年征订通知

《工业建筑》由中国钢铁工业协会主管, 中冶集团建筑研究院主办; 为高学术水平高知名度的双高期刊、“首届国家期刊奖”获奖期刊、中国建筑科学类核心期刊、国际建筑数据库 (ICONDA) 收录期刊。多年来, 《工业建筑》一直本着指导性、针对性、实用性、创新性的办刊宗旨, 重点报道建筑设计、建筑结构、地基和基础、建筑材料、施工技术等方面的应用研究成果及开发技术, 突出工业建筑、钢结构、鉴定加固技术等特点, 优先报道国家、省部级科学基金资助项目和重大工程建设项目; 内容丰富翔实, 理论结合实际; 适于土木工程界广大科研、设计、施工等专业技术人员及大专院校师生阅读。

《工业建筑》创刊于 1964 年, 月刊, 大 16 开本, 彩色胶版印刷, 每月 20 日出版, 国内外公开发行人; 每期定价 6.00 元, 全年定价 72.00 元; 兼营广告, 收费合理, 具有一定规模, 是展示企业形象的理想舞台。全国各地邮局均可订阅, 邮发代号为 2-825, 也可直接汇款到编辑部订阅。

地 址: 北京市海淀区西土城路 33 号

邮 编: 100088

电 话: (010) 82227239 82227236

E-mail: gyjz@public.sti.ac.cn