

组合墙结构非线性分析模型*

高向宇

方鄂华

(华南建设学院西院, 广州 510405) (清华大学土木系, 北京 100084)

提 要 本文提出一种框墙模型, 用以对开洞组合墙进行非线性分析。使用已有试验结果和非线性有限元分析对其进行了验证。将这种单元装入结构静力分析程序, 对本文作者所完成的大开间灵活分隔住宅结构模型进行了非线性分析, 与试验吻合较好, 证明这一模型是可行的。该项研究为组合墙的设计与分析提供了可供使用的力学模型, 同时也为今后的研究提供了依据。

关键词 非线性分析, 组合墙, 有限元, 框墙单元

一、前 言

组合墙是指用钢筋混凝土梁、柱作为约束梁、柱的砌体墙。因其造价低、抗震性能好, 在多层砌体结构中应用广泛。与框架填充墙不同, 组合结构中的混凝土梁柱在砌体砌筑以后浇筑, 与砌体紧密结合, 共同工作。迄今为止, 已有很多研究者进行了研究, 提出了设计方法。但由于其受力复杂, 工作机理难于确定, 一直没有比较精确的计算方法, 特别是缺少弹塑性分析方法。除了已见到一些用非线性平面有限元方法分析单片墙外, 尚未见到对开洞组合墙整体分析的非线性力学模型。本文提出的框墙模型^[1], 是将开洞组合墙看成组合梁与组合柱组成的框架, 又将组合柱分为约束柱和墙肢, 组合梁分为约束梁和墙梁, 考虑两种材料的不同特性和共同工作, 采用不同的强度条件和非线性本构关系。该模型可方便地考虑不同开洞尺寸、不同的梁柱刚度比。将这种单元装入“框—剪结构弹塑性静力分析程序(USAMS-

* 本文收稿日期: 1996年3月

MA), 可以进行组合墙的非线性分析。本文用该程序计算了单片开洞组合墙, 其结果和非线性平面有限元分析结果以及相应的试验结果吻合较好。最后用该程序计算了作者完成的大开间灵活住宅结构试验模型^[2], 计算结果与试验吻合较好。

二、框 墙 模 型

根据组合墙结构的试验及结果分析提出的框墙模型(如图 1 所示), 有如下一些基本假定: 1) 将墙片看成平面结构; 2) 组合梁和组合柱分别用各自的两根“等价杆”代替, 一根为混凝土等价杆, 另一根为砌体等价杆; 3) 两个等价杆具有相等的刚域, 在节点处刚结; 4) 两个等价杆之间的相互作用由等价条件确定。

等价条件为: 1) 线性阶段: 两个等价杆与原组合杆刚度相等, 据此求出等价系数。2) 非线性阶段: 每种等价杆使用各自的强度条件, 任意一个等价杆进入新的受力状态以后(如初裂, 裂通, 屈服等), 修改其本身刚度, 并修改相应的等价系数。

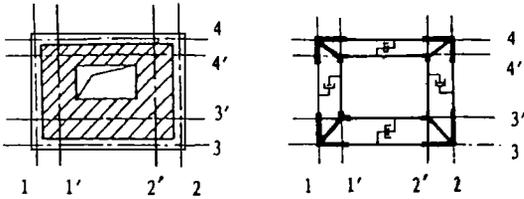


图 1 框墙单元组合墙模型

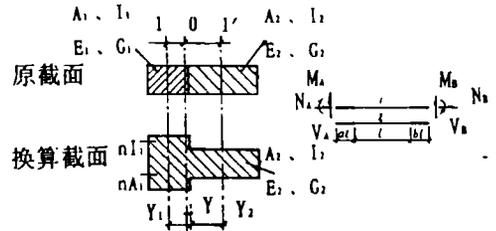


图 2 组合截面及单元坐标系

三、框墙模型杆件单刚阵及等价系数

由两种材料组成的组合杆件, 在保证其整体工作性能时, 可用弹性等效原则化为单一材料, 考虑弯曲、剪切及轴向变形, 对等价杆 1 截面形心轴建立坐标系, 可以方便地算出组合杆的单刚阵^[1], 以 K 表示, 杆件截面及坐标系见图 2。

将组合截面分成两个等价杆后, 组合单刚 K 与等价杆单刚 $K_{1\alpha}$ 、 $K_{2\alpha}$ 有如下关系:

$$K = K_{1\alpha} + K_{2\alpha} \quad (1)$$

式中 $K_{1\alpha}$ 与 $K_{2\alpha}$ 为考虑了等价系数后的等价杆单刚阵, 表达如下:

$$\begin{array}{cccccc}
 E_1 A_1 / l & 0 & 0 & - E_1 A_1 / l & 0 & 0 \\
 12\alpha_1 E_1 I_1 & - 6\alpha_1 E_1 I_1 & & 0 & - 12\alpha_1 E_1 I_1 & - 6\alpha_1 E_1 I_1 \\
 (1 + 2r_1) l^3 & (1 + 2r_1) l^2 & & & (1 + 2r_1) l^3 & (1 + 2r_1) l^2 \\
 & 2\alpha_1 (2 + r_1) E_1 I_1 & & 0 & 6\alpha_1 E_1 I_1 & 2\alpha_1 (1 - r_1) E_1 I_1 \\
 & (1 + 2r_1) l & & & (1 + 2r_1) l^2 & (1 + 2r_1) l \\
 K_{1\alpha} = & & & E_1 A_1 / l & 0 & 0 \\
 & & & & 12\alpha_1 E_1 I_1 & 6\alpha_1 E_1 I_1 \\
 & & & & (1 + 2r_1) l^3 & (1 + 2r_1) l^2 \\
 & & & & & 2\alpha_1 (2 + r_1) E_1 I_1 \\
 & & & & & (1 + 2r_1) l
 \end{array} \quad (2)$$

$$\begin{array}{cccccc}
 E_2 A_2 & 0 & - E_2 A_2 e & - E_2 A_2 & 0 & E_2 A_2 e \\
 l & & l & l & & l \\
 12\alpha_4 E_2 I_2 & - 6\alpha_4 E_2 I_2 & & 0 & - 12\alpha_4 E_2 I_2 & - 6\alpha_4 E_2 I_2 \\
 (1 + 2\gamma_2) l^3 & (1 + 2R_2) l^2 & & & (1 + 2R_2) l^3 & (1 + 2R_2) l^2 \\
 2\alpha_4^5 (2 + \gamma_2) E_2 I_2 & E_2 A_2 e^2 & E_2 A_2 e & 6\alpha_4 E_2 I_2 & 2\alpha_4 (1 - r_2) E_2 I_2 & E_2 A_2 e^2 \\
 (1 + 2\gamma_2) l & + l & l & (1 + 2\gamma_2) l^2 & (1 + 2\gamma_2) l & - l \\
 K_{2\alpha} = & & E_2 A_2 & & 0 & - E_2 A_2 e \\
 & & l & & & l \\
 & & & & 12\alpha_4 E_2 I_2 & 6\alpha_4 E_2 I_2 \\
 & & & & (1 + 2\gamma_2) l^3 & (1 + 2\gamma_2) l^2 \\
 & & & & & 2\alpha_4 (2 + \gamma_2) E_2 I_2 \\
 & & & & & (1 + 2\gamma_2) l + E_2 A_2 e^2 \\
 & & & & & l
 \end{array} \quad (3)$$

上两式中 γ_1 、 γ_2 为约束梁(柱)和墙梁(肢)的剪力影响系数 $\gamma_1 = 6\mu_1 E_1 I_1 / G_1 A_1 l^2$, $\gamma_2 = 6\mu_2 E_2 I_2 / G_2 A_2 l^2$; e 为两个等价杆形心距离 $e = y_1 + y_2$; $\alpha \sim \alpha_6$ 是由等价条件得到的等价系数:

$$\begin{array}{ll}
 \alpha = \frac{1}{\theta_1} + \frac{A_1}{\theta_1 I_1} (Y_1 - Y)^2 & \alpha_4 = \frac{1}{\theta_4} + \frac{A_2}{\theta_4 I_2} (Y_2 + Y)^2 \\
 \alpha_5 = \beta \left[\frac{1}{\theta_2} + \frac{A_1}{\theta_2 I_1} (Y_1 - Y)^2 \right] + \frac{A_1}{4\theta_2 I_1} (Y_1 - Y)^2 & \alpha_6 = \beta \left[\frac{1}{\theta_5} + \frac{A_2}{\theta_5 I_2} (Y_2 + Y)^2 \right] \\
 & - \frac{A_2}{4\theta_5 I_2} e^2 \left(1 - \frac{A_2^2}{A_0^2} \right) \\
 \alpha_3 = \beta \left[\frac{1}{\theta_3} + \frac{A_1}{\theta_3 I_1} (Y_1 - Y)^2 \right] - \frac{A_1}{2\theta_3 I_1} (Y_1 - Y)^2 & \alpha_6 = \beta \left[\frac{1}{\theta_6} + \frac{A_2}{\theta_6 I_2} (Y_2 + Y)^2 \right] \\
 & + \frac{A_2}{2\theta_6 I_2} e^2 \left(1 - \frac{A_2^2}{A_0^2} \right)
 \end{array} \quad (4)$$

式中

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \frac{1 + 36I_0/(A_0 * L^2)}{1 + 36I_1/(A_1 * L^2)}, \theta_2 = \frac{1 + 9I_1/(A_1 * l^2)}{1 + 36I_1/(A_1 * l^2)}, \theta_3 = \frac{1 - 18I_1/(A_1 * l^2)}{1 + 36I_1/(A_1 * l^2)}, \theta_4 = \frac{1 + 36I_0/(A_0 * l^2)}{1 + 36I_2/(A_2 * l^2)} \\ \theta_5 &= \frac{1 - 9I_2/(A_2 * l^2)}{1 + 36I_2/(A_2 * l^2)}, \theta_6 = \frac{1 - 18I_2/(A_2 * l^2)}{1 + 36I_2/(A_2 * l^2)}, \beta = \frac{1 + 9I_0/(A_0 * l^2)}{1 + 36I_0/(A_0 * l^2)}, \beta = \frac{1 - 18I_0/(A_0 * l^2)}{1 + 36I_0/(A_0 * l^2)} \end{aligned} \quad (5)$$

$$A_0 = nA_1 + A_2, \quad Y = (nA_1Y_1 - A_2Y_2)/A_0$$

$$I_0 = nI_1 + nA_1(Y_1 - Y)^2 + I_2 + A_2(Y_2 + Y)^2 \quad (6)$$

由于单元内力必须平衡, 式(4)中各系数应满足下列关系, 由此可以检查等价系数计算的正确性。

$$\begin{aligned} \alpha &[(2 + \gamma_1)\alpha_2 + (1 - \gamma_1)\alpha_3]/3 \\ \alpha &= [(2 + \gamma_2)\alpha_5 + (1 - \gamma_2)\alpha_6]/3 \end{aligned} \quad (7)$$

由于式(4)中各等价系数只与七个几何参数 $A_1, A_2, I_1, I_2, Y_1, Y_2, Y$ 以及一个物理参数 $n = E_1/E_2$ 有关, 当等价杆进入非线性阶段后, 只需改变杆的刚度及其刚度比, 即可修正等价系数, 修改单刚阵。为此, 需要分别给出两个等价杆的刚度变化规律。

四、杆件力- 变形关系

对于墙梁及墙肢, 本文采用三线性力- 变形关系。第一折点取砌体初裂强度, 以主拉应力理论确定砌体开裂抗剪强度^[3], 由灰缝抗拉强度及正应力确定。第二折点考虑砌体形成贯通主裂缝, 按剪摩理论确定砌体抗剪强度, 由灰缝抗剪强度、正应力及摩擦系数确定。根据试验结果分析, 建议第一段刚度取墙体弹性刚度 K_0 , 第二段刚度取 $0.6K_0$, 第三段刚度取 $0.05K_0$ 。钢筋混凝土约束梁及柱的力- 变形关系采用双线性模型, 折点对应杆件端部截面屈服点, 屈服值按截面实际配筋及实际强度计算。

按逐步加荷法计算内力及变形。在弹性阶段直接用平截面假定的有关公式计算砌体杆件应力。进入非线性阶段后, 由内力增量与原有内力叠加后得到杆件内力。由砌体杆件心处的应力验算其抗剪强度。

五、框墙模型的验证

为了验证上述框墙模型的可行性和有效性, 用作者编写的框墙模型单元装入弹塑性静力分析程序 USAMS, 称为 USA MS- MA, 用该程序计算了两片试验开洞组合墙^[4], 见图3。另外, 还采用一个非线性平面有限元分析程序对这两片墙进行了计算。后者使用涂抹型开裂模型(Smeared Model)、脆性材料多轴强度和本构关系、八节点等参元描述砌体材料的工作过程。混凝土材料的强度条件采用 Kupfer 和 Gerstle 双轴公式及 Darwin 和 Pecknold 的等效单向本构关系。钢筋采用拉压杆单元, 本构关系为理想双线性模型。图4给出了试验实测 $V-\Delta$ 曲线与计算结果的比较。图5描绘了在单向加载下用平面有限元分析的裂缝分布及开

裂顺序,与图3所给实验模型的裂缝分布范围基本吻合。由上述比较表明,框墙模型的分析结果与试验结果及非线性有限元分析结果均吻合较好。

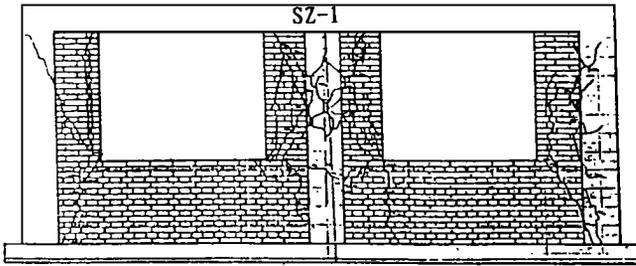


图3 开洞组合墙

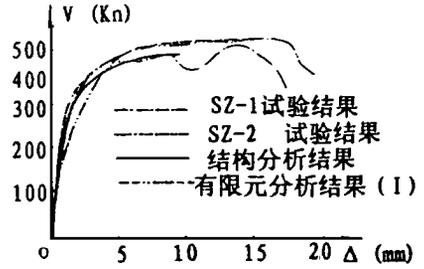
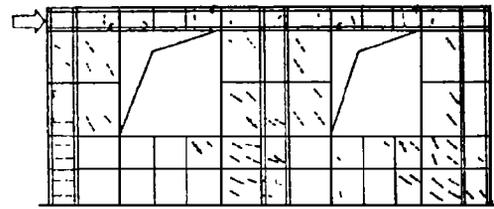


图4 水平荷载-顶点位移关系

六、用框墙单元分析结构

用 USAMS-MA 程序对一个试验结构模型进行了分析。该试验模型为六层大开间少内纵墙结构,外墙为组合墙,开窗洞,内墙为钢筋混凝土横墙及楼梯筒,为研究这种结构纵向的抗震性能,本文作者对该模型进行纵向水平反复加载试验^[2]。

计算时,将其简化为平面结构,纵向为两片开洞组合墙及三个钢筋混凝土筒。开洞组合墙均采用框墙模型,混凝土筒按工形截面的压弯构件计算,图6为该结构的计算简图。比较了两种计算方案,方案 I 不考虑楼板与横墙参与抗侧力,竖向荷载也只取外墙及楼梯筒所承受的那部分;方案 II 将楼板看成横梁,将横墙作为柱,形成另一片平面框架参与抗侧力,这时竖向荷载取全部。竖向荷载均一次加上,而水平荷载采用逐级增加方法逐步计算。



开裂荷载: $\rightarrow 150-225-300-375-425-500\text{kN}$
屈服荷载: 1: 500 2: 500 3: 500 4: 500 5: 525kN

图5 计算开裂过程

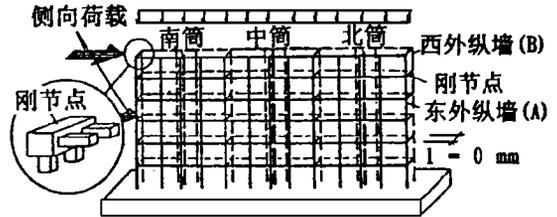


图6 结构计算简图

图7为计算与实测的底部剪力-顶点侧移曲线的比较。可以看出,在70%破坏荷载之前,计算值与试验值吻合;而在此之后,方案 II 的计算结果与试验结果吻合较好,但最终位移较小,方案 I 则位移较大。

图8为计算得到的三个筒体在屈服前的剪力、弯矩、轴力分布图。由图可见三个筒体以独立弯曲为主,整体工作作用很小,三层以上筒体内力不大,这些现象与试验实测吻合。

为进一步比较,图9给出了中筒底截面弯矩的计算与试验值,试验值系根据筒内纵筋实测应变求出^[1]。由图可见,内筒初裂以后试验值低于计算值,当底部剪力达到 $0.7V_u$ 以后二者又趋于接近,此时筒体首层钢筋已出现多处屈服。

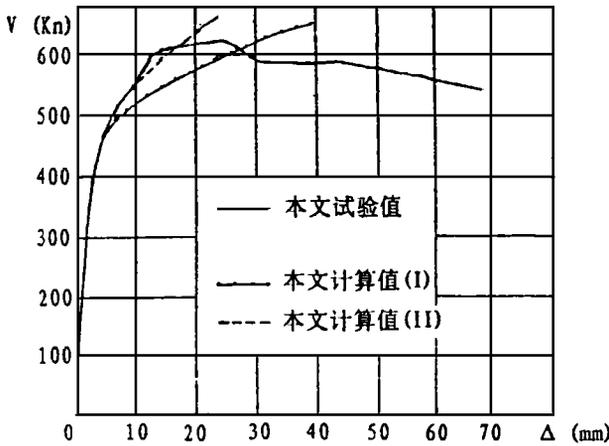


图7 底部剪力-顶点位移关系

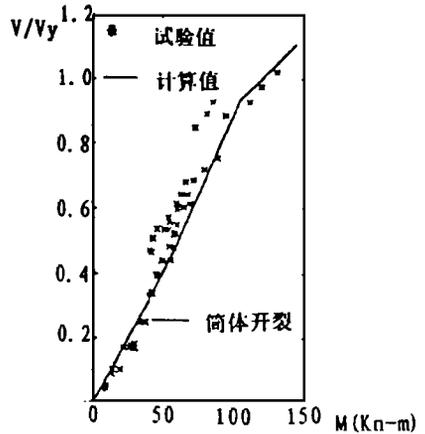


图9 中筒根部弯矩的变化过程

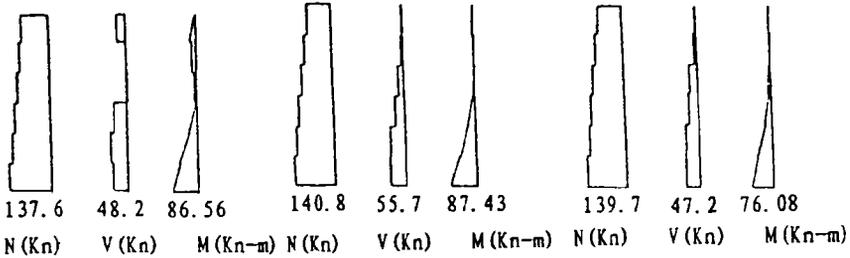


图8 三筒体轴力、剪力、弯矩分布图

由计算得到,外纵墙的初裂与约束梁屈服均从三、四层开始($V = 50kN$),然后向下层和上层发展,约束梁屈服在筒体屈服之前,约束柱屈服在筒体屈服之后,角柱屈服比内柱略早,与内横墙相连的约束柱屈服略早,上述结果均与试验现象吻合。在各受力阶段均可得到内力分布和在外纵墙与内纵墙之间的剪力分配,而试验无法直接测出剪力分配值。以上两种计算方案相比,方案 考虑了内横墙参与工作,承担了部分弯矩,使筒体和外纵墙约束柱的屈服推晚,与试验结果更为接近。因此可以认为,适当地考虑空间作用(即横墙作用)可以获得更为合理的结果。

在分析结果中,有两点与试验结果有一定出入。其一是混凝土杆件的屈服多数比实测结果早,其二是东外纵墙开裂和破坏均比西外纵墙早,而试验则相反。作者分析产生前者现象的主要原因是混凝土杆件使用了双线性模型,初始刚度偏高。产生后者现象的主要原因是模型中混凝土筒体(楼梯间)紧靠着西外纵墙,加大了西外纵墙刚度,而计算中未考虑这一因素;此外实测得到东外纵墙轴向压应变较大,提高了它实际的抗剪强度,而计算中轴力按平均分配,使东外纵墙抗剪强度偏低。

七、结 论

本文提出了一个用于分析组合墙非线性工作过程的框墙单元模型。通过已有的单片墙试验结果和平面有限元非线性分析结果比较,对该模型进行了验证。对大开间灵活分隔多层住宅试验模型进行结构分析,与试验现象也能基本吻合。因此,本文建议的框墙模型是有效的和可行的。本模型使用方便,结果也能满足工程要求。如果能进一步改善杆件的力-变形关系,并考虑结构的空作用 and 扭转效应,将获得更好的结果。

参 考 文 献

- 1 高向宇. 多层大开间灵活分隔住宅结构模型试验研究及组合墙结构非线性分析. (博士学位论文) 清华大学, 1993
- 2 赵作周, 高向宇, 方鄂华. 多层大开间少内纵墙住宅结构模型试验研究. 建筑结构学报, 1994; (6)
- 3 朱伯龙. 砌体结构设计原理. 同济大学出版社, 1991; (2)
- 4 沈阳市组合墙结构研究组. 辽宁省设计院, 大连理工大学. 足尺和 1/4 模型外纵墙片试验. 选自《钢筋混凝土-砖组合结构的研究》资料集, 1990; (6)

NONLINEAR ANALYSIS FOR COMPOSITE MASONRY WALLS

Gao Xiangyu

Fang Ehua

(South China Construction University, Guangzhou 510405) (Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract Composite masonry walls, which consist of masonry walls, tie-columns and tie-beams, possess many advantages and are widely used in China. However, it is difficult to have the structure analyzed, because of its complex working mechanics.

In this paper, a new nonlinear analytical model called frame-wall model is put forward. It was verified by nonlinear finite element analytical results and test results of two tested composite masonry walls. This model was also used to analyze a tested six-story residential structure model and fine result was obtained. Conclusion is that the new model is feasible and effective.

Key words nonlinear analysis, composite masonry wall, finite element, frame-wall model