

# 密肋复合墙板简化弹塑性计算模型的研究

李 轩 姚谦峰 黄 炜

(西安建筑科技大学土木工程学院 710055 西安)

**摘 要:**本文在密肋复合墙板大量试验研究的基础上,得到了密肋复合墙板中填充砌块等效斜压杆的应力—应变曲线,并建立了等效为全长均匀轴向分布的斜压杆轴向塑性铰,由此建立了密肋复合墙板的弹塑性计算模型。应用该模型对密肋复合墙板进行 PUSHOVER 分析,得到了与试验较为接近的结果,验证了该模型的可行性。本文分析计算方法可为密肋壁板结构整体模型的进一步研究提供参考和依据。

**关键词:**密肋复合墙体;等效斜压杆;PUSHOVER 分析

## 1 研究目的

密肋壁板结构节能住宅体系是为适应国家建筑节能及墙体改革和住宅产业化的需要而开发的一种全新的节能建筑结构体系。由于其具有良好的社会效益及经济效果,近年来国家高度重视,并在陕西、河北等省均已进行了工程示范应用,得到了社会的一致好评。

但作为一种新型结构,如何简单、准确地进行结构设计和对建筑的抗震性能评估是推广与应用中的瓶颈。本文拟对密肋壁板结构的主要受力构件—密肋复合墙板(密肋复合墙板是由截面及配筋较小的钢筋混凝土肋梁、肋柱构成框格(即肋格),内嵌加气混凝土砌块(或其他具有一定强度的轻质骨料砌块)预制而成的板式构件。(见图 1)进行 PUSHOVER 分析,为以后进行整体结构分析提供方法、思路。

## 2 密肋复合墙板特点

前期的试验研究<sup>[2]</sup>表明,密肋复合墙板在水平荷载达到极限荷载的 40% 前,其受力性能表现为弹性,肋梁、肋柱中没有出现裂缝,砌块中出现沿对角线方

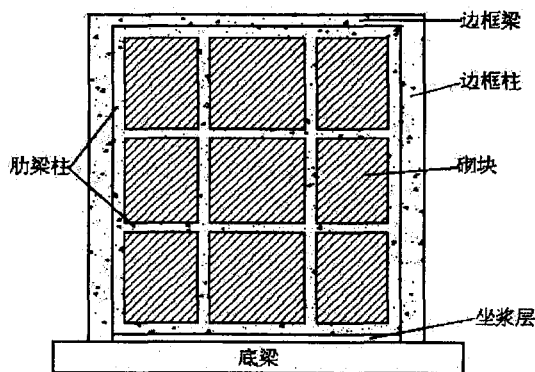


图 1 密肋复合墙板示意图

向的弥散微裂缝。见图 2。随着水平荷载的增加,肋格上出现裂缝,砌块对角线两侧出现较明显的斜裂缝,形成了对角线的斜压杆。当水平荷载加到极限荷载的 85% 左右时,中层砌块的受压角区出现压碎现象,肋梁中的钢筋应变迅速增大并开始屈服,墙体承载力虽仍在上升,但其刚度下降很快,塑性变形显著。当水平荷载达到极限荷载时,中层砌块剥落严重,退化成为纯框架结构,并在肋梁上出现塑性铰区。由此可见密肋复合墙板结构具有明显的“三阶段”破坏特性。

## 3 PUSHOVER 分析方法

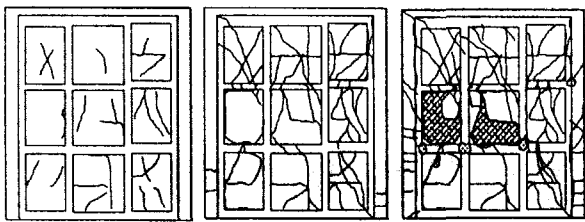


图2 密肋复合墙板破坏模式图

PUSHOVER 分析方法本质上是一种考虑材料非线性来对建筑物的抗震性能进行评估的静力弹塑性分析方法。它将静力荷载逐步加载至结构的最高性能点来生成横向荷载与变形的关系,并将之与按反应谱形式所表现的对于水平地震作用性能要求相比较,以评估该建筑物是否能够发挥所设定的目标性能。

PUSHOVER 的集中塑性铰杆系模型建立在经典的弹塑性力学屈服面模型基础上,具有计算简单的优点。该模型可以考虑开裂、屈服、硬化、刚度退化等钢筋混凝土特性,并且与损伤指数挂钩。

对于杆系模型,PUSHOVER 分析可大致预测结构在横向力作用下的行为,得到结构构件弹性—开裂—屈服—弹塑性—承载力下降的全过程,杆端出现塑性铰的先后顺序以及塑性铰的分布和结构的薄弱环节等。

#### 4 模型的建立

本文中采用将密肋复合墙板中砌块等效为斜压杆的方法进行 PUSHOVER 分析。

##### 4.1 砌块的等效斜压杆计算

借鉴参考文献对框架填充墙的研究<sup>[3]</sup>,可以得到斜压杆的等效宽度为:

$$w = \frac{\sigma_b t (1 - \alpha_c) \alpha_c \frac{h}{f_c} + \tau_b t \alpha_b \frac{l}{f_c}}{t \cos \theta} \quad (1)$$

其中  $\sigma_b, \sigma_c, \tau_b, \tau_c$  分别为梁、柱与砌块接触面上的正应力与剪应力。 $\alpha_b, \alpha_c$  等效肋梁、肋柱与砌块接触面正应力为均布的接触长度系数。 $h, l$  为砌块的高、宽、厚度。 $f_c$  为砌块抗压强度。 $t$  为墙厚。 $\theta = \arctan(h/l)$ 。

## 4.2 塑性铰设置

### 4.2.1 肋梁、肋柱塑性铰的设置

SAP2000 中,对混凝土梁、柱构建的默认塑性铰定义基于 ATC-40。分析中考虑密肋复合墙板“三阶段破坏”的特性,所以对一般肋梁、肋柱设为弯矩铰 (Default -  $M^3$ )。

对于墙体顶部及底部的肋梁、肋柱,由于其与暗梁浇筑在一起,整体性较好,所以将其设置为刚度较大的杆件,并两端不设置塑性铰。

### 4.2.2 等效斜压杆塑性铰的设置

#### 4.2.2.1 斜压杆的应力等效

因为等效的密肋复合墙板的斜压杆长细比较大,虽然由于砌块受两侧肋柱、肋梁约束,可不考虑斜压杆的失稳变形,但根据 San Vincent 原理,等效斜压杆只有中间部分接近均匀的单轴受压应力状态,如图 3。所以本文将斜压杆等效为全长均匀单轴受力的杆件。

针对此等效斜压杆,笔者提出与加气混凝土混凝土材料的受压应力—应变曲线类似的等效斜压杆的应力—应变曲线,如图 4。

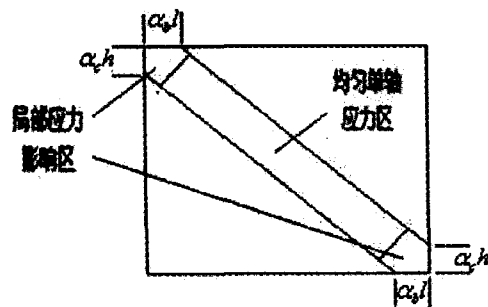


图3 等效斜压杆应力区

#### 4.2.2.2 等效斜压杆的应力—应变计算

由文献<sup>[3]</sup>,笔者推导出等效斜压杆的弹塑性应力—应变公式:

1. 弹性阶段:

$$\sigma = f_c \quad (2)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 = \frac{5.8 \varepsilon_u h \cos^2 \theta (\alpha_c^2 + \alpha_b^2)^{0.333}}{d} \quad (3)$$

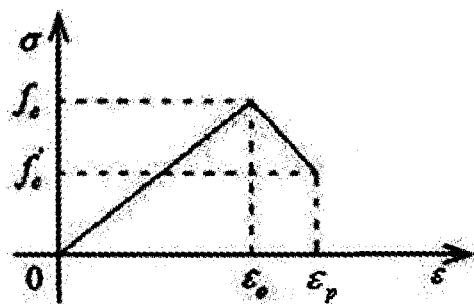


图4 等效斜压杆应力—应变曲线

## 2. 塑性阶段

$$\sigma = \begin{cases} f_c = \frac{\sigma_{\infty} t (1 - \alpha_c) \alpha_c h}{wt \cos \theta} & A_c \geq A_b \text{ 时} \\ f_c' = \frac{\tau_{b0} t \alpha_b l}{wt \cos \theta} & A_c < A_b \text{ 时} \end{cases} \quad (4)$$

$$\varepsilon = \begin{cases} \varepsilon_p = \frac{(\varepsilon_u - \sqrt{1 + 3\mu^2 r^4} \frac{\sigma_c}{E}) \sqrt{(\alpha_c h)^2 + t^2}}{d} & A_c \geq A_b \text{ 时} \\ \varepsilon_p = \frac{(\varepsilon - \sqrt{1 + 3\mu^2} \frac{\sigma_b}{E}) \sqrt{(\alpha_b l)^2 + t^2}}{d} & A_c < A_b \text{ 时} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} A_b = \sigma_b \alpha_b (1 - \alpha_b - \mu r) \\ A_c = r^2 \sigma_c \alpha_c (1 - \alpha_c - \mu r) \end{cases} \quad (6)$$

其中  $\sigma_{\infty}$  为砌块与柱接触面的最大正应力,  $\tau_{b0}$  为砌块与肋梁接触面的最大剪应力,  $\varepsilon_u$  为砌块极限应变,  $E$  为砌块弹性模量,  $\alpha$  为等效斜压杆长度。  $\mu$  为砌块与肋梁、肋柱的摩擦系数,  $r$  为砌块高宽比 ( $r = h/l \leq 1$ )。

## 5 模型分析

### 5.1 分析模型

本文采用一块  $3 \times 3$  框格的典型墙板, 砌块为  $370 \times 300 \text{mm}^2$ , 肋柱、肋梁宽分别为  $75 \text{mm}$ ,  $50 \text{mm}$ 。墙厚  $100 \text{mm}$ 。分析采用位移控制法,

### 5.2 加载模式与分析工况

不同的侧向水平荷载分布方式下, PUSHOVER 方法对抗震性能的评估差异很大<sup>[5]</sup>。本文采用 ATC-40 规定的与第一振型成正比的侧向力分布模式, 其引起的破坏形式与试验结果最为相似的。由此可

以定义重力 + 第一振型分布的分析工况。

### 5.3 容许准则

ATC-40 将房屋遭受地震后, 可能出现的状态主要分为 IO (直接使用)、LS (生命安全)、CP (防止倒塌) 三种状态。B 为出现塑性铰点, C 为倒塌点, D 为破坏点, E 为卸载点。

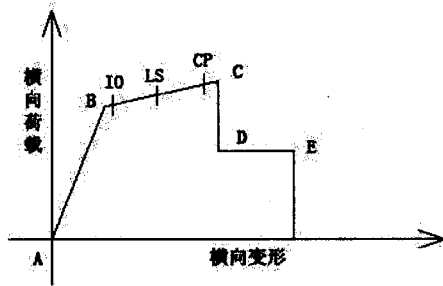


图5 塑性铰位移限值

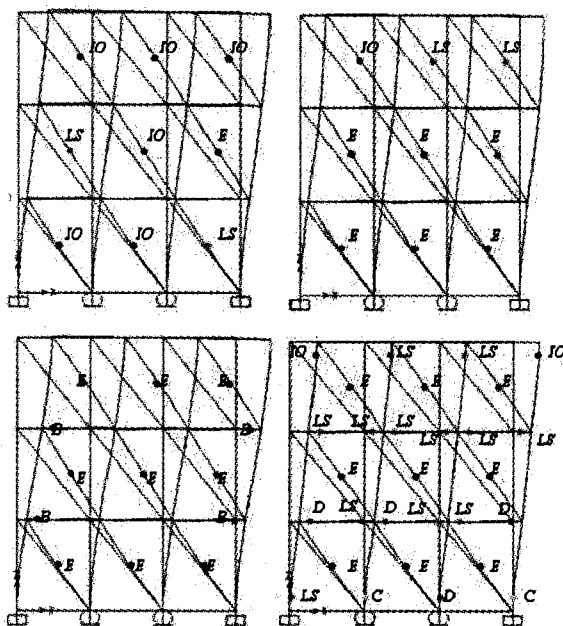


图6 保存步为 1,5,9,24 时塑性铰分布图

### 5.4 结果分析

经过 PUSHOVER 计算得各加载步塑性铰分布如图 6。可以看到模型中层等效斜压杆首先达到破坏, 并卸载。当水平荷载逐渐增大时, 卸压杆从右至左, 从下至上先后进入破坏。当等效斜压杆全部卸载后, 结构所受外力荷载全部由肋梁、肋柱承担, 此时肋梁

(下转第 14 页)

时,耐火极限可由 1.5 小时提高到 2.65 小时。(3) 构件表面喷涂防火涂料或做防火吊顶。(4) 设置自动灭火系统。

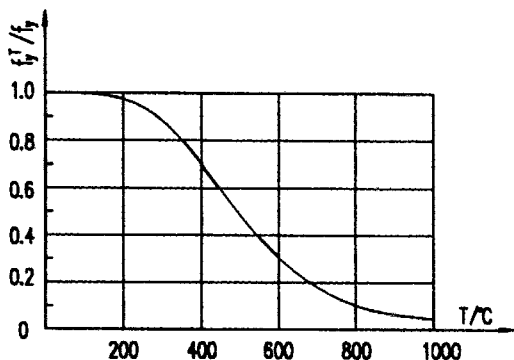


图 1

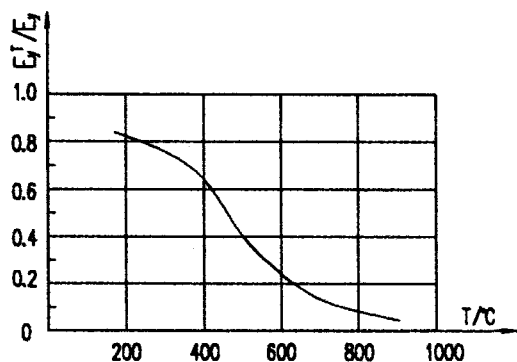


图 2

以上几点是笔者对当前结构设计中存在的有关防火问题的一些看法及相应的处理办法。笔者认为结构形式及结构构件的耐火问题值得结构工程师认

真对待。当前的结构耐火研究已经从基于试验的传统方法转为基于计算的现代方法,然而真正能有效应用于结构设计中的成果还为数不多。如何在现有规范的指导下做好结构防火设计是值得每一个结构工程师认真思考的问题。我们只有不断地总结火灾带给我们的经验教训,才能更好地预防火灾,在火灾不可避免地来临的时候,将损失降低到最低限度。

依据标准及参考文献:

- [1] 国家标准《民用建筑设计防火规范》GB50045 - 95 (2001 年版)
- [2] 李国强 蒋首超 林桂祥《钢结构抗火计算与设计》中国建筑工业出版社
- [3] 王学谦 岳庚吉《建筑消防百问》中国建筑工业出版社
- [4]《02 系列结构标准设计图集》(陕 02G05 - 09) 中国计划出版社
- [5]《建筑产品选用技术结构分册》中国计划出版社
- [6]《陕西省 02 系列建筑标准设计图集》(陕 02J01 - 03) 陕西省建筑标准办公室
- [7] 明星、刘非小、张旭东 新华网
- [8] 吕彤光.《高温下钢筋的强度和变形试验研究. [硕士学位论文]》北京:清华大学,1996
- [9] 过镇海 时旭东《钢筋混凝土的高温性能及其计算》清华大学出版社

(上接第 9 页) 出现大量塑性铰,并发展较快,并最先达到破坏,这与试验结果十分吻合。并符合密肋复合墙板“三阶段”破坏特性。

## 6 结论

6.1 本文采用等效斜压杆模型进行的密肋复合墙板 PUSHOVER 分析,结果与试验结果相同,很好的反映了墙板“三阶段”破坏特性。方法简单,概念清晰,适合工程实际应用。

6.2 本文提出的等效斜压杆轴向塑性铰设置经验证符合实际,所构造的密肋复合墙板计算模型符合墙体独特的构造特点,可用于构建密肋壁板结构整体模型。

## 参考文献

- [1] 姚谦峰,黄炜等.《密肋复合墙体受力机理及抗震性能试验研究[J]》. 建筑结构学报,2004 年 12 月,第 25 卷第 6 期.
- [2] 黄炜,姚谦峰等.《新型复合墙体的有限元建模技术研究[J]》. 工业建筑,2005 年,第 35 卷第 11 期.
- [3] Saneinejad. A, Hobbs. B. Inelastic design of infilled frames[J]. J. Struct. Eng., 121(4), 634 - 650.
- [4] 熊向阳,戚震华.《侧向荷载分布方式对静力弹性分析结果的影响[J]》. 建筑科学, Vol. 17, No. 5, 2001. 10.