

内嵌墙板钢框架等效单斜撑简化模型

金晓飞^{1,2}, 高松召³, 杨晓杰², 曹正罡¹, 范 峰¹

(1. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 150090 哈尔滨; 2. 中国建筑股份有限公司技术中心, 101300 北京;
3. 中冶焦耐工程技术有限公司, 116085 辽宁 大连)

摘 要: 为了解决已有等效斜撑模型有效宽度计算公式不适用于轻质围护墙板钢框架结构的问题,通过参数分析方法,重新拟合得到适用于内嵌围护墙板钢框架结构的等效斜撑模型有效宽度计算公式,利用已有实验数据证明公式有效性,并考虑影响内嵌围护墙板钢框架结构抗侧刚度的部分关键参数对公式适用性的影响.结果表明:拟合得到的公式在不同跨高比、轴压比、墙板厚度、墙板开洞等情况下均适用;在不同墙板宽度情况下,可通过乘以板宽影响系数 K_B 来调节板宽对计算公式的影响.

关键词: 内嵌围护墙板; 等效斜撑模型; 有效宽度; 板宽影响系数

中图分类号: TH133; TP183

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2013)06-0016-06

Equivalent single strut simplified model for steel frames with embedded retaining wall

JIN Xiaofei^{1,2}, GAO Songzhao³, YANG Xiaojie², CAO Zhenggang¹, FAN Feng¹

(1. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China;

2. China State Construction Engrg. Corp. LTD. Technology Center, 101300 Beijing, China;

3. ACRE Coking And Refractory Engineering Consulting Corporation, MCC, 116085 Dalian, Liaoning, China)

Abstract: To solve the problem that the existing effective width formula of the equivalent strut mode does not apply to steel frame structure with light enclosure wall panels, in this paper, re-fitting the effective width formula of the equivalent strut model for steel frame structure with light enclosure wall panels is obtained by parameter analysis method. Considering the key parameters influencing lateral stiffness of steel frame with light enclosure wall panels on the applicability of formula, the validity of the formula was proved by using the test data in the literature. The results show that the fitted formula are applicable in different cross-height ratio, axial load ratio, wallboard thickness and wallboard holes. In different width wallboard, it can be multiplied by the width coefficient K_B to regulate the influence of the formula by panel width.

Key words: embedded enclosure wall panels; the equivalent strut model; effective width; the panel width coefficient

钢结构具有自重轻、易安装、施工周期短、抗震性能好、环境污染小等优点,随着我国住宅产业化进程的加快,装配式钢框架结构住宅的应用必将越来越广泛.结合装配式的特点钢框架的墙体

一般采用便于安装的轻质围护墙板,然而目前对于钢框架与围护墙板之间的相互作用机理研究较少.李国强等^[1]对带 ALC 墙板钢框架结构进行了一系列实验研究,发现内嵌围护墙板钢框架初始刚度比空框架增大 50%~70%,承载力提高 65%左右.许刚^[2]针对 ASA 板(轻质节能环保型复合材料)镶嵌式墙板钢框架进行了低周往复荷载作用下的实验研究,结果表明该体系抗侧刚度、极限承载能力和延性均优于普通钢框架体系.由前期研究可知,有必要对内嵌围护墙板钢框架结构进

收稿日期: 2012-07-02.

基金项目: 2010 年中央国有资本经营预算重大技术创新及产业化资金项目(财企[2010]209 号).

作者简介: 金晓飞(1982—),男,工学博士;

范 峰(1971—),男,教授,博士生导师.

通信作者: 高松召, gaosongzhao@sina.cn.

行深入研究. 由于墙体与钢框架之间的相互作用非常复杂, 因此对其计算模型的研究意义重大. 而等效斜撑模型就是一类高效、高精度的分析墙体与钢框架之间协同作用的计算模型. 贾连光等^[3]进行了考虑填充墙对钢框架结构体系影响的静力非线性分析, 将填充墙简化成等效单杆, 研究框架抗震分析中填充墙对框架结构抗侧性能的影响. 冯伟栋^[4]利用单杆简化模型研究了考虑填充墙作用的钢筋混凝土框架结构非线性地震反应, 指出填充墙的刚度效应对结构的自振周期和频率有不可忽略的影响. 然而对于装配式的围护墙板钢框架由于墙板变形及传力的差异, 现有模型未必适用.

本文在总结已有等效斜撑简化模型的基础上, 验证了其对于内嵌围护墙板钢框架的适用性, 在已有研究基础上提出了适用于内嵌围护墙板钢框架结构的简化模型, 并从影响内嵌围护墙板钢框架结构抗侧刚度的几个方面分析了简化模型的适用性.

1 等效斜撑模型

等效斜撑的概念由 Polyakov^[5]于 1956 年首次提出, 文献[6-8]对其合理性进行了理论分析和实验研究. 等效斜撑模型即填充墙框架结构在侧向荷载作用下, 墙框产生分离呈现一对角顶紧另一对角分离的现象(图 1), 认为填充墙的作用如同桁架系统中的对角压杆, 在侧向水平力作用下, 框架和填充墙之间的应力只在填充墙的受压区边界互相传递. 由于等效压杆模型简单实用, 宏观上描述了砌体与框架结构之间的相互作用, 被各国学者广泛运用于填充墙分析研究中. 利用等效压杆模拟填充墙的作用, 等效压杆的材料与填充墙材料相同, 高度取填充墙厚度, 而有效宽度是该模型的重要参数, 有效宽度的确定与结构填充墙体尺寸、框架和填充墙材料性质等有关. 许多学者对这一参数的计算进行了研究, 给出了不同的等效压杆宽度的计算表达式. 其中 1984 年 Liauw 等^[9]对一个三层填充墙钢框架结构进行了有限元模拟分析, 得到了填充墙钢框架在侧向荷载作用下的受力特性, 发现墙体主压应力分布在 $h\cos\theta$ 范围内, 认为等效压杆有效宽度与 $h\cos\theta$ 有关, 通过参数分析将得到的 $w/h\cos\theta$ 作为纵坐标, 与 λ_h 作为横坐标放在同一坐标系中, 拟合得到有效宽度表达式为

$$\frac{w}{h\cos\theta} = \frac{0.86}{\sqrt{\lambda_h}}.$$

(1)

式中: $\lambda_h = h(\frac{E_c t \sin 2\theta}{4E_s I h'})^{1/4}$ 为墙框刚度比, h 为框架层高, θ 为墙对角线与水平线间的夹角, w 为等效压杆有效宽度, E_c 为墙体材料弹性模量, E_s 为柱弹性模量, t 为墙体厚度, I 为柱子截面惯性矩, h' 为墙体高度.

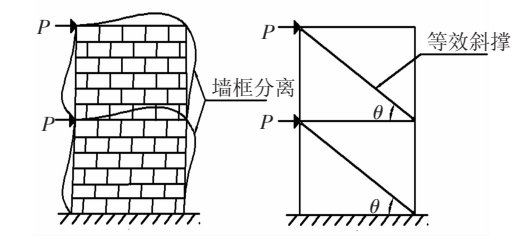
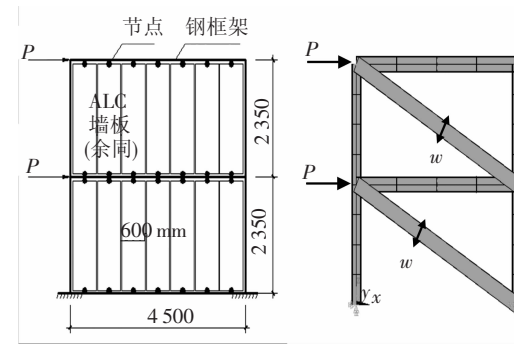


图 1 等效斜撑概念示意

等效斜撑模型的提出是基于砌体(块)填充墙钢框架结构, 对于目前常用轻质围护墙板其适用性有待验证. 已知文献[1]实验模型, 即两层单跨框架模型柱截面尺寸(mm): H250 × 200 × 8 × 12, 梁截面尺寸(mm): H300 × 120 × 6 × 12; ALC 板材厚度均为 100 mm, 宽度为 600 mm. 为了验证已有公式的适用性, 本文采用 Beam189 单元模拟钢框架, Link8 单元模拟斜撑, 将文献[1]实验模型简化成等效斜撑模型, 见图 2. 此外为了重新拟合宽度公式需建立内嵌围护墙板钢框架实体有限元模型, 本文采用 solid95 单元模拟钢框架, solid65 单元模拟 ALC 墙板, 墙框和墙墙之间采用 Targe170 和 Conta174 接触单元模拟墙框、墙墙相互作用, Combin14 单元模拟墙板与钢框架连接节点. 墙板采用分块墙板, 宽度为 600 mm, 厚度为 100 mm, 材料本构选用轻质混凝土本构模型^[10], 墙板配筋采用实际 ALC 墙板配筋率, 破坏准则为五参数破坏准则. 通过定义接触单元参数最大摩擦应力来模拟墙板之间的砂浆作用, 接触面法向罚刚度因子取 10^[11]. 建立与实验相同的有限元实体模型见图 3.



(a) 文献[1]模型 (b) 等效斜撑 ANSYS 模型

图 2 实验模型简化成等效斜撑模型示意

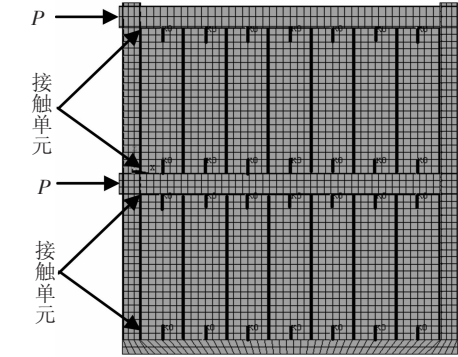


图 3 内嵌墙板钢框架有限元模型

等效单杆材料与墙体材料相同,截面高度取墙体厚度,有效宽度由式(1)得到,等效斜撑模型与实体模型均施加与实验相同的水平单调荷载,得到顶点的荷载位移曲线,利用已有实验数据验证等效斜撑模型的适用性及实体模型的正确性.有限元结果与实验结果对比见图 4.

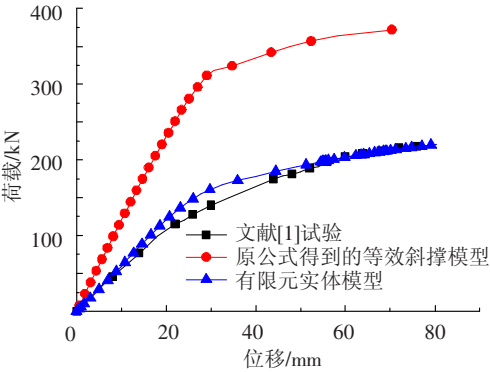


图 4 单调加载下的荷载-位移曲线

可以看出,实体模型得到的结果与实验结果吻合较好,证明了该建模方法的正确性.

对于等效斜撑模型,由原有效宽度公式得出的等效斜撑模型刚度比试验增大近一倍,分析原因:(1)内嵌围护墙板与钢框架之间有 20 mm 柔性填充物,且墙板分块之间无抗剪连接件相对于砌体填充墙其整体性较差;(2)内嵌围护墙板比砌体填充墙在侧向荷载下更易发生整体转动变形.

因此原公式得到的等效斜撑不适用于内嵌围护墙板钢框架,需进行修正.

2 等效斜撑模型的修正

文献[9]根据墙体应力分布得出压杆的有效宽度与 $h\cos\theta$ 有关,本文通过观察有限元实体模型的分析结果,发现内嵌围护墙板的应力分布规律(图 5)与填充墙相似,也在 $h\cos\theta$ 范围内,因此可依据文献[9]的基本思想对宽度公式重新拟合.

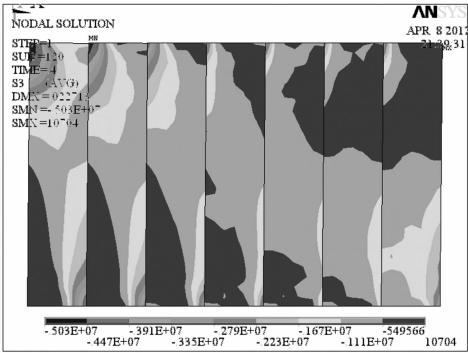


图 5 墙板应力分布(Pa)

为了便于数据回归及提高计算效率,采用已验证的建模方法,以跨高比为基本参数选取钢框架常用的跨度及层高,保持跨高比不变,同时变化层高 h ,跨度 L ,选取跨高比为 1.25 和 1.5 两种模型各 10 个,参数选取见表 1. 建立单层单跨有限元实体模型,并简化成等效单杆模型见图 6,进行单调加载分析得到与实体模型相吻合的刚度曲线,记录下此时的单杆宽度,以此进行公式拟合.

表 1 公式拟合参数

编号	L/m	h/m	L/h
1	2.7	2.2	1.25
2	3.3	2.6	
3	3.6	2.9	
4	3.9	3.1	
5	4.2	3.4	
6	4.5	3.6	
7	4.8	3.8	
8	5.1	4.1	
9	5.4	4.3	
10	5.7	4.6	
11	3.3	2.2	1.50
12	3.9	2.6	
13	4.2	2.8	
14	4.5	3.0	
15	4.8	3.2	
16	5.1	3.4	
17	5.4	3.6	
18	5.7	3.8	
19	6.0	4.0	
20	6.3	4.2	

以 $L = 4.5\text{ m}$, $h = 3\text{ m}$ 情况(图 7)为例,说明单杆模型与实体模型分析结果的吻合标准,取柱顶荷载位移曲线,墙体的主要作用是提高结构的整体侧向刚度及极限承载力,且等效单杆模型的提出是基于柱顶侧移相等的原则,因此通过调

整单杆模型的有效宽度使得其与实体模型的初始刚度相等时即认为简化的单杆模型面积合适,取此时的单杆宽度 w 。

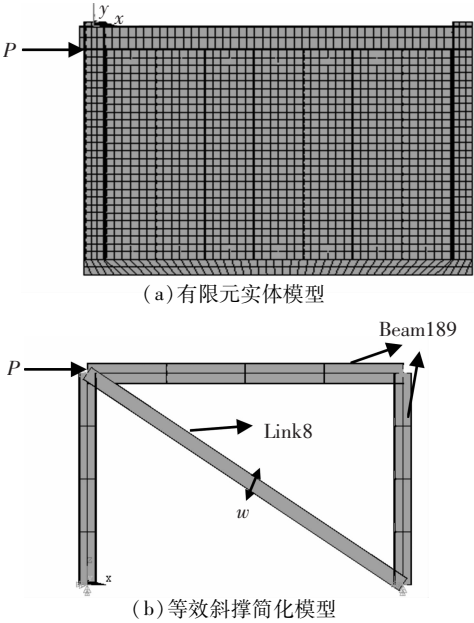


图 6 单层单跨有限元实体模型与简化模型

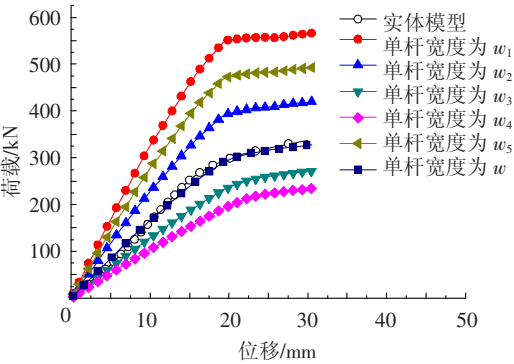


图 7 $L=4.5\text{ m}, h=3\text{ m}$ 荷载-位移曲线

依次计算出各种情况下的 w 值,并将得到的 $w/h\cos\theta$ 作为 Y 值,与 λ_h 作为 X 值放在同一坐标系得到一系列的分布点,见图 8,拟合得到宽度计算公式为

$$\frac{w}{h\cos\theta} = \frac{0.86}{(\lambda_h)^{1.5}} \tag{2}$$

式中各参数意义与式(1)相同。

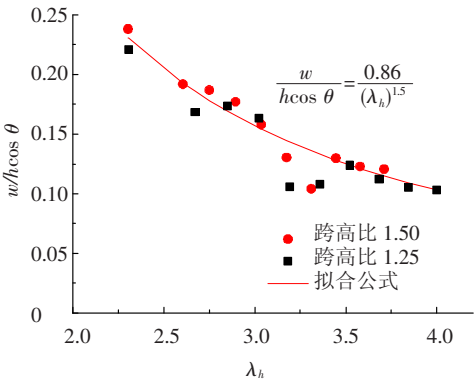


图 8 式(2)拟合图

将文献[1]实验简化成等效单杆模型,其有效宽度用式(2)计算得到,施加侧向单调荷载,得到顶点荷载位移曲线见图 9,可以看出有限元实体模型、等效单杆模型、试验三者吻合较好,证明了式(2)的有效性。

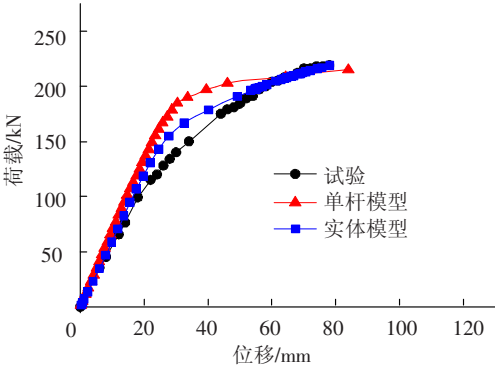


图 9 荷载-位移曲线

3 各参数对公式的影响

3.1 跨高比

选取钢框架结构常用的层高、跨度,使跨高比从 0.9~2.0 变化,验证不同跨高比下公式的适用性,各参数选取见表 2。

表 2 跨高比参数变化

编号	L/m	h/m	L/h
1	3	3.3	0.9
2	3	3.0	1.0
3	3.3	3.0	1.1
4	3.6	3.0	1.2
5	3.9	3.0	1.3
6	4.2	3.0	1.4
7	5.1	3.0	1.7
8	5.7	3.0	1.9
9	6.0	3.0	2.0

为使图形表达清楚只将跨高比 0.9、1.0、1.4 和 1.7 情况下实体模型与等效单杆模型在单调加载下的荷载位移曲线图绘出,见图 10。在各跨高比下,实体模型与等效单杆模型荷载-位移曲线吻合较好,说明跨高比对宽度计算公式无影响即计算公式适用于各跨高比。

3.2 轴压比

选取柱子轴压比为 0.1、0.3、0.5、0.6,框架高度 3 m,跨度 3.3 m 进行分析,考察在不同竖向荷载下公式的适用性。不同轴压比下的单调荷载位移曲线对比见图 11。在各个轴压比下,实体模型与等效单杆模型荷载位移曲线吻合较好,说明轴压比对宽度计算公式无影响即计算公式在施加竖向荷载情况下同样适用。

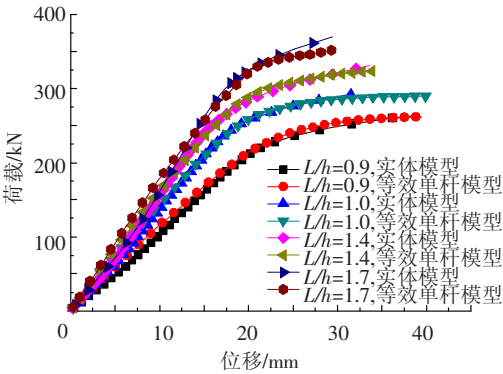
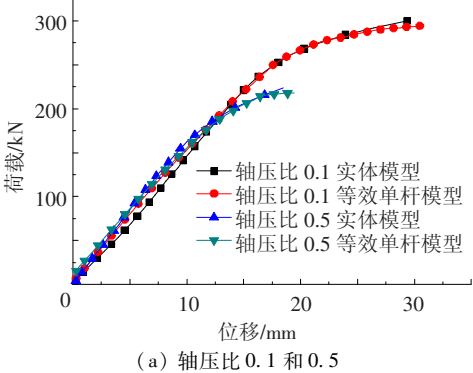
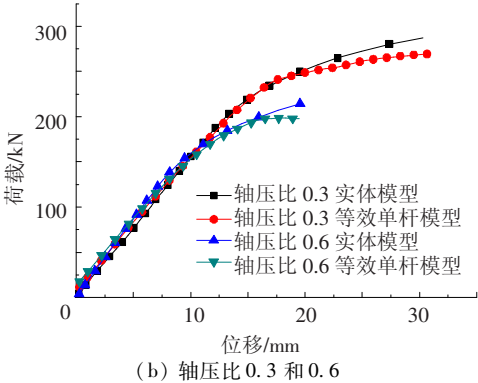


图 10 不同跨高比下荷载 - 位移曲线



(a) 轴压比 0.1 和 0.5



(b) 轴压比 0.3 和 0.6

图 11 不同轴压比下荷载 - 位移曲线

3.3 墙板宽度

公式拟合是以 600 mm 宽墙板下的结果为基础数据进行的,但不同墙板宽度对钢框架抗侧刚度有不同贡献,研究发现不同墙板宽度下单杆模型与实体模型荷载位移曲线有差异,因此需考虑墙板宽度对计算公式的影响. 根据目前工程中实际运用的几种板材规格^[12]: 分别取 10 种不同的墙板宽度 W_B , 拟合得到不同墙板宽度对计算公式的影响系数,各参数选取见表 3.

以拟合公式为基准,首先利用计算公式得到不同宽度墙板简化成单杆后的有效宽度,通过不断调整单杆的有效宽度使简化模型与实体模型初始刚度吻合,记下有效宽度的调整系数,将其作为 Y 值,将墙板宽度除以 600 进行标准化,作为 X 值,拟合得到墙板宽度影响系数 K_B 见图 12. 由图拟合得到墙板宽度影响系数 $K_B = W_B/0.6$, 式中 W_B 单位为 m.

表 3 墙板宽度参数选取

编号	W_B/mm	h/m	L/m
1	300	3	4.5
2	350	3	4.5
3	400	3	3.9
4	420	3	4.5
5	500	3	3.6
6	520	3	4.5
7	550	3	3.6
8	600	3	4.5
9	660	3	3.6
10	700	3	4.5

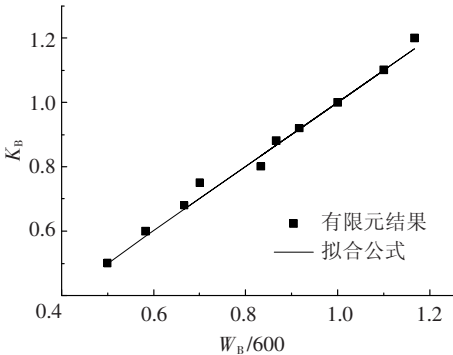


图 12 墙板宽度影响系数拟合

3.4 墙板厚度

公式拟合是在 100 mm 厚的墙板下进行的,分别取墙板厚度 75、125、150 mm,框架高度 3 m,跨度 3.3 m,墙板宽度 600 mm 进行分析,考察在不同墙板厚度下的公式适用性,不同墙板厚度下单调荷载位移曲线对比见图 13. 在墙板厚度不同时,实体模型与等效单杆模型荷载位移曲线吻合较好,说明墙板厚度不同时,有效宽度计算公式适用,即简化模型单杆截面的高度取墙板厚度,宽度可按计算公式取值.

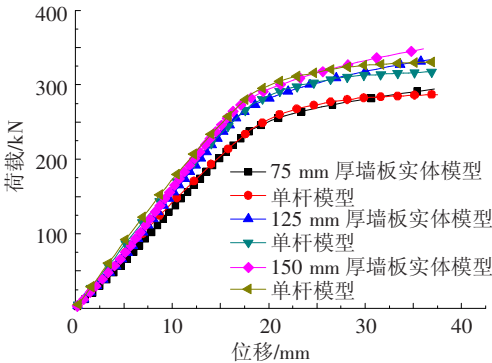


图 13 不同厚度墙板荷载 - 位移曲线

3.5 开洞面积

在开洞情况下结构承载力和刚度必然会有所降低,而实际工程中均需对洞口进行加固. 本文考虑实际住宅中常见的几种不同尺寸的门窗洞口,

选取与实际工程中相同的角钢对洞口周边进行加固.建模时,在洞口四边用梁单元来模拟角钢,模型中采用耦合三个方向自由度的方法来模拟墙板与角钢间的铆钉连接,见图 14.加固后的墙体由于角钢的存在较大程度上限制了墙体的变形和裂缝的提早出现,其荷载位移曲线见图 15.可以看出,洞口加固后结构承载力和刚度都有较大提高,与不开洞的情况相近.因此,对于位于住宅框架中部的常见门窗洞口加固后可不考虑洞口对整体结构刚度和承载力的削弱作用,即此种情况下单杆公式仍适用.

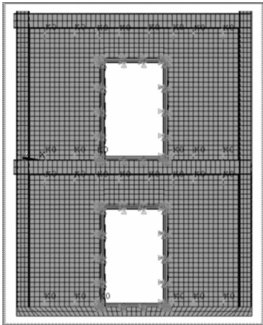


图 14 洞口加固实体有限元模型

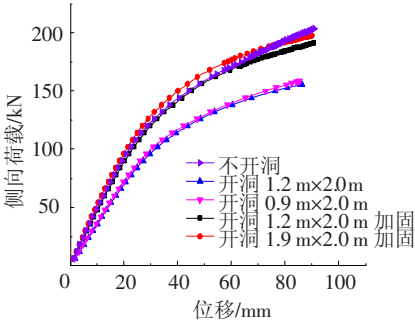


图 15 洞口加固前后钢框架荷载-位移曲线

4 结 论

- 1)重新拟合得到了适用于内嵌围护墙板钢框架结构的等效单杆模型有效宽度计算公式,并利用已有实验数据验证了其有效性.
- 2)不同跨高比、轴压比、墙板厚度及墙板开洞等因素对计算公式没有影响.

3)对于不同宽度的墙板给出了墙板宽度影响系数.

参考文献

[1] 李国强,王城. 外挂式和内嵌式 ALC 墙板钢框架结构的滞回性能试验研究[J]. 钢结构,2005,20(1): 52-55.

[2] 许刚. 镶嵌式填充墙钢框架抗侧力性能试验研究[D]. 天津:天津大学,2007.

[3] 贾连光,孙鹏,肖青. 考虑填充墙对钢框架结构体系影响的静力非线性分析[J]. 沈阳建筑大学学报,2008,24(1):13-15.

[4] 冯伟栋. 考虑填充墙作用的钢筋混凝土框架结构非线性地震反应分析[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2009.

[5] POLYAKOV S V. On the interactions between masonry filler walls and enclosing frame when loaded in the plane of the wall[M]. Moscow: Translations in Earthquake Engineering Research Institute, 1956:125.

[6] HOLMES M. Steel frames with brickwork and concrete infilling[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 1961, 19: 48-60.

[7] STAFFORD S B. Lateral stiffness of infilled frames[J]. Journal of the Structural Division (ASCE), 1962, 88: 183-199.

[8] HENDRY A W. Structural masonry [R]. London:Mac Millan Education,1969.

[9] LIAUW T C,KWAN K H. Nonlinear behaviour of non-integral infilled frames [J]. Computers&Structures, 1984,18(3):551-560.

[10] 颜雪洲. 轻质高性能混凝土力学性能试验研究及新型复合墙体性能分析[D]. 北京:北京交通大学,2006.

[11] 田海,陈以一. ALC 板材抗剪性能系列试验研究[C]//第14届全国结构工程学术会议论文集. 北京:中国力学学会,2005:417-423.

[12] 中华人民共和国建设部. 03SG715-1 蒸压轻质加气混凝土板(NALC)构造详图[S]. 北京:中国建筑标准设计研究院,2003.

(编辑 赵丽莹)