

文章编号:1000-582X(2010)08-114-09

采用半分离-整体式模型的填充墙干缩开裂过程模拟与分析

傅 军^{1,2}, 金伟良¹, 岳增国¹

(1. 浙江大学 结构工程研究所, 杭州 310058; 2. 浙江理工大学, 杭州 310018)

摘 要:考虑到计算效率,采用“半分离-整体式”计算模型对框架填充墙干缩开裂过程进行了数值模拟,结构模型采用了符合工程实际的二层单跨填充墙结构。对不同柱刚度、开洞率、连接刚度下结构的变形、应力、裂缝规律进行了影响因素的分析。模拟的裂缝形态和宽度与工程实践具有可比性。研究表明:计算时不能忽略自重和竖向荷载作用的影响;干缩一般会导致窗洞等产生非结构性的损坏;不同的柱刚度、洞口率和连接刚度下的裂缝发生位置、发展趋势和变形结果有差异,采用统一的构造措施并不能完全解决问题;对于没有采取任何构造措施的框架填充墙结构在等效温差 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下即发生局部的微裂缝,干缩下最终的裂缝宽度预计会超出使用要求范围。最后对干缩作用下的墙体裂缝宽度进行了评价,并补充了若干措施建议。

关键词:裂缝; 框架填充墙结构; 干缩; 数值模拟; ANSYS

中图分类号: TU522.01

文献标志码: A

Simulation and analysis of infilled-wall cracks' development by shrinkage using semi-discrete and whole type model

FU Jun^{1,2}, JIN Wei-liang², YUE Zeng-guo¹

(1. Structural Engineering Institute, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, P. R. China;

2. Zhejiang Sci-tech University, Hangzhou 310018, Zhejiang, P. R. China)

Abstract: For computational efficiency, numerical simulation analysis of cracks' development by dry shrinkage effect has been carried out on a practical meeting two-storey and single span wall-infilled frame structure. FEM models are used as semi-discrete type and whole type. Different column rigidity, opening sizes, and connection rigidity are described with deformation, stress, crack development results. The crack morphology and width can be comparable with practice. Gravity and vertical loads should be considered in model. Shrinkage causes large deformation near openings. Different column rigidity, opening sizes and connection rigidity cause different crack development and deformation. The uniform construction detailing is not enough for all. Primary crack of non-constructural detailing wall-infilled frame may happen at $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ equivalent temperature, and the ultimate crack width can exceed usage permission. At last wall crack width by dry shrinkage is assessed, and some proposals are given.

Key words: cracks; wall-infilled frame; dry shrinkage; numerical simulation; ANSYS

收稿日期:2010-03-24

基金项目:国家科技支撑计划子课题资助项目(2006BAJ03A04-03);杭州市科技重点项目(2005333)

作者简介:傅军(1970-),男,副教授,博士研究生,主要研究方向为砌体结构及工程设计,(Tel)13588717727;
(E-mail)fujunfujun@163.com。

随着新型墙体材料的广泛使用,框架填充墙裂缝问题由于影响到建筑物的使用及耐久性,已成为关注的焦点^[1]。文献[2-5]基于砌体开裂机理从调研、试验、有限元分析等多个环节进行了一系列的工作,目前有关墙体抗侧力分析、构造措施、温度差效应分析的文献较多,而关于干缩效应下填充墙裂缝影响因素分析的文献较少,同时在数值模拟中也存在着计算模型采用弹性或者理想弹塑性本构关系、不考虑自重或者墙体开设洞口、不考虑不同连接方式、模型为单层结构等问题,均与实际工程应用有着一定的差异。因此,笔者拟采用有限元法作为数值分析手段,考虑计算效率,提出了采用“半分离-整体式”计算模型、近似方法计算裂缝宽度的新思路,改进后对框架填充墙的干缩开裂过程进行模拟,并对相关的因素进行分析。

1 有限元计算方法验证

1.1 抗侧力试验计算对比

通过已经进行的抗侧力试验与有限元模型进行计算对比,详细对比见文献[6],这里列出裂缝分布的对比结果,见图1,结果表明试验与有限元计算得到的结果比较接近。

1.2 单片墙收缩试验计算对比

采用文献[3]进行的试验数据,对其中的一片墙体进行了有限元计算。墙端位移的对比结果见表1,结果表明理论结果与试验数据基本吻合。

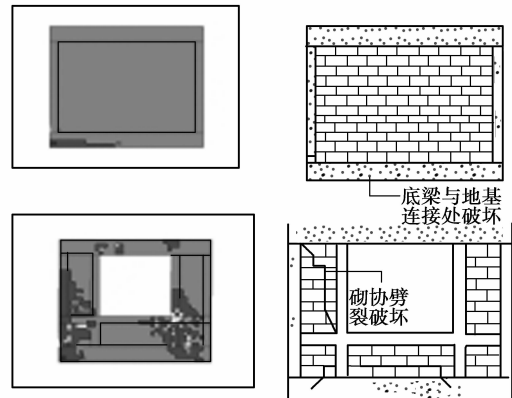


图1 裂缝分布计算与试验结果对比

上述两例说明采用 ANSYS 建立有限元模型能够较准确的用于砌体结构计算分析。类似的,对于填充墙砌体结构,在合理设置参数和求解策略,且合理考虑框架与填充墙连接的条件,采用 ANSYS 建立有限元模型可进行相关效应分析。

表1 基础墙体(WallII)墙端位移有限元结果与试验结果对比

时间/d	等效温差/℃	试验值 $\Delta_2 / (\times 0.001 \text{ mm})$	理论值 $\Delta_1 / (\times 0.001 \text{ mm})$	$(\Delta_1 - \Delta_2) / \Delta_2$
1	-4.4	87	98	0.126
2	-8.3	166	184	0.108
3	-11.5	230	254	0.104
4	-15.1	302	330	0.093
5	-17.8	355	384	0.082
6	-19.6	391	422	0.079
7	-21.5	430	464	0.079
8	-23.3	465	496	0.067
9	-24.8	495	528	0.067
10	-26.4	528	562	0.064
12	-28.9	577	602	0.043
14	-31	620	646	0.042
16	-32.4	648	646	-0.003
18	-33.9	677	674	-0.004
20	-35	700	706	0.009
22	-35.9	717	728	0.015
24	-36.3	725	758	0.046
28	-36.5	730	760	0.041

2 参数和求解策略

2.1 模型参数

填充墙裂缝 80% 是由非荷载作用引起的,主要包括温度作用和收缩作用,二者的数学分析模型类似,

可以把干缩作用折算成当量温度荷载^[3]。比较显著的墙体收缩效应等效温差在 $-15 \sim -40$ ℃ 左右^[2]。参考其他文献,并考虑到实际工况中存在温度和收缩共同作用的极端情况,取 -40 ℃ (暂不考虑温度作用,混凝土框架结构部分假设在砌体砌筑时收缩已经稳

定)。结合工程实际,模型综合考虑为单跨二层结构,暂不考虑洞口加强等各类构造措施,分别考虑框架填

充墙结构由柱刚度、洞口率、柱—墙连接方式等变化带来的影响。各种模型参数设计见表2。

表2 模型设计表

编号	跨度/mm	层高/mm	洞口尺寸/mm	柱、梁尺寸/(mm×mm)	连接方式
1A	3 000	3 000	0	400×400,200×400	弹性连接:柱—墙拉结筋连接,梁—墙砂浆粘结
2A	3 000	3 000	0	600×600,200×400	弹性连接
2B	3 000	3 000	0	600×600,200×400	柔性连接:柱—墙脱开
2C	3 000	3 000	0	600×600,200×400	弹性连接,不考虑自重和楼面荷载
2D	3 000	3 000	0	600×600,200×400	固定连接:周边固定约束
3A	3 000	3 000	0	800×800,200×400	弹性连接
4A	3 000	3 000	1 600×1 600	400×400,200×400	弹性连接
4B	3 000	3 000	1 600×1 600	400×400,200×400	柔性连接
5A	3 000	3 000	1 400×1 400	400×400,200×400	弹性连接
6A	3 000	3 000	1 200×1 200	400×400,200×400	弹性连接

2.2 材料参数

砌体结构有限元分析模型通常分为两大类:整体式模型和分离式模型,2种模型各有优缺点^[7-8]。整体式模型把砌块和砂浆作为匀质化单元考虑,模型简单,适用于大型结构分析,分离式模型可以更细致的考虑砌块与砂浆的接触情况和初始缺陷,但存在难以获得接触面的准确参数、不容易收敛、单元数庞大等问题,考虑计算效率,采用“半分离—整体式”计算模型进行分析,即:混凝土框架和墙体按照匀质化整体模型,砌块与砂浆的接触情况和初始缺陷在试验得到的本构关系中体现,墙体—框架连接部分采用不同刚度的“弹簧”单元来考虑接触。

工程实践表明:填充墙与周边混凝土框架结构的连接情况是不同的,墙—梁底为灰缝紧密接触、而墙—顶梁在填充墙砌筑稳定后用斜砖立砌、细石混凝土或者砂浆嵌固,其接触形式应该是非紧密的;柱—墙的连接已经有了大量的构造做法,可以分为3类^[9]:1)全刚性连接:柱—墙采用现浇整体配筋的方式连接,该部位处于完全约束状态,以达到“抗”的目的,实际工程很难做到;2)柔性连接:柱—墙采用控制缝分割,缝中填塞可压缩材料,连接部位处于无约束状态,以达到“放”的目的,目前这种做法在抗震构造中有一定的实施难度;3)弹性连接:柱—墙采用一定的连接措施但不完全,如设

置拉结筋等,使得连接部位处于部分约束的状态,以达到部分“抗”的目的,这是目前最普遍的做法。在数值模拟计算模型中,可以假设交接部位用不同“弹簧”刚度连接来反映这一现象。弹簧的数量根据单元划分后的节点数确定。根据接触情况,弹簧的刚度按以下几类计算:

1)剪切刚度 $k_{\text{剪切}}$,适用于周边滑移情况。

$$3k_{\text{剪切}} = C_x \times B \times L_{\text{ELE}} \quad (1)$$

2)拉伸刚度 $k_{\text{顶拉}}$,适用于柱—顶梁粘结情况。

$$3k_{\text{顶拉}} \times \epsilon_m \times B = f_t \times B \times L_{\text{ELE}} \quad (2)$$

3)连接刚度 $1k_{\text{拉}}$,适用于柱—墙的水平连接。

$$6k_{\text{拉}} \Delta x = 2 \times E_s \times \epsilon \times A_s = 2 \times E_s \times \frac{\Delta x}{TT} \times A_s \quad (3)$$

4)连接刚度2,适用于底梁—墙连接,取值为一个刚度很大的数。

5)连接刚度3,适用于柔性做法的连接,取值为一个刚度很小的数。

上述公式中, B 为柱、梁、墙接触面宽度(mm); L_{ELE} 为单元尺寸(mm); TT 为连接灰缝的厚度,取10mm; A_s 为单根钢筋面积(mm^2); C_x 为墙—混凝土界面剪切系数(N/mm^3),参照文献[9]取 $1.5 \text{ N}/\text{mm}^3$; ϵ 为应变; ϵ_m 为砂浆的极限拉应变,参照文献[10,11]取0.0004; f_t 为砂浆抗拉强度; Δx 为弹簧伸长量(mm); E_s 为钢筋弹性模量。

表3 材料特性

材料	抗压强度 f_k / MPa	弹性模量 E / MPa	泊松比 ν	收缩率 / (mm·m)	线膨胀系数 α / ($1 \cdot ^\circ\text{C}$)	密度 ρ / ($\text{kg} \cdot \text{m}^3$)
C20 混凝土框架	13.5	—	0.167	—	—	2 500
混凝土砌块砌体	4.47	—	0.2	-0.2	10×10^{-6}	1 400

(表中为块体强度 MU10、砌筑砂浆强度等级 M10(Mb10)时的砌体的平均值;初始弹性模量在计算中按应力应变曲线的切线模量取值。)

上述计算公式中,拉伸刚度按照砂浆灰缝的抗拉强度换算得到,由于砂浆的拉伸作用存在软化段,而本次计算采用线性弹簧单元,所以采用本构关系曲线包络面积相等的条件换算,并考虑梁底与填充墙的接触不紧密进行折减;连接刚度1用拉结筋的屈服强度换算得到(拉结筋 $2\Phi6@500$,忽略砂浆强度的贡献)。

主要材料参数指标见表3。混凝土材料的本构关系取《混凝土结构设计规范》^[12]中单轴受压时的应力-应变关系曲线。砌体本构关系采用下述简化的非线性弹性关系公式^[6]。

上升段

$$\frac{\sigma}{f} = 3.2 \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right) - 2.2 \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^{1.45}, \epsilon \leq \epsilon_0. \quad (4)$$

下降段

$$\frac{\sigma}{f_1} = 1.04 - 0.04 \frac{\epsilon}{\epsilon_0}, \epsilon_0 \leq \epsilon \leq 3.5\epsilon_0. \quad (5)$$

式中, ϵ_0 为峰值应变; f_1 为砌块单轴受压应力峰值。

计算模型为“MKIN+CONCRETE”方式,取混凝土材料的峰值压应变0.00147、砌体材料的峰值压应变0.002;混凝土和砌体类材料的抗拉强度值比较离散,材料的抗拉强度均暂取抗压强度的1/10^[7];ANSYS计算中,混凝土结构配筋采用分布式考虑(配筋率),裂缝采用弥散裂缝模式,模型统一采用SOLID65实体单元。

2.3 求解策略

为了解决计算后阶段的收敛问题,给出了如下设定:1)计算模式为“半分离-整体式”;2)单元尺寸为100 mm;3)单元划分采用“MAPPED”或者

“SWEEP”方式;4)采用线性弹簧(Combine14);5)分荷载步情况确定不同的求解控制,初期加载时采用程序缺省值,后期等效温差加载时采用自定义控制参数:力-范数容限TOLER=0.05~0.07、最大子步数NSUBST=400、平衡迭代最大次数NEQIT=80、打开线性搜索开关LNSRCH、采用PCG求解器,关闭压碎开关。

计算共分3个荷载步:首先对填充墙框架结构进行自重作用下的计算;然后考虑结构楼板传至框架梁上的竖向均布荷载(暂取12 kN/m);最后在填充墙上加入等效温差。考虑结构和荷载的对称性,取1/2模型施加对称约束进行计算。

其他详细的材料参数、本构关系和求解策略可参见文献^[6,7,13]。

3 干缩作用过程模拟与因素分析

3.1 计算模型对比

表2中,固定连接模型为:假设不考虑柱-墙-梁连接的刚度变化,周边为全固定约束连接。该类模型的计算结果见图2左图。计算表明:在不大的干缩作用下(等效温差 -5°C),模型已经沿周边发生开裂,不再能保证柱-墙共同工作,与实际工程有较大的差异。因此,全固定连接模型不能用于工程设计。

表2中,如果模型在计算过程中不考虑楼板竖向荷载和自重,该类模型的计算结果见图2右图。计算表明:模型的变形和墙体内力大小以及裂缝分布方式均与后叙弹性连接方式有较大的差异,计算结果严重失真,因此自重和竖向荷载的影响不容忽视。

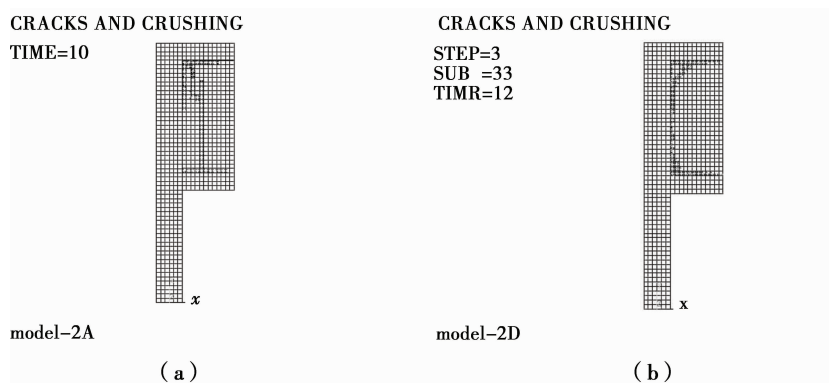


图2 模型2C、2D在 -10°C 下裂缝开展图

3.2 逐级作用下墙体应力和裂缝开展的描述

3.2.1 竖向荷载作用下性状

楼面荷载和自重作用下模型的计算结果限于篇幅略。计算表明:填充墙体内部没有出现开裂。但是顶梁-墙交接处出现了位移差,导致部分脱开。框架梁因为受到竖向荷载的作用发生节点转动,与

墙体的接触也发生了变化:角部脱开,梁中则紧密接触,墙体成为了梁的“简支点”,说明墙体参与了整个受力过程;框架柱在刚度较小的情况下(1A)也发生了挠曲。柱刚度越大,结构的竖向和水平位移越小,内部应力越大;对于开设洞口的模型,因为墙体贡献的刚度有限,相对实体模型来说竖向位移要增加,应

力要增大,洞口越大越明显。

3.2.2 干缩作用下性状

干缩作用下各种模型的最终计算结果见图 3 和

图 4。图形按照模型编号排列(从左至右和从上到下依次为:1A,2A,2B,3A,4A,4B,5A,6A),为了清晰起见,所示图形均经过一定比例的放大。

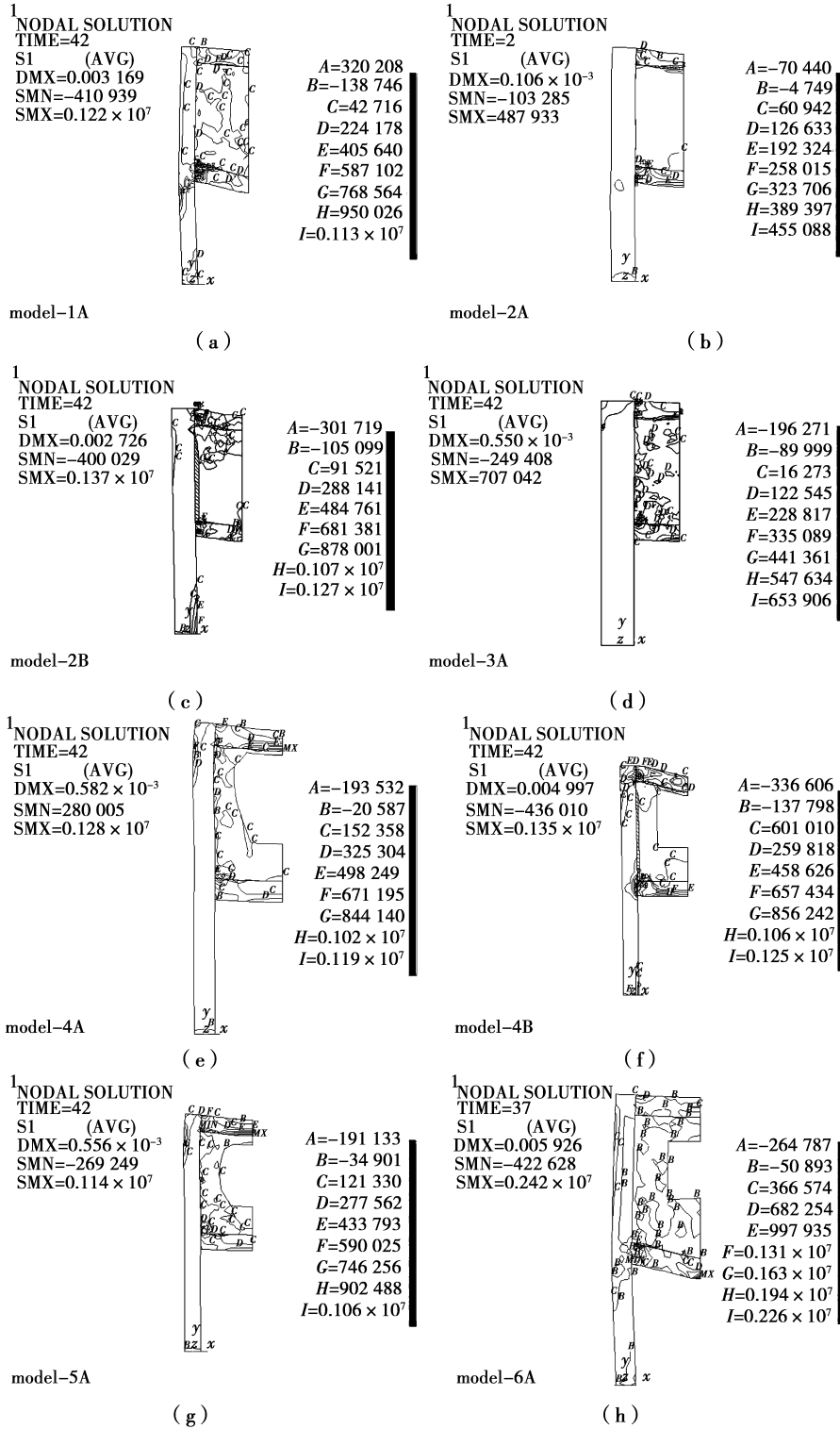
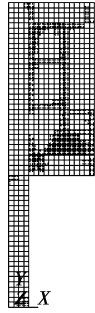


图 3 模型在-40 °C 下主拉应力图

裂缝的发展和最终形态表明:模型在等效温差-5 °C 均发生了不同程度的微小裂缝,最终裂缝把整片

墙体分割成若单片独立的墙体;一般变形最大值,水平向发生在柱-墙中部结合处、竖向则在梁中底部。

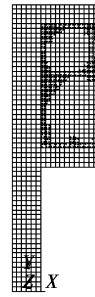
1
CRACKS AND CRUSHING
STEP=3
SUB =116
TIME=42



model-1A

(a)

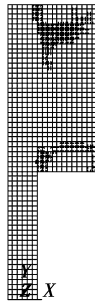
1
CRACKS AND CRUSHING
STEP=3
SUB =87
TIME=42



model-2A

(b)

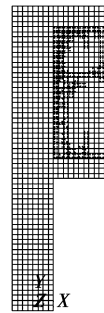
1
CRACKS AND CRUSHING
STEP=3
SUB =76
TIME=42



model-2B

(c)

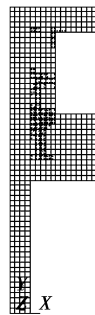
1
CRACKS AND CRUSHING
STEP=3
SUB =62
TIME=42



model-3A

(d)

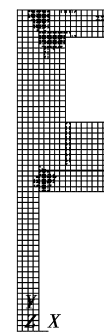
1
CRACKS AND CRUSHING
STEP=3
SUB =50
TIME=42



model-4A

(e)

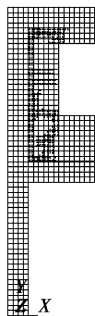
1
CRACKS AND CRUSHING
STEP=3
SUB =46
TIME=42



model-4B

(f)

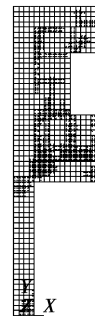
1
CRACKS AND CRUSHING
STEP=3
SUB =62
TIME=42



model-5A

(g)

1
CRACKS AND CRUSHING
STEP=3
SUB =83
TIME=42



model-6A

(h)

图 4 模型在 -40 °C 下裂缝开展图

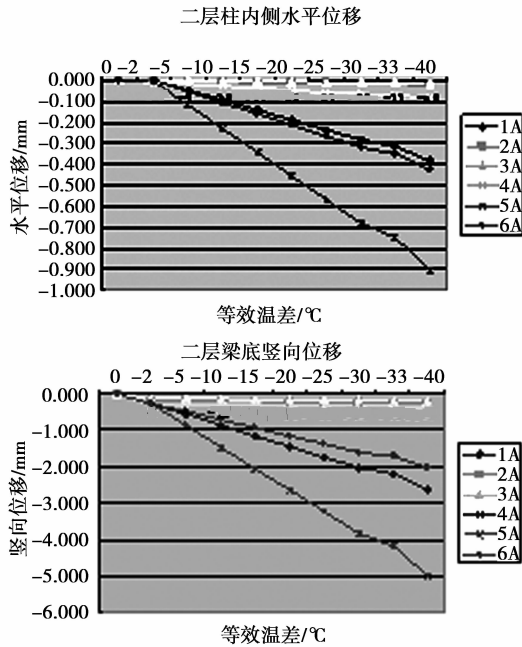


图 5 各级作用下水平位移和竖向位移

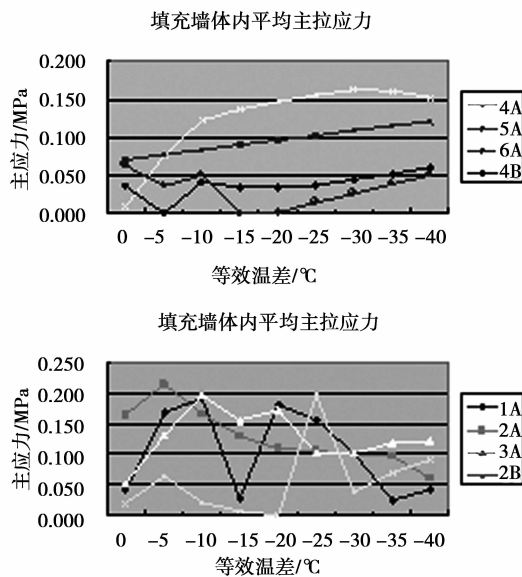


图 6 各级作用下墙体平均主拉应力

对于没有洞口的填充墙,干缩作用下首先在上角部柱-墙、梁墙连接处产生了裂缝,随着作用增大,裂缝沿着柱墙边界向下发展,最终至下角部。当柱刚度相对较小的时候(1A),在 1/4 跨度的墙中出现了竖向裂缝,墙体的中部出现了两道水平裂缝;当柱刚度相对较大的时候(2A,3A),竖向裂缝出现在 1/2 部位,墙体的中部出现了一道水平裂缝。

对于有洞口的填充墙,干缩作用下首先在上角部、下角部产生了裂缝,随着作用增大,裂缝沿着斜向发展,之后沿着柱-墙边界发展。当洞口相对较小的时候(5A,6A),由于墙体所占面积较多,裂缝发展要充分些,并在 1/4 跨度、1/2 跨度依次在墙中出

现了竖向裂缝,同时墙体的中部出现了多道水平裂缝;当洞口相对较大的时候(4A),裂缝发展主要集中在洞口下角部和柱-墙边界,同时墙体的中部出现了一道水平裂缝。

为了解结构变形和墙体内部应力分布情况,采用二层柱中侧部位和二层梁底中部位计算的水平、竖向位移逐级变化见图 5,各个模型在各级荷载作用下的墙体平均主拉应力变化见图 6。

从图中可以知道:无洞口填充墙体内部平均主拉应力在竖向荷载作用后的干缩起始阶段、以及在等效温差 -15 °C 左右发生了突变;有洞口填充墙体内部平均主拉应力在竖向荷载作用后的干缩起始阶段、以及在等效温差 -5 °C 左右发生了突变。可能是受力方式改变和裂缝发展产生了内力重分布。随着干缩作用增大,无洞口填充墙体内部平均主拉应力逐渐减小,有洞口填充墙体内部平均主拉应力逐渐增大。

3.3 裂缝宽度的近似计算

由于弥散裂缝模式不能准确计算裂缝宽度。参考文献[14]的论述:在研究关注的裂缝形态和宽度并不是非常重要的情况下,可以采用弥散裂缝模式,裂缝开展宽度等于开裂单元垂直裂缝方向(主拉应变方向)相邻两节点之间相对位移减去开裂单元内受拉混凝土的变形。提出如下方法近似估算:1)周边弹簧单元连接部位,近似以节点间的位移差来模拟;2)对于墙体内部裂缝,参考文献[4]的做法和文献[15]关于裂缝宽度近似计算的论述,近似以节点的塑性主拉应变乘以斜向单元长度表征裂缝宽度:

$$l_{cr} = \epsilon_1 \times l_e, \epsilon_1 = \epsilon_{tol} - \epsilon_m \quad (6)$$

式中: l_{cr} 为裂缝宽度; ϵ_1 为塑性应变;

ϵ_{tol} 为主拉应变;

l_e 为单元斜向长度= $100\sqrt{2} \approx 140$ mm。

最终的裂缝宽度近似计算结果见表 4-5。

表 4 周边连接部位的近似最大裂缝宽度

模型编号	上部梁-墙体交界处	中部柱-墙体交界处
	最大裂缝宽度/mm	最大裂缝宽度/mm
1A	0.066	0.006
2A	0.082	0.006
3A	0.071	0.002
4A	0.086	0.008
5A	0.021	0.002
6A	0.004	0.001
2B	0.428	0.126
4B	0.387	0.629

(梁-墙交界处平均最大裂缝宽度 0.143 mm;柱-墙交界处平均最大裂缝宽度 0.098 mm。)

表 5 墙体内部的近似最大裂缝宽度

模型编号	最大裂缝宽度/mm	位置	分布形态
1A	2.170	中部:1/4 跨度处	垂直
2A	1.204	中部:1/4 跨度处	水平
3A	1.064	中部:1/4 跨度处	水平
4A	1.484	角部:洞口下角处	斜向
5A	1.568	角部:洞口下角处	斜向
6A	1.414	下部:洞口下墙中	垂直
2B	0.656	角部:梁-墙上角处	水平
4B	0.351	角部:洞口下角处	斜向

(墙体水平平均最大裂缝宽度 0.975 mm;垂直平均最大裂缝宽度 1.792 mm;斜向平均最大裂缝宽度 1.134 mm。)

3.4 影响因素分析

1A,2A,3A 模型的计算结果表明:柱刚度越大,裂缝分布越广,产生的主拉应力越大,但是结构的变形小,墙体内部产生的裂缝宽度小。

4A,5A,6A 模型的计算结果表明:洞口率越大,裂缝分布越集中,产生的主拉应力越大,界面裂缝宽度越大。墙体内部的裂缝发生在洞口角部,洞口附近会发生较大的变形,导致窗户等构件的损坏,应该有加强措施。

2B,4B 模型的计算结果表明:柔性连接模型在干缩作用下,墙体内部应力会发生释放,最终状态下,一般柱-墙体交接部位的最大裂缝宽度可能会达到 0.629 mm。

4 工程实例比对

文献[1]及[16]对常见的框架填充墙裂缝情况进行了调研,总结得到裂缝的形式如图 7-8 所示。

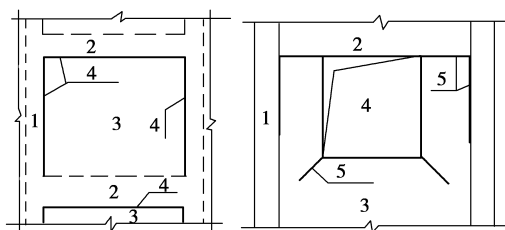


图 7 墙面裂缝示意

文献[17]对成都地区两栋框架填充墙建筑的裂缝宽度进行了现场实测,见表 6。

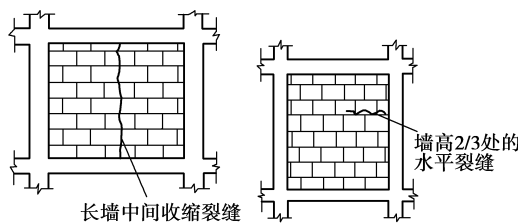


图 8 墙面裂缝示意

表 6 文献[17]实测建筑物裂缝宽度

裂缝位置	1#楼平均 /mm	2#楼平均 /mm	备注
填充墙斜向	0.388	0.373	1#楼测试最墙体大裂缝宽度 1.709 mm,
窗角部	1.200	0.364	最小裂缝宽度
门洞口	0.253	0.249	0.184 mm;2#楼测
墙体水平	1.709	0.365	试墙体最大裂缝宽度
柱边竖向	1.170	0.658	0.658 mm,最小裂缝宽度 0.191 mm。

对比计算结果,考虑到工程实例中材料、尺寸、荷载工况、施工情况、环境条件等的不同,提出的模拟裂缝形态类似,裂缝宽度计算也跟工程实测情况接近。

5 裂缝宽度评价和措施建议

我国耐久性指标规定的裂缝宽度一般为 0.2 mm,神山幸弘等试验表明^[18],当墙体处于饱和含水状态时,在无风和微风时产生漏水的最小裂缝宽度是 0.06~0.08 mm,美国砌体协会规定如果能够将裂缝宽度控制在 0.51 mm 以内,就可以通过涂抹防水层防止渗水^[19]。合适的裂缝宽度要结合耐久性、防渗要求、美观要求等由设计师综合考虑。

实际发生的裂缝宽度因为考虑时效和应力松弛等要小于计算值^[20],但是在干缩最终状态下,最大裂缝宽度可能还会超过范围,必须采取一定的措施。有关填充墙结构防止裂缝的文献很多,方法包括“放、防、抗”等,这里不再赘述。根据计算分析,补充建议如下:

1)裂缝发生的初始等效荷载很小,很难满足工程应用工况,因此避免裂缝发生和减小裂缝宽度的优先措施是控制材料的生产质量和施工工艺,而非构造措施本身。

2)考虑到不同柱刚度、开洞率、连接方式等不同,对于填充墙结构防止开裂问题,建议工程实践采

用这里提供的计算思路做初步定量分析,然后再采取对应的构造措施,避免盲目加强导致开裂部位和形态发生转移。

3)根据裂缝发生顺序,工程应用中防止裂缝发生和开展的主要部位是柱-墙、梁-墙交界处和窗洞口角部(有洞口填充墙)。建议对于柱-墙、梁-墙交界处采用“柔性连接”措施、窗洞部位采用“圈梁+芯柱(构造柱)”加强措施。

6 结 语

1)有限元数值模拟计算中,兼顾计算精度和效率,可以采用“半分离-整体式”计算模型。

2)自重和竖向荷载作用在计算模型中不能忽略。

3)干缩会导致洞口附近产生较大的变形,因此会对窗户等产生非结构性的损坏。

4)框架填充墙参与了受力过程,实际计算工况中应该考虑填充墙的作用。

5)在没有任何构造措施的情况下,框架填充墙结构在等效温差 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下即发生局部的微裂缝,工程应用上较难控制初始裂缝;在一般的干缩最终状态下,裂缝宽度均超过了允许范围,必须采取一定的措施。

计算过程发现,梁-墙底部交界处因为梁的挠曲转动产生了脱离,与实际情况并不完全吻合,这是由于设置弹簧单元所致;同时由于计算模型的简化,假设交接部位的单元未发生“侵入”;柱-墙连接采用弹性方式,实际工程中灰缝开裂后,拉结钢筋与墙之间会产生粘结滑移,在滑移达到极限前,可能会减少计算裂缝宽度。上述问题带来的误差还要进一步分析考虑。

提供的计算思路和得出的结论可以用于工程的定性分析和初步的定量计算,并指导试验。

参考文献:

- [1] 于飞,赵国兴,郑国泰,等. 框架填充墙裂缝调查与成因分析[J]. 新型建筑材料, 2006(1):8-9.
YU FEI, ZHAO GUO-XING, ZHENG GUO-TAI, et al. Investigation and genetic analysis of the crack - facing of wall-filled frame[J]. New Building Materials, 2006(1):8-9.
- [2] 孙小鸾,孙伟民,张大长,等. 混凝土小型空心砌块框架结构填充墙裂缝机理分析及控制措施[J]. 南京工业大学学报, 2006, 28(6):52-56.
SUN XIAO-LUAN, SUN WEI-MIN, ZHANG DA-

CHANG, et al. Analysis of cracking in small-concrete block infill panel of frame and preventative measures against it [J]. Journal of Nanjing University of Technology, 2006, 28(6): 52-56.

- [3] 周谨,陈鸣,金伟良等. 混凝土小型空心砌块墙体干缩性能的试验研究[J]. 工业建筑, 2004, 34(8):41-43.
ZHOU JIN, CHEN MING, JIN WEI-LIANG, et al. Experimental study on dry shrinkage of small concrete hollow block wall[J]. Industrial Construction, 2004, 34(8): 41-43.
- [4] VAN ZIJL G P A G, de VRIES P A, VERMELTFOORT A T. Masonry wall damage by restraint to shrinkage [J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(7):1075-1086.
- [5] SHARIQ M, ABBAS H, IRTAZA H, et al. Influence of openings on seismic performance of masonry building walls[J]. Building and Environment, 2008, 43(7): 1232-1240.
- [6] 傅军,金伟良,岳增国,等. 框架填充墙开裂的数值模拟分析[J]. 墙材革新与建筑节能, 2008(6):29-32.
FU JUN, JIN WEI-LIANG, YUE ZENG-GUO, et al. Numerical simulation of Crack Development in Wall-infilled Frame[J]. Wall Materials Innovation & Energy Saving in Buildings, 2008(6):29-32.
- [7] 李英民,韩军,刘立平. ANSYS在砌体结构非线性有限元分析中的应用研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2006, 28(5):90-105.
LI YING-MIN, HAN JUN, LIU LI-PING. Application of ANSYS to finite element analysis for nonlinear masonry structures[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2006, 28(5):90-105.
- [8] GIAMBANCO G, RIZZ O S, SPALLINO R. Numerical analysis of masonry structures via interface models[J]. Compute Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2001, 190, (49/50):6493-6511.
- [9] 王铁梦. 工程结构裂缝控制[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2005.
- [10] MA G W, HAO H, LU Y. Homogenization of masonry using numerical simulations [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2001, 127(5):421-431.
- [11] WU C, HAO H. Numerical derivation of averaged material properties of hollow concrete block masonry[J]. Engineering Structures, 2008 30(3):870-883.
- [12] 中国建筑科学研究院. GB50010-2002. 混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2002.

(下转第 135 页)

- serpentine heat exchanger; part i-effectiveness and heat transfer characteristics [J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29 (14/15): 3081-3087.
- [7] KADYLAK D, CAVE P, MERIDA W, et al. Effectiveness correlations for heat and mass transfer in membrane humidifiers [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009, 52(5/6): 1504-1509.
- [8] MATHEW B, HEGAB H. Application of effectiveness-NTU relationship to parallel flow microchannel heat exchangers subjected to external heat transfer [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2010, 49(1): 76-85.
- [9] ABD EIBAKY M A A, MOHAMED M M. Heat pipe heat exchanger for heat recovery in air conditioning [J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27 (4): 795-801.
- [10] WILLIS N C. Analysis of three-fluid crossflow heat exchanger[D]. NASA, USA, 1966.
- [11] 王礼进,张会生,翁史烈. 三股流高温紧凑板翅式换热器的性能分析[J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(3): 389-393.
WANG LI-JIN, ZHANG HUI-SHENG, WONG SHI-LIE. Performance analysis of high temperature three-fluid compact heat exchanger[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2008, 42(3): 389-393.
- [12] GVOZDENAC D D, BACLIC B S. Performances of three-fluid single pass crossflow heat exchanger [J]. Heat and Mass Transfer, 1994, 29(6): 343-347.
- [13] 石程名,辛明道,陈远国. 三流体分离型热管换热器的传热性能[J]. 重庆大学学报, 1992, 15(4): 20-25.
SHI CHENG-MING, XIN MING-DAO, CHEN YUAN-GUO. The heat transfer performance of three-fluid separate type heat pipe exchanger [J]. Journal of Chongqing University, 1992, 15(4): 20-25.

(编辑 陈移峰)

~~~~~

(上接第 122 页)

- [13] 曾鹏,刘清,叶建荣. 利用模拟钢筋混凝土中的收敛问题的对策[J]. 四川建筑, 2008, 20(3): 113-117.  
ZENG PENG, LIU QING, YE JIANRONG. Solving convergence problems of Reinforced Concrete Simulation Using ANSYS. Sichuan Construction, 2008 (6): 113-117.
- [14] 吴胜兴. 混凝土裂缝宽度计算的有限单元法[J]. 计算力学学报, 1997, 14(1): 69-77.  
WU SHENG-XING. Finite element method of the crack width prediction for RC beams[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 1997, 14(1): 69-77.
- [15] ZUCCHINI A, LOURENCO P B. A coupled homogenization-damage model for masonry cracking[J]. Computers and Structures, 2004, 82(11/12): 917-929.
- [16] 彭人玮. 某国外工程实心混凝土小型砌块填充外墙裂缝原因的研究与分析[J]. 工业建筑, 1998, 28(4): 44-48.  
PENG RENWEI. A study on the causes of Concrete small solid block in-filled walls' cracks-case study of a foreign construction project [J]. Industrial Construction, 1998, 28(4): 44-48.
- [17] 班明霞. 框架轻质填充墙温度和干缩裂缝产生机理的研究[D]. 成都: 西华大学, 2007.
- [18] 日本混凝土工程协会. 混凝土裂缝调查及修补规程[M]. 北京: 地震出版社, 1992.
- [19] 梁建国,方亮,彭茂丰. 美国砌体结构房屋墙体裂缝的控制[J]. 建筑砌块与砌块建筑, 2007(6): 2-6.  
LIANG JIAN-GUO, FANG LIANG, PENG MAO-FENG. Crack control of masonry building wall in USA[J]. Building Block and Block Building, 2007(6): 2-6.
- [20] VERHOEF L G W, VAN ZIJL G P A G. Restrengthening of brickwork to reduce crack width [J]. Advanced in Engineering Software, 2002, 33 (1): 49-57.

(编辑 张小强)