

# 抗震结构中填充墙倒塌数值模拟与分析

杨 伟<sup>1</sup>, 欧进萍<sup>1,2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 深圳研究生院, 518055 广东 深圳, ywluck@126.com;

2. 大连理工大学 土木水利学院, 116024 辽宁 大连)

**摘 要:** 为了考察填充墙的构造措施对其防平面外倒塌的影响, 采用数值计算方法进行模拟与分析, 基于 LS-DYNA 计算程序, 分析了提高砂浆强度等级和采用拉结筋构造措施时, 填充墙的破坏行为. 结果表明: 提高砂浆强度等级, 设置合理的构造措施, 包括设置拉结筋措施, 可以有效地提高填充墙的防倒塌能力. 建议对于八度设防烈度以上的填充墙框架结构, 除设置全长贯通拉结筋外, 应适当减小设置间距, 并采取其他适当的构造措施, 以确保填充墙砌块不倒塌伤人.

**关键词:** 汶川地震; 填充墙; 倒塌; 模拟; 构造措施

**中图分类号:** P315.9

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0367-6234(2011)06-0016-04

## Collapse simulation and analysis of infill walls for earthquake-resistant structures

YANG Wei<sup>1</sup>, OU Jin-ping<sup>1,2</sup>

(1. Harbin Institute of Technology Shenzhen Graduate School, 518055 Shenzhen, Guangdong, China, ywluck@126.com;

2. School of Civil & Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, 116024 Dalian, Liaoning, China)

**Abstract:** To investigate out-of-plane behavior of infilled frame due to different construction measures, collapse simulation of the structure is carried out by LS-DYNA software. The influences of construction measures of infilled frame and grades of mortar are researched, respectively. The results show that the collapse prevention capacity of infill walls is effectively improved by increasing the grade of mortar and setting steel tie bars. The space of tie bars is advice to reduce when infilled structures are beyond the eighth seismic precautionary intensity. Other reasonable measures can be also adopted to protect infill walls from collapse and ensure the safety of people's life and possessions.

**Key words:** Wenchuan earthquake; infill walls; collapse; simulation; construction measures

近年来, 建筑抗震设计方法已经有了很大的发展, 而且在不断地更新和完善, 但填充墙对结构的影响目前设计方法考虑得还不够全面, 只是简单地考虑周期折减, 并没有与结构构件的设防水准相协调, 即没有在同一标准下加以考虑设计, 结果导致其震害严重, 甚至会引起结构倒塌伤人<sup>[1]</sup>. 按照当前许多国家普遍采用的“小震不坏、中震可修、大震不倒”的设防标准<sup>[2]</sup>, 所设计和建

造的房屋结构, 即使做到大震时建筑物的结构不倒, 能保障生命安全, 也无法做到中小地震时填充墙不坏, 进而造成严重的经济损失, 影响到社会生活.

汶川地震之后, 本文作者参与了国家地震局组织的都江堰市震害普查工作, 发现该市建筑包括各种典型结构形式, 震害也表现出各种典型形式, 其中填充墙的破坏十分普遍. 目前对于填充墙的面内失效机理研究比较充分<sup>[3-7]</sup>, 但是对于填充墙的面外失效机理研究还不多, 尤其对于填充墙的倒塌问题. 因此, 本文在此背景下分析总结填充墙的典型震害, 并进行填充墙面外倒塌有限元

收稿日期: 2010-05-15.

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2007CB714202).

作者简介: 杨 伟(1979—), 男, 博士研究生;

欧进萍(1959—), 男, 博士生导师, 中国工程院院士.

仿真,探讨砂浆强度等级与填充墙的构造措施,对改善填充墙抗震性能的影响,具有重要意义。

### 1 填充墙的典型震害

汶川地震震害调查发现,框架或底框结构中的填充墙根据其地震作用大小、受力方式、砌体的

材料特性、砌体的砌筑方式、砂浆级别、结构中的位置、连接构造措施和施工质量等因素,其典型震害形式主要有:水平裂缝、斜裂缝、X 型裂缝、平面外倾斜、角部压碎和局部或整体倒塌等情况,如图 1~6 所示。



图 1 水平裂缝



图 2 斜裂缝



图 3 X 型裂缝



图 4 平面外倾斜



图 5 角部压碎



图 6 部分倒塌或全倒塌

### 2 框架填充墙倒塌数值模拟与分析

在某些情况下,填充墙的倒塌会给人身安全带来危害.抗震结构地震倒塌模拟是一个非常复杂的过程,目前国内外对框架填充墙大震倒塌仿真的研究还不多,文中借助数值计算软件 LS-DYNA,对填充墙的面外倒塌问题进行仿真分析。

#### 2.1 有限元模型

分析的模型为一单层单跨填充墙框架,柱距 6.0 m,高 3.6 m,截面 500 mm×500 mm,梁截面 250 mm×500 mm.分析的填充墙砌块为混凝土砌块,砌块尺寸为 880 mm×240 mm×380 mm,其中厚度为 240 mm.该类型砌块在灾区是十分常见的,如图 3、4 所示.框架和砌体填充墙以及地面均采用三维 8 节点显示 SOLID164 单元,该单元常被用于 3 维实体结构显示动力分析,钢筋则采用 BEAM161 单元进行建模;地面为刚体,其他为变形体.由于讨论面外倒塌问题,因此梁柱和砌体均采用弹性本构,考虑其接触非线性问题,不考虑材料破坏.框架填充墙有限元模型如图 7 所示,文中考虑 9 度罕遇地震作用,每隔 380 mm 设置贯通

的 2φ6 拉结筋,加筋模型如图 8 中所示;墙的长度超过 5 m,按规范要求墙顶与梁宜有拉结,拉结筋模型如图 8 中所示。

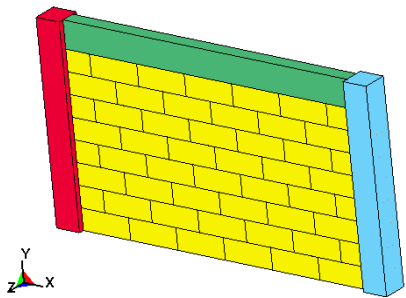


图 7 填充墙框架 LS-DYNA 有限元模型

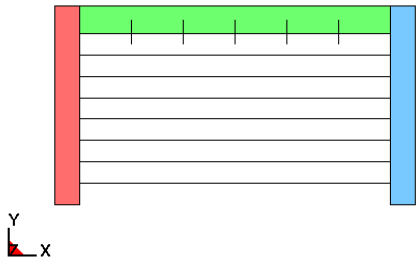


图 8 填充墙设置拉结筋

#### 2.2 固连失效接触模型

文中不对砂浆建模,而是通过定义固连失效

接触模型,考虑砂浆的影响.该接触模型是基于砂浆抗拉和抗剪强度建立固连失效准则,如图9所示,即初始时刻砌块和砌块之间,以及砌块和框架之间互相固连,当接触应力 $f_n$ 和剪应力 $f_s$ 分别达到失效值 $f_{n,f}$ 和 $f_{s,f}$ 时,固连作用就会失效,从而接触体之间可以分离和滑移.砂浆的抗拉强度和抗剪强度按混凝土砌块加M5级和M7.5级砂浆分别进行讨论,具体参数根据砌体结构设计规范<sup>[8]</sup>规定值取用,M5砂浆抗拉强度为0.08 MPa,抗剪强度为0.10 MPa,M7.5砂浆抗拉强度为0.10 MPa,抗剪强度为0.13 MPa.

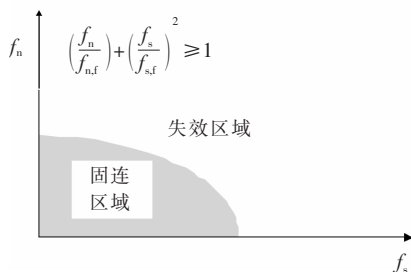


图9 固连失效接触模型

### 2.3 模拟结果及分析

为了分析各因素,如材料强度、规范要求的构

造措施等,对填充墙框架倒塌模式的影响,采用多个工况进行对比分析.工况1:作为参考算例,无任何构造措施且考虑砂浆强度等级较低为M5;工况2:考虑砂浆强度等级的影响,即提高砂浆强度等级为M7.5;工况3:在工况1基础上,与两端柱设置贯通拉结筋措施;工况4:在工况1基础上,与梁柱均设置拉结筋措施.

工况1的框架填充墙倒塌过程,分析结果如图10所示.图中给出的结果均是以单元网格形式,可以看到单元之间的接触情况.在 $t = 1.0 \sim 3.0$  s时,由于地震动的幅值大,靠近梁上部的首层填充墙砌块很快达到其抗剪与抗拉强度而首先滑落脱落,进而下部砌块也跟着脱落倒塌,如图10(a)~(c)所示.经过上述破坏之后,砌体填充墙整体性较差,紧接着又有较大的地震动幅值输入,砌体又大量倒塌.到 $t = 6.0$  s时,填充墙砌块则大部分倒塌,如图10(d)所示.模拟结果和实际震害是比较一致的,如图6所示.模拟结果充分说明了没有任何构造措施且砂浆强度较低的填充墙在地震动作用下,较早也较容易脱离框架而出现倒塌现象.

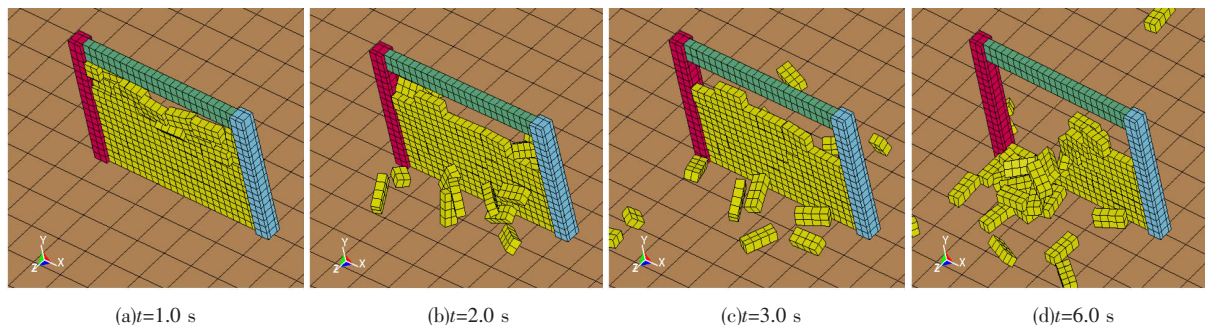


图10 无拉结筋, M5 砂浆等级填充墙框架倒塌过程

工况2为无水平拉结筋构造措施,砂浆等级为M7.5时,填充墙框架的破坏过程,分析结果如图11所示.由于砂浆等级较高,其抗拉和抗剪强度均比较大,到 $t = 2.7$  s时,靠近梁上部个别砌块才相对滑移较大,往外倾斜,接近倒塌,如图11(a)所示.到地震作用结束( $t = 6.0$  s)时,填充墙砌块之间基本能够保持良好的整体性,仅靠近梁上部砌块掉落,但并没有出现大量砌块滑落脱落现象,部分变形较大接近脱落,在后续的地震作用可能仍会倒塌,如图11(b)所示,说明提高砂浆等级对防止和延迟砌块脱落倒塌能起到一定的作用,但不是最有效的方法.

工况3为有水平拉结筋构造措施的填充墙破坏情况,分析结果如图12所示.该算例在工况1的基础上,设置贯通的水平拉结筋.钢筋节点与柱

及填充墙砌块节点均耦合在一起.在整个地震作用过程中,由于钢筋对砌块的约束作用,且钢筋每隔一层砌块设置一道,设置间距较小,使砌块保持较好的整体性,框架填充墙整体晃动;直至 $t = 6$  s时,靠近梁上部的填充墙砌块往外突出,并不脱落,结构始终能保持整体不倒塌.因此,说明拉结筋措施能比较有效地防止填充墙砌块的平面外倒塌.

工况4的填充墙破坏情况,分析结果如图13所示.本算例在工况3的基础上增加与梁的拉结筋措施,拉结筋节点分别与砌块和梁的节点耦合一起,使之变形协调.在地震作用整个过程中,由于钢筋对砌块的约束作用,且设置间距较小,使砌块保持良好的整体性,框架填充墙整体晃动,靠近梁上部的填充墙砌块由于两侧钢筋的约束作用,

前后左右晃动,并不脱落;直至最后,结构始终保持整体不倒塌,且变形较小. 因此,说明与框架边界施加拉结筋措施能有效地防止填充墙砌块的抗倒塌能力.

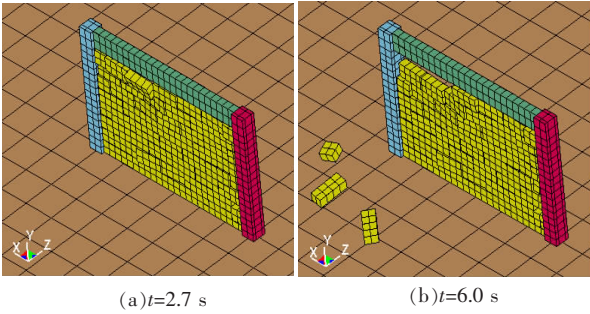


图 11 工况 2 填充墙框架破坏过程

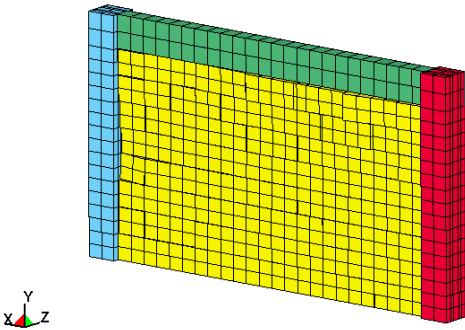


图 12 工况 3 填充墙框架破坏情况

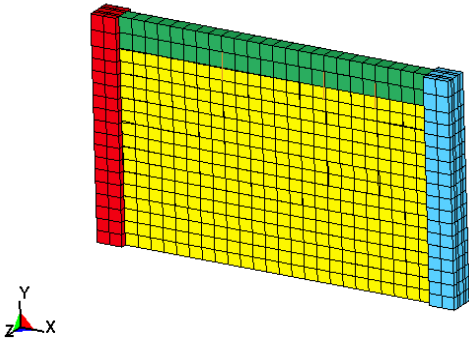


图 13 工况 4 填充墙框架破坏情况

3 结 论

1)在往复地震作用下,填充墙典型震害形式主要有水平裂缝、斜裂缝、X 型裂缝、平面外倾斜、

角部压碎和局部或整体倒塌等情况,应当极力避免由于没有设置任何构造措施而导致填充墙倒塌伤人,汶川地震灾区发现不少这种情况.

2)数值计算软件 LS - DYNA 能够很好地模拟填充墙的倒塌过程,有助于深入了解填充墙的破坏机理.

3)提高砂浆强度等级,设置合理的构造措施,如设置拉结筋措施,可以有效地提高填充墙的防倒塌能力;建议对于八度设防烈度以上的填充墙框架结构,除设置全长贯通拉结筋外,应适当减小设置间距,并采取其他适当的构造措施,如设置钢筋(丝)网,以确保填充墙砌块不倒塌伤人.

参考文献:

[1] 清华大学,西南交通大学,北京交通大学土木工程结构专家组. 汶川地震建筑震害分析[J]. 建筑结构学报,2008,29(4):1-9.

[2] GB 50011—2001. 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2001.

[3] SHING P B, MEHRABI A B. Behavior and analysis of masonry-infilled frames[J]. Prog Struct Engng Mater, 2002, 4:320-331.

[4] KLINGNER, BERTERO V V. Infilled frames in earthquake-resistant construction; report EERC176 - 32 [R]. Berkeley: Earthquake Engineering Research Center, University of California,1976.

[5] BERTERO V V, BROKKEN S. Infills in seismic resistant building[J]. Journal of Structural Engineering, 1983,109(6):1227-1361.

[6] SCHMIDT T. Experiments on the nonlinear behavior of masonry infilled reinforced concrete frames[J]. Darmstadt Concrete, Annual Journal on Concrete and Concrete Structures,1989, 4:185-194.

[7] MEHRABI A B, SHING P B, SCHULLER M P, et al. Experimental evaluation of masonry-infilled R/C frames[J]. Journal of Structural Engineering, 1996, 122(3):228-237.

[8] GB 50003—2001. 砌体结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.

(编辑 魏希柱)