填充墙震害数值模拟与对策讨论

张炎圣，马千里，陆新征，叶列平
（清华大学土木工程系，北京，100084）

摘要：在 5•12 汶川地震中，大量框架结构和框架-剪力墙结构虽未出现主体结构破坏，但是填充墙大量开裂，造成严重财产损失，有些填充墙甚至倒塌，造成人员伤亡。因此为实现性能化抗震设计，有必要开展填充墙的震害分析。本文基于灾区建筑震害调查和非线性有限元，对填充墙震害进行了数值模拟与对策讨论。

关键词：填充墙，震害，性能化设计，数值模拟，对策

1 概述

在 5•12 汶川地震中，大量框架和剪力墙结构虽未出现主体结构破坏，但是填充墙破坏严重。填充墙的砌块和砂浆抗拉强度都不高，其界面的粘结强度也较低，加之施工质量难以保证，使得砌体墙在地震作用下很容易开裂，严重时还会出现错位甚至倒塌[1]。灾区现场观察到的填充墙震害包括以下几种：

1）斜向或交叉斜向剪切裂缝（图 1）；
2）水平或竖向墙体-框架界面裂缝（图 2）；
3）填充墙局部砌块脱落（图 3）；
4）填充墙倒塌（图 4、图 5）。

图 1　墙体交叉斜向裂缝

图 2　墙体-框架界面裂缝

图 3　墙体局部砌块脱落

图 4　填充墙倾倒

图 5　墙体倒塌

填充墙开裂虽然不影响结构安全性，但会引起居民的的心理恐慌。此外，大量的修复工作还会造成严重的财产损失。而填充墙倒塌的后果则更加严重，会增加人员伤亡数量。减轻填充墙震害，可以通过以下两个途径：

1）改进填充墙的构造措施[2]。填充墙的变形能力，包括抗裂能力和抗倒塌能力，很大程度上受构造措施影响。合理的构造措施，如设拉结钢筋、构造柱、水平系梁等，能够有效增强填充墙变形能力，避免填充墙的严重破坏。

2）强化基于性能的抗震设计[3]。根据填充墙变形能力和经济承受能力，合理确定建筑抗震性能设计目标，特别是变形设计目标，从而控制填充墙等非结构构件在不同预定地震水准下的破坏程度。

以上两个途径，都要基于对填充墙破坏机理和变形能力的研究。由于涉及砌块、砂浆两种材料及其界面的复杂力学行为，以及施工的高离散性，砌体的力学行为十分复杂。数值模拟为砌体力学行为分析提供了有力工具，离散元[4]、有限元[5]等数值方法都被用于砌体力学行为分析。本文采用有限元法对填充墙震害进行数值模拟与分析，为改进填充墙构造措施和基于性能抗震设计提供依据。

2　有限元模型

本文主要借助有限元方法研究为采用抗震措施的填充墙和采用各种不同抗震措施填充墙的受力机理及其变形能力，为填充墙抗震性能的研究和设计计算提供依据。分析模型为一单榀单层框架及其填充墙，柱距 5m，层高 3.6m。柱截面为 450mm×450mm，梁截面为 500mm×250mm。填充墙的破坏模式主要有两种，一是面内开裂，二是面外倒塌，本文分别针对这两种破坏模式进行建模分析。

对于面内开裂问题，分析灾区常见的 120 厚实心砖隔墙，砌块尺寸为 240mm×115mm×

50mm，砂浆厚度为 10mm。基于 MSC.MARC 软件，采用平面应力单元建模分析（图 6）。墙体单元尺寸均为 10mm×10mm，单元数量达到 12.5 万，精细的网格划分保证了开裂分析的精度。框架材料采用线弹性本构，砖和砂浆采用基于最大拉应力准则的弥散裂缝本构，抗拉强度根据文献[6][7]取值，列于表 1 中。

对于面外倒塌问题，分析 240 厚实心混凝土砌块墙，砌块尺寸为 880mm×240mm×380mm[8]，灾区有类似的大砌块填充墙（图 1）。基于 LS-DYNA 软件，采用实体单元建模分析（图 7）。框架和砌块材料采用线弹性本构，不对砂浆建模，而是通过固连失效接触模型（Tied-break contact）考虑砂浆的影响[9]。固连失效接触模型基于砂浆的抗拉强度和抗剪强度建立固连失效准则，初始时刻砌块和砌块之间，以及砌块和框架之间互相固连，当接触拉应力和剪应力达到一定值时，固连作用就会失效，从而接触体间可以分离或者滑移。砂浆抗拉强度和抗剪强度按混凝土砌块加 M7.5 级砂浆，取规范规定[10]值，列于表 1 中。

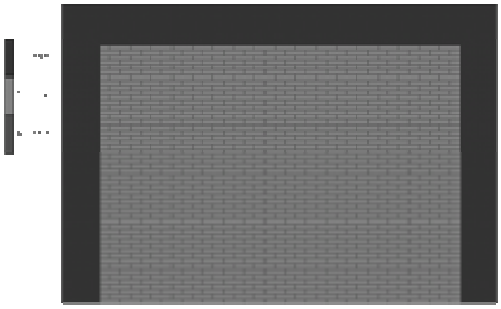

图 6　MSC.MARC 有限元模型

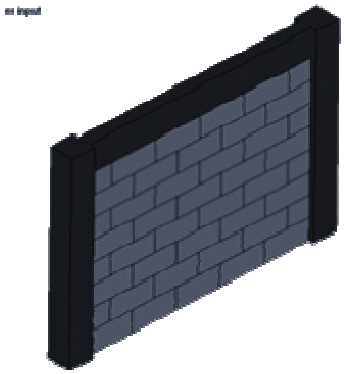

图 7　LS-DYNA 有限元模型

表 1　有限元模型参数

MSC.MARC 模型参数		LS-DYNA 模型参数	
砖抗拉强度/MPa	0.58	砂浆抗拉强度/MPa	0.08
砂浆抗拉强度/MPa	0.36	砂浆抗剪强度/MPa	0.08

3　模拟结果及其分析

3.1 两种破坏模式仿真

图 9 显示面内反复加载的裂缝分布情况。由于显示结果为单元历史最大开裂应变云图，除了当前荷载产生的裂缝，历史上相反方向荷载产生的裂缝也能予以显示，于是形成两条交叉斜向裂缝，与图 1 震害现象吻合良好。图 10 显示双向反复加载的填充墙倒塌情况，也与图 5 震害现象吻合。可见，本文有限元模拟能够真实再现填充墙震害。

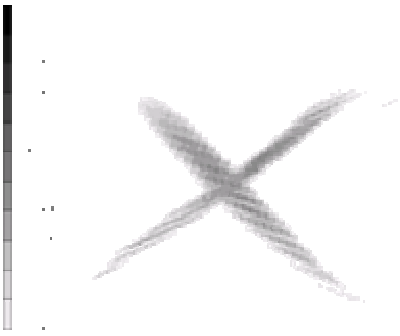

图 9　面内交叉裂缝

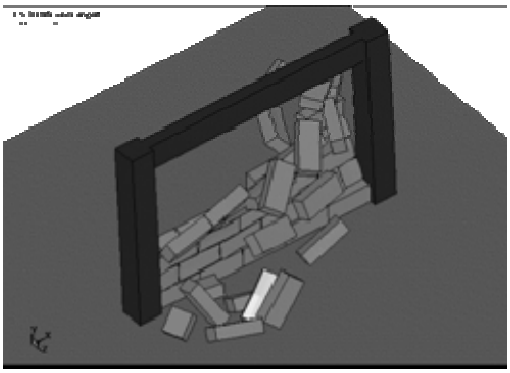

图 10　面外砌块倒塌

3.1 开裂机理和抗裂能力

图 11-15 显示面内单调加载裂缝发展过程：受拉侧出现竖向墙体-框架柱界面裂缝（图 11）——墙体受拉侧、对角线以及墙体-框架梁界面的砂浆大面积开裂（图 12）——砌块开裂，形成墙体斜向裂缝（图 13）——墙体斜向裂缝不断发展（图 14，15）。要注意到，开裂机理与砌块、砂浆的抗拉强度比有关。本文砂浆强度低于砌块强度，所以砂浆先开裂。而对于高强砂浆，则可能砌块先开裂。

图 11-15 显示的是开裂应变，开裂应变乘以垂直裂缝方向单元尺寸，可得裂缝宽度。图 11-15 所示最大开裂应变对应的最大裂缝宽度分别为 0.024mm，0.029mm，0.109mm，0.265mm，1.579mm。不同层间位移角下的最大裂缝宽度，反映了填充墙的抗裂能力，可以据此确定建筑抗震性能设计目标，特别是变形设计目标，从而控制填充墙在不同预定地震水准下的破坏程度。

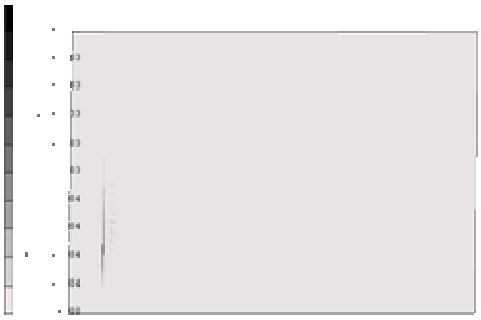

图 11　1/3500 层间位移角开裂应变

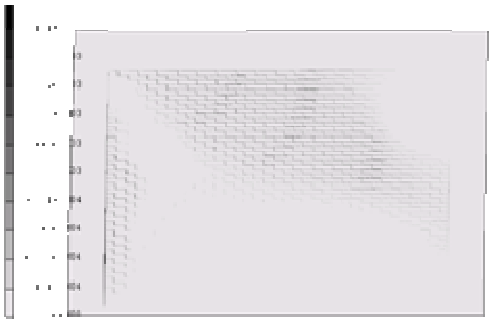

图 12　1/2500 层间位移角开裂应变

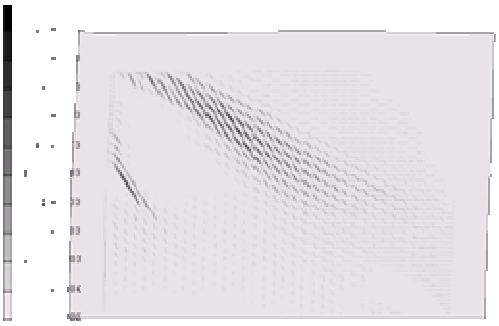

图 13　1/1200 层间位移角开裂应变

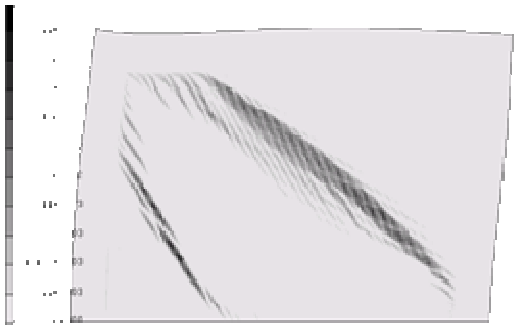

图 14 1/550 层间位移角(小震限值)开裂应变

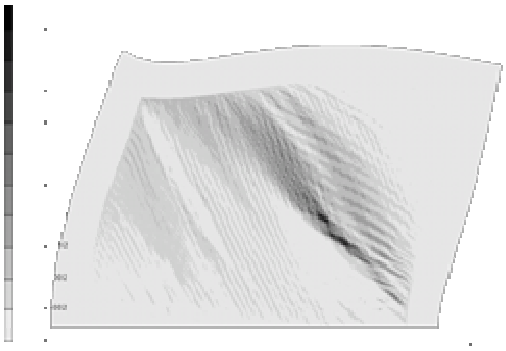

图 15 1/50 层间位移角（大震限值）开裂应变

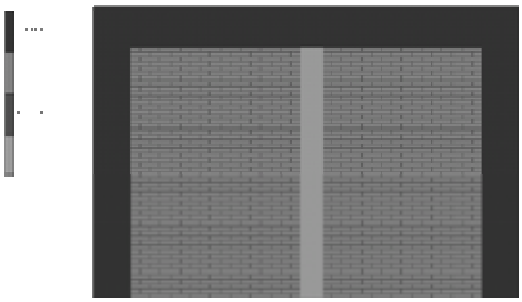

图 16　设构造柱

3.2 抗裂构造措施及其效果

本文考虑三种构造措施对填充墙抗裂能力的影响：填充墙中部设一根 120mm×240mm 构造柱（图 16）；填充墙中部设一根 120mm×240mm 构造柱，层高中部设一根 120mm×240mm 系梁（图 17）；沿层高每隔 500mm 设 2Φ6 水平钢筋（图 18）。

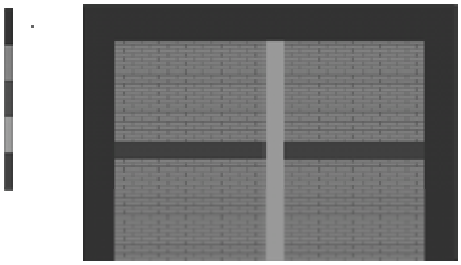

图 17　设构造柱和水平系梁

图 18　设水平拉结钢筋

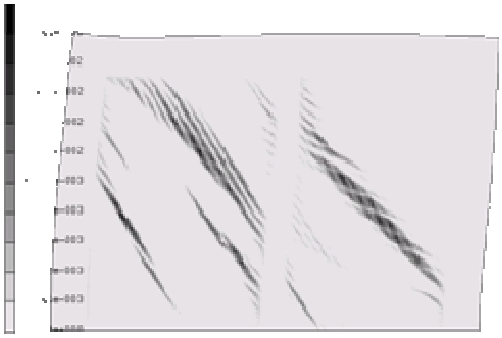

图 19 设构造柱开裂应变云图

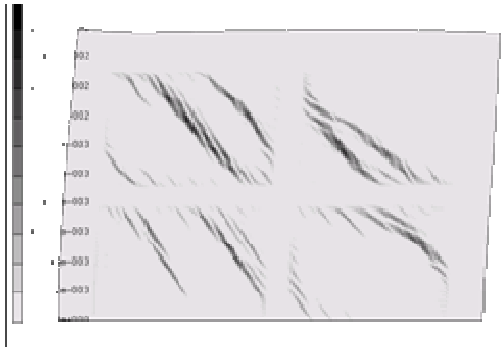

图 20 设构造柱和水平系梁开裂应变云图

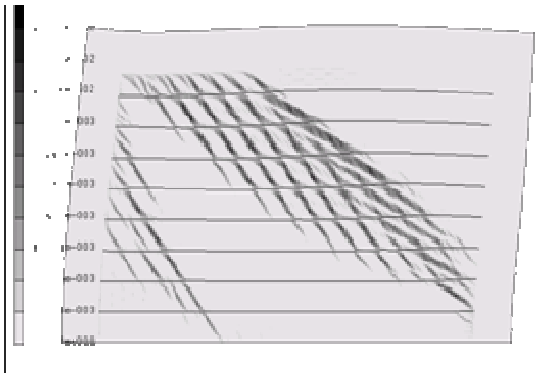

图 21 设水平拉结钢筋开裂应变云图

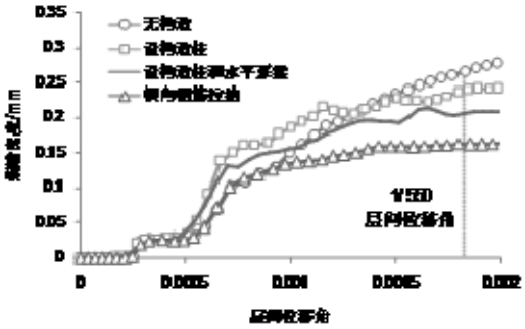

图 22 小震下最大裂缝宽度-层间位移角曲线

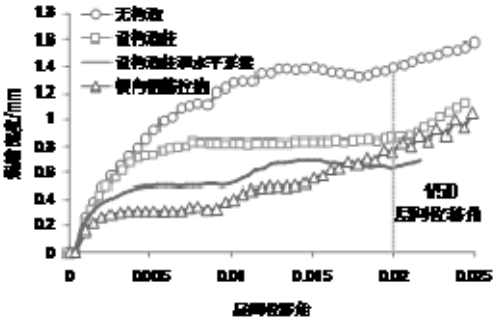

图 23　大震下最大裂缝宽度-层间位移角曲线

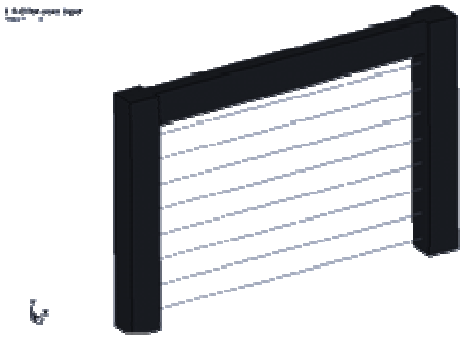

图 24　设水平拉结钢筋 LS-DYNA 模型

图 19-21 显示 1/550 层间位移角时三种构造措施的开裂应变云图。图 22 显示小震水平各构造措施下最大填充墙体裂缝宽度-层间位移角曲线，图 23 显示大震水平各构造措施下最大填充墙体裂缝宽度-层间位移角曲线。图 22，23 表明，设构造柱、水平系梁和水平拉结钢筋均能减小裂缝宽度，从而提高填充墙变形能力。其中，在小震和中震水平下，设拉结钢筋的效果最好，达到大震水平后，设构造柱和水平系梁的效果越来越明显。

裂缝宽度是反映开裂情况的主要指标，因此填充墙修复措施可以根据裂缝宽度合理制定

[11]。裂缝宽度小于 0.2mm 时，如果裂缝较浅，只需用水泥浆液或环氧树脂胶泥进行表面修补，如果裂缝较深，需要进行灌注补强；裂缝宽度在 0.2mm~0.5mm 时，宜用收缩较小的环氧树脂浆液灌注补强；裂缝宽度在 0.5mm~1mm 时，需用水泥砂浆进行灌注补强；裂缝宽度大于 1mm，则要进行专门的加固设计，甚至拆除重建。表 2 列出各构造措施下最大裂缝宽度达到 0.5mm 和 1.0mm 时的层间位移角。可见，对于延缓 0.5mm 裂缝的出现，效果最好的是设拉结钢筋，其次是同时设构造柱和水平系梁，仅设构造柱的效果不明显。而对于延缓 1mm 裂缝的出现，设拉结钢筋、水平系梁和构造柱的效果相当。

表 2　各构造措施最大填充墙体裂缝宽度对应的层间位移角

最大填充墙体裂缝宽度		0.5mm	1.0mm
层间位移角	无构造措施	1/380	1/140
	设构造柱	1/420	1/38
	设构造柱和水平系梁	1/180	>1/46
	设水平拉结钢筋	1/70	1/40

3.3 抗倒塌构造措施及其效果

填充墙开裂尚可修补，但填充墙倒塌则不但不可修，而且会造成人员伤亡，因此必须避免填充墙的倒塌。本文讨论设水平拉结钢筋对填充墙抗倒塌能力的影响，沿层高方向每隔 380mm 设 2Φ6 水平钢筋（图 24）。

图 25-32 比较了不设水平拉结钢筋和设置水平拉结钢筋的填充墙破坏情况。无拉结墙体在地震下发生倒塌，而水平拉结钢筋能有效防止墙体倒塌。

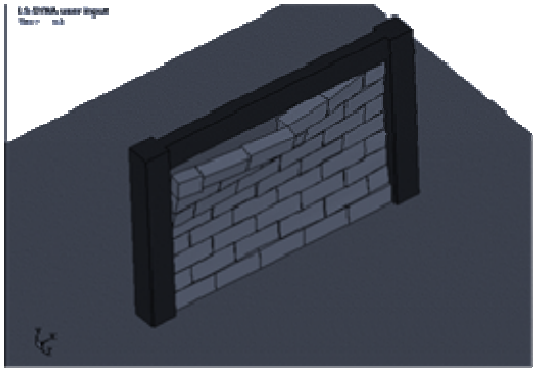

图 25　t=0.5s，无水平拉结钢筋破坏情况

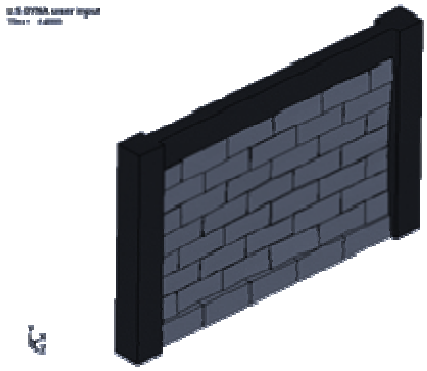

图 26　t=0.5s，有水平拉结钢筋破坏情况

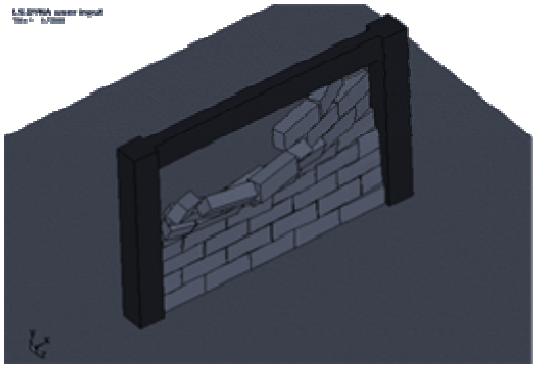

图 27　t=0.75s，无水平拉结钢筋破坏情况

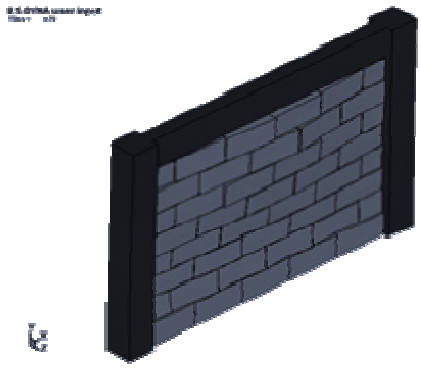

图 28　t=0.75s，有水平拉结钢筋破坏情况

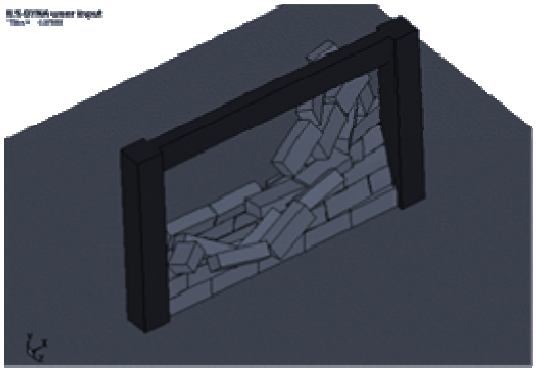

图 29　t=1.0s，无水平拉结钢筋破坏情况

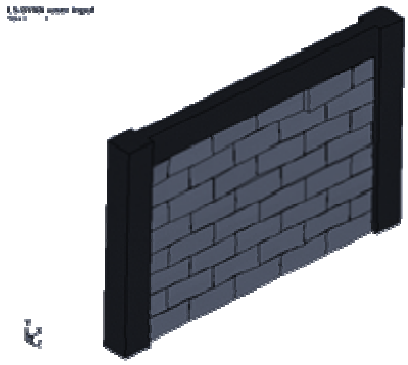

图 30　t=1.0s，有水平拉结钢筋破坏情况

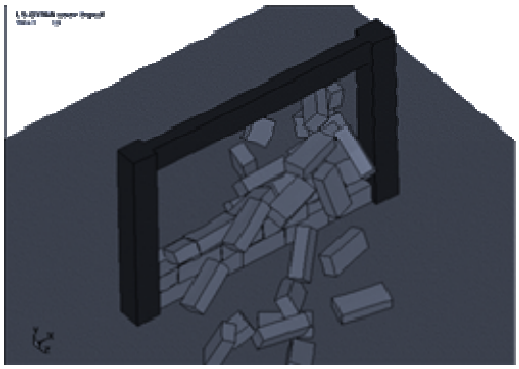

图 31　t=1.5s，无水平拉结钢筋破坏情况

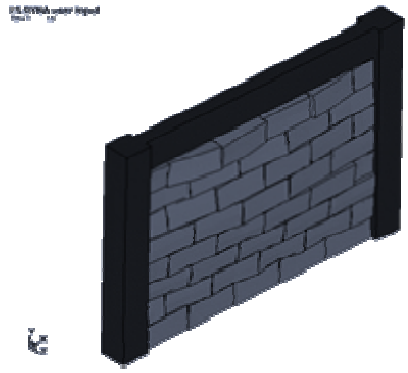

图 32　t=1.5s，有水平拉结钢筋破坏情况

4　结论

本文基于汶川地震填充墙震害的调查和非线性有限元，对填充墙震害进行数值模拟，并对防止填充墙震害的对策进行讨论，得到如下结论：

1）非线性有限元能够很好模拟填充墙的震害过程，有助于深入了解填充墙的破坏机理和变形能力，从而为基于性能抗震设计提供依据。

2）合理的构造措施，如设置构造柱、水平系梁、拉结钢筋等，能够有效提高填充墙变形能力，包括抗裂能力和抗倒塌能力。可据此进一步开展结构的性能化抗震设计和实验研究，结合实际震害情况进行分析，提出增强填充墙抗震性能的具体措施，以减少填充墙体地震破坏造成的经济损失和对人员生命威胁。

参考文献

[1]　唐群诗. 砌体结构的主要震害特征及抗震设计[J]. 国外建材科技, 2007,28(6):71-73.
[2]　张亚文,孙倩. 砌体结构的一般构造措施探讨[J]. 科技园, 2006,3:58-59.
[3]　张瑞甫,苗吉. 基于性能的结构抗震设计研究[J]. 山西建筑, 2007,33(15):69-70.
[4]　刘汉阳. 砌体结构的软化机理与离散元分析[J]. 河北建筑工程学院学报, 2000,18(1):1-5.
[5]　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.
[6]　张中脊,杨伟军. 蒸压灰砂砖砌体砂浆与块体强度最优组合试验研究[J].砖瓦世界, 2007,3:31-34.
[7]　周达,杨伟军. 高性能砂浆的抗裂性能试验研究[J]. 建筑砌块与砌块建筑, 2007,1:6-9.
[8]　覃维祖. 结构工程材料[M]. 北京:清华大学出版社,2003.
[9]　张正威, 宋二祥, 陆新征, 陈肇元, 核爆冲击波作用下空心砌块墙对主体结构的作用[J]. 工程力学, 2008, 25(5): 73-78.
[10] 砌体结构设计规范[S].GB 5003-2001,2002.
[11] 朱志华. 砌体结构裂缝处理的若干办法[J].科技信息,2006,7:62-62.