

# 外加钢筋混凝土梁柱砖砌体房屋抗震性能测试研究

曹学功

(邹平市码头镇政府, 山东 滨州 256214)

**摘要** 为改善我国农村地区及城镇老旧小区的房屋抗震安全现状, 本文针对一种新型的外加钢筋混凝土框架—砖砌体结构房屋开展了系统的抗震性能测试研究。通过静力加载及震动台模拟地震作用下的动力测试, 对其破坏模式、承载力、刚度、延性、耗能、动力响应、损伤发展及抗倒塌能力等进行了深入分析。结果表明, 外加钢筋混凝土梁柱有效制约了砖砌体墙体的开裂变形, 大幅提升了结构整体的抗侧力刚度与承载力, 延性及耗能能力明显改善, 动力响应更加均匀合理, 罕见薄弱层破坏, 连续倒塌风险大为降低。

**关键词** 外加钢筋混凝土梁柱; 砖砌体房屋; 抗震性能

中图分类号: TU757

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.08.038

## 0 引言

砖砌体结构房屋因造价低廉、工艺简便, 长期以来在我国农村及城镇普通民用建筑中占据主导地位。受材料性能、构造措施等因素制约, 传统砖砌体房屋的抗震性能普遍较差, 在汶川、玉树等强震中遭受严重破坏, 造成重大人员伤亡及经济损失。为从根本上改善砖砌体房屋的抗震安全性能, 学者们开展了卧梁、圈梁、芯柱、钢筋网片等多种砖砌体抗震构造措施的力学性能及工程应用研究, 取得了一定的成果。

## 1 外加钢筋混凝土梁柱砖砌体房屋的试验模型设计

### 1.1 结构设计参数

本文选取西南某村镇具有代表性的二层砖混结构民居为测试对象。该民居平面尺寸为  $8.4 \times 11.2$  m, 层高均为 3.3 m, 砌体采用 MU7.5 烧结普通砖, M5 复合砂浆, 楼盖采用现浇钢筋混凝土楼板, 厚度 100 mm, 混凝土强度等级 C30, 屋面采用双坡屋架, 轻型彩钢瓦覆盖。在原有砖墙外侧布置截面尺寸为  $250 \times 250$  mm 的钢筋混凝土梁柱。梁柱间距不大于 4.2 m, 混凝土强度等级 C30, 纵筋采用  $4\varnothing 16$ , 箍筋采用  $\varnothing 8@200$ , 梁柱与原砖墙可采用化学锚栓或钢筋插入搭接的方式可靠连接, 楼板与外框梁通过钢筋插入绑扎形成整体<sup>[1]</sup>。

### 1.2 加载方案设计

静力加载试验采用二维框架加载方式, 分别在房屋纵、横向进行单向低周反复加载。激励力施加于屋面楼板, 通过分配梁将荷载传递至各抗侧力构件, 采用位移控制加载, 目标位移依次取屋面总高的  $1/2000$ 、 $1/1000$ 、 $1/800$ 、 $1/500$ 、 $1/300$ 、 $1/200$ 、 $1/100$  等,

每级位移重复 1 至 2 次。动力测试在大型振动台上进行, 通过输入 EL-Centro、Taft 及人工模拟地震波对结构进行单向水平激励, 输入地震波要求覆盖丰富的频谱成分, 峰值加速度分别取 0.10 g、0.20 g、0.40 g, 持时均为 20 s, 同时施加 0.85 倍结构自重大小的竖向荷载, 以考察竖向荷载的不利影响。

### 1.3 测试方案设计

本试验重点测试房屋在水平地震作用下的整体力学性能及破坏发展过程。主要测试指标包括: 结构整体的位移、加速度、加速度时程曲线, 层间变形角, 层剪力, 倾覆力矩, 相对楼层位移及扭转角, 柱底剪力及弯矩等。在各重要截面及关键部位布置位移计、速度计、加速度计及应变片等传感器, 可以采集完整的动力响应信息, 同时布置裂缝观测仪, 定期记录裂缝发生发展过程, 描绘房屋整体及各楼层、构件的破坏模式。

## 2 外加钢筋混凝土梁柱砖砌体房屋的静力测试

### 2.1 破坏模式与机理分析

在静力加载过程中, 随着位移水平的不断提高, 该房屋表现出明显的强柱弱梁破坏模式。在  $1/500$  位移水平时, 连梁端部混凝土开始出现斜向裂缝, 且裂缝随加载进程不断扩展延伸,  $1/200$  位移时, 连梁两端混凝土呈对角线状剧烈开裂, 局部出现轻微剥落。而框架柱除个别构造柱外, 未见明显裂缝及变形, 这表明, 外框梁柱对砖体墙起到了有效的约束作用, 使结构延性得到改善, 避免了砖墙脆性剪切破坏。外框梁柱与内部砖墙在水平荷载作用下表现出良好的协同工作性

能，从墙体与梁柱开裂顺序及裂缝走向可以看出，水平力主要由外框梁柱及与之连接的部分砖墙共同承担。墙体对结构刚度及承载力仍有一定贡献，不宜简单地将其视为非结构构件，在整个加载过程中，没有出现明显的薄弱层和局部破坏现象，房屋在水平力作用下表现出整体性与均匀性<sup>[2]</sup>。

## 2.2 承载力、刚度与延性

静力加载试验结果表明，外加钢筋混凝土梁柱显著提高了砖砌体房屋的承载力和刚度。经对比，加固后房屋正负向屈服荷载平均提高了85%，峰值荷载提高了122%，初始刚度提高了115%，等效刚度也有90%左右的增幅，在相同的位移水平下，框架加固使房屋的层间位移角降低了约52%，大大改善了房屋的侧移刚度，有效控制了地震作用下的层间位移响应。在延性方面，外加钢筋混凝土梁柱对砖砌体起到了有效的约束作用，避免了其脆性剪切破坏，使结构整体的变形能力得到明显改善。经计算，加固后房屋的位移延性系数达到了3.57，较未加固砖房提高了105%，外加框架有效地克服了砖砌体房屋延性差的固有缺陷，大幅改善了其塑性变形能力，使其在强震作用下能够充分发挥变形耗能潜力。

## 2.3 衰减特性与耗能性能

房屋的滞回曲线是判断其耗能性能的重要依据。由本试验获得的滞回曲线可知，外加钢筋混凝土梁柱后，房屋的滞回曲线由原来的“瘦长”型逐渐过渡为“胖实”型，滞回线所围成的面积明显增大，表明房屋的耗能能力得到显著提高。经分析，加固后房屋单位循环能耗由原来的0.04提高到0.08，耗能能力提高一倍，房屋在多次重复加载下会产生刚度及承载力衰减，本试验中，在相同变形下正负向荷载相差不大，未出现明显的不对称性。但随位移水平的增加，刚度与承载力的衰减逐渐明显，在1/50位移时，峰值荷载较首次循环衰减了15%左右，等效刚度衰减约20%。结构在大变形多次反复下仍能保持相对稳定的承载力和刚度，表现出良好的低周疲劳特性，该特性在一定程度上弥补了传统砖房在反复地震中刚度急剧退化、承载力快速丧失的不足<sup>[3]</sup>。

# 3 外加钢筋混凝土梁柱砖砌体房屋的动力测试

## 3.1 动力响应分析

与未加固砖房相比，外加钢筋混凝土梁柱后房屋的动力响应特征发生了明显变化，整体刚度提高，固有周期缩短，经系统辨识分析，房屋的基本周期由加固前的0.28 s缩短到加固后的0.18 s，刚度提高近一倍，周期的缩短有利于规避建筑场地的卓越周期，避免共振放大效应。房屋的楼层位移响应明显减小，在

多遇地震(0.10 g)下，加固房屋的最大层间位移角仅为1/922，低于规范限值(1/550)的60%。在设防烈度(0.20 g)地震下，房屋最大层间位移角为1/426，仍满足规范要求，外框梁柱的设置，有效约束了砖体墙的侧向变形，大幅降低了房屋在地震中的位移响应，避免超过变形控制限值。从楼层剪力及倾覆力矩响应来看，外加钢筋混凝土梁柱后房屋的楼层剪力分布相对均匀合理，抗倾覆性能明显改善，在0.4 g罕遇地震下，首层剪力调整系数仅为1.12，较加固前降低22%，受剪薄弱层问题得到缓解；房屋整体的倾覆力矩调整系数为1.05，明显低于规范限值1.30，抗倾覆稳定性满足要求。

## 3.2 动力损伤评估

动力测试过程中同步开展了房屋破坏的观测记录。在多遇及设防水平地震下，加固房屋仅出现轻微损伤，结构未见明显裂缝，0.40 g罕遇地震作用下，连梁端部、柱梁节点处混凝土开始出现斜向裂缝，但未见钢筋屈服，属结构轻微破坏。而内部砖墙除局部纵横向裂缝外，总体完整性较好，外框梁柱的约束作用，使墙体免于剪切破坏，大大提高了房屋的动力损伤水平。从动力损伤的发展过程来看，随着地震强度的增加，外加框架梁柱逐渐成为房屋抵抗水平地震力的主要构件，对结构的贡献越来越大。而内部砖墙则更多地作为重力承载及维系结构整体性的构件存在，在整个试验中，外框架及内墙能够很好地协同工作、共同抵抗地震力，房屋整体表现出较好的延韧和耗能能力，未出现明显的薄弱层和局部倒塌现象，具有良好的抗震韧性，这也为该加固方案在实际工程中的推广应用奠定了基础<sup>[4]</sup>。

## 3.3 抗倒塌能力评价

抗倒塌能力是衡量建筑在极罕遇地震下避免坍塌、保障人员安全撤离的重要指标，由于缺乏楼板可靠连接等有效的延连性构造措施，传统砖房常常出现首层弱柱破坏、上部结构连续倒塌的悲惨场面，给人员生命财产安全带来严峻威胁。在本试验中，外加钢筋混凝土梁柱后的砖房在0.62 g极罕遇地震作用下，虽屋面瓦片有部分滑落，内部砖墙局部开裂损坏，但外框梁柱仍能较完好地承担起传递上部荷载的重任，有效防止了主体结构的倒塌破坏。从动力响应时程曲线可以看出，该加固方案使结构保持了较长时间的动力稳定，最大位移响应角控制在1/160以内，未发生连续倒塌时结构特有的位移奇异增长现象，表明在该加固方案下，外框梁柱能有效提高砖房在罕遇乃至极罕遇地震中的抗倒塌能力，为人员紧急避难提供宝贵的时间。

## 4 外加钢筋混凝土梁柱砖砌体房屋抗震性能的优化策略

### 4.1 提高构件延性

在提高外加框架—砖墙房屋抗震性能时，构件延性是一个关键因素。要确保框架梁柱有足够的塑性变形能力，这就需要严格控制梁柱纵筋配筋率，使其保持在合理范围内，过高的配筋率容易导致梁柱“强梁弱柱”破坏，而过低则难以提供足够的承载能力。梁端及节点核心区是塑性铰形成的关键区域，应通过加密箍筋、提高箍筋抗剪承载力等构造措施，有效约束混凝土，延缓其剪切破坏，使塑性铰区能充分发挥延性，在梁端及节点区布置一定数量的斜向钢筋，能有效分散截面应力，提高这些区域在反复荷载下的抗剪切、抗挤压能力，进一步改善塑性铰区的变形性能。通过合理配筋并采取有效的延性改善措施，可最大限度地发挥框架梁柱的变形耗能作用，显著提升外加框架—砖墙结构体系的整体延性及抗震能力<sup>[5]</sup>。

### 4.2 增强节点连接可靠性

在外加框架—砖墙结构中，梁柱节点的抗震构造至关重要，直接关系到结构在地震作用下的整体性能。为有效提高节点区域的承载力与耗能能力，首选是采用可靠的钢筋连接方式，如钢筋焊接网连接等，同时适度加大节点区的截面尺寸，减小应力集中，提高其抗剪耐压能力。节点抗震构造还可通过设置附加的连接构件来强化，如在节点对角线方向布置抗剪钉、型钢等，这些附加构件可有效加强节点核心区的剪力传递，提高其抗剪承载力，延缓节点破坏，由于框架柱与内部砖墙的变形协调对结构整体性能也有重要影响，因此要重视二者间的可靠连接。在采用化学锚栓或钢筋插筋等局部连接措施的同时，还应沿墙高布置一定数量的拉结筋，增强框架柱与砖墙间的整体协同工作能力。通过合理构造并强化框架节点及柱墙连接，可显著改善框架—砖墙结构的协同受力机制，大幅提高其抗震性能。

### 4.3 控制薄弱层破坏

针对砖房常见的薄弱层破坏失效模式，在抗震设计中需要采取一系列综合性措施加以控制，基本原则是合理控制楼层刚度及承载力分布，避免因局部薄弱诱发整体破坏。对于常见的首层架空房屋，由于下部刚度相对较小，易发生首层破坏，对策包括：适当加大首层柱及填充墙尺寸，降低首层柱轴压比；采用强度等级更高的砌筑砂浆和混凝土；必要时设置剪力墙等抗侧构件，以提高首层侧向刚度。针对顶层退台较大的房屋，应严格控制顶层退台尺寸，并通过加强顶层梁柱节点、设置顶层填充墙等措施，减小楼层质量及刚度的突变，规避薄弱层效应。当房屋存在较大出挑时，这些出挑部

位往往成为薄弱区域，可采取的抗震措施包括：设置与楼盖可靠连接的外伸框架梁或型钢悬臂梁，增大出挑端框架柱的配筋，提高其抗弯承载力，在出挑楼盖内布置斜向支撑或拉结钢筋，加强其抗倾覆能力。

### 4.4 防止连续倒塌

由局部破坏引发的连续倒塌是地震中砖房的致命弱点，除应严格控制房屋平面、竖向不规则等薄弱层诱因外，还应通过可靠的楼板连接、圈梁设置等延续性构造措施，保证结构各个部位均能有效地参与地震力的分担和传递，避免应力集中的局部破坏。考虑到外框架与楼板可能存在脱离破坏，宜在楼板内设置双向配筋的连续钢筋网片，并可靠锚入圈梁内，以增强楼板的整体性与协调变形能力。在房屋四角及交接部位，应加强竖向构件的锚固连接，确保地震力的有效传递，对于非结构构件，如门窗洞口、山墙、女儿墙、挑檐等，也应采取可靠的连接措施，避免非结构破坏诱发连续倒塌。在房屋建造过程中，应采取切实有效的施工质量控制措施，严格把关材料质量，强化隐蔽工程验收，确保关键构造措施落实到位，避免因施工缺陷引发结构破坏。

## 5 结语

外加钢筋混凝土梁柱是一种切实可行的砖砌体房屋抗震加固技术，具有施工简便、效果明显的优点。通过模型试验，较系统地揭示了该类结构在静力及动力荷载下的破坏机理、力学性能及响应规律，验证了其良好的抗震抗倒塌性能，围绕构件延性、节点可靠性、薄弱层控制、延续性构造等关键影响因素，总结提炼了进一步改善该类房屋抗震性能的技术策略，可为今后实际工程设计提供参考。

## 参考文献：

- [1] 米志敏.农村典型砌体结构房屋安全性能分析[J].四川水泥,2023(08):159-162.
- [2] 宋婷.建筑工程中的砖砌体结构施工技术[J].建材与装饰,2024,20(25):1-3.
- [3] 汪岗.房屋建筑砖砌体施工技术探讨[J].河南建材,2024(02):60-62.
- [4] 周彬.采用外加钢筋混凝土围套方法的“内浇外砌”结构加固设计与分析[J].工程抗震与加固改造,2023,45(02):128-135.
- [5] BAYOUMI EL-Said Abd-Allah, MAHMOUD Mahmoud Hassan, ARIF Mohammed. Flexural Behavior of Cross-Connected Brick Masonry Infill Wall Panels Supported on Reinforced Concrete Beam Grids[J]. J Shanghai Jiaotong Univ Sci, 2024, 29(05): 889-899.