

# 底框砌体结构的 FRP 加固分析

王帆

西南林业大学

DOI: 10.12238/jpm.v5i9.7196

**[摘要]** 底框结构作为部分偏远地区或乡镇经济适用结构在世界各地有着大规模应用,但是根据近年地震破坏分析结果显示该结构通过现有加固方式加固后仍然存在连接层易损的结构缺陷,应该引入最新加固手段。为了研究该结构在玻璃纤维增强复合材料(GFRP)加固后的抗震性能,文章采用有限元建模进行地震模拟试验,通过单面墙模型验证了“X”型加固带加固效果优于“#”型加固带;通过三层墙模型证实了底框结构连接层易破坏的结论,同时证明了GFRP加固带能强化构造柱对地震力的传导和消散;通过底框结构整体模型证实了GFRP混合加固作用下结构的抗震性和结构整体性得到有效提高。文章结论为底框砌体结构后续的模式抗震性能研究和工程实践提供新思路和新方向。

**[关键词]** 底框砌体结构;底框结构;纤维增强复合材料;GFRP;有限元

## Analysis of the FRP reinforcement of bottom-frame masonry structures

Wang Fan

Southwest Forestry University, Kunming City

**[Abstract]** As an economically applicable structure in some remote areas or towns, the bottom frame structure has a large-scale application around the world. However, according to the analysis results of earthquake damage in recent years, it shows that the structure still has the vulnerable structural defects of the connection layer after the existing reinforcement method, so the latest reinforcement means should be introduced. In order to study the seismic performance of the structure after the reinforced glass fiber reinforced composite (GFRP), using finite element modeling, the reinforcement effect of "X" type reinforcement belt is better than the "#" through the single wall model, the conclusion that the connection layer of the bottom frame structure is proved through the three-layer wall model, and the GFRP reinforcement belt can strengthen the conduction and dissipation of the seismic force on the structure of the GFRP mixed reinforced structure through the overall model of the bottom frame structure. The conclusion provides new ideas and new direction for the subsequent model seismic performance research and engineering practice of the bottom frame masonry structure.

**[Keywords]** bottom frame masonry structure; bottom frame structure; fiber reinforced composite; GFRP; finite element

### 引言

底部框架结构特指底部由混凝土现浇框架与上部砖砌体和柱混合组成的一种适用于世界部分特殊地区的建筑结构(以

下称底框结构)。该结构下部属于常见混凝土框架结构,由结构中的梁、柱、板承受荷载,墙只做分割区域用途;而上部是由砖砌体加上混凝土构造柱形成的砖混结构,由砌体墙承受荷载。该结构在施工速度以及造价上有着比全框架结构房屋无可

比拟的优势（在满足相同的使用功能条件下，建筑造价要比钢筋混凝土框架结构房屋节省约 20%-25%[1]，同时在结构施工时，难度低工期短），其次上部砖混结构有着砌体结构的许多优点（建筑材料获取方便、施工简单、造价相对低廉和良好的耐久性、耐候性及耐火性等），极大满足人民群众在特定地点的生活需求。

由于底框结构属于混合结构，且框架结构与砌体结构在结构刚度和材料、自重上有着很大区别，一般是底框结构刚度小于上部砌体结构，这使得结构在竖向的刚度分布不均匀，在过渡层位置处结构的竖向刚度突变，容易发生破坏[2]；上部砖混结构的整体自重大于下部框架，在地震波的横向作用下，混合结构的连接层极易发生破坏。在对“5.12”汶川地震区域的震害调查中，房屋建筑倒塌破坏形式多种多样。其中针对底框结构的调查发现：

(1) 在震中区域，有的房屋上部砌体结构发生破坏，同时也存在着上部结构与底部结构均发生破坏垮塌的情况；

(2) 在距离震中较远的地震区域，该结构房屋则是底框部分受到破坏使得下部结构消失，上部结构骑坐在下部已破坏结构之上。刘艳辉[3]认为，这主要是因为连接层的侧移刚度与底部框架结构的侧移刚度之间的比例差距较大造成的。

现目前国内对于底框这种混合结构中的下部框架结构的加固方法主要是在合理位置设置抗剪墙等，提升底部结构的抗剪能力和耗能能力，同时通过在原构件截面上增配钢筋，提高结构的承载力和刚度，或使用高强度复合材料粘贴于关键节点，分担受力并延缓破坏。上部砌体结构部分大多数则是采用增设圈梁、梁垫，对局部砌体结构进行拆除和修补，目前最多采用在砌体墙外部添加钢筋网和钢丝网的方法，提高抗弯刚度和抗剪强度。但是普通的钢筋网和钢丝网在强度-厚度做了很多妥协，使得这些加固方法无一例外的需要增加结构截面积，提高结构自重。而目前国外对相关加固网材料有了新的研究成果，纤维增强复合材料（FRP），其轻质，满足截面小的要求的同时又能满足强度高的要求。对于这种新型加固材料针对砌体和混凝土框架结构的相关研究，国外有 Michael[16]等研究了不同纤维增强复合材料对墙体的加固效果，结果表明，粘贴 FRP 片材可以有效提高墙体的抗弯刚度；Triantafiliou[15]等研究发现了与未加固的墙片相比，粘贴 FRP 加固条可有效提高砌体墙片的抗剪强度。国内近些年对该新型加固材料也有研究，季长征[21]等研究了 FRP 对混凝土框架结构的抗震性能的影响进行了研究，证实了当框架结构在梁柱节点部位粘贴加固确实能够提高结构的整体抗震性能；唐永明[10]等试验表明混合锚固的 GFRP 加固后的砌体墙对比未加固甚至是纯外贴 GFRP 加固墙体，在墙体整体性、正反向承载力、变形能力和延性有明显提高。

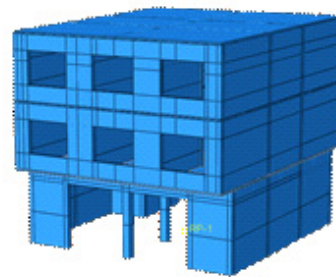
本文通过建立单面墙、三层墙、整体结构三种不同模型分别研究 FRP 不同粘贴方式对加固性能影响、研究地震来袭时连接层破坏情况、研究整体底框砌体结构在采用 FRP 加固后的抗震性能。本研究填补了国内在 FRP 加固的相关领域仅针对单一结构的空白。

## 1 有限元结构建模

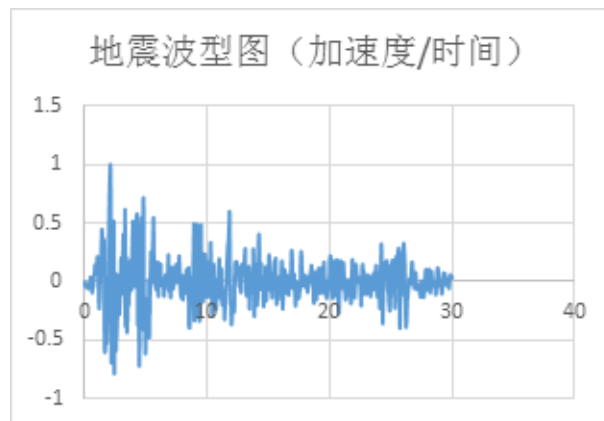
本文采用 Abaqus 有限元软件建模三层结构并添加 FRP 加固带输入地震波验证结构应力应变变化效果。

### 1.1 结构设计

该结构采用由底部一层混凝土框架结构外加上部两层砌体结构组成的混合结构。底部由四周 240\*240mm 的框架柱混合中部 400\*400mm 的框架柱和混凝土钢筋现浇梁组成，上部由 240mm 厚的砌体墙混合 240mm 构造柱与钢筋圈梁及楼板组成，采用混合粘贴方式的 FRP 加固。混凝土采用 C30，钢筋采用 HRB400，GFRP 采用玻璃纤维/环氧模型模拟，砌体结构采用 MU15 本构模拟。在整体模型底部设置 FR 耦合点耦合底部所有接触面并施加地震波幅值用以模拟地震波对结构的影响。本文模拟重点关注混合结构连接层的应力应变情况。



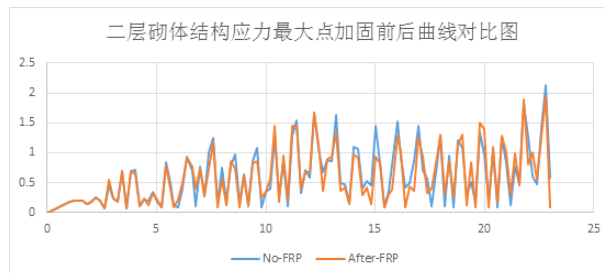
整体结构建模图



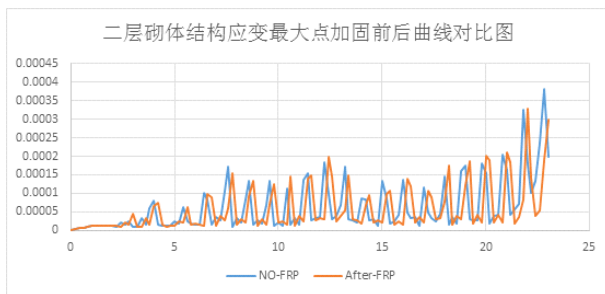
加载试验所用地震波形图

### 1.2 应变数据对比

作者通过将二层砌体结构单独显示，去除 GFRP 加固带，找到应力应变最大节点与加固前相应数据对比并分析得出其应力应变曲线，可以更加直观展现连接层在加固带作用下自身应力应变的变化情况。



通过上图可以明显观察到结构在加固前连接层应力波动更大, 加固后最大节点的应力大幅减小, 此结果证实 GFRP 的确有效的程度并消散了大部分地震波传导上来的应力, 符合小模型的模拟结果特点。



通过上图也可明显发现连接层在未加固下的最大应变逐渐增大, 符合结构的应变特性, 并且在分析步末端发生较大应变, 这可能会导致结构破坏。而结构在引入 GFRP 加固后, 可以看到应变的变化幅度相较于未加固结构有了降低, 这符合加固前后应力对比图变化特性, 同时加固后的应变的末端变化大幅低于未加固应变, 这意味着加固后的结构震后存续性更好, 并且证明加固带对结构的加固确实有效。

## 2 讨论

对底框砌体这种混合结构使用复合材料进行抗震设计, 总体上有很好的效果, 但是也存在一些问题值得我们注意。

(1) 本文采用 Abaqus 有限元软件进行模拟, FRP 与加固墙面的粘贴由于多种因素使用“绑定”这种相互作用来模拟, 但在实际加固过程中可能会受到粘接剂性能, 作用环境温度的影响。

(2) 本次加固结构模拟, 在连接层的窗间墙处只采用了“#”型粘贴方式, 后续可以增加“X”型粘贴方式进行新模拟。

(3) 本文只采用了玻璃纤维增强复合材料 (GFRP 玻璃纤维/环氧本构模型) 进行 FRP 加固模拟, 还可以采用其他复合材料 (CFRP、BFRP 等) 和 TRC (纤维编织网增强混凝土) 进行相关模拟试验。

## 3 结论

本文通过建立 ABAQUS 有限元模型模拟不同结构在采用 FRP 加固带作用下的应力应变关系研究了 FRP 对结构抗震性能方面的影响, 同时通过单面墙、三层墙模型验证粘贴方式, 整体底框砌体结构模型验证抗震效果相互验证的方式得到了以下结论:

(1) 通过建立单面墙模型进行抗震模拟试验, 对比分析结果确定墙体不同 FRP 粘贴情况下的作用效果不同。FRP 不同的粘贴方式确实会给砌体墙带来不同的加固效果。

(2) 通过建立平面三层墙模型进行抗震模拟试验后得到的整体应力应变云图, 对比分析确定了当地震来袭时, 连接层的构造柱会承担大量由底部上传的应力, 并且最终会传导至上部砌体结构中的连接部位; 此时加固带会承担大部分墙体应力应变, 使得墙体不被破坏。地震作用下混合结构连接层处确实容易发生破坏, FRP 加固带能很好地承担墙体应力应变。

(3) 通过建立三层整体底框砌体结构模型进行抗震模拟试验, 对比分析结果确定 FRP 加固后的上部结构的内墙, 无论是窗间墙还是门墙的整体性都要优于未加固结构, 并且使得墙体所受应力应变能够通过构造柱等部件更好地传导和消耗能量, 在提高墙体的抗震能力的同时也提高了结构的整体性。

(4) 通过建立单面墙、平面三层墙、三层整体底框砌体结构三个模型进行抗震模拟试验, 对比三个模型的应力应变结果发现“X”型粘贴方式在分担墙体应力应变方面都优于“#”型粘贴方式, “X”型加固带能很好的承担底部上传的应力并分担墙体的应变。

## 【参考文献】

[1]熊立红, 高连军, 熊朝晖等.底框剪-砌体房屋抗震性能研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2008, 24(4): 586-591.

[2]单若宸.典型底框砌体结构地震倒塌模式及其废墟结构特征研究[D].中国地震局工程力学研究所, 2015(02).

[3]刘艳辉, 赵世春, 黄云德, 牟朝志, 孙玉林, .侧移刚度比对底框结构过渡层的影响[J].四川建筑科学研究, 2011, (05): 91-94+98.

[4]《砌体结构设计规范》中华人民共和国国家标准.砌体结构设计规范(GB50003-2011).北京: 中国建筑工业出版社, 2012.

[5]徐天航, 郭子雄, 柴振岭, 叶勇, 王兰, 侯炜, 刘阳, .钢筋网片改性砂浆加固石砌体墙抗震性能试验研究[J].建筑结构学报, 2016, (12): 120-125.

[6]唐曹明, 罗瑞, 程绍革, 黄宝栋, .水泥砂浆及钢筋网水泥砂浆单面加固低强度砖墙抗震性能试验研究[J].建筑结构学报, 2017, (10): 157-167.

[7]张富文, 蒋利学, 郑士举, .单面钢筋网砂浆面层和混凝土板墙加固开洞砖墙抗震性能试验研究[J].建筑结构学报, 2019, (08): 108-117.

[8]罗国胜.FRP 加固钢筋混凝土框架地震作用损伤分析[D].江南大学, 2021(01).

[9]古金本.CFRP 网格加固砌体墙体的抗震性能研究[D].西安建筑科技大学, 2018(07)

[10]唐永明.GFRP 对砖砌体房屋抗震加固方法研究[D].防灾科技学院, 2022(01).

[11]谷倩, 蒋华, 张广海, 彭少民, .喷射 GFRP 加固开洞砌体墙抗震性能试验研究[J].东南大学学报(自然科学版), 2010, (S2): 72-78.

[12]郭猛, 范旺生, 孙静, .转动变形机制下砌体墙的等效抗侧刚度计算模型[J].建筑科学与工程学报, 2022, (06): 102-112.