

ECC 低干预加固结构数值模拟研究

方先慧, 邓嘉瑞, 张军朋, 李晓琴

(昆明理工大学 建筑工程学院, 云南 昆明 650500)

摘要: 研究定量分析了不同加固方法的经济与碳排放指标并指出 ECC 覆面加固穿斗式木构架民居结构是一种经济、环保的绿色低干预加固方法。基于带填充墙的燕尾榫穿斗式木构架与木楼板砌体墙抗震试验建立数值模型, 讨论了模拟方案的可靠性。由此建立了典型云南村镇民居带填充墙穿斗式木构架模型, 分析讨论了 ECC 单面加固对结构的平面内与平面外抗震性能的影响, 并对不同损伤状态下结构的平面外加固效果进行了研究。结果表明: ECC 单面加固能抑制裂缝的产生与发展, 提高结构的延性; 加固后结构平面内承载力提升 2.7%, 平面外承载力提升 178.5%; ECC 单面加固对轻微和中等损伤的带填充墙穿斗式木构架平面外抗倒塌性能较好, 为 ECC 在农村民居维修、加固工程中的应用提供了依据。

关键词: 穿斗式木构架; 填充墙; ECC; 抗震性能; 塑性损伤模型

中图分类号: TU366.2

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2022)02-0267-11

Numerical simulation of ECC low intervention reinforced structures

FANG Xianhui, DENG Jiarui, ZHANG Junpeng, LI Xiaoqin

(Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: The economic and carbon emission indexes of different reinforcement methods were quantitatively analyzed, and it was pointed out that ECC structure was an economical, environmentally friendly and green reinforcement method with low intervention. The reliability of the simulation scheme was discussed based on the seismic test results of the wooden structure with dovetail joint and wooden floor masonry wall. A FE model of a typical column-and-tie wooden structure with infilled walls in Yunnan was established. The influence of the in-plane and out-of-plane seismic performance of the structure with ECC strengthening was analyzed and discussed, and the out-of-plane reinforcement effect of the structure under different damage states was also studied. The results indicated that the ECC strengthening could effectively reduce the cracks and improve the structure ductility. The in-plane and the out-of-plane bearing capacity of the reinforced structure was increased by 2.7% and 178.5%, respectively. ECC single-sided reinforcement has better out-of-plane collapse resistance to slightly and moderately damaged column-and-tie wooden structures with infilled walls, which provided a basis for the application of ECC in rural residential maintenance and reinforcement projects.

Key words: Column-and-tie wooden structure; Infilled wall; ECC; Seismic performance; CDP model

穿斗式木结构广泛应用于南方地区的民居建筑中, 特别是在西南地区应用较多, 也是云南主要的村镇民居建筑形式^[1-2]。穿斗式木构架本身起主要承重作用, 以贯穿柱截面的穿枋将柱联结成一排木架, 木檩直接支撑于柱头而不设置梁^[3]。木构架通常以砖墙或土墙作为围护结构。云南省为我国经济欠发达地区, 由于经济上的原因农村民居多为自建房, 房屋建造主要凭经验, 缺乏正规

的设计与施工^[4], 大部分不满足《建筑抗震设计规范》^[5]设计要求, 存在安全隐患。木构架与砌体围护墙由于质量、刚度、自振特性的不同, 在地震作用下产生的位移不一致, 会导致墙体-木构架碰撞开裂, 因此《建筑抗震设计规范》^[5]规定木构架与墙体之间应设置水平拉结筋或拉结网片, 同时也规定木结构房屋不应采用混合承重, 不得采用硬山搁檩。然而现有的穿斗式木构架民居即使承重

收稿日期: 2021-04-01

修改稿日期: 2021-04-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52168029, 51968035), 云南省万人计划青年拔尖人才基金项目(YNWR-QNBJ-2020-049), 2020 年云南省重点研发计划基金项目(202003AC100001)

第一作者: 方先慧(1998—), 男, 硕士生, 主要从事工程抗震与加固研究。E-mail: 553432511@qq.com

通信作者: 李晓琴(1983—), 女, 副教授, 主要从事新材料在土木工程领域的应用研究。E-mail: Xiaoqin.Li@foxmail.com

结构设计合理,大部分仍存在构造方法不当的问题,存在地震作用下维护结构开裂倒塌的风险^[6],因此,对维护结构的加固十分必要。

针对现有结构的加固方法主要有钢材加固方法(外贴钢板加固和水平嵌筋加固)^[8]、钢筋混凝土加固^[9](钢筋混凝土加固^[10]、砂浆带加固^[10])、ECC 加固^[11]和注浆(环氧树脂)加固^[12]等方法。其中,注浆加固造价过高,约为4万元/t,经济性较差,且研究^[12]表明砌体结构注浆加固耗能能力仅提升1倍;钢材加固方法造价约为0.6万元/t,但其加固材料涉及的碳排放因子最高,在2000 kg CO₂e/t以上;尽管钢筋混凝土加固方法加固效果最好且造价最低约为0.1万元/t,但所涉及的材料碳排放因子和用量仍然较高(其中混凝土碳排放因子295 kg CO₂e/m³);而尽管 ECC 加固造价约为0.3万元/t,但加固材料用量较混凝土加固用量少,且研究^[11]表明砌体结构 ECC 加固耗能能力能提升3倍,加固效果较好。且 ECC 原材料大量采用工业废料粉煤灰代替水泥^[13],相对于传统混凝土材料碳排放急剧减少,高粉煤灰掺量 ECC 其碳排放因子仅约为100 kg CO₂e/t,符合节能减排的要求。此外,钢或钢筋混凝土加固等方法的施工工艺都较为复杂,部分加固办法需在原有建筑结构表面进行钢筋锚固等操作会影响原有结构。而 ECC 加固施工工艺简单,只需在加固构件、结构内、外侧通过喷射或抹面实现一薄层 ECC 敷面加固即可,基本不影响原构件截面,是一种简单易操作的低干预加固方法。

由于现有的针对穿斗式木构架的试验、模拟研究主要针对木节点^[14-18]、木构架承重主体^[19-23]拟静力抗震或振动台试验研究,鲜有研究针对带填充墙的穿斗式木构架的拟静力试验/模拟研究,而研究表明^[24]:对砖填充墙榫卯节点木框架进行抗震鉴定和加固时,应考虑砖填充墙的影响,故选取带填充墙的穿斗式木构架进行加固模拟研究。

针对填充墙与木构架间没有搭接措施的云南民居应该采取拉结筋与 ECC 共同加固的方法,这也是作者正在进行的研究,但本文旨在先分析讨论单纯的 ECC 加固维护结构对此种结构的贡献,即研究在不考虑填充墙与木构架之间拉结而仅考虑木构架本身对维护结构产生的约束效应的情况下研究 ECC 单面加固木构架填充墙的面内与面外抗震性能。首先,基于 ABAQUS^[25]大型非线性有限元软件并选取具有一定相似性的单层单跨的带填充墙木框架试件^[8]与木楼盖砌体墙试件平面内外

加载,验证有限元模型的可靠性;随后,基于云南“一颗印”做法^[26]设计一榀带填充墙的穿斗式木构架数值模型进行平面内拟静力循环加载与平面外推覆加载;再引入 ECC 材料对填充墙单面加固,评价平面内外的加固效果,表明此加固方法对填充墙平面外承载能力有明显的提升。基于此,进行不同损伤填充墙平面外抗倒塌加固有限元模拟,评价不同损伤状态下 ECC 单面加固的效果,给与工程加固以科学的指导方法。

1 带填充墙的穿斗式木构架数值模型

1.1 有限元模型

本研究拟采用三维建模方法来建立带填充墙的穿斗式木构架民居模型。木构架与填充墙均采用 C3D8R 单元进行建模,木构架榫卯连接处采用面面接触,定义其法向“硬”接触以及切向“罚”刚度来模拟接触的摩擦行为^[18],对于通榫式木节点木材之间摩擦系数取值在0.3~0.38之间,其具体数值根据对比试验与模拟的滞回曲线、骨架曲线确定,最后确定摩擦系数为0.38。为防止模型穿透对结果产生影响,从面网格尺寸应小于主面。木构架与填充墙之间的接触同样采用以上方法,摩擦系数根据《砌体结构设计规范》^[27]取0.6。填充墙目前建模的方法有三种,分别为整体式模型、简化微观模型与精细化微观模型,如图1所示。孔璟常^[28]对比了一榀带填充墙 RC 框架采用整体式模型与简化微观模型两种建模方法,表明两种有限元模拟方法都能较成功地得到结构的初始刚度及承载力,整体式模型软化段模拟结果稍逊于简化微观模型,但简化微观模型考虑了组合砖之间的界面模拟,导致计算成本远高于整体式建模方法。考虑到模型大小与计算成本,填充墙采用整体式建模方法建模。

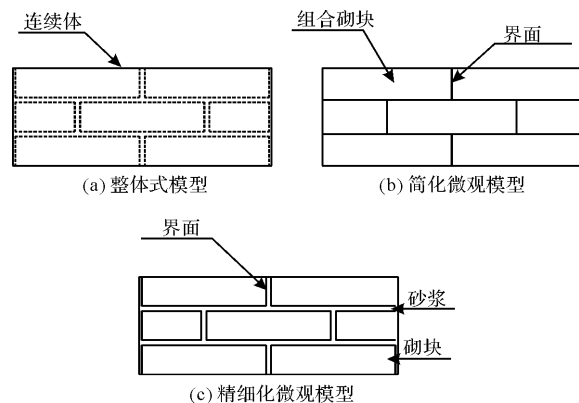


图1 填充墙模型

Fig. 1 Infilled wall models

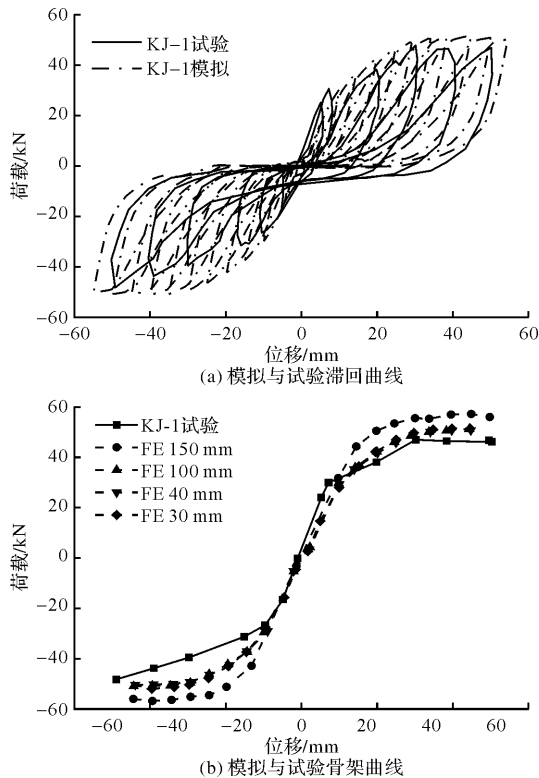


图3 试件 KJ-1 试验和模拟结果比较

Fig. 3 Comparison of test and simulation results of KJ-1 specimen

由图 3(a)可知,模拟得出的滞回曲线形状与试验基本保持一致,由图 3(b)可知 150 mm、100 mm、40 mm、30 mm 网格下的带填充墙木构架的正向骨架曲线较为接近,其对应的峰值荷载分别为 57.2, 51.4, 51.2 和 50.7 kN, 40 mm 与 30 mm 网格下的正向峰值承载力与试验结果 47.8 kN 分别相差 7.1% 和 6.1%, 表明带填充墙的木构架在不同网格下的模拟结果已经收敛. 试验测得的负向滞回曲线由作动器位移读取, 而负向(即往回拉)的时候

由于柔性牵引绳有伸长或端板滑移误差, 会导致试验读取的负向滞回曲线和骨架曲线与正向相应曲线的不对称性, 而数值模拟没有这个特征. 因此, 负向模拟骨架曲线结果与试验结果相差较大, 这是边界条件设置缺陷导致的误差, 在穿斗式木构架试验和模拟研究对照中普遍存在^[8, 24, 32-33].

1.3.2 平面外静力加载模型验证

目前尚未见有关带填充墙的穿斗式木构架平面外加载试验文献的相关报导, 因此选用具有一定相似性的文献[34]的 W1 试验数据进行平面外静力加载验证. 试件 W1 为木楼盖砌体结构, 受力砖墙厚度为 240 mm, 宽 4 500 mm, 高 3 000 mm, 受力砖墙两端设有宽 760 mm, 高 3 000 mm, 厚 240 mm 的正交横墙, 正交横墙端部设置 240 mm × 240 mm 混凝土柱, 柱与横墙沿高度每隔 300 mm 布置拉结筋, 保证受力砖墙平面外的约束力, 具体如图 4 所示. 试验采用 MU10 普通烧结砖与 M2.5 混合砂浆, 实测抗压强度分别为 29.3 MPa、2.69 MPa. 采用 C30 混凝土, 实测立方体平均抗压强度为 38.4 MPa. 拉结筋、构造柱箍筋实测屈服强度 406 MPa, 构造柱纵向钢筋实测屈服强度 412 MPa.

试验中设置混凝土构造柱与砌体墙之间的拉结筋是为了保证受力砖墙平面外的约束力, 为简化模型, 不建立构造柱与砌体墙之间的拉结筋而将构造柱与混凝土之间设为绑定约束, 即忽略了两个面之间的相对位移形成足够的面外约束力. 将上述试验数据带入公式(3)与(4)得出均质化后的砌体平均抗压强度与弹性模量分别为 5.02 MPa、4 162 MPa, 平均抗拉强度根据《砌体结构设计规范》^[27]表 3.2.2 取值 0.09 MPa.

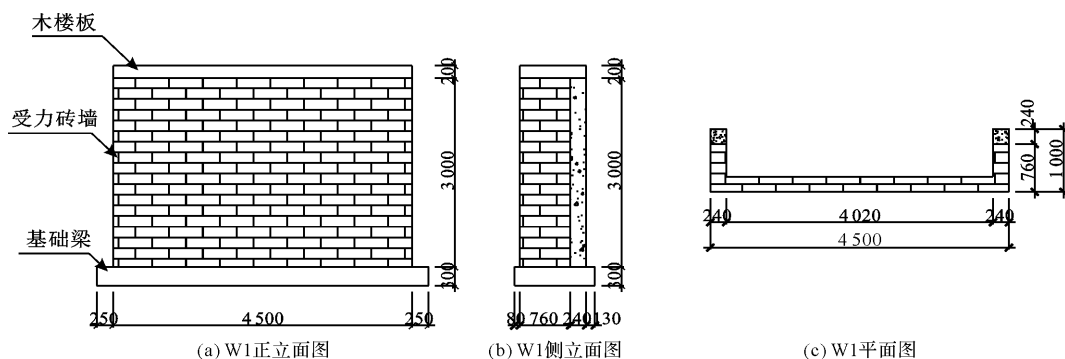


图4 砌体墙试件 W1 尺寸

Fig. 4 W1 size of masonry wall specimen

试件 W1 的有限元模拟结果如图 5 所示. 由图可知模拟所得的曲线初始刚度都大于试验曲线, 这是因为试验中拉结筋与砌体之间存在粘结滑移, 而有限元模型中采用的绑定接触, 忽略了由于钢筋与砌体之间的粘结滑移带来的两个面的相对位移, 从而导致刚度

模拟值大于实验值. 随着网格尺寸缩小, 平面外峰值承载力有递增的趋势, 变化幅度明显, 具有明显的网格依赖性. 100 mm、50 mm、40 mm 网格下的 W1 试件平面外峰值承载力分别为 61.8 kN、74.3 kN、79.5 kN, 与试验值 80.1 kN 分别相差 22.8%、7.3%、

0.8%。表明墙体的平面外推覆模拟结果在 40 mm 网格下达到收敛, 此结论与文献[35]一致。

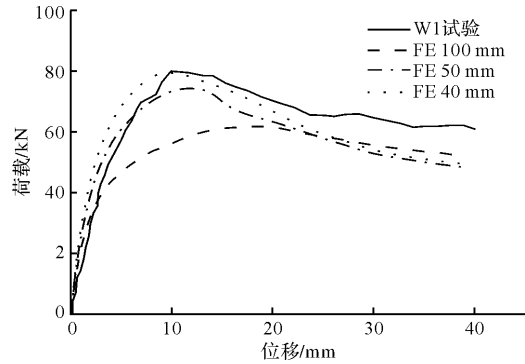


图 5 砌体墙平面外荷载-位移曲线比较
Fig. 5 Comparison of out-of-plane load-displacement curves of masonry wall

综上所述, 墙体平面内的拟静力加载与平面外的静力推覆加载有限元模拟在采用 40 mm 网格条件下能取得良好的结果, 误差均控制在 8% 以内, 验证了有限元模型的可靠性。

2 带填充墙穿斗式木构架数值模拟研究

基于滇南“一颗印”穿斗式木构架设计方法, 云南传统穿斗式木构架民居一榀带填充墙框架的足尺模型^[1]如图 6 所示。

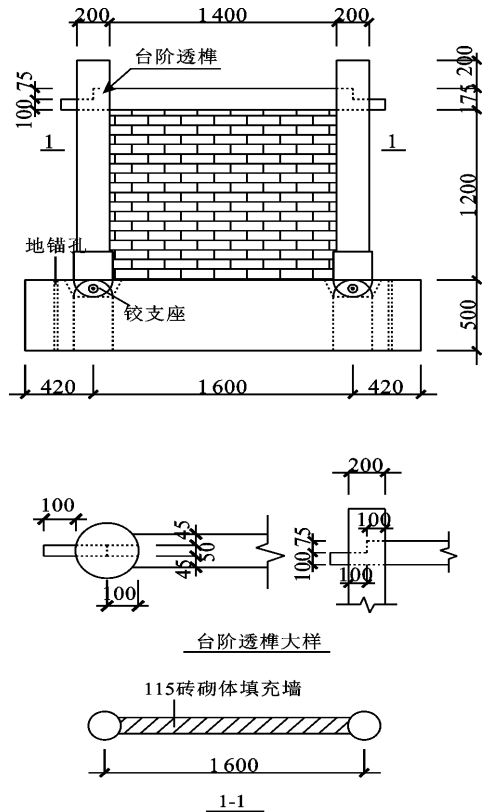


图 6 一榀带填充墙框架的足尺模型
Fig. 6 A full scale model with infilled wall frame

与前述带填充墙木构架模型的节点形式不同, 采用台阶透榫节点。木材采用杉木, 材料参数如表 2 所示, 砌块采用 MU25 烧结普通砖, 砂浆采用 M2.5 等级砂浆, 根据公式(3)与(4)计算得到均质化后的砌体平均抗压强度 f_m 与弹性模量 E 分别为 4.58 MPa 与 3 627 MPa。为反映云南农村地区民居填充墙普遍未设置拉结筋, 仅将填充墙与框架顶紧的现状, 框架与填充墙采用罚摩擦接触模拟。砌块沿木材相对滑动的摩擦系数取 0.6^[27]。

表 2 杉木物理力学性能参数

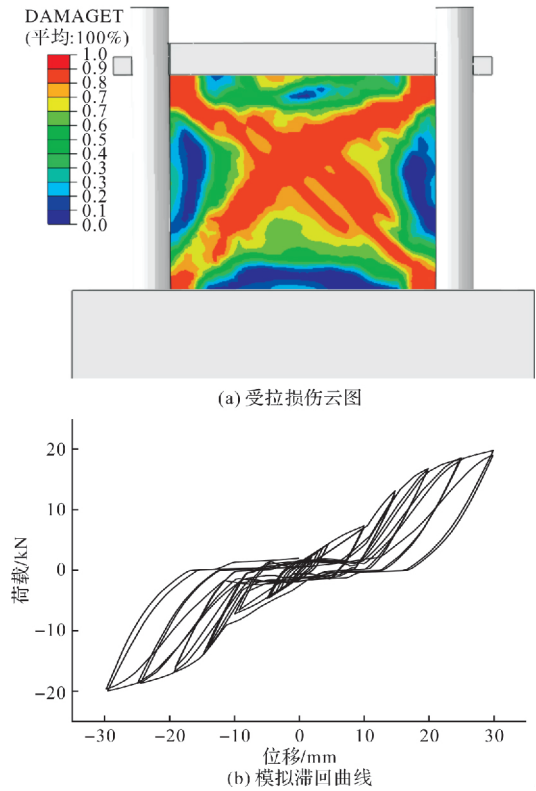
Tab. 2 Physical and mechanical properties of Chinese fir

材料方向	弹性模量 E/MPa	剪切模量 G/MPa	抗压强度 f/MPa	泊松比 μ
顺纹 (L)	11 580	920	35.1	0.37
横纹径向 (R)	890	680	3.7	0.49
横纹弦向 (T)	493	220	3.5	0.43

2.1 平面内拟静力加载模拟

平面内加载方式根据《建筑抗震试验方法规程》^[36]在柱端采用荷载-位移控制加载方法, 首先通过荷载控制, 每级循环一次, 记录墙体出现裂缝时的位移并记为 Δ , 后采取位移控制并以 Δ 为增量, 每级循环两次直至填充墙破坏。

以 0.1% 应变作为砌体的极限拉伸应变, 以 40 mm 特征长度的单元通过公式(6)计算砌体的 I 型断裂能, 得出损伤因子-断裂能曲线如图 7(d)所示。当损伤因子为 0.85 左右砌体已消耗 80% 的断裂能, 可以认为裂缝已经产生, 因此损伤因子大于 0.85 的区域视为破坏。



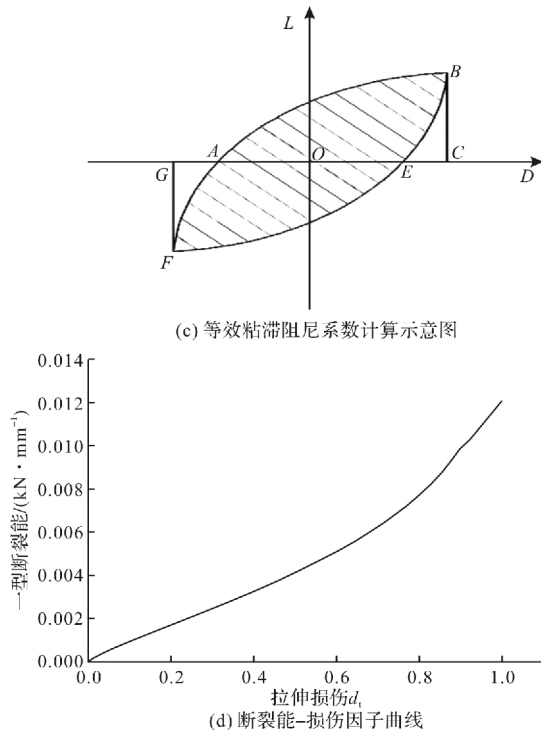


图7 一榀带填充墙穿斗式木构架平面内循环加载模拟结果
Fig. 7 Simulation results of in-plane cyclic loading of a column-and-tie wooden structure with infilled wall

$$G_f^I = h_c \int \sigma d\epsilon \quad (6)$$

通过 FE 模拟, 得出了带填充墙的台阶透榫式穿斗式木构架的拉损伤云图与滞回曲线, 如图 7(a)、(b)所示。损伤首先发生于填充墙的四角, 随着加载的进行, 在填充墙的中部出现斜裂缝并逐渐向四角发展, 最终形成“X 型”裂缝。由于填充墙与框架之间仅靠摩擦传力, 在试件加载时便会产生相对滑移, 因此滞回曲线有“捏缩”现象, 滞回曲线形状为 Z 形也证实了试件受到大量的滑移影响。在试件加载初期, 填充墙处于弹性阶段, 未达到屈服状态, 卸载之后残余变形很小, 滞回环面积很小, 因此滞回曲线中部较为密集。当填充墙达到塑性阶段开始产生残余应变, 内部损伤开始累积, 滞回曲线面积开始增大, 耗能能力开始提升, 滞回环面积小、不饱满, 表明试件的平面内耗能能力较弱, 抗震性能欠好。

在工程中等效粘滞阻尼系数 ξ_{eq} 的大小通常被用来判断结构的耗能能力并据此评价结构的耗能性能。等效粘滞阻尼系数 ξ_{eq} 越大, 耗能能力越强。其等效粘滞阻尼系数 ξ_{eq} 计算公式如式(7), 计算示意图如图 7(c)所示, 由此计算出不同位移下试件的等效粘滞阻尼系数。

$$\xi_{eq} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{S(ABE+EFA)}{S(OBC+OFG)} \quad (7)$$

计算得出以位移为增量的第 1~6 个滞回环的等效粘滞阻尼系数分别为 0.141、0.160、0.095、

0.092、0.087、0.085, 其随着水平方向的位移增大表现出先增大后减小的趋势, 后几环减小的幅值越来越小。这是因为前两个循环试件还未产生滑移, 因此耗能能力较强, 对应着中部“梭形”滞回曲线; 后四个循环试件随着损伤的产生而出现明显的粘结滑移, 因此耗能能力明显减小, 对应着“Z 形”滞回曲线, 表明填充墙与框架之间的粘结滑移会影响试件的耗能性能。

2.2 平面外静力推覆模拟

平面外加载方式通过位移控制加载。建立 250 mm×250 mm×10 mm 大小加载垫块, 位于填充墙中心, 相对位置如图 11(b)所示, 加载垫块与墙体之间采用罚摩擦接触与硬接触模拟。距垫块中心面外偏离 50 mm 建立参考点并与垫块耦合, 施加面外 15 mm 位移荷载。

FE 模拟得出试件面外静力加载损伤云图与荷载-位移曲线如图 8(a)、(b)、(c)所示。

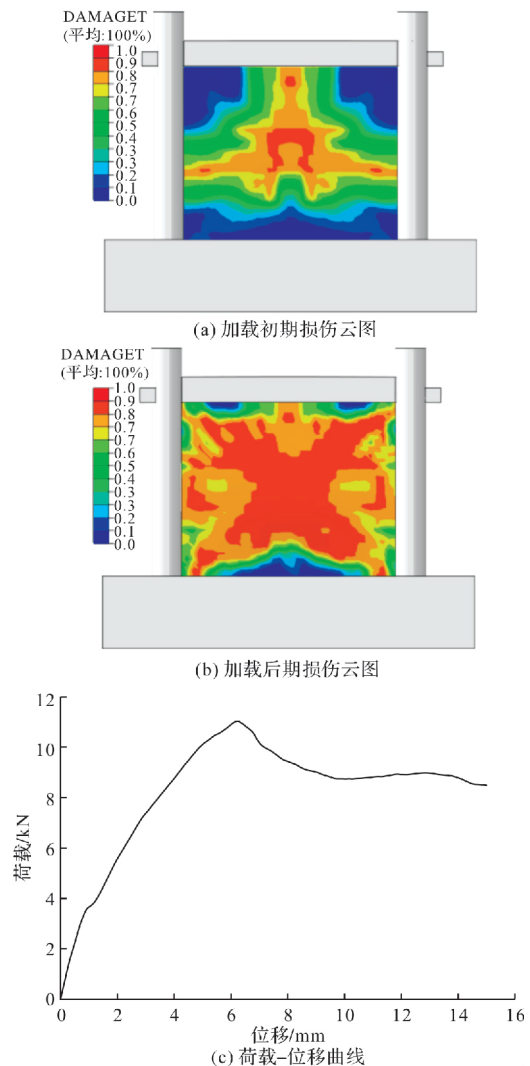


图8 一榀带填充墙穿斗式木构架平面外静力推覆模拟结果

Fig. 8 Simulation results of out-of-plane loading of a column-and-tie wooden structure with infilled wall

损伤首先发生于填充墙的中心,在加载初期呈现“倒Y”型损伤,为三边约束边界破坏模式,表明填充墙顶部与枋之间接触不好;继续加载,随着试件形变破坏模式由“倒Y”型转变为“X”型,裂缝由中部向四角发展,为四边约束边界破坏模式,表明填充墙顶部与枋之间已完全接触。面外位移约为 6.23 mm 时面外承载力达到峰值,约为 11.03 kN,随后进入软化阶段,平面外耗能能力约为 123.8 kN·mm。

3 ECC 单面加固填充墙数值模拟

ECC 是一种高韧性的新型水泥基复合材料,极限拉伸应变是普通混凝土的 300 倍以上。Meng 等^[37]经过大量 ECC 拉伸试验,将 ECC 的受拉阶段分弹性阶段、多缝开裂阶段和应变硬化阶段。Feenstra 等^[38]将 ECC 的受压过程用断裂能表示,并用抛物线的形式表示受拉受压曲线。ECC 材料的拉压断裂能均应为不变量,但由于在受拉应力状态下 ECC 呈现出应变硬化,在达到峰值应力后迅速失去承载能力,软化不明显,因此 ECC 受拉应力状态采用应力应变关系定义;而在受压应力状态下 ECC 在达到峰值应力后软化明显,在不同单元特征长度下应采用不同的应力应变关系曲线以

保证受压模态断裂能 G_c 为常数。ECC 的受压应力-应变曲线和受拉应力-应变曲线如图 9 (a)~(b) 所示。ECC 性能参数如表 3 所示。

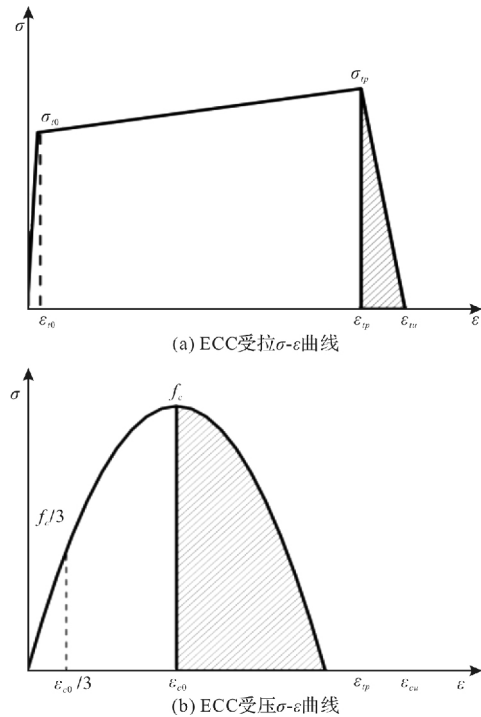


图 9 ECC 应力-应变曲线

Fig. 9 ECC stress-strain curve

表 3 ECC 性能参数

Tab. 3 ECC Performance Parameters

参数名称	极限拉应力相 对的拉应变	初裂拉应力相 对的应变	极限拉应力 /MPa	初裂时拉 应力/MPa	ECC 抗压 强度/MPa	ECC 抗压强度 对应应变	受拉断裂能 /(N·mm ⁻¹)	受压断裂能 /(N·mm ⁻¹)
数值	0.006	0.000 17	4.06	3.27	59.86	0.005	0.13	28.26

ECC 受拉本构计算方程为^[37]

$$\sigma_t = \begin{cases} E_0 \varepsilon, & 0 \leq \varepsilon < \varepsilon_{t0} \\ \sigma_{t0} + (\sigma_{tp} - \sigma_{t0}) \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{t0}}{\varepsilon_{tu} - \varepsilon_{tp}} \right), & \varepsilon_{t0} \leq \varepsilon < \varepsilon_{tp} \\ \sigma_{tp} \left(1 - \frac{\varepsilon - \varepsilon_{tp}}{\varepsilon_{tu} - \varepsilon_{tp}} \right), & \varepsilon_{tp} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{tu} \\ 0, & \varepsilon_{tu} < 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: σ_t 为 ECC 的受拉应力; σ_{t0} 为初裂时拉应力; ε 为 ECC 在受拉应力状态下的应变; ε_{t0} 为初裂拉应力相对的应变; σ_{tp} 为极限拉应力; ε_{tp} 为极限拉应力相对的拉应变; ε_{tu} 为极限拉应变。

ECC 受压本构计算方程为^[38]

$$\sigma_c = \begin{cases} E_c \varepsilon, & 0 \leq \varepsilon < \varepsilon_{c0}/3 \\ \frac{f_c}{3} \left[1 + 4 \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{c0}/3}{\varepsilon_{c0} - \varepsilon_{c0}/3} \right) - 2 \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{c0}/3}{\varepsilon_{c0} - \varepsilon_{c0}/3} \right)^2 \right], & \varepsilon_{c0}/3 \leq \varepsilon < \varepsilon_{c0} \\ f_c \left[1 - \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{cu}/3}{\varepsilon_{cu} - \varepsilon_{cu}/3} \right)^2 \right], & \varepsilon_{c0} \leq \varepsilon < \varepsilon_{cu} \end{cases} \quad (9)$$

$$\varepsilon_{c0} = \frac{5f_c}{3E_c}, \quad \varepsilon_{cu} = \frac{3G_c}{2f_ch} + \varepsilon_{c0} \quad (10)$$

式中: σ_c 为 ECC 的受压应力; E_c 为 ECC 的弹性模量; ε 为 ECC 在受压应力状态下的应变; f_c 为 ECC 的抗压强度; ε_{c0} 为 f_c 对应的应变; ε_{cu} 为极限压应变。 h 为有限元模型单元特征长度, $h = \sqrt[3]{A}$, A 为单元体积; G_c 为受压断裂能。

采用 20 mm 厚 ECC 单面敷面加固填充墙,进行试件的平面内外加载模拟研究其加固效果。采用 tie 接触模拟 ECC 与填充墙的界面,即不考虑二者间的相对滑移。

3.1 ECC 加固填充墙平面内抗震性能分析

ECC 单面加固填充墙平面内加载损伤云图与曲线对比如图 10 (a)、(b) 所示。采用相同的加载方式,未加固损伤云图图 7 (a) 与 ECC 单面加固后损伤云图图 10 (a) 有较明显差异,从云图对比中可以看出 ECC 有效抑制了填充墙裂缝的发展。ECC 加固对比加固前后的滞回曲线如图 10 (b) 所示,试

件的峰值承载力仅提升 2.7%，刚度略有提高，耗能提升不明显。因本文 ECC 单面加固仅加固填充墙而未考虑框架与填充墙之间的整体加固，而滞回曲线捏缩的主要原因是填充墙与木构架间的滑移，而此种方法并未从根本上解决此原因，因此仅加固填充墙的方法对平面内抗震能力提升不明显。

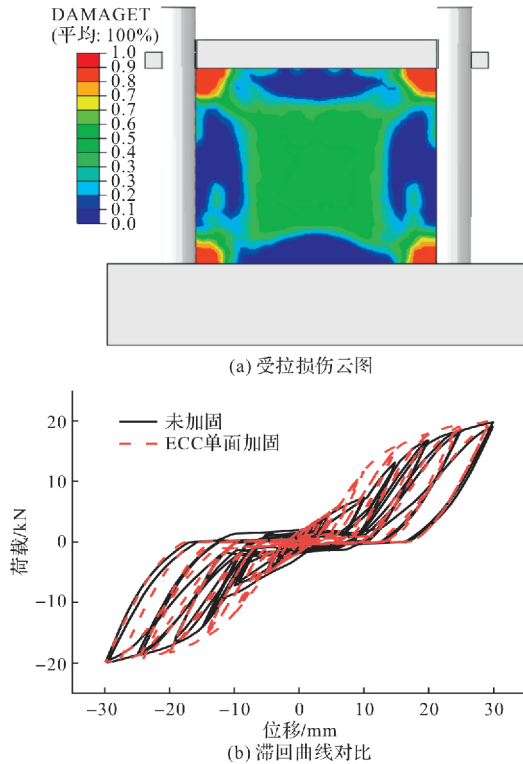


图 10 ECC 单面加固平面内加载

Fig. 10 In-plane loading with ECC single-side reinforcement

3.2 ECC 加固填充墙平面外抗倒塌性能分析

ECC 加固试件受拉侧损伤云图及荷载-位移曲线如图 11(a)、(b)、(c)所示。由图(a)、(b)云图可知，ECC 单面加固填充墙受拉侧后破坏模式与未加固破坏模式一致，为损伤从中部发生并向四周扩展，但加固后试件损伤程度明显小于未加固试件。未加固填充墙平面外极限承载力为 11.03 kN，采用单面 ECC 加固填充墙受拉侧后填充墙平面外极限承载力为 30.72 kN，提升了 1.785 倍。将荷载-位移曲线与坐标轴围成的面积作为耗能评价指标，得出未加固的试件耗能为 123.8 kN·mm，加固后的试件耗能为 309.5 kN·mm，提升 1.5 倍。由此可以看出采用 ECC 单面加固填充墙的方法对平面外的承载力及耗能提升作用明显。

4 不同损伤程度下的加固后结构平面外抗倒塌模拟研究

由于采用 ECC 单面加固的方式对试件平面外

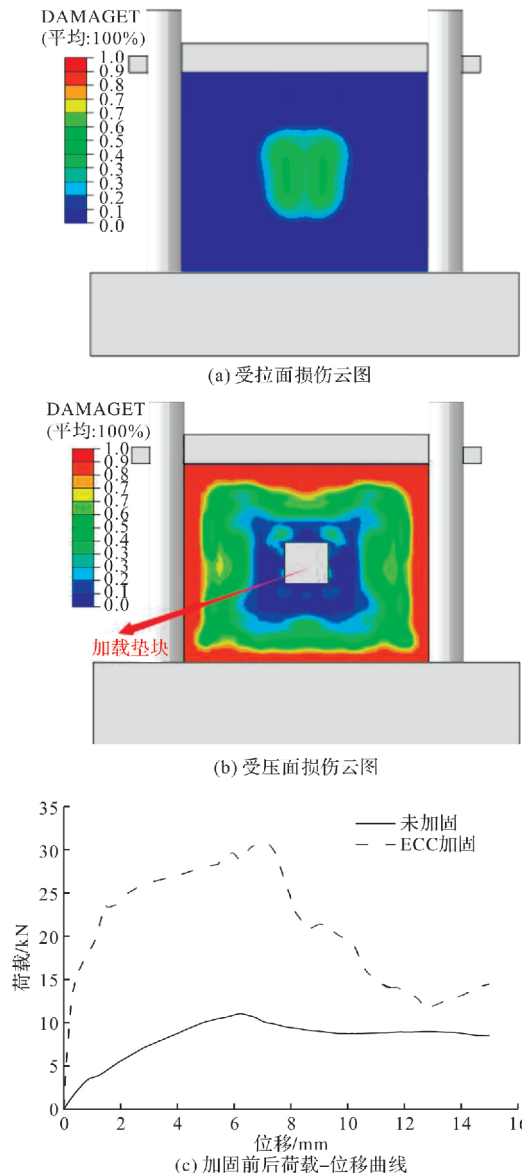


图 11 ECC 单面加固平面外加载

Fig. 11 Out-of-plane loading with ECC single-side reinforcement

的承载力提升更为明显，而填充墙的损伤状态对加固效果的影响目前尚未有研究报道，因此拟进一步进行不同损伤状态下结构的平面外加固效果研究。根据 Meng 等^[39]可采用试件所承受的荷载状态或与之对应的变形状态来模拟穿斗式木构架填充墙的损伤情况。本文为方便数值模拟的实现，以未加固带填充墙的穿斗式木构架的加载点所受荷载对应的位移量来模拟试件的损伤状态。

4.1 模拟方法

根据先前的试件数值模拟结果，当试件的上升段承载力为峰值荷载的 20% 时，试件已有裂缝产生。因此，本文以峰值承载力的 20% 所对应的位移点作为第一个计算工况，定义该工况为轻微损伤状态；以峰值承载力的 100% 所对应的位移点作为第五个工况计算，定义该工况为极严重损伤

状态. 将峰值承载力的 20%~100% 区间均等划分, 分别取峰值荷载的 40%, 60%, 80% 所对应的位移点作为第二~四个计算工况, 三个工况分别定义为中等、较严重、严重损伤状态.

采用 ABAQUS 软件中的生死单元功能来实现补强加固模拟, 首先将加固层单元设为生死单元, 在试件加固前将其钝化, 对未加固试件施加以位移荷载. 当试件达到相应损伤状态时将加固层单元激活, 再对试件施加位移荷载直至破坏.

4.2 加固效果分析

针对 ECC 单面敷面加固方案不同时机下穿斗式木构架填充墙面外荷载-位移曲线见图 12(a), 不同损伤状态下的加固效果有明显的不同.

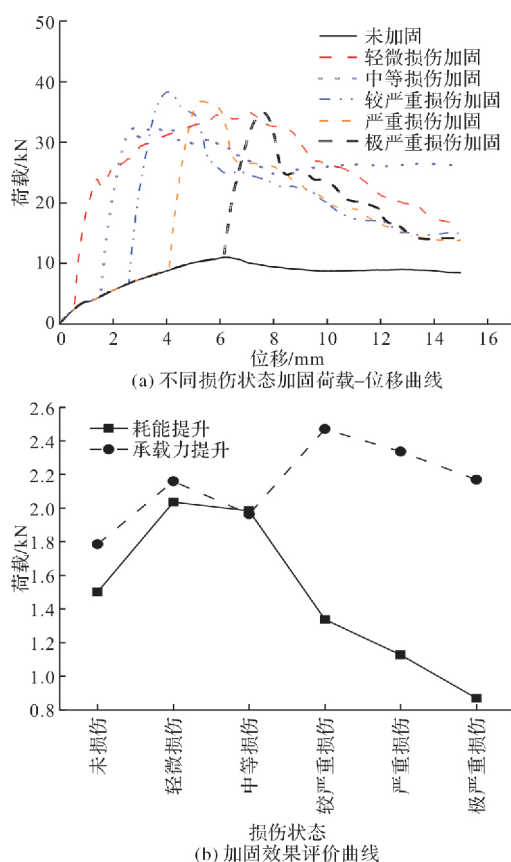


图 12 不同损伤状态下 ECC 单面加固结构模拟

Fig. 12 ECC single-side strengthened structure modelling under different damage levels

其中: 轻微损伤状态下加固曲线走势与未损伤直接加固走势相似; 较严重、严重、极严重损伤状态下加固后曲线走势相似; 中等损伤状态下加固曲线未表现出明显的承载力走低趋势, 表明耗能性能提升明显. 在较严重、严重、极严重损伤状态下加固时, 峰值承载力提升明显, 分别提升了 2.47 倍、2.34 倍与 2.17 倍; 在轻微损伤与中等损伤状态下加固时, 耗能能力提升明显, 分别提升了 2.04 倍与 1.98 倍, 提升曲线如图 12(b) 所示. 综合考虑承载能力与耗能性能, 在填充墙

轻微或中等损伤时采用 ECC 单面加固效果最优.

5 结论

(1) ECC 覆面加固穿斗式木构架民居结构是一种经济、环保的绿色低干预加固方法;

(2) 带填充墙的穿斗式木构架的平面内耗能效果较为不好, 滞回曲线存在“捏缩”现象, 表明结构受面内横向荷载时存在大量滑移, 亟待设置拉结筋等构造措施以提升面内的抗震性能;

(3) 采用 ECC 单面敷面的加固方式对平面内承载力提升不明显, 仅提升 2.7%, 而面外承载力提升 1.7 倍以上, 表明此种加固方式可以有效提升结构平面外抗倒塌能力;

(4) 带填充墙的穿斗式木构架在不同损伤状态下的加固效果有明显差异, ECC 单面加固对不同损伤状态下的填充墙面外性能都有明显的加固作用, 但在轻微损伤与中等损伤状态下加固效果更好.

参考文献 References

- [1] 高永林, 陶忠, 叶燎原等. 带有黏弹性阻尼器穿斗木结构振动台试验研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(1): 240-247.
GAO Yonglin, TAO Zhong, YE Liaoyuan, et al. Shaking table tests for a chuan-dou timber building with viscoelastic dampers [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(1): 240-247.
- [2] 薛建阳, 许丹, 任国旗等. 传统民居穿斗式木构架抗震性能振动台试验研究[J]. 土木工程学报, 2019, 52(12): 1-10.
XUE Jianyang, XU Dan, REN Guoqi, et al. Shake table test on seismic performance of column and tie wooden structure in traditional residence [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(12): 1-10.
- [3] 曲哲, 钟江荣, 孙景江. 四川芦山 7.0 级地震中非抗震设防民居震害特征[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(5): 157-164.
QU Zhe, ZHONG Jiangrong, SUN Jingjiang. Seismic damages of non-seismic design residential houses in the M7.0 Lushan Earthquake [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(5): 157-164.
- [4] 陶燕, 侯敏, 柴栋, 等. 云南省楚雄州生土房屋抗震加固方法研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2019, 41(4): 133-139.
TAO Yan, HOU Min, CHAI Dong, et al. Seismic behavior and strengthened methods of raw soil houses in Yunnan province [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2019, 41(4): 133-139.
- [5] 中国建筑科学研究院. 建筑抗震设计规范: GB 50010-2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
CABR. Code for seismic design of buildings: GB50010-

- 2010[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2015.
- [6] 柏文峰. 云南民居结构更新与天然建材可持续利用[D]. 北京:清华大学, 2009.
BAI Wenfeng. Structure renewal and sustainable using of natural building materials on Yunnan folk houses [D]. Beijing: Tsinghua university, 2009.
- [7] 中国建筑科学研究院. 建筑碳排放计算标准: GB/T51366-2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社. 2019.
CABR. Building carbon emission calculation standard: GB/T51366-2019[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2019
- [8] 颜江华. 带填充墙木框架抗震性能及加固方法研究[D]. 南京:东南大学, 2015.
YAN Jianghua. Research on seismic behavior and strengthening method of wood frame with masonry in-fill wall[D]. Nanjing: Southeast university, 2015.
- [9] C Baokui, F LI, X Jingang, et al. Seismic Performance and Risk Assessment of Traditional Brick-Wood Rural Buildings Based on Numerical Simulation[J]. Advances in Civil Engineering, 2021, 2021(5):1-16.
- [10] 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, 40(08): 108-117.
ZHANG Fuwen, JIANG Lixue, ZHENG Shiju. Experimental study on seismic performance of brick walls with openings strengthened by mortar layer with reinforcement grid and concrete slab on single-side[J]. Journal of Building Structure, 2019, 40(08):108-117.
- [11] 邓明科, 高晓军, 梁兴文. ECC 面层加固砖墙抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2013, 30(6): 168-174.
DENG Mingke, GAO Xiaojun, LIANG Xingwen. Experimental investigation on aseismic behavior of brick wall strengthened with ECC splint [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(6):168-174.
- [12] 王善伟, 王社良, 杨涛, 等. 古砖墙注浆加固性能试验及滞回模型研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, 41(9):1295-1302.
WANG Shanwei, WANG Sheliang, YANG Tao, et al. Performance tests and hysteretic model research on ancient brick walls reinforced by grouting[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2020, 41 (9): 1295-1302.
- [13] 张志刚. 钢桥面高延性水泥基材料铺装层自愈合机理与疲劳损伤研究[D]. 南京:东南大学, 2016.
ZHANG Zhigang. Research on the self-healing mechanism and fatigue damage of ECC applying on steel bridge deck overlay[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [14] 高永林, 陶忠, 叶燎原, 等. 传统穿斗木结构榫卯节点附加黏弹性阻尼器振动台试验[J]. 土木工程学报, 2016, 49(2): 59-68.
GAO Yonglin, TAO Zhong, YE Liaoyuan, et al. Shaking table tests of mortise-tenon joints of a traditional Chuan-Dou wood structure attached with viscoelastic dampers[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49 (2):59-68.
- [15] 潘毅, 王超, 唐丽娜, 等. 古建筑木结构直榫节点力学模型的研究[J]. 工程力学, 2015, 32(2): 82-89.
PAN Yi, WANG Chao, TANG Lina, et al. Study on Mechanical Model of Straight-Tenon Joints in Ancient Timber Structures[J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(2): 82-89.
- [16] 徐娇, 朱占元, 梁危, 等. 武侯祠桂荷楼穿斗木构架透榫节点抗震性能研究[J]. 地震工程与工程振动, 2021, 41(1): 140-150.
XU Jiao, ZHU Zhanyuan, LIANG Wei, et al. Study on seismic behavior of the mortise-tenon joint of Chuan-Dou type timber frames of Guihe building in Wuhou shrine[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics. 2021, 41(1):140-150.
- [17] 薛建阳, 任国旗, 许丹, 等. 传统民居穿斗式木结构榫卯节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(10):158-167.
XUE Jianyang, REN Guoqi, XU Dan, et al. Experimental study on seismic performance of dowel joints in traditional Chuan-Dou style timber structures[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(10): 158-167.
- [18] 薛建阳, 许丹, 代武强. 穿斗式木结构通榫节点抗震性能研究及数值模拟分析[J]. 土木工程学报, 2019, 052(11): 56-65.
XUE Jianyang, XU Dan, DAI Wuqiang. Experimental study and numerical simulation analysis on seismic performance of continuous tenon joint in column-and-tie timber structure[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 052(11):56-65.
- [19] 孙建, 邱洪兴, 陈春超, 等. 古木结构中抬梁式和穿斗式木构架受力性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(7): 79-88.
SUN Jian, QIU Hongxing, CHEN Chunchao, et al. Experimental investigation on mechanical behavior of post-and-lintel timber frame and column-and-tie timber frame in ancient timber structures [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(7):79-88.
- [20] 王海东, 尚守平, 何放龙, 等. 穿斗式木构架结构与轻型木结构抗震性能振动台试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(6): 138-143.
WANG Haidong, SHANG Shouping, HE Fanglong, et al. Shaking table tests of Chinese traditional wood building and light wood framed building[J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(6):138-143.
- [21] 熊海贝, 王洁, 吴玲, 等. 穿斗式木结构抗侧力性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(10): 122-129.
XIONG Haibei, WANG Jie, WU Ling, et al. Experimental study on lateral resistance performance of Chuandou wooden frame structures [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(10):122-129.

- [22] 薛建阳, 许丹, 郭锐. 有无填充墙板的穿斗式木结构房屋振动台试验及对比分析[J]. 振动与冲击, 2020, 39(13): 184-192.
XUE Jianyang, XU Dan, GUO Rui. Shaking table tests and contrastive analysis for column-and-tie wooden buildings with and without infills[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(13): 184-192.
- [23] 薛建阳, 许丹, 任国旗, 等. 传统民居穿斗式木构架抗震性能振动台试验研究[J]. 土木工程学报, 2019, 52(12): 5-14.
XUE Jianyan, XU Dan, REN Guoqi, et al. Shake table test on seismic performance of column and tie wooden structure in traditional residence[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(12): 5-14.
- [24] 许清风, 刘琼, 张富文, 等. 砖填充墙榫卯节点木框架抗震性能试验研究[J]. 建筑结构, 2015, 45(6): 50-53.
XU Qingfeng, LIU Qiong, ZHANG Fuwen, et al. Experimental research on seismic performance of mortise-tenon joint wood frame with brick masonry infilled wall[J]. Building Structure, 2015, 45(6): 50-53.
- [25] 王鹰宇. Abaqus 分析用户手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.
WANG Yingyu. Abaqus analysis user manual[M]. Beijing: China Machine Press, 2018.
- [26] 杨立峰. 匠作·匠场·手风[D]. 上海: 同济大学, 2006.
YANG Lifeng. Construction, Field and Style of Craftsmen[D]. Shanghai: Tongji University, 2006.
- [27] 住房和城乡建设部. 砌体结构设计规范: GB 50003-2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
MOHURD. Code for design of masonry structures: GB 50003-2011[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2015.
- [28] 孔璟常, 翟长海, 李爽, 等. 砌体填充墙 RC 框架结构平面内抗震性能有限元模拟[J]. 土木工程学报, 2012, 45(S2): 137-141.
KONG Jingchang, ZHAI Changhai, LI Shuang, et al. Study on in-plane seismic performance of solid masonry-infilled RC frames[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(S2): 137-141.
- [29] 杨卫忠. 砌体受压本构关系模型[J]. 建筑结构, 2008, 38(10): 80-82.
YANG Weizhong. Constitutive relationship model for masonry materials in compression[J]. Building Structures, 2008, 38(10): 80-82.
- [30] 陈再现, 杨续波. 组合材料加固砖砌体的有限元模拟方法[J]. 工程力学, 2020, 37(4): 96-104.
CHEN Zaixian, YANG Xubo. Finite element simulation method for brick masonry reinforced with composite materials[J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(4): 96-104.
- [31] 王明谦, 宋晓滨, 顾祥林. 基于三维弹塑性损伤模型的木材非线性分析[J]. 土木工程学报, 2018, 51(7): 22-28.
WANG Mingqian, SONG Xiaobin, GU Xianglin. Nonlinear analysis of wood based on three-dimensional combined elastic-plastic and damage model[J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(7): 22-28.
- [32] LI X, ZHAO J, MA G et al. Experimental study on the seismic performance of a double-span traditional timber frame[J]. Engineering Structures, 2015, 98 (S1): 141-150.
- [33] HUANG H, SUN Z, GUO T, et al. Experimental study on the seismic performance of traditional Chuan-Dou style wood frames in Southern China[J]. Structural Engineering International, 2017, 27(2): 246-254.
- [34] 张永群, 蒋利学, 王卓琳. 历史建筑砌体结构的砖墙平面外受力性能试验与理论研究[J/OL]. 北京: 建筑结构学报, 2022 [2022-03-04]. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2021.0181.
- [35] BOWEN Z, YONG L, CARLOS C N. Modeling and parameter importance investigation for simulating in-plane and out-of-plane behaviors of un-reinforced masonry walls[J]. Engineering Structures, 2021, 27(2): 246-254.
- [36] 住房和城乡建设部. 建筑抗震试验方法规程: JGJ 101-1996[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
MOHURD. Code for seismic test method of buildings: JGJ 101-1996[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2015.
- [37] MENG D, HUANG T, ZHANG Y et al. Mechanical behaviour of a polyvinyl alcohol fibre reinforced engineered cementitious composite (PVA-ECC) using local ingredients[J]. Construction and Building Materials, 2017, 141: 259-270.
- [38] FEENSTRA P H, ROTS J G, ARNESEN A et al. A 3D constitutive model for concrete based on a co-rotational concept[C]//Computational modelling of concrete structures, the Euro-C 1998 Conference on Computational modelling of concrete structures, bad-gastein: Computational modelling of concrete structures, 1998.
- [39] 李晓琴, 张田, 丁祖德等. ECC 套拱加固不同损伤衬砌的数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(S2): 3654-3664.
LI Xiaoqin, ZHANG Tian, DING Zude, et al. Numerical study on ECC arch strengthened linings with different damaged levels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(S2): 3654-3664.

(编辑 沈波)