

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.06.016

碳纤维布加固古建筑木结构基于结构 潜能和能量耗散地震破坏评估

薛建阳¹, 吴占景¹, 张凤亮², 赵鸿铁¹, 刘祖强¹, 王豆豆¹

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 西安 710055; 2. 陕西省建筑科学研究院, 西安 710082)

摘要:为了评估古建筑木结构加固后的抗震性能以及研究加固结构在各工况地震作用下的破坏过程及对应的破坏状态,基于碳纤维布加固燕尾榫柱架和料拱铺作层低周反复荷载作用下的滞回特性和能量耗散原理,计算了两耗能元件在低周反复荷载作用下的“抵抗破坏潜能”;借助碳纤维布加固古建筑木结构振动台试验,计算了各工况地震作用下每一耗能元件所耗散的能量,基于构件的“抵抗破坏潜能”和各工况下的地震耗能建立了耗能元件在不同地震作用下的地震破坏评估模型,并借助能量分配系数找出了各耗能元件破坏状态与整体加固结构破坏状态之间的关系,建立了整体加固结构在不同地震作用下的破坏评估模型。应用该地震破坏评估模型,定量计算了碳纤维布加固燕尾榫柱架和料拱铺作层、整体加固结构在各工况地震作用下的破坏系数,并基于破坏程度,得出了整体加固结构不同破坏系数对应的结构不同震害等级。研究结果可为碳纤维布加固古建筑木结构的震前破坏预测和震后加固古建筑木结构的保护再修复提供可靠的理论依据。

关键词:古建筑木结构;抵抗破坏潜能;能量耗散;地震破坏评估;破坏系数

中图分类号: TU366.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2013)06-0103-09

Potential and Energy Dissipation-Based Seismic Damage Evaluation of Ancient Timber Structure Strengthened with CFRP

Xue Jianyang¹, Wu Zhanjing¹, Zhang Fengliang², Zhao Hongtie¹,
Liu Zuqiang¹, Wang Doudou¹

(1. College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, P. R. China;
2. Shaanxi Institute of Architecture Science, Xi'an 710082, P. R. China)

Abstract: The aim is to evaluate the seismic properties of ancient timber structure after strengthening and analyze the failure process and corresponding failure state. Based on the hysteretic behavior and energy dissipation principle of the dovetail column-frame strengthened with CFRP and Arches Brackets under the low reversed cyclic loading, the “potential of destruction-resisting” of the two energy-consuming components is obtained. The dissipated energy of each energy-consuming component under the various earthquake conditions is calculated combining with the shaking table test of ancient timber structure. The model of seismic damage evaluation of the two energy-consuming components is established on the basis of the “potential of destruction-resisting” and the dissipated energy. By means of the energy distribution coefficient, the relationship of the failure state between energy-consuming components and overall

收稿日期: 2013-02-18

基金项目: 国家科技支撑计划资助课题(2013BAK01B03-02); 陕西省科学技术研究发展计划国际合作项目(2013KW23-01)

作者简介: 薛建阳(1970-),男,教授,博士(后),主要从事钢与混凝土组合结构、钢筋混凝土结构、古建筑木结构抗震性能研究, (E-mail) jianyang_xue@163.com。

strengthened structure is discovered, and the model of seismic damage evaluation of the overall structure under the various earthquake conditions is presented. With the derived model of seismic damage evaluation, the failure coefficient of the energy-consuming components and the overall strengthened structure is quantitatively calculated. According to the failure state, the corresponding damage grade of overall strengthened structure is obtained. The results can provide a reliable theoretical basis for predicting the destruction before earthquake and re-reinforcement to the strengthened ancient timber structures after earthquake.

Key words: ancient timber structure; potential of destruction-resisting; energy dissipation; seismic damage evaluation; failure coefficient

古建筑是中国民族历史文化的重要组成部分,它的形成和发展从不同侧面反映了中国各个历史时期的政治、经济、艺术以及科学文化状况,这其中,木结构古建筑作为中国古代建筑的主流,被广泛应用于宫殿、庙宇、民居、楼阁等建筑中,是历史发展的见证和民族文化兴衰潮汐之映射,是不可再生的珍贵的历史文化遗产^[1]。但是对于现存的古建筑木结构来说,千百年的历史传承中受到了自然力和人为的破坏,材料发生腐朽、虫蛀、老化以及结构或构件发生破坏,再加上多年来对其保护不够重视、年久失修,使得现存古建筑木结构绝大多数处于不同程度的残损状态,其健康安全状况不容乐观并有进一步恶化的趋势,有的已处于危险状态甚至濒临损毁^[2-3]。但是由于木材资源相对匮乏以及中国保护文物的政策性要求,不可能大面积地采用替换新材的方法来修缮和改造破坏的木结构古建筑。因此,对古建筑木结构进行科学合理的修缮保护已迫在眉睫,而对加固后各构件及整体结构的抗震性能研究也成为古建筑木结构修缮保护的关键工作。为了能够合理地评估古建筑木结构加固后的抗震性能以及研究加固结构在各工况地震作用下的破坏过程及对应的破坏状态,本文提出了一种能够客观评价加固后木结构地震破坏程度的方法。

通过碳纤维布加固古建筑木结构振动台试验可以发现,在科拱铺作层以及柱架榫卯节点发生滑移前,结构或构件不断吸收外部输入的能量,结构基本处于弹性阶段,这个过程中结构将少量的能量转化为动能和弹性势能储存;而开始滑移之后,结构或这两部分耗能元件进入弹塑性阶段,塑性变形和阻尼使得地震输入能不断被释放和耗散导致结构也逐渐出现不同程度的破坏。也就是说,结构或构件的破坏过程实质上是能量耗散和释放的过程,而结构或构件最终的破坏是因为地震输入的能量向结构或构件释放的过程受到抑制^[4-6]。因此,对于碳纤维布加固古建筑木结构来说,结构的破坏是因为科拱铺作

层或碳纤维布加固燕尾榫柱架的破坏不断加剧而导致。鉴于此,借助碳纤维布加固古建筑木结构振动台试验以及碳纤维布加固燕尾榫柱架和四铺作料拱拟静力试验,基于耗能元件在低周反复荷载作用下所表现出的“构件抵抗破坏潜能”以及整体结构在地震作用下各种工况下所耗散的地震能量,建立了古建筑木结构各耗能元件及整体结构在不同工况地震作用下的地震破坏评估模型,并结合试验进行破坏分析,以期能够客观地反映木结构古建筑的实际震害等级。

1 古建筑木结构的构件地震破坏评估

1.1 构件破坏评估模型

根据《建筑抗震试验方法规程》^[7]规定,在低周反复荷载作用下的能量耗散能力应以荷载—变形滞回曲线所包围的面积来衡量。基于此,本文将“构件抵抗破坏潜能”定义为构件在反复荷载作用下,从加载初期到构件破坏,所有加载循环过程中构件所能耗散的总输入能或者所能承受总的外力功。图 1 给出了低周反复荷载作用过程中古建筑木结构构件在第 j 循环的受力状态,在经历正反向位移 $\pm \delta_j$ 加载循环过程中,构件所能耗散的输入能或外力功为:

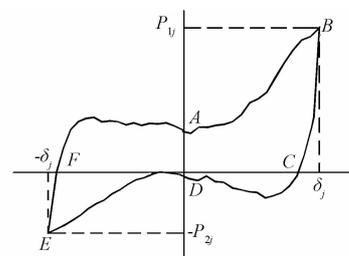


图 1 第 j 循环下的构件受力状态

$$W_{ij} = S_{ABCDEF}^{ij} \quad (1)$$

那么有:

$$W_i = \sum_{j=1}^n W_{ij} \quad (2)$$

式中: W_{ij} 为第 i 构件在正反向位移 $\pm\delta_j$ 加载循环过程中所耗散的能量,其数值大小为图形的面积 S_{ABCDEF} ; n 为构件发生破坏时所经历的正反向低周反复加载循环次数; W_i 为第 i 构件 n 个加载循环破坏后耗散的总能量。

对于碳纤维布加固古建筑木结构振动台模拟地震震动试验,各构件在不同工况地震作用下耗散的能量,可根据构件在该工况地震作用下的层间剪力-层间位移滞回曲线来求得。由于无法直接测出结构各层的地震剪力,只能根据结构各层测点的绝对加速度间接求出。根据地震作用效应以及地震惯性荷载的定义,结构模型各构件在 h 工况下的地震剪力 $r_{ih}(t_k)$ 可按式(3)^[8]计算:

$$r_{ih}(t_k) = \sum m_i \ddot{x}_{ih}(t_k) \quad (3)$$

式中: $\ddot{x}_{ih}(t_k)$ 为第 h 工况下第 i 构件在 t_k 时刻的绝对加速度值, m_i 为第 i 构件的质量。结构模型在 h 工况地震作用下的层间滞回耗能可由式(4)^[2]计算:

$$W'_{ih} = \sum_{i=1}^s \frac{1}{2} [r_{ih}(t_k) + r_{ih}(t_{k-1})] [\Delta x_{ih}(t_k) - \Delta x_{ih}(t_{k-1})] \quad (4)$$

式中: W'_{ih} 为第 i 构件在 h 工况地震作用下的累积滞回耗能; $\Delta x_{ih}(t_k)$ 和 $\Delta x_{ih}(t_{k-1})$ 分别为 t_k 时刻和 t_{k-1} 时刻第 i 构件 h 工况地震作用下的层间位移值,该值通过试验位移拾振器采集;求和上限 s 为该工况振动持时下的总采样点数。图 2 反映出了不同工况地震作用下各构件的累积滞回耗能随时间 t_k 的变化。

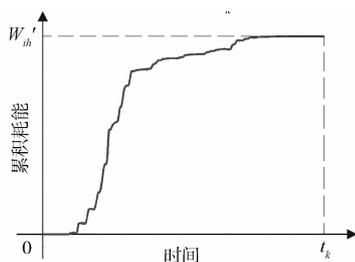


图 2 h 工况地震作用下构件的累积滞回耗能随时间 t_k 的变化

基于构件的“构件抵抗破坏潜能”及各工况地震作用下构件的累积滞回耗能,定义构件 i 在 h 工况地震作用下的破坏系数 F_{ih} 为该构件在 h 工况地震作用下耗散的能量与该构件“构件抵抗破坏潜能”的比值,如公式(5)所示,图 3 给出了破坏系数的计算过程:

$$F_{ih} = \frac{W'_{ih}}{W_i} \quad (5)$$

1.2 碳纤维布加固古建筑木结构的构件破坏评估

为了定量地评估 2 个耗能元件在不同工况地震

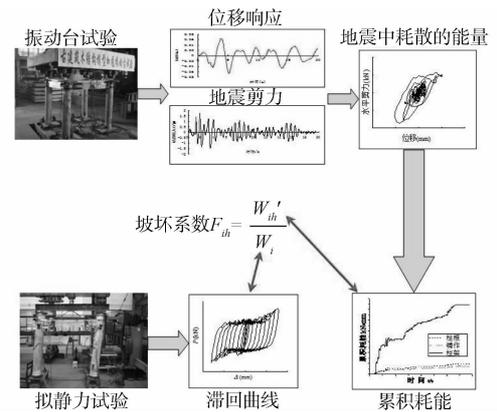


图 3 构件破坏评估分析过程

作用下的破坏程度,结合碳纤维布加固古建筑木结构振动台试验,采用本文提出的构件破坏评估模型对碳纤维布加固木结构中的柱架榫卯节点和料拱铺作层在地震作用下的破坏程度进行分析。

通过对碳纤维布加固古建筑木结构振动台试验的动力响应分析,得出了碳纤维布加固燕尾榫柱架层和料拱铺作层在各种工况地震作用下的地震剪力和层间位移,并根据公式(4)和(5)分别计算出了碳纤维布加固整体结构的 2 个耗能元件在地震过程中的累积滞回耗能(如图 4 所示)。

通过图 4 可以看出,在 8 度区多遇烈度和基本烈度(200 gal)地震作用下,碳纤维布加固古建筑木结构的主要耗能方式为柱架榫卯节点的转动耗能^[9],且随着地震强度的增大,由于碳纤维布加固榫卯节点不同程度的破坏导致节点刚度降低,料拱铺作层逐渐分担了越来越多的地震能量;当地震动强度达到 300 gal 时,料拱铺作层所分担的地震能量已经超过碳纤维布加固榫卯节点,且随着地震作用的逐渐增强,料拱铺作层分担的地震能量越来越多,而碳纤维布加固榫卯节点分担的地震能量成比例下降。

1.2.1 碳纤维布加固燕尾榫柱架的破坏评估

为了研究地震作用下碳纤维布加固古建筑木结构榫卯节点的抗震性能,课题组对 3 个截面尺寸、材料(木材、碳纤维布、粘结剂)属性、碳纤维布加固长度、厚度和加固方法以及节点连接方式都相同的碳纤维布加固燕尾榫柱架(如图 5(a)所示)在 20 kN 竖向荷载作用下以位移加载的方式进行了拟静力试验研究^[10-11](如图 5(a)所示)。图 5(b、c、d)给出了 3 个碳纤维布加固燕尾榫柱架在低周反复荷载作用下的滞回耗能曲线,按照公式(2)并借助于 Origin8.0 软件对图 5(b、c、d)3 个碳纤维布加固燕尾榫柱架的“抵抗破坏潜能”进行计算,结果如表 1 所示。

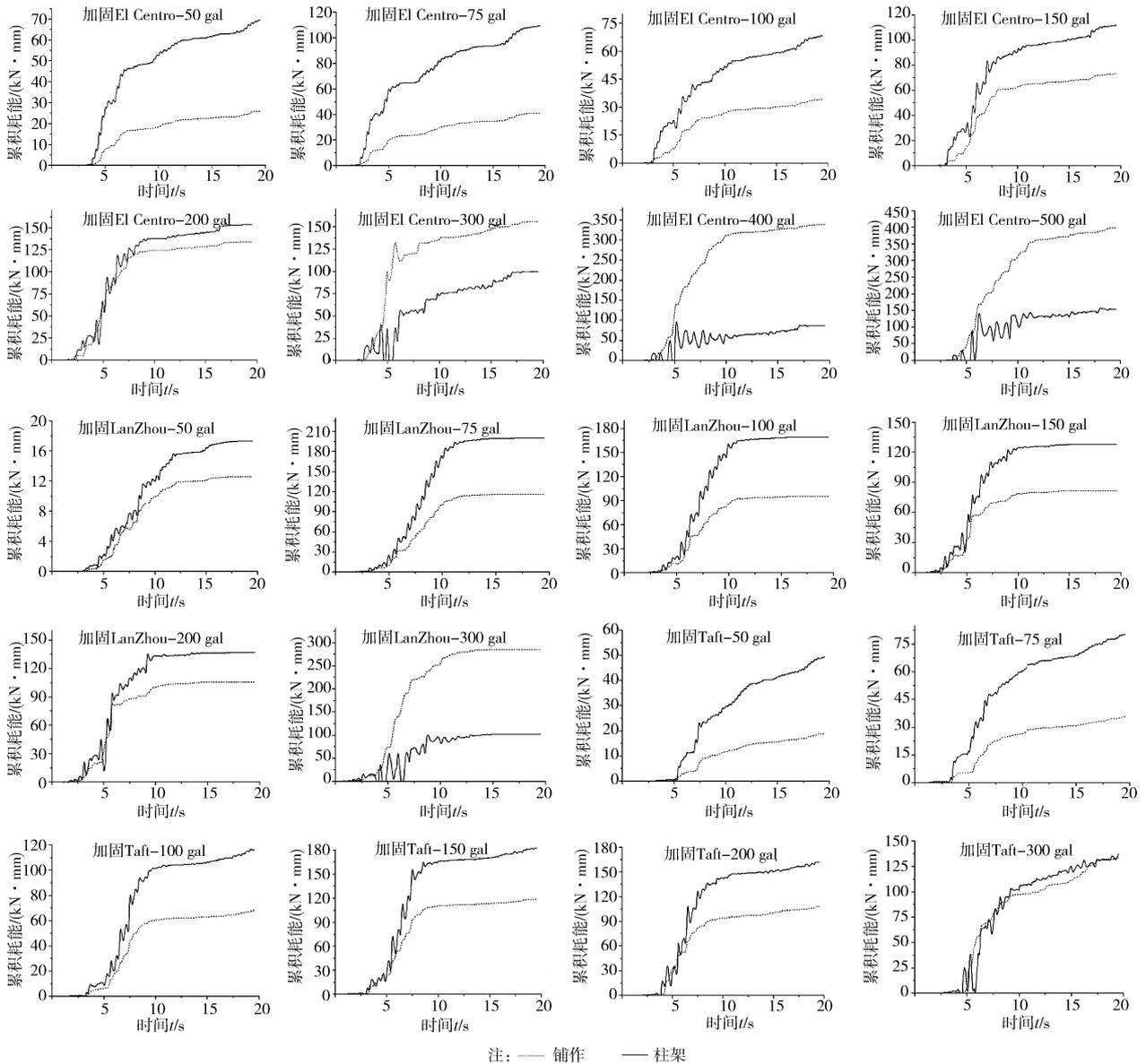


图 4 各工况地震作用下耗能元件的累积滞回耗能

表 1 单榀碳纤维布加固燕尾榫柱架抵抗破坏潜能

构件编号	竖向荷载/ kN	抵抗破坏潜能/ (kN·mm)	平均值/ (kN·mm)
1	20	1 695.648	1 854.711
2	20	2 200.668	1 854.711
3	20	1 667.816	1 854.711

结合表 1 并按照公式(5)计算出单榀碳纤维布加固燕尾榫柱架在各工况地震作用下的破坏系数 F_{sh} 如表 2 所示。

根据碳纤维布加固古建筑木结构振动台试验现象及结果分析,并结合表 2 得出的碳纤维布加固燕尾榫柱架在各工况地震作用下的破坏系数,分析得出:由于碳纤维布加固燕尾榫柱架是在未加固结构振动台试验加载破坏后采用粘结剂和碳纤维布重新

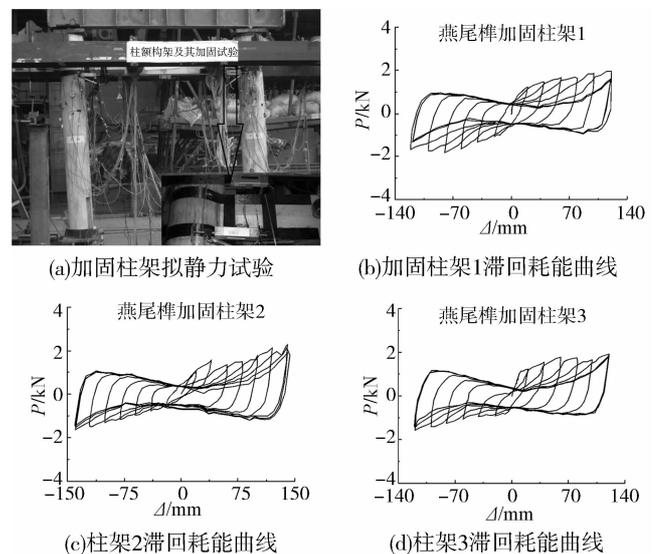


图 5 加固燕尾榫柱架拟静力分析

表2 各工况地震作用下碳纤维布加固燕尾榫柱架的破坏系数 F_{dh}

地震作用工况 h	地震烈度	累积耗能/ (kN·mm)	构件破坏系数 F_{dh}
EL—50 gal	7度多遇烈度	69.465	0.019
TA—50 gal	7度多遇烈度	49.295	0.032
LZ—50 gal	7度多遇烈度	17.350	0.037
EL—75 gal	8度多遇烈度	109.194	0.066
TA—75 gal	8度多遇烈度	78.913	0.087
LZ—75 gal	8度多遇烈度	199.737	0.141
EL—100 gal	7度基本烈度	68.334	0.160
TA—100 gal	7度基本烈度	116.562	0.191
LZ—100 gal	7度基本烈度	169.004	0.237
EL—150 gal	7度基本烈度	111.672	0.267
TA—150 gal	7度基本烈度	182.547	0.316
LZ—150 gal	7度基本烈度	127.923	0.350
EL—200 gal	8度基本烈度	153.647	0.392
TA—200 gal	8度基本烈度	162.003	0.436
LZ—200 gal	8度基本烈度	136.626	0.472
EL—300 gal	8度基本烈度	99.644	0.499
TA—300 gal	8度基本烈度	136.779	0.536
LZ—300 gal	8度基本烈度	101.211	0.563
EL—400 gal	8度罕遇烈度	96.301	0.589
EL—500 gal	8度罕遇烈度	156.617	0.632
EL—600 gal	9度罕遇烈度	未测	
EL—(800—900 gal)	9度强罕遇烈度	结构倒塌	

注:EL— X gal表示输入的Elcentro地震波最大加速度为 X gal;TA— X gal表示输入的Taft地震波最大加速度为 X gal;LZ— X gal表示输入的兰州地震波最大加速度为 X gal, X 为地震动输入强度(本文指地震加速度)。

拼装而成,榫卯节点用胶粘合之后本身的承载能力有一定程度的下降,因此,当粘合榫卯节点达到其承载力再次发生开裂之后,榫卯节点的承载能力主要取决于碳纤维布的承载能力,且由于碳纤维布为脆性单向材料,只能承受拉力,抵抗剪切、弯曲以及受压的能力较弱,因此在地震荷载反复作用下,加固后的燕尾榫柱架具有较低的承载能力和耗能能力。当地震动强度到达300 gal左右时,碳纤维布加固燕尾榫柱架的破坏系数约为0.5,此时碳纤维布发生较为严重的剥离现象;当地震动强度达到约500 gal时,破坏系数超过了0.6,柱架节点发生严重破坏,此时节点几乎不再耗能,试验过程中考虑到测量传感器的安全性,加载到500 gal后,将测量传感器全部移走,根据试验现象可以看出,地震动强度为800

gal时,节点几乎完全退出工作,900 gal时结构的恢复力不足以使柱架恢复到平衡位置,结构轰然倒塌。

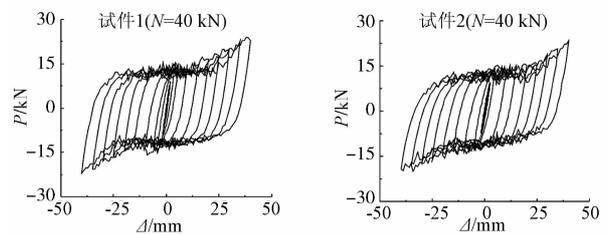
1.2.2 碳纤维布加固木结构中料拱铺作层的破坏评估 为了评估料拱铺作层的抗震性能以及四铺作的协同工作性能,结合古建筑木结构振动台试验,课题组对2组相同材料、相同尺寸以及相同构造做法的四铺作料拱在40 kN竖向荷载作用下以位移加载的方式在柱顶施加低周反复荷载进行了拟静力试验^[10-11](如图6(a)所示)。图6(b、c)给出了2组四铺作料拱低周反复荷载作用下的滞回耗能曲线,按照公式(2)并借助于Origin8.0软件对图6(b、c)2组四铺作料拱的“抵抗破坏潜能”进行计算,结果如表3所示。未加固古建筑木结构振动台试验结果显示,结构倒塌之后料拱铺作层仅发生个别销栓破坏,因此,对于碳纤维布加固古建筑木结构的料拱铺作层来说,拼装时仅将破坏的销栓替换即可,其“抵抗破坏潜能”与未加固结构的料拱铺作层“抵抗破坏潜能”基本一致。

表3 四铺作料拱抵抗破坏潜能

构件编号	竖向荷载/ kN	抵抗破坏潜能/ (kN·mm)	平均值/ (kN·mm)
1	40	7 465.28	7 087.995
2	40	6 710.71	7 087.995



(a)四铺作拟静力试验



(b)试件1滞回耗能曲线

(c)试件2滞回耗能曲线

图6 四铺作料拱拟静力分析

根据图6计算得出的各工况地震作用下碳纤维布加固燕尾榫柱架的累积滞回耗能以及表3计算得出的四铺作料拱的“抵抗破坏潜能”,按照公式(5)计算出四铺作料拱在各工况地震作用下的破坏系数 F_{dh} 如表4所示。

表 4 各工况地震作用下料拱铺作层的破坏系数 F_{dh}

地震作用工况 h	地震烈度	累积耗能/ ($\text{kN} \cdot \text{mm}$)	构件破坏 系数 F_{dh}
EL—50 gal	7 度多遇烈度	26.036	0.003 67
TA—50 gal	7 度多遇烈度	18.856	0.006 33
LZ—50 gal	7 度多遇烈度	12.595	0.008 11
EL—75 gal	8 度多遇烈度	41.164	0.013 92
TA—75 gal	8 度多遇烈度	34.341	0.018 76
LZ—75 gal	8 度多遇烈度	116.073	0.035 14
EL—100 gal	7 度基本烈度	34.195	0.039 96
TA—100 gal	7 度基本烈度	68.218	0.049 59
LZ—100 gal	7 度基本烈度	94.850	0.062 97
EL—150 gal	7 度基本烈度	72.940	0.073 26
TA—150 gal	7 度基本烈度	118.744	0.090 01
LZ—150 gal	7 度基本烈度	81.519	0.101 51
EL—200 gal	8 度基本烈度	133.958	0.120 41
TA—200 gal	8 度基本烈度	107.984	0.135 65
LZ—200 gal	8 度基本烈度	105.470	0.150 53
EL—300 gal	8 度基本烈度	155.966	0.172 53
TA—300 gal	8 度基本烈度	133.605	0.191 38
LZ—300 gal	8 度基本烈度	284.789	0.231 56
EL—400 gal	8 度罕遇烈度	338.631	0.279 34
EL—500 gal	8 度罕遇烈度	399.343	0.335 68
EL—600 gal	9 度罕遇烈度	未测	
EL—(800—900 gal)	9 度强罕遇烈度	结构倒塌	

注:EL—X gal,TA—X gal,LZ—X gal 表示含义均同表 2 注。

从表 4 可以看出,在相同地震作用下,碳纤维布加固木结构中的料拱铺作层在地震作用过程中耗散的能量比未加固结构中的构件耗能明显要多,结构不再以榫卯节点耗能为主,但由于料拱铺作层受荷之后具有良好的自锁联结功能^[12],即使在 8 度罕遇地震作用下,料拱铺作层的破坏系数也仅仅在 0.34 左右,属于轻微破坏。通过碳纤维布加固木结构振动台试验结果发现,即使整体结构发生倒塌以后,料拱铺作层的破坏程度也不大。因此,在地震作用下,料拱铺作层具有较强的抗震性能。

2 整体加固结构的地震破坏评估

2.1 整体加固结构地震破坏评估模型

根据振动台试验结果分析得出,地震作用下古

建筑木结构发生倒塌(图 7(a))之后的破坏情况如图 7((b)~(i))所示。从图中可以看出,东北角燕尾榫节点和西北角燕尾榫节点破坏相当严重,卯口发生断裂,且发生脱榫现象;东南角和西南角燕尾榫节点卯口局部出现竖向裂缝,但并未发生脱榫现象;东北榫头纵向开裂,其余榫头没有出现破坏;普拍枋在倒塌过程中被折断;柱头馒头榫在水平反复地震荷载作用下发生弯曲挤压破坏;料拱在水平反复荷载作用下,主要破坏情况为暗榫的弯曲挤压破坏,而料拱本身并未发生较大破坏;梁、柱构件基本完好。

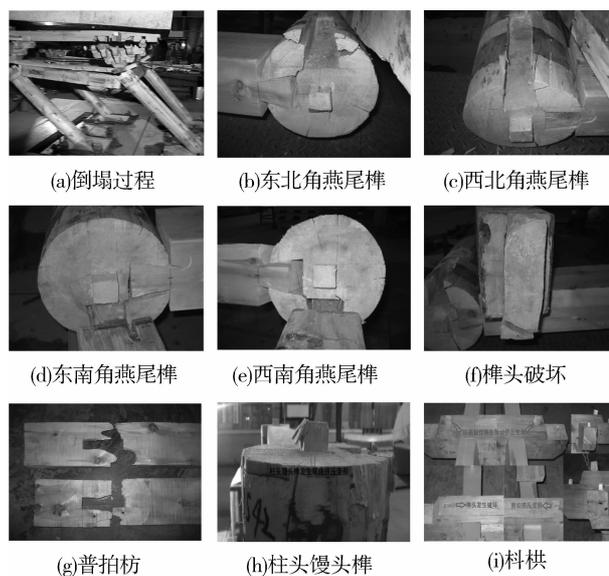


图 7 殿堂式古建筑木结构振动台试验构件及节点破坏情况

未加固结构模型经过首次振动台试验倒塌破坏之后,根据试验中的破坏情况,分别对图 7 出现的不同破坏形态按照加固规范的规定^[13]进行加固或者替换修复:将劈裂的榫头、卯口以及节点区域的外表面用丙酮清洗干净,以除去破损处以及外表面的污物,待丙酮完全挥发后,涂敷配套的树脂粘结剂,再用碳纤维布将受损的节点区域进行包裹拼装成加固模型如图 8 所示。各节点采用同一规格的、相同数量(层数、长度)的材料(碳纤维布和粘结剂)以及相同的加固方法,保证结构的各节点松紧程度尽量一致;同样对普拍枋破损处用丙酮清洗干净后,再涂敷配套的树脂粘结剂将其粘好;对料拱铺作层和柱头由于挤压导致破坏的榫头进行更换处理,然后将修复加固后的模型重新拼装如图 9 所示,并对加固后试验模型进行模拟地震振动台试验研究。

为了简化计算,对碳纤维布加固古建筑木结构整体结构进行地震破坏评估时,仅考虑碳纤维布加固柱架榫卯节点以及料拱铺作层 2 个耗能元件的破坏对整体结构破坏的影响,因而忽略梁、柱等其它构

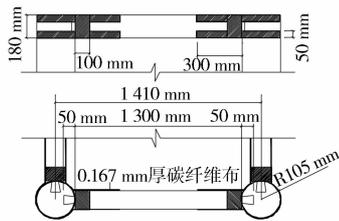


图8 燕尾榫节点CFRP加固方案



图9 CFRP加固古建筑木结构

件破坏的影响。为了能够定量地评估整体加固结构在不同工况地震作用下的破坏情况,结合前面对2个耗能元件地震作用下的破坏评估分析,借助能量分配系数寻找耗能元件破坏状态与整体结构破坏状态之间的关系,建立计算整体加固结构在不同地震作用下的破坏评估模型。具体整体结构破坏评估模型如下:

由于各耗能元件*i*(燕尾榫柱架和料拱铺作层)的质量、刚度以及延性等性能参数具有较大的差异,

因此在每工况*h*地震作用下各耗能元件耗散能量也不同,两耗能元件在每工况*h*地震作用下耗散的能量之和可看作整体加固结构在该工况*h*地震作用下耗散的总能量 W_h ,即:

$$W_h = \sum_{i=1}^2 W'_{ih} \quad (6)$$

为了考察各耗能元件在每一工况*h*地震作用下对整体结构耗能的贡献比例,引入耗能元件的能量分配系数 λ_i ^[14],则有:

$$\lambda_i = \frac{W'_{ih}}{W_h} \quad (7)$$

显然,对于整体加固结构来说,能量分配系数 λ_i 大的构件表明该构件在地震作用下耗散的地震能量较多,其破坏程度也有可能随之增大。因此,可将结构破坏程度与地震能量分配结合起来。每一工况地震作用结束后,结构整体破坏系数 F_h 等于各耗能元件破坏系数 F_{ih} 与能量分配系数 λ_i 乘积的总和,即:

$$F_h = \sum_{i=1}^m \lambda_i F_{ih} \quad (8)$$

2.2 碳纤维布加固整体结构地震破坏评估模型的应用

基于碳纤维布加固燕尾榫柱架和料拱铺作层两耗能元件破坏评估,结合碳纤维布加固古建筑木结构振动台试验,根据公式(6)~(8)计算出碳纤维布加固木结构古建筑各工况地震作用下整体结构地震破坏系数 F_h 如表5所示。

表5 碳纤维布加固古建筑木结构各工况地震作用下整体结构地震破坏系数 F_h

地震工况	耗能元件各工况下耗能/(kN·mm)		各耗能元件能量分配系数		构件破坏系数		整体结构破坏系数
	燕尾榫柱架	料拱铺作层	燕尾榫柱架	料拱铺作层	燕尾榫柱架	料拱铺作层	
EL-50 gal	69.465	26.036	0.727	0.273	0.019	0.003 67	0.015
TA-50 gal	49.295	18.856	0.723	0.277	0.032	0.006 33	0.025
LZ-50 gal	17.350	12.595	0.579	0.421	0.037	0.008 11	0.025
EL-75 gal	109.194	41.164	0.726	0.274	0.066	0.013 92	0.052
TA-75 gal	78.913	34.341	0.697	0.303	0.087	0.018 76	0.066
LZ-75 gal	199.737	116.073	0.632	0.368	0.141	0.035 14	0.102
EL-100 gal	68.334	34.195	0.666	0.334	0.160	0.039 96	0.120
TA-100 gal	116.562	68.218	0.631	0.369	0.191	0.049 59	0.139
LZ-100 gal	169.004	94.850	0.641	0.359	0.237	0.062 97	0.174
EL-150 gal	111.672	72.940	0.605	0.395	0.267	0.073 26	0.190
TA-150 gal	182.547	118.744	0.606	0.394	0.316	0.090 01	0.227
LZ-150 gal	127.923	81.519	0.611	0.389	0.350	0.101 51	0.253

续表 5

地震工况	耗能元件各工况下耗能/(kN·mm)		各耗能元件能量分配系数		构件破坏系数		整体结构破坏系数
	燕尾榫柱架	料拱铺作层	燕尾榫柱架	料拱铺作层	燕尾榫柱架	料拱铺作层	
EL—200 gal	153.647	133.958	0.534	0.466	0.392	0.120 41	0.266
TA—200 gal	162.003	107.984	0.600	0.400	0.436	0.135 65	0.316
LZ—200 gal	136.626	105.470	0.564	0.436	0.472	0.150 53	0.332
EL—300 gal	99.644	155.966	0.390	0.610	0.499	0.172 53	0.300
TA—300 gal	136.779	133.605	0.506	0.494	0.536	0.191 38	0.366
LZ—300 gal	101.211	284.789	0.262	0.738	0.563	0.231 56	0.318
EL—400 gal	96.301	338.631	0.221	0.779	0.589	0.279 34	0.348
EL—500 gal	156.617	399.343	0.282	0.718	0.632	0.335 68	0.419
EL—600 gal	未测	未测	未测	未测	未测	未测	未测
EL—(800—900 gal)	倒塌	倒塌	倒塌	倒塌	倒塌	倒塌	倒塌

通过表 5 得出的整体结构破坏系数并结合振动台试验现象可以得出,8 度区基本烈度下的地震,碳纤维布加固的柱架破坏系数已经超过 0.5,说明加固节点已到达中等破坏,需要再次修复加固,榫卯节点由于承载力下降,料拱铺作层开始分担更多的地震能量;碳纤维布加固古建筑木结构在经历 8 度区罕遇地震时,整体结构的破坏系数为 0.348,随着加固节点破坏的加剧,料拱铺作层分担越来越多的地震能量,但结构仍具有较强的整体稳定性和承载力;当地震峰值加速度为 500 gal 时,整体结构破坏系数为 0.419,结构处于中等破坏状态,此时,各节点的碳纤维布陆续发生断裂,并沿纵向发展,结构的摇摆幅度明显加大,且铺作层发生较大的滑移,整体结构明显进入塑性阶段;随着地震作用的增加,结构有倒塌的趋势。

2.3 基于破坏程度的震害等级划分

参照钢筋混凝土结构中应用比较广泛的 Park-Ang^[15] 损伤破坏程度分类,并结合碳纤维布加固古建筑木结构振动台试验结果以及整体结构的破坏系数,表 6 给出了古建筑木结构整体结构基于破坏程度的震害等级。

表 6 地震作用下碳纤维布加固整体结构破坏系数及对应震害等级

整体结构破坏系数	震害等级	易修复程度
0.00~0.10	基本完好	不用修复
0.10~0.25	轻微破坏	较易修复
0.25~0.45	中等破坏	可以修复
0.45~0.80	严重破坏	不可修复
0.80~1.00	倒塌	不可修复

3 结论

借助碳纤维布加固燕尾榫柱架和料拱铺作层的拟静力试验以及整体加固结构的振动台试验,计算出了两耗能元件在低周反复荷载作用下所具有的“抵抗破坏潜能”和各工况地震作用下每一耗能元件所耗散的能量,并基于构件/结构的“抵抗破坏潜能”和能量耗散原理建立了碳纤维布加固古建筑木结构各构件及整体加固结构在不同工况地震作用下的地震破坏评估模型,为碳纤维布加固古建筑木结构的震前破坏预测和加固古建筑木结构的保护再修复提供可靠的理论依据。主要结论有以下几点:

1) 碳纤维布加固古建筑木结构在小震作用下的主要耗能元件为碳纤维布加固柱架榫卯节点,但随着地震强度的增大,榫卯节点破坏逐渐加剧,料拱铺作层分担的地震能量越来越多。

2) 利用构件地震破坏评估模型,定量地计算出了碳纤维布加固燕尾榫柱架以及料拱铺作层在各工况地震作用下的破坏系数,碳纤维布加固燕尾榫柱架由于粘合榫卯本身的弱承载力以及碳纤维布的单一受力性能,当地震动强度为 800 gal 时,节点几乎完全退出工作,破坏系数接近于 1;而料拱铺作层即使在 8 度罕遇地震作用下,其破坏系数也仅仅在 0.34 左右,属于轻微破坏。

3) 基于能量分配系数建立的碳纤维布加固古建筑木结构整体结构地震破坏评估模型,较好地计算出了整体加固结构在各工况地震作用下的破坏情况,与试验现象基本符合,并基于破坏程度,得出了整体加固结构不同破坏系数对应的结构不同震害等级。

参考文献:

- [1] 李诫(宋). 营造法式[M]. 上海:商务印书馆,1954.
- [2] 谢启芳. 中国木结构古建筑加固的试验研究及理论分析[D]. 西安:西安建筑科技大学,2007.
- [3] 张鹏程. 中国古代木构建筑结构及其抗震发展研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2003:82-87.
- [4] Tanahashi H, Suzuki Y. Elasto-plastic Pasternak model simulation of static and dynamic loading tests of traditional wooden frames [C]// World Conference on Timber Engineering - WCTE 2010, Riva del Garda, Italy, vol. 2, 2010: 476-485.
- [5] Seo J, Choi I, Lee J. Static and cyclic behavior of wooden frames with tenon joints under lateral load [J]. Journal of Structural Engineering, 1999, 125(3): 344-349.
- [6] Suzuki Y, Maeno M. Structural mechanism of traditional wooden frames by dynamic and static tests [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2006, 13: 508-522.
- [7] JGJ 101-96 建筑抗震试验方法规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社,1997.
- [8] 邱法维,钱稼茹,陈志鹏. 结构抗震试验方法[M]. 北京:科学出版社,2000.
- [9] 薛建阳,赵鸿铁,张鹏程. 中国古建筑木结构模型的振动台试验研究[J]. 土木工程学报,2004,37(6):6-11.
Xue J Y, Zhao H T, Zhang P C. Study on the seismic behaviors of Chinese ancient wooden building by shaking table test [J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(6): 6-11.
- [10] 隋葵. 中国古代木构耗能减震机理与动力特性分析[D]. 西安:西安建筑科技大学,2009:74-97.
- [11] 隋葵,赵鸿铁,薛建阳,等. 中国古建筑木结构铺作层与柱架抗震试验研究[J]. 土木工程学报,2011,44(1):50-57.
Sui Y, Zhao H T, Xue J Y, et al. Experimental study of the seismicity of dougong and wooden frame in Chinese historic buildings[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(1): 50-57.
- [12] 姚侃. 木结构古建筑的结构特性及抗震性能研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2006:127-139.
- [13] GB 50165-92 古建筑木结构维护与加固技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,1992.
- [14] 于琦,孟少平,吴京. 基于变形与能量双重准则的钢筋混凝土结构地震损伤评估[J]. 土木工程学报,2011,44(5):16-23.
Yu Q, Meng S P, Wu J. Deformation and energy-based seismic damage evaluation of reinforced concrete structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(5): 16-23.
- [15] Park Y J, Ang A H S. Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete [J]. Journal of Structural Engineering, 1985, 111 (4): 722-739.

(编辑 罗 敏)