

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201808019



典型江南传统木构建筑的 构件重要性分析方法

淳庆, 孟哲, 贾肖虎, 金辉

(东南大学 建筑学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 以江南典型宋元木构建筑(宁波保国寺大殿)和江南典型明清木构建筑(甘熙故居津逮楼)为研究对象,基于能量方法,采用改变后结构整体应变能的单位体积改变率作为构件重要性的评价指标,运用有限元软件 ANSYS 开发基于生死单元法和改变弹性模量法的构件重要性评价程序.通过对保国寺大殿和津逮楼的单榀框架和整体框架在竖向荷载作用下的结构构件重要性的计算分析,得到构件的重要性系数和重要性排序,并指出这两个典型构架体系的江南传统木构建筑的关键构件.结果表明:改变弹性模量法更适用于江南传统木构建筑结构构件的重要性分析.

关键词: 传统木构建筑; 构件重要性; 关键构件; 生死单元法; 改变弹性模量法

中图分类号: TU 366.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2019)01-0064-08

Evaluation Methods of Component Importance of Typical Traditional Timber Buildings in Yangtze River Regions

CHUN Qing, MENG Zhe, JIA Xiaohu, JIN Hui

(School of Architecture, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: A typical traditional timber building (Baoguo Temple in Ningbo) built in the Song and Yuan dynasties and a typical traditional timber building (Jindai Building in Ganxi's former residence) built in the Ming and Qing dynasties were taken as the examples, based on energy method, the change of unit volume towards the strain energy of the whole structure after altering component attributes was employed as the component importance evaluation index, the finite element software of ANSYS was used to assess the component importance of these two traditional timber buildings with the birth-death element method and the altering elastic modulus method. Through the component importance analysis of the single frame and the whole frame under the vertical loads, the component importance coefficient and the sorting results of these two traditional timber buildings were obtained, the key components of these two traditional timber buildings were pointed out. The results show that the altering elastic modulus method is more suitable for the calculation and analysis of component importance of traditional timber buildings.

Keywords: traditional timber building; component importance; key component; birth-death element method; altering elastic modulus method

江南地区拥有大量的传统木构建筑,保留至今的建筑年代涵盖宋元与明清时期,江南地区传统木构

建筑的主要流派有香山帮、东阳帮、宁绍帮及徽州帮等。这些工艺流派建造的大量江南传统木构建筑明显区别于北方传统木构建筑。这些木构建筑遗产具有较高的历史价值、艺术价值和科学价值，其关键构件一旦失效就很有可能导致整体结构的坍塌，造成巨大损失。因此，对建筑遗产的构件重要性研究能够给建筑遗产保护提供科学合理的依据，针对关键构件采取加强的修缮措施可以防止可能发生的大范围倒塌破坏。构件重要性通过构件功能对结构整体性能的贡献及影响进行评价，它受到结构的力学性能、荷载工况和评价指标的影响。张雷鸣等^[1]通过比较拆除不同杆件对结构系统总体应变能影响的大小以确定结构杆件的重要性。林旭川等^[2]通过引入基于结构广义刚度的构件重要性指标，提出考虑构件重要程度差异的钢筋混凝土(RC)框架结构抗震优化设计方法。柳承茂等^[3-4]将构件失效后对整体结构的影响面积作为评价指标。Jahan 等^[5]提出平均应力比评价指标、刚度退化系数评价指标及稳定退化系数评价指标。Nafday^[6]将原始结构与拆除构件后结构的刚度矩阵行列式的比值作为评价指标。Zhu 等^[7]等提出综合考虑多因素的客观赋权法及对应的评价指标与赋权系数。叶列平等^[8]以拆除构件对广义结构刚度的影响程度作为构件重要性评价指标，并将该指标转化为结构变形能损失。张松^[9]和朱丽华等^[10]将改进的统计矩点估计法应用于构件重要性分析。Mazars^[11]基于重要性评价原理，开发相应的计算程序使功能得以实现。Hoseyni 等^[12]将生死单元法应用于机械接头的性能评估中。Wang 等^[13]运用生死单元法评估某二战时期桥梁的构件重要性。郑江等^[14]将生死单元法应用于建筑结构施工的力学分析。综上，目前对于构件重要性的研究主要集中在制定评价指标和结合现代工程的应用，鲜有涉及传统木构建筑遗产的研究。本文运用有限元软件 ANSYS，自主开发传统木构建筑的构件重要性计算程序。

1 基于能量方法的构件重要性评价

1.1 结构总应变能的概念与评价指标

应变能即是以应变和应力的形式贮存在物体中的势能。对于一个保守的杆件结构系统，外荷载所做的功能够完全贮存在结构中，从而转化为该结构系统的应变能，总应变能即系统中所有杆件应变能之和。叶列平等^[8]中提出以构件损失所导致的结构广义刚度(结构应变能)损失率作为衡量构件在结构中的重要程度指标，其简化后的表达式为

$$I = 1 - \frac{K_f}{K_0} = 1 - \frac{U_0}{U_f} \tag{1}$$

式(1)中： K_0 和 K_f 分别为原始结构和某构件属性改变后的结构广义刚度； U_0 和 U_f 分别为原始结构和某构件属性改变后的结构总应变能。

结构广义刚度是针对杆系结构建立的，忽略了构件体积对重要性的影响。由于运用有限元软件建立梁单元模型，为排除单元体积差异对结果的影响，卢啸等^[15]提出考虑单元体积影响的评价指标，结构整体应变能的单位体积改变率表达式为

$$\Gamma = \left(1 - \frac{U_0}{U_f}\right)/V_e \tag{2}$$

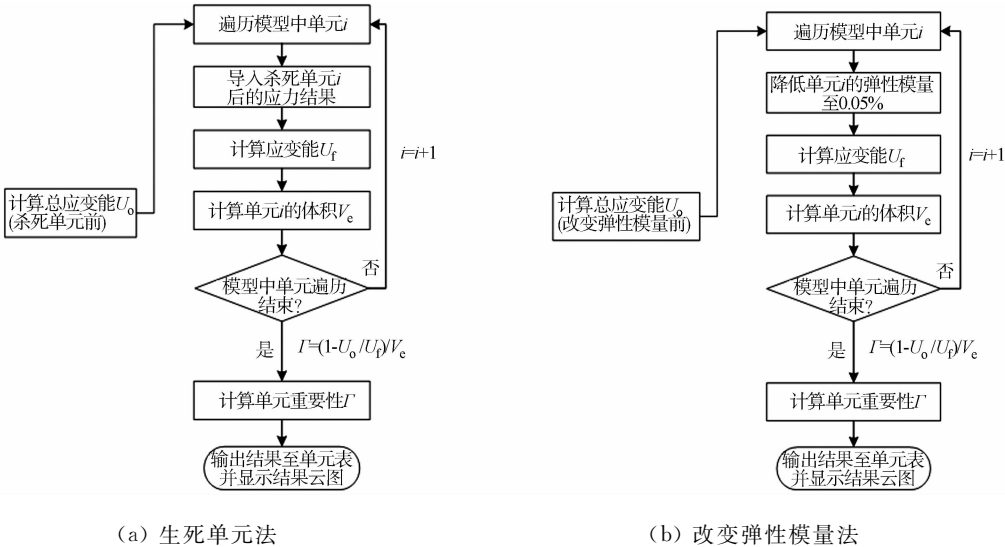
式(2)中： V_e 为改变属性单元的体积。

1.2 基于能量方法的构件重要性计算方法

基于能量方法的构件重要性计算多通过 ANSYS 等有限元软件的生死单元功能实现。其原理是在单元被“杀死”时刚度接近于 0，与该单元有关的载荷向量的输出值、应力和应变均被重置为零，因而被“杀死”的单元不再对载荷生效。这种模拟方式可以近似等效于单元被删除的脆性失效，已被广泛地应用于混凝土框架和砌体结构的构件重要性评价中，而这种脆性失效情况有别于文中研究的传统木构建筑的结构损伤情况。

对于传统木构建筑的损伤类型可大体分为：木材腐朽、构件开裂、挠度过大和榫卯节点拔榫等。由于木材是各向异性的非匀质材料，损伤多为塑性的，有别于生死单元法的模拟脆性失效状态。针对古建筑木结构的材料力学特性，提出基于改变弹性模量的构件重要性计算方法。该方法为逐一降低单元的弹性模量，得到它们对整体结构变形能的单位体积影响程度。弹性模量改变的单元不同于被“杀死”的单元，它能够传递力并产生变形，更贴近真实状态下的木构损伤情况。运用能量方法，对采用生死单元法和改

变弹性模量法对传统木构的构件重要性评价进行比较分析,得到更适用于传统木构建筑的构件重要性计算方法.采用有限元软件 ANSYS 开发基于能量方法的生死单元法和改变弹性模量法的传统木构构件重要性评价程序,具体流程如图 1 所示.



性模量法的计算结果更符合实际情况。因此,综合考虑生死单元法的不足之处,以及木构建筑的结构损伤、材料性能退化和结构的受力特征,提出采用改变弹性模量法对传统木构建筑的构件重要性进行计算,被改变弹性模量的单元的变形是连续的且能够传递荷载。考虑塑性破坏过程,改变弹性模量法更符合传统木构建筑实际的结构状态评估。

2 江南典型宋元木构建筑构件重要性评估

2.1 保国寺大殿有限元模型的建立

江南地区现存宋元时期传统木构建筑的结构体系以厅堂八架椽屋为主,其中,前后乳栿用四柱为最有代表性,在其基础上进行功能和形式优化及改进,形成各不相同的多变结构体系。应用最为广泛的结构演变分支是“八架椽屋前三椽栿后乳栿用四柱”,保国寺大殿、天宁寺大殿和延福寺大殿均为典型的月梁造“八架椽屋前三椽栿后乳栿用四柱”结构体系。保国寺大殿现状,如图 4 所示。保国寺大殿结构为厅堂式构架,呈传统井字型,前后内柱不同高。大殿结构主要由柱、梁、檩条、斗拱等构件组成,梁柱连接均为榫卯连接,其中,梁与柱的连接榫卯主要为锲口鼓卯或直榫,短柱与梁的连接榫卯主要为直榫。

采用 ANSYS 有限元软件建立大殿的有限元计算模型,如图 5 所示。梁柱连接节点考虑榫卯半刚性,柱与基础采用铰接,斗拱采用斜杆进行模拟,结构阻尼比取 0.05,柱、梁、檩条、斗拱等构件采用 BEAM189 单元模拟,梁柱榫卯节点采用 COMBINE39 单元模拟,考虑到仅做构件重要性评估方法研究,对应工况可为弹性受力状态,因此,COMBINE39 单元模拟的榫卯节点半刚性为常刚度。大殿主要榫卯节点的半刚性数据可参考文献[16],大殿木结构承重构件的主要材质为杉木。考虑到建筑物修建距今的时间大于 500 a,参考《古建筑木结构维护与加固技术规范》建议的折减系数,木材顺纹弹性模量设计强度调整系数为 0.75,故大殿木材的顺纹弹性模量取 6 750 MPa,泊松比为 0.3,木材其余的弹性参数可参考文献[17]按比例关系取值。根据现场勘察,大殿屋面每平方米有 16 块盖瓦、32 块底瓦,苫背平均厚为 12 cm,故屋面恒荷载标准值取 3.5 kPa。活荷载标准值取 0.7 kPa。



图 4 保国寺大殿现状
Fig. 4 Present situation
of Baoguo Temple

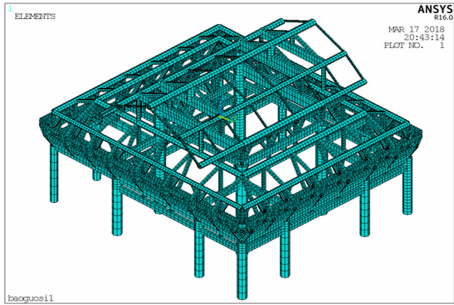


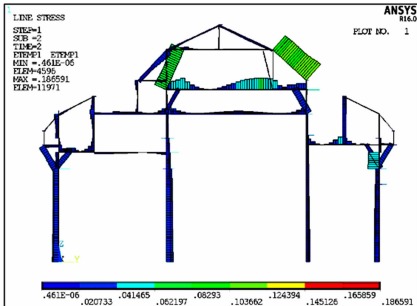
图 5 保国寺大殿有限元模型
Fig. 5 Finite element model
of Baoguo Temple

2.2 构件重要性评估

2.2.1 明间横剖面木构架 经过计算,保国寺大殿明间木构架的构件重要性计算结果,如图 6(a)所示。由图 6(a)可知:最大的构件为内柱上端支撑平梁的斗拱构件,在竖向荷载计算中该构件承受了较大的压应力;四椽栿由于承受了较大的弯矩和剪力并产生较大的变形,计算结果也偏大;保国寺大殿的前檐柱和前内柱由于承受了更多的屋面荷载,重要性明显大于后檐柱和后内柱。

2.2.2 山面前檐柱-内柱纵剖面木构架 选择保国寺大殿的横剖面(山面前檐柱-内柱截面)进行构件重要性计算分析,结果如图 6(b)所示。由图 6(b)可知:构件重要性的最大值发生于东侧和西侧的山面前檐柱,在柱构件内的重要性呈由上至下递增趋势,其次是前内柱,最后是靠近内柱的斗拱构件。

2.2.3 结构整体 保国寺大殿结构整体的构件重要性计算



(a) 横剖木构架

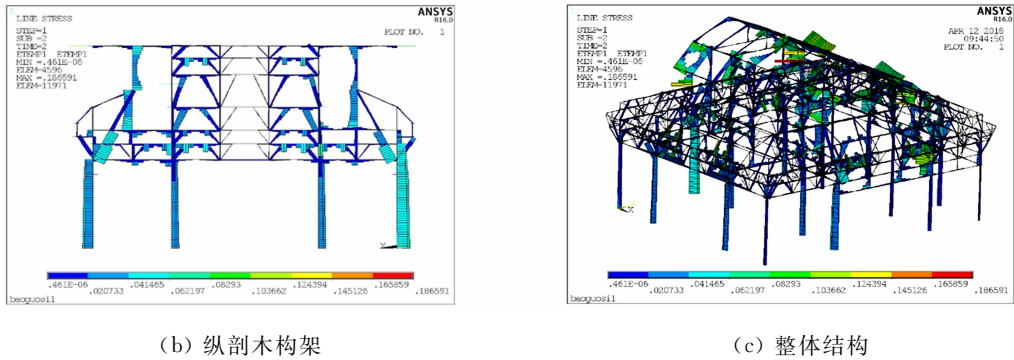


图 6 保国寺大殿的构件重要性计算结果

Fig. 6 Calculation results of component importance of Baoguo Temple

结果,如图 6(c)所示。由图 6(c)可知:由于保国寺大殿的构件较多且结构复杂,在竖向荷载作用下,构件重要性最大值发生于内柱上端支撑平梁的斗拱构件,该部分构件的截面较小又承受了较大的屋面荷载,当发生损伤时容易导致屋面角部坍塌;前内柱和前山面檐柱共 4 根柱的重要性在所有柱中最大,因其所承担的屋面荷载面积最大,此外,两前檐柱底部的计算结果也偏大,其余重要性结果较大的构件主要有节点变形较大的构件及其周、长细比较大的构件,以及受力复杂、应力较大的构件。

传统木构建筑基于能量流方法的构件重要性分析可通过有限元计算得以实现,计算结果既可以通过云图直观显示,也可以用数据列表的形式呈现,但这两种方法都不能直观地对构件的重要性等级进行评价。将构件重要性进行等级分类可以帮助研究人员和修缮工作者更便捷地识别关键构件,当结构中的关键构件出现损伤或破坏时,整体结构应变能的改变最为突出,损坏严重会对传统木构建筑造成无法挽回的损失。因此,对关键构件进行的监测能够更高效率地避免大型事故的发生,并在古建筑保护工作中提高效率。

传统木构的构件重要性等级评定,如表 1 所示。表 1 中: c 为构件的重要性计算结果在整体结构中的排序百分比。由表 1 可知:等级评定中 $c>95\%$ 的含义为该构件的重要性计算数值大于 95% 的构件,可以评定为 I 级关键构件,其损坏容易造成结构的大面积损坏;II 级重要构件损坏可引起较大范围的损坏;III 级次要构件损坏可引起结构局部范围的损坏;IV 级一般构件损坏一般局限于损害构件本身,对结构整体影响较小。

保国寺大殿有限元模型共包含 17 176 个单元,依据表 1 中的传统木构构件重要性等级评定方法,保国寺大殿的关键构件($c>95\%$)的单元总量为 859 个,其分布如图 7 所示。由图 7 可知:保国寺大殿的主要构件重要性排序为 c (内柱上端支撑平梁的斗拱构件) $>c$ (三椽栿) $>c$ (前内柱-前山墙檐柱的四柱) $>c$ (南立面两前檐柱) $>c$ (其他构件)。

3 江南地区明清时期典型木构建筑

3.1 津逮楼有限元模型的建立

甘熙故居津逮楼是江南地区典型明清风格的木构建筑,如图 8 所示。根据现场测绘和勘察,该建筑的建筑平面布局、梁柱构架体系、木构件尺度、梁柱榫卯连接及空斗墙围护墙体构造做法均基本符合江南传统木构建筑的做法,为典型的明清江南传统木构建筑。津逮楼为东西对称结构,共六楹框架。

津逮楼梁柱连接均为榫卯连接,檐柱与梁连接采用箍头榫连接,中柱与梁连接采用半榫连接,瓜柱与梁连接采用直榫连接,柱与基础采用铰接连接,结构阻尼比取 0.05,柱、梁、檩条等构件采用 BEAM189 单元模拟,梁柱榫卯节点采用 COMBINE39 单元模拟,榫卯半刚性数据参考文献[18]~

表 1 传统木构构件重要性等级评定

Tab. 1 Importance rating of traditional wood structural members

等级	重要性排序	构件描述
I 级	$c>95\%$	关键构件
II 级	$95\%\geq c>80\%$	重要构件
III 级	$80\%\geq c>50\%$	次要构件
IV 级	$50\%\geq c>0\%$	一般构件

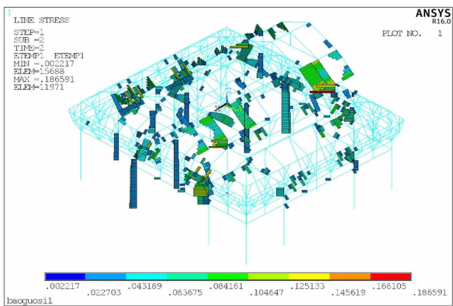


图 7 保国寺大殿关键构件分布

Fig. 7 Distribution of key components of Baoguo Temple

[20]. 津逮楼的木材顺纹弹性模量 E 取 8 550 MPa, 泊松比为 0.3, 木材其余弹性参数参考文献[19]按比例关系取值. 津逮楼的屋面活荷载标准值 $q_K=0.7$ kPa; 屋面恒荷载标准值 $g_K=2.4$ kPa; 楼面活荷载标准值 $q_{K1}=3.5$ kPa; 楼面恒荷载标准值 $g_{K1}=1.0$ kPa. 津逮楼等明清时期的江南传统木构建筑出现了很普遍的砖砌山墙, 将山墙面简化为等效斜撑, 砌体材料强度取测试值如下: 弹性模量为 930 MPa; 泊松比为 0.3; 剪切模量为 357.7 MPa; 密度为 $1\,500\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. 对于结构内部砖砌墙体, 也以等效斜撑的形式进行了简化模拟. 津逮楼的有限元模型, 如图 9 所示.



图 8 津逮楼现状
Fig. 8 Present situation of Jindai Building

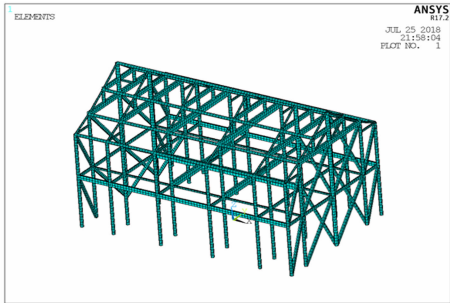


图 9 津逮楼有限元模型
Fig. 9 Finite element model of Jindai Building

3.2 构件重要性评估

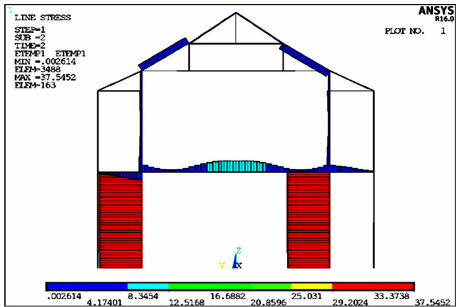
3.2.1 明间木构架 津逮楼明间木构架的构件重要性计算结果, 如图 10(a), (b) 所示. 由图 10(a), (b) 可知: 重要性最大的构件是金柱, 其他构件 (尤其二层构件) 的计算结果不明显, 因此, 选择楼面梁以上的明间木构架二层部分进行独立观察; 二层楼面梁的重要性计算结果与楼面梁以弯曲变形为主导的不利情况相对应, 跨中重要性最大, 其次为梁柱节点处; 虽然三架梁和五架梁的受力水平也较高, 但由于构件截面尺寸较大, 使重要性计算结果降低; 明间木构架的构件重要性排序为 $c(\text{一层金柱}) > c(\text{金柱间楼面梁}) > c(\text{金柱与檐柱间楼面梁}) > c(\text{二层金柱}) > c(\text{一层檐柱}) > c(\text{二层檐柱}) > c(\text{其他构件})$.

3.2.2 边贴木构架 边贴木构架的重要性计算结果, 如图 10(c), (d) 所示. 由图 10(c), (d) 可知: 最大值发生在一层中柱; 与明间木构架不同的是边贴木构架的楼面梁跨度较小, 因而内力水平较低, 重要性计算结果较小; 边贴木构架的构件重要性排序为 $c(\text{一层中柱}) > c(\text{一层金柱}) > c(\text{一层檐柱}) > c(\text{二层中柱}) > c(\text{中柱与金柱间楼面梁}) > c(\text{二层金柱}) > c(\text{二层檐柱}) > c(\text{其他构件})$.

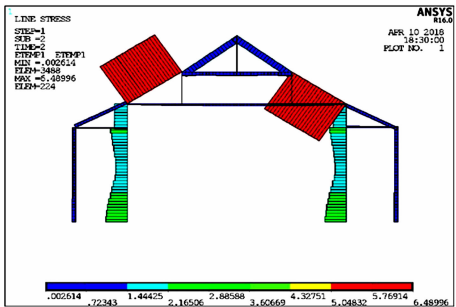
3.2.3 结构整体 津逮楼结构整体的构件重要性计算结果, 如图 10(e) 所示. 由图 10(e) 可知: 明间木构架的金柱构件重要性仍最为突出; 构架间的横向联系构件如枋、檩条的重要性计算结果均较小; 在楼面荷载的作用下, 一层内柱的重要性均较大, 在修缮和保护工作中应当给予重视.

津逮楼有限元模型共包含 3 614 个单元, 其中, 共 181 个单元为关键构件 (单元尺度), 关键构件的分布, 如图 11 所示.

由图 11 可知: 结构整体的关键构件主要是明间木构架一层金柱、明间木构架金柱间楼面梁跨中部分、边贴木构架一层中柱及边贴木构架一层金柱; 津逮楼的主要构件重要性排序为 $c(\text{一层明间金柱}) > c(\text{明间金柱间楼面梁}) > c(\text{一层边贴中柱}) > c(\text{一层边贴金柱}) > c(\text{明间金柱与檐柱间楼面梁}) > c(\text{二层金柱}) > c(\text{明间五架梁}) > c(\text{其他构件})$.



(a) 明间木构架整体



(b) 明间木构架二层部分

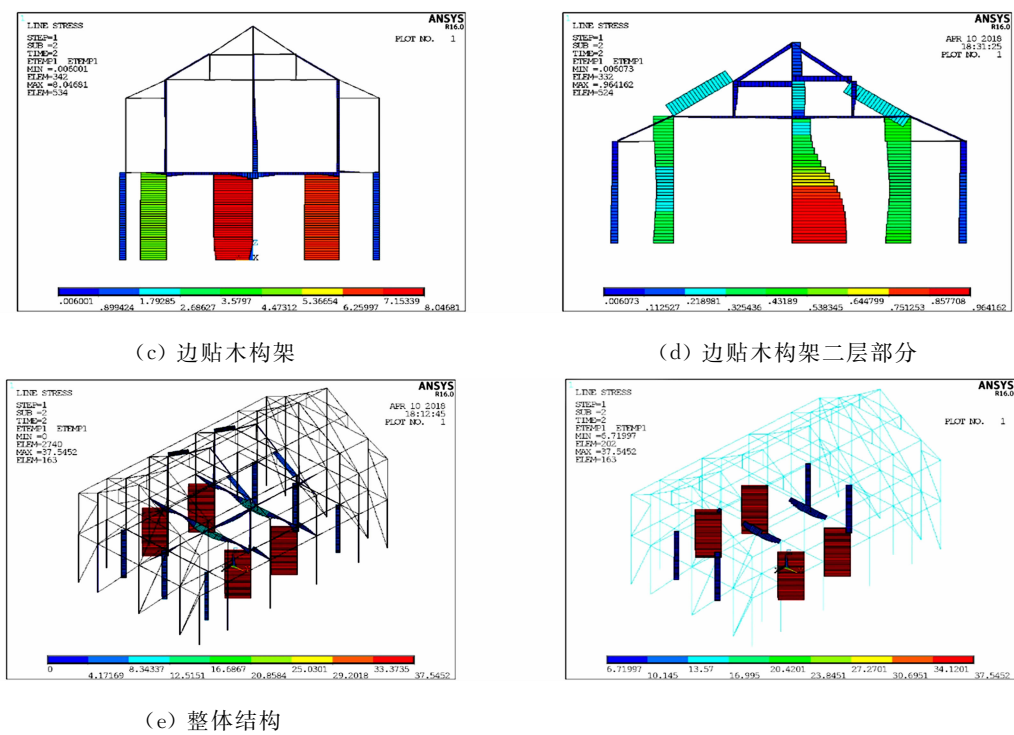


图 10 津速楼的构件重要性计算结果

Fig. 10 Calculation results of component importance of Jindai Building

图 11 津速楼关键构件分布

Fig. 11 Distribution of key components of Jindai Building

4 江南地区传统木构建筑的关键构件分布规律

对比保国寺大殿与津速楼的构件重要性评估结果,由于存在较大的做法和结构体系差异,两个不同时期木构建筑的关键构件分布规律显示出差异性,但也可以从中总结出 3 点关键构件分布的相通之处: 1) 关键构件存在于承受大范围竖向荷载面积の木柱,如保国寺大殿的内柱、津速楼的金柱和中柱等;2) 关键构件存在于跨度较大且承担荷载的梁跨中位置,如保国寺大殿的三椽栿、津速楼的楼面梁和五架梁等;3) 关键构件存在于承担荷载且长细比较大的构件处,如保国寺大殿的内柱上端支撑平梁的斗拱构件、津速楼的楼面梁等. 构件重要性的计算结果不仅与构件的位置有关,还与承担的荷载(如轴力、剪力、弯矩)相关,也与构件截面尺寸相关. 在两个计算实例中,并非所有柱构件都是关键构件,原因在于柱的实际承载力存在安全储备,当某处受损时可以依靠剩余截面继续承载.

5 结论

以有限元软件 ANSYS 为分析平台,自主开发了适用于传统木构建筑的基于能量变化的改变弹性模量法的构件重要性评价程序,提出了构件重要性的评估准则,并提出等级分类方法,基于构件重要性的等级分类可以帮助判断关键构件的分布.

以保国寺大殿和津速楼为例,对宋元时期、明清时期江南典型传统木构建筑的结构类型运用改变弹性模量法,研究了它们在竖向荷载作用下的构件重要性,得到了这两种江南传统木构建筑关键构件的分布规律. 保国寺大殿的主要构件重要性排序为 $c(\text{内柱上端支撑平梁的斗拱构件}) > c(\text{三椽栿}) > c(\text{前内柱-前山墙檐柱的四柱}) > c(\text{南立面两前檐柱}) > c(\text{其他构件})$. 津速楼的主要构件重要性排序为 $c(\text{一层明间金柱}) > c(\text{明间金柱间楼面梁}) > c(\text{一层边贴中柱}) > c(\text{一层边贴金柱}) > c(\text{明间金柱与檐柱间楼面梁}) > c(\text{二层金柱}) > c(\text{明间五架梁}) > c(\text{其他构件})$.

两种江南传统木构建筑的关键构件有如下 3 种分布规律: 1) 关键构件存在于承受大范围竖向荷载面积の木柱,如保国寺大殿的内柱、津速楼的金柱和中柱等;2) 关键构件存在于跨度较大且承担荷载的梁跨中位置,如保国寺大殿的三椽栿、津速楼的楼面梁和五架梁等;3) 关键构件存在于承担荷载且长细

比较大的构件处,如保国寺大殿的内柱上端支撑平梁的斗拱构件、津逮楼的楼面梁等。构件重要性的计算结果不仅与构件的位置有关,还与承担的荷载(如轴力、剪力、弯矩)相关,也与构件截面尺寸相关。

参考文献:

- [1] 张雷明,刘西拉. 框架结构能量流网络及其初步应用[J]. 土木工程学报,2007,40(3):45-49. DOI:10.15951/j.tmgexb.2007.03.008.
- [2] 林旭川,叶列平. 基于构件重要性指标的 RC 框架结构抗震优化设计研究[J]. 建筑结构学报,2012,33(6):16-21. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2012.06.011.
- [3] 柳承茂,刘西拉. 结构安全性综合评估方法的研究[J]. 四川建筑科学研究,2004,30(4):46-48.
- [4] 柳承茂,刘西拉. 基于刚度的构件重要性评估及其与冗余度的关系[J]. 上海交通大学学报,2005,39(5):746-750. DOI:10.16183/j.cnki.jsjtu.2005.05.019.
- [5] JAHAN A,MUSTAPHA F,SAPUAN S M,*et al.* A framework for weighting of criteria in ranking stage of material selection process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2012,58(1):411-420. DOI:10.1007/s00170-011-3366-7.
- [6] NAFDAY A M. System safety performance metrics for skeletal structures[J]. Journal of Structural Engineering,2008,134(3):499-504. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9445(2008)134:3(499).
- [7] ZHU Lihua,WANG Ningjuan,DAI Jun. Evaluation on element importance based on objective weighting method[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2015,34(2):556-563. DOI:10.1007/s11144-007-5156-7.
- [8] 叶列平,林旭川,曲哲,等. 基于广义结构刚度的构件重要性评价方法[J]. 建筑科学与工程学报,2010,27(1):1-6.
- [9] 张松. 改进的统计矩点估计法及其在构件重要性分析中的应用[D]. 重庆:重庆大学,2012.
- [10] 朱丽华,王宁娟,戴军. 基于客观赋权法的构件重要性评估[J]. 建筑科学与工程学报,2015(4):46-52.
- [11] MAZARS J. Structural reliability[J]. Journal of High Pressure Institute of Japan,2009,17(14):257. DOI:10.1002/9780470611708.
- [12] HOSEYNI S M,SHAKOURI M. Verifying the effect of element birth and death technique on stress distribution in cracked areas[J]. Journal of Automotive and Applied Mechanics,2015,3(2):13-16.
- [13] WANG Duodian, QIU Guoqing. The wartime bridge reliability evaluation model based on birth-and-death process [J]. American Journal of Computational Mathematics,2011,1(4):281-284. DOI:10.4236/ajcm.2011.14034.
- [14] 郑江,葛鸿鹏,王先铁,等. 局部形约束生死单元法及其在施工力学分析中的应用[J]. 建筑结构学报,2012,33(8):101-108. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2012.08.001.
- [15] 卢啸,陆新征,张劲泉,等. 某石拱桥连续倒塌模拟及构件重要性评价[J]. 兰州交通大学学报,2010,29(6):25-30. DOI:10.3969/j.issn.1001-4373.2010.06.006.
- [16] 韩宜丹,淳庆. 宁波保国寺大殿风振性能研究[J]. 文物保护与考古科学,2017,29(6):84-94.
- [17] 汪兴毅,王建国. 徽州木结构古民居营造合理性的理论分析[J]. 合肥工业大学学报,2011,34(9):1375-1380. DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2011.09.023.
- [18] 淳庆,吕伟,王建国,等. 江浙地区抬梁和穿斗木构体系典型榫卯节点受力性能[J]. 东南大学学报(自然科学版),2015,45(1):151-158. DOI:10.3969/j.issn.1001-0505.2015.01.02.
- [19] 淳庆,潘建伍,韩宜丹. 江南地区传统木构建筑半榫节点受力性能研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2016,43(1):124-131. DOI:10.3969/j.issn.1674-2974.2016.01.017.
- [20] CHUN Qing, HAN Yidan, MENG Zhe. Mechanical properties of monodirectional gutou mortise-tenon joints of the traditional timber buildings in the Yangtze River region [J]. Journal of Southeast University: English Edition, 2016,32(4):457-463. DOI:10.3969/j.issn.1003-7985.2016.04.011.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 方德平)