

结构拆解力学分析基础与基本方法

夏冰¹, 肖建庄^{1,2}, 吕凤悟¹, 王耀³

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092;

3. 中建海峡建设发展有限公司, 福建 福州 350015)

摘要: 建立了结构拆解的力学分析总体思路, 提出安全性和再利用性作为结构拆解控制属性, 阐明结构拆解的力学分析目标、对象、工况、问题与分析方法; 建议了状态离散法和空间分割法作为简化分析方法, 将拆解全流程划分为多状态, 将各状态的分析划分为局部分析、结构分析和构件分析3类, 总结力学分析内容。进一步, 筛选了可用的概念分析、解析分析和数值模拟工具, 给出混凝土结构和钢结构框架拆解分析简例, 并指出未来研究方向及难点, 致力于为拆解安全、拆解后构件再利用和拆解效率提升提供研究基础。

关键词: 结构拆解; 安全性; 再利用性; 力学分析; 鲁棒性

中图分类号: TU311

文献标志码: A

Mechanical Analysis and Fundamental Philosophy for Deconstruction of Structures

XIA Bing¹, XIAO Jianzhuang^{1,2}, LÜ Fengwu¹, WANG Yao³

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. CSCEC Strait Construction and Development Co., Ltd, Fuzhou 350015, China)

Abstract: The general idea of mechanical analysis for deconstruction of structures is established. Safety and reusability are proposed as control attributes of deconstruction, and the aim, objects, conditions, problems, and methods of the mechanical analysis are clarified. Besides, the state dispersion method and the spatial segmentation method are recommended as the methods for simplification. In this way, the whole deconstruction process is divided into multiple states, and the analysis of each state is divided into local analysis,

structural analysis, and component analysis, of which the contents are summarized. Furthermore, the available tools in conceptual analysis, analytical analysis, and computational simulation are screened, based on which, deconstruction scenarios of simple concrete and steel frame structures are analyzed, and future research directions and difficulties are pointed out, in order to provide research foundation for the safety of deconstruction, the reuse of components, and the enhancement of efficiency.

Key words: deconstruction of structures; safety; reusability; mechanical analysis; robustness

我国城镇化进程带来了大规模建设热潮, 建成服役后的建筑结构拆除将是未来土木工程的一个不可避免的问题。“十一五”期间, 我国年均建筑拆除量已达9.2亿m²[1]。2017年, 我国年排放建筑固体废物(简称“固废”)量达18亿t(不含渣土), 占城市固废的30%~40%[2], 已造成严重环境负担, 提高建筑固废资源化利用水平将成为建筑业可持续发展的必然要求[3]。

结构拆解, 是按特定流程将结构构件分类、分对象从原结构中逐步拆卸的逆向施工方法。近年来, 已有研究重点关注结构拆解技术, 提出了不同类型结构构件的拆解施工方法[4-6], 尽量保证了构件的完整性, 使构件直接再利用成为可能。为优化结构拆解和构件再利用的便捷性, 亦有文献提出了可拆装结构的理念[7], 研发构造上便于拆卸与再安装的可拆装节点[8-9], 使预制混凝土构件具有整体再利用潜能; 有研究[10]采用常规施工工具, 实现了混凝土构件的拆装过程, 并通过拟静力试验验证了可拆装混凝土

收稿日期: 2019-12-06

基金项目: 国家自然科学基金(51325802, 51661145023); 中央高校基本科研业务费专项资金(22120200063)

第一作者: 夏冰(1996—), 男, 博士生, 主要研究方向为结构拆解力学分析与可持续性评价。

E-mail: xiabing@tongji.edu.cn

通信作者: 肖建庄(1968—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为可持续混凝土结构。

E-mail: jzx@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

土框架节点具有良好的抗震性能。相比于再生混凝土等原料化后循环利用的方式,构件层次的再利用可降低资源化过程的能耗与污染,可持续性更优^[11-12]。因此,采用结构拆解替代传统拆除,对建筑固废资源化的发展具有里程碑意义。

结构拆除过程中,构件承载力、连接性能、原有结构体系完整性等逐渐被破坏,危险性较高,造成了不少工程事故^[13]。结构拆解因工期长、工序多使得类似问题更为突出,安全管控尤为重要。结构拆解这一新型施工过程将形成新型结构形式、传力路径与受力承载状态,有必要采用针对性力学分析以保证拆解施工全过程的安全性。

在现有力学理论的基础上,本文结合结构拆解的目标和特征,提出控制属性,提炼出主要力学分析内容,并给出可行的力学分析工具,为结构拆解提供理论保障与指导。

1 结构拆解的力学基础

1.1 拆解目标与控制属性

结构拆解关注废旧建材资源化利用率的提升,其目标为在安全的前提下,从原有结构中尽可能多地拆卸下损伤程度较低的可再用构件,兼顾施工成本与工期的降低。因此,相应的力学分析需为拆解全流程的力学控制提供保障,可提炼出以下2种控制性拆解属性。

(1)安全性。结构拆解可能造成局部或整体安全风险。拆解作业削弱局部承载力,周边区域内力重分布显著,易出现承载力不足导致的意外破坏。结构鲁棒性表征在偶然作用对结构造成局部损伤的条件下,结构体系不会发生连续倒塌的能力^[14]。结构拆解造成的整体安全风险主要来源于结构冗余度的变化,需考虑与鲁棒性分析类似的问题,但将上述偶然作用变更为人工干预。为保证拆解安全性,需开展承载力校核和结构鲁棒性分析。

(2)再利用性。再利用性反映拆解后构件或剩余结构的再次使用潜能,关注材料性能劣化程度和构件的损伤、残余应力与残余变形程度,上述程度越低,再利用性越高。

安全性满足要求是结构拆解实施的必要条件,而再利用性是实现拆解目标与意义的关键属性,应尽量满足,可作为拆解的优化目标。结构拆解的力学分析需获取能有效判别以上2类属性的力学状态量。如图1给出了单根构件拆解示意,指明了本文

叙述中的各类对象,其中涉及2个拆解过程,单个拆解过程对应单步拆解作业与一处约束解除。

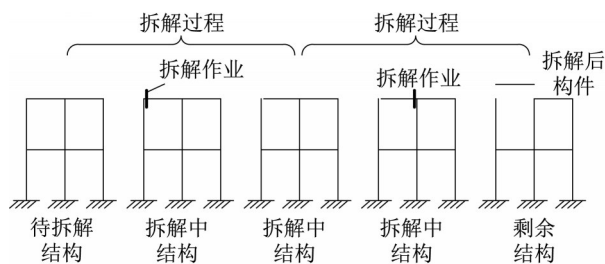


图1 单根构件拆解流程及结构拆解各分析对象

Fig.1 Deconstruction of a component and analysis objects of deconstruction

1.2 拆解类别与荷载状况

传统的结构力学分析是在特定结构形态的基础上分析各类荷载或荷载组合作用下结构的力学响应。而在拆解过程中,结构形态与荷载状况均随施工过程的演进而不断变化,时变特征较强。但不同拆解作业对结构内力的扰动程度不同,造成的时变影响也存在差异,带来不同的分析需求。

结构拆解过程可进行如下分类:

(1)依据拆解顺序分为正序拆解和非正序拆解。前者从上至下将构件依次拆解,与结构建造的逆过程相近;后者则是在目标构件上方结构尚未完成拆解时,优先对目标构件实施拆解。

(2)依据施工方法分为有支撑拆解和无支撑拆解。前者指作业前在拆解区域安装临时支撑,以分担拆解后局部产生的附加内力;后者则指无临时支撑的拆解作业,结构时变造成的内力重分布更为显著。

(3)依据作业特点分为慢速拆解和快速拆解。前者为缓慢移除约束、释放内力,动态响应不明显;后者则快速解除局部约束,造成的应力波传播将使结构到达静力平衡前产生较为明显的短时动态响应^[15]。

各类拆解过程对结构受力的影响程度如表1所示。应当指出,拆解全流程可能由一类或多类拆解过程构成。

结构拆解的工程特征形成力学分析中关注的荷载状况,需考虑静力与动力作用。静力作用主要有结构自重和临时施工荷载,如施工机具与废弃物的堆放、施工人员的移动、施工机械作用等,部分地区可通过拟静力方式考虑风、雪等荷载作用。动力作用主要有地震等自然灾害的动力作用、结构形状快速时变产生的动力效应、施工意外造成的冲击荷载

表 1 拆解类别及对应力学影响

Tab.1 Deconstruction categories and corresponding mechanical influence

拆解类别	静/动态	内力扰动	拆解作业	剩余结构
	结构响应	程度	周边影响	整体影响
正序有支撑慢速	静	—	—	—
正序有支撑快速	静	—	✓	—
正序无支撑慢速	静	+	✓	—
正序无支撑快速	动	++	✓	✓
非正序有支撑慢速	静	+	✓	✓
非正序有支撑快速	动	+	✓	✓
非正序无支撑慢速	静	++	✓	✓
非正序无支撑快速	动	+++	✓	✓

注:—表示影响可忽略;+表示影响弱;++表示影响较强;+++表示影响强;✓表示需进行力学分析。

和部分施工方法造成的结构振动等。

拆解中结构的动力响应程度与拆解类别密切相关,短时动态响应若出现,则将成为该拆解过程的控制性工况,可简化地在静力分析中采用动态放大系数考虑这一影响^[16-18]。此外,常规结构拆解工期短,遭遇重大灾害的概率很小,可不考虑地震作用^[19];对于超高层或复杂结构,工期长、倒塌影响大,应适当考虑地震作用。对于其他灾害也可根据地区特征,分析工期内灾害发生的概率,以确定是否进行灾害下的动力分析。人为失误造成的动力影响可转化为意外冲击荷载作用,考虑冲击荷载的施加的最不利位置,分析结构的鲁棒性。

组合上述静、动力作用,可形成适合于各类拆解背景的力学分析工况。

1.3 力学状态与理论基础

待拆解的原结构可由不同种类的材料构成,从固体力学的观点出发,这些结构材料所处的宏观力学状态主要有弹性、塑性和黏弹性^[20]。进入塑性后,将出现不可逆变形,对结构外观及性能产生影响;黏弹性体现于结构长期性能中的徐变与应力松弛,长期使用造成结构的变形及应力状态与初始设计状态存在差异,这种差异在预应力结构中体现得尤为明显^[21]。以上分析可依据现有材料力学、弹性力学、弹塑性力学等基础理论进行。

损伤力学是基于材料或结构宏观力学性能退化进行力学分析的方法^[22]。通过引入损伤变量,不仅能辅助分析结构受力状态,还可反映结构各部分力学性能劣化程度。相较于避免损伤发生,将再利用部位的损伤因子控制在某一限值以下,可扩大资源化再利用的选择面,更适合于实际工程。

时变结构力学为形状时变的拆解中结构与剩余

结构提供了一种适用性较好的力学分析方法^[23],可分为快速、慢速和超慢速时变结构力学3类^[19],快速时变可用于快速拆解造成的动态响应分析,慢速时变可用于拆解过程静力分析,超慢速时变可用于服役后、拆解前的结构状态分析。边界约束减弱可能导致部分构件或局部结构失稳,可采用结构稳定理论分析。拆解作业中,破坏面裂纹可能发生意外形式的扩展,进而降低结构或构件的再利用性能,可采用断裂力学理论进行分析与控制。

此外,结构服役期内环境作用下性能退化是影响待拆解结构力学性能的重要因素,工程结构典型服役环境有大气环境、工业环境、海洋环境、冻融环境等^[24],需采用碳化锈蚀、氯盐侵蚀、硫酸盐侵蚀、冻融循环等作用下结构性能退化预测理论成果定义待拆解结构的初始性能,有条件时还可依据现场检测结果进行修正。

2 结构拆解的力学分析内容

2.1 简化方法与分析类别

针对拆解工程的特点,可提出以下2种简化分析方法:

(1)状态离散法。理论上,拆解施工过程中结构随施工作业不断变化,时变效应明显。但当结构时变不造成明显的动力响应时,可依据慢速时变结构力学,将结构的形状时变离散为一系列时不变的结构状态进行分析。当动力响应明显时,也可简化为动力荷载作用于特定结构状态的问题,避免力学分析中结构参数时变带来的复杂性。通常基于单步拆解开始前与完成后的结构状态开展分析。

(2)空间分割法。单步拆解作业往往是对局部区域进行破拆,局部区域有较为显著的内力重分布或裂纹扩展过程,力学分析需跟踪上述变化过程以判别危险状态。由于过程分析涉及的状态相对密集,若基于整体结构模型分析将使计算量过大,而局部作业对远离局部区域的应力扰动较小,可对整体结构进行空间分割,对局部区域单独划分更密集的分析状态,找到危险状况后再反作用于剩余结构完成整体分析。这一简化的实质为忽略作业局部和其余结构力学响应的耦合作用,因而局部范围的选择决定分析精度^[18],应依据局部拆解对结构体系的影响的敏感程度确定。

基于状态离散法和空间分割法,结构拆解全流程可划分为一系列离散的结构状态,对各结构状态

可开展局部、结构和构件3类分析,如图2。

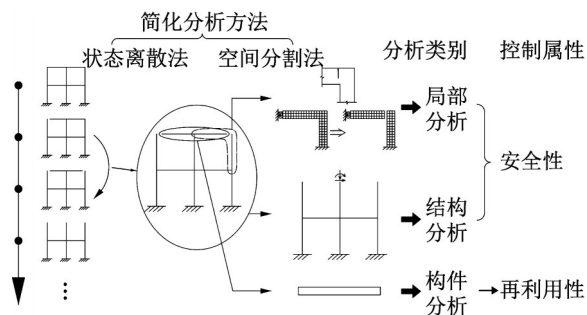


图2 结构拆解力学分析内容

Fig.2 Analysis contents of deconstruction of structures

2.2 分析目标与主要内容

2.2.1 局部分析

局部分析的目标为建立描述拆解作业影响的荷载模型,并校核局部承载力。通过提取拆解作业及周边应力、变形变化较大的区域作为子结构,其余结构部分作为边界约束,进行力学分析,将拆解作业的特殊影响集中于所分析局部,关注子结构中内力转移规律。

对于施工作业区域,可通过荷载统计,采用量化的静、动力作用模型描述拆解施工作用。局部分析需重点关注拆解造成的约束解除过程。破坏面是拆解的约束解除处,对于螺栓、榫卯、可拆装节点等可拆连接的情况,连接的释放较为便捷,断裂风险小,需关注截面应力重分布过程;对于现浇、焊接等整体连接情况,常采用局部切割的方式完成拆解,产生的人工裂纹处于复杂应力场中,裂纹扩展方向与原有裂纹方向存在一定夹角^[25],需评估裂纹意外扩展和突然破坏风险。通过过程分析,可识别危险状况,评估作业安全,同时,将拆解对破坏面的特殊影响转化为通用的结构力学状态参量表达。

对于作业周边区域,有支撑拆解的分析重点为拆解中构件、临时支撑和剩余结构在该局部的内力重分布;无支撑拆解的分析重点则为约束撤除后构件承载机制的变化。此外,还需重点关注边界约束弱化后的构件稳定性问题。通过力学状态分析实现局部承载力校核,并储存典型危险状况,为后续结构分析和构件分析提供荷载、损伤等力学参数。

2.2.2 结构分析

结构分析的目标为判别各结构状态的安全性,具体为整体承载力与鲁棒性校核。正序拆解对剩余结构传力路径影响小,安全风险可在局部分析中得

到充分体现,可弱化结构分析。而非正序拆解将切断原传力路径,存在连续倒塌风险^[26],即单根构件的局部失效可能造成结构大规模失效。此时,拆解对剩余结构的影响与抗连续倒塌分析中常用的改变路径法(Alternate Path Method)^[16, 27-28]分析状况十分类似,需利用结构冗余度提供的替代荷载传递路径保证拆解安全。采用局部分析结果可简化结构承载力分析中的荷载作用项;若结构响应与局部分析中的边界条件设置情况差异较大,需调整局部分析的范围,重新进行局部分析和结构分析,直至上述差异减小至可接受的精度要求内。

结构拆解涉及多构件拆解流程,结构状态分析需兼顾后续拆解的可行性,因而鲁棒性是拆解力学分析的关键指标,反映结构多路径承载潜能与受力合理性,以及在灾害下的抗连续倒塌性能,可基于结构的属性或性能进行评价^[14]。同时,鲁棒性分析可识别结构的易损状态,减少需进行整体承载力分析的结构状态数量。

2.2.3 构件分析

构件分析的目标为判别构件的再利用性。构件再利用性与服役期耐久性损伤以及拆解中的应力历史有关,可体现于上述局部分析与结构分析的应力、应变分布及变化历史结果中。因此,构件分析的实质是对各构件涉及的拆解全流程力学参量分别再处理的过程,基于最大响应的损伤指标^[29]较为适用,可依据材料损伤变量、塑性应变或刚度退化等力学特征评估再利用性。

构件分析的对象为需再利用的拆解后构件,在改建工程中还需对剩余结构中的各构件与子结构进行分析。对于无需再利用部分,可充分利用塑性的变形或应力增长潜力以保证安全;在灾害、事故等意外状况的分析中,也可降低再利用需求,充分利用结构塑性和冗余度对剩余承载力的贡献。上述2类情况可不进行构件分析。

3 结构拆解的力学分析工具

结构拆解的力学分析对象众多,需采取合适的分析策略保障分析精度并提升分析效率,适用于结构拆解分析的力学工具,推荐为概念分析、解析分析和数值模拟。

3.1 概念分析

概念分析是不直接求解力学基本方程而通过综合运用力学概念判断结构基本力学响应的方法^[30]。

概念分析可对结构力学状态进行宏观把握与预估,总结大量拆除工程事故案例可发现,事故原因多为拆除顺序不当、施工操作不当、局部过载等结构概念性错误,且拆解工程中的各结构状态为维持时间很短的临时状态,大量的精细化力学分析常常是不经济的,因而概念分析在结构拆解力学分析中尤为重要。

概念分析的常用方法有:几何可变性分析、刚度分配法、极限法、影响线法、振型概念判断等。结构体系的几何组成性质涉及约束数量和约束位置2类条件^[31],拆解作业改变体系的约束数量,临时支撑改变约束位置,需通过分析保证拆解全流程剩余结构的几何不变。刚度分配法是基于超静定结构中内力按刚度分配的原理分析结构内力分布的方法,主要有弯矩分配法和剪力分配法,基于此还可建立动因素法、延拓方法^[30]等实用概念分析策略。极限法是刚度分配法的拓展,通过分析约束刚度极大或极小的状况,判别结构内力的上下限值,可指导拆解局部分析范围的初选。影响线法是基于虚位移原理判断静力荷载作用于不同位置所引起局部内力响应的方法^[31],借助影响线可以指导拆解施工荷载的合理布置,如图3。振型概念判断可依据低阶振型形状对应体系应变能较小的原理,对结构较低阶和较高阶振型形状进行定性分析,由此可大致校核定量分析结果的合理性。

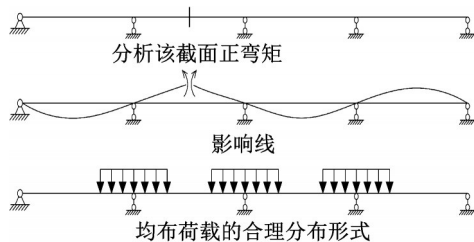


图3 影响线法判断合理荷载分布示例

Fig. 3 An example of determining reasonable load distribution with the influence line method

概念力学通常用于分析结构线弹性状态下的小变形响应,结构响应线性可叠加。随着非线性效应的增大,结构受力状态依赖于应力路径,概念分析结果失真程度将显著增加。因此,概念分析在正序拆解与有支撑拆解中适用性较好。在概念力学的指导下,可捕捉拆解全流程和特定拆解过程中的少量关键危险状态进一步开展解析分析或数值模拟,有效减少计算量。此外,概念力学还可辅助工程现场突

发状况的应急处理和定量分析结果的快速校核,对事故防范具有重要意义。

3.2 解析分析

解析分析是基于结构力学原理,采用简化力学模型建立力学响应计算解析公式的分析方法。通过简化假定忽略次要受力特征,突出结构主要抗力机理,进而便于捕捉控制性因素,减少分析成本,有效指导设计应用^[32]。结构拆解全流程采用状态离散法和空间分割法处理后,各对象的分析状态明确,便于解析分析模型的选用或建立。

以非正序、无支撑的柱优先拆解为例,存在5种替代传力路径^[26]:①失效柱处的梁弯曲;②失效柱上方框架的空腹弯曲;③梁的拱效应;④梁/平板的悬链/膜效应;⑤外墙和隔断等非结构构件的贡献。上述各效应并非同时发挥作用,在不同荷载水平下主要替代传力机制将发生变化,使结构承载力随变形的增大存在阶段性变化^[33-34],替代传力机制的识别可有效指导拆解局部分析范围与方法的确定。现有研究给出多类反映上述替代传力机制的解析分析模型^[32-33, 35-36],典型示例如图4,针对动态响应还可采用简化单自由度模型^[17]进行动力分析。通过对比研究^[17, 32-33]证明,根据受载状况对应的主要传力机制,选取合适的解析分析模型,可获取与试验分析或精细化数值模拟很接近的计算结果,并有效节约分析成本。解析分析可基于静力平衡^[37]或能量法^[18, 32]进行,能量法在这一问题中的应用更为广泛,从几何分析角度入手评估剩余结构的极限承载力,可有效减少运算量。

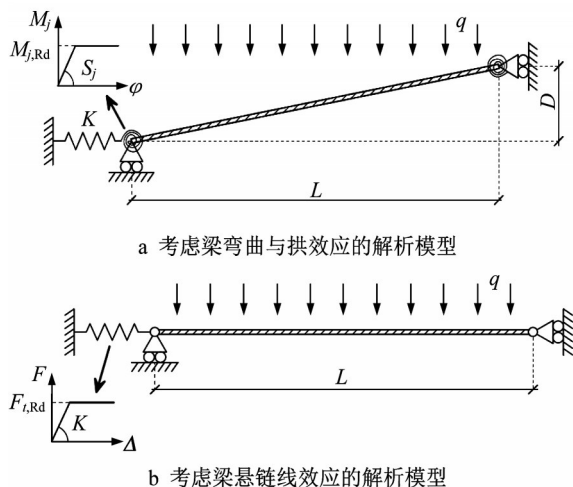


图4 梁在不同传力机制下的解析分析模型^[33]

Fig. 4 Analytical models of beams in different load-resisting mechanisms^[33]

此外,易损性理论是基于结构形式判断结构鲁棒性的典型解析分析方法。依据几何拓扑稳定理论,并不过多关注构件强度和非线性等性能因素,将结构分解为多个几何形式稳定的基本子结构单元,在层级模型中自上而下寻找结构的薄弱环节,并研究结构的易损模式^[38-39]。这一分析过程适用于结构拆解分析,尤其在水平构件的拆解中,结构传力路径受到的扰动相对较小,主要问题存在于结构形式联系削弱,基于上述分析过程便于分析结构局部平衡、稳定状态的变化,有效简化对结构失效风险的判断。

3.3 数值模拟

数值模拟是采用数值计算求解力学方程组进而模拟结构受力响应的方法,有限单元法是目前结构工程领域应用最为广泛的求解方法。数值模拟可有效弥补概念分析和解析分析在临界力学状态判断、结构非线性响应分析、结构动力分析、损伤分析等方面的不足,为结构拆解提供更为真实的定量化力学行为与损伤分布结果。

数值算法可分为隐式和显式方法2类。隐式算法采用迭代方法求解平衡方程,可以做到无条件稳定,但在强非线性或材料应变软化等问题中,可能出现严重的收敛性问题^[40]。显式算法在小步长内采用差分格式求解平衡方程,一般不存在收敛性问题,但通常为条件稳定,时间增量过大时易出现位移解振荡,而稳定时间步长通常由1个或几个质量较小或尺寸小的单元控制^[41]。隐式算法常用于静力分析,而显式算法常用于动态响应分析。

在待拆解结构的力学模型中,需反映耐久性退化导致的物理关系变化以合理刻画结构性能,可采用性能退化后的材料本构模型、连接受力关系和定义预应力、预变形或预损伤状态等方式进行结构建模。此外,构件稳定性常与缺陷及微扰动相关,拆解时约束减弱使构件稳定性可能成为控制性问题,因而对失稳风险较大的构件需采用直接引入缺陷或施加假想荷载等方式体现这一问题^[42]。

局部分析通常采用实体有限单元模型进行分析以反映局部较为显著的非线性特征,并应依据具体施工过程进行精细化分析以确定支撑力分担或局部损伤状况。时变力学给出时变单元法和拓扑变化法^[23],通过单元数量或大小随时间变化实现结构求解域时变,可用于局部施工过程的精细化模拟中。对于切割所致破坏面断裂问题,可依据构件尺寸采用适当的增量步长在模型中建立人工裂纹,因结构的超静定性,应考虑因施工过程中内力重分布造成

的裂纹扩展后对应截面内力的变化。进一步,可采用基于相场理论^[43]的有限元方法或扩展有限元方法^[44]等模拟裂纹的扩展情况。

结构分析可对抗连续倒塌领域构件移除模拟的研究成果^[15, 45-46]进行拓展应用。以剩余结构整体为对象建模通常采用构件单元模型,可有效节约计算量。其中,纤维截面单元^[47]是梁、柱构件常用的建模方式,多层壳单元^[48]是板常用的建模方式,节点的简化建模方法是研究重点^[15]。结构拆解的加卸载路径与拆解流程有紧密联系,结构分析应采用增量方法逐状态分析,以体现应力历史的影响。分析中,保留前一状态内力,解除单步拆解作业所破坏的约束,并将所解除约束处原内力作为额外荷载施加于相应位置以维持当前平衡状态。对于有支撑拆解,还需依据支撑刚度在临时支撑点施加弹性约束,并根据支撑点的连接性质建立位移协调关系。然后,在额外荷载作用处施加与额外荷载量值相等的反向荷载,慢速拆解作业时为渐加荷载,快速拆解作业时为突加荷载,也可通过引入动力放大系数将突加荷载转化为渐加荷载,分析最不利结构响应^[18]。上述过程常通过“生死单元法”实现,可指定所解除约束处原内力在分析步内线性变化至零^[49],这种近似对整体结构分析结果影响不大。

3.4 框架结构拆解分析简例

为分析2层两跨框架结构的拆解,分别建立了混凝土结构与钢结构力学模型,结构尺寸如图5,对应的构件截面如表2,B-1~B-4表示梁构件,C-1~C-6代指柱构件。概念分析可知:为提升梁拆解的安全性,拆解施工常优先解除靠近边柱处梁的截面约束,S-1、S-2表示可能的拆解截面。拆解施工前,建筑使用荷载已撤除,仅考虑自重及施工荷载,等效为均布荷载 q ,认为常规施工下 $q=7.5\text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$ (考虑施工均布荷载 $4\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$);梁单侧约束解除前,与之相连的板与板上方荷载通常已移除,认为所拆解梁上方均布荷载减小至 $q'=1.5\text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$ (保守考虑分布于所拆解梁上的施工荷载);梁拆解后其上方荷载随之移除。由于这一结构规模很小,可采用实体单元模型同时进行局部分析与结构分析,暂不进行构件分析。本例不考虑作业对破坏面的附加荷载,假定拆解作业使破坏面处原内力线性减小,采用ABAQUS软件分析不同构件拆解对拆解中结构与剩余结构造成的静力影响。

首先考虑单构件拆解,典型状况如图6所示。由力学分析结果可得出初步结论:①由于拆解施工

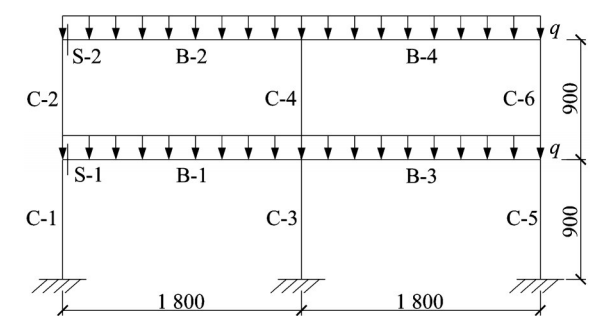


图5 本案例所分析的框架结构(单位:mm)
Fig.5 Frame structure analyzed in this case study (unit:mm)

前建筑使用荷载已撤除,在常规施工荷载作用下待拆解结构整体应力水平较低;水平构件拆解对于剩余结构内力的影响通常小于竖向构件拆解。②梁优先拆解时,所拆解梁损伤程度的控制状况出现于单侧约束解除、另一侧约束保留时;但对于剩余结构而言,由于梁约束解除前上方荷载大部分已撤除,前述状况与梁整体移除状况差异很小。③中柱优先拆解后,在常规施工荷载作用下,长梁弯曲效应与拱效应常为主要承载机制;上下2层所受均布荷载相同时,下层中柱拆解后,上层中柱几乎不受力。④上层边柱拆解后,其上方梁仅通过悬臂弯曲承载,为最危险拆除状况,结构损伤显著,应加设临时支撑;下层边柱拆解时,空腹效应抗力机制贡献显著,上、下层边梁通过拉压杆效应承担部分荷载,减弱了拆解造成的不利影响。

基于以上单构件拆解结论,由概念分析可知:①正序拆解对剩余结构受力影响很小,在无特殊需求的状况下,应优先选用。②先拆梁后拆柱是较优的

选择,但需校核剩余结构柱的稳定性,在钢结构拆解中尤应重视;当柱上方无水平构件时,可直接拆解。③在先拆柱的情况下,应避免形成大悬臂构件;由此,优先拆解C-4后,B-2和B-4应同时拆解。④应避免先拆解边柱,因其将使当前或后续拆解施工难以安全进行。本例的钢结构模型在梁拆解后可满足柱稳定要求,提供了多种可行拆解路径,以钢结构模型为例进一步模拟多构件拆解可知:当对特定梁或中柱有优先拆解需求时,拆解后对剩余结构通常继续按正序拆解即可,仅优先拆解C-3的情况例外,在2根结构梁构成的长梁便于同时拆解的条件下,优先拆解C-3,然后继续拆解C-4,可减小剩余结构损伤程度(如图7)。此外,对于部分剩余结构状况(如B-1和C-3同时移除),继续进行正序拆解也是不可行的,因而拆解实践中,合理顺序还需根据既有结构构件的失效状况和拆解需求进行深入研判。

4 未来研究方向

- 结构拆解力学分析尚存在以下技术难点:
- (1)各类型构件拆解后剩余结构替代传力机制的正确识别。需依赖识别结果,更准确地判断非线性情形下的局部分析范围,并建立结构分析的高效工具,有效反映主要传力机制以准确评估承载能力。
 - (2)局部作业荷载与断裂行为的模拟。结构拆解常采用微损切割、静态爆破等多种新型施工方法,需统计相关施工方法的力学影响,建立合理的局部作用和断裂行为模型,反映静、动态作用程度。
 - (3)多类型、多构件拆解力学分析的准确性。单

表2 框架结构有限元模型的构件截面情况		
Tab.2 Sections of components in FE models of the frame structure		
结构模型类型	框架梁截面	框架柱截面
混凝土结构 ^[50]		
钢结构		

注:混凝土强度等级选用C35,Ⅲ级、Ⅳ级钢筋屈服强度分别取为400MPa、565MPa;钢结构钢材选用Q345钢,屈服强度取为345MPa。

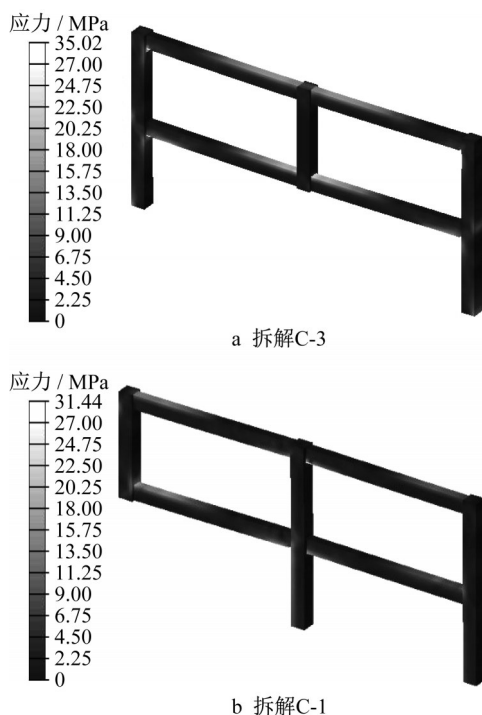


图6 混凝土结构模型柱拆解状况下剩余结构混凝土部分应力(单位:MPa)

Fig.6 Stress of concrete parts of remaining structures under column deconstruction scenarios in the concrete structure model (unit: MPa)

构件拆解力学分析的准确性受到建模方式、参数离散性、算法精度等影响,因而多构件拆解全流程力学分析需重视结构力学行为对典型参数的敏感性程度,控制误差的累积与传递。

(4)拆解安全性与再利用性量化评定方法的建立。现有鲁棒性和损伤相关指标多基于结构抗震定义,但拆解主要造成静态或短时动态响应,因而需进一步研究依据结构拆解力学分析结果对安全性与再利用性统一定义、统一评价的方法。

(5)结构拆解力学分析结果有待不同规模拆解工程的验证。随着对拆解技术原理和拆解真实工程中结构响应的认识加深,本文所建立结构拆解力学分析理论框架的可操作性将进一步提升。

此外,还可基于结构拆解的力学分析成果进行拓展研究:

(1)再利用构件优选与拆解经济性评价。根据原有结构的体系关系和节点形式判别各类构件完整拆解的难易程度,结合构件尺寸、剩余承载性能等提出再利用构件的甄别方法,通过高度和跨度的匹配关系使尽可能多的构件高效再利用。核算结构拆解的经济性,控制再利用构件的总价值高于拆解工程

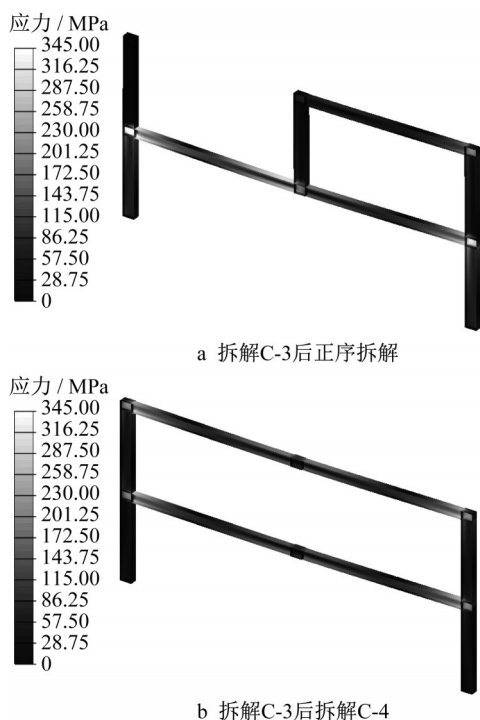


图7 钢结构模型双构件拆解状况下剩余结构应力(单位:MPa)

Fig.7 Stress of remaining structures under two-component deconstruction scenarios in the steel structure model (unit: MPa)

相较于传统拆除增加的成本,促进结构拆解的推广应用。

(2)结构拆解顺序优化方法。结构拆解力学分析需依据某一特定拆解顺序进行,不同的拆解顺序将造成拆解流程中力学状态的差异,对拆解安全性、再利用性以及施工效率、经济性造成显著影响,因此拆解顺序的规划与优化是一个值得研究的问题。

5 结语

在厘清拆除与拆解概念差异的基础上,深入剖析了结构拆解的力学分析目标、对象、工况、问题与方法,得到如下主要结论:

(1)与传统建造相比,结构拆解是逆向施工,目标为从原有结构中尽可能多地拆卸下损伤程度较小的可再用构件,可显著提升废旧建材的资源化利用率。拆解过程可依据拆解顺序、施工方法、作业特点进行分类,分别对应不同荷载状况与分析需求。拆解力学分析需重视损伤的出现与演化,并选取合适的现有力学理论进行分析。

(2)提出了安全性和再利用性作为拆解控制属

性,安全性是拆解进行的必要条件,再利用性是拆解工程的优化目标。同时,提出状态离散法和空间分割法作为拆解力学分析的基本简化方法,将拆解全流程简化为多个离散结构状态,并围绕各状态开展局部、结构和构件3类分析,其中前2类关注安全性,构件分析关注再利用性。

(3)基于待拆解结构服役期性能退化结果,可采用概念分析、解析分析和数值模拟工具对结构拆解全流程各分析对象在各工况中的力学状态及重点问题进行分析。针对2层两跨混凝土结构和钢结构框架的拆解,完成了示例性有限元分析,得出了拆解传力机制、安全性与拆解顺序紧密相关的初步结论。

(4)结构拆解力学分析为拆解安全、拆解后构件再利用潜能提升和拆解效率提升提供理论保障,是拆解工程学的基石。进一步拓展,还可对施工技术研发和构件修复加固等进行指导,提升拆解工程经济性,促进拆解技术的推广应用。

作者贡献申明:

夏冰:建立并细化结构拆解力学分析理论框架与具体内容。

肖建庄:提出不同于传统拆除的结构拆解基本概念,并建立结构拆解力学分析的总体思路和研究方向。

吕凤梧:提出结构拆解力学分析的主要方法。

王耀:工程简例分析。

参考文献:

- [1] 中国建筑科学研究院. 建筑拆除管理政策研究[R]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2014.
China Academy of Building Research. Researches on building demolition management policy[R]. Beijing: China Academy of Building Research, 2014.
- [2] 张德江. 全国人民代表大会常务委员会执法检查组关于检查《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》实施情况的报告——2017年11月1日在第十二届全国人民代表大会常务委员会第三十次会议上[J]. 中华人民共和国全国人民代表大会常务委员会公报, 2017(6): 1001.
ZHANG Dejiang. Report on the inspection of the implementation of The Law of the People's Republic of China on the Prevention and Control of Solid Waste Pollution by the law enforcement inspection group of the Standing Committee of the National People's Congress; Delivered at the 30th session of the Standing Committee of the 12th National People's Congress on November 1, 2017[J]. Gazette of the Standing Committee of the National People's Congress of the People's Republic of China, 2017(6): 1001.
- [3] 肖建庄. 可持续混凝土结构导论[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
XIAO Jianzhuang. An introduction to sustainable concrete structures[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [4] TE DORSTHORST B J, KOWALCZYK T. State of deconstruction in the Netherlands[R]. Delft: Delft University of Technology, 2003.
- [5] PACHECO-TORGAL F, TAM V W Y, LABRINCHA J A. Handbook of recycled concrete and demolition waste [M]. Cambridge: Woodhead Publishing, 2013.
- [6] 肖建庄, 陈立浩, 叶建军, 等. 混凝土结构拆除技术与绿色化发展[J]. 建筑科学与工程学报, 2019, 36(5): 1.
XIAO Jianzhuang, CHEN Lihao, YE Jianjun, *et al.* Technology and green development of demolition for concrete structures [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2019, 36(5): 1.
- [7] GUY B, SHELL S, ESHERICK H. Design for deconstruction and materials reuse[J]. Proceedings of the CIB Task Group, 2006, 39(4): 189.
- [8] XIAO J, DING T, ZHANG Q. Structural behavior of a new moment—resisting DfD concrete connection [J]. Engineering Structures, 2017, 132: 1.
- [9] DING T, XIAO J, ZHANG Q, *et al.* Experimental and numerical studies on design for deconstruction concrete connections: An overview [J]. Advances in Structural Engineering, 2018, 21(14): 2198.
- [10] DING T, XIAO J, CHEN E, *et al.* Experimental study of the seismic performance of concrete beam—column frame joints with DfD connections [J]. Journal of Structural Engineering, 2020, 146(4): 4020036.
- [11] AKBARNEZHAD A, ONG K C G, CHANDRA L R. Economic and environmental assessment of deconstruction strategies using building information modeling [J]. Automation in Construction, 2014, 37: 131.
- [12] XIA B, DING T, XIAO J. Life cycle assessment of concrete structures with reuse and recycling strategies: A novel framework and case study [J]. Waste Management, 2020, 105: 268.
- [13] 何军, 于亚伦, 李彤华. 城市建(构)筑物控制拆除的国内外现状[J]. 工程爆破, 1999, 5(3): 76.
HE Jun, YU Yalun, LI Tonghua. Current situation of demolishing urban structures with controlled blasting at home and abroad[J]. Engineering Blasting, 1999, 5: 76.
- [14] 吕大刚, 宋鹏彦, 崔双双, 等. 结构鲁棒性及其评价指标[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(11): 44.
LV Dagang, SONG Pengyan, CUI Shuangshuang, *et al.* Structural robustness and its assessment indicators [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(11): 44.
- [15] KUNNATH S K, BAO Y, EL-TAWIL S. Advances in computational simulation of gravity—Induced disproportionate

- collapse of RC frame buildings [J]. Journal of Structural Engineering, 2018, 144(2): 3117003.
- [16] Unified Facilities Criteria. Design of buildings to resist progressive collapse [S]. Washington D C: Department of Defence, 2013.
- [17] ORTON S L, KIRBY J E. Dynamic response of a RC frame under column removal [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2014, 28(4): 4014010.
- [18] IZZUDDIN B A, VLASSIS A G, ELGHAZOULI A Y, *et al.* Progressive collapse of multi—storey buildings due to sudden column loss — Part I: Simplified assessment framework [J]. Engineering Structures, 2008, 30(5): 1308.
- [19] 王光远. 论时变结构力学[J]. 土木工程学报, 2000, 33(6): 105.
WANG Guangyuan. On mechanics of time-varying structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(6): 105.
- [20] 尹祥础. 固体力学[M]. 北京: 地震出版社, 2011.
YIN Xiangchu. Mechanics of solids [M]. Beijing: Seismological Press, 2011.
- [21] 陈永春, 马国强. 考虑混凝土收缩徐变和钢筋松弛相互影响的预应力损失的计算[J]. 建筑结构学报, 1981, 2(6): 31.
CHEN Yongchun, MA Guoqiang. Calculation of prestress losses due to the interaction of shrinkage, creep of concrete and relaxation of steel [J]. Journal of Building Structures, 1981, 2(6): 31.
- [22] 李杰, 吴建营, 陈建兵. 混凝土随机损伤力学[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
LI Jie, WU Jianying, CHEN Jianbing. Stochastic damage mechanics of concrete structures [M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [23] 曹志远. 土木工程分析的施工力学与时变力学基础[J]. 土木工程学报, 2001, 34(3): 41.
CAO Zhiyuan. Construction mechanics and time-varying mechanics in civil engineering [J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(3): 41.
- [24] 张誉. 混凝土结构耐久性概论[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2001.
ZHANG Yu. Durability of concrete structures [M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2001.
- [25] 许斌, 江见鲸. 混凝土 I - II 复合型断裂判据研究[J]. 工程力学, 1995, 12(2): 13.
XU Bin, JIANG Jianjing. Study of I - II mixed—mode fracture criteria for concrete [J]. Engineering Mechanics, 1995, 12(2): 13.
- [26] ADAM J M, PARISI F, SAGASETA J, *et al.* Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century [J]. Engineering Structures, 2018, 173: 122.
- [27] 胡晓斌, 钱稼茹. 结构连续倒塌分析改变路径法研究[J]. 四川建筑科学研究, 2008, 34(4): 8.
HU Xiaobin, QIAN Jiaru. Study on alternate path method of structural progressive collapse analysis [J]. Sichuan Building Science, 2008, 34: 8.
- [28] General Services Administration. Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization projects [S]. Washington D C: Office of Chief Architects, 2003.
- [29] GHOBARAH A, ABOU-ELFATH H, BIDDAH A. Response-based damage assessment of structures [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1999, 28(1): 79.
- [30] 朱慈勉, 郭志刚, 张伟平. 概念力学分析中的延拓方法[J]. 力学与实践, 2011, 33(4): 61.
ZHU Cimian, GUO Zhigang, ZHANG Weiping. Continuation method in conceptual mechanical analysis [J]. Mechanics in Engineering, 2011, 33(4): 61.
- [31] 朱慈勉, 张伟平. 结构力学[M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 2016.
ZHU Cimian, ZHANG Weiping. Structural mechanics [M]. 3rd ed. Beijing: High Education Press, 2016.
- [32] LI G, ZHANG J, JIANG J. Analytical modeling on collapse resistance of steel beam-concrete slab composite substructures subjected to side column loss [J]. Engineering Structures, 2018, 169: 238.
- [33] STYLIANIDIS P M, NETHERCOT D A, IZZUDDIN B A, *et al.* Study of the mechanics of progressive collapse with simplified beam models [J]. Engineering Structures, 2016, 117: 287.
- [34] 何政, 黄国辉. 框架结构悬链线效应研究新进展[J]. 力学进展, 2012, 42(5): 547.
HE Zheng, HUANG Guohui. Progress in studies of catenary action in frame structures [J]. Advances in Mechanics, 2012, 42: 547.
- [35] QIAN K, LI B. Experimental and analytical assessment on RC interior beam-column subassemblages for progressive collapse [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2012, 26(5): 576.
- [36] SASANI M, BAZAN M, SAGIROGLU S. Experimental and analytical progressive collapse evaluation of actual reinforced concrete structure [J]. ACI Structural Journal, 2007, 104(6): 731.
- [37] BAILEY C G. Membrane action of unrestrained lightly reinforced concrete slabs at large displacements [J]. Engineering Structures, 2001, 23(5): 470.
- [38] AGARWAL J, BLOCKLEY D, WOODMAN N. Vulnerability of structural systems [J]. Structural Safety, 2003, 25(3): 263.
- [39] AGARWAL J, BLOCKLEY D, WOODMAN N. Vulnerability of 3-dimensional trusses [J]. Structural Safety, 2001, 23(3): 203.
- [40] BELYTSCHKO T, LIU W K, MORAN B, *et al.* Nonlinear finite elements for continua and structures [M]. [s.l.]: John Wiley & Sons, 2013.