

建筑结构在极端荷载作用下的动力响应研究

凡杰

武汉天创建设集团有限公司，湖北武汉，430000；

摘要：建筑结构在其全寿命周期内，除承受常规的重力荷载与风荷载外，还可能遭受地震、强风、爆炸及火灾等极端荷载的作用。此类荷载具有突发性强、能量高的特征，常致使结构产生剧烈的动力响应，甚至引发连续倒塌。本文聚焦于极端荷载下结构的动力行为，剖析了地震与风荷载作用下结构的破坏模式，探究了抗火设计与抗爆分析中的关键参数。通过归纳不同荷载类型的动力特性，提出基于性能的结构抗极端荷载设计思路，为工程实践提供兼顾安全性与经济性的参考。

关键词：动力响应；极端荷载；抗震设计；抗连续倒塌

DOI： 10.69979/3029-2727.26.05.010

近年来，国内外建筑安全事故时有发生。部分事故由地震等自然灾害引发，部分则因意外爆炸或火灾所致。这些事件使人们认识到，建筑结构在服役期间可能遭遇远超设计时所考虑“常规力”的荷载。此类荷载作用时间极短，但能量巨大，结构往往在来不及响应的情况下就遭受严重破坏。传统的静力设计方法在应对这种情况时存在局限性，因为结构的受力状态不再是单纯的拉伸或压缩，而是包含加速度、惯性力和材料快速变形的复杂过程。因此，明晰结构在极端情况下的动力响应，是提高建筑安全性的关键环节，也是当前工程师需直面的实际问题。

1 常见极端荷载的特征及其对结构的作用

建筑结构可能遭遇的极端荷载具有多样性，其来源不同，对建筑造成的破坏模式也存在显著差异。了解这些荷载的特征，是分析结构响应的首要步骤。

1.1 地震荷载

地震是地壳快速释放能量所致的振动，这种振动经由地基传递给上部结构。在实际工程里，输入结构的地震波有着复杂的频率成分，当某频率跟结构自振频率差不多的时候，共振现象就会让结构的变形明显变大。高层建筑里，这种动力响应主要就是水平方向往复晃动，楼层间位移角是衡量其安全性的重要指标。近些年来对震害的调查结果表明，框架结构要是柱子强度不够，很容易在底部形成薄弱部分并整体倾覆。剪力墙结构得留意墙体面外失稳这一状况。当下抗震设计的重点是控制结构的延性，也就是让构件能进入塑性状态，但不发生脆性破坏，靠合理配筋和节点构造来把地震输入的能量

耗散掉。并且软土地会放大长周期地震波，对柔性建筑来说很不利。工程师在实际项目里，一般得结合时程分析，挑多条地震波来验算，保证结构在不同频谱特性下都能稳定。

1.2 风荷载与爆炸荷载

强风作用与爆炸冲击虽均涉及风压，但二者在作用时间和破坏机理上存在明显差异。风荷载属于长期反复荷载，对于超高层建筑或大跨度屋面，强风会引发显著的涡流脱落和横风向振动。这种振动虽不一定直接导致结构倒塌，但会造成围护结构损坏，并使使用者产生不适感。在工程实践中，除确保主体结构具备足够的刚度外，还常通过风洞试验验证外形设计的合理性，并对幕墙等非结构构件进行专项抗风设计。

风压作用以及爆炸冲击虽然都与风压有关，却在作用时间及破坏机理上有着很大区别。风荷载是长期反复荷载的一种，超高层建筑或者大跨度屋面时，强风会造成明显的涡流脱落，还会有横风向振动，这种振动未必会直接让结构倒塌，不过会引发围护结构的损坏，也会让用户感到不适。工程上，主体结构要能保证有足够的刚度，而且还得经常通过风洞试验来验证外形设计的合理性，对幕墙等非结构构件也做着专项抗风设计。相比之下，爆炸荷载属于极端突发事件，如燃气泄漏引发的化学爆炸或意外粉尘爆炸，其特点为压力上升迅速且持续时间极短。这种冲击波首先作用于迎爆面的外墙和梁柱，导致局部构件破碎或飞散。一旦关键竖向构件失效，上部荷载将迅速转移，可能引发连续倒塌。在实际工程中，通常采取提高关键构件抗力的措施，同时增强结构

的整体性,使结构在局部受损后仍具备替代传力路径的能力。这些差异可从表 1 的对比中清晰呈现,设计时

需根据建筑的重要性和可能遭遇的风险类型权衡侧重点。

表 1: 地震、强风及爆炸荷载的动力特性对比**

荷载类型	作用时间	主要破坏特征	设计关注点
地震荷载	数十秒	往复变形、共振、倒塌	延性、耗能能力
强风荷载	数小时	累积疲劳、舒适度下降	刚度、气动外形
爆炸荷载	毫秒级	局部击穿、渐进式坍塌	构件强度、冗余度

2 动力响应分析的核心方法与难点

计算建筑结构在极端荷载下的表现时,不能简单地把静力乘以一个放大系数就完了。需要运用更复杂的动力分析方法。

2.1 时程分析法

时程分析法是结构动力响应分析里应用得比较广泛的手段,在超限高层或者重要公共建筑的抗震性能评估时,规范常要求用它来补充计算。工程师得先挑出若干条符合场地类别和设计谱特征的地震加速度记录,然后把把这些波形数据输入结构模型,再用逐步积分的办法求出每一时刻的结构响应。该方法能较好地体现结构在地震时从弹性阶段进入塑性阶段以及可能破坏的全过程,像构件的开裂、屈服还有内力重分布之类的情况。实际工程中,通常选取不少于三条地震波进行计算,并取包络值作为设计依据。然而,该方法对计算资源的消耗较大,一个复杂模型的分析可能耗时数小时甚至更久。同时,地震波的选取具有一定的经验性,不同波形计算所得的层间位移和基底剪力有时存在明显差异。这就要求工程师对结构动力特性有充分的理解,能够判断哪些计算结果偏于危险应予以采用,哪些属于波形异常导致的失真需予以剔除。

2.2 材料的非线性问题

在极端荷载作用下,结构必然进入弹塑性状态,此时材料的本构关系成为决定分析准确性的关键因素。混凝土在强震或爆炸冲击作用下会出现开裂、压碎现象,钢筋也会经历屈服强化直至拉断的过程,构件的实际刚度在加载过程中持续退化。爆炸荷载带来的问题更为复杂,因为材料在毫秒级加载条件下表现出显著的应变率效应,钢材的屈服强度和极限强度会有所提升,混凝土的动态抗压强度也比静载时高出许多。

目前,有限元软件中虽有多种本构模型可供选用,但参数设置往往依赖试验数据的积累。火灾高温下的材

料性能退化同样是棘手问题,高温下钢筋和混凝土的弹性模量大幅降低,且两者之间的粘结强度也会减弱。众多实际案例表明,若模型仅考虑弯曲非线性而忽略剪切破坏模式,或者未能准确模拟节点区的复杂受力状态,分析结果往往会偏于不安全。现阶段工程中通常采用简化弹塑性模型并配合构造措施的方法,对于特别重要的构件则进行更精细的实体单元模拟。

3 典型结构在极端荷载下的响应与破坏模式

不同类型的建筑在遭遇极端荷载时,其动力响应和最终的破坏形态各具特点。以下以框架结构和高层建筑为例进行说明。

3.1 框架结构的倒塌机制

框架结构在强震作用下的破坏形态与梁柱的相对强度密切相关。现行抗震规范通过强柱弱梁的调整系数引导塑性铰出现在梁端而非柱端,以此利用多根梁的塑性变形耗散地震能量。但从实际震害情况来看,由于楼板的参与作用以及填充墙的约束,梁的实际承载力往往高于设计值,塑性铰仍有可能出现在柱端。

针对这一问题,目前工程中常采用提高柱端箍筋加密区体积配箍率、控制轴压比等措施来确保柱的延性。在爆炸或偶然撞击导致局部构件失效的工况下,框架结构需依靠剩余构件的悬链线效应和转动能力维持整体稳定。国内已有不少工程在设计中引入抗连续倒塌验算,采用拆除构件法分析底层角柱失效后上方梁板的内力重分布情况,必要时在楼板底部增设通长钢筋以增强拉结作用。

3.2 高层建筑的风振响应

随着建筑高度的增加以及建筑材料轻质高强的发展趋势,风致振动问题愈发突出。人体对加速度较为敏感,当楼顶峰值加速度超过一定限值时,居住者会明显感觉到晃动甚至产生恐慌。我国高层建筑混凝土结构技术规程对顶点加速度峰值有明确的限值要求,不同强度

风荷载下的响应特征可从表 2 中获取。

在实际工程里，常会把结构措施和机械措施相结合来控制风振。结构措施包含调整建筑外形以杜绝涡流脱落共振、增大结构刚度这类举措。机械措施是把调谐质量阻尼器或者调谐液体阻尼器设置在楼顶或者设备层

上，然后调整其自振频率来吸收风振能量。台北 101 大厦和上海中心大厦都运用了这种装置，实测结果显示减振效果相当明显。一般高层建筑若想提高风振性能，可优化抗侧力构件布置，无需盲目增加结构断面。

表 2: 高层建筑在不同强度风荷载下的响应特征

风荷载等级	结构响应状态	顶点加速度峰值	居住者感受
常见季风	弹性，轻微晃动	< 0.05 m/s ²	无明显感觉
强台风	弹性，明显摆动	0.1 ~ 0.2 m/s ²	轻微不适，门窗作响
极端飓风	可能进入塑性	> 0.3 m/s ²	摇晃感强烈，行走困难

4 提升结构抗极端荷载能力的实用措施

鉴于难以精确计算且无法回避极端荷载，需在设计和构造方面加大力度，增强结构本身的坚固性。

4.1 概念设计与多道防线

结构在极端荷载下的响应往超出常规模型预测的范围，所以概念设计很重要，这和精确分析比起来，比得更厉害。多道防线理念在抗震设计中应用成熟且实用。以框架-剪力墙双重体系为例，框架充当第一道防线，承担部分地震作用，强震时其梁端可出现塑性铰以耗散能量；剪力墙作为第二道防线，提供后续承载力保障。在实际工程里，一般会调整刚度分配来达成这一目标，让两道防线在不同受力阶段分别发挥作用。超静定次数的增多也有现实价值，重要建筑适当增加冗余构件，就算某根柱子在爆炸或者撞击时失效，周边梁板也能凭借悬链线效应形成新的传力路径，防止连续倒塌。国内超限高层审查里，常要进行抗连续倒塌验算，拆除构件法成了常规分析手段。这些概念层面的考量，成本不会太高，能大提高结构应对突发事件的鲁棒性。

4.2 关键构件与构造细节

在极端荷载的情况下，结构体系里有些特定构件就会失效，这会直接让大面积甚至整体倒塌，这类构件往往被认定为关键构件。在实际工程里，底层角柱、转换梁、周边约束柱以及支承大跨度空间的柱体都这一类。在设计里，识别关键构件一般是按照结构体系的特性与受力路径来做的，像框架结构底层柱要是坏了，上部荷载就没了，所以得重视更多。针对关键构件的强化措施主要体现在承载力储备和延性指标两个层面。在承载力储备方面，抗震规范对底层柱的内力调整系数有明确规定，通过放大设计内力来提高其安全余量；同时在配筋设计

中适当增加纵筋面积，使构件的抗弯和抗剪能力超出常规计算需求。在延性指标方面，柱端箍筋加密区的设置至关重要，加密区长度、箍筋直径和间距需根据轴压比和抗震等级严格确定，现行规范对一级抗震框架柱的箍筋加密区最小体积配箍率有量化要求，这一举措能够有效约束核心区混凝土，提高极限压应变，同时防止纵筋在往复荷载作用下过早压屈。

梁柱节点承受来自梁端和柱端的复杂应力，节点区箍筋不足时易发生剪切脆性破坏。实际工程中常采用节点区箍筋加密并与柱端箍筋连续布置的做法，以确保节点区具备足够的抗剪能力。对于转换梁这类受力复杂且上部荷载巨大的构件，单纯增加普通钢筋往往难以满足延性需求，目前许多高层建筑在转换层采用型钢混凝土截面，利用型钢骨架承担部分荷载并提高延性，同时在梁柱节点处设置加腋或附加横向钢筋来改善传力性能。

4.3 抗火设计中的材料选择

火灾对建筑 结构损伤呈现出隐蔽性与滞后性特征，材料在高温环境下的性能退化是抗火设计的关键核心关注点。普通混凝土在温度超过 300 摄氏度时，其强度开始出现下降趋势；当温度达到 600 摄氏度时，抗压强度损失近半。与此同时，内部自由水因汽化所产生的蒸汽压力，可能致使混凝土出现爆裂剥落现象。

当前，在部分高层建筑与隧道工程中，通过向混凝土内掺入聚丙烯单丝纤维的方式来改善其高温性能。纤维熔化后会形成微细通道，从而释放内部蒸汽压力，能够有效降低爆裂风险。钢结构防火主要依赖于涂刷厚型或薄型防火涂料，厚型涂料凭借其低导热性延缓钢构件的升温速度，薄型涂料遇火膨胀后会形成碳化隔热层。在实际工程中，需依据构件耐火极限要求来选择涂料类型与厚度，并注重施工过程中的粘结质量。材料层面的

这些选择直接关联到火灾发生时结构能否维持足够的承载力，进而为人员疏散与消防救援争取必要时间。表3为改善结构动力性能的常用构造措施汇总。

表 3: 改善结构动力性能的常用构造措施

措施类别	具体做法	主要目的
延性提升	加密箍筋、限制轴压比	增加塑性变形能力
整体性加固	加强连接节点、双向配筋	防止局部破坏引发倒塌
材料优化	高强钢筋、纤维混凝土	提高抗冲击及抗爆裂性能

5 结论

从荷载特性方面讲，地震、强风和爆炸这三类极端荷载的作用时间与破坏机理有着本质的不同，抗震设计主要看重结构延性和耗能能力，抗风设计得把刚度和舒适度指标都考虑进去，抗爆设计就更关注局部构件强度和整体冗余度了。动力响应分析的准确性，很大程度上得看时程分析里地震波怎么选以及材料非线性本构关系是否准确模拟，要是忽视了应变率效应或者剪切破坏模式，计算结果往就会偏危险。不同建筑类型在极端荷载作用下破坏特征各异。框架结构通过提高超静定次数、强化节点构造预防连续倒塌；高层建筑则通过调节结构刚度、增设阻尼装置控制风振加速度，确保使用功能。按照上面的认识，提高结构抗极端荷载能力的关键就是设置多道防线来储备后续承载力，关键构件要局部强化以防止脆性破坏，而且利用材料优化来提高结构在高温、

高应变率下的性能。

参考文献

- [1] 侯毅铨. 基于 CFD 风场模拟与深度学习的高层建筑风致动力响应预测研究[D]. 广州大学, 2025.
- [2] 何羽, 钱凯, 于晓辉. 钢筋混凝土结构抗连续倒塌研究进展[J]. 河北工业大学学报, 2025, 54(01): 16-31+63.
- [3] 高鹏远. 高铁站房异形屋盖在极端荷载组合下的受力性能研究[D]. 石家庄铁道大学, 2023.
- [4] 洪德杨. 不同加载位置冲击荷载作用下钢框架—组合楼板子结构抗连续倒塌性能研究[D]. 重庆大学, 2022.
- [5] 黄耀. 新型建筑材料在建筑结构抗震中的应用与分析[J]. 中国减灾, 2025, (23): 56-57.