



北京大学  
PEKING UNIVERSITY

# 层级式倒塌隔离设计方案中动态断裂力学问题的动态测试

姓名 张家瑞 学号 2401111734 院系 工学院力学与工程科学系

2024 年 12 月 27 日

## 目录

1 实验背景	2
2 实验目的	2
3 实验装置、仪器与器材	3
4 实验内容	3
5 实验原理	3
5.1 相似理论	3
5.2 传感器测量分析原理	4
5.3 三维数字图像相关法	5
6 实验步骤	6
6.1 制作实验模型	6
6.2 静态和动态载荷试验	6
6.3 抗震性能检测	6
7 可行性分析	7

## 1 实验背景

在建筑工程领域，建筑物的安全性始终是至关重要的核心问题。近年来，多起灾难性建筑倒塌事件频发，这些惨痛的事故给社会带来了巨大的人员伤亡和经济损失，引发了全球范围内对建筑结构稳定性和抗倒塌能力的高度关注。

传统的建筑设计方法主要致力于通过增强建筑组件之间的连接性来预防倒塌。在正常情况下，这种方式能够确保在局部组件出现故障时，其所承载的荷载可以重新分配到结构的其他部分，从而在一定程度上维持结构的整体稳定性。然而，当遭遇大型初始破坏时，这种过度依赖连接性的设计策略却暴露出严重的弊端。因为在这种情况下，倒塌的元素可能会因强大的牵拉作用而致使建筑原本未受影响的部分也随之崩塌，进而导致整个建筑的灾难性倒塌。

传统的建筑设计方法在应对局部初始破坏引发的倒塌传播方面存在局限性，而基于层级式隔离的设计方法为提高建筑物的抗倒塌能力提供了新的思路 [1]。这种创新的设计方法灵感源自于蜥蜴断尾求生的生物现象，其核心在于对结构系统中的破坏层次进行精细控制。它明确区分了两种不同类型的初始破坏：小初始破坏和大初始破坏。对于小初始破坏，确保荷载能够有效地进行重新分配，从而完全阻止倒塌的发生；而对于大初始破坏，其设计目标则是在倒塌传播难以避免的关键时刻，使特定的元素在对全局稳定性起关键作用的组件失效之前先行破坏，进而实现结构系统的合理分离，将倒塌范围有效地限制在局部区域，防止其进一步蔓延。

尽管层级式隔离设计方法在理论上具有显著的创新性和潜在的应用价值，但在实际应用前，必须对其有效性进行严格的验证。在原实验设计中，按照实际尺寸搭建的建筑模型，如图1所示，进行了均布荷载下的静态与动态模拟。但因为模拟对象的尺寸是按照实际搭建的，有周期长、成本高、容错率低等缺点。并且作者的实验工作也只考虑了一种受载情况，借助模型实验，我们能够构建多个模型，从不同维度对层级式隔离设计方法进行测试与分析，进而更为精准、全面地验证层级式倒塌隔离设计方案的有效性。

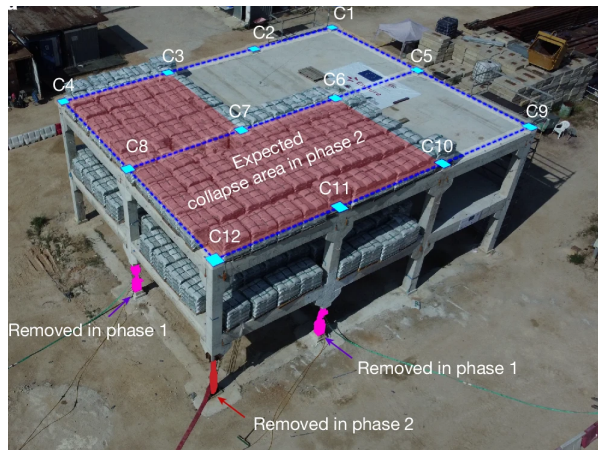


图 1: 层级式隔离建筑图

## 2 实验目的

本实验的目标是通过模型实验探讨层级式倒塌隔离设计在以下方面的性能：

1. 抗局部初始破坏的能力：通过静态和动态载荷实验分析建筑模型在部分柱失效时的表现。

2. 抗震性能：评估设计模型在振动荷载下的动态响应特性。
3. 断裂隔离的可控性：验证设计能否通过预定断裂路径有效隔离受损部分，避免大范围扩展。

### 3 实验装置、仪器与器材

1. 混凝土与钢筋（用于构建缩比建筑模型）
2. 埋入式应变片、位移传感器、加速度传感器、力传感器
3. 三维动态光学应变测量系统、光源
4. 振动台、激振器
5. 小型千斤顶、重物（作为均布载荷）

### 4 实验内容

1. 通过模型实验，考虑局部加载与全局加载两种方式，对层级式倒塌隔离设计建筑模型与传统建筑设计模型试验研究，获得动态断裂过程中应变、速度、加速度、力传感器信号，对比验证层级式倒塌隔离设计方案有效性。
2. 通过模型实验，考虑振动加载情况下，根据位移传感器与加速度传感器信号，分析结构的模态，振动过程中的能量吸收和耗散情况，对比两种建筑设计的抗震情况。
3. 通过三维数字图像相关法，获取动态断裂过程中裂纹的扩展过程，分析结构断裂相应。

### 5 实验原理

#### 5.1 相似理论

选取文章 [1] 中所述的两层 2.6m 高、15m × 12m 的预制钢筋混凝土建筑作为原型结构进行本文所述的实验，该结构共有 12 个分布均匀的支柱，如图所示。参考相似理论对原型结构进行了缩小，以便进行室内模型测试。基于  $\pi$  定理，物理参数由三个基本因素组成，即时间  $t$  (T)、长度  $l$  (L) 和质量  $m$  (M)。当选择长度 L、弹性模量 E 和密度  $\rho$  作为三个基本因素时，所有其他模型参数都可以通过量纲分析法来推导。综合考虑结构尺寸和测试条件，将密度 ( $ML^{-3}$ ) 的相似比设置为 1，弹性模量 ( $ML^{-1}T^{-2}$ ) 的相似比设置为 1/5，几何尺寸 (L) 的相似比设置为 1/10。进而推导出其他相似度比率，如表1所示。

物理量	比例关系	相似比率	量纲
应力 $\sigma$	$C_\sigma = C_E$	1/5	$ML^{-1}T^{-2}$
载荷 $F$	$C_F = C_E C_L^2$	1/500	$MLT^{-2}$
位移 $\delta$	$C_\delta = C_L$	1/10	L
面积 $A$	$C_A = C_L^2$	1/100	$L^2$
质量 $M$	$C_M = C_\rho C_L^3$	1/1000	M
刚度 $K$	$C_K = C_E C_L$	1/50	$MT^{-2}$
时间 $t$	$C_t = C_E^{-1/2} C_\rho^{1/2} C_L$	$\sqrt{5}/10$	T
速度 $v$	$C_v = C_E^{1/2} C_\rho^{-1/2}$	$1/\sqrt{5}$	$LT^{-1}$
加速度 $a$	$C_a = C_E C_\rho^{-1} C_L^{-1}$	2	$LT^{-2}$

表 1: 模型相似比率

## 5.2 传感器测量分析原理

### 5.2.1 静态和动态载荷试验

在静态和动态载荷中,为监测测试过程中样本的响应,在模型建筑的梁、板、柱等区域安装位移传感器 [1, 2]。

为了获取建筑整体的应变数据,在柱、板和梁内的钢筋上布置应变片。其中,柱纵向钢筋的应变片用于监测重力荷载的重新分布。钢柱上安装了两个应变片,用于监测去除过程并估算去除时间。在连接梁和梁托的传力杆上也安装了应变片,以评估传力杆在保持梁柱连接完整性方面的作用及其激活情况。

为监测振动响应,模型中布置了加速度计,主要测量预期失效区的垂直振动(自由落体振动)、部分倒塌前后直立部分的垂直振动,以及建筑物沿两个主轴方向的水平加速度。

为了检测立柱的支撑作用,以及倒塌过程中载荷的重分配过程,在每根立柱的底座上安装力传感器。

为了记录测试过程中建筑物的损坏演变情况,以及裂纹的扩展过程,在梁托和柱上布局三维动态光学应变测量系统。

通过对比两种建筑模型的破坏情况,来验证基于层次结构的倒塌隔离设计是否能够在不削弱整体抗倒塌能力的前提下发挥作用。下面是具体的分析对象:

1. 通过位移传感器分析梁的垂直位移,验证其通过弯曲作用承受载荷的程度,特别是被拆除的柱子所在区域的变化;记录结构在边缘柱拆除后整体漂移特性,尤其是远离倒塌区域柱顶部的动态位移,以判断拉力的传播方向。
2. 通过力传感器分析柱底的支撑力变化,得到不同柱子在重载分配中的受力状态。
3. 通过应变传感器监测关键柱处的压缩力变化,分析枢轴点的力学特性;捕捉钢筋连接断裂的时间点以及楼板系统分离的全过程,显示倒塌区域沿分段边界的成功隔离以及楼板对建筑分割的贡献。
4. 通过加速度计捕捉直立部分在倒塌前后的动态水平力,以及振动衰减与后期稳定行为,为动态响应规律研究提供数据支撑。
5. 配合三维动态光学应变测量系统观测梁托和柱的动态裂纹扩展及断裂过程,实时观察结构损坏演变的细节机制。

### 5.2.2 振动测试试验

在振动测试中，为监测测试过程中样本的响应，在模型建筑的梁托区域安装位移与加速度传感器。加速度计可捕捉结构的振动加速度，位移传感器用于精确测量结构在不同工况下的位移变化 [3]。

利用加速度传感器采集的振动数据，通过频谱分析方法获取结构的固有频率和振动模态。通过模态分析，可以了解结构在不同振动模式下的变形形态，判断结构是否存在局部薄弱部位或异常振动情况。

根据位移传感器的数据，绘制位移时间曲线，分析结构在不同荷载工况下的位移变化规律。对比不同部位的位移值，可判断结构的整体变形趋势和是否存在不均匀沉降或过大的相对位移。分析楼层间的相对位移（层间位移角），若超过规范限值，可能表明结构在地震等灾害下的抗侧移能力不足，存在安全隐患。

结合加速度和位移数据，基于结构动力学原理计算结构在振动过程中的能量吸收和耗散情况。如通过滞回曲线分析（对于具有耗能能力的结构部件或连接），计算滞回面积来量化能量耗散。比较不同结构或同一结构在不同阶段的能量耗散能力，可以评估结构的抗震性能和耗能机制的有效性。例如，在抗震结构中，若耗能装置或结构连接的能量耗散能力不足，可能导致结构在地震中遭受更大的损伤。

### 5.3 三维数字图像相关法

三维数字图像相关法 (DIC) 的原理是当白光照射到涂有散斑斑点的试件表面时，表面的散斑会随着试件的变形而变化。通过相机拍摄试件变形过程中的散斑图的变化，进行变形过程的跟踪，进而反演出试件表面的实际变形。由左、右两个相机可以得到两个不同视角的试件表面的散斑图像，通过测量图像之间的视差可以计算出试件表面的三维形貌，实现立体摄影测量。

如图2所示，通过 DIC 技术，可以获得动态断裂过程中裂纹扩展的位移场分布，定量分析裂纹扩展速率和路径。

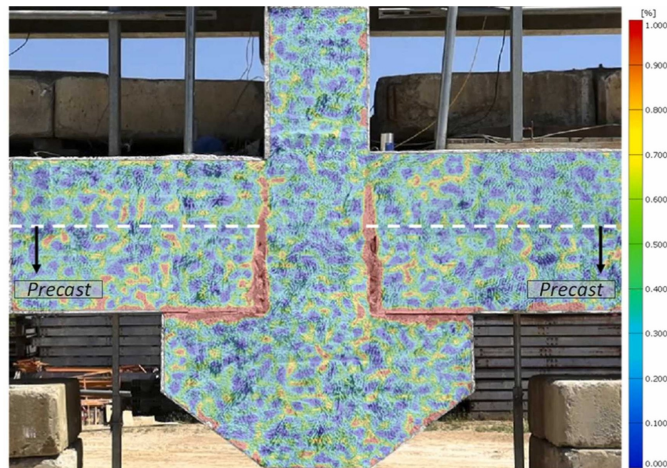


图 2: DIC 技术用于测量梁托的应变分布图

## 6 实验步骤

### 6.1 制作实验模型

依据文献 [1] 中提到的层级式倒塌隔离设计建筑与传统设计建筑的区别，按照表1及前述设定的相似比，选取合适的混凝土和钢筋材料进行模型的搭建，且每种模型搭建四个。

根据不同建筑设计结构特征，选用相应的尺寸参数与构造方式（如梁、柱、板的尺寸及配钢筋方式）。在需要使用 DIC 进行表面变形与裂纹跟踪的区域，进行制斑处理。制斑处理采用黑白喷涂，使得表面具有足够的散射光标记，确保散斑分布均匀且对比度清晰，以便 DIC 系统准确追踪变形过程。

在完成模型搭建后，连接实验设备，确保传感器与数据采集系统的准确性和稳定性。

### 6.2 静态和动态载荷试验

根据传感器布置方案（见5.2.1），在建筑模型的关键部位（如梁、柱、板）安装位移传感器，以精确监测各部分的位移和变形情况。同时，在每根柱子及梁托上布置加速度传感器，实时记录结构在不同加载工况下的动态响应。应变片布置在钢筋关键部位，用于监测钢筋的应变情况，确保捕捉到结构内部应力重分布的细节。在立柱下方安装力传感器。传感器的安装要求精确定位，并在建模前将应变片通过专业工艺粘贴于钢筋表面，确保其与钢筋材料协同变形。

本部分实验分为两种加载情况，即局部均布载荷和全局均布载荷。载荷的施加基于相似原理，选取符合缩比模型的加载强度，确保实验能够准确反映真实建筑的响应特性。在载荷施加过程中，实验模型经历两阶段测试：第一阶段为准静态移除两根边柱（模拟小初始破坏场景）；第二阶段为动态移除中间角柱（模拟大初始破坏场景），以评估层级式倒塌隔离设计在不同破坏场景下的性能表现。

此外，在模型的梁托和立柱区域布置三维动态光学应变测量系统，实时捕捉表面裂纹扩展和局部变形的细节。该系统的高精度测量能力能够提供裂纹形成、扩展路径和速度的动态数据支持。整个传感器系统的安装和调试需与数据采集系统严格同步，确保在加载和数据分析过程中不出现数据丢失、采样延迟或传感器失效等问题。

#### 6.2.1 局部加载

在搭建好模型后，针对两种建筑模型，按照图1中的加载方案，将均布荷载布置于模型楼板的指定区域。本实验分为两个阶段：

静态测试阶段：利用液压千斤顶逐步释放边柱的支撑力，观测梁、柱和板在部分柱失效情况下的变形与应力重分布，分析两种建筑物设计方案能否承受小初始破坏，并记录倒塌临界状态的参数；动态测试阶段：通过快速移除指定角柱，触发局部倒塌，获取两种设计方案在动态加载场景下的加速度、位移和应变数据，分析倒塌传播过程和系统稳定性。

#### 6.2.2 全局加载

将载荷改为全局均布加载，即在图1中所示的 C1-C9-C12-C4 的所有楼板表面施加均布荷载。实验过程与6.2.1局部加载实验类似。

### 6.3 抗震性能检测

在本节中，采用振动激励来探究层级式倒塌隔离设计方案的有效性。在模型的每个梁托位置安装加速度传感器与位移传感器，以分析模型的振动特性。并在梁托和立柱区域布局三维动态光学

应变测量系统。

### 6.3.1 振动台实验

在实验中将两种建筑模型放置于振动台上，施加相同的激励信号。振动台提供的激励信号为正弦波。通过施加不同的激励频率，记录模型在不同激励下的响应，重点分析其在结构振动下的稳定性和裂纹扩展情况。

激励信号通过信号发生器生成，并通过控制系统调节施加的频率和幅度。每次激励施加后，记录各个传感器的位移、加速度信息，并通过 DIC 系统实时监测模型表面的裂纹扩展和变形情况。

### 6.3.2 针对立柱的激振实验

在针对立柱的激振实验中，选择图1中的 C8、C11、C12 三根立柱，分别施加激励信号。每次激振后，利用加速度传感器、位移传感器以及 DIC 系统对建筑模型进行全面监测。记录激励信号与各传感器的响应数据，分析振动对整体建筑结构的影响，并结合 DIC 系统的数据，追踪裂纹的扩展与破坏模式。

## 7 可行性分析

1. 本实验根据相似原理，使用缩小模型代替全尺寸结构，能够有效降低成本、缩短实验周期，并提高容错性。
2. 在本实验中，采用了传感器与 DIC 方法结合，能够对建筑模型的动态响应进行多维度监测和分析。
3. 实验内容相对全面，既考虑了多种载荷情况的静态和动态载荷下的性能测试，也包括抗震性能的动力学分析，符合实验目的。

## 参考文献

- [1] N Makoond, A Setiawan, M Buitrago, JM Adam. Arresting failure propagation in buildings through collapse isolation. *Nature* **629**, 592-596, 2024.
- [2] M Buitrago, J Sagaseta, N Makoond, A Setiawan, JM Adam. Robustness of a full-scale precast building structure after edge column failure. *Eng. Struct.* **326**, 119495, 2025.
- [3] B Zhao, J Yi, X Li, Y Tian, X Lu. Experimental recognition of seismic performance of simple bolt-connected precast frame by comparing with equal stiffness cast-in-situ frame. *J. Build. Eng.* **78**, 107689, 2023.