

文章编号: 1000-4750(2015)05-0162-06

RC 空间框架结构竖向倒塌全过程 试验研究与理论分析

王少杰¹, 刘福胜², 徐赵东¹

(1. 东南大学混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室, 南京 210096; 2. 山东农业大学水利土木工程学院, 山东, 泰安 271018)

摘 要: 采用抽柱法对一双层双向 RC 空间框架结构进行了拟静力倒塌试验, 分别研究了框架结构底层边中柱失效后, 剩余结构的竖向倒塌过程、倒塌机制和倒塌细节。试验结果表明: RC 空间框架结构竖向倒塌分为外推阶段(拱作用阶段)、内收阶段(悬链线作用阶段)和倒塌阶段三个阶段; 现浇楼板推迟甚至避免了梁铰出现, 具体与现浇楼板对梁的约束大小有关; RC 空间框架结构具有良好的抗连续倒塌性能, 但应特别注意现浇楼板对结构抗连续倒塌性能的影响。在试验研究基础上, 分析了 RC 空间框架结构竖向倒塌机制的转化过程, 提出了最大侧向变形和临界塌落位移的计算模型和求解方法, 建立了结构损伤指数模型。

关键词: 结构倒塌; RC 框架结构; 倒塌试验; 倒塌机制; 结构损伤指数

中图分类号: TU375.4; TU317.1 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.11.1094

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL ANALYSES ON ENTIRE COURSE OF VERTICAL PROGRESSIVE COLLAPSE OF SPATIAL RC FRAME STRUCTURES

WANG Shao-jie¹, LIU Fu-sheng², XU Zhao-dong¹

(1. Key Laboratory of Concrete and Prestressed Concrete Structure of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China)

Abstract: A quasi-static test is carried out to experimentally study the vertical progressive collapse of a two-storey by two-bay spatial RC frame structure. The progressive collapse mechanism and collapse details of the residual structure due to a side column loss are simulated by unloading the jack, replacing the failure column. The experimental results indicate that: the whole vertical-collapse damaged-process of RC spatial frame structures can be divided into three stages, including an extrapolation stage (arch action stage), an adduction stage (catenaries action stage) and a collapse stage; the appearance of plastic hinges, which are relative to the binding effects of slabs on beams, can be put off or even be skipped; RC spatial frame structure has a fine anti-collapse performance, but the influence of cast-in-situ slabs on anti-collapse performance of a structure should be considered seriously; the theoretical method for maximum lateral displacement and the mathematical model and the method for the critical displacement of the slumping column are raised in the combination of an experimental research and a theoretical analysis; what is more, the structure damage indicator model was proposed.

Key words: structural collapse; RC spatial frame structures; collapse experiment; collapse mechanism; structure damage indicator

收稿日期: 2013-11-24; 修改日期: 2014-01-14

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划项目(90915004); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CXLX13_102); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(3205004907)

通讯作者: 徐赵东(1975-), 男, 安徽潜山人, 教授, 博士, 博导, 从事结构抗震、健康监测及防火等方面的研究(E-mail: xzsubmission@163.com).

作者简介: 王少杰(1985-), 男, 安徽宿州人, 博士生, 从事结构防灾、安全监测方面的研究(E-mail: tumuwsj@163.com);

刘福胜(1964-), 男, 山东潍坊人, 教授, 博士, 博导, 从事结构工程、工程力学等方面的研究(E-mail: liufsh@sdau.edu.cn).

特大地震、煤气爆炸、恐怖袭击、撞击等自然或人为偶然事件的发生,可能引发建筑或结构系统的局部破坏,甚至引发竖向或水平向的整个结构连续倒塌。结构一旦倒塌,一般均会严重威胁生命和财产安全,并产生恶劣的社会影响。因此,关于结构倒塌的研究已经成为土木工程领域研究的热点^[1-4]。围绕这一热点问题,国内外许多学者在理论研究、试验研究、数值模拟、规范编制等方面取得了大量研究成果^[5-10]。

对框架结构进行连续倒塌分析时,通常采用“抽柱法”,亦称替换荷载路径法、拆除构件法、AP法^[11]。在目前的抗连续倒塌分析中,抽柱法是最准确可靠的方法,因为该方法不依赖于具体的荷载形式,适合于任何偶然荷载作用下结构的破坏分析,是一种具有普遍适用性的方法。然而,为了深入认识结构倒塌过程、倒塌机制和倒塌细节,必须通过试验研究;欲体现结构的整体相互作用,反映结构体系的真实受力状态和规律,则必须通过空间结构试验^[12]。

本文采用油压千斤顶代替失效柱^[6],分级卸载油压千斤顶模拟“抽柱法”,通过对一双层双向RC空间框架结构的拟静力倒塌试验,旨在揭示RC空间框架结构倒塌受力机制的转化过程,定量评价现浇楼板对塑性铰形成时刻的影响;通过对倒塌试验的分析,提出数学计算模型,建立最大侧向变形和临界塌落位移的理论求解方法,应用结构损伤指数模型定量评价剩余结构损毁状态。

1 试验概况

1.1 模型设计与制作

1.1.1 模型设计

试验模型的工程背景为某12层框架结构写字楼,取其第一层和第二层的一部分,按照1:4的缩尺比例设计一双层双向空间框架结构试验模型,采用油压千斤顶模拟该写字楼底层边中柱失效后剩余结构的受力状态,即“抽柱法”。试验模型的垫梁尺寸为250mm×300mm,柱子截面尺寸为200mm×200mm,梁截面尺寸为100mm×200mm;为了对照研究现浇板的作用,模型设计为第一层无楼板、第二层有现浇楼板,板的厚度为40mm。试验模型的几何尺寸及配筋如图1所示。

1.1.2 模型制作

试验模型制作分3次浇筑完成,分别为垫梁,

一层柱梁,二层柱梁板,每层养护两天后拆模进行下一层的施工。试验模型直接制作在试验机下方的指定位置,图1所示的失效柱采用油压千斤顶代替。试验模型的梁柱纵向钢筋为HRB400,箍筋为HPB235,板的配筋为 $\phi 4@100$,混凝土设计强度等级为C20。钢筋及混凝土的力学性能指标实测值见表1,检测结果表明,材料的各项力学性能指标均满足试验设计要求。

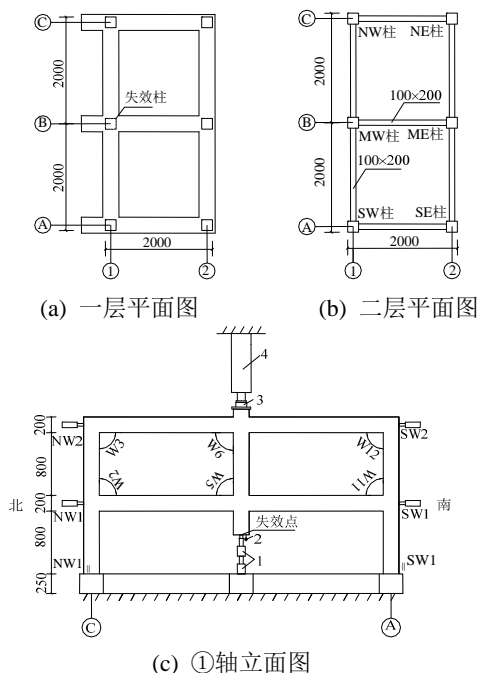
表1 钢筋及混凝土材性试验结果

Table 1 Material test results of rebar and concrete

材料	试验项目	实测值
纵筋(HRB400)	屈服强度/MPa	402.17
	极限抗拉强度/MPa	548.92
	延伸率/(%)	35
箍筋(HPB235)	屈服强度/MPa	432.17
	极限抗拉强度/MPa	657.95
板的钢筋(冷拔丝)	极限抗拉强度/MPa	651.97
	混凝土(C20)	立方体抗压强度/MPa
	回弹强度换算值/MPa	22.16

1.2 加载装置与方案

试验采用微机控制液压加载装置施加竖向荷载,该加载装置构造简单、性能稳定,可满足结构竖向倒塌试验研究的需要。如图1(c)所示,由加载千斤顶4提供竖向荷载 P ,以模拟框架柱的实际受力状态;用下部千斤顶1活塞的不断收缩模拟失效柱的失效过程。 P 值根据结构分析和相似试验理论确定,为138kN。加载制度为以0.15kN/s的速度加载至138kN;之后荷载值维持不变至试验结束。



1. 千斤顶; 2. 百分表; 3. 球形支座; 4. 加载千斤顶

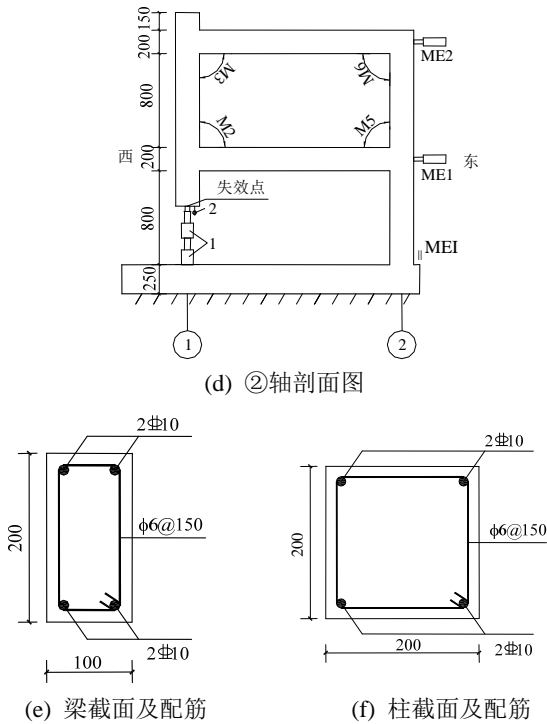


图1 试验模型几何尺寸及配筋

Fig.1 Reinforcements information of RC frame structure

1.3 测量方案

试验主要测量以下内容：失效点的竖向位移；框架柱的水平侧移，包括 ME1、ME2、SW1、SW2、NW1、NW2 共计 6 个测点；梁柱夹角，如图 1(c)、图 1(d)所示；梁、板、柱的钢筋和混凝土应变，共计布置了 231 个应变测点。失效点的竖向位移及水平侧移由百分表(位移计)采集；梁柱转角由测角仪采集；应变采集由应变仪和计算机组成数据采集系统，由人工触发实现同时采集，钢筋应变通过预先埋设的电阻应变片采集。布置的测试仪表和测点如图 1 所示。

2 试验结果

2.1 结构损伤指数

本文定义结构损伤指数(Structure damage indicator, 简称 D)，其表达式为：

$$D = \frac{\delta_m}{\delta_u} \quad (1)$$

式中： δ_m 为任意时刻模型失效点竖向位移； δ_u 为模型失效点对应的临界塌落位移，即进入倒塌阶段时失效点竖向位移，通过下文结构损伤指数 D 与框架侧移的关系曲线(图 3)知 $\delta_u = 323.1\text{mm}$ 。

结构损伤指数 D 具有明确的物理含义，从式(1)可知，当 $\delta_m = 0$ 时， $D=0$ ，此时结构处于损伤初始

状态；当 $\delta_m \geq \delta_u$ 时， $D \geq 1$ ，此时结构处于倒塌状态；当 $0 < \delta_m < \delta_u$ 时， $0 < D < 1$ ，此时结构处于损伤累积状态。结构损伤指数 D 仅涉及失效点的竖向位移 δ_m 和临界塌落位移 δ_u 两个位移量， δ_m 可以方便测量， δ_u 可以依据下文提出的理论求解方法确定，从而可以确定因灾损毁结构的 D 值，定量评价剩余结构所处损毁状态和抗倒塌性能。

2.2 试验现象

在加载至 138kN 时失效点竖向位移为 6.2mm ($D=0.019$)，致使试验模型发生初始损伤和变形，这是由于代替失效柱的油压千斤顶 1 在上部荷载作用下压缩变形造成的，但结构处于弹性阶段。

此后维持荷载 138kN 至试验结束，通过油压千斤顶实现分级卸载，模拟底层边中柱的失效过程。 $D=0.048$ 时，二层现浇板在中间梁南侧出现东西向裂缝； $D=0.062$ 时，西侧二层梁端部的裂缝已贯穿至板底； $D=0.071$ 时，板底西北角和西南角相继出现裂缝；之后，裂缝的数量没有明显增多，裂缝的长度继续增长，并伴有响声； $D=0.157$ 时，板底出现以失效柱为中心的放射状裂缝，伴有顺筋裂缝，但以放射状裂缝为主，伴随响声出现； $D=0.171$ 时，梁端部多处受压区混凝土同时被压碎； $D=0.195$ 时，东侧二层梁出现扭转裂缝，裂缝以 ME 柱为中心向两侧延伸，裂缝间距逐渐增大； $D=0.355$ 时，有大块混凝土掉落，此时为结构由外推阶段向内收阶段的转折点。

进入内收阶段以后的很长一段沉降历程，试验模型没有新的显著特征出现，只是已贯通裂缝的宽度在不断增加。 $D=0.691$ 时，东西方向一层中间梁东端较其他梁端的破坏严重； $D=1.000$ 时，该梁端已出现严重的拉脱破坏；随着塌落位移的继续增加，至 $D=1.119$ 时，该梁端已被彻底拉脱，原本封闭的箍筋也被拉开，下侧纵向钢筋发生严重的屈曲。 $D=0.939 \sim 1.000$ ，SW 柱和 NW 柱的侧移显著改变，伴随响声出现，且有大量混凝土剥落，后续分析表明，此刻对应临界塌落位移 $\delta_u = 323.1\text{mm}$ 。 $D=1.092$ 时，在 NE 柱和 SW 柱一层中间高度处，出现斜向裂缝，如下文图 6 所示； $D=1.119$ 时，在 NW 柱和 SW 柱柱底出现塑性铰，板的钢筋有多处被拉断，梁的纵向钢筋亦有明显的颈缩现象，模型进入倒塌阶段，停止加载。试验模型的最后破坏状态如图 2 所示，图 2 反映了梁柱节点、现浇混凝土板和钢筋的典型破坏特征。

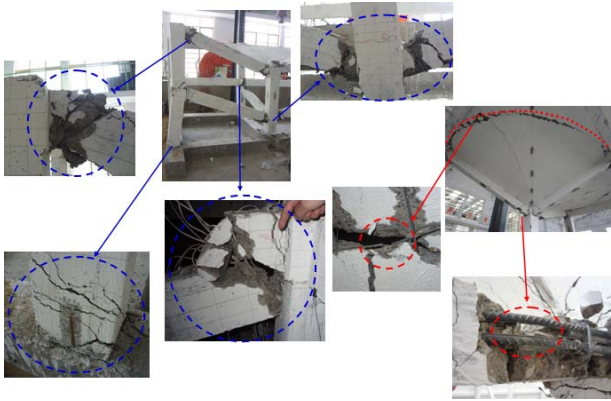


图 2 试验模型的最终破坏状态

Fig.2 Ultimate failure modes of the experimental model

3 试验结果分析

3.1 结构损伤指数 D 与框架侧移的关系

图 3 所示为与失效柱相邻的 ME 柱、SW 柱、NW 柱对应测点的结构损伤指数 D 与框架侧移的关系曲线。图 3 表明，曲线存在两个显著的拐点，可被划分为三个阶段，其中第 I 阶段为外推阶段，即拱作用阶段；第 II 阶段为内收阶段，即悬链线作用阶段；第 III 阶段为倒塌阶段，倒塌模式具有类似叠层破坏的趋势特征。ME 柱对应测点在 $D > 0.69$ 后没有明显改变，是因为此刻对应柱头已发生破坏造成的。

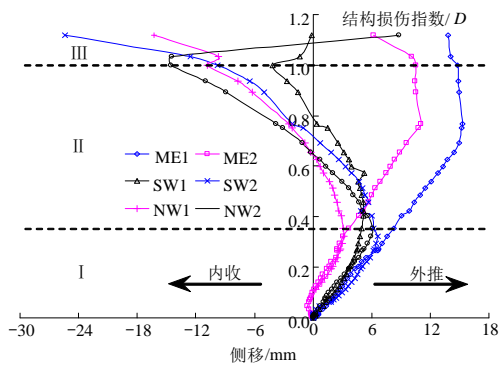


图 3 结构损伤指数 D -框架侧移曲线

Fig.3 The curve of D -lateral displacement

试验模型竖向倒塌各阶段对应的宏观状态如图 4 所示。



$D=0.202$ (外推阶段)

$D=0.767$ (内收阶段)



$D=1.000$ (倒塌破坏点)

$D=1.119$ (倒塌阶段)

图 4 模型在不同阶段的破坏形态

Fig.4 Failure modes of the model at different stages

3.2 结构损伤指数 D 与梁柱夹角的关系

图 5 所示为结构损伤指数 D -梁柱夹角之间的关系曲线，从中可以看出，在进入倒塌阶段前，梁柱夹角基本按线性趋势增加；进入倒塌阶段后，梁柱夹角有一显著增大趋势，反映了受力机制的转化。 $D=0.29$ 之后，W3 的增长突然变快是因梁底混凝土脱落导致的测量误差。夹角 M5 角度的增加量明显大于夹角 M6 角度的减少量，与一层中间梁端部破坏严重、二层同一位置处破坏较轻的试验现象相吻合； $D=0.89$ 时，夹角 M5 由大变小是因此时梁已被拉脱。

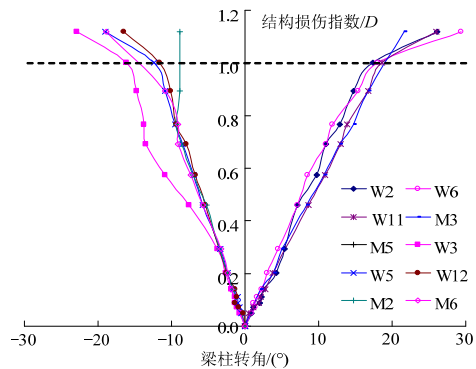


图 5 结构损伤指数 D -梁柱夹角曲线

Fig.5 The curve of D -angle between beam and column

3.3 远离失效柱的角柱损伤演化过程

试验模型远离失效柱 MW 柱的角柱包括 NE 柱和 SE 柱，两角柱在倒塌破坏点之前没有裂缝出现，进入倒塌状态后， $D=1.04$ 时在两角柱一层中间高度处同时出现裂缝。本文以 NE 柱为例，详细分析远离失效柱的角柱损伤演化过程。

图 6 所示为结构损伤指数 D 与 NE 柱一层中间高度裂缝附近应变之间的变化曲线。图 6 表明，裂缝附近各测点的应变在整个倒塌试验过程基本均按线性趋势增加，且表现为压应变；当 $D=1.04$ 时，应变突然大幅增大，此时 NE 柱在一层柱中间高度出现贯通的斜向裂缝，如图 6 所示；二层没有出现裂缝。

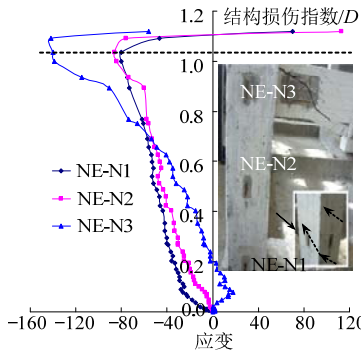


图 6 结构损伤指数 D -NE 柱应变曲线
Fig.6 Curve of D -NE column strain

上述分析表明，远离失效柱的角柱在进入倒塌阶段之前始终处于较安全状态；进入倒塌阶段后，由于梁的扭转可能导致柱中间高度处出现裂缝，但角柱不足以严重破坏。

3.4 现浇楼板的抗连续倒塌作用

根据现浇楼板对试验模型梁的约束，可将框架梁分为无现浇板约束梁(一层梁)、单边现浇板约束梁(二层边梁)和两边现浇板约束梁(二层中间梁)三种类型。通过分析框架梁上对应测点的应变测试结果，确定三种不同约束状态下梁上形成塑性铰的时刻分别为：无现浇板约束梁， $D=0.195$ ；单边现浇板约束梁， $D=0.223$ ；两边现浇板约束梁，最终在板底形成了铰，但始终没有贯穿至板顶。故可知，现浇楼板的存在推迟甚至能够导致梁铰不出现，具体与现浇板对梁约束大小有关。

通过图 2 所示试验现象，即现浇楼板的钢筋被拉断，充分证明了现浇楼板在倒塌破坏的后期发挥了拉结作用，能够显著增强结构的整体性，对结构的抗连续倒塌是有利的；但是如果最终梁上不能形成塑性铰，这将可能导致产生柱铰，对结构的抗连续倒塌是不利的。上述两个方面的分析表明，现浇楼板不能太刚，设计时在有利和不利之间寻求平衡是关键；同时宜适当加强柱，推迟柱铰的出现。

4 理论分析

4.1 RC 框架结构竖向倒塌受力机制的转化

通过对试验结果的分析，揭示了 RC 框架结构竖向倒塌受力机制的转化过程，如图 7 所示。

通过深入分析图 7 可知，随着失效点竖向位移的增加，外推阶段受压体(图中斜线部分)高度不断减小，受压体轴线对应的 A 点不断上移，B 点不断下移，促使框架柱侧移不断增加，待 A 点与 B 点在

同一高度时，对应最大侧向变形状态，如图 7(c)。随后试验模型开始由外推阶段进入内收阶段，框架梁由压弯构件变为受拉构件，但裂缝多集中在梁铰区域，即内收阶段的变形主要集中在梁铰区域。至与失效柱相连的框架梁下侧的纵向钢筋出现颈缩，试验模型进入倒塌阶段，此刻对应临界塌落位移。最大侧向变形和临界塌落位移是划分倒塌三阶段的两个关键参数，建立其理论求解方法具有重要意义。

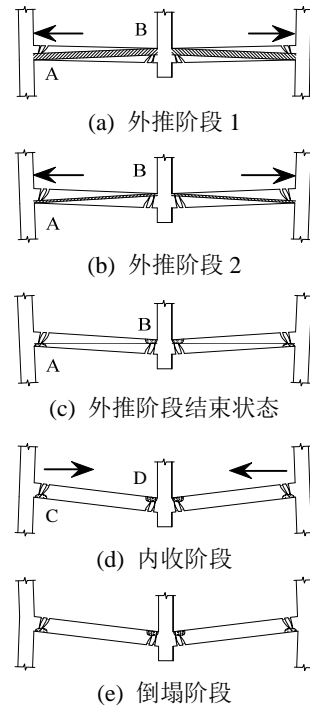


图 7 框架结构受力机制转化过程

Fig.7 Mechanical behavior transformation process of RC

4.2 最大侧向变形的理论求解

RC 框架结构最大侧向变形状态如图 7(c)，此时 A 点和 B 点在同一高度。如图 8 所示， L_1 为 A、B 两点水平状态对应的距离， l 为梁的净跨度， h_1 为梁的截面高度 h 减去 $2a'$ ， a' 为纵向受力钢筋合力点至受压区混凝土边缘的距离，即单排配筋时 $a' = c + d / 2$ ， c 为混凝土保护层厚度， d 为纵向受力钢筋的直径。根据各参数间的关系，可得出 $L_1 = \sqrt{l^2 + h_1^2}$ ，故最大侧向变形为：

$$\mu_{\max} = L_1 - l \tag{2}$$

依据上述方法，将本文试验模型对应的参量代入上述相关理论求解公式，可得最大侧向变形的理论计算结果为 6.605mm，与试验结果 6.591mm 相比大 0.21%，精度非常理想。

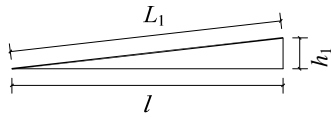
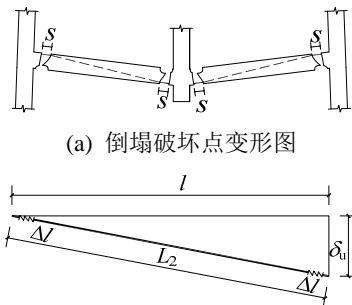


图 8 求解简图

Fig.8 Calculation diagram

4.3 临界塌落位移的理论求解

内收阶段向倒塌阶段转化的倒塌临界状态如图 9(a), 此时失效点对应的竖向位移即为临界塌落位移。试验研究表明, 内收阶段框架梁的破坏位置主要集中在梁铰区域, 即内收阶段的受拉变形主要集中在梁铰区域。故求解临界塌落位移的理论计算模型可以简化为图 9(b), 图中 l 为梁的净跨度, δ_u 为临界塌落位移, $L_2 = L_{斜} + 2\Delta l$, $L_{斜} = \sqrt{l^2 + (h - 2c)^2}$ 。



(a) 倒塌破坏点变形图

(b) 临界塌落位移求解简图

图 9 倒塌破坏点状态

Fig.9 Collapse state

因受拉破坏主要集中在梁铰区域, 如图 10 所示。故计算临界塌落位移时, 梁铰区域的伸长量 Δl 近似取为:

$$\Delta l = s \times \varphi_a = s \times 0.25 \times \varphi$$

式中: s 为箍筋间距; φ 为钢筋延伸率; φ_a 为钢筋均匀延伸率, 取 $\varphi_a = 0.25\varphi$ 。

据图 10(b)所示的各参量间关系, 可知临界塌落位移为:

$$\delta_u = \sqrt{L_2^2 - l^2} \quad (3)$$



图 10 梁铰破坏状态

Fig.10 Failure state for the beam hinges

依据上述相关理论求解公式, 代入本文试验参量, 计算可得临界塌落位移的理论计算结果为 340.49mm, 与试验结果 323.1mm 相比大 5.38%,

精度较高。结合何庆锋等^[13]一文约束梁试验数据进一步验证了本文提出的临界塌落位移的理论求解方法, 计算值与试验值吻合较好, 最大误差为 8.03%。该方法具有精度高、计算过程简便等优点, 解决了前文结构损伤指数模型中关键参数 δ_u 的理论求解难题, 使得该模型用于剩余结构损毁状态的快速定量评估成为现实。

5 结论

通过对 RC 空间框架结构倒塌试验的研究和分析, 得到以下结论:

(1) 基于抽柱法的 RC 空间框架结构倒塌试验结果表明: RC 空间框架结构竖向倒塌过程分为外推阶段(拱作用阶段)、内收阶段(悬链线作用阶段)和倒塌阶段三个阶段。

(2) 现浇楼板存在推迟甚至能够导致不出梁铰, 具体与现浇楼板对梁的约束大小有关, 约束过大可能导致先出柱铰, 因此, 设计时现浇楼板不能太刚, 同时宜适当加强柱, 以推迟柱铰出现。

(3) 在倒塌试验基础上提出的最大侧向变形和临界塌落位移理论求解方法, 计算简便且精度高, 使得应用结构损伤指数模型定量评价剩余结构损毁状态成为可能。

(4) 经过合理设计的 RC 空间框架结构具有良好的抗连续倒塌性能, 但应注意避免因板钢筋被大面积拉断引起局部坍塌以及现浇楼板对剩余结构倒塌机制的影响。

参考文献:

- [1] Mehrdad Sasani, Andre Werner, Ali Kazemi. Bar fracture modeling in progressive collapse analysis of reinforced concrete structures [J]. Engineering Structures, 2011, 33(2): 401-409.
- [2] Shi Yanchao, Li Zhongxian, Hao Hong. A new method for progressive collapse analysis of RC frames under blast loading [J]. Engineering Structures, 2010, 32(6): 1691-1703.
- [3] 李爽, 赵颖, 翟长海, 等. 节点对 RC 框架结构抗连续倒塌能力影响研究[J]. 工程力学, 2012, 29(12): 80-87. Li Shuang, Zhao Ying, Zhai Changhai, et al. The influences of joint on the progressive collapse-resisting performance of RC frames [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(12): 80-87. (in Chinese)
- [4] 吴波, 黄仕香. 结构倒塌时楼板碰撞效应的简化评估方法[J]. 工程力学, 2013, 30(3): 306-314. Wu Bo, Huang Shixiang. A simplified evaluating method for impacting of floor slabs during structural collapse [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(3): 306-314. (in Chinese)

(参考文献[5]-[13]转第 177 页)

- characteristics of conical vortices above roof eaves of low-rise cubic buildings using particle image velocimetry [J]. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 2009, 10(2): 113–123.
- [13] Elsayed M, Scarano F, Verhaagen N G. Particle image velocimetry study of the flow over a slender delta wind [C]. 25th AIAA Applied Aerodynamics Conference, Miami FL, American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc, 2007: 2034–2043.
- [14] Henrik Tryggesson, Mats D Lyberg. Stationary vortices attached on flat roofs [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2010, 98(1): 47–54.
- [15] Banks D, Meroney R N. The applicability of quasi-steady theory to pressure statistics beneath roof-top vortices [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2001, 89(6): 569–598.
- [16] 董欣, 叶继红. 大跨度平屋盖表面风荷载体型系数研究[J]. *土木工程学报*, 2012, 45(4): 29–42.
- Dong Xin, Ye Jihong. Study of shape factors for large-span flat roofs [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2012, 45(4): 29–42. (in Chinese)
- [17] 徐华舫. 空气动力学基础(上册)[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1987: 62–64.
- Xu Hufang, *Fundamentals of aerodynamics(volume I)*[M]. Beijing: BeiHang University Press, 1987: 62–64.
- [18] Rizzi A, Muller B. Large-scale viscous simulation of laminar vortex flow over a delta wing [J]. *AIAA Journal*, 1989, 27(7): 833–840.
- [19] Ekaterinaris J A, Schiff L B. Numerical simulation of incidence and sweep effects on delta wing vortex breakdown [J]. *Journal of Aircraft*, 1994, 31(5): 1043–1049.
- [20] David Banks. The suction induced by conical vortices on low-buildings with flat roofs [D]. Fort Collins, Colorado: Colorado State University, 2000.

(上接第 167 页)

- [5] 张雷明. 灾害荷载下结构倒塌机制研究[D]. 北京: 清华大学, 1999.
- Zhang Leiming. *Researches on the collapse mechanisms of structures under disastrous loading* [D]. Beijing: Tsinghua University, 1999. (in Chinese)
- [6] 易伟建, 何庆锋, 肖岩. 钢筋混凝土框架结构抗倒塌性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2007, 28(5): 104–109, 117.
- Yi Weijian, He Qingfeng, Xiao Yan. Collapse performance of RC frame structures [J]. *Journal of Building Structures*, 2007, 28(5): 104–109, 117. (in Chinese)
- [7] 陆新征, 林旭川, 叶列平, 等. 地震下高层建筑连续倒塌数值模型研究[J]. *工程力学*, 2010, 27(11): 64–70.
- Lu Xinzheng, Lin Xuchuan, Ye Lieping, et al. Numerical models for earthquake induced progressive collapse of high-rise buildings [J]. *Engineering Mechanics*, 2010, 27(11): 64–70. (in Chinese)
- [8] Mehrdad Sasani, Serkan Sagiroglu. Progressive collapse resistance of hotel San Diego [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2008, 134(3): 478–488.
- [9] ZhaoDong Xu, BenQiang Shi, KeYi Wu, et al. Vertical shaking table tests on the structure with viscoelastic multi-dimensional earthquake isolation and mitigation devices [J]. *Science in China (Series E)*, 2009, 52(10): 2869–2876.
- [10] GSA2003, Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization project [S]. 2013.
- [11] 谢甫哲, 舒赣平, 凤俊敏. 基于抽柱法的钢框架连续倒塌分析[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2010, 40(1): 154–159.
- Xie Fuzhe, Shu Ganping, Feng Junmin. Progressive collapse analysis of steel frame structure using removing column method [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2010, 40(1): 154–159. (in Chinese)
- [12] 徐有邻. 混凝土结构理论及规范的发展[J]. *建筑结构学报*, 2010, 31(6): 17–21.
- Xu Youlin. Development of concrete structure theory and code [J]. *Journal of Building Structures*, 2010, 31(6): 17–21. (in Chinese)
- [13] 何庆锋, 易伟建. 考虑悬索作用钢筋混凝土梁柱子结构抗倒塌性能试验研究[J]. *土木工程学报*, 2011, 44(4): 52–59.
- He Qingfeng, Yi Weijian. Experimental study of the collapse-resistant behavior of RC beam-column sub-structures considering catenary action [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2011, 44(4): 52–59. (in Chinese)