

引入初始破坏的桁梁结构倒塌试验研究

王磊¹, 陈以一^{1,2}, 李玲¹, 刘宏创¹

(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)

摘要: 对空间桁梁结构模型进行了倒塌试验. 研制了连续性倒塌试验中人工控制的初始破坏引入装置. 利用动态应变数据采集系统以及数字图像处理技术获取初始破坏引发的动力过程中的应变和位移, 数据分析可得到结构破坏过程的持续时间, 测点的应变时程曲线, 观测点的位移时程曲线, 揭示了破坏过程及破坏机制. 结果表明: 构件承载力富余程度的高低及空间效应是结构抗倒塌重要的冗余度. 采用理论分析和数值分析对结构的破坏过程进行了模拟.

关键词: 连续性倒塌; 模型试验; 空间桁梁结构; 动位移; 显式积分

中图分类号: TU 317

文献标识码: A

Experimental Study on Beam-truss Structure Model by Introducing Incipient Failure in Collapse

WANG Lei¹, CHEN Yiyi^{1,2}, LI Ling¹, LIU Hongchuan¹

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Shanghai 200092, China)

Abstract: Experiments on structural progressive collapse were carried out on truss-beam in a three dimensional system model. A manually controlled apparatus inducing initial member failure was developed, which could be easily installed as part of structural members subjected axial forces. By using non-contact digital image processing technique and high frequency strain acquisition system, the displacements and strains during the dynamic process after initial member failure could be obtained. The duration of collapse process, displacement and strain history at the measuring spots were analyzed to reveal the collapse mechanism. The results show that the margin of loading capacity of members over their inner forces induced by vertical loads and the interaction of structural components in the three dimensional system provide main redundancy against progressive collapse. Simple model analysis and non-linear dynamic numerical simulation were also performed to explain the behavior of failure process.

Key words: progressive collapse; model experiment; spatial beam-truss structure; dynamic displacement; explicit integration

在大型复杂结构的连续性倒塌中, 源于结构的初始局部破坏可能引起破坏范围的迅速扩散, 直至造成结构的一部分乃至整体完全失去承载能力. 深入了解和掌握这一破坏过程的机理, 对防止这类破坏的发生具有重要意义.

许多研究者将注意力集中在连续性倒塌的分析方法. 最常用的数值分析方法之一是备用荷载路径分析方法, 将初始破坏杆件删除, 分析变化后的结构在原有荷载(重力荷载)作用下的内力重分布, 判断它是向新的稳定平衡状态逐步趋近, 还是发生连续性倒塌破坏. 所谓“删除”构件单元是让指定构件退出计算. 但数值分析是建立在许多假定的基础上, 具有一定的局限性, 因此连续性倒塌的试验研究就显得非常重要.

针对结构体系的连续性倒塌试验研究尚不多见, 文献[1-2]分别进行了一层钢框架组合楼板的足尺结构模型和一榀4跨3层的钢筋混凝土平面框架缩尺结构模型在中柱“消失”下的拟静力试验来考察结构体系的悬索效应, 其中依靠千斤顶替换中柱来实现中柱的“消失”. 也有若干从材料、构件的层次上以及与之相关的动荷载作用下的试验研究. 文献[3]针对简单的钢框架体系节点断裂所产生的冲击作用和节点断裂后对整体动力性能的影响进行试验研究. 文献[4]通过单层网壳承受落锤撞击作用的实验, 研究在撞击下的动力稳定性. 文献[5]对简支梁和悬臂梁在动荷载作用下的若干动态参数测试技术进行了试验研究.

设计了空间桁梁结构模型进行连续性倒塌试验, 尝试建立一种实验室试验系统. 该结构模型造价相对较低, 一定条件下可重复利用(如只有个别杆件破坏

收稿日期: 2009-08-14

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(20060247034)

作者简介: 王磊(1974—), 男, 博士生, 主要研究方向为连续性倒塌研究. E-mail: 1307499@163.com

陈以一(1955—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为钢结构. E-mail: yiyichen@tongji.edu.cn

的情况),但能反映结构连续性倒塌的主要特点,如动力性质.其次,它的初始破坏引入装置具有可控性,局部破坏初始位置和内力状况可准确把握.最后,测量方式能获得短时内发生的动态位移和应变.

1 桁梁结构的冗余度特点

桁梁结构,是指格构式的平面受力构件组成的大跨度结构.在钢结构中,这类构件的上、下弦通常为连续杆件,腹杆与上、下弦的连接具有一定的转动刚度;此外,即使作为一维受力构件,在实际结构的三维体系中,各榀桁梁之间建立起相互约束的空间关系,实际力学性质与力学分析中简化的静定“桁架”结构不完全相同;特别是对这类构件进行真实极限承载能力精确分析时,考虑其“非静定”的特点将与“静定”结构有很大的区别^[6].结构体系抵抗连续性倒塌破坏的“冗余度”是比力学分析中超静定次数更一般的概念^[7].例如:与构件实际承载能力相比,重力荷载等设计荷载所产生的内力效应处于一种较低的水平,进而产生构件承载力的“冗余”;连接具有一定的多余约束,使局部构件破坏后的内力可重新分布;结构的性质亦使局部破坏导致的局部承载能力的丧失可由荷载路径的变化而得到补偿.但是大跨桁梁结构冗余度比完全抗弯连接的高层框架显然要低,是一种较低冗余度的结构.之所以采用桁梁结构作为试验对象,一方面缘于近年来大跨度结构时有倒塌发生的记录^[8];另一方面,也因为这类结构模型的制作及连接可以实现方便操作,重复利用的目的,同时连接的相对简易也使结构内力便于分析.

2 空间桁梁结构模型

2.1 模型设计

试验模型是由三榀平面桁梁 A、B、C 及上弦支撑杆件组成的三维结构体系,上、下弦杆是连续杆件,中间的平面桁梁 B 通过两个边榀平面桁梁 A、C 上弦水平支撑及上弦斜支撑来实现空间效应,参见图 1.所有的杆件均为铝管,直径 10 mm,厚度 1 mm;上弦节间长 500 mm,总长 2 000 mm;下弦节间长 500 mm,总长 2 500 mm;上、下弦之间高度为 300 mm.上弦节点由两个钢块构成,通过拧紧螺栓使两个钢块夹紧上弦杆;钢块并通过钢销与斜腹杆和上弦水平支撑连接,见图 2.支座的构造及连接见图 3,下弦杆与斜腹杆通过钢销与连接钢块相连,它

们再通过钢销与支座相连.桁梁 A、C 上弦杆边缘与连接钢板通过钢销连接,它们再与支座型钢通过钢销连接,如图 4 所示.该模型的连接构造均为钢销连接,易拆装,节点零件可重复使用.

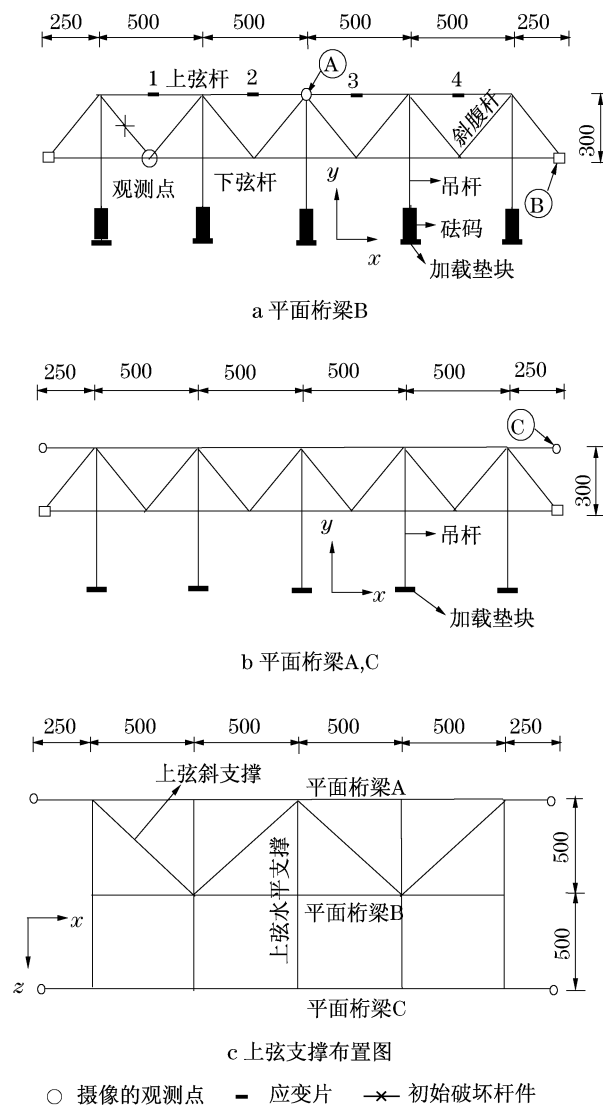


图 1 空间桁梁布置图(单位:mm)

Fig.1 Layout of spatial beam-truss structure(unit:mm)

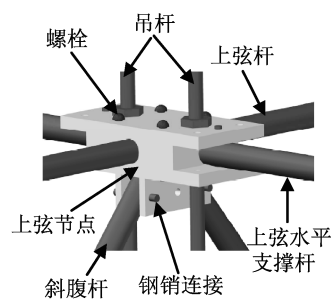


图 2 上弦节点A连接

Fig.2 Connection of upper joint A

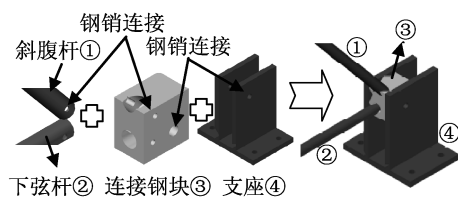


图3 上弦节点⑧连接

Fig.3 Connection of support ⑧

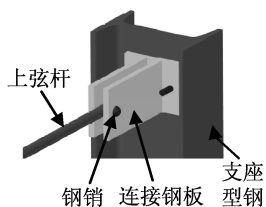


图4 桁梁 A,C 上弦杆边缘约束

Fig.4 Edge constraint of beam-truss A,C

加载采用挂载方式,其装置包括吊杆($\phi 6$ 螺纹钢杆),加载垫块及砝码参见图 1a,图 1b.吊杆上端与上弦节点相连如图 2 所示,下端与加载垫块相连.在加载垫块上加入砝码来实现逐级加载.每级荷载为一块砝码的重量 19.6 N.该加载装置能够实现不同竖向荷载工况以及在破坏过程中质量跟动的要求,模拟实际破坏过程中主要质量不缺失的情况.

2.2 初始破坏引入装置

本试验关键技术之一是如何实现结构的初始局部破坏.把初始局部破坏位置选为端部第一开间的斜腹杆,见图 1.根据文献[6],该处破坏可能引发桁梁连续破坏,也可能在一定条件下发生后续破坏的中止,这样的初始破坏位置对试验研究具有典型性.因此需设计一装置满足斜腹杆在没破坏前能够正常传力,且不影响结构的力学性能,而在破坏时,该装置能够实现该斜腹杆的“消失”.因此,设计了一初始破坏引入装置,由钢夹和两段带楔形钢头的初始破坏杆件(铝管)组成,见图 5.钢夹闭合,夹住楔形钢头

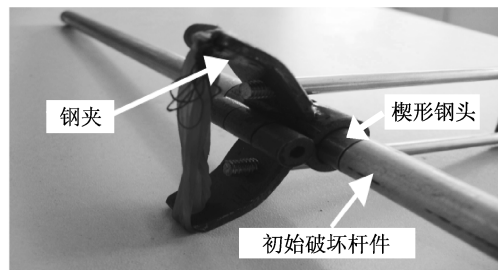


图5 初始破坏引入装置

Fig.5 Initial failure apparatus

将杆件段连接为一个整体,正常传力.钢夹打开,楔形钢头相互滑开,两段杆件分离,斜腹杆完全退出工作.其设计的基本原理就是通过钢夹的轴力与两段初始破坏杆件的受力形成一平衡力系,当钢夹打开,平衡力系破坏,两段楔形的钢头无法保持平衡,发生滑动,进而构件失效.

3 结构模型刚度的测定

结构模型的整体刚度是衡量结构模型本身以及后续动力试验与试验结果分析所必需的重要力学参量.因此进行了以下的试验及分析测定结构模型的刚度.

首先做了铝管的材料拉伸试验.拉力-轴向拉伸变形关系见图 6 的曲线 1.然后进行加载试验对桁梁 B 所有加载垫块逐级加载,桁梁 A,C 仅有加载垫块,利用百分表测量平面桁梁 B 观测点的位移,见图 1.得到荷载与观测点位移试验曲线 1,见图 7.

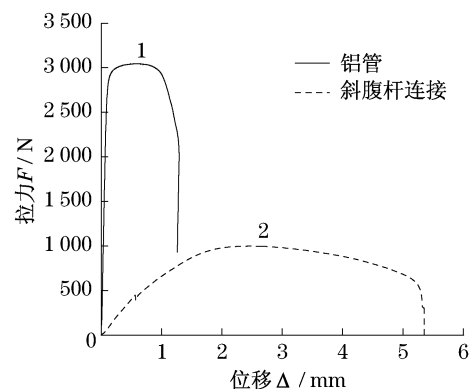


图6 拉伸试验力-位移曲线

Fig.6 Force-displacement curve in tensile test

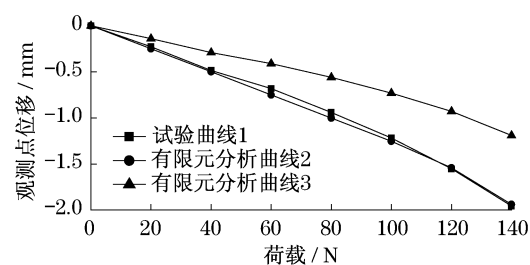


图7 逐级加载-观测点位移曲线

Fig.7 Displacement curve of observation point under load increment

对静力加载试验结果使用有限元软件 ABAQUS 进行建模校核分析.具体几何尺寸及约束与试验模型见图 1.根据图 6 铝管拉伸试验曲线 1,采用 0.2%

残余应变准则得到铝管的本构关系,屈服应变 $\epsilon_y = 1\ 800\ \mu\epsilon$. 实际节点重量及荷载大小转化为集中质量,铝管质量密度 $\rho = 2\ 700\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$,采用空间梁单元 B31,每个节间划分为 10 个单元. 有限元分析得到荷载-观测点位移曲线 2,如图 7 所示,与试验曲线 1 相差较大. 这主要是因为斜腹杆与上、下弦节点之间的钢销连接造成铝管局部受力和集中变形对模型的整体刚度影响不可忽略,因此将斜腹杆与上、下弦节点的钢销连接作为整体(简称斜腹杆连接 T)的拉伸试验来反映连接的影响. 拉力-轴向拉伸变形关系见图 6 的曲线 2.

对有限元模型进行修正. 如图 8 所示,假定斜腹杆连接 T 分为两部分:斜腹杆与节点的连接部分 A;斜腹杆的铝管部分 B. 在斜腹杆连接拉伸试验中, $\Delta_T = \Delta_A + \Delta_B$. 其中, $\Delta_T, \Delta_A, \Delta_B$ 分别为 T, A, B 的位移, Δ_T 和 Δ_B 分别由图 6 曲线 2 和曲线 1 导出. 这样得到 A 部分的力-位移关系曲线. 修正后的有限元模型分析得到的荷载-观测点位移曲线 3 与试验曲线 1 吻合较好,见图 7,因此可认为修正后的有限元模型能较好地模拟结构模型的整体刚度.

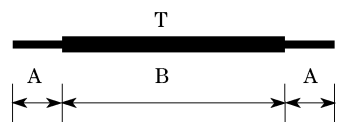


图 8 斜腹杆连接有限元示意图

Fig.8 FE sketch of connection of diagonal web members

4 动力过程测量技术

动力过程的应变和位移是测试的两个最主要的目标.

采用上海东昊测试技术有限公司的动态信号测试分析系统 DH5922 采集动态应变,16 通道最高采样频率能达到 50 kHz,分析频率能达到 19.53 kHz. 经数值分析及后续试验验证本结构的主频小于 20 Hz,满足测试要求. 采用普通应变片,可靠度已由文献[3]验证可行. 应变量程为 $-9\ 708.8 \sim 9\ 708.8\ \mu\epsilon$. 应变片布置测点见图 1,均贴在上弦杆的上表面.

在结构试验中,位移是测试的一个重要方面. 相比应变值,位移能反映结构的整体特性. 常用的位移传感器如机械式百分表、电子百分表、滑阻式传感器等,仅适用于单调静力加载和拟静力加载的试验,不能测量动力过程的位移. 也有采用测试仪器进行硬

件积分获取位移的方法,但因容易损坏电子设备不适合在结构破坏位置使用. 针对桁梁结构体系试验模型的特点开发了动位移测量程序——数字图像识别程序^[9]. 首先,在结构试验过程中使用摄像机连续拍摄结构位移,并使用适当软件将其捕捉为各时刻的图像;然后采用 Matlab 软件编制程序,分析拍摄所得图像中观测点标记在整个图像中的位置变化以获得观测点位移. 本文所选择的位移观测点均布置在平面桁梁结构 B,如图 1 所示.

5 连续性倒塌的试验

5.1 试验过程及其现象

首先在桁梁结构 A, B, C 先挂满吊杆与加载垫块,以使斜腹杆钢销连接处缝隙被压紧;然后在桁梁结构 B 的所有加载垫块上逐级施加砝码,桁梁 A, C 不另外施加荷载,以便考察在中间桁梁 B 破坏时结构的空支持效应. 加到第 7 块砝码后,结构没有发生破坏. 此时触发设置在桁梁 B 左侧第 2 根斜腹杆上的初始破坏装置(图 1a),实现初始破坏杆件的失效. 其后结构发生了短时间的振动,整体变形增大,破坏模式为桁梁结构上弦杆 2、3 平面外失稳,破坏状态见图 9.

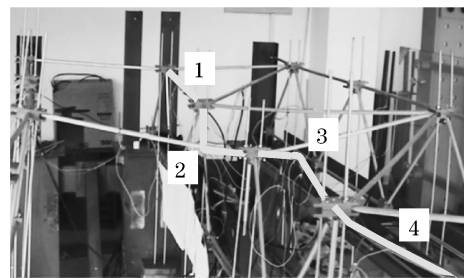


图 9 破坏现象

Fig.9 Failure phenomena

5.2 试验数据分析

从图 10 分析可知,在 160.66 s 时刻起,各应变测点都发生显著变化,由此判断此刻发生了初始局部破坏. 在 160.76 s 时刻,测点 2 的应变大于 ϵ_y ,然后极短时间内,超过了应变量程 ($-9\ 708.8\ \mu\epsilon$),说明测点 2 处经历了压缩大应变,能够反映出试验现象(图 9): 杆件 2 的平面外失稳及大致方向. 在 160.80 s 时刻,测点 3 的应变也大于 ϵ_y ,后续的应变值大约在 $2\ 500\ \mu\epsilon$ 左右,说明测点 3 处经历了较大的拉应变,也能反映出杆件 3 的平面外失稳及大致方向,但其失稳后变形程度要小于杆件 2. 测点 1 和

测点4的应变始终小于 ϵ_y ,结合试验现象,说明杆件1和杆件4没有发生明显的破坏.由此可知破坏模式:上弦杆2先平面外失稳,上弦杆3后平面外失稳,两者失稳的大致方向是相反的.从初始局部破坏到整个结构发生破坏,整个过程大约耗时0.14 s.

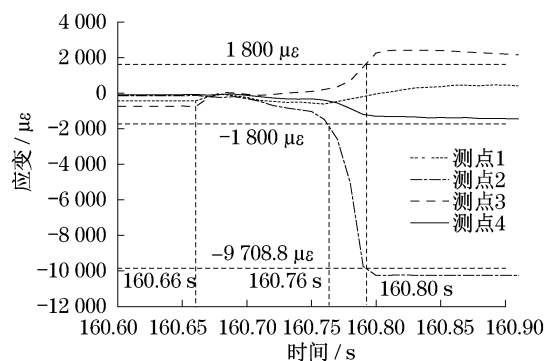


图10 连续性倒塌试验过程的动态应变图

Fig.10 Strain history curve in the progressive collapse experiment

初始局部破坏时位移随时间变化曲线见图11,整个过程分为两个时间段:160.66~160.82 s期间,观测点位移迅速下降.160.82 s之后观测点位移趋于平稳值,其内力重分布时间大约为0.16 s,与上述应变数据所得到的破坏的持续时间0.14 s基本一致,变化趋势反映了结构整体破坏过程.

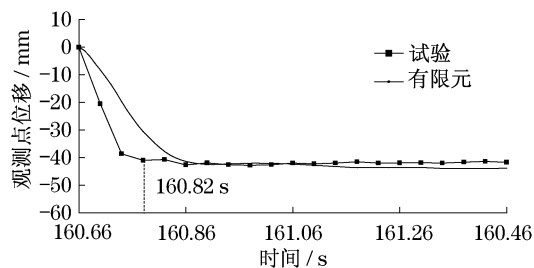


图11 观测点位移-时间曲线

Fig.11 Displacement history curve of observation point

5.3 简化模型分析

由于平面桁梁结构B承载着主要的竖向荷载,构件的受力及竖向变形远远大于桁梁结构A,C.为了定性阐明试验破坏现象,将桁梁结构B单独分离,并简化为一平面的简支梁,支座可简化为一水平和竖向刚性杆,荷载由集中力转化为均布力,如图12所示.初始局部破坏会造成该局部位置产生剪切变形以及刚度变小,使挠度D1大于没有发生局部破坏时该位置处的理想变形,增大了跨中的弯矩和变形

见图12,此时在桁梁结构体系中表现为上弦杆2,3所受的轴向压力大于平面外的失稳临界力,发生了平面外失稳.简化模型定性分析了结构的破坏模式与试验现象是一致的.但在初始局部破坏后结构内力重分布过程中,杆件之间的作用是不断地相互影响,包括随时间变化的惯性力、阻尼力及恢复力,即非常复杂的动力非线性过程,这种简化模型很难定量分析.本文尝试着运用有限元数值分析方法进行定量分析.

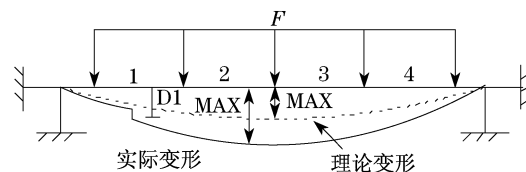


图12 简化分析模型示意图

Fig.12 Sketch of simplified analysis modeling

5.4 数值模型分析

初始局部破坏后的内力重分布过程的实质是一个高度非线性动力过程,可归结为动力方程^[10] $[M]\{\ddot{u}(t)\} + [C]\{\dot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = \{F(t)\}$ 的初值问题,数值求解宜采用显式直接积分法,基本思想是利用某一时刻的前一或多个时刻的反应量的线性组合来外推直接计算这一时刻的反应量.求解方程可表达为: $[M]\{\ddot{u}(t)\} = \{\hat{f}(t)\}$,其中 $[M]$ 为集中质量的对角矩阵,求逆简单,不会产生奇异.消除了隐式直接积分法中需刚度求逆可能产生病态矩阵的困难.

有限元软件ABAQUS分析过程如下:首先,在ABAQUS/STANDARD模块中荷载施加到没有杆件破坏的结构体系中,获得相应的力学响应(包括节点的位移以及应力);然后计算结果除去初始破坏杆件外的其余杆件的力学响应作为初始状态导入到ABAQUS/EXPLICIT模块中,进行显式直接积分计算.

ABAQUS以瑞利阻尼的形式来确定阻尼,包括两个参数:质量比例阻尼系数 α 和刚度比例阻尼系数 β .这里 β 会显著地增加计算时间,因此忽略 β 的作用.对 α 进行试算后的观测点位移变化趋势及平稳值与试验相近,但其下降段的斜率即下降速率有一定的差距,如图11所示,这种差距可能来自试验模型和理论算法两方面原因需进一步分析研究.

数值分析结果可以进一步揭示本文中的低冗余

度桁梁模型结构在初始局部破坏后并没有发生整体性倒塌的主要原因:作用在结构上的外荷载相对较小,使得构件承载力的富余水平相对较高;初始破坏位置处的上弦节点荷载主要通过上弦水平支撑传递给两个边榀桁梁,使得该位置处的下弦杆主要承受轴向拉力而非节间的弯矩作用,显然由于两个边榀桁梁分担了中间榀桁梁产生的过多荷载,使得内力分布趋向均匀化,即空间效应。

6 结论与展望

通过对空间桁梁模型的试验研究,建立了一套实验室试验系统,得到以下的结论和建议:

(1) 设计了易拆装的空间桁梁结构模型,研制了连续性倒塌试验人为控制的初始破坏装置。

(2) 利用动态应变数据采集系统以及数字图像处理技术获取了初始破坏引发的动力过程中应变和位移。从其数据分析得到结构破坏过程中的持续时间,各测点的应变时程曲线,观测点的位移时程曲线,揭示了破坏过程及破坏机制。

(3) 试验结果表明构件承载力富余程度的高低及空间效应是结构抗倒塌重要的冗余度。

(4) 数值分析可以很好地模拟结构模型的整体刚度。对连续性倒塌过程的模拟进行了有意义的尝试,还需要在试验模型和理论算法进一步研究。

(5) 初始局部破坏的位置及数量具有随机性,试验不可能完全实现,只有结合数值分析,获取敏感构件和关键构件^[6],再进行相应的试验验证,是解决该问题的主要手段,也是今后进行连续性倒塌试验研究的主要方法。

参考文献:

- [1] Astaneh-Asl A, Jones B, Zhao Y K, et al. Progressive collapse resistance of steel building floors[R]. Berkeley: University of California, 2001.
- [2] 易伟建,何庆锋,肖岩. 钢筋混凝土框架结构抗倒塌性能的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2007, 28(5): 104.
- YI Weijian, HE Qingfeng, XIAO Yan. Collapse performance of RC frames structure[J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(5): 104.
- [3] 陈以一, 卞若宁. 钢框架节点局部断裂冲击作用实验研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2007, 35(3): 299.
- CHEN Yiyi, BIAN Ruoning. Experiments on the impact effect of partial fracture at steel frame connections[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2007, 35(3): 299.
- [4] 李旺海, 郭可, 魏剑伟, 等. 撞击荷载作用下单层球面网壳动力响应模型实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(1): 39.
- LI Wanghai, GUO Ke, WEI Jianwei, et al. The dynamic response of a single-layer reticulated shell to drop hammer impact[J]. Explosion and Shock Waves, 2006, 26(1): 39.
- [5] 陈磊磊, 钱振东, 韩晓林. 梁在动荷载作用下若干参数的测试技术研究[J]. 振动与冲击, 2007, 26(8): 150.
- CHEN Leilei, QIAN Zhendong, HAN Xiaolin. Study on several beam parameters measurement under dynamic load[J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(8): 150.
- [6] 江晓峰. 大跨桁梁结构体系的连续性倒塌机理与抗倒塌设计研究[D]. 上海: 同济大学, 2008.
- JIANG Xiaofeng. Study on mechanism analysis and resistant design of progressive collapse for truss/beam-type structural systems in large-span[D]. Shanghai: Tongji University, 2008.
- [7] 日本钢结构协会, 美国高层建筑和城市住宅理事会. 高冗余度钢结构倒塌控制设计指南[M]. 陈以一, 赵宪忠译. 上海: 同济大学出版社, 2007.
- Japanese Society of Steel Construction (JSSC), Council on Tall Buildings and Urban Habitat (CTBUH). Guidelines for collapse control design—construction of steel buildings with high redundancy[M]. Translated by CHEN Yiyi, ZHAO Xianzhong. Shanghai: Tongji University Press, 2007.
- [8] 江晓峰, 陈以一. 建筑结构连续性倒塌及其控制设计的研究现状[J]. 土木工程学报, 2008, 41(6): 1.
- JIANG Xiaofeng, CHEN Yiyi. A review on the progressive collapse and control design of building structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(6): 1.
- [9] 李玲. 反映构件失效效应的结构模型试验(动位移测量程序开发)[D]. 上海: 同济大学, 2008.
- LI Ling. Structural model tests reflecting effects of members failure-model design and development of measuring program for dynamic displacement[D]. Shanghai: Tongji University, 2008.
- [10] 克拉夫 R, 彭津 J. 结构动力学[M]. 第2版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- Clough R, Penzien J. Dynamics of structure [M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2006.