

甘肃省体育馆钢桁架防连续倒塌分析与机理研究

芮佳^{1,2}, 张举涛²

(1 兰州理工大学土木工程学院, 兰州 730050; 2 甘肃省建筑设计研究院, 兰州 730030)

[摘要] 以甘肃省体育馆钢桁架为研究对象, 根据事件控制、概念设计和直接设计法对由平面桁架构成的主桁架体系及悬挂结构体系进行防连续倒塌方法探讨。结合设计依据对荷载组合、失效准则进行了讨论。根据完整结构与剩余结构应变能不同的思想, 提出了基于位移向量改进的构件重要性分析方法。并对主桁架系统及悬挂结构的重要构件、几何位置分布、整体结构中空间作用的分布情况进行了分析。按构件重要性评定方法所得结果与工程经验及数值分析结果一致, 能定量地判定整体结构中的关键构件, 为拆除杆件法提供了必要的判定依据, 便于工程实践。采用 ABAQUS 数值分析平台进行了结构连续性倒塌动力响应分析, 并对内力重分布机制进行了研究, 结果表明结构具有较强的抗连续倒塌能力。

[关键词] 甘肃省体育馆; 构件重要性系数; 抗连续倒塌; 钢桁架; 悬挑桁架; 数值模拟
中图分类号: TU393.3 文献标识码: A 文章编号: 1002-848X(2018)11-0057-07

Anti-progressive collapse analysis and mechanism study on steel truss of Gansu Province Gymnasium

Rui Jia^{1,2}, Zhang Jutao²

(1 College of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;
2 Gansu Provincial Architectural Design & Research Institute, Lanzhou 730030, China)

Abstract: Taking the steel trusses of Gansu Province Gymnasium as the research object, the method of preventing progressive collapse of the main truss system and suspension structure system composed of plane truss was discussed based on event control, conceptual design and direct design methods. Based on the design basis, the load combination and failure criteria were discussed. Based on the idea that the strain energy of the complete structure is different from the strain energy of the residual structure, an improved component importance analysis method based on improved displacement vector was proposed. The main components, the distribution of geometrical positions, and the distribution of spatial effects in the overall structure of the main truss system and the suspension structure were analyzed. The result of evaluation method of component importance was consistent with the result of engineering experience and numerical analysis results. It could quantitatively determine the key components in the overall structure, and provide the necessary basis for determining the rod-dismantling method, which was convenient for engineering practice. The ABAQUS numerical analysis platform was used to analyze the dynamic response of structural progressive collapse, and the internal force redistribution mechanism was studied. The results show that the structure has strong resistance to progressive collapse.

Keywords: Gansu Province Gymnasium; component importance coefficient; anti-progressive collapse; steel truss; cantilever truss; numerical simulation

1 工程概况

甘肃省体育馆为甘肃省奥体中心的主要建筑之一, 建设场地位于兰州新区甘肃省奥体中心规划用地东北角。总建筑面积 5.18 万 m²。根据建筑功能要求, 体育馆钢桁架包括主桁架系统、悬挂结构(悬挑桁架)系统两部分, 见图 1。

体育馆内场上空屋盖平面尺寸为 109.2m × 79.8m。屋盖选用单向平面桁架结构, 主桁架沿横

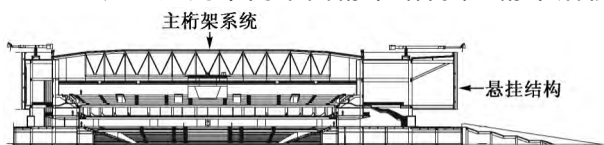


图 1 体育馆剖面图

向布置, 下弦节点通过弹性球形铰支座支承在体育看台外围的 SRC 框架柱上。在 1/3 跨度处设两道纵向稳定桁架, 并沿横向桁架支座边缘设置两道封边桁架。由于悬挂荷载较大, 主桁架的上下弦和斜腹杆均采用箱形截面。在上弦每个节间布置刚接次梁, 上弦平面内沿周圈设交叉支撑形成上弦平面稳定系统。主桁架结构平面布置见图 2。

13.500m 标高的休息厅悬挑约 15.0m, 采用悬挂结构体系。休息厅楼盖采用主次钢梁结构, 沿 15m 跨度方向均为次梁, 在悬挑端与吊柱相连的为

作者简介: 芮佳, 博士研究生, 高级工程师, Email: richard800910@163.com。

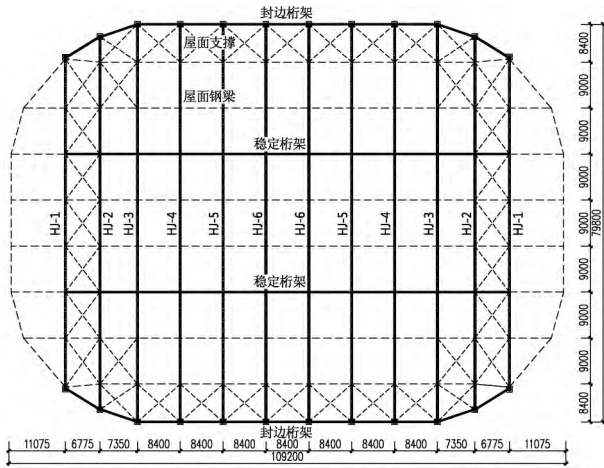


图2 主桁架结构平面布置图

封边钢梁。其楼面荷载通过次梁传递至封边钢梁，再通过吊柱将封边钢梁吊挂于悬挑桁架。屋面悬挑桁架由上弦杆及斜腹杆组成，悬挑桁架平面外设连系梁、交叉支撑形成上弦平面稳定系统。这样既满足了建筑大空间的使用功能，又可充分展示其建筑造型(图3)。钢桁架主要截面尺寸见表1。

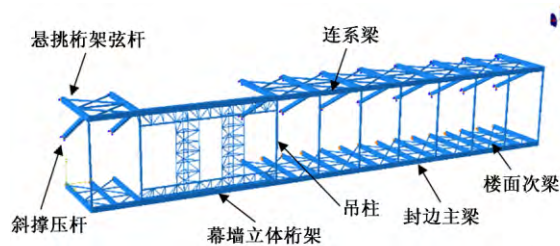


图3 悬挂楼盖结构布置图

主桁架主要截面 表1

主桁架主要截面		截面
主桁架系统	主桁架弦杆	□600×400×16×20~□600×400×30×30
	稳定桁架弦杆	□600×300×20×16
	封边桁架弦杆	□600×300×20×16
	主桁架腹杆	□200×400×8×14~□300×400×30×30
	稳定桁架腹杆	□200×300×8×10
	封边桁架腹杆	□200×300×8×10
悬挂楼盖系统	上弦杆	□1000×600×40×40
	吊柱	□300×300×14×14
	屋面支撑	351×8
	斜腹杆	□700×600×50×50
	封边钢梁	□1000×400×20×24
	连系梁	□1000×400×20×24

2 防连续倒塌设计方法

防连续倒塌设计主要分为三个层次：一是事件控制法；二是间接设计法，即概念设计；三是直接设计法，包括构件拆除法（替代路径法）及关键构件法。现有国内外结构抗连续倒塌设计规范并没有对上述所有设计方法都做出详细的规定，而是各有侧重。构件拆除法主要参照美国国防部（DoD）的 UFC

4-023-03 标准^[1]和总务管理局（GSA）的 GSA 2005 标准^[2]。关键构件法参照英国规范^[3]及欧洲规范^[4]中相应标准。荷载组合参照美国土木工程学会 ASCE 7 标准^[5]，意外荷载来源分析参考文献^[6]中英国结构工程师学会（IStructE）发布的结构抗连续性倒塌的风险评估指南提供的参考和建议。

2.1 失效准则

2.1.1 构件的失效准则

本工程受拉、受弯按照变形准则进行构件失效判定。截面受剪以强度准则进行构件失效判定。根据结构重要性及 GSA 2005 标准^[2]的规定，选取中、高防护级别的构件限值：对受拉构件延性系数 μ 达到 10 时、受压构件延性系数 μ 达到 2 时、受弯构件截面塑性铰转角达到 6° 时、截面剪力达到抗剪极限承载力时判定为构件失效。

2.1.2 结构的整体失效准则

桁架结构其倒塌限制在与失效的构件直接相连的平面结构相邻榫间距内时认为没有发生连续倒塌，此时应考虑荷载向相邻跨的卸载。整体结构的倒塌标准为结构直接失效或产生不可接受的大变形^[7]。对于不可接受的大变形各规范均未明确限值，本工程参考结构弹塑性位移角限值并考虑结构的重要性，确定变形限值为挠度达到 $1/100$ 。对于悬挂结构倒塌标准为倒塌面积达到楼面面积的 15% 或 100m^2 。

2.2 防连续倒塌事件控制分析

甘肃省体育馆在设计时已采用性能等级较高的消防性能化设计，在偶然事件分析时不再考虑火灾及火灾蔓延事件的影响。根据 SRC 框架柱所处位置，不考虑车辆撞击事件，可能遭受的偶然事件为炸弹袭击、人为失误。节点采用性能较高的抗震设计，对正常使用时的荷载工况具有足够的超强能力，采用关键构件法进行复核算。

2.3 防连续倒塌概念设计

2.3.1 主桁架系统

如一榀桁架失效后其坍塌范围是两端支承柱的柱距所围部分（约为 1340m^2 ），坍塌影响较大。必须选取备用路径进行内力重分布。首先利用在 $1/3$ 跨度处设两道纵向稳定桁架，当中间榀桁架失效时可通过稳定桁架向两侧卸载，当边榀桁架失效时稳定桁架虽表现为悬挑特性，仍可以承受相邻榀桁架卸载。利用上弦每个节间布置的刚接次梁，辅助稳定桁架进行内力重分布。当桁架支座失效时，利用封边桁架进行内力重分布。

2.3.2 悬挂结构系统

根据悬挑吊挂结构传力途径为单线程传力，

对直接传力途径中任何一个环节失效都能导致传力途径中断,其中吊柱的失效为传力途径中最重要的一环,其次为悬挑桁架的失效。利用悬挑桁架端部平面外设置的连系梁,当悬挑桁架失效时连系梁可对吊柱进行拉结,向相邻两侧或一侧桁架卸载。吊柱为该传力体系最重要的环节,当吊柱失效后传力途径即可中断,如采用关键构件法进行加强则过于不经济,并且不一定能达到预期的目标。必须寻找新的传力途径,进行防连续倒塌设计。最终本工程在吊柱内设置 80mm 高矾索作为吊柱传力途径的替代。由于高矾索为柔性构件,同时又在吊柱的内部,可有效避免意外事件对其产生的破坏。同时高矾索有预先张力,对完成结构有一定的竖向刚度,可有效缓解连续倒塌中的动力效应。

2.4 构件拆除分析

荷载组合主要根据 ASCE 7 标准^[5]取值,考虑偶然事件一般发生在人员密集的重要活动中,故对人员可能密集的活动场所的活荷载不进行折减,荷载组合为 $1.2D + 1.0L + 0.5LR + 0.2W$,其中 D 为恒荷载、 L 为活荷载、 LR 为屋面活荷载、 W 为风荷载,当活荷载不是由于人员密集造成的,其组合系数折减为 0.5。

2.4.1 基于位移向量改进的构件重要性分析方法

采用拆除构件法时,对于非框架结构体系,国内外规范均未明确构件的重要性评价指标,对于被拆除构件的选择主要依靠设计者的经验判断。目前根据现有国内外的相关研究成果,对构件重要性评价已有基于刚度、能量和强度的评定方法^[8]。但很多方法由于计算复杂或计算量大等原因在实际工程应用中很难实现。

本文根据文献[7-9]中提出的基于能量流的构件重要性评定方法作为基础,在确定荷载作用下,通过比较拆除构件前后对结构应变能的影响来确定该构件的重要性。提出基于位移向量改进的构件重要性分析方法及构件重要性系数计算公式。

杆件的广义应变能 Γ 公式如下:

$$\Gamma = \iiint_V \kappa dV \tag{1}$$

$$\kappa = \sigma_{ij} \epsilon_{ij} / 2 \tag{2}$$

$$\sigma_{ij} = \epsilon_{ij} C_{ij} \tag{3}$$

式中: κ 为应变能密度; C_{ij} 为弹性模量矩阵分量; σ_{ij} 为单元应力; ϵ_{ij} 为单元应变。

将式(3)带入式(1),总应变能 Γ 公式可改写为式(4),并对总应变能求微分得到式(5)。

$$\Gamma = \frac{1}{2} \iiint_V \epsilon_{ij}^2 C_{ij} dV \tag{4}$$

$$d\Gamma = C_{ij} \int \epsilon_{ij} d\epsilon \iiint_V dV \tag{5}$$

对于杆系钢结构体系,在整个连续倒塌过程中,金属材料弹塑性基本假定为不可压缩性,可以不考虑杆件的体积变化。利用有限元法对整个结构进行单元划分后,总应变能公式又可改写为式(6)。

$$\Gamma = \sum_1^n C_{ij} \int \epsilon_{ij} d\epsilon \tag{6}$$

将式(6)与胡克定律比较可知,荷载作用下完整结构的广义位移向量用 D_ω 表示, $D_\omega = \sum \epsilon_{ij}$ 。结构的广义刚度用 K_ω 表示, $K_\omega = \sum C_{ij}$ 。定义结构上荷载分布为广义力 F_ω , $F_\omega = D_\omega \cdot K_\omega$ 。将式(6)积分后总应变能可以改写为式(7)。

$$\Gamma = D_\omega^2 K_\omega / 2 \tag{7}$$

基于位移向量改进的构件重要性分析方法,以拆除构件后剩余结构与完好结构的应变能差与完好结构的应变能比值,作为构件重要性的评定指标 (Δ)。应变能差值越大,说明被拆除构件的重要性越大。计算方法如式(8)所示:

$$\Delta = (\Gamma' - \Gamma) / \Gamma' = 1 - \Gamma / \Gamma' \tag{8}$$

Γ 为完整结构的应变能, Γ' 为拆除构件后剩余结构的应变能。将式(7)代入式(8)可得构件重要性评定指标的计算式(9)。

$$\Delta = 1 - \frac{\frac{1}{2} D_\omega^2 K_\omega}{\frac{1}{2} D_\omega'^2 K_\omega'} = 1 - \frac{\frac{1}{2} D_\omega^2 \frac{F_\omega}{D_\omega}}{\frac{1}{2} D_\omega'^2 \frac{F_\omega'}{D_\omega'}} = 1 - \frac{D_\omega}{D_\omega'} \tag{9}$$

式中: D_ω' 为拆除构件后剩余结构在荷载分布下的广义位移向量。

对于整体结构系统,当结构上的荷载分布向量确定时,结构的广义位移向量也是确定的。广义位移向量既与结构的刚度矩阵有关,又与结构的荷载分布向量有关,是反映整体结构抵抗给定荷载作用下变形能力的一个整体物理量。

根据概念可以判定 $D_\omega' \geq D_\omega$,因此构件重要性评定指标 Δ 为 [0, 1] 的一个常数指标。当 $\Delta = 0$ 时,表示拆除此构件后对结构的变形没有影响,或理解为对结构的刚度没有影响,不参与整体结构的传力(即为“零杆”);当 $\Delta = 1$ 时,表示此构件为单线程传力途径上的一部分,当此构件失效后结构将丧失整体传力途径,无法抵抗给定荷载。

2.4.2 主桁架构件重要性分析

根据式(9)计算主桁架结构杆件及支座重要性系数。中间榀桁架选取荷载较大的HJ-6作为主要分析目标,边榀桁架选择HJ-1作为分析目标。主要杆件编号见图4,杆件重要性系数见表2。根据受力特性不同,选择重要性系数相对较大的代表性杆件进行剩余结构的动力响应分析。

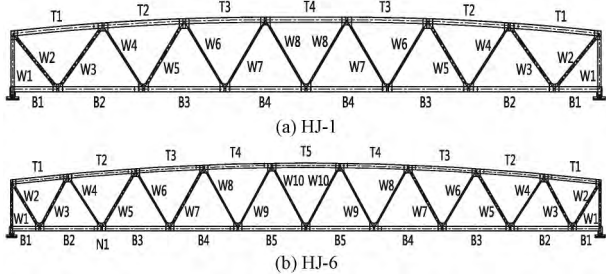


图4 主桁架构件编号

主桁架系统部分杆件重要性系数 表2

杆件编号		T1	T2	T3	T4	B1	B2	B3	
HJ-1	重要性系数	0.005	0.024	0.036	0.040	0.001	0.122	0.142	
	杆件编号		B4	W1	W2	W3	W4	W5	W6
	重要性系数	0.190	0.051	0.079	0.097	0.066	0.029	0.004	
HJ-6	杆件编号		W7	W8	支座				
	重要性系数	0.002	0.001	0.071					
	杆件编号		T1	T2	T3	T4	T5	B1	B2
HJ-6	重要性系数	0.010	0.077	0.112	0.144	0.170	0.001	0.103	
	杆件编号		B3	B4	B5	W1	W2	W3	W4
	重要性系数	0.138	0.158	0.184	0.017	0.063	0.087	0.076	
杆件编号		W5	W6	W7	W8	W9	W10	支座	
重要性系数	0.060	0.037	0.019	0.005	0.001	0.001	0.025		

注:表中加粗字体代表同类杆件中重要性系数最大的杆件,表3同。

由表2可知,主桁架上、下弦杆的重要性变化趋势为支座向跨中逐渐增加,基本与桁架内力变化趋势一致。腹杆的重要性变化趋势为支座向跨中逐渐减小,压杆重要性大于拉杆。

2.4.3 悬挂结构构件重要性分析

悬挂结构构件编号见图5,杆件重要性系数见表3。根据重要性系数表明吊柱为传力途径中最重

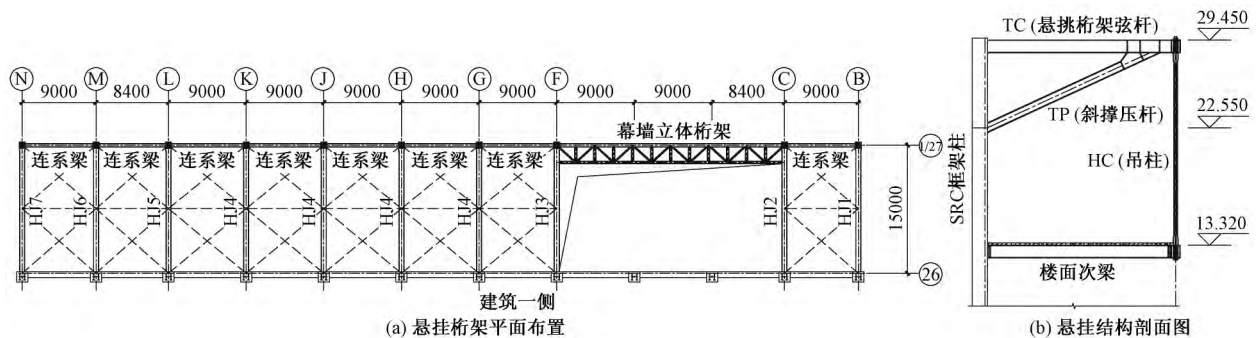


图5 悬挂结构构件编号

悬挂结构杆件重要性系数 表3

所在桁架	HJ-1	HJ-2	HJ-3	HJ-4	HJ-5	HJ-6	HJ-7	
悬挑桁架弦杆 TC	重要性系数	0.161	0.278	0.234	0.107	0.107	0.108	0.156
斜撑	所在桁架	HJ-1	HJ-2	HJ-3	HJ-4	HJ-5	HJ-6	HJ-7
压杆 TP	重要性系数	0.418	0.576	0.481	0.258	0.263	0.279	0.420
吊柱	所在桁架	HJ-1	HJ-2	HJ-3	HJ-4	HJ-5	HJ-6	HJ-7
HC	重要性系数	0.615	0.465	0.259	0.230	0.185	0.239	0.393

要的杆件。

3 有限元计算及结果分析

3.1 有限元模型

结构的连续性倒塌过程涉及到构件的大位移、大转动、断裂失效和非连续变形以及结构的机构运动和不稳定性等诸多问题。采用有限元的精细化建模可以获得较为精确的结果。Luccioni, Ambrosini 和 Danesi^[10]通过精细有限元法研究了一栋混凝土结构的连续倒塌,分析中考虑了爆炸冲击波的传播、结构碎片的形成和接触。但是相应的建模和计算工作量大幅上升,因此精细化建模分析主要适用于构件或局部子结构的分析。有限元法是常用的数值模拟方法,但都不是很成熟,难以全面高效地反映结构的实际倒塌过程。目前常用的有限元连续倒塌数值模拟方法主要分为:弹性静力方法、非线性静力方法、弹性动力方法、非线性动力方法四大类。根据不同的分析方法对应的荷载取值及组合,倒塌破坏的评定标准也不同。相比之下动力弹塑性方法因能较真实地模拟结构连续倒塌过程中的动力效应、机构运动等复杂的力学过程,计算精度相比其他三种方法要高。

本工程采用非线性动力分析方法,选用有限元分析软件 ABAQUS 模拟结构连续性倒塌过程^[11]。桁架杆件、梁、吊柱采用 B32 单元(三节点二次空间梁单元)模拟(模型假定所有梁单元间的连接均能传递弯矩)。屋面支撑、吊索(高钎索)采用 T3D2 单元(两节点线性三维桁架单元)模拟。主桁架弹性球形铰支座采用 SPRING 单元(接地弹簧单元)模拟。

钢材本构采用双折线随动强化模型,极限强度为屈服强度的 1.35 倍(Q345),极限拉应变为 0.02。由于偶然事件的不确定性,本文分析中不考虑材料应变率。为了充分考察结构的抗连续倒塌能力,檩条、楼面板、屋面材料等都以荷载考虑。根据屋(楼)面构件的排布方式及吊挂荷载,为了提高计算效率,以线荷载及节点荷载施加。

加载方式为首先采用完整模型进行静力加载(STEP-1),得到结构的初始刚度。采用生死单元令指定杆件失效(STEP-2),即对拆除杆件后的剩余结构在初始荷载作用下进行非线性动力时程分析直至结构失效或达到一个稳定状态,模拟结构产生瞬时的动力效应及连续倒塌过程。

3.2 杆件失效的结构动力响应分析

3.2.1 主桁架杆件失效的结构动力响应分析

(1) 弦杆初始失效。首先分别选取重要性系数较大的 HJ-6 的上弦杆 T5 及下弦杆 B5。当弦杆 T5 失效后,剩余结构的最大变形值为 227mm,超过结构正常使用状态的变形限值 196mm,结构正常使用功能受到影响,如图 6 所示。被拆除杆件周围结构未出现塑性铰,各杆件截面未达到抗剪极限承载力。当杆件 B5 失效后,剩余结构的最大变形值为 276mm,超过结构正常使用状态的变形限值,如图 7 所示。剩余整体结构最大变形值小于 1/100 的竖向变形限值,整体结构未发生整体倒塌。

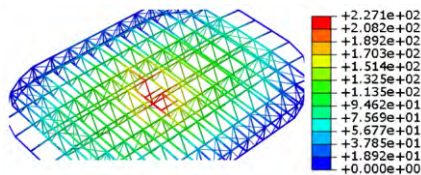


图 6 上弦杆 T5 失效后剩余结构变形/mm

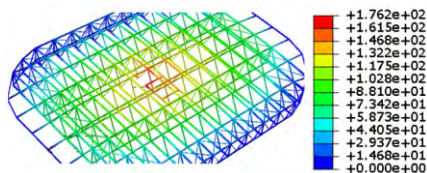


图 7 下弦杆 B5 失效后剩余结构变形/mm

被拆除杆件周围结构未出现塑性铰,对应下弦杆件 B1 轴力增加明显,见图 8,达到初始轴力的 1.4 倍。主桁架跨中内力最大处弦杆失效后,主桁架原有弯矩传递能力被破坏,由于稳定桁架及屋面刚接钢梁的作用,初始破坏桁架迅速卸载,相邻跨桁架内力明显增加。稳定桁架阻断了连续倒塌的途径,跨中弦杆初始失效时,对应破坏桁架在稳定桁架与支座间范围内杆件变形与相邻榫桁架相当。HJ-6 上弦杆

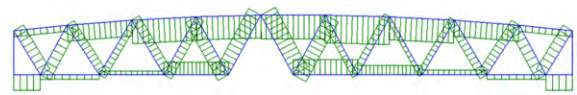


图 8 下弦杆 B5 初始失效后的轴力分布示意图

T5 及下弦杆 B5 失效后结构不会发生连续倒塌。

选取 HJ-6 左端上弦杆 T1 初始失效,主桁架原有的弯矩传递途径被破坏,下弦杆第一跨节点处产生较大的弯矩致使截面内力突然增加。同时通过稳定桁架向两侧桁架卸载,内力重分布后达到稳定平衡。由于初始失效杆件在初始荷载下内力较小,其内力重分布对总体结构影响较小,未出现连续性倒塌。

选取主桁架左端下弦杆 B1 初始失效,杆件初始失效后,由于封边桁架的作用,桁架很快由原有下弦支承变为上弦支承桁架,封边竖杆内力增加明显。

(2) 腹杆初始失效。选取 HJ-6 中重要性系数较大的腹杆 W3。当腹杆 W3 失效后,主桁架左端抗剪能力被严重削弱,上、下弦杆将以弯曲变形的形式继续承载,并通过稳定桁架向两侧卸载。而边跨竖腹杆的顶部、底部也将产生较大的平面内弯矩。如图 9(a) 所示,桁架竖向挠度明显增加,剩余结构的最大变形值为 149mm,未超过结构正常使用状态的变形限值。结构未出现塑性铰,不会发生连续倒塌。

(3) 桁架支座初始失效。根据重要性系数选取 HJ-1 的一侧支座作为失效部件。当 HJ-1 的支座失效后,封边桁架立即成为 HJ-1 支座的备用传力路径,进行内力重分布。剩余结构的最大变形值为 134mm,如图 9(b) 所示,这与正常使用状态下的变形值相当。结构未出现塑性铰,不会发生连续倒塌。

3.2.2 悬挂结构杆件失效的结构动力响应分析

(1) 吊柱初始失效。选择悬挑桁架中重要性系数较大的桁架 HJ-1 的吊柱 HC。吊柱失效后,首先楼面封边钢梁梁端弯矩显著增加,出现明显的塑性铰,塑性铰转角为 10° ,封边钢梁失效。楼面构件的内力增加明显,向相邻侧吊柱卸载,相邻侧桁架 HJ-2 吊柱 HC 轴力明显增加,如图 10(a) 所示。由于封边钢梁失效,坍塌面积 165m^2 超过限值 100m^2 ,可判定发生连续性倒塌。

当中间跨桁架 HJ-4 吊柱 HC 失效后,对应悬挑桁架首先卸载,封边钢梁的弯矩显著增加,并向两侧吊柱卸载,结构经历适当的内力重分布后,最终在新的传力途径上达到稳定平衡。结构未出现塑性铰,剩余结构的最大变形值为 119mm,如图 10(b) 所示。超过结构正常使用状态的变形限值,没有出现连续性的倒塌破坏。

(2) 弦杆初始失效。选择悬挑桁架中重要性系

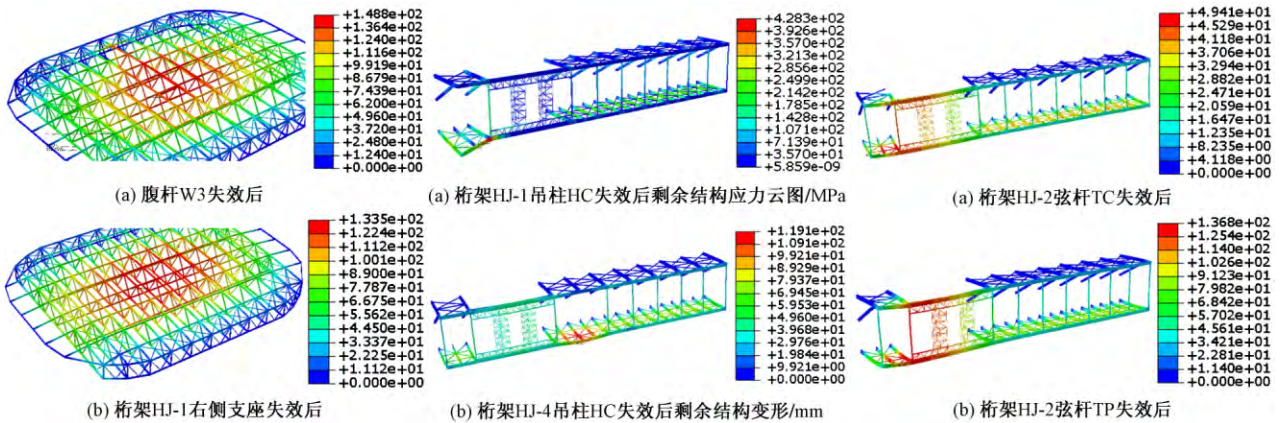


图9 剩余结构变形/mm

图10 剩余结构应力和变形

图11 桁架HJ-2弦杆失效后剩余结构变形/mm

数较大的桁架 HJ-2 弦杆 TC。悬挑桁架弦杆初始失效后,悬挑桁架两侧封边钢梁及连系梁以弯曲变形的形式继续承载,并向两侧悬挑桁架卸载。剩余结构的最大变形值为 99mm,见图11(a)所示,超过结构正常使用状态的变形限值,没有出现连续性的倒塌破坏。

(3) 斜腹杆初始失效。选择悬挑桁架中重要性系数较大的桁架 HJ-2 斜腹杆 TP。悬挑桁架斜腹杆初始失效后,其内力重分布过程与桁架 HJ-2 弦杆 TC 相同,剩余结构的最大变形值为 136mm,如图 11(b)所示,超过结构正常使用状态的变形限值,没有出现连续性的倒塌破坏。

3.3 内力重分布机制

3.3.1 主桁架的内力重分布机制

非线性结构动力响应分析结果表明,结构杆件失效后的内力重分布机制基本与静力分析一致。但重分布过程中的动力效应明显,这将导致局部结构有更大的内力和变形需求。图 12 为 HJ-6 节点 N1 在杆件 B1 初始失效后的竖向位移时程曲线。动力效应总的变化趋势为,在邻近初始失效杆件周围的杆件动力效应越大,随着杆件离初始失效杆件的位置越远动力效应越小。

(1) 根据杆件失效的结构动力响应分析,可以看出,主桁架任意一处构件的失效,其相邻构件在杆端首先弯矩增大,继而出现比较明显的弯曲变形,存在出现塑性铰的趋势,然后在整体结构内部进行相应的内力重分布。

(2) 主桁架上弦杆

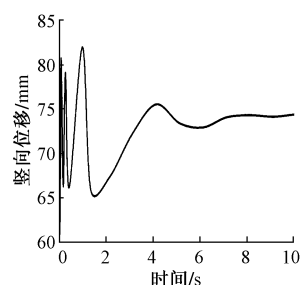


图12 节点N1的竖向位移时程

初始失效后,对应其下

方的腹杆、下弦杆及相连构件在构件端部有形成塑性铰的趋势,本工程的实际情况是未形成塑性铰仍处于弹性变形范围内。但此时杆端节点的转动刚度相对于完整结构要小很多,无论塑性铰是否形成,由于转动刚度的薄弱,总的趋势都是主桁架在杆端节点以转动的方式进行内力重分布,即通过稳定桁架或封边桁架向相邻跨卸载。

(3) 支座处上、下弦杆的初始失效,会使对应于桁架另一侧的杆件内力减小,但会使跨中弦杆的内力增加明显。跨中弦杆的初始失效会使边跨弦杆的内力有明显的增加。由于有稳定桁架及屋面钢梁,跨中弦杆的初始失效将导致该跨桁架向相邻跨桁架快速卸载。跨中区域弦杆的初始失效,比边跨弦杆的初始失效更易引起显著的内力重分布。

(4) 由于主桁架跨中剪力较小,跨中腹杆失效对结构内力重分布影响较小。而边跨腹杆(特别是受压腹杆)失效对弦杆及其余腹杆内力影响较大。

(5) 设置封边桁架、稳定桁架及屋面刚接钢梁,有助于主桁架整体内力重分布,抑制了主桁架因个别杆件失效而导致整体连续倒塌。且由于设置了封边桁架,使得跨端竖腹杆内力重分布敏感性减低。

3.3.2 悬挂结构的内力重分布机制

(1) 对于边跨吊柱,根据 HJ-1 的吊柱 HC 的动力响应结果,初始失效后,由于结构失去了主要的传力途径,并且只有一侧有封边钢梁,内力重分布能力有限,封边钢梁发生弯曲失效,不能阻止连续倒塌的发生。为了阻止吊柱初始失效产生的连续倒塌,必须寻求备用的传力途径进行加强,相比较关键构件法更为经济可靠。本工程最终选定的方案为在吊柱内增设高矾索($\phi 80$)作为二道防线。并且加强吊柱的上下节点设计,保证节点在偶然荷载作用下有足够的强度,不能先于吊柱或高矾索失效。仍假定

HJ-1 的吊柱 HC 初始失效,如图 13 所示,由于增加的后备传力途径,整体结构以完整的传力途径进行传力。由于高钒索与钢柱的弹性模量略有差异,故剩余结构的最大变形 78mm 较正常使用状态变形 76mm 略有增加。边跨吊柱的初始失效,必须通过候补传力途径的方法,在吊柱内增设高钒索作为二道防线。并且保证节点不能先于吊柱或高钒索失效,可有效遏制连续倒塌的机制。

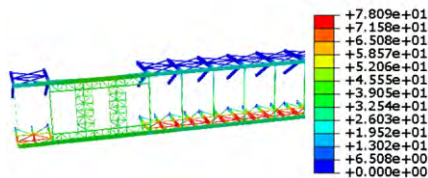


图 13 增设高钒索后 HJ1-HC 失效后剩余结构变形/mm

(2) 杆件失效后,其相邻构件在杆端首先弯矩增大,继而出现比较明显弯曲变形,存在出现塑性铰的趋势,然后在整体结构内部进行相应内力重分布。

(3) 悬挑桁架的初始失效,比吊柱的初始失效更易引起显著的内力重分布,因而前者对引起后续的失效更为敏感,而保护后者对阻断结构的连续性倒塌破坏更具有关键性的意义。

(4) 封边钢梁及悬挑桁架端连系梁有助于结构整体内力重分布,特别是对于中间榫悬挑桁架,抑制了因个别杆件失效而导致整体连续倒塌。

4 结论

(1) 整体结构中的构件重要性评价对研究结构的合理性以及保证整体结构安全具有重要意义。本文基于位移向量,提出了改进的构件重要性分析方法。根据甘肃省体育馆钢桁架防连续倒塌分析结果,通过本文提出的构件重要性评定方法判定的构件重要性,与工程经验及数值分析结果一致。本文提出的构件重要性评定方法能定量地判定整体结构中的关键构件,为防连续倒塌设计中的拆除杆件法提供了必要的判定依据,便于工程实践。

(2) 防连续倒塌设计中,首先应根据概念设计方法提高结构冗余度,并保证多荷载传递路径。主桁架体系设置的稳定桁架、封边桁架及刚接次梁,悬挂结构中的增设高钒索,加强封边钢梁及连系梁等,都是基于以上思路进行的防连续倒塌概念设计。这为主桁架体系及悬挂结构防连续倒塌数值分析验算通过提供了先决条件。整体抗连续倒塌性能良好。

(3) 抗震设计中提出的结构冗余度特性和连接

延性等要求,对于提高结构的抗连续倒塌能力具有重要意义。由于甘肃省体育馆的钢桁架体系,在整体模型计算时都表现出主要抵抗竖向地震作用,并提出了较高的抗震性能设计要求,所以在抵抗正常使用荷载作用下的连续倒塌分析中表现出具有足够的超强能力。

(4) 根据甘肃省体育馆的钢桁架的内力重分布机制。当考虑杆件间的节点具有抵抗弯矩的实际能力时,局部构件的初始失效,由于传力途径的破坏首先表现为相连杆件受弯,并在杆端形成塑性铰或塑性铰趋势,构件转动进而形成局部的内力重分布。结构随之也进入整体的内力重分布过程。

参 考 文 献

- [1] Unified facilities criteria (UFC)—design of building to resist progressive collapse: UFC 4-023-03 [S]. Washington D. C.: US Department of Defense (DoD), 2013.
- [2] Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization projects [S]. Manhattan: US General Services Administration (GSA2005), 2005.
- [3] The building regulation: approved document A3: disproportionate collapse [S]. London: Department for Transport, Local Government and the Regions, 2010.
- [4] European Committee for Standardization. Action on structures—part 1-7: general actions—accidental actions: EN 1991-1-7 [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2010.
- [5] American society of civil engineers standard 7 minimum design loads for buildings and other structures: ASCE 7. [S]. USA: American Society of Civil Engineers, 2010.
- [6] 姜健,李国强. 结构抗连续性倒塌风险评估与设计—ISstructE 指南介绍[J]. 建筑结构, 2015, 45(4): 33-40.
- [7] 蔡建国,王峰岚,冯健,等. 大跨空间结构连续倒塌分析若干问题探讨[J]. 工程力学, 2012, 29(3): 143-149.
- [8] 叶列平,林旭川,曲哲,等. 基于广义结构刚度的构件重要性评价方法[J]. 建筑科学与工程学报, 2010, 27(1): 1-6.
- [9] 张雷明,刘西拉. 框架结构能量流网络及其初步应用[J]. 土木工程学报, 2007, 40(3): 45-49.
- [10] LUCCIONI B M, AMBROSINI R D, DANESI R F. Analysis of building collapse under blast loads [J]. Engineering Structures, 2004, 26(1): 63-71.
- [11] Hibbit, Karlson and Sorenson Inc. ABAQUS Version 6.7: Theory Manual, Users' Manual, Verification Manual and Example Problems Manual [M]. Providence: Hibbit, Karlson and Sorenson Inc., 2007.