

# 基于损伤场景的桁架结构拓扑易损性分析

于刚, 孙利民

(同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 结构拓扑易损性分析从影响结构易损性的内因揭示了结构体系中与外部荷载作用特性无关的先天弱点所在. 分析中以结构的几何稳定性作为结构性能需求, 采用了矩阵分析方法, 以平面和空间桁架结构体系为例, 探讨了结构中冗余构件配置的有效性以及不同易损场景对结构性能的影响程度. 研究发现, 合理的冗余构件分布能够将结构的易损场景限定在更小的范围内, 而盲目增加冗余构件则不一定能起到降低结构易损性的作用; 由于局部机构的存在, 不同易损场景的影响范围不同. 拓扑易损性分析可以把握结构体系的弱点所在, 从而可采取有针对性的措施降低结构易损性.

**关键词:** 拓扑易损性; 损伤场景; 冗余度; 机构判别; 局部机构

中图分类号: TU 312 + .3

文献标识码: A

## Damage Scenarios-based Topological Vulnerability Analysis of Truss Structures

YU Gang, SUN Limin

(State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Structural vulnerability analysis is becoming one of efficient theoretical methods to improve structural design and increase structural safety. Structural topological vulnerability analysis can reveal the inherent structural weakness which is irrelevant to the external load by focusing on the internal factor of structural vulnerability. The matrix analysis method is used to study the structure geometrical stability which is a measurement of structural performance. A 2-D and 3-D truss structures are used to study the effectiveness of the allocation of redundant components in structures, as well as the impact extent of different vulnerable scenarios to structural performance. It is found that the reasonable allocation of the redundant components may limit the vulnerable scenario to a relatively small region, whereas blindly increasing component

redundancy may not serve any purpose to reduce the structural vulnerability; furthermore, due to the existence of local mechanisms, the event impact to the structural system is different for various vulnerable scenarios. With the help of topological vulnerability analysis, measures can be taken to reduce the structural vulnerability.

**Key words:** topological vulnerability; damage scenario; redundancy; mechanism determination; local mechanism

近年来, 很多突发事件下结构的失效使研究者们意识到, 传统的结构设计不能完全保证结构的安全性, 纽约世贸大厦遭到恐怖袭击倒塌的“911”事件就是一个典型的例子, 从而掀起了结构损伤与其后果之间关系研究的高潮.

英国的 Bristol 大学较早开始了对结构易损性的量化研究<sup>[1-2]</sup>. 研究是基于图论针对结构的几何构成进行的. 在国内, 刘西拉<sup>[3-5]</sup>较早地进行了结构易损性的研究. 将结构易损性定义为结构在突发事件中容易受到伤害或者损伤的程度, 主要表现在连续性破坏与倒塌问题中, 反映了意外作用下结构的脆弱性. 文献[6-7]对结构易损性进行分析以及对其在结构健康监测中的应用作了探讨.

对结构在拓扑构成层面进行易损性分析可见于 Bristol 大学<sup>[1-2]</sup>以及柳承茂<sup>[8]</sup>所做的拓扑易损性分析中, 分别基于构件对节点主轴刚度的贡献以及构件的冗余关联程度, 得到的易损结果中的构件具有依赖于分析方法的次序关系, 但未考虑极端事件中构件破坏具有任意性的特点.

本文中考虑了极端事件中构件破坏的任意性, 以结构体系的几何稳定性作为结构性能需求, 采用

收稿日期: 2009-06-09

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(50538020); 同济大学土木工程防灾国家重点实验室自主研究课题基金资助项目(SLDRCE08-A-05)

作者简介: 于刚(1981—), 男, 博士生, 主要研究方向为结构易损性分析. E-mail: oriland@126.com

孙利民(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为结构健康监测与振动控制. E-mail: lmsun@tongji.edu.cn

矩阵分析方法判别桁架结构体系的几何稳定性,可以得到能够导致结构退化成为机构的最小构件数目组合的易损场景,并分别以二维和三维桁架结构作为算例,对提出的分析方法作了验证,探讨了冗余度分配的合理性以及易损场景影响范围的局部机构问题.

## 1 桁架结构体系拓扑易损性分析方法

为了清楚说明结构易损性分析方法,首先引入如下基本概念:易损性,指结构性能对局部损伤的敏感性;损伤场景,指造成结构损伤的失效构件的集合;失效场景,指造成结构体系失效的失效构件的集合,其中构件失效无次序关系;失效路径,指造成结构体系失效的失效构件的序列,其中构件失效有次序关系;易损场景,指结构易损性较高的失效场景.

为了从拓扑构成角度揭示结构弱点所在,本文中以极端事件中构件的完全破坏为损伤场景,通过将构件直接从结构中移除来模拟构件的破坏,并以结构体系的几何稳定性作为结构性能需求,对桁架结构体系进行拓扑层面的易损性分析.通过分析,找到能够造成结构体系失效的组成构件数目最少的易损场景,以及不同易损场景对结构几何稳定性影响的大小.需要指出的是结构拓扑易损性分析中的失效场景分析有别于结构体系可靠度分析中用到的结构体系失效模式的搜索,其区别主要表现在2点.

(1) 在结构体系可靠度分析中,失效模式中失效构件的选取通常依据构件的剩余承载能力或者失效概率进行;而结构易损性分析中易损场景中构件的破坏可能是由极端事件(比如爆炸)引起,并不受构件剩余承载能力以及失效概率影响.

(2) 结构易损场景指构件的突发破坏,其中所包含构件破坏无次序关系,本文中称之为失效场景;而结构体系可靠度分析中的失效模式中的构件破坏有次序关系,因此叫做失效路径.

### 1.1 结构体系几何稳定性失效准则

传统上,结构体系的几何稳定性采用 Maxwell 准则判别. Maxwell 准则通过节点数、杆件数和外部约束数之间的关系来判别杆件体系的类型,表达式简洁明了.但是,一个杆件体系的特征还与杆件的组

成形式,即体系拓扑关系和节点位置有关,也就是说与结构几何的完整描述有关<sup>[9]</sup>. Maxwell 准则只是1个结构几何稳定性的必要条件.因此结构体系的完整描述必须借助矩阵理论.

对于1个桁架结构体系,假定所有约束节点都完全约束,杆件数量为  $b$ ,非约束节点数为  $N$ ,则非约束自由度数为  $n = 3N$ .节点及单元几何关系见图1.图中, $i, j, k, l$ 为节点名称; $e$ 为杆件名称.

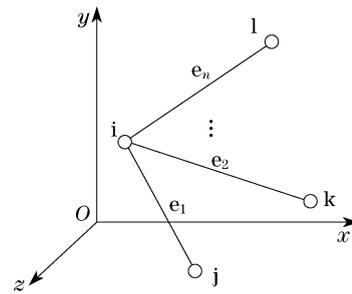


图1 节点及单元几何关系

Fig.1 Geometrical layout of nodes and elements

对某一非约束节点,其平衡方程根据图1写为

$$\begin{cases} \frac{x_i - x_j}{L_{e_1}} t_{e_1} + \frac{x_i - x_k}{L_{e_2}} t_{e_2} + \dots + \frac{x_i - x_l}{L_{e_n}} t_{e_n} = p_{i_x} \\ \frac{y_i - y_j}{L_{e_1}} t_{e_1} + \frac{y_i - y_k}{L_{e_2}} t_{e_2} + \dots + \frac{y_i - y_l}{L_{e_n}} t_{e_n} = p_{i_y} \\ \frac{z_i - z_j}{L_{e_1}} t_{e_1} + \frac{z_i - z_k}{L_{e_2}} t_{e_2} + \dots + \frac{z_i - z_l}{L_{e_n}} t_{e_n} = p_{i_z} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $x$ 和 $y$ 为相应节点坐标; $L$ 为相应杆件长度; $t$ 为杆件轴力; $p$ 为节点力.将上式扩展到整个结构,可得结构平衡方程为

$$[\mathbf{A}]\{\mathbf{t}\} = \{\mathbf{p}\} \quad (2)$$

式中: $[\mathbf{A}]$ 为 $n \times b$ 平衡矩阵; $\{\mathbf{t}\}$ 为 $b$ 维杆件内力向量.同时可建立结构的协调方程为

$$[\mathbf{B}]\{\mathbf{u}\} = \{\mathbf{e}\} \quad (3)$$

式中: $[\mathbf{B}]$ 为 $b \times n$ 相容矩阵; $\mathbf{u}$ 为 $n$ 维节点位移向量; $\{\mathbf{e}\}$ 为 $b$ 维单元轴向变形向量.在小变形假设下,由虚功原理可得 $\mathbf{A} = \mathbf{B}^T$ .若用 $r$ 表示 $[\mathbf{A}]$ 的秩,则独立机构位移模态数为 $m = n - r$ ,独立自应力模态数为 $s = b - r$ ,其中, $n, b$ 分别为节点位移向量和杆件内力向量的维数.根据 $s$ 和 $m$ 的值,桁架结构体系可分为如下4类:

(1) 第1类: $s = 0, m = 0 (b = r, n = r)$ ,此时矩

阵 $[A]$ , $[B]$ 满秩,对任意荷载模式 $\{p\}$ ,平衡方程和协调方程均有唯一解,即通常所说的静定体系.

(2) 第2类: $s > 0, m = 0 (b > r, n = r)$ ,对任意荷载模式 $\{p\}$ ,平衡方程有无穷解;对某一特定杆伸长量 $\{e\}$ ,协调方程有唯一解,即通常所说的超静定体系.

(3) 第3类: $s = 0, m > 0 (b = r, n > r)$ ,对某些特定荷载模式 $\{p\}$ ,平衡方程有唯一解;对任意杆伸长量 $\{e\}$ ,协调方程有无穷解,即通常所说的可变体系.

(4) 第4类: $s > 0, m > 0 (b > r, n > r)$ ,对某些特定荷载模式 $\{p\}$ ,平衡方程和协调方程均有唯一解,否则无解,其几何可变性需进一步判定.

对于第4类情况结构几何稳定性的判定,首先要确定结构自应力模态和独立机构位移模态,可采用奇异值分解理论<sup>[10]</sup>.根据矩阵奇异值分解理论,平衡矩阵 $[A]$ 可表示为

$$[A] = [U] \begin{bmatrix} S_{r \times r} & 0_{r \times s} \\ 0_{m \times r} & 0_{m \times s} \end{bmatrix} [V]^T \quad (4)$$

式中: $[U] = [u_1, u_2, \dots, u_n]$ ;  $S_{r \times r} = \text{diag}(s_{11}, s_{22}, \dots, s_{rr})$ 称为奇异值,且  $s_{11} \geq s_{22} \geq \dots \geq s_{rr} > 0$ ;  $[V] = [v_1, v_2, \dots, v_b]$ 为正交矩阵.由于平衡矩阵的秩  $\text{rank}(A) = r < \min\{b, n\}$ ,则 $[V]$ 的后  $b - r$  列组成矩阵 $[A]$ 的零空间的标准正交基, $[U]$ 的后  $n - r$  列组成矩阵 $[A]^T$ 的零空间标准正交基,即

$$\begin{aligned} [A][V]_{b \times s} &= 0 \\ [A]^T[U]_{n \times m} &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $[V]$ 的列向量即为  $s$  个独立的自应力模态; $[U]$ 的列向量即为  $m$  个独立机构位移模态.

在荷载作用下,结构产生机构位移,同时由于杆单元方向的改变,在节点上将产生不平衡力,称为几何力,若几何力具有使节点恢复平衡位置的趋势,说明自应力能使结构得到刚化,则该机构称为1阶无穷小机构,可以认为是几何稳定的,这种情况下满足几何力在机构位移上做功大于零的条件,即

$$W = \{\beta\} [G_i]^T [U]_{m \times n} \{\beta\} > 0 \quad (6)$$

式中: $W$ 为几何力在机构位移上做的功; $\{\beta\}$ 为  $m$  维乘子向量; $[G_i]$ 为第  $i$  阶自应力模态下的几何力模式矩阵,由相应的自应力模态和独立机构位移模态求得.当第  $i$  种自应力模态发生第  $j$  种机构位移模态时,可按如下过程计算几何力:

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{(x_i + u_{i_x}) - (x_j + u_{j_x})}{L_{e_1}/t_{e_1}} + \frac{(x_i + u_{i_x}) - (x_k + u_{k_x})}{L_{e_2}/t_{e_2}} + \dots + \\ & \frac{(x_i + u_{i_x}) - (x_1 + u_{1_x})}{L_{e_n}/t_{e_n}} = p_{i_x} \\ & \frac{(y_i + u_{i_y}) - (y_j + u_{j_y})}{L_{e_1}/t_{e_1}} + \frac{(y_i + u_{i_y}) - (y_k + u_{k_y})}{L_{e_2}/t_{e_2}} + \dots + \\ & \frac{(y_i + u_{i_y}) - (y_1 + u_{1_y})}{L_{e_n}/t_{e_n}} = p_{i_y} \\ & \frac{(z_i + u_{i_z}) - (z_j + u_{j_z})}{L_{e_1}/t_{e_1}} + \frac{(z_i + u_{i_z}) - (z_k + u_{k_z})}{L_{e_2}/t_{e_2}} + \dots + \\ & \frac{(z_i + u_{i_z}) - (z_1 + u_{1_z})}{L_{e_n}/t_{e_n}} = p_{i_z} \end{aligned} \right. \quad (7)$$

式中: $u$ 为节点机构位移在整体坐标系中的位移分量.比较式(7)与式(1)可得到

$$\left\{ \begin{aligned} G_{i_x} &= \frac{u_{i_x} - u_{j_x}}{L_{e_1}/t_{e_1}} + \frac{u_{i_x} - u_{k_x}}{L_{e_2}/t_{e_2}} + \dots + \frac{u_{i_x} - u_{1_x}}{L_{e_n}/t_{e_n}} \\ G_{i_y} &= \frac{u_{i_y} - u_{j_y}}{L_{e_1}/t_{e_1}} + \frac{u_{i_y} - u_{k_y}}{L_{e_2}/t_{e_2}} + \dots + \frac{u_{i_y} - u_{1_y}}{L_{e_n}/t_{e_n}} \\ G_{i_z} &= \frac{u_{i_z} - u_{j_z}}{L_{e_1}/t_{e_1}} + \frac{u_{i_z} - u_{k_z}}{L_{e_2}/t_{e_2}} + \dots + \frac{u_{i_z} - u_{1_z}}{L_{e_n}/t_{e_n}} \end{aligned} \right. \quad (8)$$

对所有非约束节点进行上述运算可得到第  $i$  种自应力模态与第  $j$  种机构位移模态形成的几何力,若用 $[T] = [V]_{b \times s}$ 表示结构的自应力模态矩阵,则几何力用矩阵形式表示为

$$\begin{aligned} \{G_{i,j}\} &= [\Delta A_j] \{T_i\} \quad i = 1, 2, \dots, s; \\ j &= 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (9)$$

则第  $i$  自应力模态下的几何力矩阵为

$$[G_i] = [G_{i,1}, G_{i,2}, \dots, G_{i,m}]$$

综合上述,当体系存在自应力模态时,式(6)就成为如下形式:

$$W = \{\beta\} [G_i]^T [U]_{m \times n} \{\beta\} = \{\beta\} [Q_i] \{\beta\} > 0 \quad (10)$$

式中: $[Q_i]$ 为体系几何稳定性判别矩阵.体系几何稳定性转化为 $[Q_i]$ 的确定性问题.若判别矩阵 $[Q_i]$ 确定,则结构体系几何稳定,否则几何可变.

### 1.2 易损场景搜索

结构拓扑易损场景搜索的主要流程如图2所示,其中的机构判别子程序流程如图3所示.整个搜索以及判别过程所需要输入的仅是结构体系的几何信息.

从图2可以看出,易损场景搜索过程遵循如下主要步骤:①在输入几何信息后程序自动生成包含 $n=1$ 个构件的损伤场景开始的损伤场景分析;②遍历所有 $C_n^b$ 个损伤场景,调用“机构判别”子程序,判断每个损伤场景是否会造成结构体系退化成为机构,输出能够导致结构退化为机构的易损场景至易损场景集合 $V_{DS}$ ;③若 $V_{DS}$ 非空,则完成搜索退出程序,否则 $n=n+1$ ,返回步骤①再执行上述过程直至 $V_{DS}$ 非空.

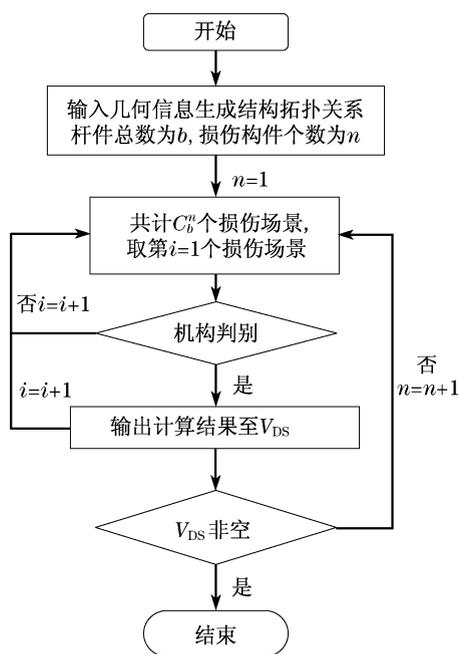


图2 易损场景搜索流程

Fig.2 Flow chart of vulnerable scenario search

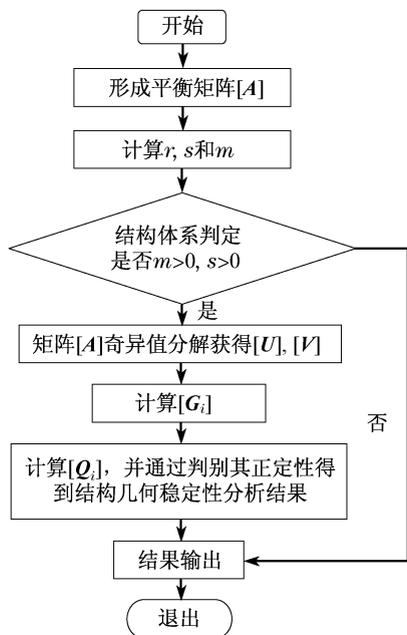


图3 机构判别子程序流程

Fig.3 Flow chart of mechanism determination

从图3可以看出,对结构体系失效判别遵循如下步骤:

(1) 根据结构几何信息生成平衡矩阵 $[A]$ .

(2) 计算矩阵 $[A]$ 的秩 $r$ ,自应力模态数 $s$ 和独立机构位移数 $m$ .

(3) 根据 $m, s$ 值和前述4类桁架结构几何稳定性分类,判断结构几何稳定性.若属于前3类之一,则可直接判断后退出程序,若属于第4类,则执行以下步骤:①对平衡矩阵 $[A]$ 进行奇异值分解;②计算几何力模式矩阵 $[G_i]$ ;③根据式(10)计算矩阵 $[Q_i]$ ,根据其确定性得到稳定性分析结果.

## 2 算例分析

### 2.1 算例1——平面桁架结构

图4所示为某一桁架结构桥梁的主桁,其冗余度为4,其中1个冗余度来自约束,另外3个来自内部杆件冗余,分布在中间3跨.容易看出,结构体系在端部2跨不存在构件冗余.这种不均匀的冗余分布使得端部成为整个结构的弱点所在.

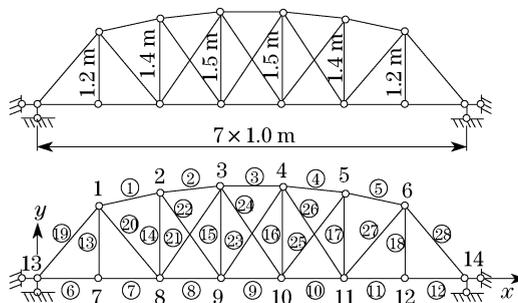


图4 平面桁架尺寸及编号

Fig.4 Layout and numbering of 2D truss

根据图2所示的易损场景搜索,可得到结构体系的最小构件数目易损场景为1组由2个构件组成的失效场景,如表1所示.

从表1中可以看出,易损场景中出现的构件(1, 5, 6, 7, 11, 12, 13, 18, 19, 20, 27, 28),分布在结构端部不具备杆件冗余的位置,表中任何一个损伤场景都能使结构退化成为可变体系而失去几何稳定性.为了更加明确结构易损场景分布与结构冗余度分布的关系,现将结构中缺乏冗余度的位置增加冗余构件,增加的构件如图5中粗实线所示.结构增加冗余构件后的易损场景分析结果列于表2,对比表1和表2可以看出,由于冗余度分配范围的扩展,易损场景中构件的分布范围缩小,仅涉及端部不具备冗余构件的范围内(6, 12, 19, 28)4个构件.易损场景中构

件分布区域的变化如图5所示.对比分析结果表明了冗余构件的存在能有效控制易损场景的分布范围,但是只要结构中存在相对薄弱部位,易损场景中最少构件数目仍然不变,即不能从几何构成角度降低结构的易损性.

表1 易损场景搜索结果

Tab.1 Results of vulnerable scenario search

场景	$V_{DS}$	场景	$V_{DS}$	场景	$V_{DS}$
1	(1,6)	14	(6,19)	27	(11,13)
2	(1,7)	15	(6,20)	28	(11,18)
3	(1,11)	16	(6,27)	29	(11,19)
4	(1,12)	17	(6,28)	30	(11,20)
5	(5,6)	18	(7,11)	31	(11,27)
6	(5,7)	19	(7,12)	32	(11,28)
7	(5,11)	20	(7,13)	33	(12,13)
8	(5,12)	21	(7,18)	34	(12,18)
9	(6,7)	22	(7,19)	35	(12,19)
10	(6,11)	23	(7,20)	36	(12,20)
11	(6,12)	24	(7,27)	37	(12,27)
12	(6,13)	25	(7,28)	38	(12,28)
13	(6,18)	26	(11,12)		

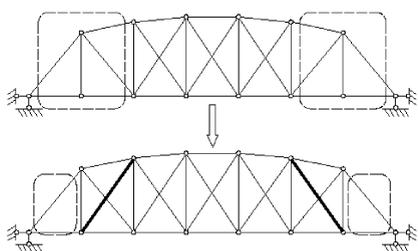


图5 易损构件分布位置随冗余度的变化

Fig.5 Distribution of vulnerable components with redundancy variation

表2 增加构件后损伤的场景

Tab.2 Vulnerable scenarios after enhancement

场景	$V_{DS}$	场景	$V_{DS}$
1	(6,12)	4	(12,19)
2	(6,19)	5	(12,28)
3	(6,28)		

从图5的下图可知,原桁架结构增加1对构件后,薄弱部分仅分布在最端部范围,但是若为了消除这段脆弱部位继续增加构件,将端部无冗余构件的局部增加冗余构件,如图6所示,则结构的最少构件数目的易损场景仍然为2个构件组成的易损场景,经过计算分析可知,易损场景为图6中粗实线所表示的构件a,b和c任意2个构件的组合.

从上述分析可知,在端部增加的构件虽不能降低结构的拓扑易损性,也不能再度缩小易损场景的分布范围,但图6结构的易损场景生成的是局部机

构,与图4结构的易损场景有着本质的不同.有关局部机构的问题,将在下一节结合算例进行讨论.

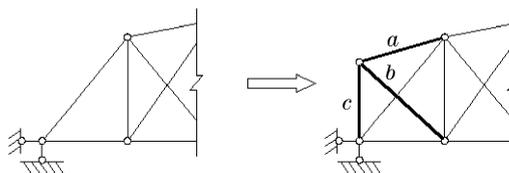


图6 端部冗余构件加强方案

Fig.6 Redundant component enhancement

## 2.2 算例2——空间桁架结构

图7所示为一冗余度为7的空间桁架结构.

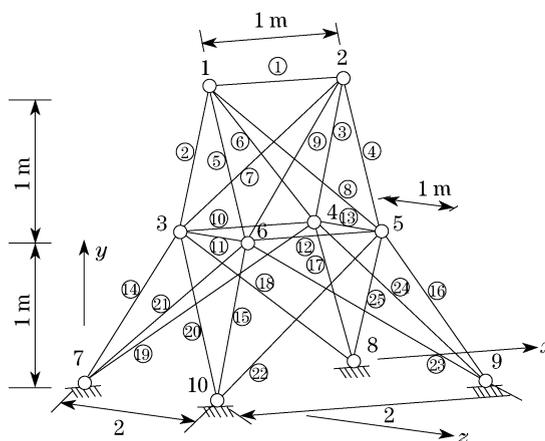


图7 空间桁架尺寸及编号

Fig.7 Layout and numbering of 3D truss

通过前述的结构拓扑易损性分析,可以得到表3所示易损场景分析结果,从结果中可以看出,对于1个冗余度为7的结构,要使其退化成为机构最少只需破坏3个构件.由于结构体系的对称性,表中易损场景也具有对称性.

表3 空间桁架易损场景

Tab.3 Vulnerable scenarios of 3D truss

场景	$V_{DS}$	场景	$V_{DS}$	场景	$V_{DS}$
1	(1,2,5)	9	(1,5,6)	17	(3,4,9)
2	(1,2,6)	10	(1,5,8)	18	(3,7,9)
3	(1,2,8)	11	(1,6,8)	19	(4,7,9)
4	(1,3,4)	12	(1,7,9)	20	(5,6,8)
5	(1,3,7)	13	(2,5,6)	21	(11,20,21)
6	(1,3,9)	14	(2,5,8)	22	(13,24,25)
7	(1,4,7)	15	(2,6,8)		
8	(1,4,9)	16	(3,4,7)		

算例分析结果中有一个值得讨论的现象,就是机构的局部性问题.对于易损场景中仅涉及部分构件的机构,称为局部机构.显然,局部机构的影响范围小,结构对与之相应的易损场景的易损性也就相

对较低.

在本算例中,首先以第1个易损场景为例,在构件(1,2,5)失效后,结构退化为机构,经过计算判别可知,剩余结构退化成为机构,并且有1个独立机构位移  $m = 1$ ,其独立机构位移模态向量为

$$[U]_{n \times m} = [U]_{18 \times 1} = [-0.707 \quad -0.707 \quad 0 \quad 0]^T$$

由于结构实际机构均可由独立机构位移模态的线性组合获得,此剩余结构的机构位移仅涉及第1号节点(图8a),因此为局部机构位移.类似的易损场景还有2~20号易损场景.

再以第21个易损场景为例,构件(11,20,21)失效后,剩余结构独立机构位移模态向量为

$$[U]_{n \times m} = [U]_{18 \times 2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.447 & 0.894 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.447 & 0.894 & 0 \end{bmatrix}^T$$

从上式可知,剩余结构的机构位移设计第3和第6号节点(图8b)为局部机构,但是此局部机构比第1个易损场景对应的局部机构影响范围更大,虽然都是由3个构件组成的易损场景,但从形成的机构影响范围来看,结构对于第21个易损场景的易损性要高于对于第1个易损场景的易损性.类似的还有第22号易损场景.所有易损场景的局部性分析结果均列于表4.

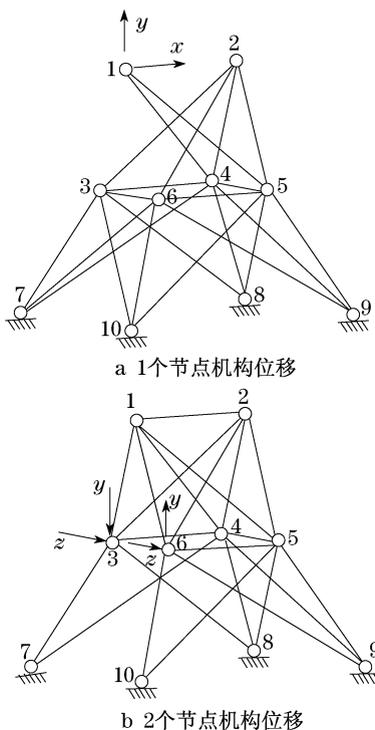


图8 机构位移图示

Fig.8 Mechanism displacement chart

表4 机构的局部性分析结果

Tab.4 Mechanism locality analysis results

编号	$m$	局部机构	涉及节点	编号	$m$	局部机构	涉及节点
1	1	Y	1	12	1	Y	2
2	1	Y	1	13	1	Y	1
3	1	Y	1	14	1	Y	1
4	1	Y	2	15	1	Y	1
5	1	Y	2	16	1	Y	2
6	1	Y	2	17	1	Y	2
7	1	Y	2	18	1	Y	2
8	1	Y	2	19	1	Y	2
9	1	Y	1	20	1	Y	1
10	1	Y	1	21	2	Y	3,6
11	1	Y	1	22	2	Y	4,5

注:Y表示是局部机构.

从表4可以看出,根据易损场景发生后剩余结构中发生机构位移涉及范围的大小,可以得到结构对不同易损场景的易损性高低次序:结构对影响范围涉及2个节点的21,22号易损场景易损性最高;其次为1~20号易损场景,其影响范围仅为处于结构顶端的单个节点.

本文算例仅在结构出现机构时就停止搜索,所得易损场景最大影响到结构中2个节点范围,形成的机构为局部机构.若继续增加失效构件数目,则局部机构的影响范围将继续扩大,直至形成整体机构.由此可见,在后续研究中有必要探讨搜索深度的问题,对易损场景中的失效构件数目和易损场景的影响后果做更深层次的权衡分析.

### 3 结论

(1) 进行了桁架结构拓扑构成的易损性分析,从影响结构易损性的内因,即结构体系几何拓扑构成角度分析得到了能够使得结构退化成为机构的易损场景,揭示了结构体系中与外部荷载作用特性无关的先天的弱点所在.

(2) 结合桁架结构算例分析对冗余构件分配与易损场景分布的关系进行了讨论,从结果可以看出,合理的冗余构件分布能够将结构的易损场景限定在更小的范围内;而盲目增加冗余构件则有可能起不到降低结构体系易损性的作用.

易损场景发生后,结构性能(本文中指结构的几何稳定性)降低或完全失效.由于结构退化成的机构可以分为局部机构与整体机构,所以不同易损场景对结构性能的影响程度也不同.

(下转第499页)