

程东辉, 刘文武. 大跨度轮辐式张弦梁构件失效后力学行为研究[J]. 华南地震, 2023, 43(1): 14–22. [CHENG Donghui, LIU Wenwu. Study on Mechanical Behavior of Long-span Spoke Beam String Components After Failure [J]. South China journal of seismology, 2023, 43(1): 14–22]

大跨度轮辐式张弦梁构件失效后力学行为研究

程东辉, 刘文武

(东北林业大学土木工程学院, 哈尔滨 150040)

摘要: 以具体案例为依托, 对大跨度轮辐式张弦梁结构的构件重要性进行分析并排序, 探讨不同因素对关键构件重要性的影响, 基于显示动力积分法模拟关键构件瞬间失效后的结构响应, 考察结构在关键构件意外失效时的力学行为。分析结果表明: 内环下弦杆、拉索、支座及靠近支座处上弦梁段为关键构件; 单独增大上弦截面刚度时, 各关键构件重要性随之降低, 单独增大垂度、初始预应力时, 拉索及支座的重要性随之提高, 其余关键构件重要性随之降低; 拆除内环下弦杆后, 结构缺乏有效的备用荷载路径, 内力重分布代价较大, 局部区域出现严重变形, 其余关键构件失效后, 环梁为主要备用荷载路径; 各关键构件瞬间失效后结构动力效应明显且不相同, 对于此类结构, 在分析时应考虑构件失效前的初始状态。

关键词: 轮辐式张弦梁结构; 构件重要性; 内力重分布; 动力效应

中图分类号: TU352.11

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2023)01-0014-09

DOI: 10.13512/j.hndz.2023.01.02

Study on Mechanical Behavior of Long-span Spoke Beam String Components After Failure

CHENG Donghui, LIU Wenwu

(School of Civil Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: Based on specific cases, the importance of components of long-span spoke beam string structure is analyzed and ranked, and the influence of different factors on the importance of key components is discussed. Based on the explicit dynamic integration method, the structural response of key components after instantaneous failure is simulated, and the mechanical behavior of the structure under the unexpected failure of key components is investigated. The results show that the lower chord of the inner ring, the cable, the support and the upper chord beam near the support are the key components. When the stiffness of upper chord section is increased individually, the importance of each key component decreases. When the sag and initial prestress are increased separately, the importance of cables and supports increases, and the importance of other key components decreases. After the removal of the lower chords of the inner ring, the structure lacks an effective backup load path, the cost of internal force redistribution is high, and severe deformation occurs in local areas. After the failure of other key components, the ring beam is the main backup load path. The structural dynamic effect of each key component is obvious and

收稿日期: 2022-07-15

基金项目: 中央高校基本科研业务费创新团队与重大项目培育资金项目(2572016EBC1)

作者简介: 程东辉(1971-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 预应力混凝土结构及混凝土结构加固改造。

E-mail: chengdonghui2000@126.com

different after the instantaneous failure. For such a kind of structure, the initial state before the component failure should be considered in the analysis.

Keywords: Spoke beam string structures; Component importance; Redistribution of internal forces; Dynamic effect

0 引言

大跨度张弦结构具有受力合理、施工方便等优点。然而此类结构覆盖范围大,多应用于人员密集的各类公共建筑中,一旦发生整体或局部倒塌,很可能造成重大的人员伤亡和财产损失。

目前已有相关文献对局部损伤下张弦结构的力学行为及倒塌机理进行研究。武啸龙^[1]采用试验与数值模拟相结合的方式研究了拉索破坏时大跨度张弦桁架结构的内力变化规律及结构失效机理。朱奕锋^[2]等人以实际工程为案例,开展连续倒塌动力分析,探讨了纵向联系构件对空间张弦桁架抗连续倒塌性能的提升作用。蔡建国^[3]等以新广州站索拱结构屋盖为研究对象,对比了单榀索拱结构各构件的重要性,连续倒塌分析结果表明,结构抗倒塌性能较好,该类结构在计算时应考虑移除关键构件前的初始状态。蔡建国等学者还在文献[4]中研究了撑杆失效单榀张弦结构的抗连续倒塌性能,结果表明索力在拆除撑杆后变化很小,但相邻撑杆因此增加的内力远大于50%。张微敬^[5]等人研究后认为双向张弦梁结构可能因撑杆的破坏而发生连续倒塌,易因边索与角柱的失效而发生连续倒塌。唐恒^[6]研究了张弦梁雨棚在列车撞击下的抗倒塌能力,结果表明在1~2根柱失效的情况下不会发生连续性倒塌,仅造成局部倒塌。殷志祥^[7]等以双向张弦梁结构为研究对象,分析了各种因素对火灾下该类结构抗倒塌性能的影响,并以此

为基础给出了提升抗倒塌性能的具体措施。蒋友宝^[8]等针对传统张弦梁结构冗余度低、易发生连续倒塌的特点,提出了一种交叉撑杆构型的张弦梁结构体系,并开展了刚度、承载力和连续倒塌分析。王媛^[9]等对空间张弦桁架结构在局部构件失效下的传力模式和倒塌机理进行了深入研究,并提出了抗倒塌性能加强措施,为张弦结构的抗倒塌设计提供了依据。

上述研究成果均表明了张弦结构可能因重要构件的破坏而发生局部或整体倒塌。轮辐式张弦梁结构作为一种应用较广泛的大跨度张弦结构,国内相关研究却较少,因此本文基于备用荷载路径法(AP法)以具体案例为依托,对大跨度轮辐式张弦梁构件失效后的力学行为进行研究。

1 分析对象及有限元模型

文献[10]采用数值模拟的方式研究了各种参数对轮辐式张弦梁屋盖静力性能的影响,本文根据该文献设计算例结构并进行分析。算例结构水平投影面为圆形,直径为100 m,由32榀张弦梁辐射状均匀布置而成梁,矢高为6 m,垂度为4 m,以环梁连接各榀张弦梁,结构中心设置直径10 m的刚性内环,以避免构件过于密集,除内环竖杆外,其余撑杆与张弦梁上弦及拉索铰接且不发生相对滑动,支座采用可沿径向滑动的铰支座,各构件截面特性及材料见表1。

表1 构件截面尺寸及材料
Table 1 Section size and material of components

构件	截面尺寸/mm	材料
上弦梁	箱形 400×16	Q345B
内环上弦、下弦	箱形 500×400×20×20	Q345B
内部环梁	箱形 250×6	Q345B
最外圈环梁	箱形 500×400×20×20	Q345B
撑杆(内环竖杆)	φ203×6.5	Q345B
拉索	φ5×127	1670级钢丝束

Q345B 钢材采用图 1 所示的双折线本构模型, 弹性模量 $E=2.1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$, 密度 $\rho=7850 \text{ kg/m}^3$, 泊松比 0.3, 屈服强度 $f_y=345 \text{ MPa}$, 材料失效应变为 0.01, 本构模型如图 1 所示:

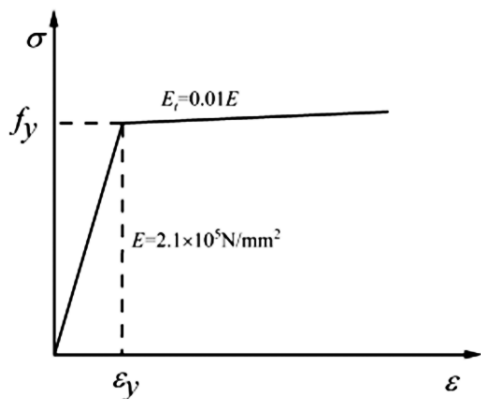


图 1 钢材双折线本构模型

Fig.1 Double broken line constitutive model of steel

图 1 中 ε_y 为钢材屈服应变, E 、 E_t 分别为弹性模量和钢材屈服后的切线模量。拉索采用线弹性本构模型并设置为只拉不压, 弹性模量 $E=1.6 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$, 密度 $\rho=7850 \text{ kg/m}^3$, 泊松比 0.3, 膨胀系数 1.2×10^{-5} , 极限抗拉强度 1670 MPa。

图 2 为在 ABAQUS 中建立的屋盖有限元模型, 在 ABAQUS 模型中, 拉索单元类型选用桁架单元, 其余构件单元类型选用梁单元。对支座施加边界约束条件, 具体做法为释放各支座在单榀张弦梁平面内的转动自由度以及径向的平动自由度, 限制其他方向自由度。设置各构件连接关系, 除内环竖杆外所有撑杆上下铰接, 其余各构件刚接。屋盖恒载 0.5 kN/m^2 , 屋面活载 0.5 kN/m^2 , 通过降温法施加拉索预应力, 在结构仅受自重, 不受外荷载的初始态下, 拉索索力为 580 kN。分析时忽略轻质屋面的刚度、各连接节点重量以及下部结构的影响。

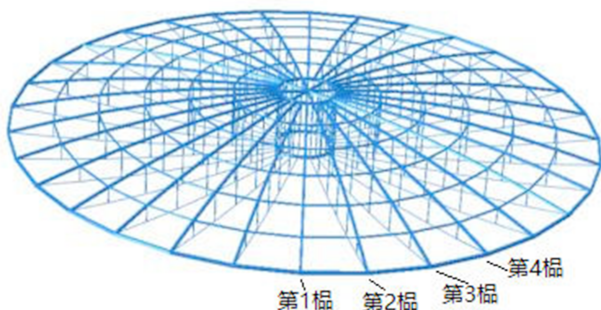


图 2 结构有限元模型

Fig.2 Finite element model of structure

2 构件重要性分析

2.1 构件重要性排序

若以节点位移作为构件拆除时的结构响应, 则单根构件拆除后, 各节点位移响应的平均值可以反映结构对该构件失效的敏感程度, 进而反映该构件对于结构的重要程度。因此为衡量构件的重要性, 定义构件的重要性系数 α_j 为:

$$\alpha_j = \sum_{i=1}^n \frac{|S_{ijx}| + |S_{ijy}| + |S_{ijz}|}{3n} \quad (1)$$

式(1)中, n 为节点数目, S_{ijx} 、 S_{ijy} 、 S_{ijz} 分别表示节点 i 对应于构件 j 移除的三个平动方向位移变化值。计算范围仅取距离失效构件最近的一榀张弦梁, 这是由于大跨空间结构构件众多, 覆盖面积大, 整体性较好, 单个构件失效后, 一般只对局部区域有较大影响, 若构件重要性系数 α_j 取整个结构所有节点的位移响应进行计算, 不仅工作量巨大, 还会使局部区域较大的位移响应被平均以致 α_j 过小, 难以判断关键构件以及直观反映构件失效对局部区域的影响。

结构为对称结构, 因此拆除任意一榀张弦梁的构件都会得到相同的分析结果, 为便于分析, 选取最易操作的一榀张弦梁进行构件拆除并将其编号为第 1 榀。对单榀张弦梁构件及节点按图 3 方式进行编号, 其中 ZZ1 表示张弦梁支座。将逆时针方向上与第 1 榀平面张弦梁相连的一根内环下弦杆和内环上弦杆编号为 NHXX1、NHSX1。

表 2 列出了标准荷载下以线性静力分析方法得到的构件重要性系数, 计算时位移单位取毫米。

由表 2 可知, 内环下弦杆重要性系数远高于其他构件, 这是由于该构件发生破坏后结构缺少有效的备用荷载路径, 处于不利受力状态, 部分节点产生了较大位移。此外, 张弦梁上弦各梁段距离支座越近重要性系数越高, 各段拉索重要性相差不大, 最内侧索段重要性系数略高于其他索段, 内环上弦杆和各撑杆重要性系数较低, 其中内环竖杆最低, 因此可以将内环下弦杆、拉索、靠近支座处上弦梁段、支座视为重要的关键构件。

2.2 构件重要性影响因素分析

重要性系数 α_j 在一定程度上反映了局部构件失效后结构的剩余承载力, 故各因素对构件重要性的影响, 也反映了其对剩余结构受力性能的影响。

响。本文以改变单一变量的方式，研究垂度、上弦刚度、初始预应力对关键构件重要性的影响。

2.2.1 垂度的影响

调整结构垂度，其他条件保持不变，各构件

重要性系数变化情况见表3。由表3可知，各构件重要性随垂度均匀变化，垂度增大66.67%，LS6和ZZ1的重要性系数分别增大了9.60%、8.55%，NHXX1和SX1分别降低了10.75%、31.19%。

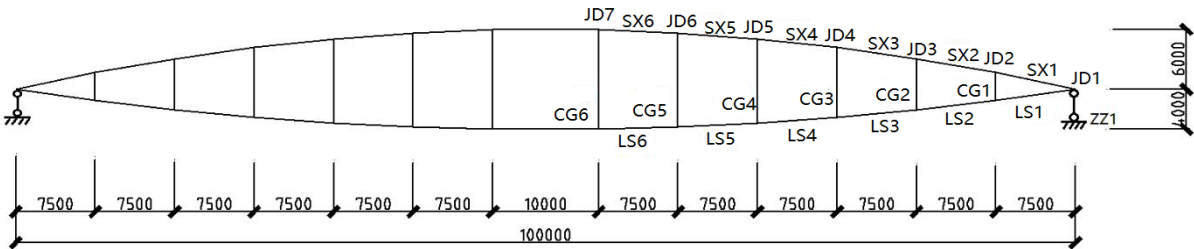


图3 构件及节点编号

Fig.3 Component and node numbering

表2 构件重要性系数及排序

Table 2 Importance coefficients of components and their ranking

构件编号	重要性系数 α_j	排序
NHXX1	691.05	1
SX1	35.56	2
LS6	34.92	3
LS5	32.92	4
LS1	32.18	5
LS4	31.57	6
LS2	30.94	7
LS3	30.85	8
SX2	27.94	9
SX3	21.20	10
ZZ1	15.89	11
SX4	13.37	12
SX5	7.77	13
CG2	4.29	14
CG5	4.17	15
SX6	4.04	16
CG1	3.58	17
CG3	3.36	18
CG4	2.93	19
NHSX1	1.70	20
CG6	0.08	21

表3 不同垂度下构件重要性系数

Table 3 Importance coefficients of components under different sag

垂度/m	LS6	ZZ1	NHXX1	SX1
3.0	33.23	15.21	730.77	42.64
3.5	34.12	15.56	709.84	38.93
4.0	34.92	15.89	691.05	35.56
4.5	35.64	16.20	671.20	32.31
5.0	36.42	16.51	652.23	29.34

2.2.2 上弦刚度的影响

调整张弦梁上弦截面刚度，保持截面积及其他条件不变，调整后各工况上弦截面特性见表4，各构件重要性变化情况见表5。

表4 各对比模型上弦截面特性

Table 4 Characteristics of upper chord section of each comparison model

编号	截面尺寸/mm	截面惯性矩/mm ⁴
1	箱形 300×22.11	3.18×10 ⁸
2	箱形 350×18.54	4.51×10 ⁸
3	箱形 400×16.00	6.05×10 ⁸
4	箱形 450×14.10	7.79×10 ⁸
5	箱形 500×12.61	9.74×10 ⁸

表5 不同上弦刚度下构件重要性系数

Table 5 Importance coefficients of components under different upper chord stiffness

惯性矩/mm ⁴	LS6	ZZ1	NHXX1	SX1
3.18×10 ⁸	47.45	18.96	1211.87	42.68
4.51×10 ⁸	39.44	16.55	1018.69	38.32
6.05×10 ⁸	34.92	15.89	691.05	35.56
7.79×10 ⁸	30.57	14.69	295.49	32.70
9.74×10 ⁸	27.51	13.97	187.284	30.62

由表5可以看出,随着上弦刚度增大,各构件重要性系数持续降低,构件重要性排序发生变化,上弦刚度增大206.29%,LS6、ZZ1、NHXX1、SX1的重要性系数分别降低了42.02%、26.32%、84.55%、28.60%,内环下弦重要性受张弦梁上弦刚度影响较大。

2.2.3 初始预应力的影响

调整结构初始预应力分别为480 kN、530 kN、580 kN、630 kN、680 kN,其他条件保持不变,各构件重要性变化情况见表6。

表6 不同初始预应力下构件重要性系数

Table 6 Importance coefficients of components under different initial prestress

预应力值/kN	LS6	ZZ1	NHXX1	SX1
480	32.11	15.34	722.86	39.26
530	33.48	15.6	707.27	37.42
580	34.92	15.89	691.05	35.56
630	36.28	16.18	675.66	33.86
680	37.65	16.5	660.23	32.23

由表6可知,初始预应力增大41.67%,LS6和ZZ1的重要性系数分别增大了17.25%、7.56%,NHXX1、SX1分别降低了8.66%、17.91%。

3 构件失效动力分析

3.1 动力分析理论依据

采用连续倒塌分析时常用的备用荷载路径法对结构进行非线性动力分析。由于以等效荷载瞬时卸载法模拟构件失效时不易确定荷载方向,因此参照文献[11]提出的数据传递卸载法模拟构件的

失效,将完整结构稳定后的动力分析结果作为初始状态,对剩余结构进行计算,实现关键构件瞬时失效。为准确模拟结构的动力效应,应考虑钢材的应变率效应,通过Cowper-Symonds模型反映应变率对钢材屈服应力的影响,分析时采用Rayleigh阻尼,阻尼比固定取0.02。参照美国规范GSA2013^[12],动力分析时的荷载组合取(D 、 L 分别为恒荷载和活荷载):

$$\text{Load} = D + 0.5L \quad (2)$$

由于动力分析需要考虑惯性力因素,故将外荷载简化为作用于结构的节点荷载,再将节点荷载换算为质量点作用于结构上。

张弦结构的倒塌判断准则目前还没有统一结论,本文规定当构件网格单元达到失效应后该单元自动删除,若该构件因此丧失功能,则认为构件失效。参照文献[13],确定整体结构倒塌失效准则为:结构竖向变形与跨度的比值超过限值1/150,且超过区域的面积比例达到30%以上。

3.2 结构位移分析

沿逆时针方向将距离第1榀最近的三榀张弦梁由近到远分别编号为第2~4榀。设置四种拆除构件工况,并进行非线性动力分析。工况1~4拆除的关键构件分别为前文中的ZZ1、LS6、SX1、NHXX1。

工况1~3下的结构未发生倒塌,也没有构件产生塑性变形,位移响应较大的节点均位于失效构件所在的第1榀张弦梁,说明支座、拉索、上弦遭受破坏时,结构有足够的剩余承载力。

工况4下结构在单根内环下弦杆失效后缺乏相应的备用荷载路径,内环下弦在拉索拉力作用下发生大变形,结构稳定过程中部分内环竖杆接近断裂,结构未发生整体倒塌,但内力重分布代价较大,大量节点竖向位移峰值超过1/150,结构已经遭受了严重破坏,不适合继续承载。图4为工况4下结构稳定后的局部区域位移图,可以看出结构发生大面积变形,相较于其他工况,内环下弦杆失效对结构影响更大。

将四种工况下各榀张弦梁上弦节点竖向位移最大值进行对比见图5,由图5可以看出工况1~3下,关键构件失效后,距离失效构件越远,各榀张弦梁上弦节点所受影响越小。而工况4下,各榀上弦节点竖向位移峰值较大且差距不明显,这是因为此工况下构件失效对整体结构造成了大范围的影响。

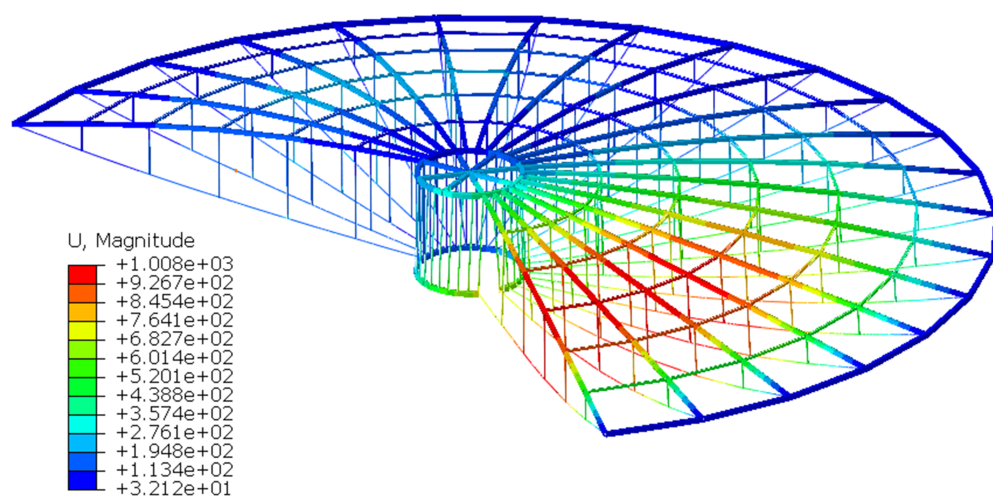


图4 工况4下结构稳定后局部区域位移

Fig.4 Local area displacement after stabilization of the structure under working condition 4

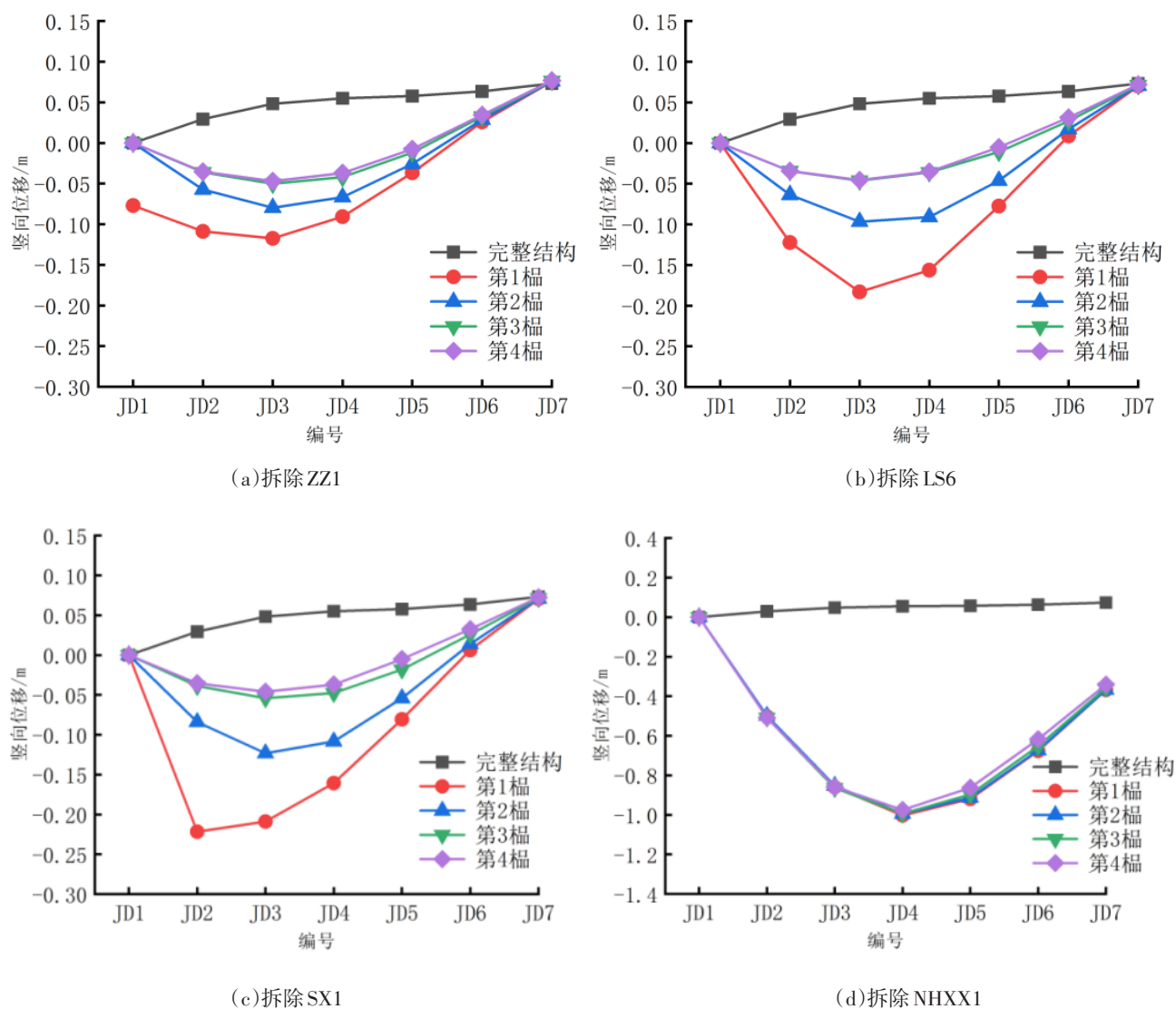


图5 各榀张弦梁上弦节点竖向位移最大值

Fig.5 The maximum vertical displacement of the upper chord node of each tension beam string

将距离失效构件最近的第1榀张弦梁上弦节点竖向位移最大值与相同荷载组合下的非线性静力分析结果以及完整结构分析结果进行对比,对比结果见图6。由图6可以看出静力与动力分析结果

差别较大,排除位移较小的节点后,由节点竖向位移通过计算可知,这四种工况下动力放大系数最大值分别为1.15、1.18、1.32、1.58。

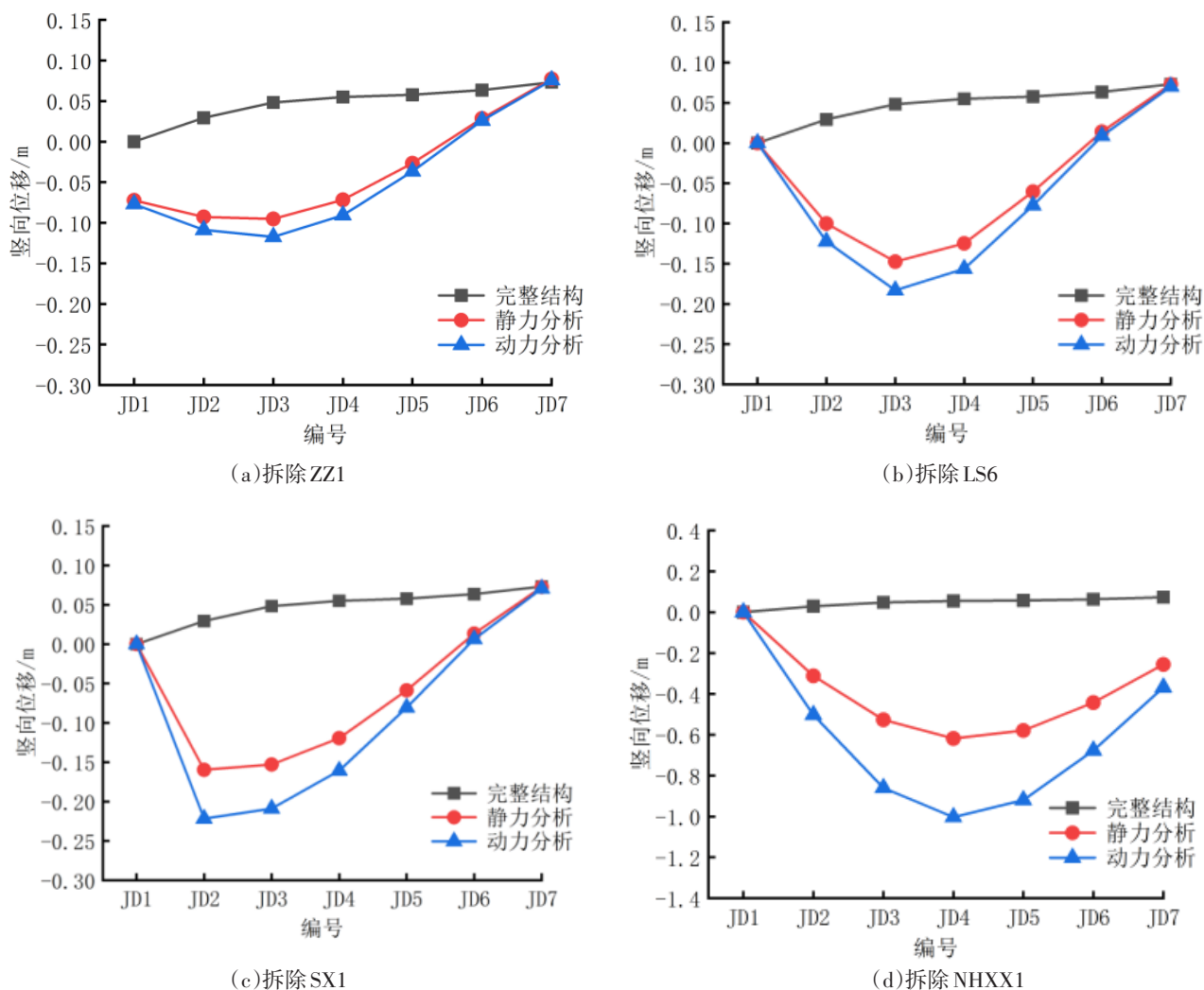


图6 第1榀上弦节点动力及静力竖向位移分析结果对比

Fig.6 Comparison of analysis results of dynamic and static vertical displacement of the top chord node of the 1st bays

3.2 结构内力重分布状况

图7为各工况下结构稳定后局部区域应力图,反映了关键构件失效后上部结构的内力分布。由图7可知,工况1~3下环梁起到了重要的备用荷载路径的作用。

工况1,第1榀张弦梁支座失效后,原先传向失效支座的荷载改为沿环梁向两侧张弦梁及相邻支座传递,与失效支座相连的最外侧环梁内力变化最为明显,结构稳定过程中其应力最大值达到278 MPa。

工况2,最内侧拉索失效后,拉索应力被释放,该榀张弦梁承载力降低,部分荷载向相邻张弦梁传递,由外向内第三、四道环梁应力变化最明显,最大应力值分别达到了293 MPa、300 MPa。

工况3,靠近支座处上弦梁段失效后,第1榀张弦梁拉索收缩,最外圈环梁在拉索作用下内力变化明显,结构部分预应力被释放,发生剧烈振荡,荷载同样沿环梁向两侧传递,环梁最大应力达到303 MPa。

工况4,内环下弦杆失效后,在拉索拉力作用下,内环下弦因弯矩剧增而发生变形,进而又导

致拉索预应力不断损失,张弦梁上弦拱产生的水平推力主要由外环梁承担。由图7(d)可知,该内环下弦杆失效导致上部结构大量构件应力明显增大。

图8为工况4下内环最终形态及应力图,内环

已严重变形,部分内环竖杆由于侧向位移角较大,对内环下弦起到了拉结作用,限制了内环变形的进一步增大,但是其端部因弯矩产生较大的应力,一旦断裂,很可能引起相邻构件的接连破坏,最终导致结构连续倒塌。

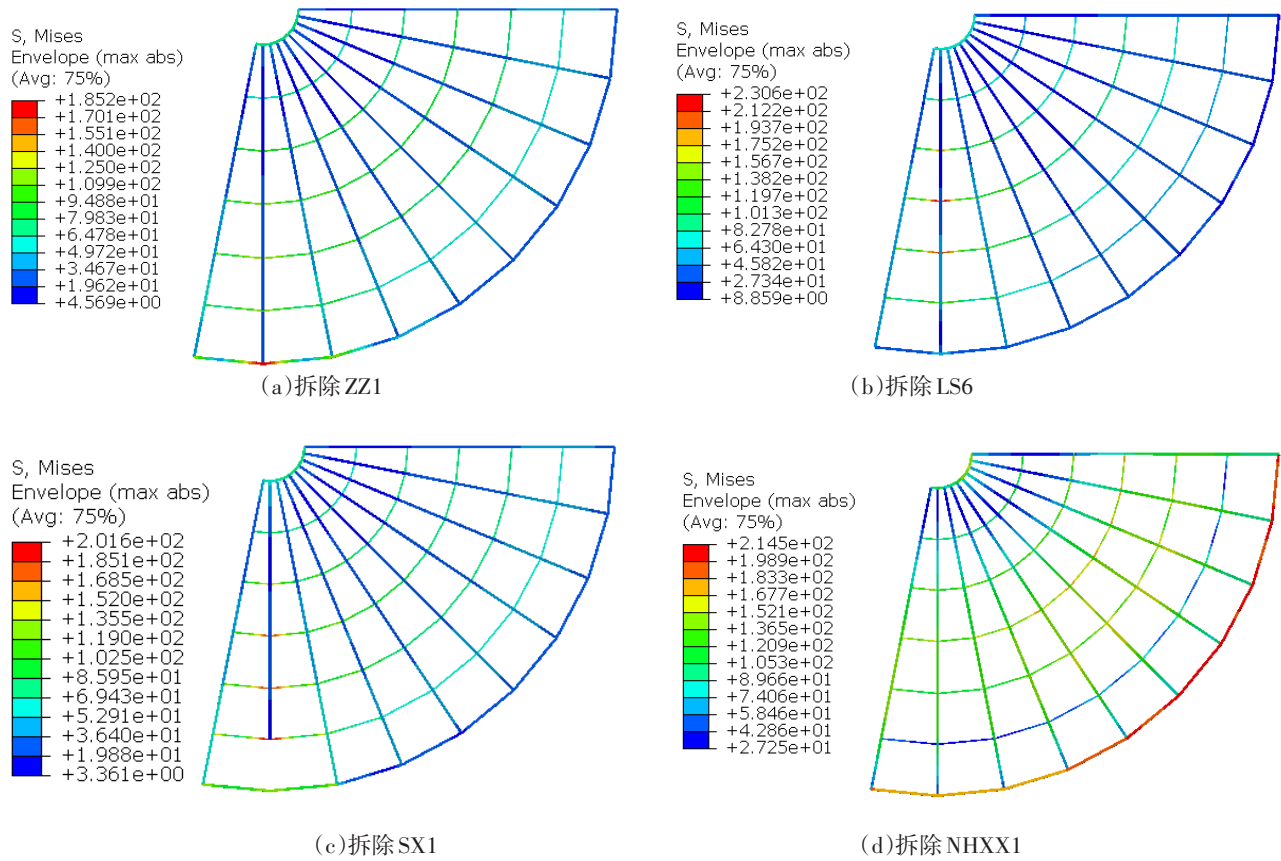


图7 各工况下结构稳定后局部区域应力分布

Fig.7 Stress distribution in the local area after stabilization of the structure under each working condition

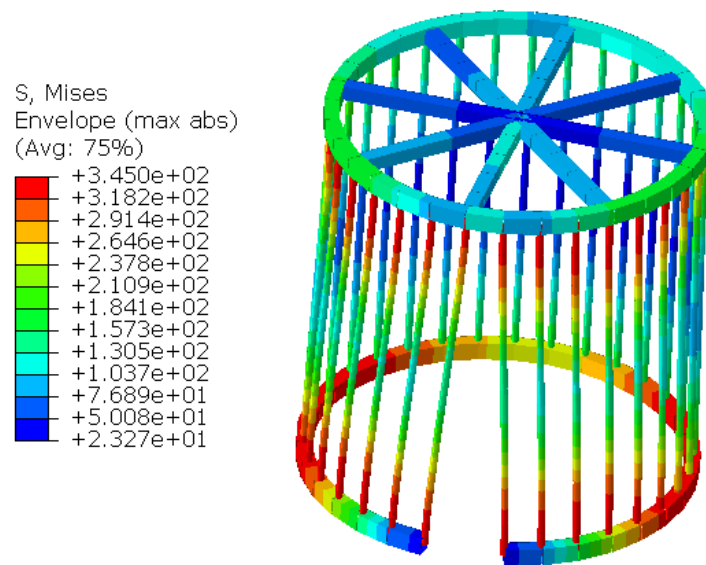


图8 工况4下内环最终形态及应力分布

Fig.8 Final morphology and stress distribution of the inner ring under working condition 4

4 结语

(1)算例轮辐式张弦梁结构内环下弦杆重要性系数最大,达到691.05,张弦梁上弦各梁段越靠近支座重要性系数越大,由近到远分别为35.56、27.94、21.20、13.37、7.77、4.04,各段拉索重要性系数相差不大,处于30.85~34.92之间,支座重要性为15.89,其余构件重要性较低,采用AP法时应将内环下弦杆、拉索、支座及靠近支座处上弦梁段视为关键构件。

(2)各关键构件重要性随着上弦截面刚度的增大而降低。随着垂度、初始预应力的增大,拉索、支座构件重要性提高,其余关键构件重要性降低。合理调整垂度、上弦刚度、初始预应力对于改善结构剩余承载力有一定作用。

(3)根据静力及动力分析结果,由节点竖向位移计算得到动力放大系数,工况1~4下动力放大系数最大值分别为1.15、1.18、1.32、1.58,结构动力效应不可忽视。

(4)支座、拉索、上弦梁段失效后,环梁为重要的备用荷载路径,由失效构件所在张弦梁传来的荷载主要由相邻张弦梁承担。内环下弦杆失效后,结构内力重分布代价较大,可能引起结构连续倒塌。

参考文献

- [1] 武啸龙. 大跨度张弦桁架结构连续倒塌数值模拟及试验研究[D]. 南京:东南大学,2016.
- [2] 朱奕锋,冯健,蔡建国,等. 梅江会展中心张弦桁架抗连续倒塌分析[J]. 建筑结构学报,2013,34(03):45-53.

- [3] 蔡建国,王峰岚,冯健,等. 新广州站索拱结构屋盖体系连续倒塌分析[J]. 建筑结构学报,2010,31(07):103-109.
- [4] 蔡建国,朱奕锋,冯健,等. 撑杆失效对张弦结构抗连续倒塌性能的影响[J]. 建筑结构学报,2015,36(06):78-85+100.
- [5] 张微敬,胡帅领,张毅刚. 双向张弦梁结构连续倒塌仿真分析与抗倒塌设计[C]//第十三届空间结构学术会议论文集. 北京:中国土木工程学会桥梁及结构工程分会空间结构委员会,2010.
- [6] 唐恒. 列车撞击作用下高铁客站无柱张弦梁雨棚结构的倒塌破坏研究[D]. 成都:西南交通大学,2014.
- [7] 殷志祥,王孟玉. 考虑火灾全过程的空间双向张弦梁结构倒塌分析[J]. 空间结构,2021,27(03):25-31.
- [8] 蒋友宝,周浩,康维,等. 基于抗连续倒塌性能的张弦梁结构撑杆构型与数值验证[J]. 建筑结构学报,2021,42(S1):186-194.
- [9] 王媛,王文斌. 大跨度空间张弦桁架结构抗连续倒塌性能研究[J]. 结构工程师,2021,37(02):45-53.
- [10] 罗宇能. 大跨度辐射式张弦梁结构的静力稳定性及施工仿真分析[D]. 广州:华南理工大学,2016.
- [11] 魏建鹏. 大跨度单层网壳结构抗连续性倒塌分析与评估[D]. 西安:西安建筑科技大学,2017.
- [12] GSA. Alternate path analysis & design guidelines for progressive collapse resistance[S]. Washington D. C.: General Service Administration,2013.
- [13] 上海市住房和城乡建设管理委员会. 大跨度建筑空间结构抗连续倒塌设计标准: DGTJ08-2350-2021 [S]. 上海: 同济大学出版社,2021.