



SAP2000 在预应力悬挑雨棚设计中的应用

筑信达 郑翔

预应力钢结构,是指在设计、施工和使用过程中,采用人为方法引入预应力以提高结构强度、刚度、稳定的钢结构。SAP2000 软件可以使用框架单元或索(cable)单元来模拟预应力拉索,通过降温法、应变荷载、目标力荷载等多种方式施加预应力。预应力钢结构的形式多种多样,本文以某预应力悬挑雨棚为例,讨论这类偏刚性索结构的常规建模分析方法的合理性和便捷性,以及操作过程中的注意事项。

1. 工程概述

某看台雨棚^[1]纵向长度 28.8m,柱距 7.2m,采用四根悬臂柱支撑。屋面沿纵向各挑出 3.6m,横向长度 15.35m,起始端设置拉索与支撑柱顶相连,计算模型见图 1,结构平面布置图见图 2、图 3。

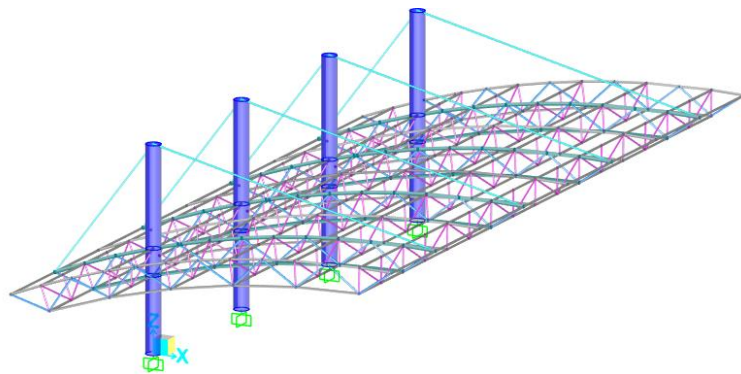


图 1 悬挑雨棚计算模型

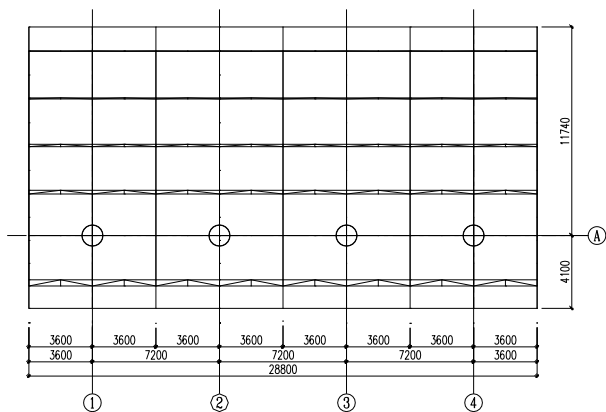


图 2 结构平面布置图

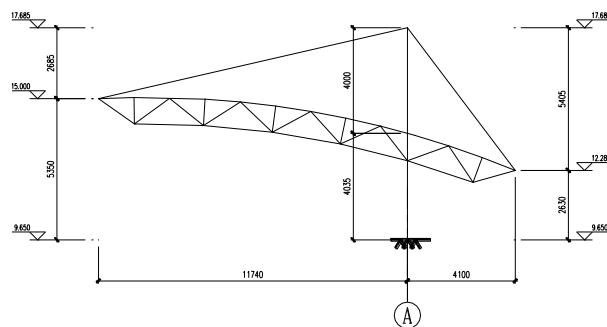


图 3 结构立面布置图

1.1 结构设计基本条件

本工程抗震设防烈度为 7 度,设防类别为丙类,设计地震分组为第三组,场地类别为 II 类,钢结构阻尼比取 0.05,场地特征周期为 0.45s,按柱底固结考虑。

1.2 结构荷载

1) 屋面恒载

本案例的屋面恒载包含主体结构自重,围护结构自重。其中,主体结构自重由程序自动考虑,围护结构自重按 0.4kN/m^2 考虑。檩条跨度为 2.7m,则对应的线荷载为, $DL: 0.4 \times 2.7 = 1.1\text{kN/m}$ 。(见图 4)

2) 屋面活载

本案例的屋面活载按 0.5kN/m^2 ,对应线荷载为, $LL: 0.5 \times 2.7 = 1.35\text{kN/m}$ 。(见图 5)



1.3 截面和材料

本案例所有杆件均采用 Q355B 材质，各杆件的截面见表 1。

表 1 钢管截面列表

| 构件号 | 截面规格 | 材质 | 备注 |
|-----|---------|-------|------|
| 1 | P180X12 | Q355B | 弦杆 1 |
| 2 | P95X5 | Q355B | 弦杆 2 |
| 3 | P76X5 | Q355B | 腹杆 1 |
| 4 | P60X4 | Q355B | 腹杆 2 |
| 5 | P700X20 | Q355B | 立柱 |
| 6 | P121X5 | Q355B | 封口梁 |

1.4 荷载组合

本案例考虑恒载、活载、风载、预应力及地震作用，承载能力极限状态的荷载组合见表 2。

表 2 荷载组合

| 序号 | 荷载组合 | 序号 | 荷载组合 |
|----|-------------------------|----|--------------------------|
| 1 | 1.3DL+1.5LL+1.0PS | 6 | 1.0DL+1.5LL+0.9WL+1.0PS |
| 2 | 1.0DL+1.5LL+1.0PS | 7 | 1.3DL+1.05LL+1.5WL+1.0PS |
| 3 | 1.3DL+1.5WL+1.0PS | 8 | 1.0DL+1.05LL+1.5WL+1.0PS |
| 4 | 1.0DL+1.5WL+1.0PS | 9 | 1.2DL+0.6LL+1.3E+1.0PS |
| 5 | 1.3DL+1.5LL+0.9WL+1.0PS | 10 | 1.0DL+0.5LL+1.3E+1.0PS |

表中：DL—恒载；LL—活载；WL—风载；PS—预应力；E—地震作用。

2. 分析结果及注意事项

2.1 是否考虑几何非线性

索结构技术规程 (JGJ257-2012) 5.1.2 条^[3]，索结构应分别进行初始预应力及荷载作用下的计算分析，计算中均应考虑几何非线性影响。但是，对于较为刚性的索结构，如斜拉结构和张弦结构，在大部分工况下，可不考虑几何非线性的影响。本案例在大部分情况下属于较为刚性的索结构，可通过以下两个工况的计算结果来验证。

以 1.3DL+1.5LL+0.9WY+1.0PS 为例，运用降温法，利用框架单元模拟索，分别采用“线性分析”（**结构刚度继承非线性工况的终止刚度**）、“非线性分析”（**直接接力非线性工况**）两种方式来分析。其中，“线性分析”不会继承非线性工况 PS 中施加的荷载，只会继承 PS 工况的终止结构刚度，因此在施加荷载中需要添加 PS 荷载（图 9）；“非线性分析”会继承前置工况中施加的荷载，因此在施加荷载中，不需要再添加 PS 荷载（图 10）。经过计算，相同的荷载组合作用下，结构的轴力图见图 11、图 12。

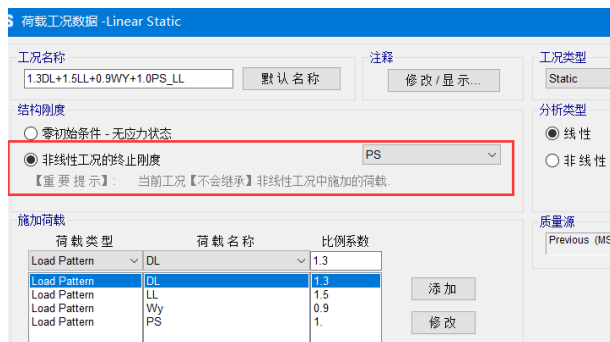


图 9 线性分析（结构刚度继承非线性工况的终止刚度）

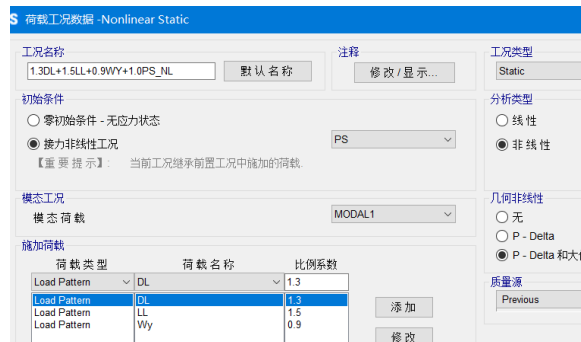


图 10 非线性分析（直接接力非线性工况）

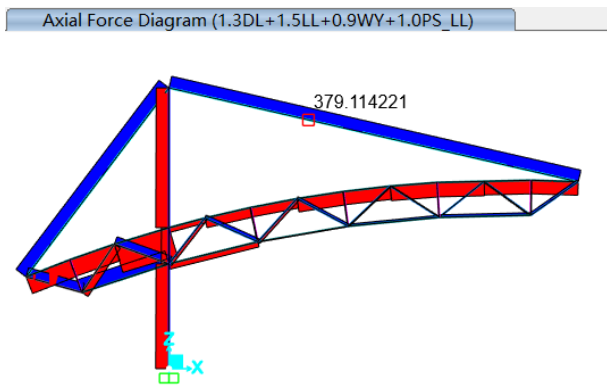


图 11 典型索的轴力图（线性分析）

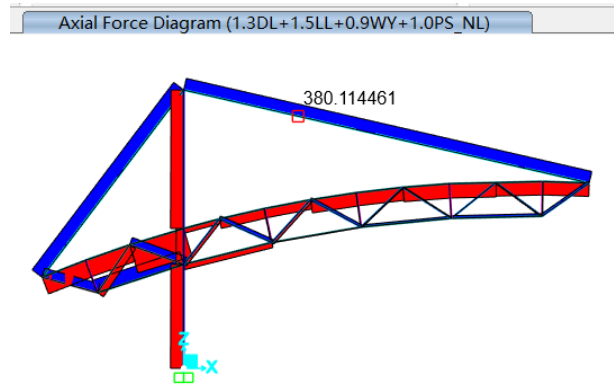


图 12 典型索的轴力图（非线性分析）

对比图 11、图 12 可知，“线性分析”和“非线性分析”的分析结果非常接近。这说明：对于这类刚性较大的结构，采用线性分析是可行的。

但需要指出的是，索在某些荷载工况作用下（例如风吸力工况），索的张拉力可能比较小，这时，索的大变形效应会比较明显，结构设计时不宜忽略。依然以本案例为例，取风吸力工况（1.0DL+1.5WX+1.0PS）说明（图 13、图 14）。

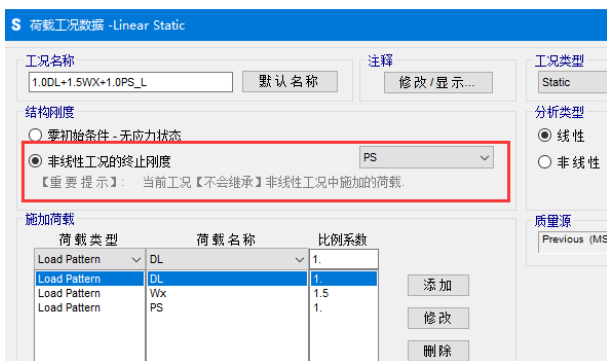


图 13 线性分析（结构刚度继承非线性工况的终止刚度）

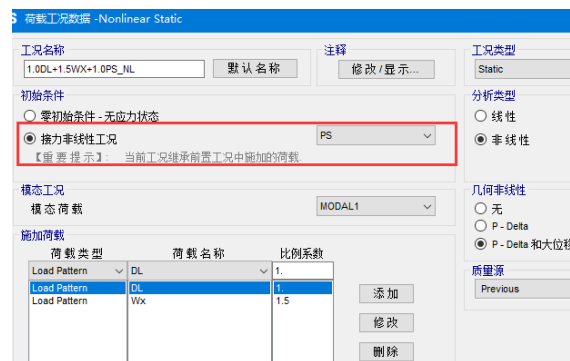


图 14 非线性分析（直接接力非线性工况）

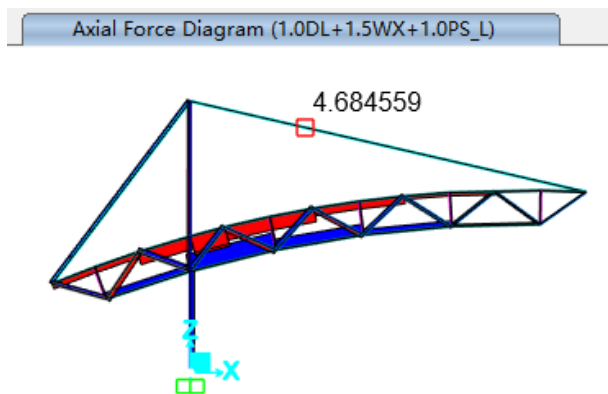


图 15 典型索的轴力图（线性分析）

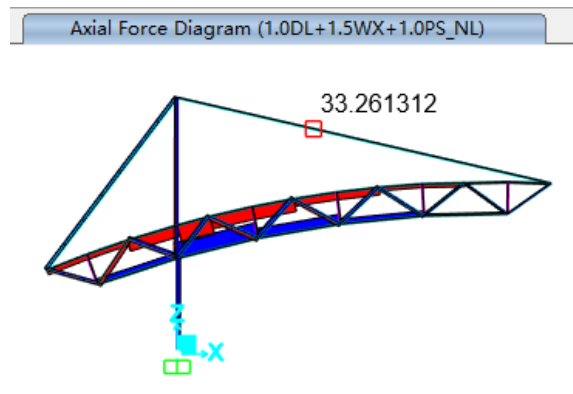


图 16 典型索的轴力图（非线性分析）

通过图 15、图 16 对比可知：同一根索、同样的风吸力工况，采用线性分析和非线性分析的结果差异很大。其原因就是当索的张拉力偏小时，索在自身重力作用下，其大变形效应可能会很显著，从而导致分析结果差异。注意：为了捕捉索的大位移效应，需要将拉索对应的框架单元进行足够细的剖分，本案例将拉索对应的框架单元按 1m 间距剖分。

而且，对于此类结构，风吸力作用下的工况是主桁架的根部上下弦杆的最不利设计工况。这种差异会影响杆件的应力比，依然以这榀桁架为例进行说明。

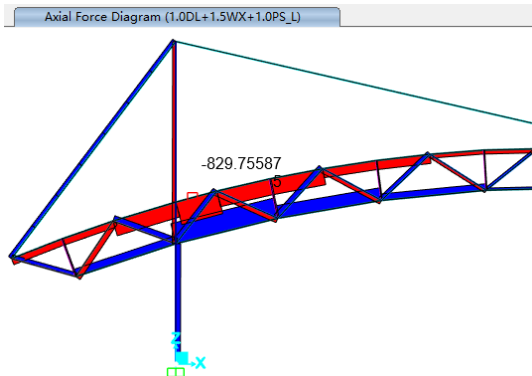


图 17 桁架弦杆的轴力图（线性分析）

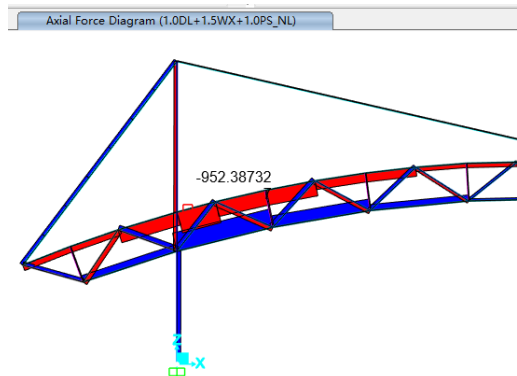


图 18 桁架弦杆的轴力图（非线性分析）

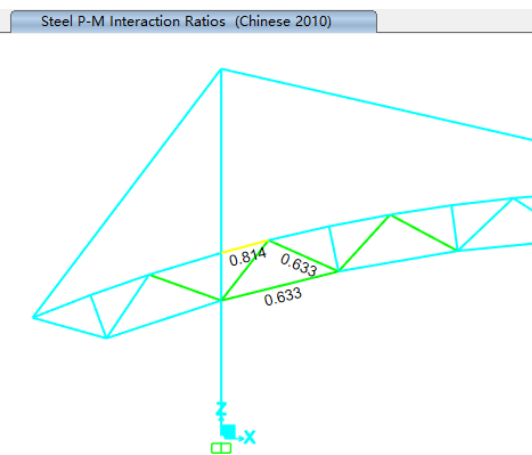


图 19 桁架弦杆的应力比图（仅风吸力工况，线性分析）

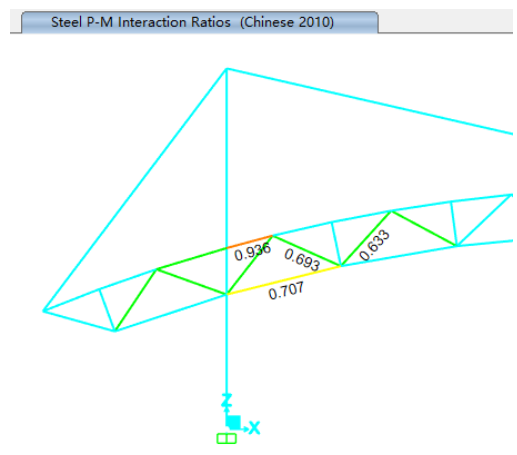


图 20 桁架弦杆的轴力图（仅风吸力工况，非线性分析）

对比图 17、图 18、图 19、图 20 可知：同一上弦杆、同样的风吸力工况，采用线性分析和非线性分析的结果相差了 15%；进而导致相应设计内力下，应力比相差 15%。此时若采用线性分析，可能低估结构的受力，使得截面设计偏不安全。

当然，要减小这种大变形效应，可以继续增大索的初拉力，使得风吸力作用下，索的刚度足够强。但这样会使得结构的杆件截面进一步加大，不一定经济。

综上所述，对于此类结构，风吸力工况的处理要慎重，必要时候需要通过非线性分析来考虑索的大位移效应。

2.2 风吸力作用下，索是否退出工作

预应力索的屋盖结构常采用轻质屋面，此时预应力索对风荷载敏感，在风吸力作用下，预应力索可能会受压而退出工作，这会使得预应力结构的整体受力状态发生实质性变化，会影响结构安全。因此，工程中往往需要保证在风吸力作用下，拉索不退出工作。

本案例需保证在各种荷载组合作用下，预应力索均不退出工作。但是，如前所述，本案例在风吸力工况下，索的大变形效应开始体现，而考虑大变形效应，索在自重作用下其轴力将始终为拉力，若简单通过索力是否小于零并不能准确判断拉索是否退出工作。这时，可以将拉索重量指定为零，避免索自重的干扰。详细讨论见本文 3.2 节。

2.3 杆件应力比

经过计算，各杆件的应力比如图 21 所示。

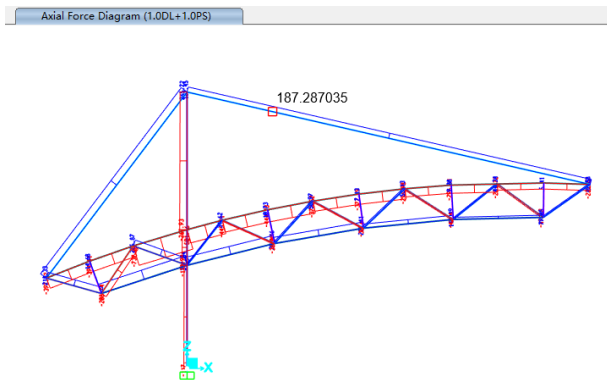


图 23 典型索 1 的轴力图 (1.0DL+1.0PS)

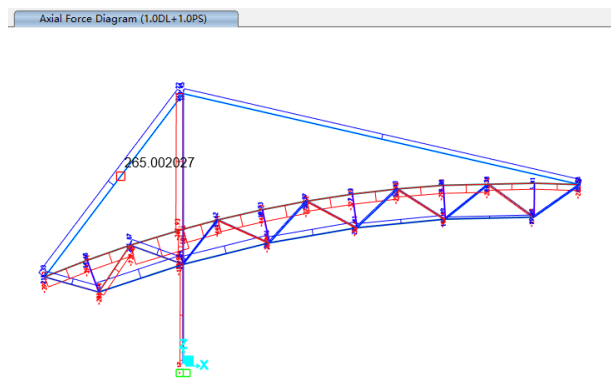


图 24 典型索 2 的轴力图 (1.0DL+1.0PS)

3. CABLE 单元模拟拉索注意事项

对于预应力拉索，除了用框架单元来模拟外，也可直接绘制 cable 单元来模拟。cable 单元是一种高度非线性单元，能通过形状设计器直接指定变形前的长度等方式施加初始预应力。以本案例为例，若采用 cable 单元并通过形状设计器施加初始预应力，则需在弹出的索对象形状设计器中，直接输入 i 端张力 1150kN（图 25），或者变形前长度 12.0244（图 26）。两种施加方式是等效的。

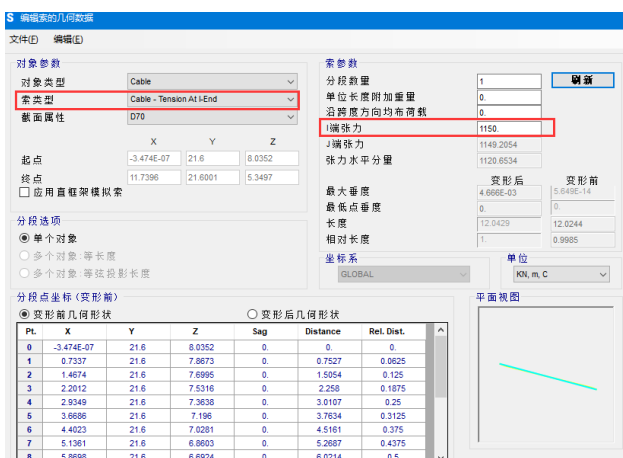


图 25 输入 i 端张力施加初始预应力

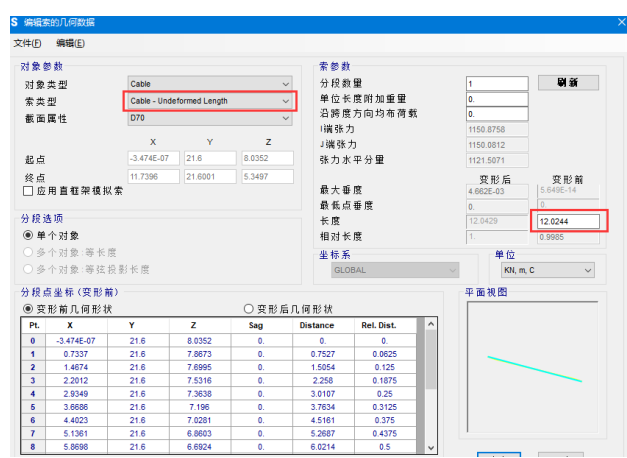


图 26 输入变形前长度施加初始预应力

但在使用 cable 单元模拟拉索时，需要注意以下问题。

3.1 形状设计器中输入的初始预应力仅在非线性工况中有效

形状设计器中输入的初始预应力只能在非线性工况中继承，无法通过线性分析继承非线性工况终止刚度的方式来继承初始预应力。

以本案例为例，事先设置一个无荷载的非线性工况 PS（图 27），由于存在形状设计器中输入的初始预应力，整个结构发生变形并产生内力。这里以某根索为例，查看 PS 工况下的轴力（图 28）。之后分别采用接力 PS 的恒载非线性工况（DL-PS-NL）（图 29）和接力 PS 的恒载线性工况（DL-PS-LL）（图 31）对整个结构进行分析，分别得到该索对应的轴力（图 30，图 32）。

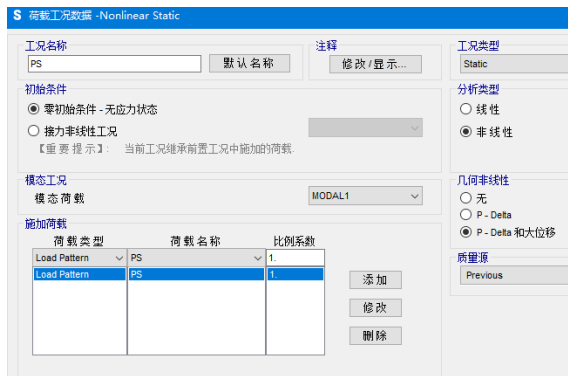


图 27 无荷载的非线性 PS 工况

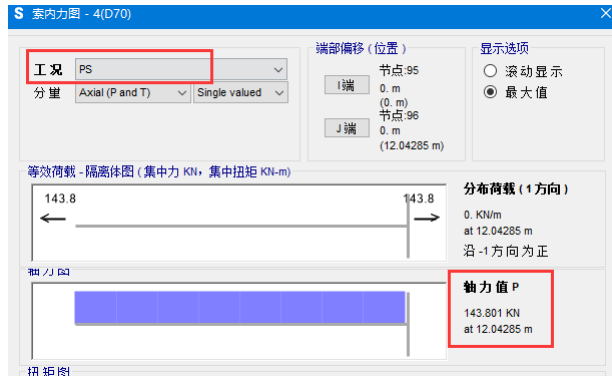


图 28 PS 工况下索轴力

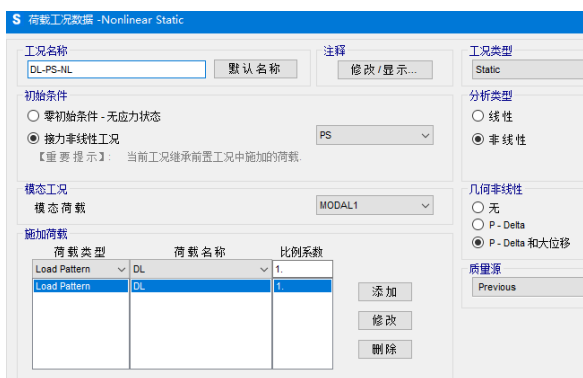


图 29 接力 PS 的恒载非线性工况 (DL-PS-NL)

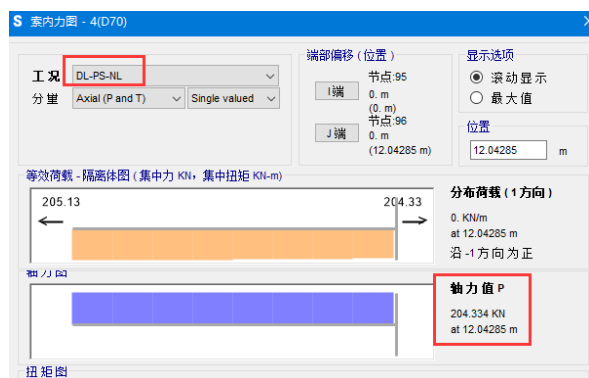


图 30 DL-PS-NL 工况下索轴力

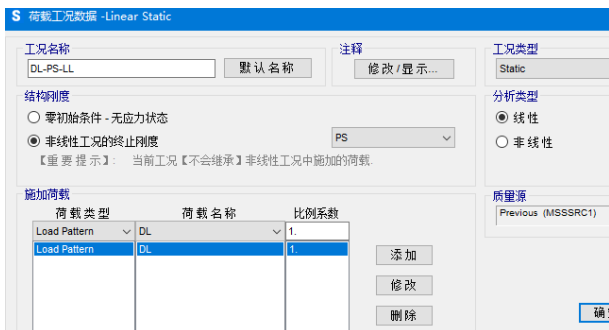


图 31 接力 PS 的恒载线性工况 (DL-PS-LL)

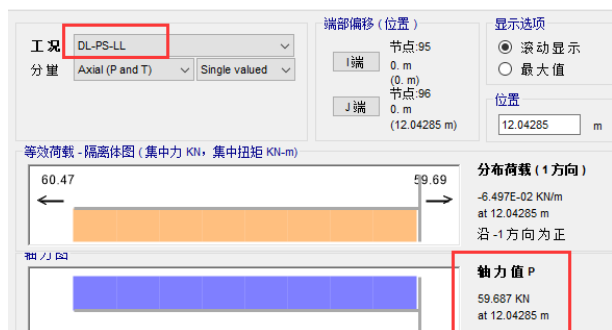


图 32 DL-PS-LL 工况下索轴力

从图 28 可知，PS 工况下，索的轴力为 143.8kN，该值远小于施加的初始预应力 1150kN。其原因是索两端并非完全约束，结构的变形释放了一部分预应力。DL-PS-NL 工况下索轴力为 204.3kN（图 30），说明非线性工况在继承 PS 工况索轴力基础上，进一步施加了恒荷载，使得索的轴力加大。DL-PS-LL 工况下索轴力为 59.7kN（图 32），其值远小于 204.3kN，其原因为线性工况无法继承 PS 工况下索的轴力，只能继承 PS 工况下结构的刚度，则索的轴力仅仅为恒载下的轴力，未包含 PS 工况下索的轴力。

由上可知，若采用 cable 单元模拟拉索并通过形状设计器施加预应力，所有的荷载组合均需采用非线性工况，否则会漏掉索的初始预应力。然而反应谱法无法用于非线性分析，若采用该方法会导致无法通过反应谱法计算地震作用。

3.2 cable 单元分析风吸力作用注意事项

采用 cable 单元对结构进行风吸力作用下分析时，索自重及索的大变形效应可能会影响拉索是否退出工作的判断。因为索的非线性分析工况自动考虑大变形效应。当索的张力不足时，索会在自重作用下下垂，从而使得索受拉，其轴力将始终维持一定的拉力。以本案例为例，当将索的初始预应力降至 200kN 时，由图 33 可知，索的轴力依然为 17.9kN，但此时拉索早已松弛。

针对这个问题，建议用户在判断索在风吸力作用下是否退出工作时，可以将索的重量设置为 0，则索不会受重力作用下垂，则可通过索力来判断索是否受压退出工作。依然以索的初始预应力为 200kN 的模型为例，若将索的重量设置为 0，运行



分析，结果见图 34。由图 34 可知，索内力为 0，表明索受压退出工作，则索施加的初始预应力不足。

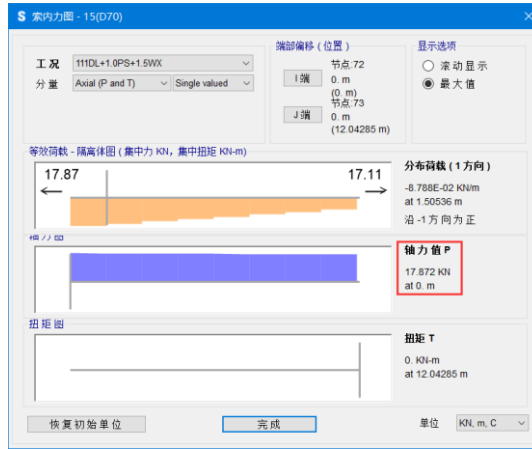


图 33 cable 单元自重不为零的轴力 (1.0DL+1.5Wx+1.0PS)

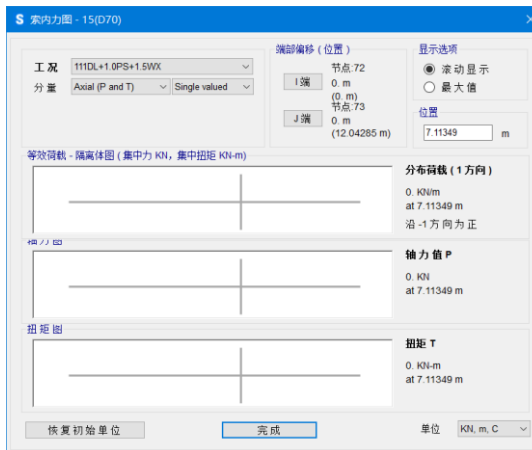


图 34 cable 单元自重为零的轴力 (1.0DL+1.5Wx+1.0PS)

4. 结论及讨论

本文以某预应力悬挑雨棚为例，介绍了这类偏刚性索结构的常规建模分析方法以及操作过程中的注意事项。通过分析可知，对于此类结构，可采用框架单元（降温法）来模拟拉索，并通过线性分析进行结构设计；但需注意风吸力作用下，拉索的大变形效应，必要时可以仅针对风吸力工况补充非线性分析。

若采用 cable 单元并通过形状设计器施加初始预应力，会面临一些更复杂的设置。比如，所有荷载组合均需采用非线性工况，不然会漏掉索的初始预应力。而且，反应谱法也无法用于非线性分析，会增加结构设计的难度。因此笔者建议，对于此类结构，采用框架单元（降温法）来模拟拉索是更加便捷的方法。但如果结构偏柔性，拉索的几何非线性效应明显，则采用 cable 单元是必要的。

此外，本案例雨棚悬挑跨度不大，若采用斜拉钢管代替预应力索，在结构计算上是可行的。但风吸力作用下，斜拉钢管将受压，则需按照受压构件控制长细比，经试算得斜拉钢管截面需采用 P245x10，严重影响结构美观。因此按照当前建筑方案，采用预应力索的形式更佳。

参考资料

- [1] 张相勇. 建筑钢结构设计方法与实例解析[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [2] 索结构技术规程: JGJ257-2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [3] 李立. SAP2000 模拟张弦结构的常见问题[J]. 筑信达技术通讯, 2019, 03: 7-13.