

球面网壳逆作法施工内力特性分析

卓 新

【提要】针对网壳结构的逆作法施工方法,全过程跟踪分析了结构构件在安装期间的施工内力特性及变化规律,得出了网壳结构设计计算必须考虑施工内力的影响等重要结论。

关键词 网壳 逆作法安装 施工内力

一、引言

网壳结构是空间结构的重要形式,也是目前国内应用最多、发展最快、经济和社会效益最好的结构之一。对网壳结构的分析研究,以往大多仅是在使用阶段的对外载作用下的变形和内力进行剖析,而网壳结构的施工内力和变形问题是非常重要的,它会控制结构的截面设计,以致耗资本可以省去的材料,也会导致部分杆件弯曲失稳甚至整个结构倒塌。然而,现在的设计和施工人员往往对其不够重视,只是对施工过程作一般的定性分析。中文对网壳结构在施工中的内力变化进行了比较分析。

二、逆作法施工内力分析

1. 逆作法施工分析说明

逆作法安装网壳是分阶段一圈一圈地由内向外、由上往下逐步安装形成的,其优点是:避免了大量高空作业,施工安全;80%以上工作量在地面完成,安装质量易保证;地面施工工效高;避免了构件散件的垂直运输,省力方便;几乎无需脚手架,安装成本大大降低;与土建平行施工,工期缩短。缺点是:该方法需要一定的起重设备,施工方案需要进行严格的技术设计。阶段施工内力由正在安装的这一圈的构件荷载引起,并会对前面所有已安装好的结构构件的施工内力产生影响。如果不考虑非线性因素的影响,构件施工内力的变化过程是一个阶段施工,内力的叠加过程;反之,已安装好的结构构件内力并不会传到正在安装的这一圈结构的构件上。施工

内力的分析计算应考虑正在安装的这一圈结构的空作用,这一圈的构件内也存在内力。以下通过对一个联方网格型单层球面网壳用逆作法的施工内力分析,来进一步深入说明施工内力的特性。为便于对比分析,计算荷载时仅考虑结构自重。作用在节点上的荷载值:

$$\begin{cases} P_i^b = q_{1,i} \\ P_{i+1}^b = q_{1,i} + q_{2,i+1} + q_{3,i+1} \end{cases}$$

式中 $q_{1,i}$ 为第 i 圈斜向杆重量, $q_{2,i+1}$ 为第 $i+1$ 圈环向杆重量, $q_{3,i+1}$ 为第 $i+1$ 圈球结点重量。

2. 球面网壳逆作法施工内力分析

单层网壳如图1所示。跨度40m,矢高11.547m。其中XG表示斜向杆, HG表示环向杆。

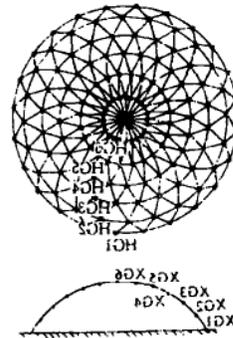


图1 联方网格型单层球面网壳平、剖面图

该球面网壳杆件为 $\phi 140 \times 4.5$ 热轧无缝钢管,钢材为 Q235 号钢,网壳所有杆件的管径均相同,构件制作精确;节点采用空心球焊接节点,钢材为 Q235 号钢;支座为固定支座,点支承,所以计算时把节点当作铰接点考虑;施工过

程规范,故不考虑施工初应力;网壳荷载仅考虑其自重;由于该球面网壳是联方网格,结构对称,荷载均匀,支座是点支承,所以每一圈中所有的斜向杆内力都相等,所有的环向杆内力也都相等。该网壳采用逆作法施工,网壳的吊点位置始终在顶圈的节点上,共24点,如图2。吊点限制z方向的竖向位移,网壳顶点限制x,y方向的水平位移。为吊装需要,在场地上设置四根把杆。

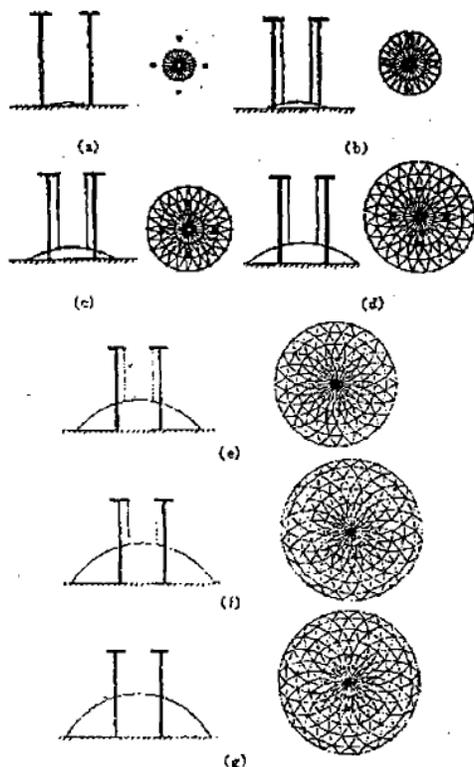


图2 逆作法安装球面网壳施工过程前、俯视图

在图2中,施工安装顺序从(a)~(f)表示逐圈安装的过程,(g)表示安装完毕后放开吊索,网壳搁置在地面上。下面就根据这个顺序分阶段计算各杆件的内力,并约定 N_i 为阶段施工内力; N 为施工内力:

$$N = \sum_{i=1}^n N_i \quad (i = 1, 7)$$

网壳形成过程中的阶段施工内力见表1。由于是小变位,不考虑非线性影响,所以结构的构件施工内力在施工过程中是一个逐步变化的过

程。因此,把表1的数据逐个叠加,就得到构件安装后的施工内力,如图3,4所示。

表1 阶段施工内力 N_i (kN)

| 杆件 编号 | 安装圈数 | | | | | | |
|----------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| | 一 | 二 | 三 | 四 | 五 | 六 | 七 |
| HG1 | | | | | | -4.06 | 0 |
| XG1 | | | | | | 1.02 | -9.64 |
| HG2 | | | | | -5.24 | -7.84 | 7.51 |
| XG2 | | | | | 1.05 | 2.27 | -8.19 |
| HG3 | | | | -6.7 | -10.01 | -5.70 | 3.75 |
| XG3 | | | | 1.13 | 2.48 | 2.69 | -6.87 |
| HG4 | | | -8.87 | -13.67 | -8.14 | -8.62 | -0.08 |
| XG4 | | | 1.32 | 2.94 | 3.25 | 3.51 | 5.64 |
| HG5 | | -13.04 | -22.09 | -15.38 | -16.86 | -18.25 | -5.58 |
| XG5 | | 1.74 | 3.94 | 5.09 | 5.27 | 5.45 | -4.20 |
| HG6 | 13.14 | 13.06 | 29.72 | 33.66 | 36.85 | 39.91 | -9.47 |
| XG6 | -3.44 | -0.13 | -0.14 | 0.14 | 0.04 | -0.02 | -5.38 |

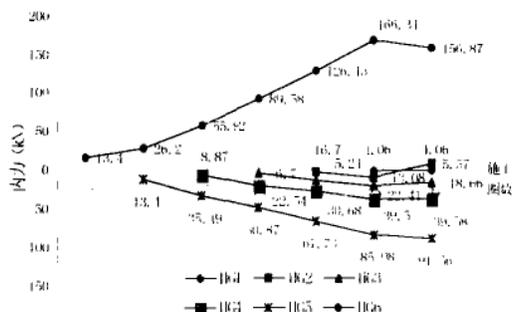


图3 环向杆施工内力变化图

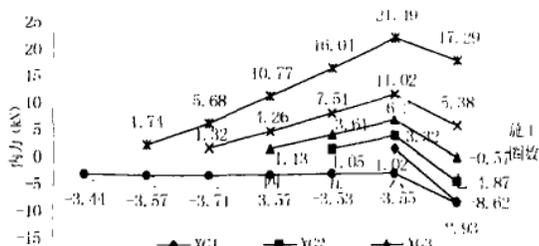


图4 斜向杆施工内力变化图

3、逆作法施工内力和设计内力比较

施工完成后,由网壳自重所形成的构件内力数据汇总见表2。其中构件实际使用内力值 N_2 等于构件施工内力的终值。 N_S 为自重作用下逆作法构件施工内力最大值, N_f 为自重作用下全支架法构件实际使用内力值。

三、结论

1、自重荷载所产生的部分使用内力与网壳的安装方法有直接关系。结构若按不同的施工方

法进行安装,那么同一构件在结构整体形成后的实际内力是不同的。只有全支架安装法形成的结构实际内力与常规的设计计算值相同,而逆作法则不一样,在有些构件上的差别会非常大。因此,逆作法施工一定要进行严格的施工设计。

表2 各种内力值比较(kN)

| 杆件 | N_s | N_d | N_i |
|-----|--------|--------|--------|
| HG1 | -4.06 | -4.06 | 0 |
| XG1 | -8.62 | -8.62 | -9.64 |
| HG2 | -13.08 | -5.57 | 7.51 |
| XG2 | -4.87 | -4.87 | -8.19 |
| HG3 | -22.41 | -18.66 | 3.75 |
| XG3 | 6.30 | -0.57 | -6.87 |
| HG4 | -39.58 | -39.58 | -0.08 |
| XG4 | 11.02 | 5.38 | -5.64 |
| HG5 | -91.56 | -91.56 | -5.58 |
| XG5 | 21.49 | 17.29 | -4.20 |
| HG6 | 166.3 | 156.8 | -97.47 |
| XG6 | -8.93 | -8.93 | -5.38 |

2、逆作法在结构的安装过程中,只有已安装好的构件参加工作,未安装好的构件并不参与结构的工作,所以结构的整体空间共同工作体系并未形成。而常规的结构设计一般是以所有的相关构件同时参与整体空间共同工作为前提,所以构件设计内力与用逆作法安装的构件实际内力是不同的。

3、在结构安装过程中,构件的施工内力是动态变化的,其值的变化是一个由阶段施工内力

逐步叠加的过程。但施工内力的绝对值变化以及拉压性质的改变取决于结构构件的具体部位。对网壳的某些部位来说,施工内力的终值不一定是最大值。

4、对逆作法和其他安装方法来说,自重荷载以外的其它荷载所产生的结构使用内力是一样的,因为它们的边界条件和受力状态是一致的。结构的构件实际内力值应等于自重荷载与其它荷载所产生的部分使用内力之和。其中自重荷载所产生的部分使用内力等于结构全部安装完毕后施工内力的终值。

5、网壳结构在施工中部倒塌事故有许多就是因为没有进行有效的施工设计造成的。这一点应当引起设计人员和施工人员的高度重视。在网壳逆作法安装的施工设计中,不仅要计算把杆、吊索、起重设备的承载能力,而且还要考虑网壳结构构件施工内力的变化情况。如果初始方案的施工内力值与设计内力值相差很大,那就应该修改施工方案。通过确定合理的施工顺序、调整吊点的位置和数量、使构件的施工内力值与设计内力值尽可能相符。只有这样才能对结构在施工中的受力过程进行有效控制,以确保结构在施工阶段及使用阶段的安全。

参考文献

- 1、Akire Wada, Zhu Wan Influences of Uncertainties on Mechanical Behavior of a Double-Layer Space Truss. International Journal of Space Structures, 1992.7(3)。
- 2、尹德钰 提高设计施工质量促进空间结构发展,《空间结构》,1995,5。
- 3、刘善维、张树民、尹卫泽等 一个球面组合网壳工程的事故剖析,《空间结构》,1995,11。

注:本文原载于《建筑结构》1998年第6期