

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.S2.006

某复杂大跨度站房屋盖结构静力加载试验模型设计

周家伟^a, 郑晓清^a, 董石麟^b, 赵阳^b, 丁超^b

(浙江大学 a. 建筑设计研究院有限公司; b. 空间结构研究中心, 杭州 310027)

摘要: 主次桁架、变椭圆截面钢斜柱、钢管格构式斜柱、单层椭球壳和鱼眼形结构共同组成了一复杂大跨度站房屋盖结构。为进一步了解结构的力学性能, 对该结构进行了试验模型设计并完成了模型静力加载试验。模型设计过程中, 在结构纵向截取有代表性的基本单元, 其涵盖了屋盖的主要结构特征, 并制作了 1:20 的大比例缩尺模型。在模型设计中利用相似原理进行了各参数相似比的确定, 然后进行了屋盖结构与下部结构间的支座条件模拟。为验证缩尺模型的合理性, 对实际模型与试验模型采用有限元软件进行了相似原理验证。验证结果表明: 缩尺结构模型能够反应实际结构的基本受力性能。该文的研究成果可为类似工程的模型试验设计与制作提供参考。

关键词: 大跨度屋盖结构; 缩尺模型; 模型试验; 相似比

中图分类号: TU356 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2016)S2-0024-06

Design of static load test model for a complex large span rail-way station

Zhou Jiawei^a, Zheng Xiaoqing^a, Dong Shilin^b, Zhao Yang^b, Ding Chao^b

(a. Architectural Design and Research Institute Co., Ltd; b. Space Structures Research Center, Zhejiang University, Hangzhou 310027, P. R. China)

Abstract: The primary and secondary truss, inclined elliptical section steel column, steel pipe lattice type inclined column, single-layer ellipsoidal shell and fisheye structure together to form a complex of large span station buildings. In order to further understand the mechanical properties of the structure, the test model of the structure was designed and the model of static loading test was completed. The model design process, basic unit of structure in vertical interception, which covers the main structural characteristics of the roof, and made 1 to 20 large scaled model. In the model design, the similarity ratio of each parameter is determined, and then the support condition between the roof structure and the lower structure is simulated. In order to verify the rationality of the scale model, the actual model and test the model using the finite element software to verify the similarity principle. The verification results show that the scale structure model can the basic mechanical behavior of the actual structure of the reaction. The research results of this paper can provide reference for the design and manufacture of similar engineering model test.

Key words: large-span roof structure; scale model; model test; similarity scales

某复杂大跨度站房屋盖结构东西进深 463.5 m, 南北面宽 143.6 m, 站房主体最高点距地面 39.6 m。屋盖结构采用由变椭圆截面斜钢柱和钢管格构斜柱支承的大跨度钢管相贯桁架结构, 屋盖结构布置如图 1 所示。该站房屋盖结构主要有以下技术特点和

难点: 1) 屋盖主要由沿轨道方向的横向主桁架及与之垂直方向的纵向主桁架组成, 主桁架间距较大(最小、最大间距分别约为 43 m、68 m), 主桁架之间的区域除了常规的次桁架和联系梁, 还有鱼眼形结构和单层网壳结构, 结构构成较为复杂; 2) 整个屋盖由

三种类型的变椭圆截面斜钢柱和两种类型的大型钢管格构式斜柱支承,且部分斜钢柱以高架层柱顶为基础,结构的支承条件十分复杂;3)钢管格构式斜柱节点、钢管格构式斜柱与屋盖连接节点、变椭圆截面钢斜柱与屋盖连接节、变椭圆截面钢斜柱与高架层柱顶连接节点、单层网壳杆件相交节点等各类连接节点均十分复杂。

因此,该复杂大跨度屋盖结构的计算、分析与设计均存在较大难度。为确保工程安全、可靠、经济,同时又能满足加工制作、施工安装方便以及建筑美观等方面要求,对结构整体受力性能进行模型试验研究是十分必要的。本文根据结构特点、技术要求、试验场地等因素,确定试验模型尺寸、缩尺比例、杆件截面、节点构造、边界条件等相关参数,并完成了结构模型试验设计。

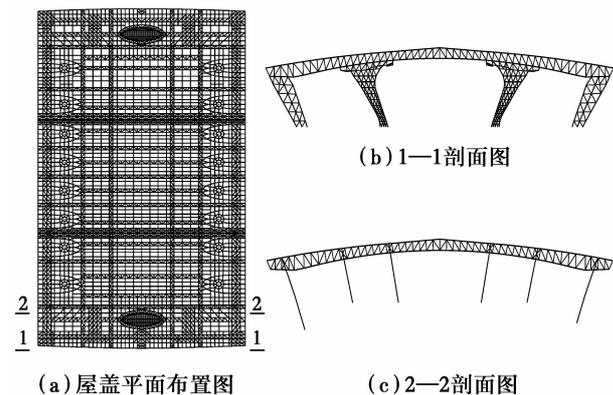


图 1 站屋盖结构布置图

1 模型设计

站房屋盖结构长度方向的中间大部分为标准单元。为减小试验模型的规模,试验模型在结构纵向截取有代表性的单元,涵盖结构横向一排格构柱和中间两排椭圆形变截面柱,长度约 131.3 m,模型内还涵盖了单层椭圆网壳、鱼眼结构等具有代表性的结构形式。前期经与各方沟通,确定模型缩尺比为 1:20,缩尺后试验模型的总体平面尺寸为:长 14.2 m、宽 6.6 m,如图 2 所示。

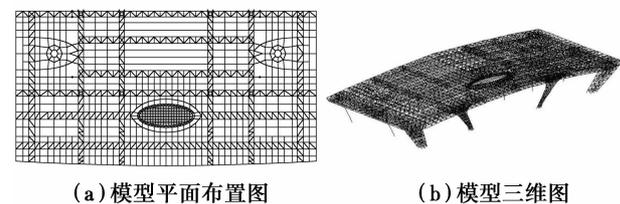


图 2 试验模型结构图

1.1 模型相似比^[1-3]

建筑结构模型试验所采用的模型,是仿照实际结构按一定相似关系复制而成的代表物,它具有实际结构的全部或部分特征。考虑现有试验设备,加载条件并结合试验场地大小等因素,确定模型几何相似比为 $c_l = 1/20$ 。试验模型一般应满足几何相似、物理相似和物理过程相似。对于本结构屋盖是一种交叉桁架体系,其杆件主要受轴力作用,故本缩尺模型以构件轴向应力一致的原则来进行构件截面的选取。截面相似比的理论推导如下:

以单榀桁架为分析对象,假定荷载为均布面荷载 q ,在该荷载作用下桁架上、下弦杆应力为

$$\sigma = \frac{M}{hA} = \frac{\alpha(qb)l^2}{hA} \quad (1)$$

式中: M 为桁架弯矩; h 为桁架高度; A 为杆件面积; α 为不含量纲的常数; (qb) 为均布面荷载转变为一榀桁架上的均布线荷载; l 为跨度。

设原型结构中的荷载为 q_p ,杆件截面面积为 A^p ,桁架高度为 h^p ,跨度为 l^p ,面荷载作用宽度为 b^p ,应力为 σ^p ;模型结构中的荷载为 q^m ,构件截面面积为 A^m ,桁架高度为 h^m ,跨度为 l^m ,面荷载作用宽度为 b^m ,应力为 σ^m 。考虑到原型和试验模型的相似关系,可得到下列关系式

$$\begin{aligned} q^m &= C_q q^p & A^m &= C_A A^p \\ h^m &= C_h h^p & l^m &= C_l l^p \\ b^m &= C_b b^p & \sigma^m &= C_\sigma \sigma^p \end{aligned} \quad (2)$$

式中: c_q, c_A, c_h, c_l, c_b 和 c_σ 分别为荷载、构件截面积、高度、长度、宽度和应力的相似常数。因为 c_h, c_l 和 c_b 均为几何长度相似比,可以得到 $c_l = c_h = c_b$ 。把公式(1)改写为

$$\alpha = \frac{(qb)l^2}{hA\sigma} \quad (3)$$

式(3)是无量纲比例常数,即相似准数。由此试验模型和原型有如下关系式成立

$$\frac{(q^m b^m)(l^m)^2}{h^m A^m \sigma^m} = \frac{(q^p b^p)(l^p)^2}{h^p A^p \sigma^p} \quad (4)$$

将式(2)代入式(4),则得到一个相似条件

$$C_\sigma = \frac{C_q C_l^2}{C_A} \quad (5)$$

其中, $c_l = 1/20$,则杆件截面面积缩尺比需满足下述条件

$$c_A = \frac{c_q}{c_\sigma} \left(\frac{1}{20} \right)^2 \quad (6)$$

1)荷载相似比的确定 实际结构中,“1.2 恒+1.4 活”这一荷载工况下均布荷载设计值约为 1.7

kN/m²。在 1/20 缩尺模型中,如果按此设计工况共需施加 15.9 t 荷载,综合考虑实验室加载条件,将荷载相似比取为: $c_q = 3$,即在模型全跨加载试验中共加载 47.7 t。

2) 应力相似比的确定 考虑模型试验材料(20 #、Q235)与原型结构(Q345)材质的差别,将应力比取为 $c_\sigma = 0.7$ 。

将 $c_q = 3$, $c_\sigma = 0.7$ 代入式(6),可得杆件面积相似比为 $c_a = 0.0107$ 。

1.2 杆件规格

实际结构中大多数杆件均采用 Q345 钢材,杆件分别为圆管、矩形管和椭圆形变截面管这 3 种截面形式,杆件规格较多。综合考虑杆件截面形状相似、面积相似比、试验条件、产品质量、产品规格、产品购买周期、原型截面尺度和制作加工工艺等因素来确定模型圆管和矩形管截面规格和材料材质,所选截面规格及钢材材质如表 1、表 2 所示。为真实反映变椭圆截面钢斜柱的受力性能,模型试验中椭圆斜柱采用卷曲钢板形成椭圆形截面管件模拟,所采用的椭圆管截面规格及钢材材质如表 3 所示。

表 1 模型结构圆钢管截面配置

编号	实际结构 杆件截面	模型试验 杆件截面	模型试验 材料牌号
1	P102x3.5	P16x2	20 #
2	P127x4	P16x2	20 #
3	P159x4	P16x2	20 #
4	P180x5	P16x2	20 #
5	P219x5	P16x2	20 #
6	P180x8	P16x2	20 #
7	P245x7	P16x2	20 #
8	P180x10	P16x2	20 #
9	P203x10	P16x2	20 #
10	P219x10	P16x2	20 #
11	P299x8	P16x2	20 #
12	P245x10	P16x2	20 #
13	P219x12	P16x2	20 #
14	P273x10	P16x2	20 #
15	P245x12	P21x3	20 #
16	P299x10	P21x3	20 #
17	P273x12	P21x3	20 #
18	P325x10	P21x3	20 #
19	P351x10	P21x3	20 #

续表 1

编号	实际结构 杆件截面	模型试验 杆件截面	模型试验 材料牌号
20	P351x12	P21x3	20 #
21	P273x16	P21x3	20 #
22	P299x16	P21x3	20 #
23	P400x12	P21x3	20 #
24	P325x16	P32x3	20 #
25	P351x16	P32x3	20 #
26	P377x16	P32x3	20 #
27	P400x16	P32x3	20 #
28	P700x10	P32x3	20 #
29	P500x16	P32x3	20 #
30	P377x25	P32x3	20 #
31	P400x25	P32x3	20 #
32	P500x20	P42x3	20 #
33	P700x16	P42x3	20 #
34	P500x25	P42x3	20 #
35	P800x16	P51x3.5	20 #
36	P700x25	P51x3.5	20 #
37	P600x30	P51x3.5	20 #
38	P700x35	P57x5	20 #

表 2 模型结构矩形钢管截面配置

编号	实际结构 杆件截面	模型试验 杆件截面	模型试验 材料牌号
1	B250x120x16	B25x12x2	Q235B
2	B200x200x16	B20x20x2	Q235B
3	B400x400x20	B40x40x2	Q235B
4	B400x500x20	B40x40x2	Q235B
5	B500x500x30	B50x50x3	Q235B
6	B500x650x30	B50x50x3	Q235B
7	B2000x2000x25	B200x200x3	Q235B

表 3 模型结构椭圆管截面配置

编号	实际结构 杆件截面	模型试验 杆件截面	模型试验 材料牌号
	T2552x1270x40	T120x60x6	Q235B
TZ1	T4300x1700x35	T190x70x6	Q235B
	T5700x4320x30	T240x180x6	Q235B
	T5808x4928x25	T260x220x6	Q235B
	T2192x1524x50	T110x80x6	Q235B
TZ2	T2778x2042x50	T140x100x6	Q235B
	T3360x2554x40	T180x130x6	Q235B
	T2192x1512x50	T110x80x6	Q235B
TZ3	T2818x2036x50	T140x100x6	Q235B
	T3600x2692x40	T180x130x6	Q235B

1.3 柱脚连接的模拟

主站房结构中椭圆斜柱和倾斜格构柱的平面布置如图 3 所示。其中 TZ2 和 TZ3 支承于结构标高为 9.700 m 的高架层,其余柱子支承于地面。准确模拟各柱脚的连接刚度对于试验模型十分重要,这也是模型设计的难点之一。为真实反应柱脚连接刚度对结构整体受力性能的影响,对各柱的柱脚连接方式做如下处理。

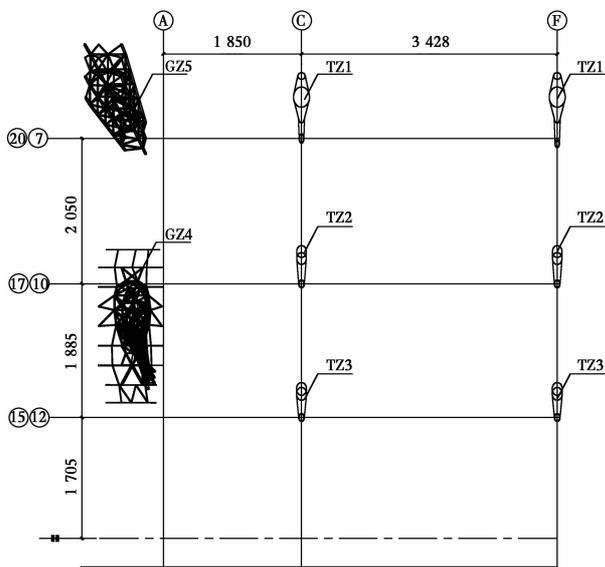


图 3 柱平面布置图

1.3.1 变椭圆截面钢斜柱与高架层的连接 实际工程中变椭圆截面钢斜柱 TZ2 和 TZ3 支承于高架层,因此柱脚连接并不是完全刚接。要完全反映工程实际情况,就需要在试验模型中建立下部高架层结构,这显然过于复杂,模型中几乎不可能实现,也是没有必要的。本试验模型一方面考虑了变椭圆截面钢斜柱 TZ2 和 TZ3 与高架层连接刚度对结构整体受力特性的影响;另一方面,根据实际工程中的高架层位置在变椭圆截面钢斜柱 TZ2 和 TZ3 下部建立钢结构支承平台,以简化实际结构中的高架层对屋盖结构受力性能的影响。模拟高架层的钢结构支承平台平面布置,如图 4 所示。带支承平台的结构整体模型,如图 5 所示。

1.3.2 柱脚与地面的连接 为使变椭圆截面钢斜柱 TZ3、倾斜格构柱 GZ4~GZ5、支承平台的钢柱与地面形成刚性连接,拟跨越结构试验室地槽设置三道焊接工字钢地梁,通过地锚将地梁与地槽进行连接,并将各柱脚固接于地梁上,以此来模拟柱脚连接。地梁平面布置,如图 6 所示。

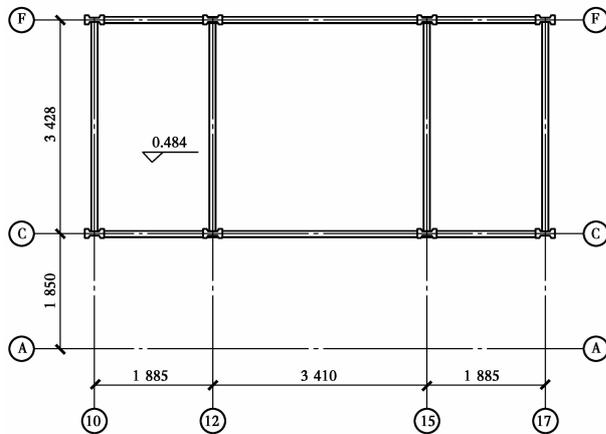


图 4 支承平台平面布置图

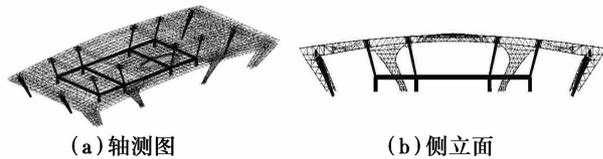


图 5 试验整体模型

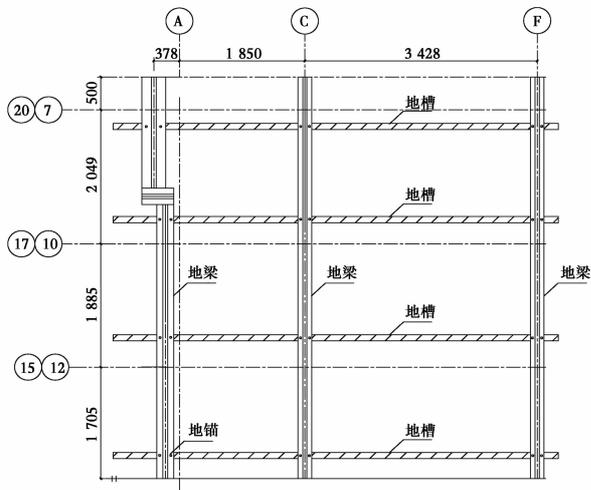


图 6 柱脚与地面连接

2 模型验证

为了验证截取模型的合理性及试验模型有限元分析的正确性,分别采用了 Sap 模型、Midas 模型和 Ansys 模型进行了有限元分析验证。

2.1 截取模型合理性验证

如前所述,主站房屋盖结构总体平面尺寸为 514.735 m×274.748 m,而试验模型在结构纵向仅截取有代表性的单元,涵盖结构横向一排格构柱和中间两排椭圆形变截面柱,长度约 131.287 m。为了得出简洁、有效的截取模型,拟去除主站房屋盖结构下部的高架层等部分结构,并用钢结构支承平台

来模拟高架层与椭圆柱柱脚连接刚度对上房屋盖结构的受力性能影响。

为合理确定高架层与 TZ2、TZ3 的连接刚度,首先对实际结构的整体模型(总体平面尺寸为 $514.7\text{ m} \times 274.7\text{ m}$,且采用梁、板单元严格模拟下部高架层结构中的柱、梁和楼板等构件)与截取结构模型(平面尺寸为 $131.3\text{ m} \times 274.7\text{ m}$,不再严格模拟下部高架层等结构,而是以适当刚度的钢结构支承平台来代替)的受力性能进行有限元分析比较。实际结构的 Sap 有限元模型见图 7(a),截取的简化结构 Sap 有限元模型见图 7(b)。通过调整钢结构支承平台各构件的截面尺寸,使截取的简化结构与实际结构的竖向位移尽可能接近,从而实现高架层对上房屋盖结构受力影响的近似。

图 7(c)和图 7(d)分别给出了实际结构和截取结构在结构自重作用下的竖向位移分布图,可见截取结构与实际结构的位移分布基本一致,且最大竖向位移分别为 -109.17 mm 和 -108.125 mm ,差距仅为 1%。因此用截取的简化结构来代替原结构进行受力性能的分析是可行的。

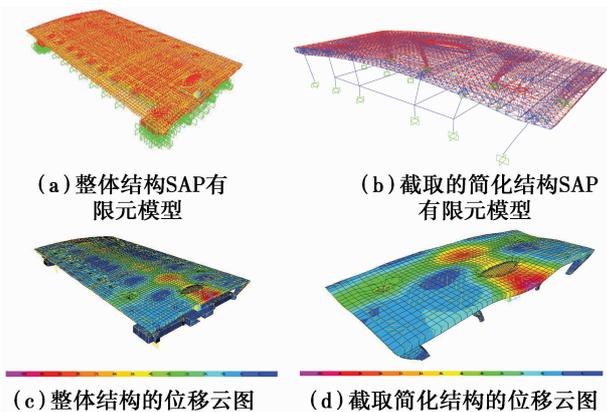


图 7 有限元分析结果

2.2 有限元缩尺模型正确性验证

为了验证有限元缩尺模型的正确性,以用于与模型试验结果的对比分析,分别建立了 Midas 和 Ansys 有限元模型,且分析了截取简化缩尺模型在 13 倍自重的配重下竖向位移响应,见图 8(a)和图 8(b),可以看出两者结果非常接近,因此其所建立的有限元模型是可靠的。

2.3 缩尺模型与实际结构关系的验证

为了验证缩尺模型的合理性,对实际模型与试验模型的相似原理进行验证。此处采用了两者的竖向位移云图及位移峰值进行验证。上部屋盖一榀桁

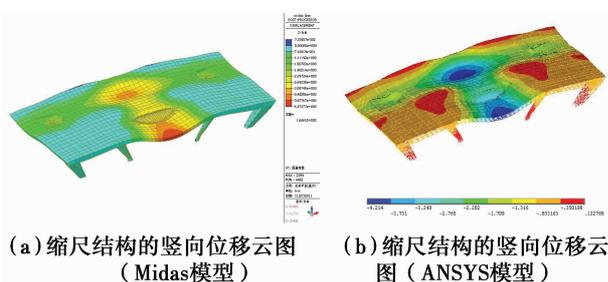


图 8 有限元分析结果

架的竖向位移,可近似为: $s = \frac{\alpha(qb)l^4}{\beta EI} = \frac{\alpha(qb)l^4}{\beta EA h^2}$,其中, $c_A = 0.0107$, $c_l = c_i = 1/20$, $c_q = 3$,可以推出: $c_s = 0.035$ 。即试验模型在 3 倍原结构设计荷载条件下,其位移值是原结构在设计荷载作用下的 0.035 倍。

这里对实际结构在自重荷载作用下及试验缩尺模型按相似理论考虑配重条件下的竖向位移值进行了计算,结果分别见图 9(a)和图 9(b)。可以看出两者竖向位移云图基本一致,原结构最大竖向位移为 -105.64 mm ,缩尺模型的最大竖向位移为 -4.21 mm ,两者比值为 0.040,与理论比值 0.035 接近。杆件截面的归并及对屋盖结构求解杆件内力和位移公式的简化,可能是导致该部分差异的原因。因此采用相似理论确定的缩尺结构模型能够反应实际结构的基本受力性能。

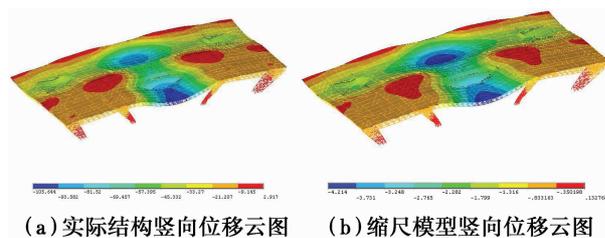


图 9 有限元分析结果

3 结论

1) 站房屋盖结构总体平面尺寸为 $514.7\text{ m} \times 274.7\text{ m}$,在结构纵向截取有代表性的单元,涵盖结构横向一排格构柱和中间两排椭圆形变截面柱,以及单层椭圆面网壳、鱼眼结构等代表性结构。截取结构长度 131.3 m ,可以基本真实、全面地反映整体结构的主要受力性能。

2) 综合考虑试验设备、加载条件以及试验场地大小等因素,确定试验模型缩尺比为 1:20,缩尺后试验模型的总体平面尺寸为长 $14.2\text{ m} \times$ 宽 6.6 m 。

3) 去除主站房屋盖结构下部的高架层等部分结

构后,采用钢结构支承平台来模拟高架层与椭圆柱脚连接刚度对上部屋盖结构的受力性能影响的简化模型是合理可行的。缩尺后的简化模型静力计算结果,基本符合相似性原理。

4)分别对试验模型采用 Ansys 与 Midas 两种软件建模、计算和对比,验证了后续分析中所采用的 Ansys 有限元整体模型的正确性,可应用此模型的分析结果与模型试验结果进行对比分析。

参考文献:

- [1] 王柏生. 结构试验与检测[M]. 杭州:浙江大学出版社,2007.
- [2] 傅恒箴. 建筑结构试验[M]. 北京:冶金工业出版社,1992.
- [3] 王济川. 建筑试验与检测[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2007.

(编辑 吕建斌)