

文章编号: 1005-0523(2006)01-0024-05

上海铁路南站屋盖结构风致响应研究

胡光祥

(上海铁路局工程建设中心, 上海 200071)

摘要: 随着建筑科技和施工工艺的逐渐进步, 大量形式新颖、质量轻、柔性大的大跨度屋面不断涌现, 这些结构形式丰富多彩, 且采用了许多新材料和新技术, 发展了许多新的空间结构形式. 正在建设的上海铁路南站是其中之一. 但大跨度屋盖结构因具有质量轻、柔性大、阻尼小等特点, 风荷载是其结构设计的控制荷载. 通过对铁路南站站屋屋盖风洞试验和有限元分析, 得出的结论供结构设计研究, 在建设过程中取得良好的结果.

关键词: 铁路站屋; 屋盖结构; 风洞试验; 研究

中图分类号: TU37

文献标识码: A

随着建筑科技和施工工艺的逐渐进步, 大量形式新颖、质量轻、柔性大的大跨度屋面不断涌现, 这些结构形式丰富多彩, 且采用了许多新材料和新技术, 发展了许多新的空间结构形式. 如弧状屋面由于其优美的造型, 被广泛应用于车站、体育馆等大型公共设施. 许多宏伟而富有特色的大跨度建筑已成为当地的标志性建筑和著名的人文景观.

大跨度屋盖结构因具有质量轻、柔性大、阻尼小等特点, 风荷载是其结构设计的控制荷载. 另外, 在大气边界层中, 这类结构处于高湍流度区, 而由于其独特的建筑外型, 其绕流和空气动力作用非常复杂, 结构极易发生大幅振动. 弧状屋面的局部风压系数、屋面内外压及体型系数, 对屋面材料选择和屋面整体设计至关重要, 具体的计算方法一般采用非线性有限元分析方法, 但理论上还不够成熟. 因此, 很有必要对结构进行风致响应分析.

1 大跨度屋盖结构风致响应特征

一般来说, 大跨度屋盖结构的外型复杂, 模态密集, 其动力响应和等效风荷载的试验、分析非常

复杂. 大跨度屋盖结构动力响应及动力等效风荷载分析有如下主要特点:

- 1) 基于准定常假定的动力响应分析方法用来计算大跨度屋盖的风致响应是不合适的;
- 2) 背景和共振部分一般都不可忽略, 并且共振部分包含多个模态的贡献;
- 3) 由于模态密集、阻尼小, 振型之间的交叉项不可忽略.

本研究基于这些特点, 开发了包括试验方法、分析方法和基于 ANSYS 软件的计算程序系统, 应用于上海铁路南站的动力响应和等效风荷载分析.

2 上海铁路南站工程特征

上海铁路南站作为适应二十一世纪需求的标志性建筑, 是上海铁路枢纽规划的南大门, 也是上海市规划的重要对外交通枢纽和市内换乘枢纽. 该项目位于柳州路、沪闵高架、桂林路及石龙路围成的区域之中. 其主站屋为一圆形建筑, 直径为 270 米. 工程总建筑面积约为 56 000 平方米, 建筑层数为地下一层、地上二层. 结构形式为框架结构, 其中

收稿日期: 2005-08-20

作者简介: 胡光祥(1965-)浙江象山人, 高级工程师.

9.9 米标高以下为钢筋混凝土框架结构,9.9 米标高以上则为由内外两圈钢柱支撑的大跨度钢结构屋面,内圈直径为 150 米,外圈直径为 220 米,屋面外挑约为 23 米,屋面中部设有直径 26 米的中心内压环。由于该钢结构屋面呈曲线型,且内圈及外挑跨度均较大,而屋面的相对刚度较小,因此该结构属风载敏感结构,风荷载是控制结构设计的主要荷载之一。为保证结构安全,委托同济大学土木工程防灾国家重点实验室结构风效应研究室,对这一大跨度结构的刚性模型进行了风洞实验。

3 风致响动力分析的方法和要点

本研究对上海南站工程屋盖结构进行风致响应和等效风荷载分析的主要过程如下:

1) 根据刚体模型脉动风压同步测量的风洞试验结果,分析了各测点脉动风压的功率谱密度函数,并严格按照相似比关系换算到实际风场中;

2) 根据刚体模型脉动风压同步测量的风洞试验结果,分析了各测点脉动风压之间的互功率谱密度函数,并严格按照相似比关系换算到实际风场中;

3) 华东建筑设计研究院有限公司提供的有限元模型准确地模拟了实际结构的性能;

4) 为了简化计算,将所有压力测点进行局部合并为 198 个荷载输入点,再进行结构响应计算;

5) 采用通用有限元分析软件 ANSYS 中的随机振动分析模块进行结构分析,分析中考虑了振型之间的交叉项的影响;

6) 考虑了预应力对结构刚度的影响;

7) 计算给出 198 个荷载输入点的动力位移响应,以及对应某些较大响应的阵风荷载因子。

建筑模型风洞试验要求在风洞中模拟大气边界层风场。根据铁路南站周围数公里范围内的建筑环境,本试验的大气边界层流场模拟为 B 类地貌风场。本研究的风洞实验模型的几何缩尺比取为 1/200,试验风速比为 1/3.37,由此导出频率比为 1/59.35。各点的脉动压力自功率谱和互功率谱函数依据这些相似比换算到实际风场中。

4 结构参数的选取

计算结构风振响应所取的风速参数和结构参数见表 1。

表 1 结构参数的取值

参数名称	参数取值
地貌类型	B 类
基本风压(50 年重现期)	0.55 kPa
计算风速(50 年重现期,10 米高度)	29.67 米/秒
阻尼比	0.02
峰值因子	3.5

5 计算工况的选取

根据结构的对称性、周边环境的特点(见图 1)以及对风洞试验结果的分析,选取了 12 个典型风向角下的工况进行动力计算:0°、30°、60°、90°、120°、150°、180°、210°、240°、270°、300°、330 度风向角。



图 1

6 荷载输入点的布置

为了简化计算,将所有压力测点进行局部合并为 198 个荷载输入点,再进行结构响应计算。图 2 给出了 198 个荷载输入点的位置。风荷载由包含在输入点附属面积内的刚性试验模型测压点的风压力经过平均得到,以集中力的方式施加在有限元模型相应的荷载输入点上。与图 2 荷载输入点对应的 ANSYS 有限元模型节点编号由表 2 给出。

表 2 荷载输入点和 ANSYS 模型节点对应表

荷载输入点号	节点号	荷载输入点号	节点号	荷载输入点号	节点号
1	7 435	41	5 582	81	2 583
2	7 459	42	5 666	82	2 470
3	7 517	43	5 624	83	529

7 风致响应分析及静力等效风荷载

7.1 模态分析结果

图3给出了有代表性的前几阶振型.由图可知,屋盖结构的一阶频率为0.652 Hz,振型为翘曲;在0.652 Hz和1 Hz频率之间存在14阶频率,振型非常密集.

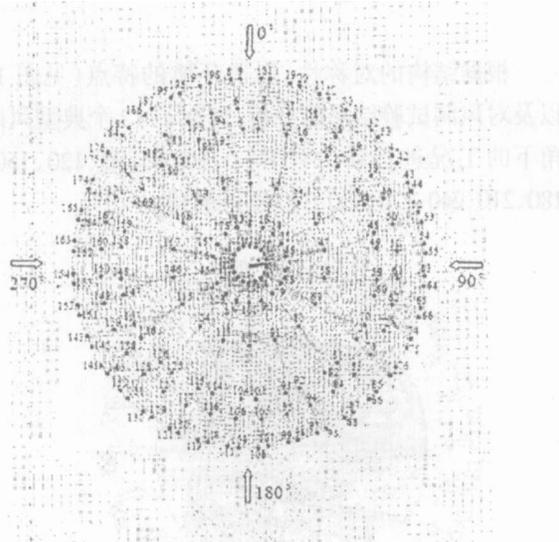


图2 荷载输入点位置

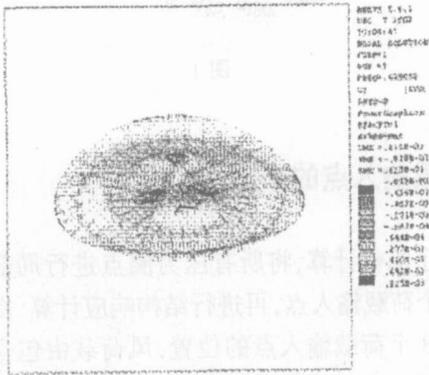


图3 有代表性的前几阶振型

7.2 静力和动力位移响应

图4为0度风向角时屋盖结构在平均风荷载作用下的变形图.可见,迎风侧悬臂端向上的位移值很大,而下风侧悬臂端也有较大的向下的位移.其它风向角下结构的平均位移变形图与此大致相同,这里不再列出.

图5为0度风向角时屋盖结构在动力风荷载作用下的振动位移图.其变形特点和屋盖结构在平均风荷载作用下的变形图相似.其它工况下的振动变形图与此大致相同.

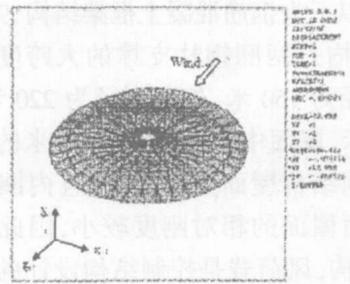


图4 0度风向角下平均风压力下的变形图 (包含预应力的变形)

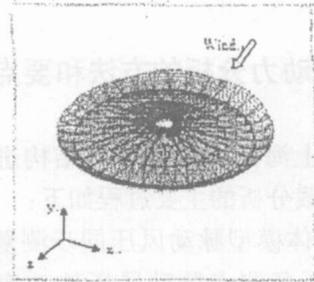


图5 为0度风向角下动力计算的变形图

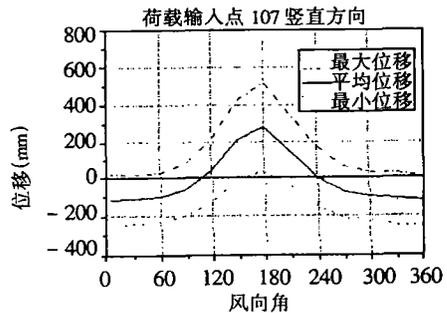
图6给出了部分荷载输入点的平均位移响应以及最大位移响应 R_{max} 、最小位移响应 R_{min} 随风向角变化的规律.这里最大位移 R_{max} 和最小位移 R_{min} 定义为

$$R_{max}(x, y, z) = \bar{R}(x, y, z) + g\sigma_R(x, y, z)$$

$$R_{min}(x, y, z) = \bar{R}(x, y, z) - g\sigma_R(x, y, z)$$

式中 $\bar{R}(x, y, z)$ 为某点的平均响应; g 为峰值因子,取3.5; $\sigma_R(x, y, z)$ 为计算得到的某点均方根动力位移.

从图6可知,当屋盖悬臂端处于来流的前缘(迎风侧)或者后缘(背风侧)时,其竖向位移的静力和动力位移响应比较大,立柱的水平位移也有相同的规律.



(1)0度风向角有极值位移的荷载输入点
图6 荷载输入点的位移响应随风向角变化的曲线

图7给出了部分荷载输入点在最大响应时的功率谱.可见,每个荷载输入点的动力响应包含有较

多的频率成分,并且背景分量(低于 0.6 Hz 的低频部分)和共振分量(0.6 Hz 以上的部分)都很明显.

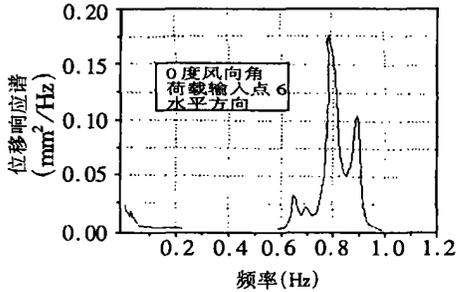


图 7 荷载输入点的位移响应谱

表 3 列出了 198 个荷载输入点的静力和动力位移响应的详细结果(对应于 50 年重现期,10 分钟风速). x, y, z 坐标的方向见图 4, x, z 为水平方向, y 为竖直方向. “Peak” (R_{peak}) 表示峰值位移,取 R_{max}, R_{min} 中绝对值较大的那一个. 由表可见,结构上的最大平均位移发生在风向角为 120 度时前缘(迎风侧)悬臂端的竖向位移,其值为 410.7 mm. 而最大均方根动力位移发生在风向角为 90 度时前缘(迎风侧)悬臂端的竖向位移,其值为 102.3 mm. 最大峰值位移发生在风向角为 90 度时的前缘(迎风侧)悬臂端的竖向位移,其值为 752.4 mm.

表 3 荷载输入点的位移计算结果表(单位:mm)

Angle	l(node 7435),x			l(node 7435),y			l(node 7435),z		
	Mean	Rms	Peak	Mean	Rms	Peak	Mean	Rms	Peak
0	2.44	6.08	23.70	9.24	24.62	95.40	2.33	8.15	30.86
30	-0.09	5.91	-20.79	14.45	23.24	95.79	0.89	7.65	27.69
60	1.26	5.94	22.06	7.29	21.73	83.35	0.38	6.99	24.84
90	1.10	6.07	22.34	8.89	24.26	93.82	-0.55	7.48	-26.74
120	1.20	5.89	21.82	15.74	24.54	101.61	-1.32	7.72	-28.35
150	0.15	5.55	19.58	15.78	23.17	96.86	-0.16	7.28	-25.65
180	-0.37	5.73	-20.43	17.55	24.24	102.40	-0.37	7.66	-27.19
210	-0.86	5.58	-20.38	23.07	23.90	106.72	-1.20	7.52	-27.53
240	-0.61	6.15	-22.12	19.85	24.37	105.14	-1.86	7.64	-28.59
270	-0.10	6.62	-23.27	18.34	24.04	102.49	-1.38	7.67	-28.23
300	1.57	6.43	24.08	17.50	23.79	100.77	-1.50	7.37	-27.29
330	2.34	6.16	23.88	14.45	24.06	98.67	0.29	7.77	27.49

7.3 阵风荷载因子法(GLF 法)及阵风荷载因子

GLF 法定义峰值位移响应与平均位移响应之比为“阵风荷载因子” G (Gust Loading Factor) 来表征结构对脉动荷载的放大作用. 作用在结构上的以某点位移响应等效的静力等效风荷载可用下式计算,

$$F(x, y, z) = G(x, y, z) \bar{F}(x, y, z) \quad (3)$$

式中, F 为平均风荷载, $G(x, y, z)$ 为阵风荷载因子, 由下式确定,

$$G(x, y, z) = \frac{R_{peak}(x, y, z)}{\bar{R}(x, y, z)} \quad (4)$$

所以

$$G(x, y, z) = 1 \pm g \frac{\sigma_R(x, y, z)}{\bar{R}(x, y, z)} \quad (5)$$

式(5)中的“±”是为了保证 σ_R 与 \bar{R} 有相同的正负号,从而保证 G 为正值.

根据以上公式和前面计算所得到的静力和动力位移结果,计算了对应于荷载输入点最大响应的阵风荷载因子,见表 4. 可见,屋盖上悬臂端竖向位移的阵风荷载因子的值基本在 2 左右,而立柱顶部水平位移的阵风荷载因子的值则稍大. 特别要注意的是,表 4 给出的阵风荷载因子 G 只适用于某一特定位置的特定响应,而不适用其他位置的响应.

表 4 50 年重现期 10 分钟风速下的结构位移响应值及阵风因子

工况名称	响应位置	\bar{R}	σ_R	R_{peak}	G
30 度风向角	前缘悬臂端(向上,荷载输入点 22)	297.1	77.4	568.0	1.91
	后缘悬臂端(向下,荷载输入点 121)	-109.1	35.2	-232.4	2.13
	柱子的水平位移(荷载输入点 18)	6.3	4.9	23.6	3.73

8 结 语

通过对上海南站工程屋盖结构风致响应的分析,得到如下结果和建议:

1) 上海铁路南站用于屋盖和外墙表面设计的风荷载主要以负压为主.

2) 在风荷载的作用下,迎风向及背风向悬臂端的平均和动力竖向位移均很大,最大平均位移为 410.7 mm,最大均方根动力位移为 102.3 mm,而最大峰值位移达到 752.4 mm,应引起设计人员的重视.

3) 上海铁路南站屋面和墙面 50、100 年重现期下的最不利负压分别为 -1.63 和 -1.78 kPa(风向角为 150 度).

4) 试验表明,上海铁路南站屋面表面测点 2-59 在 105 度风向角时负压(绝对值)达到最大值. 97.5 度和 112.5 度风向角时墙面所有测点中亦是测点 2-59 的负压最不利,50 年和 100 年重现期用于围护结构设计的最不利风压分别为 -2.02 和 -2.18 kPa,均未超过风向角 105 度时的结果.

5) 由于试验只模拟了当前的周边环境,因此严格地讲,本报告提供的风荷载只在当前周边环境状况下才是正确的,当周边环境有较大改变时,上海

铁路南站上的风荷载分布也将发生变化,在设计时应考虑这种潜在因素可能产生的影响。

参考文献:

- [1] 同济大学土木工程防灾国家重点实验室. 上海南站工程风荷载和响应研究[M]. 上海: 2002.

Wind Response Research on Roof Structure of Shanghai South Railway Station

HU Guang-xiang

(The Dept of Eng. Constructing of Shanghai Railway Administration, Shanghai 200071, China)

Abstract: With the development of building technology and techniques, more and more new types of large-span roof structures comes out, they are light, flexible and colorful. Many new space structures are being developed by means of using new materials and technologies. And Shanghai South Railway Station being built is one of these new structures. But large-span structures have the characteristics of low gravity, large flexibility and low damp. Wind load is the key to structure design. Results are acquired by wind tunnel test on model of Shanghai South Railway Station, and analysis with the ANSYS. The tests results can be used as references for roof structure design, and the production of Shanghai South Railway Station built is being achieved.

Key words: railway station; roof structure; wind tunnel test; research

(上接第7页)

5) 向固定好的混凝土护筒中回填粘土进行造浆, 然后按照反循环钻孔灌注桩的一般正常施工程序进行钻孔灌注桩的施工。

4 结束语

本工程的钻孔灌注桩在遇到人防时所采用的混凝土护筒的施工方案, 大大减少了开挖人防所带来的工程量, 而且避免了对周围建筑物的影响, 具有施工简单快捷, 省工省时, 节约费用等优点。经过桩基静载检测, 采用以上方案施工的桩身质量和单

桩竖向承载力全部符合设计要求; 实践证明, 在钻孔灌注桩施工遇到人防时, 采用此方案是行之有效的。

参考文献:

- [1] 高大钊, 赵春风, 徐 斌. 桩基础的设计方法与施工技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
[2] 杨南方, 尹 辉. 建筑工程施工技术措施[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
[3] JGJ94-94 建筑桩基技术规范[S].
[4] JGJ106-3003 JGJ106-97 建筑桩基检测技术规范[S].

Construction Technology of Drilled Grouting Pile Encounter Civil Air Defense Shelter

XIONG Guo-hui¹, CHEN Jin²

(School of Civil Eng. and Arc., East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: when drilled grouting pile encounter civil air defense shelter, authors adopted the construction plan of concrete pile casing, it guarantee the project times and quality, satisfying the design requirement.

Key words: reverse circulate drilled grouting pile; civil air defense; concrete pile casing; plan analysis; save cost