

高速铁路客站站厅层钢桁架竖向 地震振动台试验模型研究*

余志武^{1,2}, 鄢亮^{1,2}, 国巍^{1,2}, 刘汉云^{1,2}

(1. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075;
2. 高速铁路建造技术国家工程实验室, 湖南 长沙 410075)

摘要: 以天津西站典型结构为例, 提取站厅结构主要单元, 阐述可反映其抗震性能的振动台试验模型设计和制作方法。为保证试验结果可靠性, 大跨钢桁架模型严格按照相似关系和等效原则设计, 并采用 8 个相同的边桁架单元作为中间桁架单元的边界条件。比较试验模型和相应有限元模型的动力特性, 明确所设计试验模型符合要求, 能反映原型结构的竖向地震响应特征。

关键词: 房桥合一; 站厅结构; 振动台试验; 竖向地震

中图分类号: TU317 文献标志码: A 文章编号: 1672-7029(2013)05-0007-05

Shaking table test model research of long-span station hall structure of high-speed railway station under vertical earthquake excitation

YU Zhiwu^{1,2}, WU Liang^{1,2}, GUO Wei^{1,2}, LIU Hanyun^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China
2. National Engineering Laboratory for High Speed Railway Construction, Changsha 410075, China)

Abstract: The station hall of Tianjin west railway station was referred and adopted to extract the main structural units so as to elaborate the shaking table test model design and production which can reflect the seismic performance. In order to ensure the reliability of test results, the long-span steel trusses model was designed in strict accordance with the similarity relation and equivalent principle, and eight same truss units were used to be the boundary conditions of the intermediate truss unit. Comparing the dynamic characteristics of the test model with the corresponding finite element model, it is sure that the design experiment model meets the requirements and reflects vertical seismic response characteristics of the prototype structure.

Key words: integrated building-bridge structure; station hall structure; shaking table test; vertical earthquake

高速铁路客站建设要求尽可能提高旅客舒适性, 为旅客提供宽敞且功能完备的公共使用空间。目前站房的结构柱均置于股道之间, 根据列车通行的最小间距要求, 其最小柱距达 21 m; 有时受到列车通行作业的特别要求, 则需要将柱网跨度增加到

42 m 及以上。“房桥合一”高速铁路客站的站厅部分, 为大跨度结构, 通常可采用桁架结构形式, 上弦有楼板, 为候车厅, 上下弦中间为设备层, 没有预应力, 整个结构承受较大荷载, 除作为整个客站重要组成部分抵抗水平地震之外, 其自身对竖向地震也

* 收稿日期: 2013-01-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50938008, 51108466); 中国博士后基金资助项目(20110491277); 中国博士后基金特别资助项目(2012T50663); 中南大学博士后基金资助项目; 中南大学研究生学位论文创新基金资助项目

作者简介: 余志武(1955-), 男, 湖南临湘人, 教授, 从事混凝土耐久性、组合结构和抗震防灾等研究

通讯作者: 国巍(1982-), 男, 山东淄博人, 讲师, 在站博士后, 从事复杂结构抗震减震研究

较为敏感。目前已有关于大跨度地铁车站结构^[1-2]、单层球壳、柱壳等大跨度屋盖结构的振动台试验研究^[3-4],而大跨度钢桁架站厅结构的振动台模型试验尚未见相关研究和报道。国巍等在高速铁路客站抗震性能方面进行了较系统的研究工作,主要包括客站震致碰撞风险分析^[5-6]、客站模态和阻尼特征^[7]、客站减隔震控制策略^[8-9],并对客站站厅结构的竖向地震响应^[9]及多点地震输入影响^[10-11]进行了数值仿真分析,明确了新型客站竖向地震下的动力响应特征和薄弱环节。这些研究工作和成果都将为站厅结构竖向地震响应的试验研究奠定良好基础。为此,本文作者利用高速铁路多功能振动台试验系统,进行大跨度钢桁架站厅结构竖向地震激励下的振动台模型试验,获得了大跨站厅结构的竖向地震动力响应特性、屈服机制、破坏形态、耗能能力等抗震性能,为评价大跨钢桁架结构的竖向抗震性能并开展抗震设计提供了试验依据。本文重点阐述所设计大跨站厅结构的模型试件,说明其设计原则和方法,并通过振动台试验模型与有限元模型动力特性对比,明确大跨度站厅结构模型符合设计要求。

1 工程概况

为说明新型高铁客站典型站厅层的结构特征,本文将天津西站为例。天津西站高架站厅层结构南北向381.65 m,东西向一般区域宽138 m,东西向含落客区宽度188 m。东西向设置两道伸缩缝,将站厅层分为3个温度区段,分别为I区、II区、III区。温度区段II区东西向最长,达188 m。基本柱网为21.6 m×24 m,21.5 m×21 m,26.875 m×24 m,层高12.5 m。框架柱采用矩形钢管混凝土柱,内置自密实混凝土,框架梁采用平面钢桁架梁,转换梁采用实腹工字钢梁,钢桁架梁和实腹工字钢梁高3.3 m。站厅层楼板位于桁架梁上弦处,采用压型钢板混凝土组合楼板。设备层楼板位于桁架梁下弦,采用花纹钢板做设备层楼板,风机等大型设备位于此层楼板上。其对应的风管等管线可自由穿行于钢桁架梁腹杆之间,人员检修便于穿行。

2 模型选择

根据客站设计资料,适当简化了二级次梁的布置,运用SAP2000软件建立II区站厅层杆单元计算模型^[12]。除楼面布置的二级次梁外,其余杆件均采用刚接。考虑到轨道层刚度较大,对站厅层分

析时,柱底全部设定为固结。站厅层转换梁为支承上方屋盖的斜柱,采用水平约束模拟其边界条件。楼板采用薄壳单元,面荷载均匀布置在楼板上。分析模型如图1所示。

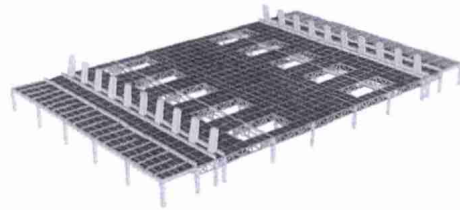


图1 天津西站站厅层结构II区分析模型

Fig. 1 Structural analysis model of region II in station hall of Tianjin West Railway Station

对站厅层II区模型进行模态分析,发现总体的竖向振动并不十分明显,且受高阶频率影响较大。考虑到振动台尺寸和模型的复杂程度,决定选出站厅层中间24 m×21.6 m部分(单个桁架单元)为模型,如图2所示。考虑到这部分模型的边界条件,同时建立了9个桁架单元模型,如图3所示。通过计算比较,选定合适的结构作为试验结构。

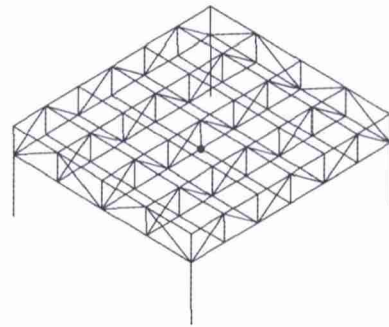


图2 高架层单个桁架单元结构分析模型

Fig. 2 Structural analysis model of single truss unit of station hall

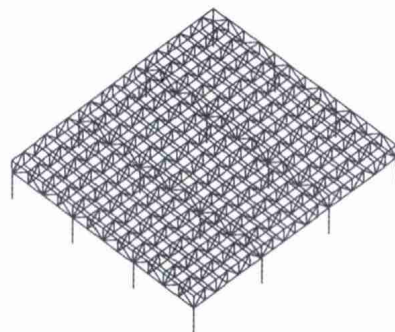


图3 高架层9个桁架单元结构分析模型

Fig. 3 Structural analysis model of 9 truss units of station hall

站厅层单个桁架单元和9个桁架单元结构分析模型模态分析结果分别如表1和表2所示。

表 1 单个桁架单元竖向模态分析结果

Table 1 Analysis results of vertical modes of single truss unit

竖向模态阶次	周期/s	自振频率/Hz	振型质量参与系数
1	0.240 8	4.152 9	0.600 0
2	0.142 0	7.042 8	0.054 1
3	0.110 9	9.014 1	0.100 0
4	0.072 3	13.835 0	0.051 9

表 2 9 个桁架单元竖向模态分析结果

Table 2 Analysis results of vertical modes of 9 truss units

竖向模态阶次	周期/s	自振频率/Hz	振型质量参与系数
1	0.257 2	3.888 1	0.067 5
2	0.236 8	4.223 8	0.600 0
3	0.189 0	5.290 7	0.016 0
4	0.138 0	7.248 4	0.030 1

站厅层 II 区模型对应位置竖向模态分析结果如表 3 所示, 可对比单个桁架单元和 9 个桁架单元竖向模态分析结果。

表 3 站厅层相应位置竖向模态分析

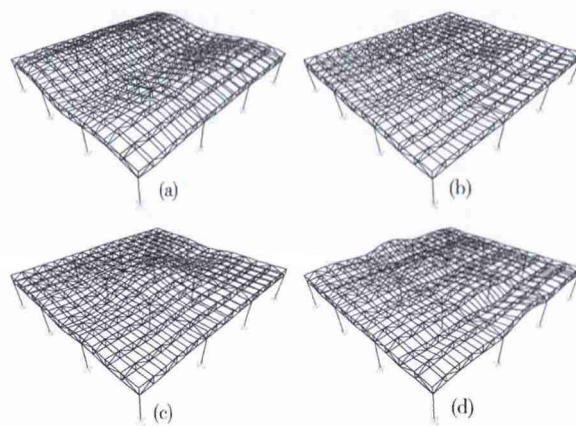
Table 3 Vertical mode analysis of region II of station hall

对应竖向模态	周期/s	自振频率/Hz	9 个桁架单元主要	
			单个桁架单元主要	9 个桁架单元主要
			竖向振动周期	竖向振动周期
			0.240 8 误差%	0.236 8 误差%
1	0.228 2	4.382 9	5.249 2	3.648 6
2	0.223 6	4.471 8	7.133 7	5.565 0
3	0.218 3	4.581 1	9.349 7	7.818 4
4	0.214 3	4.665 3	10.985 5	9.481 8
5	0.212 4	4.707 5	11.782 4	10.292 2

从表 1~3 可见: 竖向刚度较大, 有限元计算表明仅考虑竖向地震, 在罕遇地震作用下结构不会发生破坏^[11]; 竖向振动受高阶影响较大, 单个和 9 个桁架单元 2 个分析模型最主要的竖向模态的振型质量参与系数为 0.6, 周期相差为 1.7%。从表 3 可以看出: 边界条件对模型主要竖向振动模态影响较小, 但 9 个桁架单元比单个桁架单元计算结果更准确, 同时, 边界条件会对主桁架内力产生较大影响。为能更准确的反映结构在地震作用下的响应, 选用 9 个桁架单元作为振动台模型试验, 其前 4 阶竖向振型见图 4。

3 模型相似关系设计

试验模型尺寸的确定在振动台试验是十分重要的, 它影响后续的设计、制作、测试等多方面的工作。根据振动台系统的技术指标, 在达到试验目的的前提下, 尽可能采用较大试验模型, 接近实际原型结构, 方便制作及测试。参考其他振动台试验的



(a) 第一阶竖向模态; (b) 第二阶竖向模态; (c) 第三阶竖向模态; (d) 第四阶竖向模态

图 4 前四阶竖向模态

Fig. 4 The first four vertical modes

经验^[13] 及设备参数, 该大跨站厅结构采用 1/20 的几何相似关系, 9 个桁架单元, 四周 8 个相同的桁架单元模拟中间桁架单元的边界条件, 传感器集中在中间桁架单元。9 个桁架单元原型尺寸为 72 m × 64.8 m, 试验模型尺寸为 3.6 m × 3.24 m, 接近振动台面尺寸为 4 m × 4 m。试验模型和原型概况如表 4 所示。

表 4 原型和振动台试验模型概况

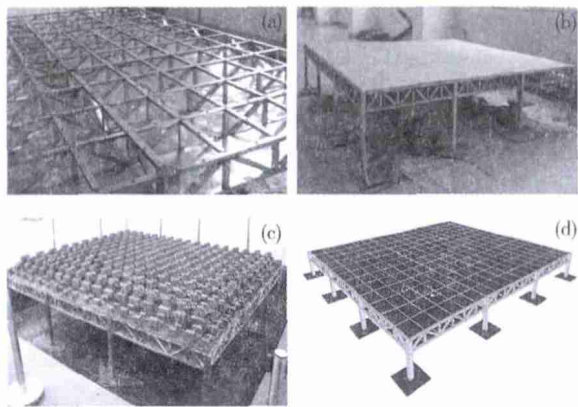
Table 4 Prototype and shaking table test model situation

参数	原型	试验模型
层数	1	1
高度/m	9.0	0.45
平面尺寸/(m × m)	72 × 64.8	3.6 × 3.24
主桁架高/m	3.38	0.169 0
次桁架高/m	3.23	0.161 5
柱截面/(mm × mm)	1 000 × 1 000	50 × 50
楼板厚度/mm	150	7.5
材料 1	砼	微粒砼
材料 2	钢筋	铁丝网
材料 3	型钢	不锈钢

由于振动台试验模型几何相似常数较小, 模型构件截面尺寸小, 要求制作精度高, 为减少施工方面的不确定性, 根据面积和 X 方向惯性矩等效原则, 选用了截面形式多样的不锈钢方钢管。在制作模型之前, 先对不锈钢进行了材料试验, 满足试验要求。本大跨结构振动台试验仅考虑竖向地震的影响, 研究大跨度钢桁架在竖向地震下的动力特性、破坏机制和形态等。因此, 在主桁架模型设计时, 要保证面积和 X 方向惯性矩的等效精度, 施工制作时确保其质量, 从而保证振动台试验和原型结构的良好近似。

考虑到模型制作误差, 在振动台试验模型完成所有附加配重, 获得模型材料强度、弹性模量后, 在适当位置安装加速度传感器, 获取模型的实际质量

和动力学特性,根据实测结果,校核并调整相似性常数。本次试验最终采用的相似常数见表5。



(a) 制作好的钢桁架; (b) 浇注楼面后的模型
(c) 加配重后的模型; (d) 有限元分析模型

图5 振动台试验模型

Fig.5 The shaking table test model

表5 振动台模型的试验相似常数

Table 5 Test similar constant of shaking table model

参数	试验相似常数	备注
应变 ϵ	1.5	
应力 σ	1	控制材料
弹模 E	0.67	控制材料
密度 ρ	6.67	
长度 l	1/20	控制尺寸
面积 S	1/400	
线位移 X	1/20	
角位移 β	1	
集中力 P	1/400	
面荷载 q	1	
质量 m	8.33×10^{-4}	
时间 t	0.16	
频率 f	6.32	
加速度 a	3	控制动力荷载
重力加速度 g	1	控制动力荷载

4 动力特性比较

对振动台试验模型结构进行有限元分析,其竖向模态分析结果见表6,对比原结构模态分析结果,二者的竖向阵型自振频率比值跟频率相似常数比较见表7。从表7可见:设计模型最大误差为3.76%,对应最大振型质量参与系数的误差为2.95%。其原因是模型设计时,刚度等效和部分简化产生的误差。

采用高速铁路建造技术国家工程实验室 SERVOTEST 公司生产的振动台系统,对固定到振动台上的模型进行白噪声扫频试验。该振动台系统由4个台面尺寸为4 m×4 m的三向6个自由度振动

台组成台阵,单台有8个作动器,台面最大位移: x 和 y 向为250 mm; z 向为160 mm;台面满载最大加速度: x 和 y 向为 $\pm 0.8g$; z 向为 $\pm 1.6g$;工作频率范围为0.1~50 Hz。

分析各加速度测点白噪声扫频试验采集数据,根据其频谱特性、传递函数等得到实际模型的自振频率见图5。因前两阶竖向自振频率比较接近,采集的数据只测出1个峰值,主要反映振型质量参与系数大的竖向模态的频率。试验模型测得的自振频率比上原型结构有限元计算的自振频率之值,相对频率相似常数最大误差为-8.17%,具体见表7。其原因包括设计带入的误差和模型施工过程中产生的误差。综上所述可以看出振动台试验模型设计合理,施工质量较好,满足要求,能够反映原型结构的竖向地震响应。

表6 振动台试验模型9个桁架单元竖向模态分析结果

Table 6 Analysis results of vertical modes of shaking table test model 9 truss units

竖向模态阶次	周期/s	自振频率/Hz	振型质量参与系数
1	0.039 2	25.495 9	0.078 7
2	0.036 4	27.476 3	0.600 0
3	0.029 0	34.493 5	0.012 3
4	0.021 8	45.873 7	0.110 0

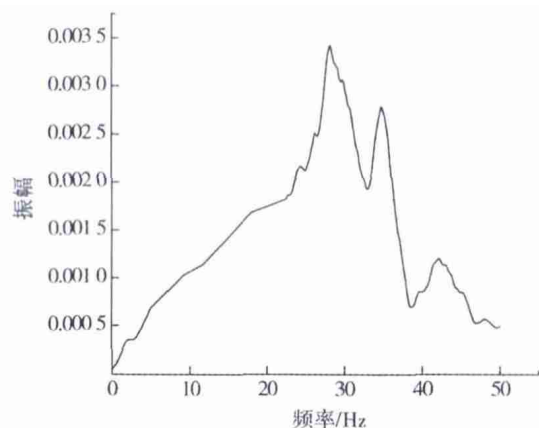


图6 主桁架测点第一次白噪声输入模型结构频率

Fig.6 Model structure frequency of the main truss measuring point for the first time white noise input

表7 9个桁架单元竖向自振频率对比

Table 7 The contrast of the vertical natural frequency of 9 truss units

参数	竖向模态阶次			
	1	2	3	4
原型结构有限元计算 f^p /Hz	3.89	4.22	5.29	7.25
试验模型有限元计算 f^m /Hz	25.50	27.48	34.49	45.87
f^m / f^p	6.56	6.51	6.52	6.33
模型白噪声激励 f^b /Hz	—	28.08	34.73	42.05
f^b / f^p	—	6.65	6.56	5.80
f^m / f^p 相对频率相似常数误差/%	3.76	2.95	3.15	0.17
f^b / f^p 相对频率相似常数误差/%	—	5.20	3.86	-8.17

5 结 论

(1) 针对振动台试验模型构件截面尺寸小,无法得到相应钢材的问题,根据面积和 X 方向惯性矩等效原则,选用了截面形式多样的不锈钢方钢管。从振动台试验模型实际动力学特性来看,性能稳定的不锈钢材料能够满足弹性阶段振动台试验要求。

(2) 中间桁架单元四周8个相同的桁架单元模拟其边界条件,中间桁架单元能较好的反映原型结构的频率和力学特性。

(3) 本文建立试件满足模型设计要求,能够真实反映原型结构在竖向地震激励下的响应,为该大跨钢桁架站厅结构的竖向地震振动台试验提供了保证。

参考文献:

- [1] 杨林德,王国波,郑永来,等. 地铁车站结构振动台试验及地震响应的三维数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(8): 1538-1545.
YANG Linde, WANG Guobo, ZHENG Yonglai, et al. Shaking table test on metro station structure and 3d numerical simulation of seismic response[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(8): 1538-1545.
- [2] 陶连金,王沛霖,边金. 典型地铁车站结构振动台模型试验[J]. 北京工业大学学报, 2006, 32(9): 798-801.
TAO Lianjin, WANG Peilin, BIAN Jin. A shaking table test method on the representative subway station structure[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2006, 32(9): 798-801.
- [3] 范峰,沈世钊. 单层球壳模拟地震振动台试验及结构减振试验研究[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2000, 33(3): 18-22.
FAN Feng, SHEN Shizhao. Study on the shaking table experiment and the vibration reducing experiment of single layer reticulated shells[J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 2000, 33(3): 18-22.
- [4] 邢侓慧,柳旭东,范锋,等. 单层柱面网壳结构地震模拟振动台试验研究[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(6): 1-8.
XING Jihui, LIU Xudong, FAN Feng, et al. Shaking table experiment research on a seismic behavior of single-layer latticed cylindrical shell[J]. Journal of Building Structures, 2004, 25(6): 1-8.
- [5] 国巍,余志武. 一种计算地震作用下相邻结构相对位移的改进差异谱方法[J]. 土木工程学报, 2012, 45(2): 68-76.
GUO Wei, YU Zhiwu. An improved spectral difference method for calculating relative displacement in order to avoid pounding in earthquakes[J]. China Civil Engineer-

- ing Journal, 2012, 45(2): 68-76.
- [6] 国巍,余志武. 铁路客站避免震致碰撞安全间距的快速随机计算方法[J]. 铁道科学与工程学报, 2010(增刊): 198-201.
YU Zhiwu, GUO Wei. An rapid random calculation method of safety distance for avoiding railway station's pounding in the earthquake[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2010(S): 198-201.
- [7] 徐汉勇,余志武,国巍. 高速铁路客站模态特征分析与阻尼模型的注记[J]. 地震工程与工程振动, 2012, 32(4): 139-144.
XU Hanyong, YU Zhiwu, GUO Wei. Study on modal characteristics and damping model of a high speed railway station[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2012, 32(4): 139-144.
- [8] 国巍,余志武. 新型客站随机地震响应的控制策略[J]. 铁道学报, 2012, 34(4): 110-117.
GUO Wei, YU Zhiwu. Control strategy of stochastic seismic responses of the new type station structure[J]. Control Strategy of Stochastic Seismic Responses of the New Type Station Structure, 2012, 34(4): 110-117.
- [9] 国巍,余志武. 高速铁路客站房桥合一结构层间隔震优化策略研究[J]. 地震工程与工程振动, 2012, 32(3): 157-164.
GUO Wei, YU Zhiwu. Research on optimization strategy of storey isolation in the integrated building-bridge structure of high-speed railway station[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2012, 32(3): 157-164.
- [10] 国巍,余志武,鄢亮. 高速铁路客站大跨站厅结构竖向多点地震响应研究[J]. 振动与冲击, 2013, 32(16): 63-69.
GUO Wei, YU Zhiwu, WU Liang. Vertical seismic response of long-span hall of high-speed railway station under multipoint earthquake excitation[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(16): 63-69.
- [11] 余志武,鄢亮,国巍. 新型高速铁路客站大跨度站厅结构的竖向地震破坏特征[J]. 铁道科学与工程学报, 2012, 9(6): 1-6.
YU Zhiwu, WU Liang, GUO Wei. Seismic failure characteristics of long-span station hall structure of new type of high-speed railway station under vertical earthquake excitation[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2012, 9(6): 1-6.
- [12] 北京金土木软件技术有限公司. SAP2000 中文版使用指南[M]. 1版. 北京: 人民交通出版社, 2006.
Civil King Software Technology Co. Ltd. SAP2000 User Guide of Chinese version[M]. 1st ed. Beijing: China Communications Press, 2006.
- [13] 周颖,吕西林. 建筑结构振动台模型试验方法与技术[M]. 1版. 北京: 科学出版社, 2012.
ZHOU Ying, LU Xilin. Method and technology for shaking table model test of building structures[M]. 1st ed. Beijing: Science Press, 2012.