

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.05.004



宋式木构屋盖自重及材份制相似关系

陈金永^{1,2}, 师希望¹, 牛庆芳¹, 魏剑伟¹, 李铁英¹, 赵燕霞³

(1. 太原理工大学 建筑与土木工程学院, 太原 030024;

2. 山西省建筑设计研究院, 太原 030013; 3. 山西传媒学院, 太原 030013)

摘要:依据宋代《营造法式》,设计了4种试验用宋式木构足尺及比例模型并确定了相应的屋盖形式;因屋面瓦和铺衬在雨雪天吸水而使屋盖重量加大,提出了考虑使用期和施工期不同工况计算屋盖重量;分析了《营造法式》中黄松与华北落叶松的关系,引入应县木塔柱轴力并与实际计算的屋盖重量对比,初步推定了《营造法式》中各材等间按照确定的相似准则在荷载效应上存在对应关系。结果可为计算宋式类似木构屋盖重量提供借鉴,为进一步探索材份制中的相似关系和木结构模型相似系数提供参考。

关键词:材份制;木构;屋盖自重;工况;相似准则

中图分类号:TU366.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2016)05-0027-07

Analysis of similar CaiFen modular system based on the weight of the roof of Song dynasty

Chen Jinyong^{1,2}, Shi Xiwang¹, Niu Qingfang¹, Wei Jianwei¹, Li Tieying¹, Zhao Yanxia³

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, P. R. China;

2. The Institute of Shanxi Architectural Design Research, Taiyuan 030013, P. R. China;

3. Communication University of Shanxi, Taiyuan 030013, P. R. China)

Abstract: Combined with "Ying Zao Fa Shi", the size of the four type of song dynasty wooden components and related contents in the design of the roof are introduced. On the basis of the facts that the weight of roof became heavier because of rain and snow, a method of calculating the weight of the roof was proposed under different cases considering construction and using period. The simplified method of working condition combined with the calculation results was put forward. The relationship between yellow pine and larchen had been clear. There was a corresponding relationship in the load effect between the various modular. The results would provide reference for calculating similar wooden roof weight, and further exploring the similarity relation in CaiFen system and model tests.

Keywords: CaiFen modular system; wooden structure; weight of the roof; working condition; similarity criterion

收稿日期:2016-03-14

基金项目:国家自然科学基金(51338001,51278324)

作者简介:陈金永(1978-),男,博士生,主要从事古建木结构的研究,(E-mail)quanshui8765@126.com.

李铁英(通讯作者),男,教授,博士生导师,(E-mail)lty680412@163.com.

Received:2016-03-14

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(No. 51338001, No. 51278324)

Author brief: Chen Jinyong (1978-), PhD candidate, main research interest: ancient timber structure, (E-mail) quanshui8765@126.com.

Li Tieying(corresponding author), professor, doctoral supervisor, (E-mail)lty680412@163.com.

现存为数不多的宋式木结构古建筑以其悠久的历史、丰富的文化和艺术内涵而成为中华民族和世界的宝贵文化遗产。利用缩尺模型研究中国古建筑木结构可从根本上实现对历史文物的保护,而联系结构实体与缩尺模型关系的相似系数必然成为研究的关键。

近年来,诸多学者对相似关系进行了深入的研究并取得了丰富的成果。文献[1-3]分别对相似理论在门式起重机、拟动力试验和摩擦摆隔震振动模型中进行了探索;文献[4-6]基于相似理论分别对不同形式的复合地基、刚性桩抗震性能及岩石爆炸成坑效应开展了试验研究;文献[7]利用相似关系分析了模型试验中材料破坏的时间问题;在其他领域如激光^[8,12-13]、有限元软件^[9]、应力场^[10]、油气分离器^[11]的研究也较多。而在木结构领域未见相关的研究。

被称为中国古建筑冠冕的屋盖系统,由于其复杂的建筑做法和构造,在结构分析和试验中完全按照建筑原型实施往往较为困难,目前可查到的所有文献中,均将屋盖部分的重量简化为集中荷载或相当于集中荷载的预制混凝土板。这样,在对建木构试验或模拟分析时,从荷载的角度基本实现与原型的一致。对屋盖部分简化的前提是准确计算该重量的大小。本文以实际的屋盖重量为基础,尝试初步建立古建筑木结构的模型相似系数。

1 《营造法式》及材份制

李诫(宋)所编《营造法式》(简称《法式》)是中国现存古代科学著作中最早的一部建筑学著作,集唐、宋两代建筑营造经验,全面、准确地反映了中国在11世纪末至12世纪初整个建筑行业的科学技术水平和管理经验。《法式》制定了“材”作为营造建筑的标准、模数及建筑的等级制度,是建筑技术进一步科学化、规范化的标志,宋代以后直至清末,各种木结构古建筑都是运用相当于“材”的标准度量之,对建筑业的发展起了推动作用。本文用于计算屋盖自重的4种木构严格按照《法式》的规定设计制作,见图1。

包含材、槩和份的材份制不仅是用来度量间广、进深和柱高的尺子,还包含着设计方法、房屋标准化、建筑力学和建筑艺术等多方面的内容,把这些内容合为一个概念,称为“材份制”^[14]。材在宋也称“章”,所谓“章”就是“章法”,有‘用材制度’这样的章

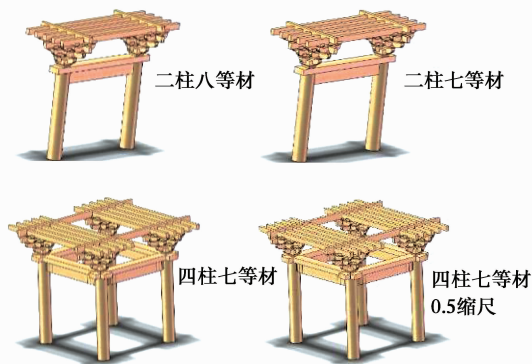


图1 四种木构模型图

Fig. 1 Model of four wooden frames

法,才不会出现失章失槩的情况。凡构屋之制,皆以材为祖,材有八等,度屋之大小,因而用之;凡屋宇之高深,名物之长短,曲直举折之势,规矩绳墨之宜,皆以所用材之份,以为制度焉^[15]。材等确定后,其构件的尺寸(长、宽、高)、屋面荷载(瓦等,覆土、板箔和屋脊层数)也相应而定^[14]。每等材高15份,宽10份,如七等材,高0.525尺(1尺=0.309m),宽0.35尺,每份0.035尺,一材(单材)15份,一槩6份,一材一槩(足材)21份(0.735宋尺)。本文4种木构的材等为七等材和八等材。

2 《法式》黄松与华北落叶松关系考证

根据目前的研究成果,按宋《营造法式》所确定的构件和结构并没有严密的力学理论基础,而是根据匠师们长期口传心授积累的施工经验而形成的约定俗成的做法,而这些成熟做法的前提是对所用材料的长期探索和认知。《法式》所用木材为黄松、白松和山杂木,作为构造技术统一措施的材份制应是以这3种木材为基础并结合长期的实践经验而建立起来的;当所用木材为其他树种(如樟子松)时,材份制所规定的屋面瓦等、覆土等恒载基于安全考虑应予以折减;在屋面自重的层面上,本文尝试借助相似原理来探索这种折减关系。

黄松在古建木构大木作中应用较多。为建立相似折减关系,需考证黄松对应现代何种树种。从密度和地域两方面进行考察。

《法式》中黄松密度 $\rho = 25$ 斤/尺³,取1尺=0.309m,1.6斤=1kg,则折算密度 $\rho = 0.530$ g/cm³。与黄松密度相近的树种有:华北落叶松气干密度为0.534g/cm³,顺纹抗压强度为59.3MPa;马尾松气干密度为0.533g/cm³,顺纹抗压强度为

40.0 MPa; 鸡毛松气干密度 0.510 g/cm³, 顺纹抗压强度为 34.7 MPa。

华北落叶松分布在冀、晋、豫、陕, 马尾松的产地为黔、豫、陕, 鸡毛松产地为粤、桂、滇、闽。据北宋地图, 以上各省均包括在内。宋代采木为务的机构设在秦晋之地尤多; 秦川多巨材, 京城营造多用陕西木。

由以上可知: 华北落叶松的分布区域与宋代木材采伐地一致, 均为现在的陕西和山西; 华北落叶松的气干密度与《法式》黄松接近, 约为 0.530 g/cm³。故可认为: 《法式》中的黄松为华北落叶松的概率较大, 或为现松科中某一类树种的集合, 且该集合中包括华北落叶松。本文进行相关计算时, 按黄松为华北落叶松考虑。

3 4 种木构模型及屋盖自重计算

3.1 大木作部分结构设计及制作

设计时尺寸单位采用“份”, 八等材每份 9.27 mm, 七等材及缩尺每份 10.815 mm。木材为俄罗斯进口樟子松。结构及主要构件的尺寸按以下原则确定:

1) 面阔、进深及柱高。凡定柱础取平, 须更用真尺较之, 真尺长一丈八尺(1丈=10尺), 广4寸, 厚2寸5分^[15]。对于殿堂和厅堂的心间面阔, 虽没有一个完整的定制, 但都遵守着一个历史传统标准, 即为18尺。至于余屋面阔, 当远小于此数。用椽之制, 每架平不过6尺^[15]。柱高不越间广。相关尺寸见表1。

2) 柱径、阑额和普拍方。凡用柱之制, 余屋即径一材一掣至两材; 造阑额之制, 广加材一倍, 厚减广1/3; 普拍方厚随材广, 其广尽所用方木。具体尺寸

表 1 主要构件尺寸表(单位:份)

Table 1 Dimension of main components (unit: fen)

类别	柱径	柱距	柱高	阑额 (b×h)	普拍方 (b×h)
二柱八等材	36	256	255	20×30	36×15
二柱七等材	36	256	255	20×30	36×15
四柱七等材	36	256	255	20×30	36×15
四柱缩尺 1/2	18	128	127.5	10×15	18×7.5

注: 铺作类型为两跳五铺作。

3) 制作完成的实体模型见图 2。



(a) 二柱八等材

(b) 二柱七等材



(c) 四柱七等材

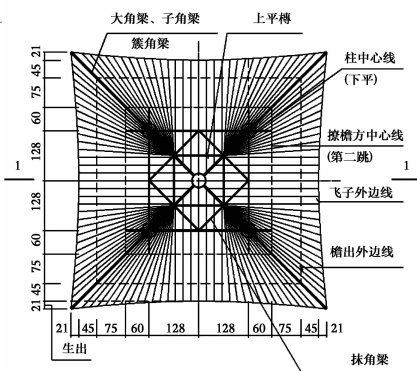
(d) 四柱缩尺 1/2

图 2 实体模型图

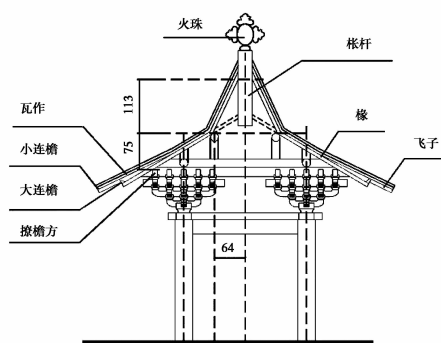
Fig. 2 Entity photos of four models

3.2 屋盖部分设计

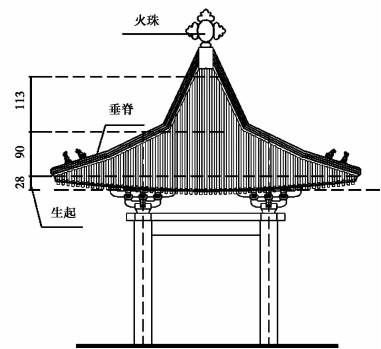
屋盖形式采用斗尖屋盖。屋盖主要部位尺寸按以下原则确定。屋盖详图见图 3。与模型屋盖形式相近的实物图见图 4(晋城·皇城相府)



(a) 屋盖俯视图



(b) 1-1剖面图



(c) 立面图

图 3 屋盖详图(份)

Fig. 3 Details of roof(in fen)

1) 举折: 自椽檐方背至上簇角梁底取 $0.2B$, 至上簇角梁顶取 $0.5B$ 。(B 为前、后椽檐方中心间距)

2) 生出生起: 按“出三起四”原则确定。即生出 $3d$, 生起 $4d$ 。(d 为椽径, $d=7$ 份)

3) 椽出: 檐椽出 75 份(约 $11d$), 飞椽出 $0.6 \times 75=45$ 份。

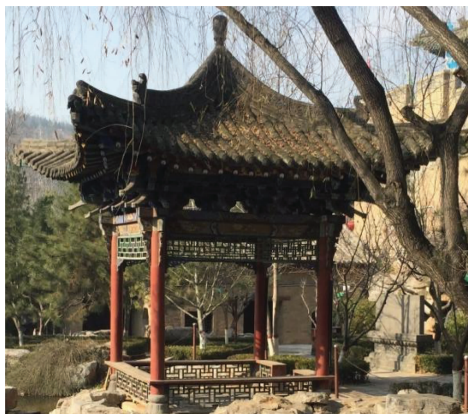


图 4 与模型屋盖形式相近的实物

Fig. 4 Four pavilions similar to the roof of model

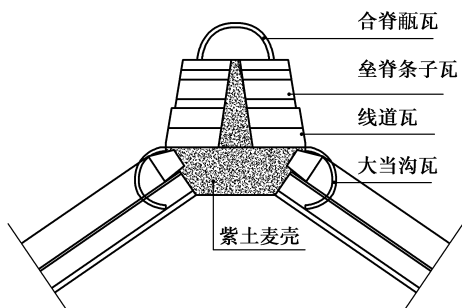


图 5 屋脊详图

Fig. 5 Details of roof ridge

3.3 不同工况下屋盖自重计算

古建木构屋盖部分重量的计算相关文献已有阐述,但仍不能满足科研、设计及维修加固等需要。刘大可《古建筑屋面荷载汇编》中详细阐述了明清时期古建屋盖重量计算;王天在文献[4]中对辽宋时期的屋盖自重进行了细致的推算,以上文献均未区分不同工况:如施工期结瓦、铺衬时所用土为泥浆,雨雪天瓦吸水等相关情况。本文所考虑工况包括施工期和使用期,使用期考虑晴天、雨天和雨雪天 3 种情况。

屋盖重量包括屋面、屋脊和屋架 3 部分的重量。首先计算工况为晴天时的重量,然后以此为基础计算其他工况时的重量。施工期考虑瓦浸水饱和、干土拌合为泥浆所增加的用水量;使用期考虑雨天、雨

雪天屋面瓦吸水及积雪增加的屋面重量。根据文献[15]卷四,七等材用于小殿及亭榭等,八等材用于殿内藻井或小亭榭,本文中的七等材模型对应于亭榭,八等材模型对应于小亭榭;另据文献[15]卷十三瓦的选用原则和文献[14]对瓦的分类,确定七等材所用瓦为四等瓦,八等材为五等瓦。四柱七等材晴天工况时屋盖各部分重量见表 2。4 种木构不同工况时屋面重量见表 3。计算相关参数如下。

表 2 屋盖各部分的重量统计表

Table 2 Weight of main components of roof

部位	名称	重量/斤	合计/ kN	备注
屋面(S=53.03 m ²)	甃瓦/丈 ²	924.7	132.58	甃瓦 甃瓦
	结瓦用料/丈 ²	1 828.5		土 麦壳 麦梢
	铺衬/丈 ²	150		苇箔三重
	铺衬用料/丈 ²	909.5		土 麦梢
屋脊(9层)(L=20.7 m)	瓦/丈	333.54	41.1	当沟 线条 条子 合脊瓦
	垒脊用料/丈	498		紫土 麦梢
	用白灰/丈	83.4		
	鸱尾 兽头	450		
屋架	檐椽	1 352.5	34.1	径 7 份
	飞子	464		截面:5.6×4.9 份
	角梁(大、子)	1 695		截面:30×20(20×17)
	连檐(大、小)	428.6		截面:15×10(8×4)
	搏 抹角梁 枅杆	1 515		搏径 17 份;枅杆径 36 份
	蜀柱 衬木			抹角梁截面:36×24 份

注:表中重量为晴天工况时四柱七等材的屋盖重量,总重为 207.78 kN,木材按黄松计算。

表 3 4 种木构各工况下屋盖重量统计表

Table 3 Weight of four models under three conditions

类别	施工期	使用期		
		晴天	雨天	雨雪天
四柱七等材	164.85	149.85	153.52	172.08
二柱七等材	82.43	74.93	76.76	86.04
四柱缩尺	41.22	37.47	38.38	43.02
二柱八等材	61.84	48.17	49.19	56.02

1) 瓦。①七等材瓦规格:甃瓦: $0.9 \times 0.35 \times 0.04$ (尺);甃瓦: $1.2 \times (0.6 \sim 0.5) \times (0.06 \sim 0.05)$ (尺)。八等材瓦规格:甃瓦: $0.8 \times 0.35 \times 0.035$ (尺);甃瓦: $1.0 \times (0.5 \sim 0.4) \times (0.05 \sim 0.04)$ (尺);②布瓦:甃瓦上压 4 份,下留 6 份;两甃瓦相去(净

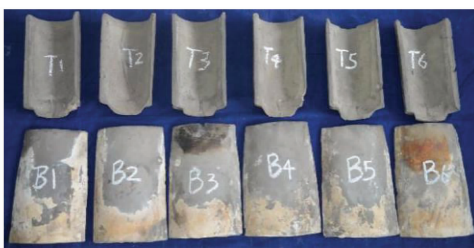
距),取甃瓦宽度;③瓦密度取 90.39 斤/尺³(干密度);④线道瓦以甃瓦一口造 2 片,条子瓦以甃瓦一口造 4 片;当沟瓦以筒瓦一口造,合脊瓦用本等。

2)土干重(未加水):60 斤/担。黄松密度 25 斤/尺³(气干)。樟子松密度 0.466 g/cm³。

3)1 宋尺=0.309 m;1 kg=1.6 宋斤。(文中所用到的斤均为宋斤,尺均为宋尺,下同)

4)屋脊为垂脊,取 9 层。屋脊详图见图 5。

5)屋面瓦饱和状态下的含水率(甃、甃瓦各取 6 块实测):甃瓦为 19%,甃瓦为 15.7%。测定含水率所用屋面瓦见图 6。



(a) 屋面瓦编号图



(b) 屋面瓦浸水图

图 6 屋面用瓦含水率测定图

Fig. 6 Moisture content of watts

6)干土拌合为泥用水量计算公式为

$$\Delta W = \frac{K_2 - K_1}{1 + K_1} \times m = 0.092 m \quad (1)$$

式中:ΔW 为干土拌合为泥增加的用水量;m 为自然状态下土的重量;K₁ 为自然状态下的含水率,取 15.4%;K₂ 为制成泥后的含水率,取 26%;土按粉质粘土考虑。

7)计算时所采用的相似准则

$$\pi = \frac{C_N}{C_\sigma C_d^2} \quad (2)$$

式中:C_σ 为柱顺纹抗压强度相似系数;C_N 为柱轴力相似系数;C_d 为柱直径相似系数;对足尺模型 C_σ= $\frac{41.2}{59.3}$ =0.69,C_d=1.0;对缩尺模型 C_σ=0.69,C_d=0.25。借助相似准则,将《法式》中的黄松与模型中的樟子松对应(C_σ),足尺模型与缩尺模型对应

(C_d)。

8)基本雪压取 0.35 kN/m²(太原 50 a 一遇)。

9)木构架部分的重量根据樟子松的密度按实计算,与屋面雪荷载处理相同,均不折减。

4 《法式》中的相似关系

以材份制为基础所建造的各类宋式木构之间是否存在某种联系?王天从一至八等材的关系入手,得出各等材材广之间基本满足等比数列关系^[14]。本文尝试以所计算的屋面重量为基础,借助相似关系从数据计算的角度探索材份制中材等间的关系。具体思路为:根据已有的应县木塔柱轴力,按照相似准则,推定 4 种木构单根柱轴力,将该轴力乘以相应的柱根数即为对应的屋盖重量(下文简称“相似屋盖重”),从对比相似屋盖重与实际计算重量的数值关系中找到材等间的内在联系。应县木塔材等为二等材,所用木材为华北落叶松,外檐角柱轴力及柱径见表 4,表中数据系李世温教授课题组研究成果^[16],该课题组在计算时,结构及构件尺寸参照陈明达所著的《应县木塔》,材料容重则通过现场取样实测所得,因此其计算结果的准确性较高,可作为计算的依据。木塔 5 层为暗层,5 层平层为明层,明层和暗层相结合与用于计算屋盖重量的试验模型一致,而 5 层平层的柱轴力已包括从 5 层暗层传下来的重力,在比较时取 5 层平层。4 种木构相似屋盖重量见表 5,表 3 晴天工况和表 5 五层平层两种屋盖重量对比见表 6。

表 4 应县木塔外檐角柱轴力及柱径

Table 4 Column axial force and the column diameter of YingXian tower

部位	五层	五层平层	四层	四层平层
轴力/kN	92.51	114.76	200.05	234.42
直径/mm	560	580	600	600

表 5 4 种木构相似屋盖重量

Table 5 Similar weight of roof of four models kN

部位	五层	五层平层	四层	四层平层
四柱七等材	123.20	142.47	232.08	271.84
二柱七等材	61.60	71.24	116.04	135.92
四柱缩尺	30.80	35.62	58.02	67.96
二柱八等材	40.8	52.52	99.24	100.25

表6 2种屋盖重量对比

Table 6 Comparison the weight of two kinds of roof

类别	晴天 W1/ kN	五层平层 W2/kN	W1-W2/ kN	100(W1- W2)/W1
四柱七等材	149.85	142.47	7.38	4.92
二柱七等材	74.93	71.24	3.69	4.92
四柱缩尺	37.47	35.62	1.85	4.94
二柱八等材	48.17	52.52	-4.35	-9.03

从表6可以看出,按相似准则 $\pi = \frac{C_N}{C_\sigma C_d^2}$ 推算的屋盖重量与实际相差5%~9%,考虑在屋面重量中比重较大的结瓦、铺衬所用土的密度因地而异及辽、宋在按照《法式》进行屋面施工时做法的具体差异,可认为推算的相似屋盖重量与实际接近。进而可初步认为:以材份制为基础的《营造法式》中各材等间按照某一相似准则在荷载效应上存在对应关系。

5 结论

根据4种木构模型屋盖重量计算结果,结合应县木塔的相关荷载,探讨了《法式》中各材等间的内在关系,得出以下结论:

1)屋盖重量计算时应考虑使用期和施工期不同工况,以满足古建木构在设计、维修加固及科研方面的需要。

2)施工期和使用期的雨雪天工况计算的屋盖重量接近(相差 $\leq 4.2\%$),雨雪天稍偏大;使用期的晴天和雨天屋盖重量接近(相差 $\leq 2.4\%$),雨天稍偏大。以上4种工况在设计中进行组合时可偏安全的仅考虑2种工况。

3)相似屋盖重量与实际计算值接近,《营造法式》中各材等间按照式(2)所示相似准则在荷载效应上存在对应关系。

参考文献:

- [1] 李新华,周绪波.相似理论在门式起重机主梁架有限元分析中的应用与研究[J].制造业自动化,2015(19):74-77.
LI X H, ZHOU X B. The research and application of similarity theory in finite element analysis of gantry crane [J]. Manufacturing Automation, 2015(19):74-77. (in Chinese)
- [2] 陈再现,陈苟桥,吴斌,等.基于静力相似的缩尺拟动力试验方法数值模拟研究[J].土木工程学报,2014

(S2):307-311.

CHEN Z X, CHEN S Q, WU B, et. al. The numerical simulation of pseudo-dynamic test method for scale model based on the static similar condition [J]. Journal of Civil Engineering, 2014 (Sup 2): 307-311. (in Chinese)

- [3] 周颖,胡程程,周广新,等.摩擦摆隔震结构振动台模型设计方法研究[J].结构工程师,2015(5):6-11.
ZHOU Y, HU C C, ZHOU G X, et. al. Model design method for shaking table test on isolated structures using friction pendulum bearings [J]. A Structural Engineer, 2015(5):6-11. (in Chinese)
- [4] 赵明华,龙军,张玲,等.不同型式复合地基试验对比分析[J].岩土工程学报,2013(4):611-618.
ZHAO M H, ROU J, ZHANG L, et. al. Comparative analysis of model tests on different types of composite foundations [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2013(4):611-618. (in Chinese)
- [5] 盛桂琳,鲍鹏,苏彩丽,等.刚性桩复合地基桩体抗震性能分析[J].岩土力学,2013(5):1274-1278.
SHENG G L, BAO P, SU C L, et. al. Analysis of seismic behavior of pile body in rigid pile composite foundation [J]. Rock and soil Mechanics, 2013(5):1274-1278. (in Chinese)
- [6] 岳松林,邱艳宇,范鹏贤,等.岩石中爆炸成坑效应的模型试验方法及对比分析[J].岩石力学与工程学报,2014(9):1925-1931.
YUE S L, QIU Y Y, FAN P X, et. al. Modeling experiment methods for cratering effects of explosions in rocks and comparative analysis [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014(9):1925-1931. (in Chinese)
- [7] 范鹏贤,王明洋,邢灏喆,等.模型试验中材料变形破坏的时间相似问题[J].岩石力学与工程学报,2014(9):1843-1851.
FAN P X, WANG M Y, XIN H Z, et. al. Time-dependent problems of deformation and failure in geo-mechanical model tests [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014(9):1843-1851. (in Chinese)
- [8] SHI Y, SHEN H, YAO Z, et al. Application of similarity theory in the laser forming process [J]. Computational Materials Science, 2006, 37 (3): 323-327.
- [9] LI X, CAO W, TANG M. The application of similarity theory in the finite element analysis of complex and large components[J]. Machine Design & Research, 2013,29(5):18-25.

- [10] SU P, QIN Q, HUANG R. Application of similarity theory in the numerical simulation of tectonic stress field [J]. *Natural Gas Industry*, 2005,25(4):57-60.
- [11] LUO X I, CHEN J Y, DUAN M L. The application of similarity theory in the design of deepwater oil and gas separators [J]. *China Offshore Platform*, 2011,26(2): 18-21.
- [12] SHI Y, SHEN H, YAO Z, et al. An analytical model based on the similarity in temperature distributions in laser forming [J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2007,45(1):83-87.
- [13] CRUZ A T, LANGE D F D, CASTILLO H I M. Comparative study of numerical models of the laser forming process [J]. *Journal of Laser Applications*, 2015,27(Sup 2):S29105-1~6.
- [14] 王天. 古代大木作静力初探[M]. 北京:文物出版社, 1992.
- WANG T. Research of static of ancient da mu zuo. [M]. Beijing: Cultural Relics Publishing House, 1992. (in Chinese)
- [15] 李诚. 营造法式[M]. 北京:人民出版社, 2011.
- LI J . Ying zao fa shi [M]. Beijing: People Press, 2011.
- [16] 李世温,王晋生,陈正廷,等. 应县木塔的荷载研究[R]. 太原理工大学, 2000.
- LI S W, WANG J S, CHEN Z T, et al. Loading research of Yingxian wooden tower [R]. Taiyuan university of technology, 2000. (in Chinese)

(编辑 胡玲)