

框架填充墙结构的静动力学特性

迟维胜¹, 孔令杨¹, 杜鹃²

1. 中国人民解放军空军工程大学航空航天工程学院, 西安 710038

2. 中国人民解放军成都军区空军勘察设计院, 成都 610041

摘要 利用MIDAS/Gen有限元分析软件,对框架填充墙结构的静动力学特性进行研究。由模态分析得结构基频为0.9252 Hz,高阶振型的模态参与系数远小于低阶模态参与系数,即低阶振型对于振动起控制作用;以反应谱的两个频率段为根据来选取时程波,时程分析结果大于反应谱分析结果的80%。通过对本模型的反应谱分析和时程分析得到了关于框架填充墙结构动力特性,并指出了结构薄弱部位,对同类结构的设计与分析有指导意义。

关键词 框架填充墙结构;模态分析;反应谱分析;时程分析

中图分类号 TU311.1

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.10.010

Statics and characteristic dynamic study on a infilled frame structure

CHI Weisheng¹, KONG Lingyang¹, DU Juan²

1. College of Aeronautics and Astronautics Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China

2. Prospect and Design Institute of Chengdu Command Air Force, Chengdu 610041, China

Abstract In this paper, static and dynamic characteristics of infilled wall structure were studied using the finite element analysis software MIDAS/Gen. The fundamental frequency of 0.9252 Hz was obtained by modal analysis. High-order modal participation factor was far less than the low-order modal participation factor, i.e., low-order mode plays a dominant role in the vibration. Time-history curve was selected based on two frequency bands of the response spectra, and time-history analysis results were more than 80% of the response spectrum analysis results. The static and dynamic characteristics of infilled wall structure were obtained through response spectrum analysis and time-history analysis of this model, and the weak part of the structure was indicated, which may provide reference for the design and analysis of similar structures.

Keywords infilled frame structure; modal analysis; response spectrum analysis; time-history analysis

一直以来,中国是一个受地震灾害影响严重的国家,特别是近几年,接连发生四川汶川8.0级大地震、青海玉树7.1级大地震、四川雅安7.0级大地震等影响范围广、破坏性严重的地震,这些事件一方面积累了大量的研究数据和资料,另一方面也出现了许多亟待人们解决的工程问题。

地震发生时结构破坏具有机理复杂、形式多样的特点,按照破坏原因可以分为振动破坏与非振动破坏。振动破坏受结构动力特性和地震特性影响,地震特性包括地震波峰值的大小、频谱特性和地震持时,结构动力特性涉及不同的结

构类型、构造措施和施工质量等许多因素。非振动破坏主要指结构除了在受到地震作用后所产生的振动破坏外,产生与地基状况有关的破坏^[1]。

根据多次大地震中现场实地调查,框架结构的破坏形式主要包括^[2]:1)结构的整体破坏;2)梁柱构件的破坏;3)填充墙的破坏。在实际中最主要的破坏形式是结构部分失去承载能力甚至全部失去承载能力。

日本学者大森吉房于1900年率先提出的静力理论是世界上第一个抗震理论^[3],该理论将地震作用简化为静力作用,

收稿日期:2015-02-10;修回日期:2015-04-15

作者简介:迟维胜,副教授,研究方向为结构工程,电子信箱:381657452@qq.com;孔令杨(共同第一作者),硕士研究生,研究方向为结构工程,电子信箱:guess0129@163.com

引用格式:迟维胜,孔令杨,杜鹃.框架填充墙结构的静动力学特性[J].科技导报,2015,33(10):101-106.

现在应用较少。而在20世纪40年代兴起的反应谱理论^[4,5]开始考虑结构的动力特性,但没有将持时效果、地基与土层的相互作用等内容考虑在内^[6]。在20世纪70年代,伴随着计算机技术的兴起,学界提出了时程分析理论,这是真正意义上的动力理论。时程分析将地震真正看作一个时间过程,选取特定的地震波作为载荷,利用逐步积分原理对结构的动力反应进行增量列式,计算在震动过程中任意时间节点的动力响应^[7]。

本文采用MIDAS/Gen软件研究框架填充墙结构的静动力学特性,并对反应谱理论与时程分析进行比较。通过两种方法计算结构的层剪力、层位移以及梁单元内力等情况,以期得到框架结构在地震作用下的内力分布以及受力特性。

1 结构有限元模型及静力分析

本研究以某文化活动中心作为框架填充墙结构的研究模型,其有限元模型如图1所示,该活动中心共有3层,结构x向跨度为70.8 m,y向跨度为45.6 m。结构内部分为办公区和会议室两部分,办公区为平坡屋面,标高为17.4 m,会议室为双坡屋面,标高为23.65 m。

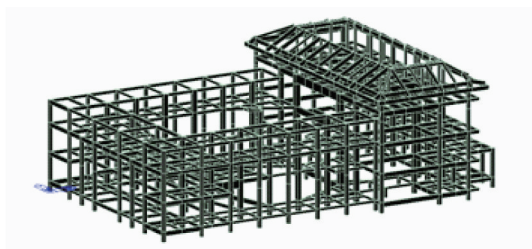


图1 结构有限元模型

Fig. 1 Finite element model of the structure

1.1 结构有限元模型

作为一个框架结构,在MIDAS/Gen软件中,结构所有杆件均为梁单元。截面形状及荷载组成由设计资料确定,荷载包括恒载(DL)、活载(LL)、风荷载(WX、WY)、反应谱荷载(RX、RY)以及时程荷载(SC₁、SC₂和SC₃)5个部分。支座处的约束条件选用一般支撑^[8]。

1.2 结构静力分析

MIDAS/Gen软件提供多种荷载组合方式,根据《JG J3—2010 高层建筑混凝土结构技术规程》^[9]对于极限承载能力的设计要求,荷载组合效应S_d为

$$S_d = \sum_{j=1}^m \gamma_{c_j} S_{c_j} + \sum_{i=1}^n \gamma_{q_i} \gamma_{L_i} \psi_{c_i} S_{q_i}$$

式中,S_{c_j}和S_{q_i}分别为按第j项永久荷载标准值G_j和第i项按活载标准值Q_i的荷载效应值;γ_{c_j}为第j项永久荷载的分项系数;γ_{q_i}为第i项可变荷载分项系数;γ_{L_i}为第i项可变荷载考虑设计使用年限的调整系数;ψ_{c_i}为第i项可变荷载Q_i的组合值系数。

在进行静力分析时选用编号gLCB12的荷载组合方式,

其表达式为1.2DL+1.4LL+1.4(0.6)WX,对结构进行层位移、层间位移角和梁单元内力等项目的验算。其中,结构层位移数据如表1所示,结构的最大层位移出现在第9层,最大位移与平均位移之比最大为1.0171,符合规范要求。

表1 结构层位移数据

Table 1 Layer displacement data of the structure

楼层	层高度/m	最大位移/ m	平均位移/ m	最大/平均
屋顶	0	0.0103	0.0102	1.0051
9F	1.70	0.0105	0.0105	1.0046
8F	1.03	0.0064	0.0064	1.0092
7F	0.87	0.0056	0.0056	1.0081
6F	2.40	0.0051	0.0051	1.0086
5F	1.80	0.0046	0.0045	1.0091
4F	4.20	0.0032	0.0031	1.0108
3F	5.40	0.0012	0.0012	1.0152
2F	5.40	0.0001	0.0001	1.0171
1F	2.00	0.0000	0.0000	0.0000

本文还对结构各项内力的最大值进行分析。1) 轴力:最大压力出现在结构底部,而最大拉力出现在屋盖下方的柱子,一般框架结构的边柱容易出现拉力,拉力随着高度增加而上升。而最大拉力的绝对值远小于最大压力的绝对值,符合混凝土的拉压特性;2) 剪力:最大剪力值出现在变截面上及屋盖下方,分布特点与结构刚度有密切关系;3) 扭矩:最大扭矩出现在结构两侧办公区的梁上,且梁的长度较短;4) 弯矩:与剪力的分布情况类似,最大弯矩也出现在结构截面改变的地方。

2 模态分析

模态分析是结构动力特性分析的基础内容,根据结构特点在MIDAS/Gen软件提供的子空间迭代法和Lanzos法中选用前者作为模态分析方法。

2.1 固有频率

固有频率是描述一个结构动力特性极其重要的参数,根据子空间迭代法算得结构前600阶频率如图2。

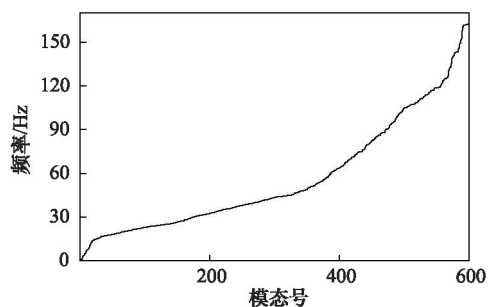


图2 结构固有频率

Fig. 2 Natural frequencies of structure

从图2可知,结构的基频为0.9252 Hz;结构的固有频率在前30阶分布较稀疏,斜率较大;在30阶至300阶模态区间内,曲线的斜率明显下降,说明模态分布比较集中;随后频率增长速度又开始提高,分布再次偏向稀疏。

2.2 参数及振型分析

为了进一步刻画结构的振动特性,各振型分解,并讨论其对振动的参与程度和贡献。因此引入参与系数的概念,其计算表达式^[10]为

$$\begin{aligned} \gamma_i &= \{\phi_i\}^T [M] \{D\} \\ A_i &= S_m \gamma_i / \omega_i^m \\ \{\gamma\}_i &= \omega_i^m A_i \{\phi\}_i \end{aligned}$$

式中, γ_i 为第 i 阶模态的振型参与系数, $\{\phi\}_i$ 为第 i 阶模态的

特征向量, $[M]$ 为质量矩阵, $\{D\}$ 表示激励方向的向量, A_i 为第 i 阶模态的模态系数, S_m 为第 i 阶模态的谱位移, ω_i^m 为第 i 阶模态的基本圆频率。

由图3可见, x 方向平动的基本周期为1.0053 s, 主振型为第2阶、第4阶和第19阶振型, y 方向平动基本周期为1.0808 s, 主振型为第1阶、第3阶和第6阶振型; z 方向扭转的基本周期为1.0053 s, 主振型为第1阶、第3阶和第17阶振型。结构各方向振型的分布与其整体刚度有关, 由于结构 x 向跨度为70.8 m, 大于 y 向跨度45.6 m, 因此结构振动在 y 方向的主振型频率要低于 x 方向主振型频率。另外, 结构的主要振型均集中在低阶模态中, 且振型参与系数随模态增加而减小, 与结构动力学中的一般规律相符。

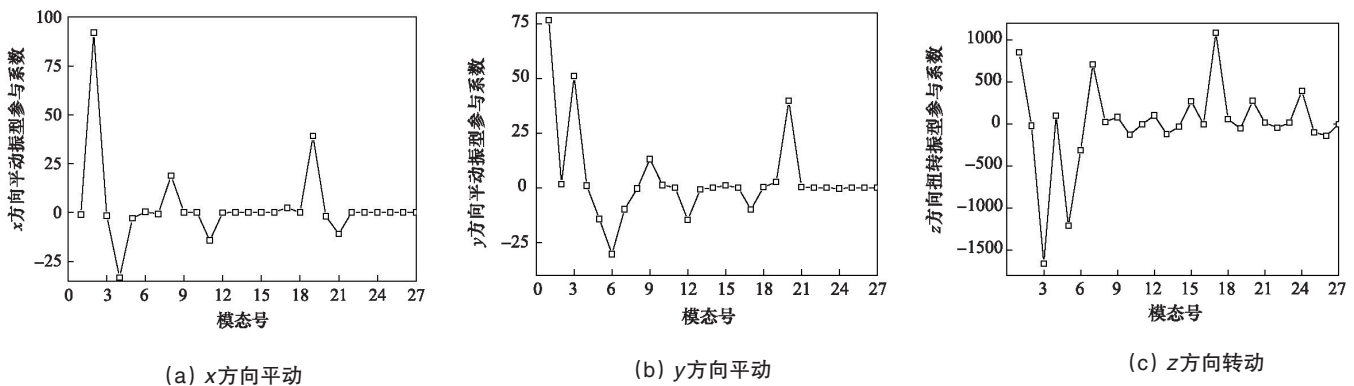


图3 各方向振型参与系数

Fig. 3 Modal participation factor of each direction

3 反应谱分析

反应谱法是指根据某一地区具有代表性的强震记录经过处理后所得地震系数曲线, 并以此为依据进行所谓的反应谱分析。反应谱理论的基本计算思路: 在对结构振型分解工作的基础上, 依照单自由度的结构反应谱计算各阶振型的变形、速度和加速度等细项并进行叠加, 从而实现问题的简化。

3.1 标准反应谱

根据相关设计资料, 结构设计地震组分为3组, 地震设防烈度为7(0.10 g), 场地类别为第II类, 地震影响为多遇地震, 设计特征周期 $T_g=0.45$ s, 阻尼比取0.05。按照《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)^[11]的相关规定, 可确定结构的反应谱如图4所示。

3.2 反应谱计算

1) 层剪重比。结构承受动荷载, 在进行结构抗震设计时, 必须对结构竖向刚度进行限制, 而其中的一个重要指标是进行抗震验算时的层剪重比。在进行结构竖向布置时, 应避免出现过大的外挑和收缩, 且结构刚度宜下大上小, 保证均匀的变化。图5为反应谱作用在 x 、 y 方向上, 结构产生的层剪重比, 结果表明, 在反应谱工况作用下的楼层剪力在底部

有最大值, 剪力随楼层的增加而减小; 在截面改变处结构刚度改变, 因此在5F和6F之间剪力有一个跳跃, 随后横截面变小, 剪重比变化趋于平缓; R_X 作用时的底部反力略大于 R_Y 作用时的底部反力, 二者相近, 说明在2个方向上的抗侧刚度相近。

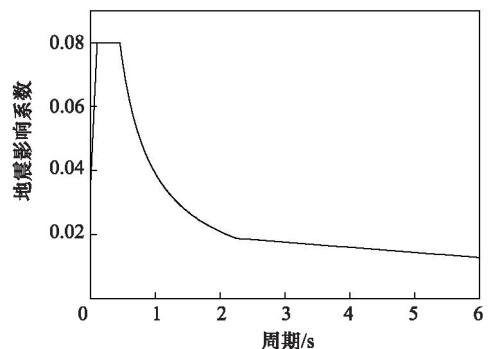


图4 设计反应谱

Fig. 4 Design response spectrum

2) 层位移。建筑在地震荷载作用下, 结构平面布置应减少扭转的影响, 必须严格限制其变形情况, 防止结构变形过

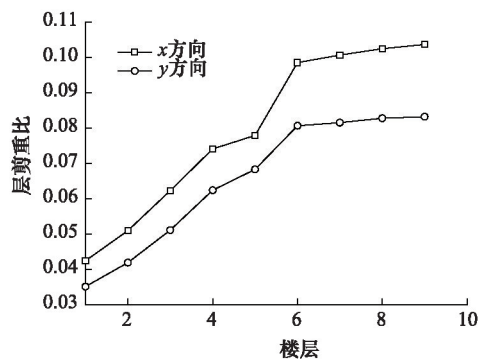


图5 层剪重比

Fig. 5 Layer shear weight ratio

大导致出现塑形较、失稳等情况,层位移正是基于这一问题进行考察的一个具有代表性的指标。

《JG J3—2010 高层建筑混凝土结构技术规程》第3.4.5条^[9]对结构在考虑偶然偏心影响的规定水平地震力作用下,楼层竖向构件最大的水平位移和层间位移做出了详细的规定。结构的层位移情况如图6所示,其结果符合规范要求,层位移随高度上升增加,在前5层增加较快,而在第6层以后,由于结构外形改变,导致刚度和惯性力变化,使得增加速度减缓。

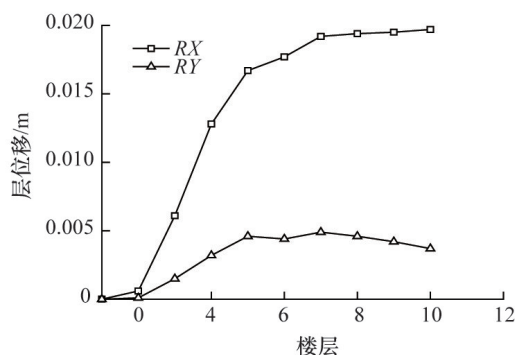


图6 RX和RY工况下层位移

Fig. 6 Layer displacement under RX and RY conditions

4 时程分析

时程分析法是一种直接动力学,选用逐步积分作为主要的数学手段处理数据。时程分析的一般步骤:1) 选取适当的地震波并进行处理从而使其数值化,地震波可以是实际的或人工模拟的地震波;2) 针对所要分析的实际结构,经有限元离散后建立耦合动力方程组;3) 将数值化的地震波带入方程组的荷载项,利用数值技术计算结构在每一时刻的动力响应。

4.1 地震波的选取

对结构进行时程分析的时候,正确选取地震波至关重要,不同的地震波所引起的动力响应往往相差很大。

在选取天然地震波的时候,通常可采用两种方法,一种

是按照结构所在场地的条件来选取,另一种是以反应谱的两个频率段为根据来选取。在进行设计时,可以选用类似场地上发生过的实测地震记录,并在其基础上进行一定的调整,用比例法对时程波的强度和频率进行缩放,以适应设计场地的要求。这种方法操作简单,但将问题过分简化。以反应谱的两个频率段为根据来选取地震波时,两个频率段是指 $[0.1, T_g]$ 和 $[T_1 - \Delta T_1, T_1 + \Delta T_2]$,其中 T_g 为设计特征周期,同样使在这一段计算出的结果与反应谱在该段的均值差值不超过10%^[12]。本文按照太平洋抗震研究中心的选波方法,根据场地条件和特征周期等参数最终选定 Elent-t、Taft-t 和 oakwh2 三条地震波并进行计算,不同的地震波其峰值,持时以及频谱特性都完全不同,其中 Elent-t 波如图7所示。

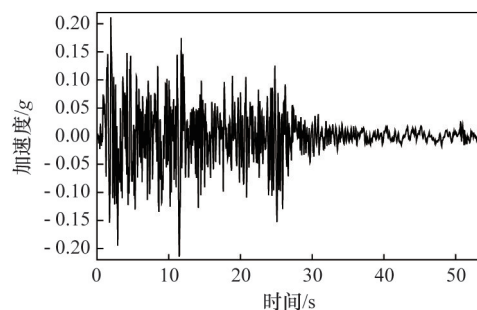


图7 Elent-t地震波

Fig. 7 Elent-t wave

4.2 楼层剪力

在3个不同工况中在楼层剪力的最大值如图8所示。在 Elent-t 波作用下结构最大底部剪力为5171.38 kN,在 Taft-t 波作用下结构最大底部剪力为6004.82 kN,在 oakwh2 波作用下结构最大底部剪力为6665.23 kN。进一步分析表明,在不同时程波作用下结构最大底部剪力出现时间差别很大,显示出持时在抗震分析中的重要性。

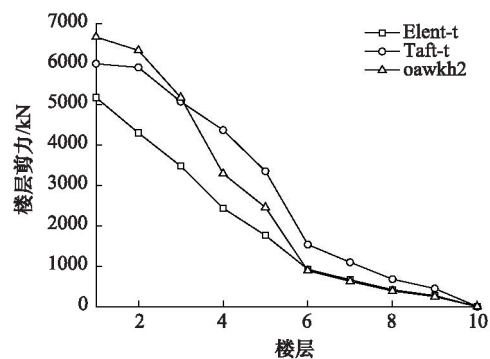


图8 时程分析下的楼层剪力

Fig. 8 Floor shear in time-history analysis

各计算结果均大于反应谱法分析对应所得结果的80%。在6层处斜率增大,变化趋势减缓,因为在此处楼层截面变小,刚度减小。

4.3 结构层位移

结构在3个时程波作用下的层位移情况如图9所示,结构最大位移出现在第6层。虽然峰值出现时间在各工况下均不同,但是总体变化趋势一致,体现了结构在地震作用下的动力特性,同时体现出正确选择地震波对时程分析的重要性,需要根据结构的设计场地及设计要求谨慎选择地震波。

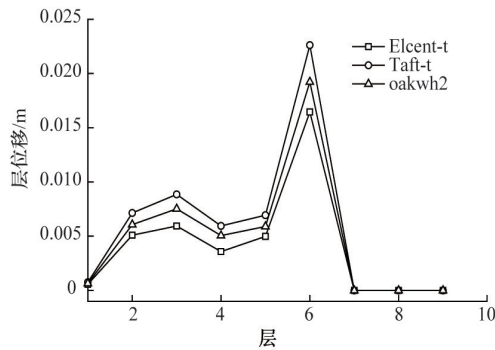


图9 时程分析下的层位移

Fig. 9 Layer displacement in time-history analysis

5 结果分析

5.1 最大位移反应

表2列出了结构在进行反应谱分析和时程分析之后,在3个激励方向上的最大位移及其对应的节点号。由表中数据可见,两种分析方法计算出的节点最大位移在数值相近,且最大值出现的位置相近,因此这些部位在地震作用下容易发生破坏。

5.2 底部剪力

表3列出了结构在不同时程波作用下的底部剪力及其平均值,同时给出反应谱分析时的底部剪力作为对比。对该结构进行弹性时程分析,每条时程曲线计算所得的结构底部剪力均大于振型分解反应谱法计算结果的65%,而且,3条时程曲线计算所得的结构底部剪力平均值也大于振型分解反应谱法计算结果的80%,都满足《建筑抗震设计规范》要求,同时规范也规定,当采用时程分析法进行多遇地震下的补充计算时,可取多条时程曲线计算结果的平均值与振型分解反应谱法计算结果的较大值,对于该结构底部剪力取值: $F_x=4921.70$ kN, $F_y=4398.71$ kN。

表2 反应谱分析和时程分析的最大位移及节点号

Table 2 Maximum displacement and node number of response spectrum analysis and time-history analysis

	类型	DX/m	节点号	DY/m	节点号	DZ/m	节点号
反应谱	RX	0.019773	797	0.000434	561	0.001755	551
	RY	0.009522	710	0.022509	710	0.00315	333
时程分析	Elent-t	0.013601	711	0.014172	716	-0.00238	333
	Taft-t	0.012328	797	0.010755	803	0.002017	333
	oakwh2	0.023418	718	0.02438	716	0.005599	340

注: DX 、 DY 、 DZ 分别为 x 、 y 、 z 方向的最大位移。

表3 反应谱分析和时程分析底部剪力情况

Table 3 Equivalent base shear of response spectrum analysis and time-history analysis

底部剪力	时程分析计算结果/kN				反应谱分析计算结果/kN	
	Elent-t	Taft-t	oakwh2	平均值	RX	RY
x	4024.88	4695.59	4484.76	4401.746	4921.70	55.87
y	3286.55	4398.71	4395.67	4026.977	55.87	4073.10

6 结论

以某文化活动中心为模型,对框架结构静动力学特性进行研究。

1) 静力特性分析表明,框架结构的边柱容易出现拉力,拉力随着高度增加而上升;最大剪力和弯矩出现在变截面上;最大扭矩出现在结构两侧的办公室区域的梁上,且梁的长度较短。

2) 模态分析表明,结构的基频为0.9252 Hz,各激励方向的主振型集中在结构前20阶模态;中间频率的模态分布较密集,频率的分布呈现出从稀疏到密集,又重新变得稀疏的变化过程;由于结构具有一定的对称性,因此有良好的整体性。

3) 反应谱分析表明,结构底部剪力为 $F_x=4921.70$ kN, $F_y=4073.10$ kN;在截面改变处结构刚度改变,因此在5F和6F之间剪力有一个突变; RX 作用时的底部反力略大于 RY 作用

时的底部反力,二者相近,说明在这两个方向上的抗侧刚度相近。

4) 时程分析表明,计算结果与反应谱分析结果吻合,最终设计的底部剪力取值为: $F_x=4921.70$ kN, $F_y=4398.71$ kN。

参考文献(References)

- [1] 朱镜清. 结构抗震分析原理[M]. 北京:地震出版社,2002.
Zhu Jingqing. Structural seismic analysis principle[M]. Beijing: Seismological Press, 2002.
- [2] 潘毅,季晨龙. 日本地震中钢筋混凝土框架结构震害及分析[J]. 工程抗震与加固,2012(4): 122-127.
Pan Yi, Ji Chenlong. Seismic damage analysis of the reinforced concrete frame structures in Japanese earthquake[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2012(4): 122-127.
- [3] 周云. 土木工程防灾减灾学[M]. 广州:华南理工大学出版社,2002.
Zhou Yun. Civil engineering disaster prevention and mitigation[M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2002.
- [4] 谢礼立,马玉宏. 现代抗震设计理论的发展过程[J]. 国际地震动态,2003,10(4): 1-8.
Xie Lili, Ma Yuhong. The development process of the modern earthquake resistant design theory[J]. Recent Developments in World Seismology, 2013, 10(4): 1-8.
- [5] 王段. 结构抗震反应谱的研究[D]. 青岛:青岛理工大学,2010,12.
Wang Duan. Study on response spectrum based on seismic design of structure[D]. Qingdao: Qingdao Technological University, 2010, 12.
- [6] 郭全全,张文芳,吴桂英. 中国国家大剧院结构地震分析[J]. 工程力学,2012,21(2): 10-15.
Guo Quanquan, Zhang Wenfang, Wu Guiying. Seismic analysis of gand national theatre of China[J]. Engineering Mechanics, 2012, 21(2): 10-15.
- [7] 王松涛,曹资. 现代抗震设计方法[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1997.
Wang Songtao, Cao Zi. Modern seismic design method[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997.
- [8] 北京迈达斯技术有限公司. MIDAS/Gen工程应用指南[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.
Beijing MIDAS Technology Co, Ltd. MIDAS/Gen guide for engineering applications[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [9] 中国建筑科学研究院. JG J3—2010 高层建筑混凝土结构技术规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
China Academy of Building Research. JG J3—2010 Technical specification for concrete structures of high-rise building[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [10] 克拉夫 R W,彭津 J. 结构动力学[M]. 王光远,译. 北京:科学出版社,1981.
Clough R W, Penzien J. Structural dynamics[M]. Wang Guangyuan, trans. Beijing: Science Press, 1981.
- [11] 中国建筑科学研究院. GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
China Academy of Building Research. GB 50011—2010 code for seismic design of buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [12] Ayala G, Ye Xianguo. Analytical evaluation of the structural seismic damage of reinforced concrete frames[C]//Proceedings of the 7th Canadian Conference on Earthquake Engineering. Montreal, Canada, 1995: 389-396.

(编辑 陈华姣)

·学术动态·



中国科学技术协会

第三届国土经济论坛探讨深呼吸大健康

2015年4月18日,由中国国土经济学会举办的“第三届中国国土经济论坛”在北京举行,150余名专家、学者参加论坛。

与会专家提出,要高度重视深呼吸小城的自然环境价值,更要深入挖掘深呼吸小城人文价值,打造人文小城、休闲小城,还要充分发挥深呼吸小城的生态优势,围绕“五个一”的建设打造中国深呼吸小城:“一城一节”,以整合文体旅游、农林生态、民族文化资源为平台,举办一年一度的“深呼吸旅游文化节”;“一城一园”,以凸显农业、湿地、体育、森林、动植物、中草药等为特色的生态优势,建一座影响深远的主题公园;“一城一品”,以借助农林牧渔、石卯贝竹、茶烟糖醋、丝绸布帛为特征的产业优势的特色旅游产品;“一城一馆”,以传承历史优秀文化、追思历史名人功绩、展示社会现代风貌、规划城市未来发展为内容的文化优势,建一座现代化的体验馆;“一城一图”,以发展观光休闲、健康养生、慢生活等为主的资源优势,设置规划符合全国深呼吸的旅游带、旅游集群地图。

与会专家呼吁,必须注重中国深呼吸小城建设的理论研究和战略规划。要推动旅游产业发展,特别是要深入研究中国气候旅游资源优化利用、空间优化格局、产业优化开发问题,以及避暑、避寒、避霾旅游等重要功能与国土空间的规划、规制、利用、保护、整治、改造以及市场发展中的经济因素、经济现象和经济规律问题研究,以促进国土气候旅游科学发展。使旅游经济发展注入更多绿色、低碳、环保、生态、休闲、度假、康疗、养生、养老、教育、会展等时代元素,为人类提供高品质健康生活环境。同时,还要努力发展深呼吸小城旅游产业,要善于引进项目、资金、团队与技术,从而更好地促进地方经济转型,提升城市品牌国内、国际的竞争力。

详见中国科协网<http://www.cast.org.cn/n35081/n35548/n38620/16345451.html>。