

纵横索网加劲的充气膜结构受力特性研究

申跃奎, 李 洋, 朱新雨, 李 星

(西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 首先对设有纵横索网加劲的充气膜结构进行不同内压下的缩尺模型试验研究, 得到不同内压下各索轴力变化规律。然后采用 ANSYS 有限元软件对试验模型进行数值模拟, 通过试验和数值结果的对比分析验证了有限元方法的正确性。接着对模型进行了参数分析, 研究了不同内压和矢跨比条件下对充气膜结构索力、膜力和变形的大小及分布规律的影响。结果表明: 对于纵横网加劲的充气膜结构横向索内力要大于纵向索内力。

关键词: 充气膜; 索网加劲; 数值模拟; 内压; 矢跨比

中图分类号: TU317⁺.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2022)04-0600-06

Research on characteristic of air-supported structure reinforced by longitudinal and transverse cable net

SHEN Yuekui, LI Yang, ZHU Xinyu, LI Xing

(School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: In the paper, the pneumatic membrane structures with longitudinal and transverse cable-net stiffening was studied under different internal pressures by means of a model test to obtain the axial forces and their variation laws. Then the finite element software ANSYS was used to numerically simulate the test model. The finite element method was verified by comparing test and numerical results. Finally, the parameters of internal pressure and vector-span ratio were changed to investigate the relationship between cable force, membrane force and deformation of the air supported structures and its internal pressure and vector-span ratio. The result showed that the transverse cable forces are larger than the longitudinal ones.

Key words: air-supported structure; cable net reinforced; numerical simulation; internal pressure; vector-to-span ratio

随着建筑膜材性能的不断发展和结构设计水平的不断提高, 膜结构因其绿色环保、空间造型丰富、抗震性能好等优点得到广泛应用。其中, 作为膜结构重要分支的充气膜结构是通过封闭的膜空间内施加一定的内压使其成为具有足够刚度抵御外荷载作用的结构^[1]。自 20 世纪 50 年代出现以来, 国内外学者进行了不少的研究。K Mitsui^[2]和 Kassem M^[3]等采用小杨氏模量曲面自平衡迭代法建模, 对充气膜结构进行了非线性找形研究。S. Lukasiewicz^[4]研究了圆柱形充气膜结构在不对称荷载作用下的稳定性和变形问题。C. E. Majoranal^[5]等通过充气膜的找形与应力分析并与试验结构的对比, 验证了其所采用非线性分析方法的可靠性。李方会等^[6-7]用非线性有限元软

件对膜结构形态、受荷等进行了全过程分析, 推到了膜结构找形的平衡方程。成新兴等^[8]采用形态分析法实现了膜结构的精确找形。白叶飞等^[9]通过现场实测进行了充气膜结构和传统体育馆的热环境差异。陈政等^[10]采用压差预置法, 结合节点平衡概念实现了索膜结构的精确找形。上述的这些研究成果大都结合未考虑钢索加劲的情况进行, 但是, 对于跨度较大的实际充气膜结构需要在膜结构外围设置索或索网的加劲。因此, 需要考虑索网与膜材的共同作用研究充气膜结构的受力性能和特点。

本文通过试验与数值参数分析相结合的方法研究纵横钢索网加劲的充气膜结构的受力性能。具体方法为先进行缩尺模型试验, 接着利用 Ansys

有限元对试验模型进行模拟,验证数值模拟方法的正确性,进而对模型进行内压、矢高的参数分析得到结构的受力变化规律。

1 缩尺模型试验

1.1 模型介绍

本文研究的充气膜结构原型尺寸为长 \times 宽 \times 高 $=46\times30\times10$ (m)。考虑实验室场地大小和测量结果的精确度,试验采用1/10比例模型。充气膜的基础平面尺寸如图1所示,模型基础底板为角钢加劲的3 mm厚钢板,固定膜材的四周为轻型卷边槽钢和等边角钢组合而成的组合截面。上部膜材选用0.8 mm厚的PVDF膜材,膜材的弹性模量为 1.9×10^9 Pa。加劲索选用时采用高宝中^[11]学位论文中膜结构试验中采用的方法,选用钢丝抗拉强度 1.47×10^9 Pa,弹性模量 $E=1.5\times10^{11}$ Pa的直径2 mm钢丝绳,横向3根于模型中间间距600 mm对称布置,纵向2根间距400 mm对称布置,最终的试验模型如图2所示。

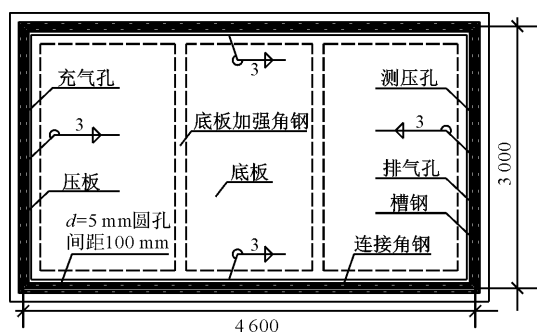


图1 试验模型基础平面图

Fig. 1 Foundation layout of the test model



图2 试验模型

Fig. 2 Experiment model

1.2 索力测量及试验过程

因为大跨度的充气膜结构主要内力由加劲的钢索来承担,所以对于索加劲的充气膜结构,测量的重要物理参数为索的内力。具体测量时,测点选取应考虑典型性和便于计算分析的原则^[12]。考虑到索材料的几何非线性,其内力不能通过测

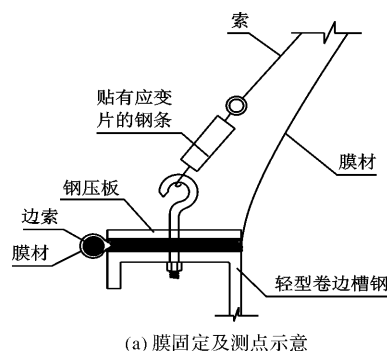
应变的方法得到,如图3所示,在纵横索的两端设置了连接钢片并粘贴应变片,以得到充气膜结构在不同内压下的索力。应变测量采用DH3816型号的64通道静态应力应变仪,取每根钢索两端应变的平均值为每根索的应变,根据应力-应变关系及连接钢片的面积求得各索内力值的大小。

具体的试验加载过程如下:

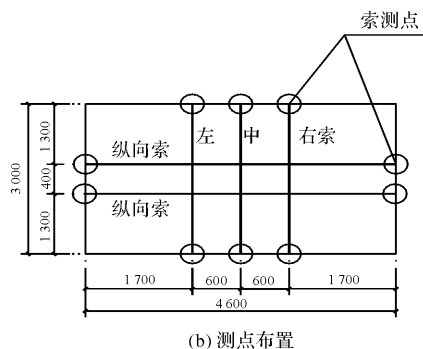
(1)试验前对结构进行试充气,停止充气后测量初始内压,1 h后再次测量膜内压。若内压降低值小于初始值的10%则表明结构气密性良好;

(2)充气膜内压清零,钢索连接片处应变值归零。对模型充气,当内压值达到100 Pa时维持30 min,待膜材和钢索之间的变形协调完成后测量记录应变数据和变形数据;

(3)继续对膜内充气,使内压值分别达到200 Pa、300 Pa、400 Pa、500 Pa和600 Pa并稳定到索膜之间变形协调后记录各索两端处的应变值。



(a) 膜固定及测点示意



(b) 测点布置

图3 纵横索网布置下的变形

Fig. 3 Deformation under the arrangement of vertical and horizontal cable nets

1.3 测试结果分析

试验得到的不同内压下的索力值如表1所示,对应的索力随内压变化的关系曲线如图4所示。由试验结果可见,随着内压的增加,各索力值均有相应的增大;但是每一个内压下纵向索的内力均小于横向索的内力;且中间横向索受力最大,大于对称布置的两根边横索索力。

表 1 不同内压下纵横索网的索力值(单位: N)

Tab. 1 Cable forces under different internal pressure/N

测点	左边索	中间索	右边索	上边索	下边索
100 Pa	13.13	14.55	13.43	9.4	9.07
200 Pa	40.1	42.46	40.39	29.59	30.92
300 Pa	70.31	74.22	70.79	55.72	55.11
400 Pa	106.73	110.72	105.22	87.36	87.91
500 Pa	142.91	147.61	143.01	124.31	123.92
600 Pa	178.09	182.33	177.55	166.34	164.36

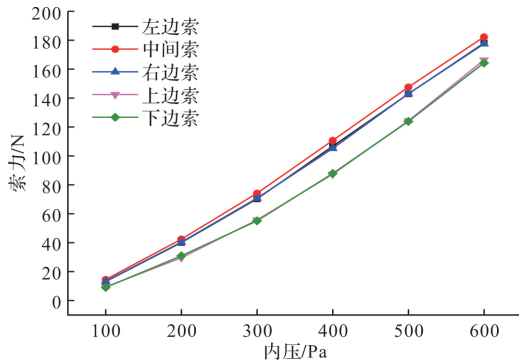


图 4 纵横索网布置下索力随内压变化曲线

Fig. 4 Curve of cable force with internal pressure

2 试验模型及数值模拟方法验证

2.1 有限元模型

有限元模拟采用通用有限元程序 ANSYS 进行,膜单元选用 Shell41 单元,厚度取为 0.8 mm,在膜材性能试验的基础上取弹性模量 $E_x = E_y = 1.9 \times 10^9$ Pa,泊松比取 $\lambda_x = \lambda_y = 0.3$ 。钢索选用 Link10 单元,索直径 $d = 2$ mm,弹性模量为 1.5×10^{11} Pa。因为膜结构需要找形分析,所以先采用小弹性模量法^[13]进行结构找形,待找形完成后形状和试验实测的形状一致后,恢复膜材及钢索真实的弹性模量。结构找形完成后的结果如图 5 所示。

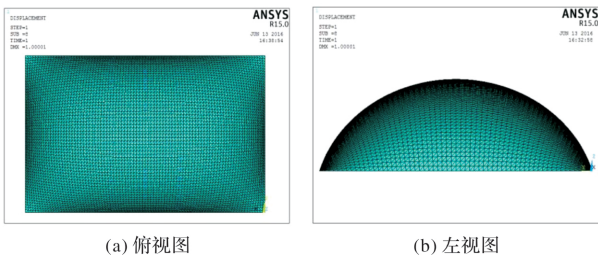


图 5 找形结果图

Fig. 5 Structure model after form finding

2.2 模拟结果

典型性地选取内压为 100 Pa 和 600 Pa 两种情况进行结构的位移和应力分析。如图 6 所示的膜材位移和应力云图,内压 100 Pa 时膜结构最大位移

为 4.3 mm,在内压 600 Pa 时膜结构最大位移为 21.4 mm。在内压 100 Pa 时最大位移出现在中间部位的两索之间;当内压增大到 600 Pa 时,因为四个角部缺少索网的约束,最大位移出现在无索布置的角部。

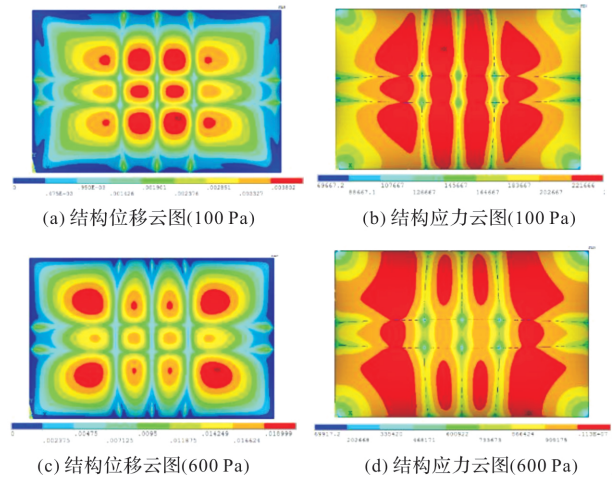


图 6 应力、位移结果云图

Fig. 6 Contour of stress and displacement results

结构计算的同时可以得到如表 2 所示的各内压下索力值。整理得到如图 7 所示的索力随内压变化曲线。分析结果可见,各索的索力值随着内压的增加增大。与模型试验的结果一致,横向索中的两个边索轴力小于中间索的轴力;纵向布置的索轴力要小于横向索的轴力,对称布置的两根横向索轴力几乎相等。

表 2 不同内压下索力模拟值(单位: N)

Tab. 2 Cable forces under different internal pressure/N

测点	左边索	中间索	右边索	上边索	下边索
100 Pa	12.46	13.34	12.29	8.59	8.57
200 Pa	40.03	42.39	39.64	29.63	29.58
300 Pa	76.65	80.26	76.03	59.76	59.7
400 Pa	119.56	123.52	118.67	98.44	98.41
500 Pa	166.54	169.8	165.39	145.02	145.08
600 Pa	216.12	217.83	214.71	198.78	198.97

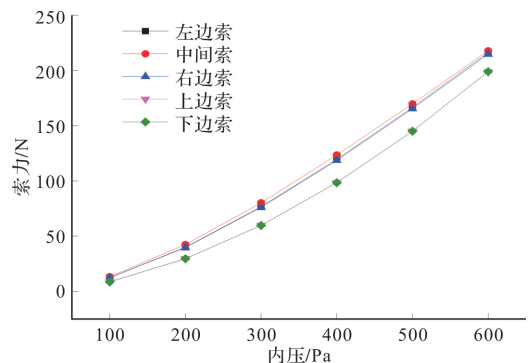


图 7 纵横索网索力随内压的变化曲线

Fig. 7 Variation curve of cable force with internal pressure

2.3 结果对比及模拟方法确认

缩尺模型试验和数值模拟得到的横向索力结果见表 3，同时表中对试验与数值模拟索力进行了误差分析。由表 3 可见，各横向索内力差值随膜内压力的增大逐渐增大。压力为 200 Pa 时，相对相差最小，吻合度较好。随着充气膜内压的升高，计算得到的索内力和试验得到的索内力误差有增大趋势。当膜内压力升到 600 Pa 时，各索应力值达到 17.7% 的差值。这种误差的原因包括：(1)模拟计算中假定了膜材和钢索的变形耦合，但试验

中随着内压的升高，结构形状变化，膜材和索之间产生滑动，索会产生一定的松弛，膜材承担的内力占比会有所提高；(2)索和膜结构加工过程中会有一些的初始缺陷，这些缺陷包括索长度的误差及膜材的焊接导致的膜材形状差异。这些缺陷会导致索力结果的误差。实际的充气膜结构使用过程中最大的内压不会超过 500 Pa，所以尽管表中两者结果偏差的最大值为 17.6%，但其误差在 20% 以内变化趋势一致，可以认为数值模拟方法可靠。

表 3 试验与模拟下各索力对比表(单位: N)

Tab. 3 The difference of each cable force under test and simulation/N

测点		100 Pa	200 Pa	300 Pa	400 Pa	500 Pa	600 Pa
模拟值	左边索	12.46	40.03	76.65	119.56	166.54	216.12
	中间索	13.34	42.39	80.26	123.52	169.8	217.83
	下边索	8.57	29.58	59.7	98.41	145.08	198.97
实验值	左边索	13.13	40.1	70.31	106.73	142.91	178.09
	中间索	14.55	42.46	74.22	110.72	147.61	182.33
	下边索	9.07	30.92	55.11	87.91	123.92	164.36
差值/%	左边索	-5.38	-0.17	8.27	10.73	14.19	17.60
	中间索	-9.07	-0.17	7.53	10.36	13.07	16.30
	下边索	-5.83	-4.53	7.69	10.67	14.59	17.39

整理得到试验和数值模拟的纵横索索力与内压的关系曲线如图 8 所示，可见两种方法得到的索力值变化趋势保持一致，均表现为横向索网中间索的索力值最大，其两边的两根索的索力值稍小，而纵向索内力值最小；各纵横索内力值大小均随内压的增大而增大，但并不呈线性增大，这也反映了索和膜结构的非线性特征。

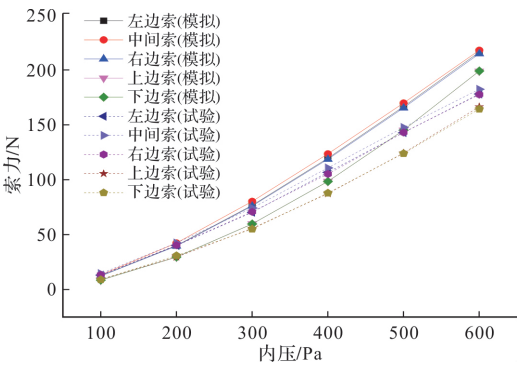


图 8 索力对比值曲线

Fig. 8 Curve of cable force comparison

3 参数分析

充气膜结构的内压和矢跨比为其重要的结构参数，它们影响着结构的内力大小和安全。这里以平面尺寸长×宽=46 m×30 m 的充气膜

为基本结构，采用数值模拟的方法研究内压、矢跨比的变化对充气膜结构的位移、应力等的影响规律。

对于尺寸长×宽×高=46 m×30 m×10 m 的充气膜结构，设内压分别为 100 Pa、200 Pa、300 Pa、400 Pa、500 Pa 和 600 Pa 六种情况，钢索直径为 20 mm 进行数值模拟，得到充气膜结构的矢量位移云图以及膜面 Mises 等效应力云图如图 9 所示，相应的索膜承担比例如表 4 所示，结构的最大应力、位移值如表 5 所示。

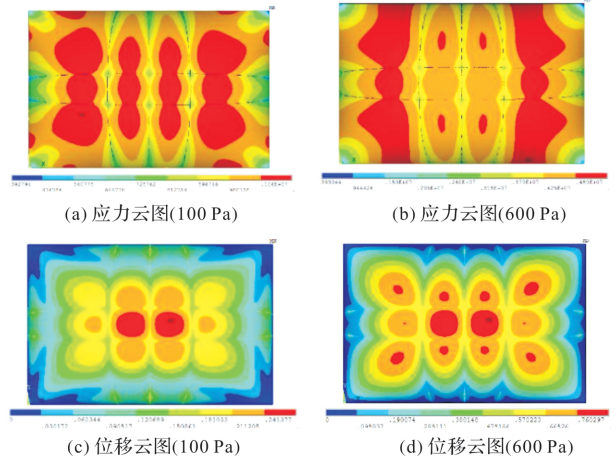


图 9 不同内压下结构应力、应变云图

Fig. 9 Structural stress and strain cloud diagrams under different internal pressures

这里的计算模拟结果和上述计算有一定的差异,原因在于为了符合实际结构分析模型中钢丝绳规格进行了10倍放大,但膜材还是采用了0.8 mm厚的膜材进行分析。通过研究应力云图可见,在内压较小时有索网区域和无索的四角最大应力相差不大;随着内压升高索的约束能力得以体现,索网区域内膜面应力降低,膜面较大应力出现在无索区域。由位移云图可见,最大位移始终发生在结构顶部的中心位置,随着内压的增大,索网布置区域外位移增长较快,甚至逐渐接近膜面顶部的最大位移。

表6 不同矢跨比下结构最大位移和最大应力

Tab. 6 The maximum displacement and maximum stress of the structure under different rise-span ratios

矢跨比	5/30	7/30	10/30	12/30	15/30
最大位移/m	0.664	0.524	0.571	0.628	0.756
最大应力/MPa	3.82	3.34	2.92	2.82	3.18

表7 不同矢跨比下结构索、膜分担合力值

Tab. 7 Values of resultant forces shared by structural cables and membranes under different rise-span ratios

矢跨比	5/30	7/30	10/30	12/30	15/30
索膜合力 F_1 /kN	39.14	31.41	26.10	24.42	23.73
索力 T /kN	18.80	13.93	10.59	9.53	9.08
膜力 N /kN	20.35	17.48	15.51	14.89	14.65
T/F_1 %	48.02	44.36	40.56	39.04	38.26
N/F_1 %	51.98	55.64	59.44	60.96	61.74

4 结论

本文对纵横向索网充气膜结构的试验研究和数值模拟,在验证了有限元方法准确性的基础上进行了内压和矢跨比的参数分析,并得出以下结论:

(1)在不同内压下横向索内力较纵向索内力值大,横向索承受了较多的内力。

(2)索网的内力随内压的增高而逐渐增大。当内压较小时膜材承担的内力占比较大,100 Pa内压时膜面承担了77.26%的内力;当内压升至600 Pa时膜面承担的内力占比下降到了51.51%。结构的最大位移始终出现在顶部中心处且随内压增大而逐渐增大。

(3)随着矢跨比的增大,充气膜结构膜材分担的比例增大而索网分担的比例减小。充气膜结构的最大位移和应力存在较优的矢跨比区间。矢跨比为7/30时结构位移最小;矢跨比为12/30时应力存在最小值。综合起来结构的最优矢跨比可取

为1/3。

参考文献 References

- [1] 周涵. 充气膜结构发展与研究现状的探讨[J]. 内蒙古科技与经济, 2019(17):14-18.
ZHOU Han. Discussion on the development and research status of inflatable membrane structure[J]. Inner Mongolia Science and Technology and Economy 2019(17):14-18.
- [2] MITSUI K, TOSAKA N. Form finding analysis of spatial structures by genetic algorithms IA[J]. Proceedings of Conceptual Design of Structures, 1998, 1: 315-322.
- [3] KASSEM M. Dynamics of Light weight Roofs[D]. London, Ontario, Canada: University of Western Ontario, 1990
- [4] LUKASIEWICZ S, BALAS L. Stability and large deformation behavior of nonsymmetrically loaded cylindrical membranes[J]. Journal of Structural Mechanics, 1986, 14(2):229-255
- [5] MAJORANA C E, SALOMONI V A. Large membrane roof analysis: nonlinear modeling of structures, connectors, and experimental evidences[J]. Journal of Architectural Engineering, 2010, 62(7/8):151-163.
- [6] 李方会, 沈世钊. 气承式膜结构找形与受荷分析[C]//第十届空间结构学术会议论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
LI Fanghui, SHEN Shizhao. Form-finding and load analysis of air-supported membrane structures [C]// Proceedings of the tenth academic conference on space structures. Beijing: China Building Materials Press, 2002
- [7] 李方会, 卫东, 沈世钊. 气承式膜结构的初始形态分析研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35(7): 869-872.
LI Fanghui, WEI Dong, SHEN Shizhao. Initial shape analysis of air-supported membrane structure[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2003, 35(7): 869-872.
- [8] 成新兴, 张超, 牛国平, 等. 大跨度充气膜结构形态分析方法研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2021, 53(3):344-349, 378.
CHENG Xinxing, ZHANG Chao, NIU Guoping, et al. Study on morphological analysis method of large span inflatable membrane structures [J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Techn. (Natural Science Edition) 2021, 53(3): 344-349, 378.
- [9] 白叶飞, 赵淋涛, 康晓龙, 等. 蒙中地区充气膜结构和传统结构体育馆热环境对比[J]. 西安建筑科技大学学报

- (自然科学版),2022,54(1):18-26.
- BAI Yefei, ZHAO Lintao, KANG Xiaolong, et al. Thermal environment comparison between inflatable membrane structure and traditional structure gymnasium in central Mongolia [J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition) 2022, 54(1):18-26.
- [10] 陈政,赵海涛,陈吉安. 充气式索膜结构的找形分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,2020,52(12):84-90.
- CHEN Zheng, ZHAO Haitao, CHEN Ji'an. Form-finding analysis of inflatable cable-membrane structure [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(12):84-90.
- [11] 高宝中. 带索圆柱形充气膜结构的受力特征分析[D]. 西安:西安建筑科技大学,2013.
- Gao Baozhong. Analysis of stress characteristics of cylindrical inflatable membrane structures with cables [D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech, 2013.
- [12] 周明华,王晓. 土木工程结构试验与检测[M]. 南京:东南大学出版社,2002:31-33.
- ZHOU Minghua, WANG Xiao. Civil engineering structure test and inspection[M]. Nanjing: Southeast University Press, 2002: 31-33.
- [13] 李群辉. 基于力密度法的充气膜结构找形与荷载分析研究[D]. 广州:华南理工大学,2010.
- LI Qunhui. Research on form-finding and load analysis of inflatable membrane structure based on force density method [D]. Guangzhou: South China University of Technology,2010.
- (编辑 沈 波)

(上接第 560 页)

- [9] GHASEM P, MAJID G, AMIN M. An experimental study on cyclic performance of the geometrically prismatic concrete-filled double skin steel tubular (CFDST) columns[J]. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 2021, 45: 629-638.
- [10] 韩伟,王文达. 圆锥形中空夹层钢管混凝土构件压弯剪受力性能研究[J]. 建筑钢结构进展, 2021, 23(12): 23-32.
- HAN Y, WANG W D. Study on the force performance of conical hollow sandwich steel pipe concrete components bending shear [J/OL]. Progress in Steel Building Structures; 2021, 23(12): 23-32,64.
- [11] ASLANI F, BRIAN U, ZHONG T. Behaviour and design of composite columns incorporating compact high-strength steel plates[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 107(4): 94-110.
- [12] 庄茁,由小川,廖剑晖,等. 基于 ABAQUS 的有限元分析和应用[M]. 北京:清华大学出版社,2009.
- ZHUANG Q, YOU X C, LIAO J H, et al. Finite element analysis and application based on ABAQUS[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009.
- [13] 李硕. 钢管混凝土柱在弯剪扭荷载下的受力性能研究[D]. 重庆:重庆大学,2017.
- LI S. Study on mechanical behavior of concrete filled steel tubular columns subjected to bending, shearing and torsion [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.
- [14] 查晓雄. 空心 and 实心钢管混凝土结构[M]. 北京:科学出版社,2011.
- ZHA X X. Hollow and solid steel pipe concrete structure[M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [15] HAN L H. Concrete filled steel tubular structures—Theory and practice[M]. 3rd ed. Beijing: China Science Press, 2016.
- (编辑 沈 波)