

玻璃钢套筒基础切向冻胀力消减作用试验研究

袁 俊^{1,2}, 于皓琳³, 管顺清², 王学明², 严福章⁴

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司, 陕西 西安 710075;

3. 哈尔滨工业大学土木工程学院, 结构工程灾变与控制教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150090;

4. 国网北京经济技术研究院, 北京 102209)

摘要: 通过 1:10 比例的直柱基础模型试验, 对比测定了不同地温和不同含水率的粉质黏土中普通基础与玻璃钢套筒基础的单位切向冻胀力, 研究了玻璃钢套筒在不同粉质黏土地质环境中对切向冻胀力的消减作用效率。研究表明, 采用玻璃钢套筒后对冻土地基冻拔作用有明显的削弱, 玻璃钢套筒切向冻胀力消减系数为 0.70~0.83, 切向冻胀力消减效率为 17.24%~29.70%。土体含水率为 20%、25%、30% 时, 切向冻胀力消减系数平均值分别为 0.73、0.74、0.79, 切向冻胀力消减效率平均值分别为 27.03%、25.60%、20.51%。

关键词: 冻土; 玻璃钢; 基础工程; 单位切向冻胀力; 消减系数

中图分类号: TU445

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2016)02-0202-05

Study on reduction of tangential frost-heave force on foundation with fiberglass sleeve

YUAN Jun^{1,2}, YU Haolin³, GUAN Shunqing², WANG Xueming², YAN Fuzhang⁴

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. Northwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Xi'an 710075, China;

3. Key Lab of Structures Dynamic Behavior and Control of the Ministry of Education, School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;

4. State Power Economic Research Institute, Beijing 102209, China)

Abstract: Model tests on column foundation were conducted with a scale of 1:10 to determine the unit tangential frost-heave force of column foundation with fiberglass sleeve at different ground temperature and water content in frozen silty clay. The reduction effect caused by fiberglass sleeve on tangential frost-heave force under different frozen geological conditions were studied as well. Results indicate that the reduction coefficient of tangential frost-heave ranges from 0.70 to 0.83 compared to column foundation without fiberglass sleeve, and the relative reduction efficiency focus on 17.24% ~ 29.70% depending on the geological conditions. Concretely, reduction coefficients are 0.73, 0.74 and 0.79, respectively, with the water contents of 27.03%, 25.06% and 20.51%.

Key words: frozen soil; fiberglass; foundation engineering; unit tangential frost-heave forces; reduction coefficient

随着国家西部大开发战略的实施和西电东送建设的推进, 输电线路在多年冻土区和深季节冻土区的工程建设规模和电压等级逐步提高, 青藏交直流联网工程、青海玉树联网工程等穿越冻土区的高电压等级线路在近年相继开展建设, 各类工程冻害成为工程建设中必须妥善处理的问题。

切向冻胀力是造成基础冻拔破坏的主要原因, 俄罗斯西伯利亚 110~500 kV 输电线路, 中国 500 kV 伊冯线、500 kV 冯大线、220 kV 海拉尔-牙克石线路都曾发生过严重的基础冻拔破坏^[1~3]。采用物理

化学法防冻胀措施中, 涂刷沥青、工业凡士林、渣油等憎水材料可以消减高达 95% 切向冻胀力^[4~5], 但经过多次冻融循环后, 其消减作用逐渐递减。另外由于地基土反复冻胀活动, 这些憎水材料会不断向周围土体挤压渗透, 沥青等材料的有效作用时间可能低于输电线路的使用时间^[6~7]。当憎水材料防冻胀效果严重降低后, 再次开挖地基重新涂刷的难度较大。玻璃钢是一种表面光滑平顺的憎水材料, 在钢筋混凝土基础的表面增加玻璃钢套筒, 施工时可作为混凝土浇筑模板使用, 施工后留在冻土地基

收稿日期: 2015-07-28 修改稿日期: 2016-04-07

基金项目: 冻土工程国家重点实验室基金(SKLFSE201312), 国家电网公司科技部计划项目(HQ-2013-S-EX-018), 西北电力设计院科技项目(XB1-TM04-2013)。

作者简介: 袁俊(1983-), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事输电线路杆塔与基础研究。Email: j.yuan@hotmail.com

中能消减切向冻胀力, 由于其憎水材性稳定, 在输电线路的使用期内可长期发挥消减作用。

青藏交直流联网工程、青海玉树联网工程、伊犁-库车输电线路工程中大量使用了玻璃钢套筒基础, 并取得了良好的效果, 但目前还缺乏玻璃钢材料对切向冻胀力消减作用的研究, 基础设计中切向冻胀力消减作用计算系数尚不明确。因此, 笔者通过 1:10 比例的直柱基础模型试验, 对比测定了不同地温和不同含水率的粉质黏土中普通基础与玻璃钢套筒基础的单位切向冻胀力, 研究了玻璃钢套筒在不同粉质黏土地质环境中对切向冻胀力的消减作用效率, 得到了玻璃钢套筒的消减作用系数。



图 1 玻璃钢套筒

图 2 玻璃钢套筒基础

Fig.1Fiberglass sleeve

Fig.2 Foundation with fiberglass sleeve

1 玻璃钢套筒切向冻胀力消减原理

切向冻胀力产生的两个基本条件: 一是土体自身的冻胀, 另一个是基础对土体冻胀的约束。土体自身的冻胀与设计采用的基础型式无关, 而基础对土体冻胀的约束与基础型式紧密相关。

现场施工的混凝土基础表面粗糙度较大, 基础与土体之间存在机械咬合作用, 将会加大基础对土体的约束。当土体温度降低时, 上部土层开始冻结, 冻结后土体的强度增加, 与基础之间机械咬合传递的力也逐渐加大, 因此切向冻胀力会随地温的降低逐渐增大^[8-10]。

在切向冻胀力的作用下, 基础将产生向上的位移的趋势。但基础发生位移, 首先需要克服基础本身的重力, 其次需要克服下部未冻结土层对基础的摩擦和咬合力。

因此, 当冻胀土层对基础的咬合力(冻胀力)小于下部未冻胀土层对基础的咬合力(锚固力)时, 基础处于稳定状态; 反之则基础处于失稳状态。

当基础表面增加玻璃钢套筒时, 接触界面发生变化, 土与混凝土表面的胶结变为土与玻璃钢表面

的胶结。由于玻璃钢表面要比现浇混凝土表面光滑, 机械咬合作用减弱。另外, 玻璃钢的憎水材性会减小水与其表面的接触面积, 降低冰与玻璃钢表面的粘附力, 玻璃钢套筒与土体之间形成的冻结强度会低于无玻璃钢套筒时的强度。因此基础增加玻璃钢套筒后能消除基础与土体潜在的机械咬合力、减小冻结强度, 土体作用于基础的切向冻胀力将会得到削弱, 从而提高基础的抗拔稳定性。

2 基础切向冻胀力模型试验

2.1 土样物理性质指标

在典型场地粉质黏土地基中完成取样, 配制含水率为 20%、25%、30%的土体样本, 其物理、力学指标见表 1。

表 1 试验土体的物理性质指标

Tab.1 Physical properties of soil used in model test

序号	含水率 $\omega/\%$	密度 $/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	干密度 $/\rho_d$	孔隙比 $/e$	孔隙度 $/n$	饱和度 $/S_r$
1	20	1.81	1.52	0.86	47.2	61.56
2	25	1.86	1.51	0.85	46.7	77.18
3	30	1.96	1.49	0.88	48.7	87.34
序号	液限 $/\%$	塑限 $/\%$	液性指数 I_p	塑性指数 I_L	渗透参数 $/\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$	
1	34.61	19.19	15.45	-0.04	2.54×10^{-5}	
2	33.85	20.04	13.51	0.23	2.16×10^{-5}	
3	35.76	21.03	14.73	0.42	3.65×10^{-5}	

2.2 土体冻胀性试验

将含水率为 20%、25%、30%的土样, 制成高 12cm, 直径 10cm 的直柱形土样进行冻胀率试验。试验装置如图 3 所示, 位移计安放在冻胀试验装置顶部监测冻胀量, 根据试验条件的不同将十个热电偶分别插入试样和试样的侧表面上。试样筒周围包裹 5 cm 厚的保温材料, 同时调节保温材料的形状和包裹方式以保证侧向冻结的正常合理的进行。恒温箱的底板温度设为 -1°C , 四周环境温度设为 5°C , 顶板温度设为 -10°C 。三组样本的冻胀性试验结果如表 2 所示。

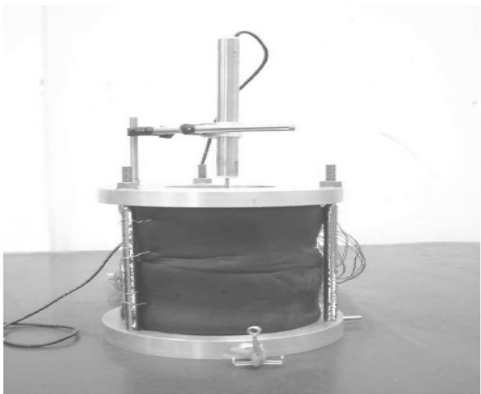


图 3 冻胀性试验装置

Fig.3 Testing apparatus for frost-heave

表 2 试验用土的冻胀率试验结果
Tab.2 Frost-heave test results of soil used in model test

序号	含水率/%	密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	冻结深度/cm	冻胀量/mm	冻胀率/%
1	20.0	2.20	12.00	3.25	2.71
2	25.0	2.30	12.00	4.18	3.48
3	30.0	2.25	12.00	4.43	3.69

2.3 基础模型制备

基础模型按照 1:10 比例尺进行制作模拟开挖基础和掏挖基础立柱部分,直径为 10.25 cm,高 60 cm. 采用水:水泥:砂:石=0.47:1:1.342:3.129 的配合比配置 C30 混凝土,拌制混凝土时加入少量早强剂. 将拌合好的混凝土分别浇筑在模具中分层振捣密实并进行养护,对无玻璃钢套筒的基础模型,脱模后适当进行凿毛,模拟实际工程中基础表面的实际情况.



图 4 制备的基础模型
Fig.4 Prepared model of column foundation

2.4 切向冻胀力试验装置

切向冻胀力试验装置如图 5 和图 6 所示,中部圆形容器直径 120 cm,高 50 cm;上方为 130 cm×130 cm 正方形钢质顶板;下方为受力底座.

土体和基础模型放置在中部圆形容器,厚度满足刚度要求,能有效约束土体冻胀过程中向外的侧向变形模拟自然环境下的土体冻胀. 容器底部通过放置流通冷媒的制冷管圈来模拟土体下部永冻层的作用,上方顶板作为安放轴力计的支座.

将制作好的混凝土基础放在实验装置装土容器底部的垫板上,往圆桶型装土容器内分层装入特定含水率的土,再分层进行压实. 在土体表面放置位移计测量土体冻胀量. 基础顶面放置轴力计,并固定在顶板上,加力抵紧. 位移计、轴力计和热电偶连接入数采仪,采集数据的时间间隔设为 5min,实验过程中按时间自动采集并记录相关的位移、轴力、温度数据.

本试验所采用的冻融循环试验箱为 Xutemp 的 XT5405B 系列土工冻胀试验箱(图 7),并采用 Fxg-±25mm 差动变压器式位移传感器、振弦式轴力计、Datataker-DT615 数字采集仪.

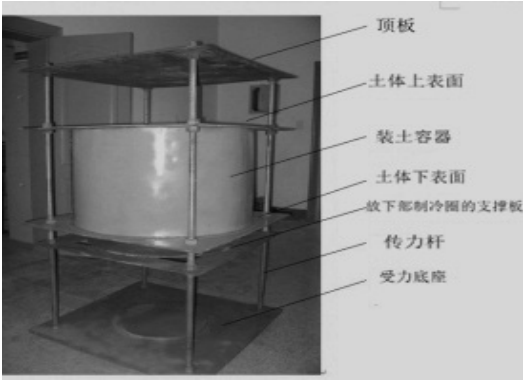
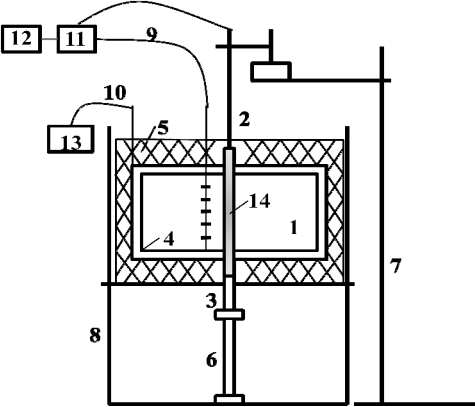


图 5 切向冻胀力试验装置
Fig.5Tangential frost-heave force testing apparatus



1—土样;2—位移计;3—测力计;4—制冷管盘;5—保温层;6—千斤顶;7—钢支架;8—钢架;9—温度传感器;10—制冷管;11—数据采集仪;12—计算机;13—制冷机图;14—基础模型

图 6 模型试验示意图
Fig.6 Sketch of scale test

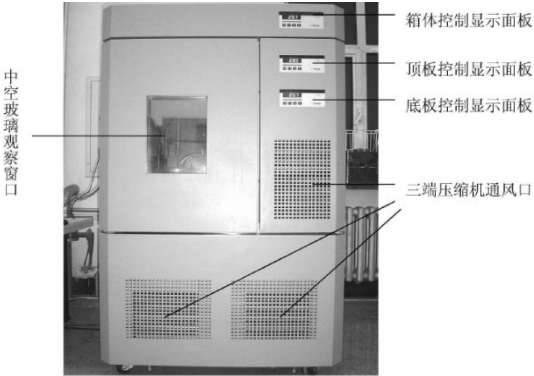


图 7 冻融循环试验箱
Fig.7 Freeze-thaw cycle test device

3 试验结果与分析

3.1 试验工况

本次试验完成了地温为 0℃~ -10℃、含水率为 20%、25%和 30%,有玻璃钢套筒和无玻璃钢套筒的基础模型的单位切向冻胀力对比试验.

3.2 试验结果

将试验所得的无玻璃钢套筒基础和有玻璃钢套筒基础的单位面积切向冻胀力数值整理如图 8 所示. 可以看出,增加玻璃钢套筒后,单位面积切向

冻胀力数值有较大的降低.同时单位面积切向冻胀力随着温度的降低而逐渐增加,在 $0\sim-2^{\circ}\text{C}$ 左右增加速度最快,低于 -5°C 左右增长趋于平缓.在 -5°C 时的切向冻胀力值约为最大值的 $60\%\sim 75\%$.

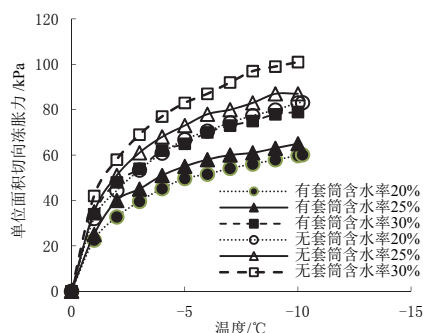


图8 无玻璃钢套筒和有玻璃钢套筒基础的单位面积切向冻胀力

Fig.8 Unit tangential frost-heave force on column foundation with and without fiberglass sleeve

为分析玻璃钢套筒对单位面积切向冻胀力的消减情况,将切向冻胀力消减系数定义为“玻璃钢套筒基础切向冻胀力/无玻璃钢套筒基础切向冻胀力”,将消减效率定义为“(无玻璃钢套筒基础切向冻胀力-玻璃钢套筒基础切向冻胀力)/无玻璃钢套筒基础切向冻胀力”,其结果如图9和图10所示.

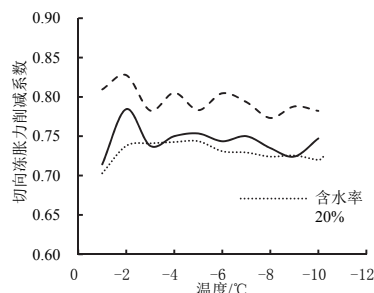


图9 玻璃钢套筒切向冻胀力消减系数

Fig.9 Tangential frost-heave force reduction coefficient of fiberglass sleeve

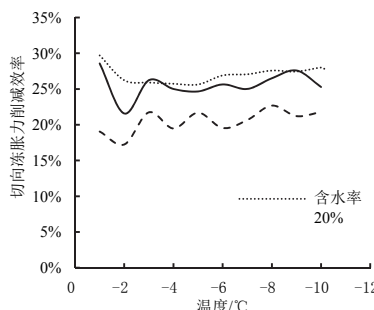


图10 玻璃钢套筒切向冻胀力消减效率

Fig.10 Tangential frost-heave force reduction efficiency of fiberglass sleeve

可以看出,玻璃钢套筒切向冻胀力消减系数在 $0.70\sim 0.83$ 之间,切向冻胀力消减效率在 $17.24\%\sim 29.70\%$ 之间.含水率为 20% 、 25% 、 30% 时,切向冻胀力消减系数平均值分别为 0.73 、 0.74 、

0.79 ,切向冻胀力消减效率平均值分别为 27.03% 、 25.60% 、 20.51% .

玻璃钢套筒切向冻胀力消减系数随土体含水率的增加而减小,切向冻胀力消减效率随土体含水率的增加而降低.图9和图10中,切向冻胀力消减系数和消减效率随温度的降低而随机变化,但基本以平均值为中轴线上波动,总体上消减系数随温度降低呈减小趋势,消减效率随温度降低呈增大趋势.

由于含水率较高和地温较低时,切向冻胀力绝对值较大,在增加玻璃钢套筒后,切向冻胀力折减的绝对差值也较大,因此在含水率较高和地温较低的土体中采用玻璃钢模板的切向冻胀力的消减系数较小,对切向冻胀力消减的绝对幅值较大.但其消减效率还与土体类别和组成构造等因素相关,不一定随含水率或地温因素呈单一的变化规律.

4 结论

通过 $1:10$ 比例的直柱基础模型试验,对比测定了不同地温和不同含水率的粉质黏土中普通基础与玻璃钢套筒基础的单位切向冻胀力,研究了玻璃钢套筒在不同粉质黏土地质环境中对切向冻胀力的消减作用效率和消减作用系数,得出以下主要结论:

(1) 采用玻璃钢套筒后,单位面积切向冻胀力数值有明显的降低,对冻土地基冻拔作用有明显的削弱.玻璃钢套筒切向冻胀力消减系数为 $0.70\sim 0.83$,切向冻胀力消减效率为 $17.24\%\sim 29.70\%$.

(2) 含水率为 20% 、 25% 、 30% 时,切向冻胀力消减系数平均值分别为 0.73 、 0.74 、 0.79 ,切向冻胀力消减效率平均值分别为 27.03% 、 25.60% 、 20.51% .玻璃钢套筒切向冻胀力消减系数随土体含水率的增加而减小,切向冻胀力消减效率随土体含水率的增加而降低.切向冻胀力消减系数和消减效率随温度的降低而随机波动,但总体上消减系数随温度降低呈减小趋势,消减效率随温度降低呈增大趋势.

(3) 单位面积切向冻胀力随着温度的降低而逐渐增加,在 $0\sim-2^{\circ}\text{C}$ 左右增加速度最快,低于 -5°C 左右增长趋于平缓.在 -5°C 时的切向冻胀力值约为最大值的 $60\%\sim 75\%$.

参考文献 References

- [1] LYAZGIN A L, LYASHENKO V S, OSTRO BOROD OVSV, et al. Experience in the prevention of frost heave of pile foundations of transmission towers under northern conditions[J]. Power Technology and Engineering, 2004, 38(2):124-126.

- [2] LYAZGIN A L. The problem of power transmission lines damage at the North of Tyumen province and the means of its decision[C]//The second conference of geocryologists of Russia. Moscow: 2001, 6-8.
- [3] 刘厚健, 程东幸, 余祁浩, 等. 高海拔输电线路的冻土工程问题及对策研究[J]. 工程勘察, 2000, 9(4): 32-36.
LIU Houjian, CHENG Dongxing, YU Qihao, et al. Study on permafrost engineering problems and engineering countermeasure of transmission line[J]. Journal of Geotechnical Investigation & Surveying, 2000, 9(4): 32-36.
- [4] 童长江, 王雅卿, 刘景寿. 涂料法防冻胀的效果[C]//青藏冻土研究论文集, 中国科学院兰州冰川冻土研究所. 北京: 科学出版社, 1983, 139-142.
TONG Changjiang, WANG Yaqing, LIU Jingshou. Coating effect of antifrost heave[C] // The proceedings of Tibet permafrost research, Lanzhou Institute of Glaciology and Cryopedology, Chinese Academy of Sciences, Beijing: Science Press, 1983, 139-142.
- [5] LINELL KA, LOBACZEF. Design and construction of foundations in areas of deep seasonal frost and permafrost[R]. U.S.Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory Special Report, 1980.80-134.
- [6] 铁道科学院金化所, 天津师范学院化学系. 表面活性剂在铁路路基化学防冻胀中的应用研究. 铁道科学技术工务工程分册(第四册)[R]. 铁道部科学技术情报研究所, 1978.
China Academy of Railway Sciences, Tianjin normal university. Application of surfactants to antifrost heave in the railway roadbed. Railway science and technology of engineering and maintenance(Volume 4)[R]. Institute of Scientific and Technical Information of the Ministry of Railways, 1978.
- [7] BIGGAR KW, SEGOD. C. Field pile load tests in saline permafrost. I. Test procedures and results[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1993, 30(1): 34-45.
- [8] А.М. Пчелинцев. Физико-химические Способы изменения сил примерзания грунта к фундаментам [C]//2d International Conference on Permafrost, Yakutsk, Siberia: National Academy of Sciences, 1973, 688-692.
- [9] PENNER E, GOLD L W. Transfer of heavy forces by adfreezing to columns and foundationwalls in frost-susceptible soils[J], Canadian Geotechnical Journal, 1971, 8(4): 514-526.
- [10] KINOSHITA S, ONO T. Heaving force of frozen ground. I. mainly on the results of field researches: low temperature science laboratory [J]. Teron Kagaka Serial A, 1963(21): 117-139.

(编辑 沈波)

(上接第201页)

- minium alloy bars loaded by axial compressive force[J]. Industrial Construction, 2001, 30(1): 52-54.
- [6] 金鑫. 单轴对称截面铝合金压杆极限承载力研究[D]. 上海: 同济大学, 2005.
JIN Xin. Study on resistance of uniaxial symmetrical aluminum alloy compression members[D]. Shanghai: Tongji University, 2005.
- [7] 石永久, 程明, 王元清. 铝合金轴心受压构件的整体稳定性研究[J]. 山东建筑工程学院学报, 2005, 20(5): 11-16.
SHI Yongjiu, CHENG Ming, WANG Yuanqing. Research of stability of aluminum alloy axial compression members[J]. Journal of Shandong University of Architecture and Engineering, 2005, 20(5): 11-16.
- [8] 吴芸, 张其林. 纵向焊接铝合金柱设计方法研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(4): 21-26.
WU Yun, ZHANG Qilin. A study on the design method for aluminum columns with longitudinal welds[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(4): 21-26.
- [9] 郭小农, 沈祖炎, 李元齐, 等. 铝合金轴心受压构件理论和试验研究[J]. 建筑结构学报, 2007, 28(6): 118-127.
GUO Xiaonong, SHEN Zhuyan, LI Yuanqi, et al. Theoretical and experimental research on aluminum alloy members under axial compression [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(6): 118-127.
- [10] 翟希梅, 吴海, 王誉瑾, 等. 铝合金轴心受压构件的稳定性研究与数值模拟[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(12): 1-6.
- ZAI Ximei, WU Hai, WANG Yujin, et al. Stability research and numerical simulation of high strength aluminum alloy column in compression [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011, 43(12): 1-6.
- [11] 谭海涛, 张伟, 汤雪锋, 等. 工字型铝合金轴心受压构件中美设计规范对比[J]. 四川建筑科学研究, 2014, 40(1): 61-64.
TAN Jintao, ZHANG Wei, TANG Xuefeng, et al. Comparison between Chinese code and American code of aluminum alloy member under axially load [J]. Sichuan Building Science, 2014, 40(1): 61-64.
- [12] 铝合金结构设计规范: GB50429-2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
Code for design of aluminium structures: GB50429-2007, [S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.
- [13] 金属材料 室温拉伸试验方法: GB/T 228—2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
Metallic materials-Tensile testing at ambient temperature GB/T 228-2002, [S]. Beijing: Standards Press of China, 2002.
- [14] 郭小农, 沈祖炎, 李元齐, 等. 国产结构用铝合金材料本构关系及物理力学性能研究[J]. 建筑结构学报, 2007, 28(6): 110-117.
GUO Xiaonong, SHEN Zhuyan, LI Yuanqi, et al. Stress strain relationship and physical mechanical properties of domestic structural aluminum [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(6): 110-117.

(编辑 吴海西)